第1章 目 的

本手册提供了一些工程方法的文件，以便为聚合物基复合材料建立以统计为基础的标准化材料性能数据。另外还对一些有关复合材料体系提供了数据汇总，它们现有的数据可满足MIL-HDBK-17具体出版要求。此外，还总结了与复合材料有关的支持工程、制造技术以及共同的实践问题。

1.1 引言

人们普遍认识到，对于有效的工程研制过程而言，以统计为基础的标准化材料性能数据是必不可少的；凡是材料供应商、工程用户和系统的最终用户，同样都需要这样的数据。由于材料的这些固有性能与具体的应用无关，所以，建立数据的方法及材料的性能数据是适用于各种工业应用情况的；它们也构成了重要的技术基础，以建立为采购、认证部门*所认可、并以统计为基础的设计值。如图 1.1 所示的复合材料固有性能的评估问题，是本手册 MIL-HDBK-17 关注的重点。

虽然，从历史上看，本手册的主要来源与内容取自航宇飞行关键结构的经验，无论是军用或民用的所有运输行业（航宇、地面、铁道与航海），以及其他的应用情况，包括一般的工业产品，都将发现这本手册是很有用的。目前，将其他更多应用情况的信息编入本手册的工作正在进行中。

这个手册的发展与维护，是美国国防部（DOD）和美国联邦航空局（FAA）的一项联合计划项目。此处所包括的数据，或在 MIL-HDBK-17 协调组会议的备忘录中以批准的条款**出现的内容，虽然不是强制性的，但是，用其确定结构设计值，对 FAA 和对 DOD 的所有部门都是认可的。但要注意，对具体的应用情况，把本手册的数据直接引用为设计值的方法，一般还需要另经采购部门或取证部门的批准。

1.2 目标

MIL-HDBK-17的首要目标是，将对建立聚合物基复合材料工程数据的方法标准化，这涉及到表征试验、数据处理以及性能数据的报告。为了支持这个目标，MIL-HDBK-17收入了一些复合材料体系的性能，这些体系已有满足具体要求的数据。MIL-HDBK-17对其他有关复合材料的技术专题，提供了经过挑选的指南，包括典型聚合物基复合材料的选材、材料规范、材料工艺、设计、分析、质量控制以及修理。因此，MIL-HDBK-17分三卷出版（译者注：现版本为五卷），内容如下：

- 第一卷：给出适合于广泛需求的材料表征、数据建立和方法指南方面的文件，以及要将数据收入本手册所需满足的具体要求。大多数采购与取证部门更关心（而且有时要求）能用于关键结构的复合材料体系，它们或者是按照第一卷的指南进行表征，或者是选自收入在第二卷中的材料体系。

---

* 采购部门的一个例子是，美国国防部(DOD)的一个部门。取证部门的一个例子是美国联邦航空局的一个办公室。

** 被认可为 MIL-HDBK-17 协调委员会批准的数据。

- 第二卷：提供一个可能的设计数据库。所收入的各材料系统性能汇总中，提供的数据满足MIL-HDBK-17的任何数据等级标准。
- 第三卷：有关与聚合物基复合材料的其他多学科的技术指南。

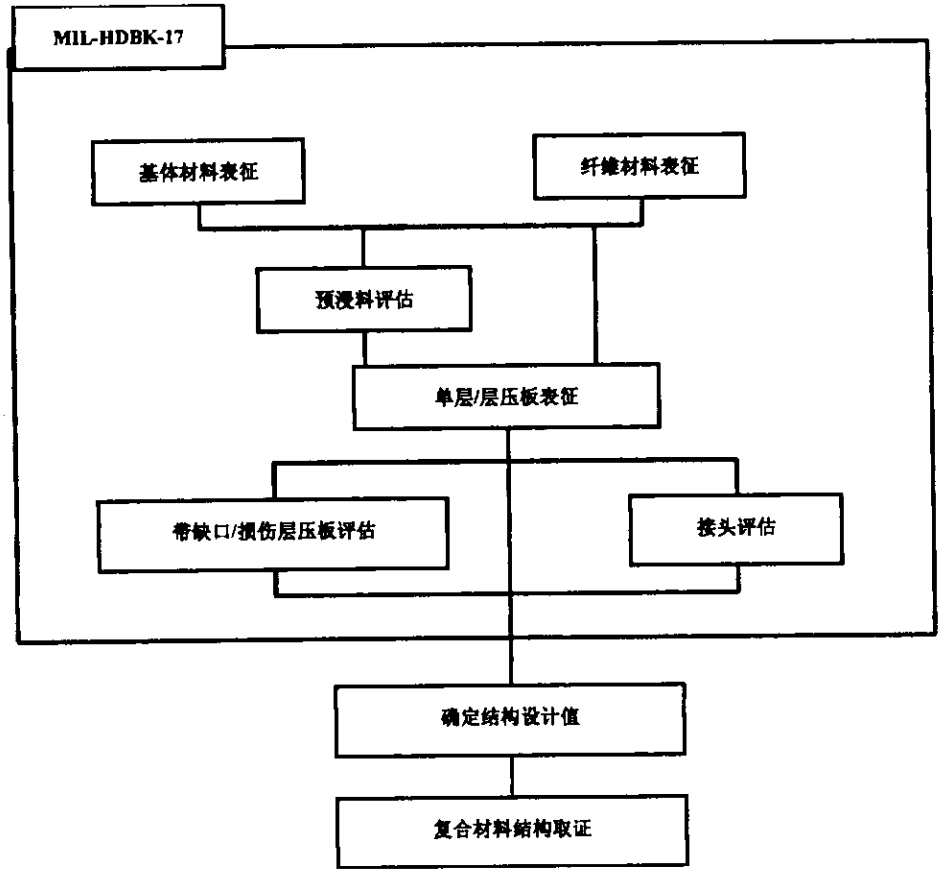


图 1.1　阴影部分是 MIL-HDBK-17 的重点

1.3　范围

就国防部的目标而言，这个手册只是指南；不能引用这个手册作为一种要求。如果这样做了，合同方不是必须遵守的。该指令只是 DOD 的要求，并不适用于联邦航空局（FAA）或其他政府部门。

这三卷 MIL-HDBK-17，是聚合物基复合材料有关技术资料的综合参考信息源，包括：

1.3.1　强度性能与许用值数据

在每种复合材料体系可能使用的范围内，定义了其以统计为基础的强度性能数据。目的是对某种特定的材料，提供其在可能环境上限和下限的数据，这样，使用的问题就不致制约力学性能的表征。如果还有中间环境条件下的数据可用，则用其来更准确地定义力学性能与环境对其影响之间的关系。

在第二卷中，列表给出了现有的、以统计为基础的强度性能数据。当应力和强度分析的能力允许进行铺层级安全裕量校核时，这些数据是很有用的，可作为确定结构设计许用值的起点。当存在这种情况时，MIL-HDBK-17 用统计方法处理的强度数据，可用于确定材料设计许用值。取决于应用的情况，有时将必须用层压板、元件或更高级别的试验，实验确定某些结构设计许用值，因为 MIL-HDBK-17 没有提供这些数据。

当有了新的数据，并证实其满足本手册的指南标准时，将增加补充的信息与性能。如果性能典型值和 S-值（见定义）能获得 MIL-HDBK-17 协调组的正式批准，就可收入本手册。

如果无法遵循 MIL-HDBK-17 指南或数据要求，应当与取证或采购的政府部门进行联系，确定可能用到的数据要求和其他文件，以便证明制造商所提议或使用数据值的正确性。

1.3.2 第一卷：结构材料表征指南

本卷包括了用于确定复合材料体系、其组分以及一般结构元件性能的指南，包括试验计划、试验矩阵、取样、浸润处理、选取试验方法、数据报告、数据处理、统计分析以及其他相关的专题。对数据的统计处理和分析给予了特别的关注。第一卷包括了材料表征数据的一般指南，和将材料数据收入 MIL-HDBK-17 的特殊要求。

必须强调指出，这个手册区别了材料基准值（材料许用值）和设计许用值。材料基准值是一个复合材料体系固有的性能，是本手册关注的重点。设计许用值虽然通常建立在材料基准值的基础上，却是随应用问题而定的，因此，要照顾并包括一些特殊的、可能会进一步影响结构强度或刚度的附加考虑。此外，在确定结构设计值时，还可能有一些额外的、超出 MIL-HDBK-17 范围的取证或采购部门要求。

1.3.3 第二卷：材料性能

第二卷中包含了以统计为基础的数据，它们满足 MIL-HDBK-17 具体的母体取样要求与数据文件要求，涵盖了普遍感兴趣的一些组分和材料体系。在第二卷中收入的数据归数据评估工作组管辖，并且，是由整个协调组（MIL-HDBK-17 的协调组和工作组在 1.5 节中讨论）批准的。只要已有数据并得到批准，将会收入新的材料体系，和现有材料体系的附加材料数据。从本手册 MIL-HDBK-17A 版本中选出的一些过去的数据，尽管它们不符合当前的数据取样、试验方法或文件的要求，但对工业界仍然可能有用，因此，也列在本卷的附录中。

在第二卷中收入的材料性能，是按可能的使用条件定义的；在可能情况下，把注意力集中在材料环境的上限与下限，这样，特定的使用环境就不会限制数据的使用。当有可以使用的中间环境条件的数据时，就为材料响应与环境之间的关系，提供了额外的定义。

虽然为特定应用情况确定结构设计值的过程，可以始于第二卷中所收入的数据，但是，对多数应用情况，尤其是需要层压板或更复杂结构（结构复杂性级别将在 2.1.2.1 讨论）的数据时，要收集更多的数据。另外，通常还必须向采购部门或取证部门，证明其具有制造第二卷中数据所用等价材料的能力，这通常包括有限的试验和数据对比。在第一卷中，给出了这种材料/工艺等价性评估的通用指南；然而，有关这种评估的很多细节问题，仍有待采购或取证部门的决断。

1.3.4 第三卷：材料使用、设计、分析指南

第三卷中提供了用于复合材料结构设计、制造、分析和支持能力的方法与得到的经验教训，及如何按第一卷中的指南使用第二卷中列出的材料数据。在第三卷中讨论的问题包括材料与工艺、质量控制、设计与分析、连接、可靠性、厚复合材料以及支持能力。

1.4 文件的使用与限制

1.4.1 使用第一卷~第三卷的路线图

以下各页中，提供了一些概要的路线图，用以简要地说明这个文件中涉及以下问题的相关各节。这些路线图是本手册的简要指南，因此，虽然它们指出了这些问题的一般处理流程，但没有给出在实际处理时所需的那些详细处理流程、交互作用以及系统。在某些情况下，不同路线图之间有一些重叠。它们没有包括一些较小的节，对此，读者可参见手册的目录。

1#路线图：新材料在设计和结构验证中的应用

这个路线图覆盖了新材料的取证、确定材料许用值和结构设计值，以及对用新材料制造的结构进行设计、分析及取证的问题。

2#路线图：新材料的取证

这个路线图覆盖了新材料的取证流程，以及制定相应的材料采购说明书的问题。这个路线图通常是由设计部门使用的。

3#路线图：单层级许用值的建立

这个路线图覆盖了为材料确定单层级材料许用值的流程。它可供希望为客户提供许用值的材料供应商使用，也可供设计部门使用。

4#路线图：为新材料建立提交给第二卷使用的数据

这个路线图覆盖了为建立提交给本手册，来计算材料性能和许用值的材料数据，然后收入第二卷的流程。这个路线图可供材料供应商使用，也可供设计部门使用。

5#路线图：将第二卷的数据用于设计与结构验证

这个路线图覆盖了获得第二卷用数据，以及进行“等效性”试验，以确认能将此材料用于制造商生产过程的流程。

6#路线图：验证材料和/或工艺过程经过修改后的等效性

这个路线图覆盖了在对材料或对部件生产过程进行小的更改后，验证其等效性的流程。这个路线图可供材料供应商或设计部门使用。

7#路线图：对“第2来源”材料进行使用验收的验证

对于将新材料取代原材料而用于部件设计和认证的情况，这个路线图覆盖了验证其可接受性的流程。“新”材料是指不同的纤维或树脂材料，或者指对原材料的一个重大变更。这个路线图通常是供设计部门使用的。

8#路线图：螺接连接试验与分析方法

这个路线图覆盖了螺接连接许用值和设计值的确定，以及螺接连接设计与分析问题。

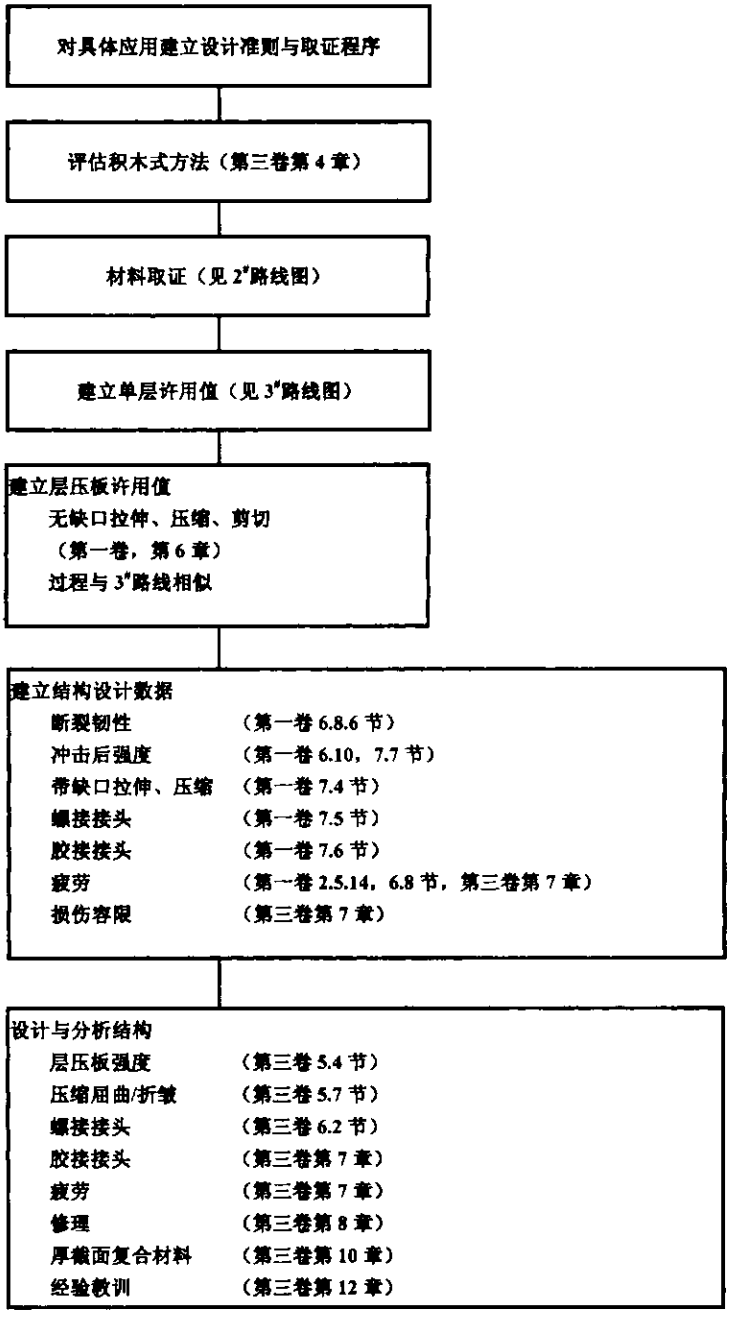
9#路线图：胶接连接试验与分析方法

这个路线图覆盖了胶接连接许用值和设计值的确定，以及胶接连接设计与分析问题。

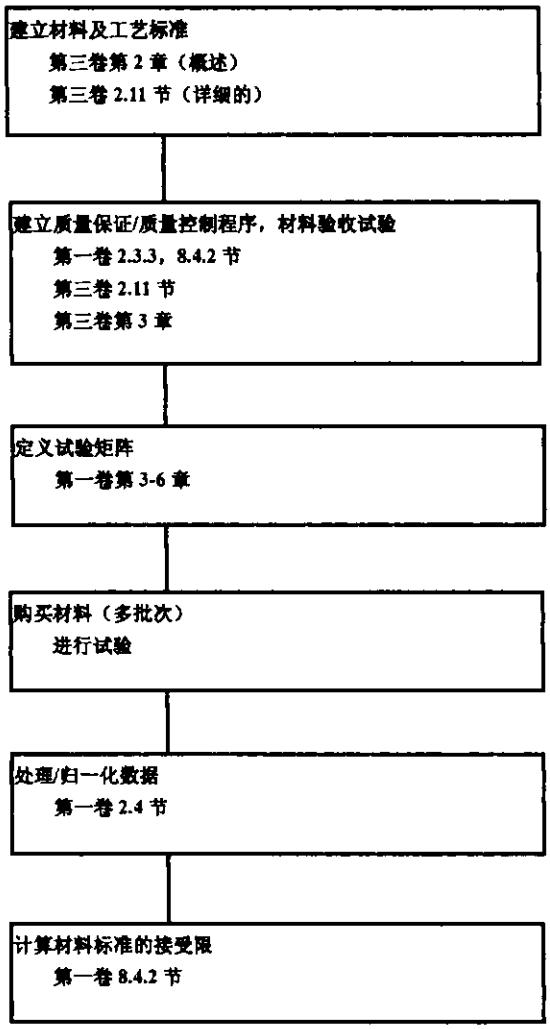
10#路线图：修理的设计、分析及制作

这个路线图覆盖了复合材料层压板修理时，其许用值和设计值的确定，以及修理的设计、分析与制作问题。

1#路线图：新材料在设计和结构验证中的应用



2"路线图：新材料的取证


建立材料及工艺标准
第三卷第 2 章（概述）
第三卷 2.11 节（详细的）
建立质量保证/质量控制程序，材料验收试验
第一卷 2.3.3，8.4.2 节
第三卷 2.11 节
第三卷第 3 章
定义试验矩阵
第一卷第 3-6 章
购买材料（多批次）
进行试验
处理/归一化数据
第一卷 2.4 节
计算材料标准的接受限
第一卷 8.4.2 节

3"路线图：单层许用值的确定

建立材料及工艺标准
第三卷 2.11 节（详细的）

建立质量保证/质量控制程序，材料验收试验
第一卷 2.3.3，8.4.2 节
第三卷 2.11 节
第三卷第 3 章

定义试验矩阵
第一卷 2.2 节（计划）
第一卷 2.3.2，8.2 节（矩阵）

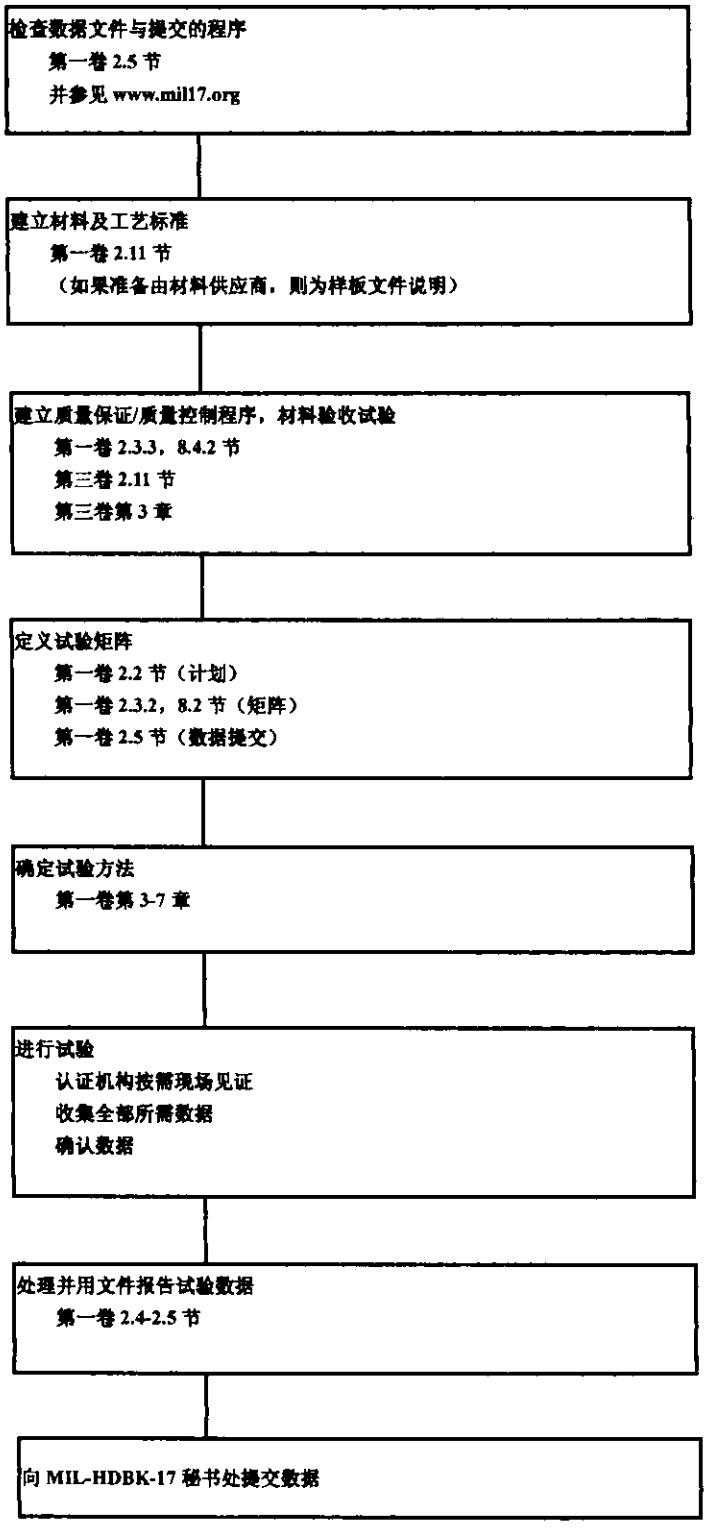
确定试验方法
第一卷第 3-6 章

购买材料（多批次）
进行试验
认证机构按需现场见证

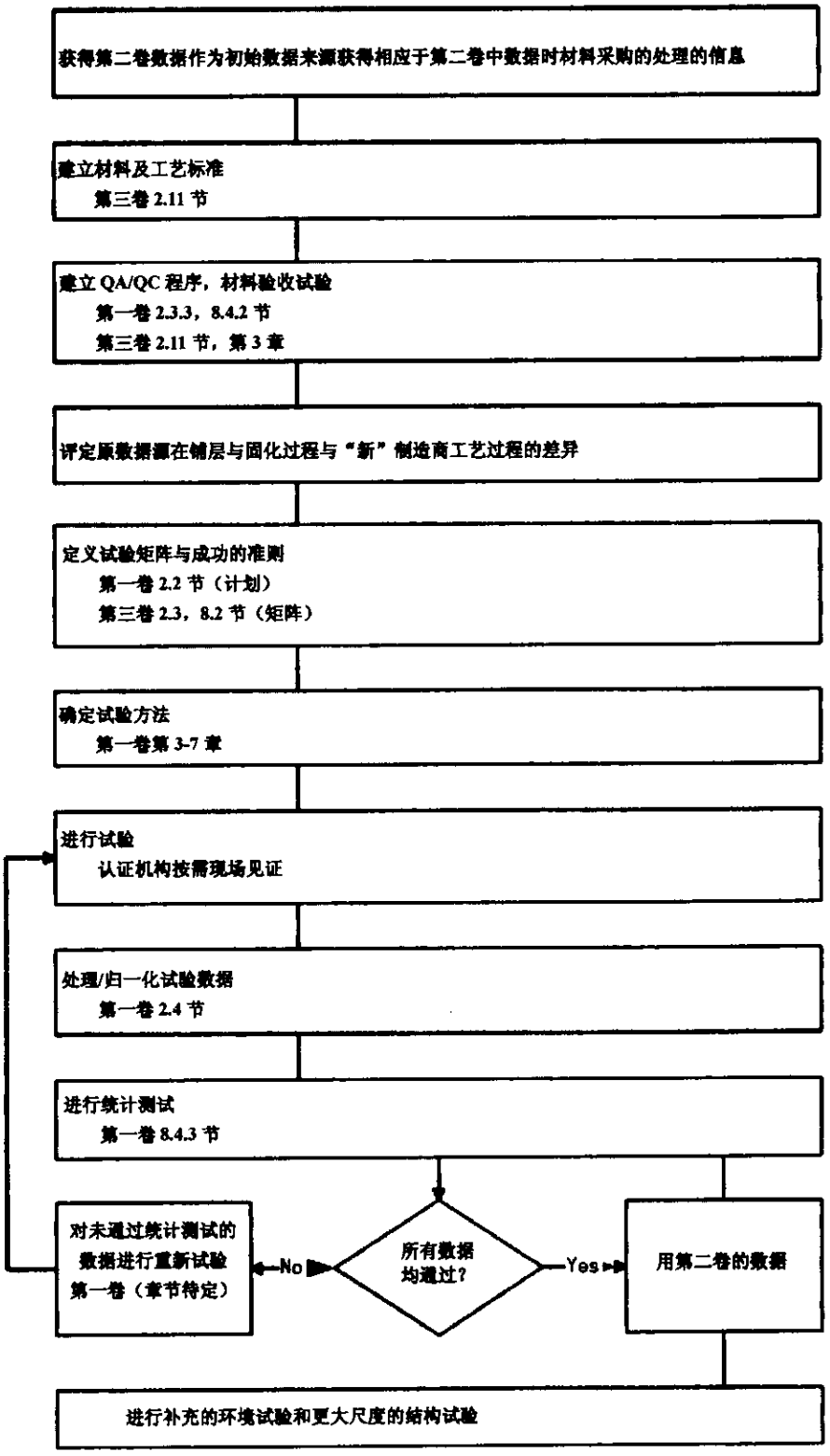
处理/归一化数据
第一卷 2.4 节

计算许用值
第一卷 8.3.1-8.3.4 节（按每种环境计算单独的许用值）
第一卷 8.3.5 节（对铺层参数回归的许用值）
第一卷 8.3.5 节（待定）
（对各种环境所集合数据的许用值计算）

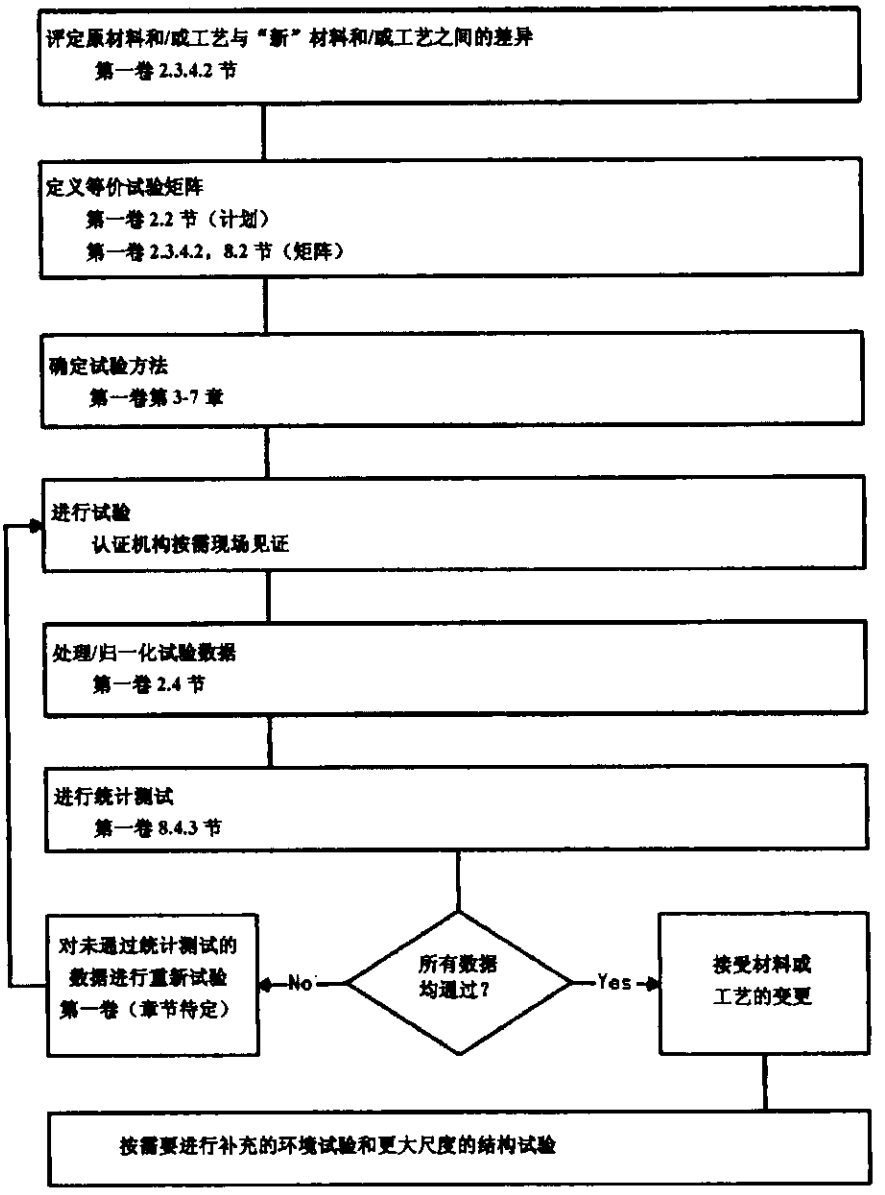
4"路线图：为新材料建立提交第二卷使用的数据



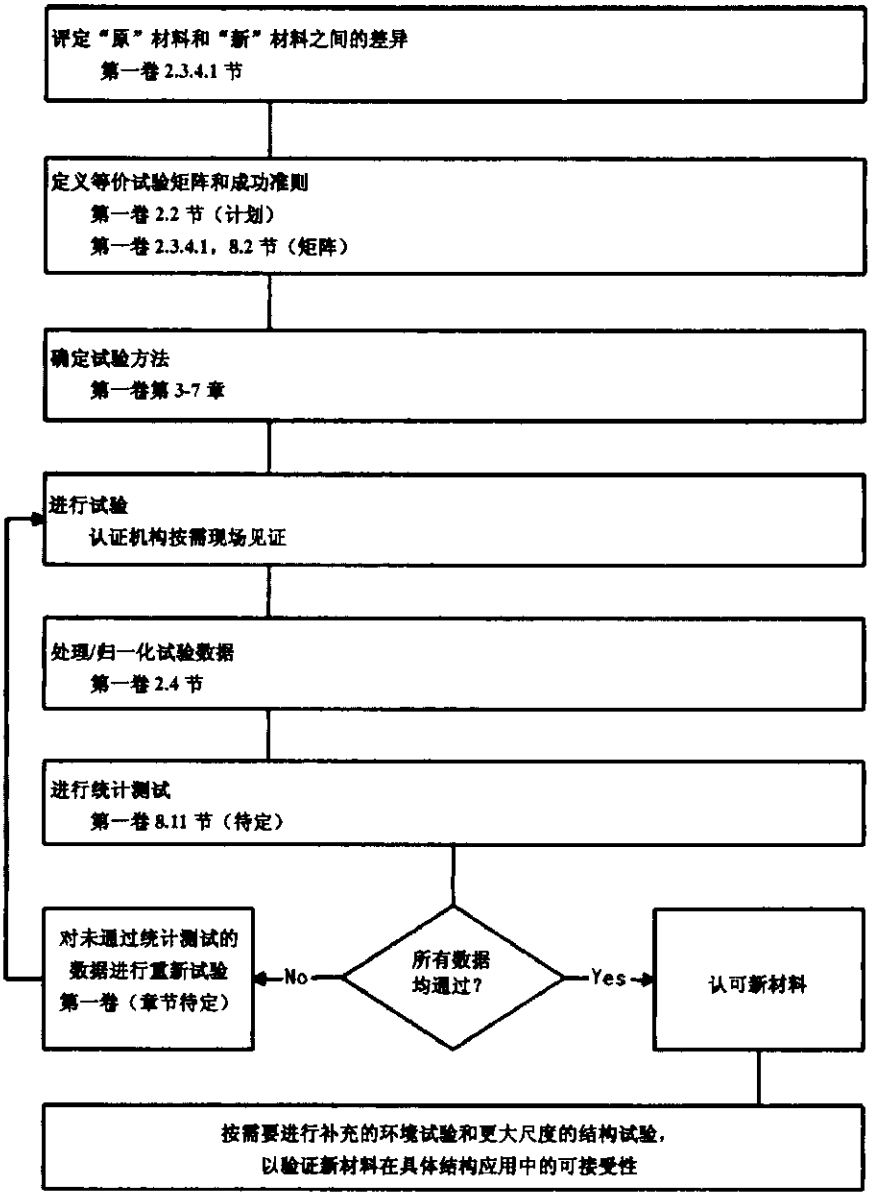
5#路线图：将第二卷的数据用于设计与结构验证



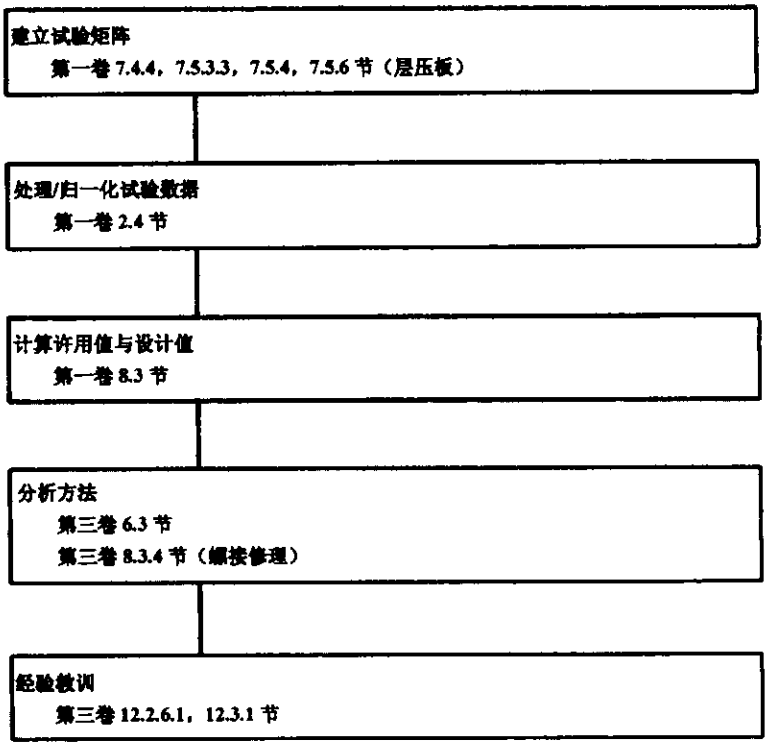
6#路线图：验证材料和/或工艺过程经过修改后的等效性



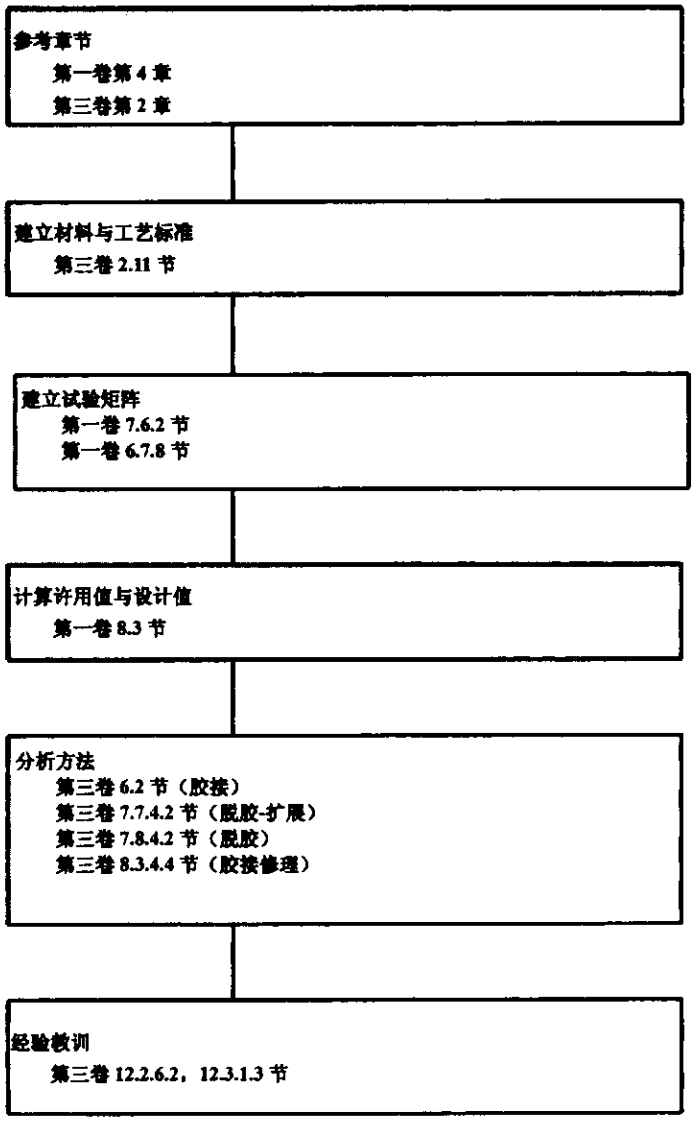
7#路线图：对“第2来源”材料进行使用验收的验证



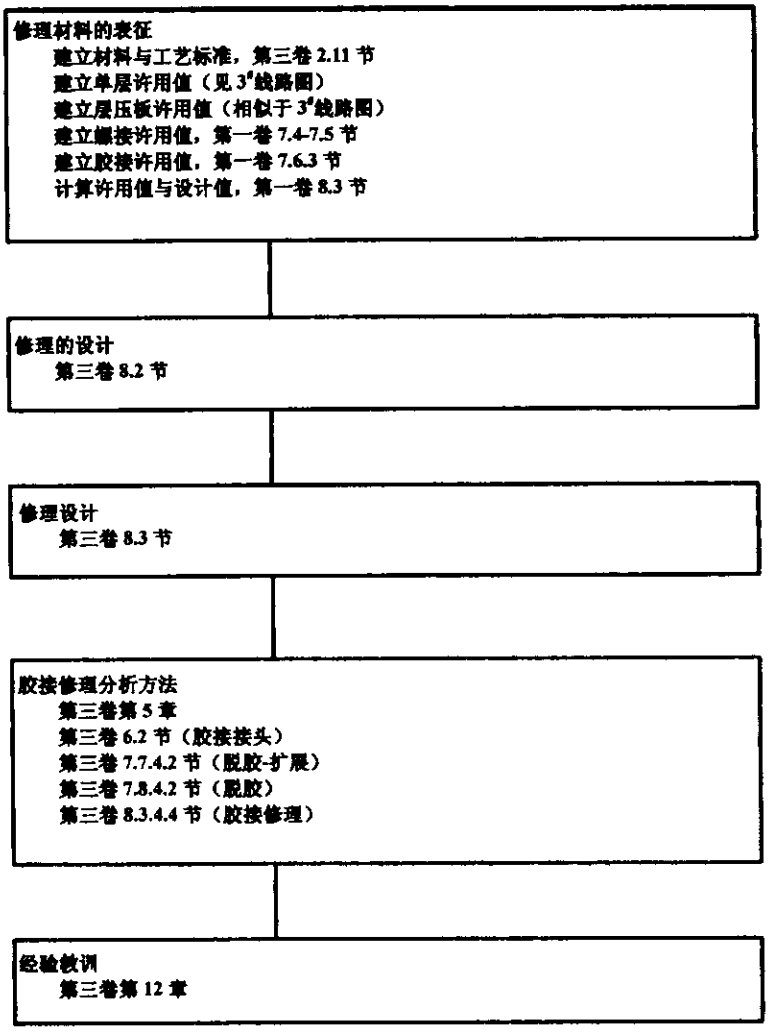
8#路线图：螺接连接试验与分析



9#路线图：胶接连接试验与分析方法



10#路线图：修理的设计、分析及制作



1.4.2 信息的来源

MIL-HDBK-17 中包含的内容，来源于材料生产商和制造厂商、航宇工业、政府赞助的研究报告、公开的文献、与研究者直接接触、以及 MIL-HDBK-17 协调活动的参与者。来自工业界、美国陆军、海军、空军、NASA、以及美国联邦航空局的代表，对这个文件中发表的所有资料进行了整理与审查。作出了每种努力，以反映在复合材料，特别是结构用复合材料使用方面的最新资料。要不断对这个手册进行审查和修订，以与当今的技术状态同步，并保证其完整性与准确性。

1.4.3 数据的使用及应用指南

此处所包含的所有数据，是针对具体的环境条件，以小尺寸试验件为基础的，它们大多限于单向准静态加载情况*。使用者有责任去判定，手册中的数据是否适合给定的应用情况，以及如果选择这些数据的话，如何按下述用途将其转换或考虑尺寸效应：

- 用于多向的层压板；
- 用于有不同特征长度和几何形状的结构；
- 处于多轴应力状态；
- 曝露在不同的环境下；
- 当作用非静态载荷时。

第三卷将对这些问题和其他一些问题作进一步的讨论。手册数据的具体应用已经超出了MIL-HDBK-17的范围，因此，关于这个手册具体条款的适用性及解释，可能需要得到适当的采购或取证部门的正式批准。

1.4.4 强度性能及许用值的术语

这个手册的目的是提供产生材料性能的指南，性能中包括在一些极端环境下以统计为基础的强度数据，这些极端环境包括了大多数中间的具体应用环境。其原理是，要避免由具体应用问题来制约一般的材料性能表征程序。如果还有在中间环境条件下的数据，则可用其更完整地定义性能与环境（对性能）影响之间的关系。然而，在某些情况下，对复合材料体系的环境极限可能依赖于使用情况；而在另外一些情况下，有可能得不到环境极限时的数据。

在第二卷中，列表给出了以统计为基础现有的强度性能数据。当应力和强度分析的能力允许在单层级进行安全裕量校核时，这些数据是很有用的，可作为确定结构设计许用值的起点。对此，MIL-HDBK-17 的强度基准值，也可称为材料设计许用值。与应用情况有关，可能必须用 MIL-HDBK-17 中没有的、附加的层压板、元件或更高级别的试验数据，经验地确定某些结构设计许用值。

1.4.5 参考文献的应用

虽然每章的结尾都提供了很多的参考文献，但要注意，引用文献中的信息，与本手册

---

* 除非另外说明，试验将按照特定的试验方法进行，重点是按先进复合材料用 ASTM 标准试验方法得到的数据，但在 ASTM 试验方法不适用或还没有时，或者，当有一些用非标准（但却是常用的）试验方法得出的数据时，则由非标准试验方法得到的数据也可能被接受发表，在数据文件中注明所用的具体试验方法。另外，见 2.5.5 节中关于试验方法认可标准说明。

中有关数据建立的一般指南、或收入数据的具体要求未必在每个方面都一致。这些参考文献只是作为有益的参考，但未必一定是在具体领域内完整或权威的其他相关信息来源。

1.4.6 商标及产品名的使用

使用商标及专利产品名，并不构成美国政府或 MIL-HDBK-17 协调组对它们的认可。

1.4.7 毒性、健康危害和安全

在 MIL-HDBK-17 中讨论的某些工艺和试验方法，可能涉及有害的材料、操作或设备。这些方法可能没有讨论因其使用而带来的安全问题（如果有的话）。对于这些方法的使用者，有责任在使用以前建立适当的安全与健康细则，并确定这些条款限制的适用性。处理和使用复合材料时，对于所涉及有关健康与安全问题的讨论，使用者可参考美国陆军先进复合材料健康及安全暂行指南（Advanced Composite Materials US Army Interim Health and Safety Guidance），这个文件是由美国陆军环境卫生署，Aberdeen 试验场医学部制订的。材料制造厂商以及各复合材料用户团体，也可以就与复合材料有关的健康及安全问题提供指南。

1.4.8 消耗臭氧的化学物质

在 1991 年美国的空气洁净法令中，已对限制使用消耗臭氧化学物质的问题做了详细说明。

1.5 批准步骤

这个手册的内容是由 MIL-HDBK-17 协调组开发与批准的，这个协调组每年开会两次，考虑对此手册的改变与增加。这个组的组成包括主席团成员、协调员、秘书处、工作组主席和现任的工作组成员（其中除了生产厂商和学术、研究机构的代表外，还包括来自美国及国际的各个采购、取证部门的代表）。每次 MIL-HDBK-17 协调组会议，大约在计划会期的八周前用邮件通知参加者，并在会议结束八周后把会议的备忘录邮寄给参加者。

虽然这些工作组的职能相似，它们分为三类：执行的，即一个负有监管职能的工作组，由各工作组的主席、手册的主席团、协调员和秘书处组成；常任的，包括数据审查、指南、材料与工艺、统计以及试验工作组；以及专业的，专业工作组将随时间而变化，但目前有编织与纤维缠绕、可支持性、结构连接、以及厚截面工作组。协调组及工作组的组成与组织、以及文件更改批准所遵循的程序，均汇总并分别发表在 MIL-HDBK-17 协调组成员指南中，可以从协调员或秘书处得到。

对此手册进行增添、删节或修改的建议，应当在会议通知投寄前一段时间，同时提交给适当的工作组和秘书处，并且应当包括对提议修改的具体说明，以及支持数据或分析方法的适当文件。对文件中提议发表的图形、图纸或照片，应当给秘书处提供可供复制的副本。在得到相应的工作组批准之后，提议的更改将发表在下一个备忘录的特殊章节，即所谓的“黄页”中，而所有的参加者都允许对其进行评论。如果到公布的征求意见期结束，对任何条款没有收到实质性的评论意见，则认为其已被协调组批准，并认为自此日起生效。（在本手册的下一版本颁布前，所收集的改变将被美国国防部的各个部门进行审查。可能

由美国国防部的这个审查，导致版本修订的建议）。

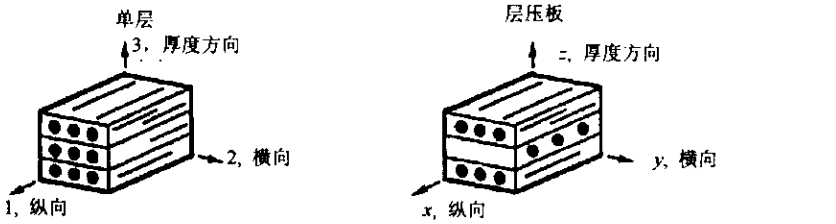
有关把材料性能数据收入到MIL-HDBK-17中的请求，应当随同2.5.5节所规定的文件，一起提交给协调员或秘书处。已经建立了数据源信息包，来帮助那些考虑为MIL-HDBK-17提供数据的人们，这可以从协调员或秘书处那里得到。秘书处对所提交的每份数据进行审查和分析，并在可能的下次协调组会议上提出一份汇总，供数据审查工作组进行评审。收入新材料的选择，是由 MIL-HDBK-17 协调组掌握控制的。出于实际的考虑，排除了包括所有的先进复合材料的做法，但将会进行合理的努力，以适时地增加一些有用的复合材料体系。

1.6 符号、缩写，及单位制

本节定义了 MIL-HDBK-17 中采用的符号和缩写，并说明了所沿用的单位制。只要可能，都保留了通常的用法。这些资料主要来源于文献 1.6(a)，1.6(b)，1.6(c)。

1.6.1 符号及缩写

本节定义了本手册中采用（除了统计学的符号以外）的所有符号和缩写；关于统计学的符号在第一卷第 8 章进行定义。单层/层压板的坐标轴适用于所有的性能；力学性能的的符号则汇总在图 1.6.1 中。



符号 H_i^{jk}

式中：

H= {
- σ, τ: 法向应力，剪应力
- F: 许用应力
- ε, γ 拉伸和剪应变
- E, G: 弹性模量,剪切模量
- ν 泊松比

i= {
- 1: 纵向
- 2: 横向
- 3: 厚度方向
- 12, 13, 32: 剪切，泊松比

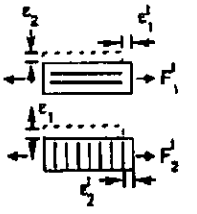
} 单层

- x: 纵向
- y: 横向
- z: 厚度方向
- xy, xz, zy: 剪切，泊松比

} 层压板

注 ν_{12}^{l} = 较大的泊松比 $= -\dfrac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1^{l}}$

ν_{21}^{l} = 较小的泊松比 $= -\dfrac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2^{l}}$



j= {
- c: 压缩
- t: 拉伸
- s: 剪切

k= {
- y: 压缩
- u: 极限，不用于刚度

例子 F_2^{tu} =单层极限横向拉伸许用应力

E_2^{c} =厚度方向层压板压缩弹性模量

图 1.6.1 力学性能的符号

- 当用作为上标或下标时，符号 f 和 m 分别表示纤维和基体。
- 表示应力类型的符号（如 cy——压缩屈服）总在上标位置。
- 方向标示符（如 x，y，z，1，2，3 等）总是用于下标位置。
- 铺层序号的顺序标示符（如 1，2，3 等）用于上标位置，且必须用括号括起来，以区别于数学的幂指数。
- 其他标示符，只要明确清楚，可用于下标位置，也可用于上标位置。
- 由上述规则导出的复合符号（例如基本符号加标示符），如下面列出的特定形式所示。

在使用 MIL-HDBK-17 时，认为下列通用符号和缩写是标准的。当有例外时，将在正文或表格中予以注明。

A	(1)面积（m^2，in^2）
	(2)交变应力与平均应力之比
	(3)力学性能的 A 基准值
a	(1)长度（mm，in）
	(2)加速度（m/see^2，ft/sec^2）
	(3)振幅
	(4)裂纹或缺陷的尺寸（mm，in）
B	(1)力学性能的 B 基准值
	(2)双轴比率
Btu	英制热单位
b	宽度(mm，in)，例如与载荷垂直的挤压面或受压板宽度，或梁截面宽度
C	(1)比热 （kJ/kg°C，Btu/lb°F）
	(2)摄氏的
CF	地心引力（N，lbf）
CPF	正交铺层系数
CPT	固化的单层厚度 （mm，in.）
CG	(1)质心；“重心”；
	(2)面积或体积质心
℄	中心线
c	柱屈曲的根部固定系数
$\bar{c}$	蜂窝夹芯高度（mm，in）
cpm	每分钟周数
D	(1)直径（mm，in）
	(2)孔或紧固件的直径（mm，in）
	(3)板的刚度（N-m，lbf-in）
d	表示微分的算子
E	拉伸弹性模量，应力低于比例极限时应力与应变的平均比值（GPa，Msi）
E'	储能模量（GPa，Msi）
E''	损耗模量（GPa，Msi）

E_c	压缩弹性模量，应力低于比例极限时应力与应变的平均比值（GPa，Msi）
$E_c^{'}$	垂直于夹层平面的蜂窝芯弹性模量（GPa，Msi）
E^{sec}	割线模量（GPa，Msi）
E^{tan}	切线模量（GPa，Msi）
e	端距，从孔中心到板边的最小距离（mm，in）
e/D	端距与孔直径之比（挤压强度）
F	(1)应力（MPa，ksi）
	(2)华氏温度计（的）
F^b	弯曲应力（MPa，ksi）
F^{ccr}	压损应力或折损应力（破坏时柱应力的上限）（MPa，ksi）
F^{su}	纯剪极限应力（此值表示该横截面的平均剪应力）（MPa，ksi）
FAW	纤维的面积重量（g/m^2，lb/in^2）
FV	纤维的体积（%）
f	(1)内（或计算）应力 （MPa，ksi）
	(2)在有裂纹的毛截面上作用的应力（MPa，ksi）
	(3)蠕变应力（MPa，ksi）
f^c	压缩内应力（或计算压缩应力）（MPa，ksi）
f_c	(1)断裂时的最大应力 （MPa，ksi）
	(2)毛应力限（筛选弹性断裂数据用）（MPa，ksi）
ft	英尺
G	刚性模量、剪切模量（MPa，Msi）
GPa	千兆帕斯卡（gigapascal）
g	(1)克
	(2)重力加速度（m/s^2，ft/s^2）
H/C	蜂窝（夹芯）
h	高度（mm，in），如梁截面高度。
hr	小时
I	面积惯性矩（mm^4，in^4）
i	梁的中性面（由于弯曲）斜度，弧度
in.	英寸
J	(1)扭转常数（$=I_p$对圆管）（m^4，in^4）
	(2)焦耳
K	(1)绝对温标，开氏温标
	(2)应力强度因子（MPa/m，ksi/in）
	(3)导热性系数（W/m°C，$Btu/ft^2/hr/in/°F$）
	(4)修正系数
	(5)介电常数，电容率
K_{app}	表观平面应变断裂韧性或剩余强度 （MPa/m，ksi/in）
K_c	平面应变断裂韧性，对裂纹扩展失稳点断裂韧性的度量（MPa/m， ksi/in）

K_{Ic}	平面应变断裂韧性（MPa/m，ksi/in）
K_N	按经验计算的疲劳缺口因子
K_s	板或圆筒的剪切屈曲系数
K_t	(1)理论的弹性应力集中因子
	(2)蜂窝夹芯板的 t_w/c 比
K_v	电介质强度，绝缘强度（KV/mm，V/mil）
K_x，K_y	板或圆筒的压缩屈曲系数
k	单位应力的应变
L	圆筒、梁、或柱的长度（mm，in）
L'	柱的有效长度（mm，in）
lb	磅
M	外力矩或力偶（N-m，in-lbf）
Mg	百万克（兆克）
MPa	兆帕斯卡（s）
MS	军用标准
M.S.	安全裕度、安全系数
MW	分子量
MWD	分子量分布
m	(1)质量（kg，lb）
	(2)半波数
	(3)米
	(4)斜率
N	(1)破坏时的疲劳循环数
	(2)层压板中的单层数
	(3)板的面内分布力（lbf/in）
	(4)牛顿
	(5)归一化
NA	中性轴
n	(1)在一个集内的次数
	(2)半波数或全波数
	(3)经受的疲劳循环数
P	(1)作用的载荷（N，lbf）
	(2)曝露参数
	(3)概率
	(4)比电阻、电阻系数（Ω）
P^u	试验的极限载荷，（N，lb/每个紧固件）
P^y	试验屈服限载荷，（N，lb/每个紧固件）
p	法向压力（Pa，psi）
psi	磅/平方英寸

Q	横截面的静面积矩 （mm^3，in^3）
q	剪流（N/m，lbf/in）
R	(1)循环载荷中最小与最大载荷之代数比
	(2)减缩比
RA	面积的减缩
R.H.	相对湿度
RMS	均方根
RT	室温
r	(1)半径（mm，in）
	(2)根部半径（mm，in）
	(3)减缩比（回归分析）
S	(1)剪力（N，lbf）
	(2)疲劳中的名义应力（MPa，ksi）
	(3)力学性能的 S-基准值
S_a	疲劳中的应力幅值（MPa，ksi）
S_e	疲劳限（MPa，ksi）
S_m	疲劳中的平均应力（MPa，ksi）
S_{max}	应力循环中应力的最大代数值（MPa，ksi）
S_{min}	应力循环中应力的最小代数值（MPa，ksi）
S_R	应力循环中最小与最大应力的代数差值（MPa，ksi）
S.F.	安全系数
s	(1)弧长（mm，in）
	(2)蜂窝夹层芯格尺寸（mm，in）
T	(1)温度（°C，°F）
	(2)作用的扭矩 （N-m，in-lbf）
T_d	热解温度（°C，°F）
T_F	曝露的温度（°C，°F）
T_g	玻璃化转变温度（°C，°F）
T_m	熔融温度（°C，°F）
t	(1)厚度（mm，in）
	(2)曝露时间（s）
	(3)持续时间（s）
V	(1)体积（mm^3，in^3）
	(2)剪力（N，lbf）
W	(1)重量（N，lbf）
	(2)宽度（mm，in）
	(3)瓦特
x	沿一个坐标轴的距离
Y	关联构件几何学特性与裂纹尺寸的无因次系数

y	(1)受弯梁弹性变形曲线的挠度（mm，in）
	(2)由中性轴到给定点的距离
	(3)沿一个坐标轴的距离
Z	截面模量，I/y（mm^3，in^3）
α	热膨胀系数（m/m/°C，in/in/°F）
γ	剪应变（m/m，in/in）
Δ	差分（用于数量符号之前）
δ	伸长量或挠度（mm，in）
ε	应变（m/m，in/in）
ε^e	弹性应变（m/m，in/in）
ε^p	塑性应变（m/m，in/in）
μ	渗透性
η	塑性折减因子
$[\eta]$	本征黏度
η^*	动态复黏度
ν	泊松比
ρ	(1)密度（kg/m^3，lb/in^3）
	(2)回转半径（mm，in）
$\rho_c^{'}$	蜂窝夹芯密度（kg/m^3，lb/in^3）
	（i, j=1，2，3 或 x，y，z）
Σ	总计、总和
σ	标准差
σ_{ij}，τ_{ij}	外法线朝 i 的平面上沿 j 方向的应力
T	作用剪应力（MPa，ksi）
ω	角速度（弧度/s）
$\propto$	无限大

1.6.1.1 组分的性能

下列符号专用于典型复合材料组分的性能：

E^f	纤维材料弹性模量（MPa，ksi）
E^m	基体材料弹性模量（MPa，ksi）
E_x^g	预浸玻璃稀纱布沿纤维方向或沿织物经向的弹性模量（MPa，ksi）
E_y^g	预浸玻璃稀纱布在垂直于纤维方向或织物经向的弹性模量（MPa，ksi）
G^f	纤维材料剪切模量（MPa，ksi）
G^m	基体材料剪切模量（MPa，ksi）
G_{xy}^g	预浸玻璃稀纱布剪切模量（MPa，ksi）
$G_{cx}^{'}$	夹芯沿 x 轴的剪切模量（MPa，ksi）
$G_{cy}^{'}$	夹芯沿 y 轴的剪切模量（MPa，ksi）
l	纤维长度（mm，in）

α^f	纤维材料热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α^m	基体材料热膨胀系数（m/m/°C，in/in/°F）
α_x^g	预浸玻璃稀纱布沿纤维方向或织物经向的热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α_y^g	预浸玻璃稀纱布垂直纤维方向或织物经向的热膨胀系数(m/m°C，in/in/°F)
ν^f	纤维材料泊松比
ν^m	基体材料泊松比
ν_{xy}^g	由纵向（经向）伸长引起横向（纬向）收缩时玻璃稀纱布的泊松比
ν_{yx}^g	由横向（经向）伸长引起纵向（纬向）收缩时玻璃稀纱布的泊松比
σ	作用于某点的轴向应力，用于细观力学分析（MPa，ksi）
τ	作用于某点的剪切应力，用于细观力学分析（MPa，ksi）

1.6.1.2 单层与层压板

下列符号、缩写及记号适用于复合材料单层及层压板。目前，MIL-HDBK-17 的重点放在单层性能上，但这里给出了适用于单层及层压板的常用符号表，以避免可能的混淆。

A_{ij} $(i,j=1，2，6)$	（面内）拉伸刚度（N/m，lbf/in）
B_{ij} $(i,j=1，2，6)$	耦合矩阵（N，lbf）
C_{ij} $(i,j=1，2，6)$	刚度矩阵元素（Pa，psi）
D_x，D_y	弯曲刚度（N-m，lbf-in）
D_{xy}	扭转刚度（N-m，lbf-in）
D_{ij} $(i,j=1，2，6)$	弯曲刚度（N-m，lbf-in）
E_1	平行于纤维或经向的单层弹性模量（MPa，Msi）
E_2	垂直于纤维或经向的单层弹性模量（MPa，Msi）
E_x	沿参考轴 X 的层压板弹性模量（MPa，Msi）
E_y	沿参考轴 Y 的层压板弹性模量（MPa，Msi）
G_{12}	在 12 平面内的单层剪切模量（MPa，Msi）
G_{xy}	在参考平面 xy 内的层压板剪切模量（MPa，Msi）
h_i	第 i 铺层或单层的厚度（mm，in）
M_x，M_y，M_{xy}	（板壳分析中的）弯矩及扭矩分量（N-m/m，in-lbf/in）
n_f	每个单层在单位长度上的纤维数
Q_x，Q_y	分别垂直于 x 及 y 轴的板截面上，与 z 平行的剪力(N/m，lbf/in)
Q_{ij} $(i，j=1，2，6)$	折算刚度矩阵（Pa，psi）
u_x，u_y，u_z	位移向量的分量（mm，in）
u_x^0，u_y^0，u_z^0	层压板中面的位移向量分量（mm，in）
V_V	空隙含量（用体积百分数表示）
V_f	纤维含量或纤维体积（用体积百分数表示）
V_g	玻璃稀纱布含量（用体积百分数表示）
V_m	基体含量（用体积百分数表示）
V_x，V_y	边缘剪力或支承剪力（N/m，lbf/in）
W_f	纤维含量（用重量百分数表示）

W_g	玻璃稀纱布含量（用重量百分数表示）
W_m	基体含量（用重量百分数表示）
W_s	单位表面积的层压板重量（N/m^2，lbf/in^2）
α_1	沿 1 轴的单层热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α_2	沿 2 轴的单层热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α_x	层压板沿广义参考轴 x 的热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α_y	层压板沿广义参考轴 y 的热膨胀系数（m/m°C，in/in/°F）
α_{xy}	层压板的热膨胀剪切畸变系数（m/m°C，in/in/°F）
θ	单层在层压板中的方位角，即 1 轴与 x 轴间的夹角（°）
λ_{xy}	等于 ν_{xy} 与 ν_{yx} 之积
ν_{12}	由 1 方向伸长引起 2 方向收缩的泊松比*
ν_{21}	由 2 方向伸长引起 1 方向收缩的泊松比*
ν_{xy}	由 x 方向伸长引起 y 方向收缩的泊松比*
ν_{yx}	由 y 方向伸长引起 x 方向收缩的泊松比*
ρ_c	单层的密度（kg/m^3，lbf/in^3）
$\overline{\rho}_c$	层压板的密度（kg/m^3，lbf/in^3）
ϕ	(1)广义角坐标（°） (2)偏轴加载中，x 轴与载荷方向之间的夹角（°）

1.6.1.3 下标

认为下列下标记号是 MIL-HDBK-17 的标准记号：

1, 2, 3	单层的自然直角坐标（1 是纤维方向或经向）
A	轴
a	(1)胶粘的 (2)交变的
app	表观的
byp	旁路的
c	(1)复合材料体系，特定的纤维/基体组合。复合材料作为一个整体，区别于单一的组分，又当与上标撇号(')连用时，指夹层芯子 (2)临界的
cf	离心力
e	疲劳或耐久性
eff	有效的
eq	等效的
f	纤维
g	玻璃稀纱布
H	圈
i	顺序中的第 i 位置

* 因为使用了不同的定义，在对比不同来源的泊松比以前，应当检查其定义。

L	横向
m	(1)基体
	(2)平均
max	最大
min	最小
n	(1)序列中的第 n 个（最后）位置
	(2)标准的、法向的
p	极的、极性的
s	对称
st	加筋条
T	横向
t	在 t 时刻的参量值
x，y，z	广义坐标系
Σ	总和，或求和
o	初始点数据或参考数据
( )	表示括号内的项相应于特定温度的格式。RT——室温（21°C，70°F）；除非另有说明，所有温度以华氏温度（°F）表示。

1.6.1.4 上标

在 MIL-HDBK-17 中，认为下列上标记号是标准的。

b	弯曲
br	挤压
c	(1)压缩
	(2)蠕变
cc	压缩折曲
cr	压缩屈曲
e	弹性
f	纤维
g	玻璃稀纱布
is	层间剪切
(i)	第 i 铺层或单层
lim	限制，用指限制载荷
m	基体
ohc	开孔压缩
oht	开孔拉伸
p	塑性
pl	比例极限
rup	断裂
s	剪切
scr	剪切屈曲

sec　　割线（模量）
so　　偏轴剪切
T　　温度或热
t　　拉伸
tan　　切线（模量）
u　　极限的
y　　屈服
'　　二次（模量），与下标 c 连用时指蜂窝夹芯的性能。
CAI　　冲击后压缩

1.6.1.5　缩写词

在 MIL-HDBK-17 中，使用下列缩写词。

AA　　atomic absorption（原子吸收）
AES　　Auger electron spectroscopy（Auger 电子能谱术）
AIA　　Aerospace Industries Association（航宇工业协会）
ANOVA　　analysis of variance（变异分析）
ARL　　US Army Research Laboratory（美国陆军研究所）
ASTM　　American Society for Testing and Materials（美国材料试验学会）
BMI　　bismaleimide（双马来酰亚胺）
BVID　　barely visible impact damage（目视勉强可见冲击损伤）
CAI　　compression after impact（冲击后压缩）
CCA　　composite cylinder assemblage（复合材料圆柱组合）
CFRP　　carbon fiber reinforced plastic（碳纤维增强复合材料）
CLS　　crack lap shear（裂纹搭接剪切）
CMCS　　Composite Motorcase Subcommittee （JANNAF）（复合材料发动机箱小组委员会（JANNAF））
CPT　　cured ply thickness（固化后层厚）
CTA　　cold temperature ambient（低温环境）
CTD　　cold temperature dry（低温干态）
CTE　　coefficient of thermal expansion（热膨胀系数）
CV　　coefficient of variation（离散系数）
CVD　　chemical vapor deposition（化学气相沉积）
DCB　　double cantilever beam（双悬臂梁）
DDA　　dynamic dielectric analysis（动态电介质分析）
DLL　　design limit load（设计限制载荷）
DMA　　dynamic mechanical analysis（动态力学分析）
DOD　　Department of Defense（国防部）
DSC　　differential scanning calorimetry（差示扫描量热法）
DTA　　differential thermal analysis（示差热分析）
DTRC　　David Taylor Research Center（David Taylor 研究中心）

ENF	end notched flexure（端部缺口弯曲）
EOL	end-of-life（寿命结束）
ESCA	electron spectroscopy for chemical analysis（化学分析的电子能谱术）
ESR	electron spin resonance（顺磁共振、电子自旋共振）
ETW	elevated temperature wet（高温湿热）
FAA	Federal Aviation Administration（联邦航空管理局）
FFF	field flow fractionation（场溢分馏法）
FGRP	fiberglass reinforced plastic（玻璃纤维增强塑料）
FMECA	Failure Modes Effects Criticality Analysis（破坏模式影响的危险度分析）
FOD	foreign object damage（外来物损伤）
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy（福里哀变换红外光谱法）
FWC	finite width correction factor（有限宽修正系数）
GC	gas chromatography（气相色谱分析）
GSCS	Generalized Self Consistent Scheme（广义自相容方案）
HDT	heat distortion temperature（热扭变温度）
HPLC	high performance liquid chromatography（高精度液相色层分离法）
ICAP	inductively coupled plasma emission（感应耦合等离子体发射）
IITRI	Illinois Institute of Technology Research Institute（伊利诺斯理工研究所）
IR	infrared spectroscopy（红外光谱学）
ISS	ion scattering spectroscopy（离子散射光谱学）
JANNAF	Joint Army，Navy，NASA and Air Force（陆、海军、NASA 及空军联合体）
LC	liquid chromatography（液相色层分离法）
LPT	laminate plate theory（层压板理论）
LSS	laminate stacking sequence（层压板铺层顺序）
MMB	mixed mode bending（混合型弯曲）
MOL	material operational limit（材料工作极限）
MS	mass spectroscopy（质谱（分析）法）
MSDS	material safety data sheet（材料安全数据单）
MTBF	Mean Time Between Failure（破坏间的平均时间）
NAS	National Aerospace Standard（国家航空航天标准）
NASA	National Aeronautics and Space Administration（国家航空航天局）
NDI	nondestructive inspection（无损检测）
NMR	nuclear magnetic resonance（核磁共振）
PEEK	polyether ether ketone（聚醚醚酮）
RDS	rheological dynamic spectroscopy（流变动态波谱学）
RH	relative humidity（相对湿度）
RT	room temperature（室温）
RTA	room temperature ambient（室温环境）
RTD	room temperature dry（室温干态）

RTM resin transfer molding（树脂转移模塑）
SACMA Suppliers of Advanced Composite Materials Association（先进复合材料供应商协会）
SAE Society of Automotive Engineers（汽车工程师协会）
SANS small-angle neutron scattering spectroscopy（小角度中子散射光谱学）
SEC size-exclusion chromatography（尺度筛析色谱法）
SEM scanning electron microscopy（扫描电子显微镜）
SFC supercritical fluid chromatography（超临界流体色谱法）
SI International System of Units（Le Système International d'Unités）（国际单位制）
SIMS secondary ion mass spectroscopy（次级离子质谱（法））
TBA torsional braid analysis（扭转编织分析）
TEM transmission electron microscopy（发射电子显微镜）
TGA thermogravimetric analysis（热解重量分析）
TLC thin-layer chromatography（薄层色谱法）
TMA thermal mechanical analysis（热量力学分析）
TOS thermal oxidative stability（热氧化稳定性）
TVM transverse microcrack（横向微裂纹）
UDC unidirectional fiber composite（单向纤维复合材料）
VNB V-notched beam（V 缺口梁）
XPS X-ray photoelectron spectroscopy（X-射线光电光谱学）

1.6.2 单位制

遵照 1991 年 2 月 23 日的国防部指示 5000.2，Part 6,，Section M“使用公制系统”的规定，通常，MIL-HDBK-17 中的数据同时使用国际单位制（SI 制）和美国习惯单位制（英制）。ASTM E-380《度量制实施标准》则提供了准备作为世界标准度量单位的 SI 制（文献 1.6.2(a)）的应用指南。下列出版物（文献 1.6.2(b)-(e)）提供了使用 SI 制及换算因子的进一步指南：

(1) DARCOM P 706-470, *Engineering Design Handbook: Metric Conversion Guide*, July 1976.
(2) NBS Special Publication 330, "The International System of Units (SI)," National Bureau of Standards, 1986 edition.
(3) NBS Letter Circular LC 1035, "Units and Systems of Weights and Measures, Their Origin, Development, and Present Status," National Bureau of Standards, November 1985.
(4) NASA Special Publication 7012, "The International System of Units Physical Constants and Conversion Factors", 1964.

表 1.6.2 列出了与 MIL-HDBK-17 数据有关的、由英制向 SI 制换算的因子。

表1.6.2　英制与SI制换算因子

由	换算为	乘以
Btu/in^2-s	W/m^2	1.634246E+06
But-in（s-ft^2-℉）	W/(mK)	5.192204E+02
华氏度（℉）	摄氏度（℃）	T_C=(T_F-32)/1.8
华氏度（℉）	开氏度（K）	T_K=(T_F+459.67)/1.8
ft	m	3.048000E-01
ft^2	m^2	9.290304E-02
ft/sec	m/s	3.048000E-01
ft/s^2	m/s^2	3.048000E-01
in	m	2.540000E-02
in^2	m^2	6.451600E-04
in^3	m^3	1.638706E-05
kgf	牛顿（N）	9.806650E+00
kgf/m^2	帕斯卡（Pa）	9.806650E+00
kip（1000 lbf）	牛顿（N）	4.448222E+03
ksi（kip/in^2）	MPa	6.894757E+00
lbf-in	N-m	1.129848E-01
lbf-ft	N-m	1.355818E+00
lbf/in^2（psi）	帕斯卡（Pa）	6.894757E+03
lb/in^3	kg/m^3	2.767990E+04
Msi（106psi）	GPa	6.894757E+00
磅力（lbf）	牛顿（N）	4.48222E+00
磅质量（lb 重）	千克（kg）	4.535924E-01
Torr（乇）	帕斯卡（Pa）	1.33322E+02

* 换算因子中的字母“E”表示幂指数，字母“E”之后的二位数表示以 10 为底的幂次方。

1.7　定义

在MIL-HDBK-17中使用下列的定义。这个术语表还不很完备，但它给出了几乎所有的常用术语。当术语有其他意义时，将在正文和表格中予以说明。为了便于查找，这些定义按照英文术语的字母顺序排列。

A 基准值（A-basis）或 A 值（A-Value）——建立在统计基础上的材料性能。指定测量值母体的第一百分位数上的 95%下置信限，也是对指定母体中 99%较高值的 95%下容许限。

A 阶段（A-Stage）——热固性树脂反应的早期阶段，在该阶段中，树脂仍可溶于一定液体，并可能为液态，或受热时能变成液态。（有时也称之为甲阶段（resol））。

吸收（Absorption）——某种材料（吸收剂）吸收另一种材料（被吸收物质）的过程。

促进剂（Accelerator）—— 一种材料，当其与某种催化的树脂相混合时，将加速催化剂与树脂之间的化学反应。

准确度（Accuracy）——指测量值或计算值与已被认可的一些标准或规定值之间的吻合程度。准确度中包括了操作的系统误差。

加成聚合反应（Addition Polymerization）——用重复添加的方法，使单体链接起来形成聚合物的聚合反应；反应中不脱除水分子或其他简单分子。

粘合（Adhesion）——通过加力或联锁作用，或者通过二者同时作用，使得两个表面

在界面处结合在一起的状态。

胶粘剂（Adhesive）——能通过表面粘合，把两种材料结合在一起的物质。在本手册里，专指所生成的连接部位能传递大结构载荷的那些结构胶粘剂。

ADK——表示 k 样本 Anderson-Darling 统计量，用于检验 k 批数据具有相同分布的假设。

代表性样本（Aliquot）——较大样本中一个小的代表性样本。

老化（Aging）——在大气环境下曝露一段时间对材料产生的影响；将材料在某个环境下曝露一段时间间隔的处理过程

大气环境（Ambient）——周围的环境情况，例如压力与温度。

滞弹性（Anelasticity）——某些材料所显示的一种特性，其应变是应力与时间二者的函数。这样，虽然没有永久变形存在，在载荷增加以及载荷减少的过程中，都需要有一定的时间，才达到应力与应变之间的平衡。

角铺层（Angleply）——任何由正、负 θ 铺层构成的均衡层压板，其中 θ 与某个参考方向成锐角。

各向异性（Anisotropic）——非各向同性；即随着（相对于材料固有自然参考轴系的）取向的变化，材料的力学及/或物理性能不同。

芳纶（Aramid）—— 一种人造纤维，其纤维的构成物质是一种长链的合成芳族聚酰胺，其中至少有 85%的酰胺基（-CONH-）是直接与两个芳基环链接的。

纤维面积重量（Areal Weight of Fiber）——单位面积预浸料中的纤维重量，常用 g/m^2 表示，换算因子见表 1.3.2。

人工老化（Artificial Weathering）——指曝露在某些实验室条件下；这些条件可能是循环改变的，包括在各种地理区域内的温度、相对湿度、辐照能的变化，以及其大气环境中其他任何因素的变化。

纵横比、长径比（Aspect Ratio）——对于基本上为二维矩形形状的结构（如壁板），指其长向尺寸与短向尺寸之比。但在压缩加载下，有时是指其沿载荷方向的尺寸与横向尺寸之比。另外，在纤维的细观力学里，则指纤维长度与其直径之比。

热压罐（Autoclave）—— 一种封闭的容器，用于对在容器内进行化学反应或其他作业的物体，提供一个加热的或不加热的流体压力环境。

热压罐模压（Autoclave Molding）—— 一种类似袋压成形的工艺技术。将压力袋覆盖在铺贴件上，然后，把整个组合放入一个可提供热量和压力以进行零件固化的热压罐中。这个压力袋通常与外界相通。

编织轴（Axis of Braiding）——编织的构型沿其伸展的方向。

B 基准值（B-basis）或 B 值（B-Value）——建立在统计基础上的材料性能。指定测量值母体的第十百分位数上的 95%下置信限，也是对指定母体中 90%较高值的 95%下容许限。（见第一卷 8.1.4 节。）

B 阶段（B-Stage）——热固性树脂反应过程的一个中间阶段；在该阶段，当材料受热时变软，同时，当与某些液体接触时，材料会出现溶胀但并不完全熔化或溶解。在最后固化前，为了操作和处理方便，通常将材料预固化至这一阶段。（有时，也称为**乙阶段（resitol）**）。

袋压成形（Bag Molding）—— 一种模压或层压成形的方法；通过对一种柔性材料施加流体压力，将压力传到被模压或胶接的材料上。通常使用空气、蒸汽、水，或者用抽真空的手段，来提供流体压力。

均衡层压板（Balanced Laminate）—— 一种复合材料层压板，其所有非 0°和非 90°的其他相同角度单层，均只正负成对出现（但未必相邻）。

批、批料（Batch）或批、组（Lot）——对于纤维和树脂，指在同一加工过程中形成、并具有同一特性的一些材料。对于预浸料、单层和层压板，则指用同一批纤维和同一批树脂制成的材料。

挤压面积（Bearing Area）——销子直径与试件厚度之积。

挤压载荷（Bearing Load）——作用于接触表面上的压缩载荷。

挤压屈服强度（Bearing Yield Strength）——指当材料中挤压应力与挤压应变的比例关系出现偏离并到某一规定限值时，其所对应的挤压应力值。

弯曲试验（Bend Test）——用弯曲或折叠来测量材料延性的一种试验方法；通常是用持续加力的办法。在某些情况下，试验中可能包括对试件进行敲击；这个试件的截面沿一定长度是基本均匀的，而该长度则是截面最大尺寸的几倍。

粘接剂（Binder）——在制造模压制件过程中，为使毡子或预成形件中的纱束粘在一起而使用的一种胶接树脂。

二项随机变量（Binomial Random Variable）——指一些独立试验中的成功次数，其中每次试验的成功概率是相同的。

双折射率（Birefringence）——指（纤维的）两个主折射率之差，或指在材料给定点上其光程差与厚度之比。

吸胶布（Bleeder Cloth）—— 一层非结构的材料，以便在复合材料零件制造时，排出固化过程中的多余气体和树脂。吸胶布在完成固化后被除去，因而并不构成复合材料制件的一部分。

筒子架（Bobbin）—— 一种圆筒状或略带锥形的桶体，带突缘或无突缘，用于缠绕无捻纱、粗纱或有捻纱。

胶接（Bond）——用胶作粘结剂或不用胶，把一个表面粘着到另一个表面上。

编织物（Braid）——由三根或多根纱线所构成的体系，其中的纱彼此交织，但没有任何两根纱线是相互缠绕的。

编织角（Braid Angle）——与编织轴之间的真实角度。

双轴编织（Braid，Biaxial）——具有两个纱线系统的编织织物，其中一个纱线系统沿着$+\theta$方向，而另一个纱线系统沿着$-\theta$方向，角度由编织轴开始计量。

编织数（Braid Count）——沿编织织物轴线计算，每英寸上的编织纱数量。

菱形编织物（Braid, Diamond）——织物图案为一上一下（1×1）的编织织物。

窄幅织物（Braid, Flat）—— 一种窄的斜纹机织带；其每根纱线都是连续的，并与这个机织带的其他各纱相捻，但自身无捻。

Hercules 编织物（Braid, Hercules）——图案为三上三下（3×3）的编织织物。

提花编织物（Braid, Jacquard）——借助于提花机进行的编织图案设计；提花机是个脱落机构，可用它独立地控制大量纱束，产生复杂的图案。

规则编织物（Braid, Regular）——织物图案为二上二下（2×2）的编织织物。

正方形编织物（Braid, Square）——其纱线构成一个正方形图案的编织织物。

两维编织物（Braid, Two-Dimensional）——沿厚度方向没有编织纱的编织织物。

三维编织物（Braid, Three-Dimensional）——沿厚度方向有一或多根编织纱的编织织物。

三轴编织物（Braid, Triaxial）——在编织轴方向上设置有衬垫纱的双轴编织织物。

编织（Braiding）—— 一种纺织的工艺方法；它将两个或多个纱束、有捻纱或带子沿斜向缠绕，形成一个整体的结构。

宽幅（Broadgoods）—— 一个不太严格的术语，指宽度大于约 305 mm（12 in）的预浸料，它们通常由供货商以连续卷提供。这个术语通常用于指经过校准的单向带预浸料及织物预浸料。

（复合材料）屈曲（Buckling （Composite））—— 一种结构响应的模式，其特征是，由于对结构元件的压缩作用，导致材料的面外挠曲变形。在先进复合材料里，屈曲不仅可能采取常规的总体或局部失稳形式，同时也可能采取一些单独纤维的细观失稳形式。

（无捻）纤维束（Bundle）—— 一个普通术语，指一束基本平行的长丝或纤维。

C 阶段（C-Stage）——热固性树脂固化反应的最后阶段，在该阶段，材料成为几乎既不可溶解又不可熔化的固态。（通常认为已充分固化，有时称为丙阶段（resite））

绞盘（Capstan）—— 一种摩擦型提取装置，用以将编织物由折缝移开，其移动速度决定了编织角。

碳纤维（Carbon Fibers）——将有机前驱体纤维（如人造纤维、聚丙烯腈（PAN））进行高温分解，再置于一种惰性气体内，从而生产出的纤维。这个术语通常可与“石墨”纤维（graphite）互相通用；然而，碳纤维与石墨纤维的差别在于，其纤维制造和热处理的温度不同，以及所形成纤维的碳含量不同。典型情况是，碳纤维在大约 1300°C（2400°F）时进行碳化，经检验含有 93-95%的碳；而石墨纤维则在 1900~3000°C（3450~5450°F）进行石墨化，经检验含有 99%以上的元素碳。

载体（Carrier）——通过编织物的编织动作来输送有捻纱的机械装置，典型的载体包括筒子架纺锤、迹径跟随器和拉紧装置。

均压板（Caul Plates）—— 一种无表面缺陷的平滑金属板，与复合材料铺层具有相同尺寸和形状。在固化过程中，均压板与铺贴层直接接触，以传递垂直压力，并使层压板制件的表面平滑。

检查（Censoring）——如果每当观测值小于或等于 M（大于或等于 M）时，记录其实际观测值，则称数据在 M 处是右（左）检查的。若观测值超过（小于）M，则观测值记为 M。

链增长聚合反应（Chain-Growth Polymerization）——两种主要聚合反应机制之一。在这种链锁聚合反应中，这些反应基在增长过程中不断地重建。一旦反应开始，通过由某个特殊反应引发源（可以是游离基、阳离子或阴离子）所开始的反应链，使聚合物的分子迅速增长。

层析图（Chromatogram）——混合物溶液体系中的洗出溶液（洗出液）经色谱仪分离后，各组分峰值的色谱仪响应图。

缠绕循环（Circuit）——缠绕机中纤维给进机构的一个完整往返运动。缠绕段的一个完整往返运动，是从任意一点开始，到缠绕路径中、通过该起点并到与轴相垂直的平面上的另外一点为止。

共固化（Cocuring）——指在同一固化周期中，在将一个复合材料层压板固化的同时，将其胶接到其他已经准备的表面上。（见**二次胶接 Secondary Bonding**）。

线性热膨胀系数（Coefficient of Linear Thermal Expansion）——温度升高一度，每单位长度上所产生的长度改变。

离散系数（Coefficient of Variation）——母体（或样本）标准差与母体（或样本）平均值之比。

准直（Collimated）——使平行。

相容（Compatible）——指不同树脂体系能够彼此在一起处理，且不致使最终产品性能下降的能力。

复合材料分类（Composite Class）——本手册中指复合材料的一种主要分类方式，其分类按纤维体系和基体类型定义，如有机基纤维复合材料层压板。

复合材料（Composite Material）——复合材料是由成分或形式在宏观尺度都不同的材料构成的复合物。各组分在复合材料中保持原有的特性，即各组分尽管变形一致，但它们彼此完全不溶解或者相互不合并。通常，各组分从物理上能够区别，并且相互间存在界面。

混合料（Compound）——具有最终成品所需各种材料的一种或多种聚合物的混合物。

缩聚反应（Condensation Polymerization）——一种特殊形式的逐步聚合反应，其特点是，在反应基的逐级加成过程中，有水或其他简单分子的生成。

置信系数（Confidence Coefficient）——见**置信区间 Confidence Interval**。

置信区间（Confidence Interval）——置信区间按下列三者之一进行定义：

$$(1)\quad p\{a<\theta\}\le 1-a$$

$$(2)\quad p\{\theta<b\}\le 1-a$$

$$(3)\quad p\{a<\theta<b\}\le 1-a$$

式中 1-α 称为置信系数。称类型(1)或(2)的描述为单侧置信区间，而称类型(3)的描述为双侧置信区间。对于式(1)，α为下置信限；对于式(2)，b 为上置信限。置信区间内包含参数θ的概率，至少为 1-α。

组分（Constituent）——通常指一个大组合的元素。在先进复合材料中，主要的组分是纤维和基体。

长丝（Continuous Filament）——指其纱线与纱束的长度基本相同的纱束。

耦联剂（Coupling Agent）——一种与复合材料的增强体或基体发生作用的化学物质，用以形成或提供较强的界面胶接。耦合剂通过水溶液或有机溶液或由气体相加到增强体中，或作为添加剂加到基体中。

覆盖率（Coverage）——对表面上被编织物所覆盖部分的量度。

龟裂（Crazing）——在有机基体表面或表面下的可见细裂纹。

筒子架（Creel）——一个用来支持无捻纱、粗纱或纱线的构架，以便能平稳而均匀地拉动很多丝束，而不会搞乱。

蠕变（Creep）——外加应力所引起应变中与时间有关的那部分应变。

蠕变率（Creep, Ratio of）——蠕变（应变）-时间曲线上，在给定时刻处的曲线斜率。

卷曲（Crimp）——编织过程中在编织织物内产生的波纹。

卷曲角（Crimp Angle）——从丝束的平均轴量起、单个编织纱的最大锐角。

卷曲转换（Crimp Exchange）——使编织纱体系在受拉或压时达到平衡的工艺。

临界值（Critical Values）——当检验单侧统计假设时，其临界值是指，如果该检验的统计大于（小于）此临界值时，这个假设将被拒绝。当检验双侧统计假设时，要决定两个临界值，如果该检验的统计小于较小的临界值时，或大于较大的临界值时，这个假设将被拒绝。在以上这两种情况下，所选取的临界值取决于所希望的风险，即当此假设为真实但却被拒绝的风险，（通常取 0.05）。

正交铺层（Crossply）——指任何非单向的长纤维层压板，与角铺层的意义相同。在某些文献中，术语“正交铺层”是指各铺层间彼此成直角的层压板，而“角铺层”则指除此之外的所有其他铺层方式。在本手册中，这两个术语被作为同义词使用。由于使用了层压板铺层方向代码，因而没有必要只为其中某种基本铺层方向而保留单独的术语。

累积分布函数（Cumulative Distribution Function）——见第一卷 8.1.4 节。

固化（Cure）——指通过化学反应，即缩合反应、闭环反应或加成反应等，使热固性树脂的性能发生不可逆的变化。可以在添加或不加催化剂、在加热或者不加热的情况下，通过添加固化（交联）剂来实现固化。同时，也可通过加成反应实现固化，如环氧树脂体系的酐固化过程。

固化周期（Cure Cycle）——指为了达到规定的性能，将反应的热固性材料置于规定的条件下进行处理的时间进程。

固化应力（Cure Stress）——复合材料结构在固化过程中所产生的残余内应力。一般情况下，当不同的铺层具有不同的热膨胀系数时，会产生固化应力。

脱胶（Debond）——指有意将胶接接头或胶接界面剥离*，通常用于修理或重新加工情况。（见**脱粘 Disbond，未粘住 Unbond**）。

变形（Deformation）——由于施加载荷或外力所引起的试件形状变化。

退化（Degradation）——指在化学结构、物理特性或外观等方面出现的有害变化。

分层（Delamination）——指层压板中铺层之间的材料分离。分层可能出现在层压板中的局部区域，也可能覆盖很大的区域。在层压板固化过程或在随后使用过程的任何时刻，都可能因各种原因出现分层。

旦（Denier）—— 一种表示线性密度的直接计量体系，等于 9 000 m 长的纱、长丝、纤维或其他纺织纱线所具有的质量（克）。

密度（Density）——单位体积的质量。

解吸（Desorption）——指从另一种材料中释放出所吸收或所吸附材料的过程。解吸是吸收、吸附的逆过程，或者，是这二者的逆过程。

偏差（Deviation）——相对于规定尺度或要求的差异，通常规定其上限或下限。

介电常数（Dielectric Constant）——板极之间具有某一介电常数的电容器，当以真空取代电解质时，二者电容之比即其介电常数，这是对单位电压下每单位体积所储存电荷的一个度量。

---

* 译者注：原文为 A deliberate separation of a bonded joint or interface.

介电强度、抗电强度、绝缘强度（Dielectric strength）——当电解质材料破坏时，单位厚度的平均电压。

脱胶（Disbond）——在两个被胶接体间的胶接界面内出现胶接破坏或分离情况的区域。在结构寿命的任何时间，都可能由于各种原因发生脱胶。另外，用通俗的话来说，脱胶还指在层压板制品两个铺层间的分离区域，（这时，通常更多使用“分层”一词。）（见**脱胶 Debond，未粘住 Unbond，分层 Delamination**）。

分布（Distribution）—— 一个公式，给出某个数值落入指定范围内的概率。（见**正态分布，Weibull 分布和对数正态分布**。）

干态（Dry）——在相对湿度为 5%或更低的周围环境下，材料达到湿度平衡的一种状态。

干纤维区（Dry Fiber Area）——指纤维未完全被树脂包覆的纤维区域。

延展性（Ductility）——材料在出现断裂之前的塑性变形能力。

弹性（Elasticity）——在卸除引起变形的作用力之后，材料能立即恢复到其初始尺寸及形状的特性。

伸长（率）（Elongation）——在拉伸试验中，试件标距长度的增加或伸长，通常用初始标距的百分数来表示。

洗出液（Eluate）——（液相层析分析中）由分离塔析出的液体。

洗提剂（Eluent）——对进入、通过以及流出分离塔的标本（溶质）成分，进行净化或洗提所使用的液体（流动相）。

丝束（End）——指正被织入或已被织入到产品中的单根纤维、纱束、无捻纱或有捻纱，丝束可以是机织织物中的一支经纱或细线。对于芳纶和玻璃纤维，丝束通常是未加捻的连续长丝纱束。

环氧当量（Epoxy Equivalent Weight）——含有一个化学当量环氧基树脂所相应的重量，用克数表示。

环氧树脂（Epoxy Resin）——指具有如右图所示环氧基特征的一些树脂，但其结构形式可能是多样的。（环氧基或环氧化物基通常表现为环氧丙基醚、环氧丙基胺、或作为脂环族系的一部分。通常复合材料应用芳族型环氧树脂。）

环氧基

引伸计（Extensometer）——用于测量线性应变的一种装置。

F-分布（F-Distribution）——见第一卷 8.1.4 节。

织物（非机织）（Fabric, Nonwoven）——通过机械、化学、加热或溶解的手段、以及这些手段的组合，实现纤维的胶接、联锁或胶接加联锁，从而形成的一种纺织结构。

织物（机织）（Fabric, Woven）——由交织的纱或纤维所构成的一种普通材料结构，通常为平面结构。在本手册中，专指用先进纤维纱按规定的编织花纹所织成的布，用作为先进复合材料单层中的纤维组分。在这个织物单层中，其经向被取为纵向，类似于长丝单层中的长丝纤维方向。

折缝（Fell）——在编织形式中的某种点，其定义为编织体系的纱线终止彼此相对运动的点。

纤维（Fiber）——长丝材料的一般术语。通常把纤维用作为长丝的同义词，把纤维作为一般术语，表示有限长度的长丝。天然或人造材料的一个单元，它构成了织物或其他纺织结构的基本要素。

纤维含量（Fiber Content）——复合材料中含有的纤维数量。通常，用复合材料的体积百分数或重量百分数来表示。

纤维支数（Fiber Count）——复合材料的规定截面上，单位铺层宽度上的纤维数目。

纤维方向（Fiber Direction）——纤维纵轴在给定参考轴系中的取向或排列方向。

纤维体系（Fiber System）——构成先进复合材料的纤维组分中，纤维材料的类型及排列方式。纤维体系的例子有，校准平行的长纤维或纤维纱、机织织物、随机取向的短纤维带、随机纤维毡、晶须等。

纤维体积含量（Fiber Volume （Fraction））——见**纤维含量（Fiber Content）**。

单丝、长丝（Filament）——纤维材料的最小单元。这是在抽丝过程中形成的基本单元，把它们聚集构成纤维束（以用于复合材料）。通常长丝的长度很长直径很小，长丝一般不单独使用。当某些纺织长丝具有足够的强度和韧性时，可以用作为纱线。

长丝复合材料（Filamentary Composites）——用连续纤维进行增强的一种复合材料。

纤维缠绕（Filament Winding）——见**缠绕（Winding）**

纤维缠绕的（Filament Wound）——指与用纤维缠绕加工方法所制成产品有关的。

纬纱（Fill）——机织织物中与经纱成直角、从布的织边到织边布置的纱线。

填料（Filler）——添加到材料中的一种相对惰性的物质，用以改变材料的物理、力学、热力学、电学性能以及其他的性能，或用以降低材料的成本。有时，这个术语专指颗粒状添加物。

表面处理剂（Finish）或浸润材料（Size System）—— 一种用于处理纤维（表面）的材料，其中含有耦联剂，以改善复合材料中纤维表面与树脂基体之间的结合。此外，在表面处理剂中还经常含有一些成分，它们可对纤维表面提供润滑，防止操作过程中的纤维表面擦伤；同时，还含有粘合剂，以增进纱束的整体性，及便于纤维的包装。

确定性影响（Fixed Effect）——由于处理或条件有一特定改变，使测定量出现的某个系统移位。（见第一卷 8.1.4 节。）

溢料（Flash）——指从模具或模子分离面溢出的，或从封闭模具中挤出的多余材料。

仿型样板（Former Plate）——附着在编织机上，用于帮助进行折缝定位的一种硬模。

断裂延性（Fracture Ductility）——断裂时的真实塑性应变。

标距（Gage Length）——在试件上需要确定应变或长度变化的某一段初始长度。

凝胶（Gel）——树脂固化过程中，由液态逐步发展成的初始胶冻状固态。另外，也指由含有液体的固体聚集物所组成的半固态体系。

凝胶涂层（Gel Coat）—— 一种快速固化的树脂，用于模压成形过程中改善复合材料的表面状态，它是在脱模剂之后，最先涂在模具上的树脂。

凝胶点（Gel Point）——指液体开始呈现准弹性性能的阶段。（可由黏度-时间曲线上的拐点发现这个凝胶点。）

凝胶时间（Gel Time）——指从预定的起始点到凝胶开始（凝胶点）的时间周期，由具体的试验方法确定。

玻璃（Glass）—— 一种熔融物的无机产品，它在冷却成固体状态时没有产生结晶。在本手册中，凡说到玻璃，均指其（用作为长丝、机织织物、纱、毡以及短切纤维等情况的）纤维形态。

玻璃布（Glass Cloth）——按照常规机织的玻璃纤维材料（见**稀纱布 Scrim**）。

玻璃纤维（Glass Fibers）—— 一种由熔融物抽丝、冷却后成为非晶刚性体的无机纤维。

玻璃化转变（Glass Transition）——指非晶态聚合物、或处于无定形阶段的部分晶态聚合物的可逆变化过程；或者由其黏性状态或橡胶状态转变成硬而相对脆性的状态，或由其硬而相对脆性的状态转变为黏性状态或橡胶状态。

玻璃化转变温度（Glass Transition Temperature）——在发生玻璃化转变的温度范围内，其近似的中点温度值。

石墨纤维（Graphite Fibers）——见**碳纤维（Carbon Fibers）**。

坯布（Greige）——指未经表面处理的织物。

手工铺贴（Hand Lay-up）—— 一种工艺过程，即把构件放到模具上或工作台面上，然后用手工将随后的铺层铺叠起来。

硬度（Hardness）——抵抗变形的能力；通常通过压痕来测定硬度。标准试验形式有布氏（Brinell）试验、洛氏（Rockwell）试验、努普（Knoop）试验以及维克（Vickers）试验。

热清洁（纤维）（Heat Cleaned）——指将玻璃纤维或其他纤维曝露在高温中，以除去其表面上与所用树脂体系不相容的浸润剂或粘接剂。

多相性（Heterogeneous）——说明性术语，表示材料是由各自单独可辨的各种不相似成分组成；也指由内部边界分开且性能不同的区域所组成的介质。（注意，非均质材料不一定是多相的。）

均质性（Homogeneous）——说明性术语，指其成分处处均匀的材料；也指无内部物理边界的介质；还指其性能在内部每一点处均相同的材料，即材料性能相对于空间坐标为常数（但是，对方向坐标则不一定）。

水平剪切（Horizontal Shear）——有时用于指层间剪切。在本手册中这是一个未经认可的术语。

相对湿度（Humidity, Relative）——指当前水蒸汽压与相同温度下标准水蒸汽压之比。

混杂（Hybrid）——指由两种或两种以上复合材料体系的单层所构成的复合材料层压板，或指由两种或两种以上不同的纤维（如碳纤维与玻璃纤维，或碳纤维与芳纶纤维）相组合而构成的结构（单向带、织物及其他可能组合成的结构形式）。

吸湿的（Hygroscopic）——指能够吸纳并保存大气的湿气。

滞后（Hysteresis）——指在一个完整的加载及卸载循环中所吸收的能量。

夹杂（Inclusion）——在材料或部件内部中出现的物理的或机械的不连续体，一般由夹带的外来固态材料构成。夹杂物通常可以传递一些结构应力和能量场，但其传递方式却明显不同于母体材料。

整体复合材料结构（Integral Composite Structure）——指把本身包含几个结构元件的结构，作为一个单一、复杂、连续的整体进行铺贴和固化后所得的复合材料结构。例如，

把翼梁、翼肋以及机翼盒段的加筋蒙皮，制成一个单一的整体件，而不是分别去制造这些结构元件，再按常规方式、用胶接或机械紧固件将其装配起来的结构。有时，也不太严格地用该术语泛指任何不用机械连接件进行装配的复合材料结构。

界面（Interface）——指复合材料中物理上可区别的不同组分之间的边界。

层间的（Interlaminar）——指在层压板单层之间的。

讨论：用于说明相邻单层之间存在或出现的物体（如空隙）、事件（如断裂）或势场（如应力）。

层间剪切（Interlaminar Shear）——使层压板中两个铺层沿其界面产生相对位移的剪切力。

中间挤压应力（Intermediate Bearing Stress）——指挤压的载荷-变形曲线上某点所对应的挤压应力，在该点处的切线斜率等于挤压应力除以初始孔径后的某个给定百分数（通常为 4%）。

层内的（Intralaminar）——指在层压板的单层之内的。

讨论：用于说明存在或出现的物体（如空隙）、事件（如断裂）或势场（如应力）。

各向同性（Isotropic）——指所有方向均具有一致的性能。各向同性材料中，性能的测量值与测试轴的方向无关。

挤卡状态（Jammed State）——编织织物在受拉伸或压缩时，其织物变形情况取决于纱的变形性能的一种状态。

针织（Knitting）——将单根或多根纱的一系列线圈相互联锁以形成织物的一种方法。

转折区域（Knuckle Area）——在纤维缠绕部件不同几何形状截面之间的过渡区域。

***k* 样本数据（k-Sample Data）**——从 *k* 批样本中取样时，由这些观测值所构成的数据集。

衬垫纱（Laid-In Yarns）——在三轴编织物中，夹在斜纱之间的一个纵向纱体系。

单层（Lamina）——指层压板中一个单一的铺层或层片。

讨论：在缠绕时，一个单层就是一个层片。

单层（laminae）——单层（Lamina）的复数形式。

层压板（Laminate）——对于纤维增强的复合材料，指经过压实的一组单层（铺层），这些单层关于某一参考轴取同一方向角或多个方向角。

层压板取向（Laminate Orientation）——复合材料交叉铺设层压板的结构形态，包括交叉铺层的角度、每个角度的单层数目、以及准确的单层铺设顺序。

格子花纹（Lattice Pattern）——纤维缠绕的一种花纹，具有固定的开孔排列方式。

铺贴（Lay-up）（动词）——按照规定的顺序和取向，将材料的单层进行逐层叠合。

铺层（Lay-up）（名词）——(1)在固化或压实前，按照规定的顺序和取向铺层后的叠合件。(2)在固化或压实前，包括铺层叠合件、装袋材料、透气材料等的完整叠合体。(3)对层压板组分材料、几何特性等情况的描述。

对数正态分布（Lognormal Distribution）—— 一种概率分布。在该分布中，从母体中随机选取的观测值落入 a 和 b（$0<a<b<B$）之间的概率，由正态分布曲线下面在 $\log a$ 和 $\log b$ 之间的面积给出。可以采用常用对数（底数 10）或自然对数（底数 e）（见第一卷 8.1.4 节）。

下置信限（Lower Confidence Bound）——见置信区间（Confidence Interval）。

宏观（性能）（Macro）——当涉及复合材料时，表示复合材料作为结构元素的总体特性，而不考虑其个体的特性（即组分的特性）。

宏观应变（Macro Strain）——指任何有限测量标距范围内的平均应变；与材料的原子间距相比，这个标距是个大值。

芯模（Mandrel）——在用铺贴、纤维缠绕或编织方法生产零件的过程中，用作基准的一种成形装置或阳模。

毡子（Mat）——用粘接剂把随机取向的短切纤维或卷曲纤维松散地粘合在一起所构成的纤维材料。

材料验收（Material Acceptance）——对来料进行测试，以保证其满足要求。

材料取证（Material Qualification）——公司或机构在验收生产用材料时用的程序。

材料体系（Material System）——指一种特定的复合材料，它由按规定几何比例和排列方式的特定组分构成，并具有用数值定义的材料性能。

材料体系类别（Material System Class）——用于本手册时，指具有相同类型组分材料、但并不唯一定义其具体组分的一组材料体系；如石墨/环氧类材料。

材料变异性（Material Variability）——由于材料本身在空间与一致性方面的变化以及材料处理上的差异，而形成的一种变异源。（见第一卷 8.1.4 节）。

基体（Matrix）——基本上是均质的材料；复合材料的纤维体系被嵌入其中。

基体含量（Matrix Content）——复合材料中的基体数量，用重量百分比或体积百分比来表示。

平均值（Mean）——见**样本平均值（Sample Mean）和母体平均值（Population Mean）**。

力学性能（Mechanical Properties）——材料在受力作用时与其弹性和非弹性反应相关的材料性能，或者关于其应力与应变之间关系的性能。

中位数（Median）——见**样本中位数（Sample Median）**和**母体中位数（Population Median）**。

细观（性能）（Micro）——当涉及复合材料时，仅指组分（即基体与增强材料）和界面的性能，以及这些性能对复合材料性能的影响。

微应变（Microstrain）——在标距的长度可与材料的原子间距相比时的应变。

弦线模量（Modulus, Chord）——应力应变曲线任意两点之间所引弦线的斜率。

初始模量（Modulus, Initial）——应力应变曲线初始直线段的斜率。

割线模量（Modulus, Secant）——从原点到应力应变曲线任何特定点所引割线的斜率。

切线模量（Modulus, Tangent）——由应力应变曲线上任一点切线所导出的应力差与应变差之比。

弹性模量（Modulus, Young's）——在材料弹性极限以内其应力差与应变差之比。（适用于拉伸与压缩情况）。

刚性模量（Modulus of Rigidity），剪切模量或扭转模量（Shear Modulus or Torsional Modulus）——剪切应力或扭转应力低于比例极限时，其应力与应变之比值。

弯曲破断模量（Modulus of Rupture, in Bending）——指梁受载到弯曲破坏时，该梁最外层纤维（导致破坏的）最大拉伸或压缩应力值。该值由弯曲公式计算：

$$F^{b}=\frac{Mc}{I} \qquad 1.7(a)$$

式中：M=由最大载荷与初始力臂计算得到的最大弯矩，

c=从中性轴到破坏的最外层纤维之间的初始距离，

I=梁截面关于其中性轴的初始惯性矩。

扭转破断模量（Modulus of Rupture, in Torsion）——圆形截面构件受扭转载荷到达破坏时，其最外层纤维的最大剪切应力；最大剪切应力由下列公式计算：

$$F^{s}=\frac{Tr}{J} \qquad 1.7(b)$$

式中：T=最大扭矩，

r=初始外径，

J=初始截面的极惯性矩。

吸湿量（Moisture Content）——在规定条件下测定的材料含水量，用潮湿试件质量（即干物件质量加水分质量）的百分数来表示。

吸湿平衡（Moisture Equilibrium）——当试件不再从周围环境吸收水分，或向周围环境释放水分时，试件所达到的状态。

脱模剂（Mold Release Agent）——涂在模具表面上、有助于从模具中取出模制件的润滑剂。

模制边（Molded Edge）——在模压后实际不再改变而用于最终成形工件的边沿，特别是沿其长向没有纤维丝束的边沿。

模压（Molding）——通过加压和加热，使聚合物或复合材料成形为具有规定形状和尺寸的实体。

单层（Monolayer）——基本的层压板单元，由它构成交叉铺设或其他形式的层压板。

单体（Monomer）—— 一种由分子组成的化合物，其中每个分子能提供一个或更多构成的单元。

NDE（Nondestructive Evaluation）——无损评定，一般认为是 NDI（无损检测）的同义词。

NDI（Nondestructive Inspection）——无损检测。用以确定材料、零件或组合件的质量和特性，而又不致永久改变对象或其性能的一种技术或方法。

NDT（Nondestructive Testing）——无损试验，一般当作 NDI（无损检测）的同义词。

颈缩（Necking）—— 一种局部的横截面面积减缩，这现象可能出现在材料受拉伸应力作用下的情况下。

负向偏斜（Negatively Skewed）——如果一个分布不对称且其最长的尾端位于左侧，则称该分布是负向偏斜的。

试件名义厚度（Nominal Specimen Thickness）——铺层的名义厚度乘以铺层数所得的厚度。

名义值（Nominal Value）——为方便设计而规定的值，名义值仅在名义上存在。

正态分布（Normal Distribution）—— 一种双参数（μ，σ）的概率分布族，观测值落入 a 和 b 之间的概率，由下列分布曲线在 a 和 b 之间所围面积给出（见第一卷 8.1.4 节）：

$$f(x)=\frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2}$$

归一化（Normalization）——将纤维控制性能的原始测试值，按某个单一（规定）的纤维体积含量进行修正的一种数学方法。

归一化应力（Normalized Stress）——相对于一个规定的纤维体积含量修正后的应力值，办法是，把测量的应力值乘以试件纤维体积与规定纤维体积之比。可以用实验的方法直接测量纤维体积而得出这个比值；或者用试件厚度与纤维面积重量直接计算这个比值。

观测显著性水平（OSL，Observed Significance Level）——当零假设（null hypotheses）成立时，观测到一个较极端的试验统计量的概率。

偏移剪切强度（Offset Shear Strength）——（由正确实施的材料性能剪切响应试验），弦线剪切弹性模量的平行线与剪切应力/应变曲线交点处对应的剪切应力值，在该点，这个平行线已经从原点沿剪切应变轴偏移了一个规定的应变偏置值。

低聚物（Oligomer）——只由几种单体单元构成的聚合物，如二聚物、三聚物等，或者是它们的混合物。

单侧容限系数（One-Side Tolerance Limit Factor）——见**容限系数（Tolerance Limit Factor）**。

正交各向异性（Orthotropic）——具有三个相互垂直的弹性对称面（的材料）。

烘干（Oven Dry）——材料在规定的温度和湿度条件下加热，直到其质量不再有明显变化时的状态。

PAN 纤维（PAN Fibers）——由聚（丙烯腈）纤维经过受控高温分解而得到的增强纤维。

平行层压板（Parallel Laminate）——由机织织物制成的层压板，其铺层均沿织物卷中原先排向的位置铺设。

平行缠绕（Parallel Wound）——描述将纱或其他材料绕到带突缘绕轴上的术语。

剥离层（Peel Ply）—— 一种不含树脂的材料层，用于保护层压板，供稍后进行二次胶接。

pH 值（pH）——对于溶液酸碱度的度量，中性时数值为 7，其值随酸度增加而逐渐减小，随碱度增加而逐渐提高。

纬纱密度（Pick Count）——机织织物每单位英寸或每公分长度的纬纱数目。

沥青纤维（Pitch Fibers）——由石油沥青或煤焦油沥青所制成的增强纤维。

塑料（Plastic）—— 一种含有一种或多种高分子量有机聚合物的材料，其成品为固态，但在其生产或加工为成品的某阶段，可以流动成形。

增塑剂（Plasticizer）—— 一种低分子量材料，加到聚合物中以使分子链分离，其结果是，降低了玻璃化转变温度，减小了刚度和脆性，同时改善工艺性。（注意，许多聚合物材料不需要使用增塑剂。）

合股纱（Plied Yarn）——由两股或两股以上的单支纱经一次操作加捻而成的纱。

层数（Ply Count ）——在层压复合材料中，指用于构成该复合材料的铺层数或单层数。

泊松比（Poisson's Ratio）——在材料的比例极限以内，均布轴向应力所引起横向应变与其相应轴向应变的比值（绝对值）。

聚合物（Polymer）—— 一种有机材料，其分子的构成特征是，重复一种或多种类型的单体单元。

聚合反应（Polymerization）——通过两个主要的反应机制，使单体分子链接一起而构成聚合物的化学反应。增聚合是通过链增进行，而大多数缩聚合则通过跃增来实现。

母体（Population）——指要对其进行推论的一组测量值，或者，指在规定的试验条件下有可能得到的测量值全体。例如，“在相对湿度95%和室温条件下，碳/环氧树脂体系A所有可能的极限拉伸强度测量值”。为了对母体进行推论，通常有必要对其分布形式作假设，所假设的分布形式也可称为母体。（见第一卷8.1.4节）。

母体平均值(Population Mean)——在按母体内出现的相对频率对测量值进行加权后，给定母体内所有可能测量值的平均值。

母体中位数（Population Median）——指母体中测量值大于和小于它的概率均为0.5的值。（见第一卷8.1.4节）。

母体方差（Population Variance）——母体离差的一种度量。

孔隙率（Porosity）——指实体材料中截留多团空气、气体或空腔的一种状态，通常，用单位材料中全部空洞体积所占总体积（实体加空洞）的百分比来表示。

正向偏斜（Positively Skewed）——如果是一个不对称分布，且最长的尾端位于右侧，则称该分布是正向偏斜。

后固化（Postcure）——补充的高温固化，通常不再加压，用以提高玻璃化温度、改善最终性能或完善固化过程。

适用期（Pot Life）——在与反应引发剂混合以后，起反应的热固性合成物仍然适合预期加工处理的时间周期。

精度（Precision）——所得一组观测值或试验结果相一致的程度，精度包括了重复性和再现性。

（碳或石墨纤维的）前驱体（Precursor）——用以制备碳纤维和石墨纤维的PAN（聚丙烯腈）纤维或沥青纤维。

预成形件（Preform）——干织物与纤维的组合体，准备提供某一种湿树脂注射工艺方法使用。可以对预成形件缝合，或者用其他方法加以稳定，以保持其A形态。一个混合的预成形件可以包含热塑性的纤维，并可用高温和加压来压实，而无需注射树脂。

预铺层（Preply）——预浸材料的铺层，它已经按照客户规定的铺层顺序进行了铺贴。

预浸料（Prepreg）——准备好可供模压或固化的片状材料，它可能是用树脂浸渍过的丝束、单向带、布或毡子，它可存放待用。

压力（Pressure）——单位面积上的力或载荷。

概率密度函数（Probability Density Function）——见第一卷8.1.4节。

比例极限(Proportional Limit)——与应力应变的比例关系不存在任何偏离的情况（所谓虎克定律）下，材料所能承受的最大应力。

准各向同性层压板（Quasi-Isotropic Laminate）—— 一种均衡而对称的层压板，在这层压板的某个给定点上，所关心的本构关系特性在层压板平面内呈现各向同性。

讨论：通常的准各向同性层压板为$[0/\pm60]_s$及$[0/\pm45/90]_s$。

随机影响（Random Effect）——由于某个外部（通常不可控）因素有特定量级的改

变，测量值出现的变化。（见第一卷 8.1.4 节）。

随机误差（Random Error）——数据变异中，由未知或不可控的因素造成，并且独立而不可预见地影响着每一观察值的那一部分。（见第一卷 8.1.4 节）。

断面收缩（率）（Reduction of Area）——拉伸试验试件的初始截面积与其最小横截面积之差，通常表示为初始面积的百分数。

折射率（Refractive Index）——空气中的光速（具有确定波长）与在被检物质中的光速之比，也可定义成，当光线由空气穿入该物质时其入射角正弦与反射角正弦之比。

增强塑料（Reinforced Plastic）——其中埋置了大刚度或高强度纤维的一种塑料，这样可以改善基本树脂的某些力学性能。

脱模剂（Release Agent）——见**脱模剂（Mold Release Agent）**

回弹（Resilience）——从变形状态恢复的过程中，材料能抵抗约束力而作功的性能。

树脂（Resin）—— 一种有机聚合物或有机预聚合物，用作为复合材料的基体以包容纤维增强物，或用作为一种胶粘剂。这种有机基体可以是热固性或热塑性的，同时，可能含有多种成分或添加剂，以影响其可控性、工艺性能和最终的性能。

树脂含量（Resin Content）——见**基体含量（Matrix content）**。

贫脂区（Resin Starve Area）——指复合材料构件中其树脂未能连续平滑地包覆纤维的区域。

树脂体系（Resin System）——指树脂与一些成分的混合物，这些成分是为满足预定工艺和最终成品的要求所需要的，例如催化剂、引发剂、稀释剂等成分。

室温大气环境（RTA）——(1)在实验室大气相对湿度下，23±3°C（73±5°F）的环境条件；(2)一种材料调节状态，即在紧随其压实/固化后，将材料储存在 23±3°C（73±5°F）和最大相对湿度 60%条件下。

粗纱（Roving）——由略微加捻或不经加捻的若干原丝、丝束或纱束所汇成的平行纤维束。在细纱生产中，指处于梳条和纱之间的一种中间状态。

S 基准值（S-Basis）或 S 值（S-Value）——力学性能值，通常为有关的政府规范或 SAE（美国汽车工程师学会）宇航材料规范中对此材料所规定的最小力学性能值。

样本（Sample）——准备用来代表所有全部材料或产品的一小部分材料或产品。从统计学上讲，一个样本就是取自指定母体的一组测量值。（见第一卷 8.1.4 节）。

样本平均值（Sample Mean）——样本中所有测量值的算术平均值。样本平均值是对母体均值的一个估计量。（见第一卷 8.1.4 节）。

样本中位数（Sample Median）——将观测值从小到大排序，当样本大小为奇数时，居中的观测值为样本中位数；当样本大小 n 为偶数时，中间两个观测值的平均值为样本中位数。如果母体关于其平均值是对称的，则样本中位数也就是母体平均值的一个估计量。（见第一卷 8.1.4 节）。

样本标准差（Sample Standard Deviation）——即样本方差的平方根（见第一卷 8.1.4 节）。

样本方差（Sample Variance）——等于样本中观测值与样本平均值之差的平方和除以 n-1。（见第一卷 8.1.4 节）。

夹层结构（Sandwich Construction）—— 一种结构壁板的概念，其最简单的形式是，

在两块较薄而且相互平行的结构板材中间，胶接一块较厚的轻型芯子。

饱和（状态）（Saturation）—— 一种平衡状态，此时，在所指定条件下的吸收率基本上降为零。

稀纱布（Scrim），亦称玻璃布、载体（Glass Cloth，Carrier）—— 一种低成本、织成网状结构的机织织物，用于单向带或其他 B 阶段的材料的加工处理，以便操作。

二次胶接（Secondary Bonding）——通过胶粘剂胶接工艺，将两件或多件已固化的复合材料零件结合在一起，这个过程中发生的唯一化学反应或热反应，是胶粘剂自身的固化。

织边（Selvage 或 Selvedge）——织物中与经纱平行的织物边缘部分。

残留应变（Set）——当完全卸除产生变形的作用力后，物体中仍然残留的应变。

剪切断裂（Shear Fracture）——沿滑移面平移所导致的断裂模式，滑移面的取向主要沿剪切应力的方向。

储存期（Shelf Life）——材料、物质、产品或试剂在规定的环境条件下储存，并能够继续满足全部有关的规范要求和/或保持其适用性的情况下，其能够存放的时间长度。

短梁剪切强度（Short Beam Strength（SBS））——正确执行 ASTM 试验方法 D 2344 所得的试验结果。

显著性（Significant）——如果某检验统计值的概率最大值小于或等于某个被称为检验显著性水平的预定值，则从统计意义上讲该检验统计值是显著的。

有效位数（Significant Digit）——定义一个数值或数量所必须的位数。

浸润材料（Size System）——见**表面处理剂（Finish）**。

浸润剂（sizing）—— 一个专业术语，指用于处理纱的一些化合物，使得纤维能粘结在一起，并使纱变硬，防止其在机织过程被磨损。浆粉、凝胶、油脂、腊、以及一些人造聚合物如聚乙烯醇、聚苯乙烯、聚丙烯酸和多酷酸盐等都用作为浸润剂。

偏斜（Skewness）——见**正向偏斜（Positively Skewed）**、**负向偏斜（Negatively Skewed）**。

管状织物（sleeving）——管状编织织物的一般名称。

长细比（Slenderness Ratio）——均匀柱的有效自由长度与柱截面最小回旋半径之比。

梳条（Sliver）——由松散纤维组合而成的连续纱束，其截面近似均匀、未经过加捻。

溶质（Solute）——被溶解的材料。

比重（Specific Gravity）——在一个恒温或给定的温度下，任何体积的某种物质的重量，与同样体积的另一种物质的重量之比。固体与流体通常是在 4°C（39°F）情况下与水进行比较。

比热（Specific Heat）——在规定条件下，使单位质量的某种物质升高温度一度所需要的热量。

试件（Specimen）——从待测试的样品或其他材料上取下的一片或一部分。试件通常按有关的试验方法要求进行准备。

纺锤（Spindle）——纺纱机、三道粗纺机、缠绕机或相似机器上的一种细长而垂直转动的杆件。

标准差（Standard Deviation）——见**样本标准差（Sample Standard Deviation）**。

短切纤维（Staple）——指自然形成的纤维，或指由长纤维上剪切成的短纤维段。

逐步聚合（Step-Growth Polymerization）——两种主要聚合机制之一。在逐步聚合中，

是通过单体、低聚物、或聚合物分子的联合，由消耗反应基而进行反应。因为平均分子量随着单体的消耗而增大，只有在高度转化时，才会形成高分子量的聚合物。

应变（Strain）——由于力的作用，物体尺寸或形状相对于其初始尺寸或形状每单位尺寸的变化量，应变是无量纲量，但经常用 in/in，m/m 或百分数来表示。

原丝（Strand）—— 一般指作为一个单位使用的单束未加捻连续长纤维，包括梳条、丝束、纱束、纱等。有时，也称单根纤维或长丝为原丝。

强度（Strength）——材料能够承受的最大应力。

应力（Stress）——物体内某点处，在通过该点的给定平面上作用的内力或内力分量的烈度。应力用单位面积上的力（lbf/in^2，MPa 等）来表示。

应力松弛（Stress Relaxation）——指在规定约束条件下固体中应力随时间的衰减。

应力-应变曲线（Stress-Strain Curve（Diagram））—— 一种图形表示方法，表示应力作用方向上试件的尺寸变化与作用应力的幅值之间的相互关系。一般取应力值作为纵坐标（垂直方向），而取应变值为横坐标（水平方向）。

结构元件（Structural Element）—— 一个专业术语，用于较复杂的结构成分（如蒙皮、长桁、剪力板、夹层板、连接件或接头）。

结构型数据（Structured Data）——（见第一卷 8.1.4 节）。

覆面毡片（Surfacing Mat）——由细纤维制成的薄毡，主要用于形成有机基复合材料的光滑表面。

对称层压板（Symmetrical Laminate）—— 一种复合材料层压板，其在中面下部的铺层顺序与中面上部者呈镜面对称。

加强片（Tab）——用于在试验夹头或夹具中抓住层压板试件的一片材料，以免层压板受损坏，并使其得到适当的支承。

黏性（Tack）——预浸料的粘附性。

（单向）带（Tape）——指制成的预浸料，对碳纤维可宽达 305 mm（12 in），对硼纤维宽达 76 mm（3 in）。在某些场合，也有宽达 1 524 mm（60 in）的横向缝合碳纤维带的商品。

韧度（Tenacity）——用无应变试件上每单位线密度的力来表示的拉伸应力，即，克（力）/旦尼尔，或克（力）/特克斯。

特克斯（Tex）——表示线密度的单位，等于每 1 000 m 长丝、纤维、纱或其他纺织纱的质量或重量（用克表示）。

导热性（系数）（Thermal Conductivity）——材料传导热的能力，物理常数，表示当物体两个表面的温度差为一度时，在单位时间内通过单位立方体物质的热量。

热塑性（塑料）（Thermoplastic）—— 一种塑料，在该材料特定的一个温度范围内，可以将其重复加温软化、冷却固化；而在其软化的阶段，可以通过将其流入物体并通过模压或挤压而成形。

热固性（塑料）（Thermoset）—— 一种聚合物，经过加热、化学或其他的方式进行固化以后，就变成为一种基本不熔和不溶的材料。

容限（Tolerance）——允许一个参量变化的总量。

容许限（Tolerance Limit）——对某一分布所规定百分位的下（上）置信限。例如，B 基值是对分布的百分数 10 取 95%的下置信限。

容限系数（Tolerance Limit Factor）——指在计算容许限时，与变异性估计量相乘的系数值。

韧性（Toughness）——对材料吸功能力的一种度量，或为使材料断裂，对每单位体积或单位质量的材料实际需要作的功。韧性正比于原点到断裂点间载荷——伸长量曲线下所包围的面积。

丝束（Tow）——未经加捻的连续长纤维束。在复合材料行业，通常指人造纤维，特别是碳纤维和石墨纤维。

变换（Transformation）——数值变换，是把一个数学函数用于所有数值而实现的计量单位变换。例如，给定数据 x，则 $y=x+1$，x^2，$1/x$，$\log x$ 以及 $\cos x$ 都是 x 的变换。

一级转变（Transition, First Order）——聚合物中与结晶或熔融有关的一种状态变化。

横观各向同性（Transversely Isotropic）——说明性术语，指一种呈现特殊的正交各向异性的材料，其中在两个正交维里，性能是相同的，而在第三个维里性能就不相同；在两个横向具有相同的性能，而在纵向则非如此。

随炉件（Traveller）——同一产品（板、管等）的一小片，作为试件，用于测量含湿量，了解吸湿处理的结果。

捻度（Twist）——纱或其他纺织原丝在单位长度上沿其轴线扭转的圈数，可表示为每英寸的圈数（tpi），或每厘米的圈数（tpcm）。

加捻方向（Twist, Direction of）——对纱或其他纺织原丝加捻的方向，用大写字母 S 和 Z 表示。当把纱吊置起来后，如果纱围绕其中心轴的可见螺旋纹与字母 S 中段的偏斜方向一致，则称其为 S 加捻，如果方向相反，则之为 Z 加捻。

加捻增量（Twist multiplier）——每英寸的加捻圈数与纱线支数平方根之比值。

典型基准值（Typical Basis）——典型性能值是一种样本平均值，注意，典型值定义为简单的算术平均值，其统计含义是，在 50%置信水平下可靠性为 50%。

未粘住（Unbond）——指两胶接件的界面间准备胶接而未被胶接的区域。也用来指一些为模拟胶接缺陷，而有意防止其胶接的区域，例如在质量标准试件制备中的未胶接区。（参见**脱粘 Disbond**、**脱胶 Debond**）。

单向纤维增强复合材料（Unidirectional Fiber-Reinforced Composite）——其所有纤维均沿相同方向排列的任何纤维增强复合材料。

单胞（Unit Cell）——这个术语用于编织织物的纱线轨迹，表示其重复几何图案的一个格子单元。

非结构型数据（Unstructured Data）——（见第一卷 8.1.4 节）。

上置信限（Upper Confidence Limit）——见**置信区间（Confidence Interval.）**。

真空袋模压（Vacuum Bag Molding）——对铺贴层进行固化的一种工艺，即用软质布盖在铺贴层上且沿四周密封，然后在铺贴层与软布之间抽真空，使其在压力下进行固化。

均方差（Variance）——见**样本方差（Sample Variance）**。

黏度（Viscosity）——材料体内抵抗流动的一种性能。

空隙（Void）—— 复合材料内部所包容的任何小气泡或或接近真空的空穴。

空隙含量（Void Content）——复合材料内部所含空隙的体积百分比。

经纱（Warp）——机织织物中，沿纵向的纱（见**纬纱(Fill)**），本身很长并近似平行。

经纱面（Warp Surface）——与纬纱相比，其经纱面积较大的这个层的表面。

讨论：对于两个表面的经纱与纬纱均相等的织物，不存在经纱面。

（双参数）Weibull 分布（Weibull Distribution（Two-Parameter））—— 一种概率分布，随机取自该母体的一个观测值，落入值 a 和 $b(0 < a < b < \infty)$之间的概率由式 1.7(d) 给出，式中：α 称为尺度参数，β 称为形状参数。（见第一卷 8.1.4 节）。

$$\exp\left[-\left(\frac{a}{\alpha}\right)^{\beta}\right]-\exp\left[-\left(\frac{b}{a}\right)^{\beta}\right] \qquad 1.7(d)$$

湿铺贴（Wet Lay-up）——在把增强材料铺放就位的同时，加入液态树脂体系的一种增强制品制作方法。

湿强度（Wet Strength）——在其基体树脂吸湿饱和时有机基复合材料的强度。（见饱和（Saturation））。

湿法缠绕（Wet Winding）—— 一种纤维缠绕方法，这种方法是，在刚要将纤维增强材料缠到芯模上的时候，才用液体树脂对其浸渍。

晶须（Whisker）—— 一种短的单晶纤维或细丝。晶须的直径范围是 1-25 μm，其长径比在 100-15 000 之间。

缠绕（Winding）—— 一种工艺过程，指在受控的张力下，把连续材料绕到有预定几何关系的外形上，以制作结构。

讨论：可以在缠绕之前、在缠绕过程中、以及在缠绕之后，加上粘结纤维用的树脂材料。纤维缠绕是最普通的一种形式。

使用寿命（Work Life）——在与催化剂、溶剂或其他组合成分混合以后，一个化合物仍然适合于其预期用途的时间周期。

机织织物复合材料（Woven Fabric Composite）——先进复合材料的一种主要形式，其纤维组分由机织织物构成。机织织物复合材料一般是由若干单层组成的层压板，而每个单层则由埋置于所选基体材料中的一层织物构成。单个的织物单层是有方向取向性的，由其组合成特定的多向层压板，以满足规定的强度和刚度要求包线。

纱（Yarn）——表示连续长丝束或纤维束的专业术语；它们通常是加捻的因而适于制成纺织物。

合股纱（Yarn, Plied）——由两股或多股有捻纱合成的纱束。通常，将这几股纱加捻合到一起，有时不用加捻。

屈服强度（Yield Strength）——指当某材料偏离应力-应变比例关系达到某规定限值时，其所对应的应力值。（这个偏移用应变表示，如在偏量法中为 0.2%，在受载总伸长法中为 0.5%）。

***X* 轴（*X*-Axis）**——复合材料层压板中，在层压板面内作为 0°基准，用以标明铺层角度的轴。

***X-Y* 平面（*X-Y* Plane）**——复合材料层压板中，与层压板平面相平行的基准面。

***Y* 轴**（*Y*-Axis）——复合材料层压板中，位于层压板平面内与 X 轴相垂直的轴。

***Z* 轴**（*Z*-Axis）——复合材料层压板中，与层压板平面相垂直的基准轴。

参考文献

1.6(a) Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5F, 1 November 1990.

1.6(b) DOD/NASA Advanced Composites Design Guide, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Dayton, OH, prepared by Rockwell International Corporation, 1983 (distribution limited).

1.6(c) ASTM E 206, "Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data," 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

1.6.2(a) ASTM E 380, "Standard for Metric Practice," 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

1.6.2(b) Engineering Design Handbook: Metric Conversion Guide, DARCOM P 706-470, July 1976.

1.6.2(c) The International System of Units (SI), NBS Special Publication 330, National Bureau of Standards,1986 edition.

1.6.2(d) Units and Systems of Weights and Measures, Their Origin, Development, and Present Status, NBS Letter Circular LC 1035, National Bureau of Standards, November 1985.

1.6.2(e) The International System of Units Physical Constants and Conversion Factors, NASA Special Publication 7012, 1964.

第 2 章　复合材料性能测试指南

2.1　引言

本章提供了进行聚合物基复合材料试验表征的指南，和在 MIL-HDBK-17 上发布材料性能数据的要求；给出并讨论了多种用途的推荐试验矩阵；重点强调了试验和试验矩阵计划中可能存在的问题，提供了有帮助的选择。本章的各节包括：

- 2.1 节，介绍本章并给出试验要求的分类方法。
- 2.2 节，讨论影响试验结果和基准值的各种因素，特别是对在编制试验计划时特别重要的问题进行了集中讨论，这些计划包括单个试验或是需要评估成百上千个试验件的大型试验程序。
- 2.3 节，给出了大量由 2.1 节中介绍的关键类别组成，事先制定的试验矩阵，它们覆盖了推荐试验环境下具体性能集的表征，并包括对批次和试验件数量的要求。
- 2.4 节说明了试验数据归一化、数据处理和给出报告的方法。
- 2.5 节详细说明了试验母体的采样要求，具体试验数据归一化以及数据进入 MIL-HDBK-17 第二卷时提交文件的要求。

2.1.1　证实复合材料结构的积木式方法

通常认为，仅仅分析还不足以证实复合材料结构的设计，反之，人们用“积木式方法”进行设计研制试验来协同分析验证。由于复合材料对面外载荷的敏感性、复合材料破坏模式的多样型、以及缺乏标准的分析方法，这种方法通常被认为是复合材料结构认证/取证（qualification/certification）*所必不可少的。

由于在真实湿度和温度环境下进行全尺寸试验常常是不现实的，因此，还用积木式方法来确定应用于室温大气环境下进行全尺寸试验的环境补偿值。用较低层次的试验来证明这些环境补偿因子。相似地，用其他的积木式试验来确定疲劳谱的截除方法，和在全尺寸水平上的疲劳分散性补偿因子。

在图 2.1.1 中简单图示了积木式方法，并在文献 2.1.1(b)和(c)中作了详细的讨论。可以把这个方法归纳为以下的步骤：

1. 生成材料的基准值和初步的设计许用值。
2. 基于对结构的设计/分析，选取以后试验验证的关键区域。
3. 对每个设计特征确定最严重的强度破坏模式。
4. 选择将出现最严重强度破坏模式的环境条件。应当特别注意基体敏感的破坏模式（如压缩、面外剪切、和胶接面）以及因为面外载荷或刚度剪裁而可能产生的“热点（hot-spot）”问题。
5. 设计并试验一系列试验件，其中每个模拟一个单独的破坏模式和载荷情况，与分

*在美国国防部 DOD 的应用中通常把设计证实（substantiation）称为“认证”（“qualification”），而在涉及美国 FAA 的民用情况称为“取证”（“certification”）。所有这些术语说明一个相似的过程，但“证实”是一个更普遍的术语，用“认证”和“取证”则具有前面说到的限制性含义。

析预计相对比，并按需要调整分析模型或设计许用值。

6. 设计并进行逐渐复杂的试验，评估可能由于几个潜在破坏模式引起破坏更复杂的载荷状态。与分析预计相对比，并按需要调整分析模型。
7. 按需要设计（包括补偿因子）并进行全尺寸构件的静力与疲劳试验，以最终验证内力和结构完整性。与分析进行比较。

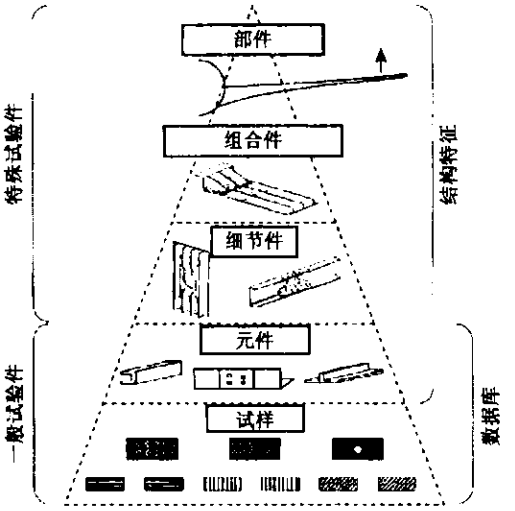


图 2.1.1　试验的金字塔（文献 2.1.1(a)）

2.1.2　试验级别与数据的使用

可以按照两个基本途径来定义试验工作，即按照结构的复杂性程度和按照数据的应用类型。每种途径内的分类情况将在后面各节进行详细讨论，并如 2.1.2.3.节所述，可用于构思大型的试验规划，来便编制试验计划。

2.1.2.1　结构复杂性等级

5 个结构复杂性等级*本身都是以其几何特征或其形式为基础的，它们是：组分，单层，层压板，结构元件和组合件。在材料数据研制计划过程的早期，应当确定要试验的材料形式和对每个等级相对强调的重点；而这又将取决于很多因素，包括：制造工艺、结构应用、公司/机构的惯例、和/或采购或适航部门。虽然在某些罕见的例子中使用一级就足够了，但大多数应用情况至少需要两级，而通常是完整地实施积木式方法的所有五级。无论所选择的是什么结构复杂性等级，都需要预浸料（或基体，如果把基体增加进来作为工艺的一部分，例如在树脂传递模塑中）的物理或化学性能表征，以支持物理和力学性能的试验结果。每个采购或适航部门均规定了数据使用的具体最低要求与指南。建议 MIL-HDBK-17 的用户在着手计划和进行任何用于支持结构认证或取证的试验以前，要与采购或取证机构进行协调。

这 5 个结构复杂性等级覆盖了以下的范围：

*由于通行单层级的试验与分析，手册的讨论通常着重于建立单层级的数据库；然而，这并不是要限制单独或联合地使用任何其他结构复杂性等级。此外，这个手册不着重组合件类别，因为其对应用的依赖极强，然而，可以把这里所包含的试样级试验计划编制和数据文件概念推广用于组合件（或更高等级）的试验。

- **组分试验：**

它对纤维、纤维形式、基体材料和纤维-基体预成形件的各自性能进行评价。例如，关键的性能包括纤维和基体的密度，和纤维的拉伸强度与拉伸模量。

- **单层试验：**

它对复合材料形态中纤维和树脂共同的性能进行评价。虽然有时把预浸料列为一个单独的级别，为讨论起见，预浸料的性能也包括在这级别上。关键的性能包括纤维面积重量、基体含量、空隙含量、固化后的单层厚度、单层的拉伸强度与模量、单层的压缩强度与模量以及单层的剪切强度与模量。

- **层压板试验：**

层压板试验对给定层压板设计中的复合材料的响应进行表征。关键的性能包括拉伸强度与模量、压缩强度与模量、剪切强度与模量、层间断裂韧性以及疲劳阻抗。

- **结构元件试验：**

它评价材料容许常见层压板中不连续性的能力。关键的性能包括开孔与充填孔拉伸强度、开孔与充填孔压缩强度、冲击后压缩强度以及连接的挤压强度与挤压旁路强度。

- **组合件（或更高级别）试验：**

这种试验评价复杂性逐渐增大的结构组合的行为与破坏模式。这是应用情况所特有的，因而没有明确包括在 MIL-HDBK-17 内。

2.1.2.2 数据应用分类

还可以按照数据的使用，把材料性能试验归到以下 5 类中的一类或几类：筛选*、认证、验收、等价性和结构证实。大多数材料体系试验的起始点通常是材料筛选。要对准备应用于工程硬件的材料体系做进一步的试验，以得到附加的数据。虽然在 MIL-HDBK-17 没有专门说明最后一类结构证实的要求，但按照 MIL-HDBK-17 的指南所产生的数据将构成这些要求的一部分。这 5 类数据使用分类覆盖了以下的范围：

- **筛选试验：**

它为给定的应用，常常是心中有一个具体的应用对象，来评价一些备选的材料。筛选试验的目的，是在最严重的环境条件和载荷试验条件下对新材料体系进行初步评价。本手册根据航宇结构应用的关键性能，提供了筛选新材料体系的指南。MIL-HDBK-17 的筛选试验矩阵提供各种强度、模量和物理性能的平均值，既包括单层级又包括层压板级的试验，这种试验设计得要在计划安排随后更加深入的评价以前，在选材过程中去掉不符要求的材料体系，发现有希望的材料体系。

- **材料取证试验：**

这一步是证明给定的材料/工艺满足材料规范要求的能力；这也是建立原始规范要求值的过程。严格的材料认证试验考察数据的统计，并在理念上是为满足结构证实要求而实施的设计许用值试验的一个子集，或与设计许用值的试验直接相关。（然而，虽然某个材料

---

*对有限数量的具体性能（通常只有一个性能）的特征响应进行的更局限的筛选试验，并不明确地归为一个试验类别，但也常常使用。这些有限试验的母体通常小到 3 至 6 个，一般来自同一批次，常常集中关注一个特定的环境条件。由于每个这类试验具有一个具体但经常变化的目的，所以在 MIL-HDBK-17 中没有对其提供明确推荐的试验矩阵；然而，为其余试验类型提供的指南，对其试验计划的编制仍然是有用的参照。

可能对某种规定的规范是合格的，但对每个具体的应用情况仍然必须被批准。）目标是定量地评定关键材料性能的变异性，得出各种统计量以建立材料的验收、等价性、质量控制和设计基准值。由于在工业界有各种不同的采样和统计方法，因此，必须明确规定所使用的方法。虽然可以用很多途径得到一个一般的基准值，但 MIL-HDBK-17 基准值则本身带有明确规定的采样要求和特定的统计测定过程，并强调了一些附加的考虑，如试验方法、破坏模式和数据文件编制。

- **验收试验：**

它的任务是通过周期性地对材料产品进行采样并评价关键的材料性能，以检验材料的符合性。把从小采样尺寸得出的试验结果与先前试验中建立的控制值进行统计的比较，以确定材料的生产过程有无显著改变。

- **等价性试验：**

这试验的任务是，评定替换材料对于先前所表征材料的等价性，通常是为了要利用一个现有材料性能数据库而进行的。其目的是对一个足够大而可提供一个确定结论的、但又足够小而比重新建立整个新数据库显著节省费用的试验母体，评价其关键的性能。重要的应用包括，对先前的合格材料，评价可能的第二供应来源。然而，这个过程的最普通的用途是：(1)对一个已经认证的材料体系，评价次要组分、组分工艺过程或制造工艺的改变；以及(2)证实以前所建立的 MIL-HDBK-17 基准值。

- **结构证实试验：**

这个试验过程的任务是，评定给定结构满足具体应用要求的能力。设计许用值从理念上是由材料认证时得到的材料基准值导出或相关联的，建立设计许用值的任务也被认为是结构证实试验的一个部分。在按照美国国防部的要求执行时，这个任务称为结构认证（structural qualification），而当美国的 FAA 是取证的机构时，这个任务称为结构取证（structural certification）。

2.1.2.3　试验计划的详细说明

表 2.1.2.3 给出了一个可以用于大型试验程序的试验计划编制矩阵。按照结构复杂性等级和数据使用分类给出的材料性能试验被放在阵列的轴上，每个相交的格子单元表示一种独特的试验内容（虽然偶尔会使用单元格子的组合）。可以用一组单元格子，来概括整个积木式试验计划的范围。表 2.1.2.3 中的阵列，说明了以复合材料为基础的航宇结构应用中其结构证实的常见（但绝非通用）试验序列。这个序列从左上角画阴影的格子开始，随着时间推移进入到右下角的格子，用编号来说明其在序列内的大致顺序。（对结构证实的分类和组合件级别打上阴影，表示在 MIL-HDBK-17 中不专门对其进行讨论）。

本手册 2.3 节按照数据使用的分类，定义了大量推荐的试验矩阵。

表2.1.2.3　试验计划的详细说明

结构复杂性水平	数据使用分类				
	材料筛选	材料取证	材料验收	材料等价性	结构证实
组　分	1				
单　层	2	4			
层压板		5			7
结构元件	3	6			8
组合件					9

2.2 试验计划的编制

2.2.1 概述

第 2.2 节讨论了很多会影响试验计划实施的试验目标。在下一节即 2.3 节推荐的试验矩阵中，通过对一些复合材料形式和目标提供推荐的试验矩阵（试验的类型和在不同环境下的试验数量）来完成这些计划。这些预先确定的试验矩阵可能必须对具体应用按客户要求来制定。

复合材料的材料性能表征与金属和未加强的塑料有显著差别。2.2 节提供了对试验和试验计划有影响的很多关键差别的信息，包括：

- 试验矩阵
- 材料采样和数据汇集
- 统计计算
- 试验方法选取
- 材料与工艺变异性
- 吸湿和非大气环境试验问题
- 可供选择的试样构型
- 数据归一化和数据文件报告
- 与具体应用有关部门的试验。

所有重要的试验计划均应当从准备其详细的试验计划文件开始。试验计划规定要评定的材料性能、选择试验方法、通过选择具体的试验件和试验配置排除标准试验方法提供的选项和确定成功的准则。计划由合同承包方准备，由认证机构批准，这是承包方与认证机构相互理解的基础。清楚写出、精心准备的试验计划也是一个主要的管理工具，用以确定试验工作的规模、成功的程度和离目标的完成情况。

2.2.2 用于以统计为基础性能的基准方法与可选方法

MIL-HDBK-17 中，主要是给出建立强度和破坏应变性能基准值*的指南。本手册已经建立了如图 8.3.1 所示，由试验结果计算出基准值的具体统计方法，推荐把这个方法用于处理数据，而这也是评估供第二卷发表用数据所需要的方法。

在本手册内对数据发表规定的其他要求还包括：具体的母体采样方法和报告支持性的数据。为了得到材料变异性的合理评估，本手册发表的基准值是按照 2.2.5 和 2.5.3 节的讨论，基于每个环境与纤维方向至少由 5 批材料和最少 30 个试件得出的。这些数据按照 2.2.11 和 2.4.3 节讨论的方法进行归一化（适用时），用图 8.3.1 和第 8.3 节介绍、讨论的方法进行统计评估，并按照第二卷 1.4.2.节的要求提出报告。

同样的统计方法可以用于批次和/或重复试件较少的母体，但是，如果把得自这种母体的数据提交本手册发表时，在公布的数据汇总中将不包括基准值。

在建立新的材料数据时可以对 MIL-HDBK-17 的基准方法进行修改，这取决于应用情

*按照第 1.7 节的定义，B-基准值是预期至少有 90%母体值以 95%的置信度高于其数值的这个值。在这个手册中，认为材料性能的统计估计基准值本身就是材料的性能。

况和采购方或认证机构的意见，在此情况下，对支持和参考，这个手册的指南仍然是有用的。在某些情况下，也可证明并使用其他可选的采样方法与统计方法来建立基准值，尽管通常不太使用。这些替代的方法直接影响到试验矩阵的建立，并通常需要对统计学和具体材料体系的材料行为有比较高深的认识。2.3.6.1 节介绍了一种替代的方法，在 8.3.5.3.节中概述了其相关的统计基础。在使用这些替代方法时，强烈建议要事先得到采购方或认证机构的批准认可。

2.2.3 数据等价性问题

数据汇集的评估（可能来自两个不同子母体的数据是否足够相似能够加以联合）和材料等价性（与另一个材料有共同特征的某种材料是否足够相似而可用其数据进行设计）是数据等价性中相似的问题；二者都需要采用统计的方法，来评定两个数据子母体之间的相似性与差异*。在 2.3.4.1，2.3.7 和 2.5.3.4 节中，比较详细地概括了这些题和其他相关的问题。对数据等价性的评价，要以检查各种关键性能在本批次内统计量和各批次间的统计量（参见 8.3.2 节）为出发点。

如果只是为了得到一个较大母体以更具有事物的代表性（参见 2.2.5 节关于采样规模影响的归纳讨论），非常期望能把不同子母体（subpopulation）的试验数据进行汇集。同样希望的是，能够证明没有基准值的一种材料等价于另一种已经建立了基准值的材料（参见 2.3.4.1，2.3.7 和 2.5.3.4 节）。使用汇集的数据或等价材料的要求，通常是按各个应用情况在与认证机构讨论过程中确定的，或者，对于准备由 MIL-HDBK-17 发表的数据，是由 MIL-HDBK-17 数据评估工作组确定的。

在确定统计的等价程度以前，必须满足基本工程考虑，两种材料应该具有相同化学成分、微结构和材料形式族系。在某种程度上，这一准则与具体应用有关。例如，对于来自同样基体和相似纤维的两个复合材料体系的性能数据，如果纤维/基体的界面明显不同，即使其纤维具有相似的模量和拉伸强度，也可能不准许将其进行汇集。通常，对仅仅由于前驱体制造或材料工艺有较小改变而出现差异的数据集，也要考虑其数据等价性问题，例如：

- 组分或组分制造工艺中的细小变化，
- 由不同部件制造商加工的同样材料，
- 同一制造商在不同地方加工的同样材料，
- 工艺参数的细小改变，或
- 以上情况的组合。

目前，数据等价性的统计方法假定，在各试验室之间和在试验室内部，其试验方法之间差异是可以忽略的。当这个假设不成立时，这种由试验方法导致的人为变异性，会大大削弱这些统计方法对两个不同数据集进行有意义对比的能力。在 2.2.4 节和 2.2.5 节中将对此作进一步的讨论。

2.2.4 试验方法的选取

常常用由比较简单的小试件得到的试验结果（然后用经验方法来确定固有材料性能（例如材料压缩模量或拉伸强度），或一般结构响应（例如准各向同性层压板的开孔拉伸强度）

---

* 如果发现某些性能相似而另外一些并不相似，必须在相信替代的材料是等价以前，用工程判断确定不相似的性能对于给定应用情况的重要性。因而，这等价仅适用于这个应用情况，对另外不同的应用，必须重新确定其等价性。

作为输入值来模拟一个较大而复杂的具体结构响应。在大多数情况下，过去为金属或塑料发展的试验方法不能直接应用于先进复合材料。虽然复合材料所用试验方法的基本物理原理与没有增强材料时的方法相似，但一般复合材料的不均匀性、正交各向异性、吸湿敏感性以及低韧性，常常使试验要求（特别是对力学试验）产生重大的差异，包括：

- 组分含量对材料响应的强烈影响，这就需要测量每个试件的材料响应，
- 需要评定多个方向上的性能，
- 需要调节试件的状态以对吸湿和排湿进行定量与控制，
- 试件对准和载荷引入方法更加重要，以及
- 需要假设破坏模式的一致性。

复合材料的很多其他独特特性也造成了试验上的差异，包括：

- 压缩强度通常低于拉伸强度（虽然像硼/环氧树脂这样的特定材料体系行为与此相反），
- 工作温度比较接近材料性能的转变温度（与金属相比），
- 剪应力响应与正应力响应是解耦的，以及
- 对试件准备工作的高度敏感性。

对试验方法的一个衡量标准是，一个完美的试验在理论上能够产生所希望的结果，例如在进行试验的过程中产生一个均匀的单轴应力状态。然而，与常规材料相比，上述因素将趋于增大复合材料对更多试验参数的敏感性。因此，试验方法的鲁棒性（robustness），或对试件和试验方法微小变化的相对不敏感性，就与理论的完善变得同样重要。鲁棒性或缺乏鲁棒性是用试验室之间的试验来评定，并用精度（在样本母体内的变异性）和偏差（样本均值对真实平均值之间的差异）进行度量*。试验方法的精确度和偏差是通过试验室内部和试验室之间的比较试验（通常称为“round-robin”试验）来评价的。显见，理想的情况是在试验室内部和试验室之间的试验中均具有高精度（差异小）和低偏差（样本均值接近真实平均值）。这样一种试验方法将重复地产生可再现的结果，而不要考虑材料、操作者、或试验室。然而，对偏差的定量需要每个试验有其材料标准，目前对复合材料还没有这样的标准。其结果，目前只能对复合材料试验方法的偏差进行定性的评估。

（对给定试件）与试验方法的精度和偏差有所不同的，是试验件尺寸和几何的变异对精度和偏差的影响。对于不均质的材料，可以预期形体较大的试件会在试样内包含更多有代表性的材料微结构样本。虽然可取，但较大的试件也比小试件更易于包含更多微观或宏观的结构缺陷，这样就可预期会产生略低的强度（虽然有可能也具有较小的差异）。试件在几何上的变异还可能产生另外的后果。尺寸和几何形状的影响可能造成结果的统计差别，这些差别与试验方法或方法实施中其他方面的“完善程度”是无关的，应该预期到这样的影响。因此，即使试件响应不能（多半也不会）与结构的响应完全相同，“理想”的试验方法中将包括能够与结构响应始终相关联的试件几何形状。

因为各种试验参数的重要程度仍在研究与了解之中（即使是比较普通的试验），同时由于发现所考察的“标准试验室做法”实际上在各个试验室均有不同，因此，尽可能多地控制或用文件规定这些做法和参数就至关重要。在改进和编制新的标准试验方法时，负责

---

*通常“精确度”（"accuracy"）是将精度和偏差这两方面作为一般术语联合使用。术语“精度”（"precision"）和“偏差”（"bias"）则较专用，适用处首选使用。

将复合材料试验方法标准化的 ASTM D-30 委员会正试图考虑所有这些因素（参见文献 2.2.4）。由于完整性及其作为完全一致同意的标准的地位，只要适用，本手册就强调使用 ASTM D-30 试验方法。

无论什么原因，如果不能把试验方法的敏感性降到最小，都可能使 MIL-HDBK-17 内的统计方法失效，因为这些统计方法都隐含地假设：数据中的所有变异都是由于材料或工艺变异的结果。在试件准备或试验过程中的任何附加变异都被加到材料/工艺变异之中，这可能导致过度保守的、或甚至没有意义的基准值结果。

第 3 到第 7 章中讨论了试验方法，特别强调的是先进复合材料的 ASTM 标准。讨论了各种复合材料试验方法的优点和缺点，为了完整起见，包括了在文献中出现的某些常被引用的非标准方法。第 3 和 4 章覆盖了组分试验方法；第 5 章覆盖了预浸料的试验方法；第 6 章覆盖了单层和层压板试验；第 7 章覆盖了结构元件试验方法。按照以下试验方法（表 2.2.4）产生的数据是 MIL-HDBK-17 认可的，可考虑包括在第二卷中。

表2.2.4　用于向MIL-HDBK-17提交数据的试验方法汇总

试验类别	试验方法来源	
	ASTM	SACMA
预浸料试验		
树脂含量	D 3529, C 613, D 5300	RM 23, RM 24
空隙含量	D 3530	--
树脂流动性	D 3531	RM 22
树脂凝胶时间	D 3532	RM 19
纤维面积重量	D 3776	RM 23, RM 24
吸湿量	D 4019	--
黏性	—	—
HPLC	—	RM 20
IR	E 1252, E 168	—
DMA（RDS）	D 4065, D 4473	RM 19
DSC	E 1356	RM 25
单层物理试验		
吸湿浸润处理	D 5229	RM 11
纤维体积	D 3171, D 2734	RM 10
树脂含量	D 3171, D 2734	RM 10
空隙含量	D 2584	—
密度	D 792, D 1505	—
固化后层厚（CPT）	—	RM 10
玻璃化转变温度，干	D 4065	RM 18
玻璃化转变温度，湿	—	RM 18
CTE，面外	E 831	—

表2.2.4 用于向MIL-HDBK-17提交数据的试验方法汇总（续）

试验类别	试验方法来源	
	ASTM	SACMA
单层物理试验		
CTE，面内	D 696, E 228	—
平衡吸湿量	D 5229	RM 11
湿扩散率	D 5229	—
热扩散率	E 1461	—
比热	E 1269	—
单层/层压板力学试验		
0°/经向拉伸	D 3039	RM 4, RM 9
90°/纬向拉伸	D 3039, D 5450	RM 4, RM 9
0°/经向压缩	D 3410, D 5467	RM 1, RM 6
90°/纬向压缩	D 3410, D 5449	RM 1, RM 6
面内剪切 (1)	D 3518, D 5448, D 5379	RM 7
层间剪切	D 5379	—
短梁强度	D 2344	RM 8
弯曲 (7)	—	—
开孔压缩	（草案）	RM 3
开孔拉伸	D 5766	RM 5
单剪挤压 (2)	（草案）	—
双剪挤压 (2)	（草案）	—
冲击后压缩	（草案）	RM 2
I 型断裂韧性	D 5528	—
II 型断裂韧性	（草案）	—
拉/拉疲劳	D 3479	—
拉/压疲劳	—	—

注：

(1) 对于平板的面内剪切模量，也可用 ASTM D 4255。

(2) 在第 7 章给出了挤压试验的方法，在以其为基础的 ASTM 试验方法草案发布以前均适用，第 7 章的这些试验方法也将被认可。

(3) 可能对一定的材料形式或工艺（如长丝缠绕）的具体材料性能，限制其采用某个单独的试验方法。关于更完整的方法说明，见第 3 到 7 章中的试验方法详细介绍，或见该试验方法本身。

(4) 在很多情况下，SACMA 试验方法是 ASTM 试验方法的子集或扩展集，而在另外一些情况下，SACMA 试验方法具有不同的使用范围或采用了不同的方法。对于存在有 SACMA 试验方法，而没有能覆盖同样性能的 ASTM 试验方法，或现有的 ASTM 试验方法采用不同试验方法的情况，ASTM 正在考虑采用一种形式的 SACMA 试验方法。在 ASTM 和 SACMA 的试验方法相重复的地方，ASTM 和 SACMA 正在着手把这些试验方法整合到下一版本的 ASTM 标准中。

(5) 对于某些性能，在 ASTM 或 SACMA 中列出了多种试验方法，这些不同的试验方法或者适用于不同的材料形式，或者采用了不同的试验方法。

(6) 由未列出的其他试验方法得出的数据，可能被试验和数据评估工作组按照 2.5.5 节所介绍的指南加以考虑。

(7) 参见 6.7.7 节。

2.2.5 母体的采样和大小

与金属材料的 MIL-HDBK-5 不同，用于复合材料的 MIL-HDBK-17 不要求同时从同一个母体确定 B 基准值和 A 基准值。这不是因为在材料行为方面有任何基本的差别，而是因为对复合材料对 A 基准性能的需要比较少。其结果，复合材料的 B 基准样本母体（30+）

要比 MIL-HDBK-5 中关于金属的 A/B 基准样本母体（100-300）小很多。不幸的是，因为需要试验的复合材料性能与方向较多，同时，因为复合材料的试验矩阵是全面分布的，不仅有室温同时还有一些极端的环境条件，所以在 B 基准复合材料试验计划中，其试件的总数常常超过 A/B 基准金属试验计划中试件的总数*。然而，在 MIL-HDBK-17 中包括、并允许使用先进的统计回归技术，这个技术可以在一些特定情况下以及当与不同的采样分布相联合时，用先前确定 B 基准值时相似的复合材料试件总数，可靠地确定 A 基准值（参见 2.3.6.1 节）。

MIL-HDBK-17 中 B 基准非回归数据所需要的采样方法，在 2.5.3 节中有详细的说明，采样中至少包括 5 批生产材料，分布在这些批次中采用最少 30 个试件，在所考虑的每种环境下充分试验每种性能。前面的 5 批预浸料要各自采用不同批组的纤维与基体组分（当批次数量大于 5 时不需要如此）。对于各种情况和性能，批次的重复件至少要从两个不同的试验板件中采样，这些板件最少要覆盖两个不同的工艺循环。用超声检查或其他适当的无损检测技术，对试验的板件进行无损评定。不得在质量有疑问的部位截取试验件。用一个试验计划（或报告）来规定层压板的设计、试件采样细节、制造的方法（包括材料跟踪信息）、检查方法、试件截取的方法、标记方案以及试验方法。

对于一般的数据研制，采样技术和样本大小可能取决于应用情况或认证/适航部门。任何使用 MIL-HDBK-17 统计方法的采样方案都希望能够有多个批次，每个批次由大小均匀的子母体构成。这种最低 5 批次的要求，只适用于准备把材料性能包括在 MIL–HDBK-17 中的那些情况。经过采购方或适航部门的批准，可以采用另外的重复试件数和批次数。然而，应当采用本手册推荐的统计方法来评估力学强度数据，以保证得到统计上可接受的基准值。

2.2.5.1　样本大小的选取

无论什么采样方案，对于小样本母体，任何基准值计算的结果都强烈地取决于样本的大小。小的样本，其试验的费用显然较少，但也要付出不同类型的代价，因为母体规模减小，则所计算的基准值也低。图 2.2.5.1 是一个假定的例子，其中按一个给定的无限的正态分布母体，用不同的样本量得出了样本大小对所计算 B 基准值的影响**。极限情况下，对于很大的样本量，这个例子的 B 基准（10%）值将为 87.2。图中的虚线是每个样本尺寸时所有可能 B 基准值的平均值，也可以把这条线解释成，对固定的样本离散系数（CV）为 10%，估计的 B 基准值是样本大小的函数。虚线则表示任何给定样本大小的 1-σ 限（2-σ 限近似地限定了 95%置信区间）。

不仅估计的 B 基准值随着样本量的增大而提高，同时，正如这些 1-σ 限所示，B 基准估计值的预期变异也明显降低。下面的 1-σ 限，要比上面的 1-σ 限距离平均的 B 基准值更远；这说明计算的 B 基准值有倾斜，这情况对小样本更严重。由于这种倾斜的结果，小母

---

* 金属用的 MIL-HDBK-5 手册重点关注 A-基准值，因而至少需要 100 个拉伸试样，但是对与室温拉伸性能成比例的压剪、挤压、和非大气情况，则采用小母体的试验，以估计压剪、挤压、和非大气情况的基准值。MIL-HDBK-17 对每个方向、每个性能和每个环境，都至少需要 30 个试样来确定 B-基准值。对于 A-基准值， MIL-HDBK-17 要求增加到 90 个试样。但是，当使用 MIL-HDBK-17 的先进统计回归技术时，有时可以把试件母体分散到要试验的所有环境条件中，这样就减少了所需要的试验件总数。

** 基于子母体的任何统计计算，只是对整个母体真实值的一个估计，虽然样本越大越有代表性，这个估计也越好。

体情况计算的B基准值非常可能过于保守，而不是偏于危险，因而在B基准值中更增大了因使用小母体而付出的代价。尽管对于非正态分布的相似例子可能有不同的定量结果，但可以预期，其随着样本大小变化的趋势是相似的。关于样本尺寸影响的进一步讨论，将安排在8.2.5节中。

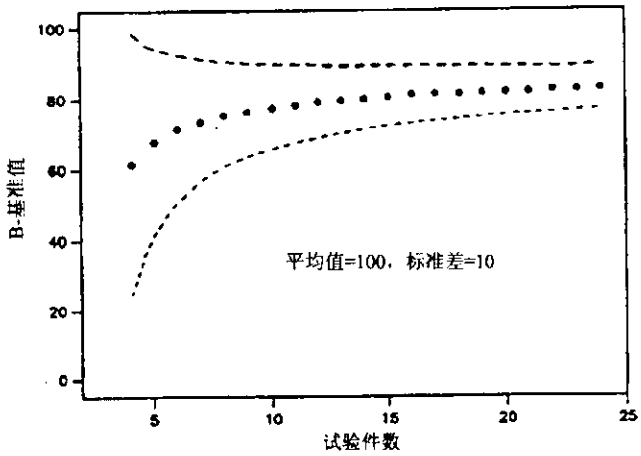


图 2.2.5.1　1-σ 限的归一化 B 基准值

2.2.5.2　批次数量对ANOVA的影响

MIL-HDBK-17 的统计方法（图 8.3.1）包括统计检验以确定批次之间的差异。如果得到的统计量指出批次之间的差异过大，则不能按照常规方法将数据汇集，而要用方差分析（ANOVA）方法加以评定。无论如何，统计方法只会像所评定数据的品质与数量一样好。

批数小可能使 ANOVA 方法产生极保守的基准值，因为这方法基本上是把每批次的平均值作为单个数据点，输入到常规的正态分布方法中以确定基准值（2.2.5.1 节中介绍了小样本对基准值的影响）。因为 MIL-HDBK-17 的统计方法假定试验的差异是可以忽略的，由试验导致的（批内或各批间的）差异（见 2.2.4 节的有关讨论）被当作实际的材料/工艺变异性，从而可能得到过低的基准值。

此外，当批数减少，或当批间的差异减少，或者二者同时出现时，批间的差异检验逐渐变得无作用。例如，当只对少量批次进行采样时，表明没有重大变异的批间差异的检验结果却有可能是不实的。另外的批次采样可能指出实际存在批间的差异，但却被原先的批数少而掩盖了。

当存在批间差异而同时 ANOVA 基准值计算时的数据又少于 5 批，则应注意到上述的问题。

2.2.6　材料与工艺差异、试件准备和 NDE

在本手册第一卷的以后各节中，读者可以找到各种试验方法的汇编，可用于各种纤维、树脂与复合材料形式以及结构元件。在多数情况下，这些材料或结构元件都是复杂的多步骤材料生产过程的产品。图 2.2.6(a)和 2.2.6(b)说明了从原材料到复合材料最终产品的基本生产加工流程。（图 2.2.6(b)中的每个方框图代表了一个成形过程，在这个成形过程中可能对材料引入附加的变异性）。这些成形工艺过程可能需要高的温度、应力或压力，通常涉及挥发物放出、树脂流动与凝固、以及增强纤维的重新调整。如果要正确解释并适当地使用所测到的复合材料材料性能，必须了解材料性能的变异性。这个变异性发生在常规的成

形过程中，并可能由于成形过程发生的大量异常情况而增大。

2.2.6.1 材料和材料成形

本手册中所涉及的复合材料组分是有机基体（热固性的或热塑性的），有机的或无机的增强纤维。增强纤维力学性能的差异有多种原因，例如纤维微结构的缺陷、或者有机纤维中聚合物链取向的差异。

由于成形工艺，热塑性的基体可能出现分子重量和分子重量分布的变异。热塑性基体的熔融黏性以及随后的成形性可能会受到这种变异的严重影响。在预浸渍时常常把热固性树脂加入纤维，其中一些部分固化被称为 B-阶段。在进行预浸渍以前，还使用其他的方法来稳定热固性树脂体系。对这些材料进行稳定是重要的，因为在包装、运输和储存这些不适当（或适当）稳定处理的中间形态产品（如预浸带、织物和粗纱）时，有很多可能的变异源。

可以用手工或自动的工艺来实现增强纤维的铺放工作。在纤维铺放中精确度不高，或在基体流动与凝固过程中增强纤维的移动，都可能引起变异。固化和/或凝固可能和纤维的铺放同时出现，也或者出现在纤维铺放之后，这取决于加工的工艺（例如，拉挤成形相对于 RTM）。成形过程的这个步骤容易出现变异。

作为例子，考虑在热压罐（一个加压或同时加热的设备）内从 B-阶段的预浸带固化成复合材料零件。当树脂被加热并开始流动时，材料由气相（挥发物或截留的空气），液相（树脂）和固相（增强材料）构成。为了避免由于空隙体积过大造成材料性能的变异，必须把产生空隙的气相材料排除或用液相加以吸收。为了避免因纤维体积含量变化所造成的变异，必须使树脂在部件内均匀分布。纤维必须保持其选定的取向，以避免或减少由于纤维偏移形成的性能变异或丧失。

应当始终把相关的工艺参数和材料的影响用文件记录，以帮助工艺控制和故障排除。如果不能通过这个途径识别并避免可能的工艺和制造缺陷，可能会因为对不代表真实零件或应用中所出现情况对材料进行测试而浪费资源。此外，由于这本来可避免的材料变异还付出了重大的重量惩罚。对这些工艺参数和其对材料性能可能影响的较好理解，还可使复合材料的制造商避免因材料、零件或最终产品性能不可接受而付出巨大费用。

本节简要讨论了材料和生产加工流程中所遇到各种过程出现的复合材料性能变异问题。有关这个问题更广泛、详细的处置，读者可参见对这些问题的深入讨论，即第三卷，第 2 章，材料与工艺——变异对复合材料性能的影响，其中还包括了关于材料准备和工艺规范的讨论。复合材料的最终产品制造商不能直接控制来料的整个过程，因而使用这样的规范以使材料的变异降到最低是至关重要的。

2.2.6.2 试件准备和无损评定（NDE）

此节留待以后补充。

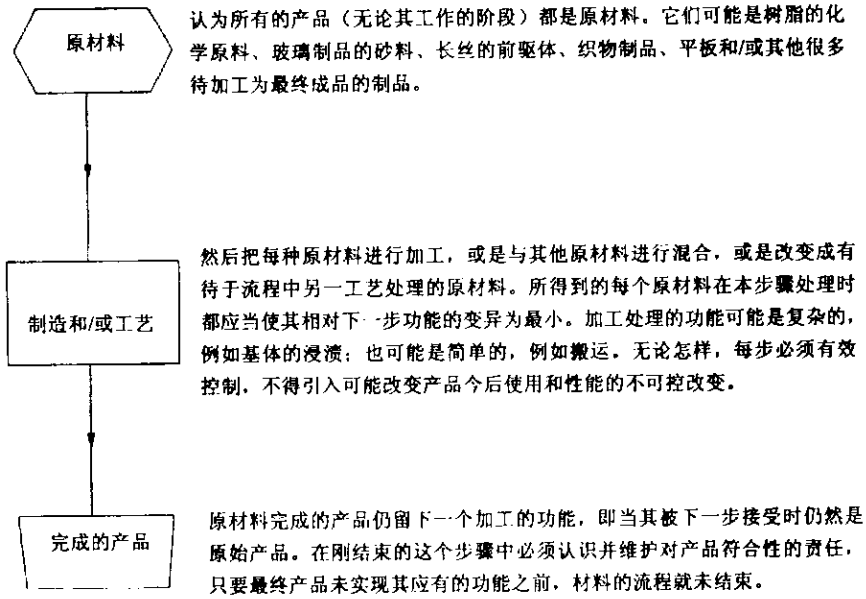


图 2.2.6(a)　复合材料材料和成形工艺，所有材料和成形工艺共同的基本流程

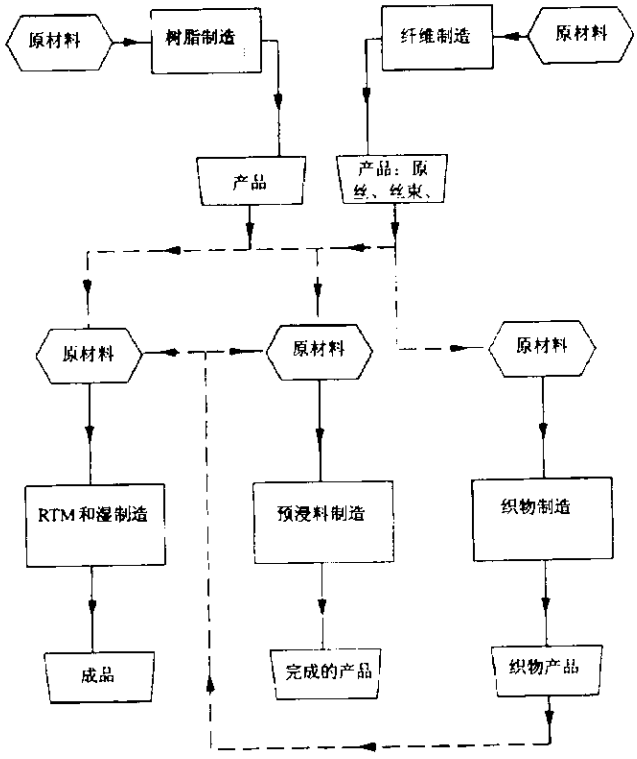


图 2.2.6(b)　原材料的流程（例子）

2.2.7 吸湿和浸润处理因素

无论是以复合材料基体或以聚合物纤维形式出现的大多数聚合物材料，都能够从周围环境中吸收少量但可能重要的水分*。假定没有任何开裂或其他吸收的路径，通常假设水分增加的物理机制是，质量扩散遵循 Fick 定律（水分扩散类似于热扩散）。虽然与周围环境直接接触的材料表面几乎立即产生水分吸收或排出，但水分从内部的流入或流出比较慢。水分的扩散速率比热流热扩散低很多数量级，然而，在潮湿环境下曝露几周或几个月之后，材料最终会吸收足够量的水分。这种被吸收的水可能造成尺寸变化（膨胀），降低聚合物的玻璃化转变温度，并降低与基体和基体/纤维界面有关的复合材料力学性能（大大降低材料的最高使用温度——见 2.2.8 节）。由于吸湿是很多结构应用可能的设计考虑，在材料试验中应当包括在典型的吸湿曝露后进行性能评定。因为材料所吸收的吸湿量与厚度及曝露的时间有关，不应当采用固定时间的吸湿方法**。反之，应当遵照如 ASTM D 5229/D 5229M 那样的吸湿方法（文献 2.2.7(c)），它考虑了扩散过程，并在厚度方向吸湿量接近均匀时再行停止。

有两个有关的 Fick 材料吸湿性能：湿扩散和平衡吸湿量（水分重量百分比）。这些性能通常用测定重量的试验方法来确定（如 ASTM D 5229/D 5229M Procedure A），把一个初始干燥的试件曝露到潮湿的环境中，并记录水分的质量增益-时间平方根关系。在称重的开始阶段，这个质量-时间关系将是线性的，其斜率与吸湿速率相关（湿扩散）。当大部分外部材料的吸湿量趋于平衡时，重量增益-时间平方根曲线的斜率逐渐变小。最后，当材料内部达到平衡时，相继称重的差值将趋于零，而其斜率将几乎平行于时间轴。在这点的重量百分增益就是平衡吸湿量，图 2.2.7(a)和(b)说明了这个过程。图 2.2.7(a)显示了试件在吸湿曝露过程中的总质量增益与时间平方根的关系，并显示了由于温度不同其响应的差异。对于 67°C（150°F）的情况（图 2.2.7(a)中的菱形点），图 2.2.7(b)中给出了几个初始时间周期沿试件厚度方向的湿度剖面，表明在接近表面处吸湿迅速增加，而在试件的中间吸湿增加就较慢。

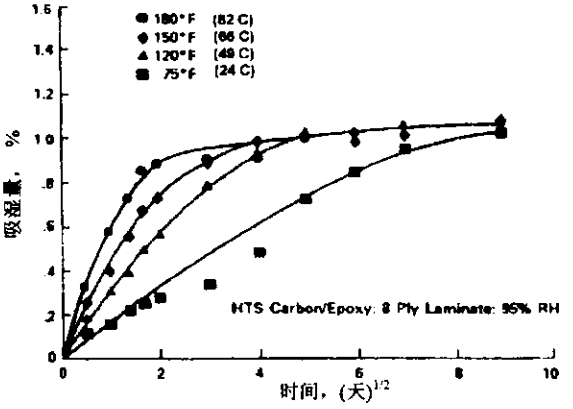


图 2.2.7(a) 典型的吸湿响应（文献 2.2.7(d)）

---

* 虽然某些聚合物如聚丁二烯能够抵抗水分吸收因而可以不需要进行吸湿的浸润处理，但认为这些材料是鲜有的例外情况。另一方面，大量增强体包括碳、玻璃、金属、和陶瓷纤维族是不吸湿的。因此，除了聚合物纤维如芳纶以外，假设任何吸湿均只限于聚合物基体。

** 固定时间的吸湿方法的例子包括用于塑料的 ASTM D 618（文献 2.2.7(a)）和 D 570（文献 2.2.7(b)）。

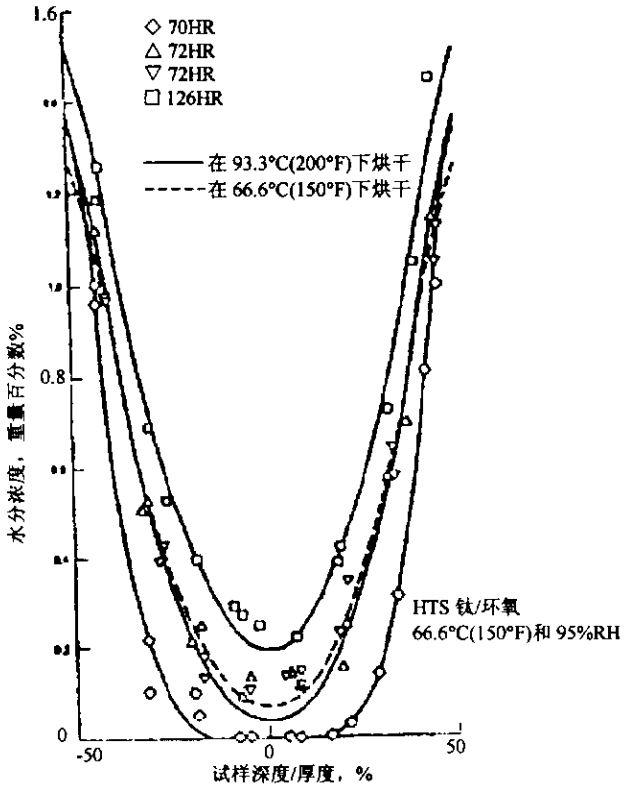


图 2.2.7(b)　厚度方向水分剖面-时间（文献 2.2.7(d)）

2.2.7.1　湿扩散率

吸湿速率受到被称为湿扩散率的材料性能控制。湿扩散率通常与相对湿度关系不大，因而假定其仅为温度的函数，通常遵循与绝对温度的倒数呈 Arrhenius 型指数关系。图 2.2.7.1(a)说明了这种对温度的强烈依变关系，图中给出了一种特定碳/韧性环氧树脂的湿扩散率与温度关系的曲线。图 2.2.7.1(b)给出了另一种材料体系在几种温度下的一族水分增重曲线。对于这个材料体系，把吸湿时的温度降低到 33°C（60°F），就使吸湿 1%需要的时间增加了 5 倍。

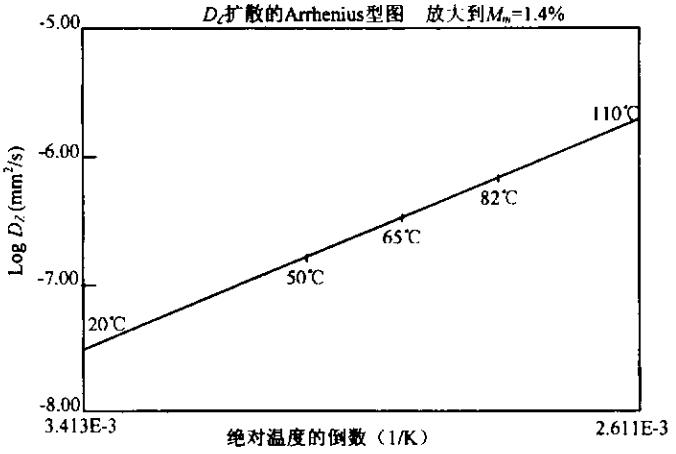


图 2.2.7.1(a)　与温度有关的湿扩散

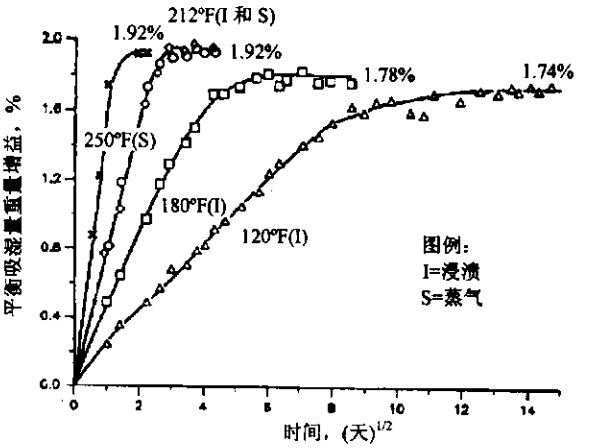


图 2.2.7.1(b) 温度对吸湿速率的影响

混杂硼-石墨/环氧树脂（5505-AS/3501）层压板（76mm×13mm×3.0mm，3.0in×0.5in×0.12in）（文献 2.2.7.1）

2.2.7.2 平衡吸湿量

平衡吸湿量和温度关系不大，因此，假设平衡吸湿量只是相对湿度的函数。给定材料的最大平衡吸湿量是在 100%RH 下出现的，也将其称为饱和含量。已经发现，给定相对湿度下的平衡吸湿量近似等于相对湿度乘以材料的饱和含量；然而，正如图 2.2.7.2 所示，未必每种材料体系都很好符合这种线性的近似。不管怎样，如果材料没有达到其在给定相对湿度下的平衡吸湿量，则其厚度方向的局部吸湿量就是不均匀的。需要强调的另外一点是，在大气条件潮湿环境下的吸湿性能，既不同于流体浸润也不同于加压蒸汽的情况。后面这些环境情况改变了材料的扩散特征，产生了较高的平衡吸湿量，因此，除非其模拟了所讨论问题的应用环境，否则不应当加以使用。

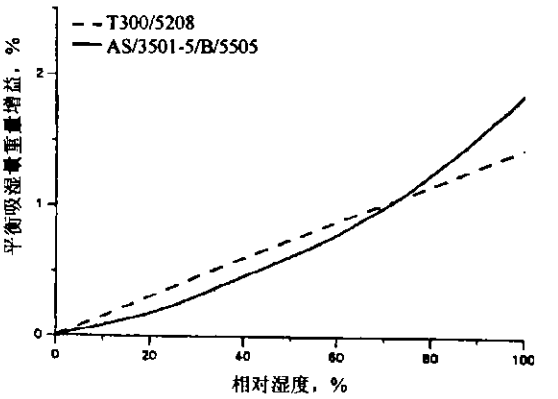


图 2.2.7.2 平衡吸湿量与相对湿度

2.2.7.3 浸润处理与试验环境

为了评估吸湿量对材料性能的最不利影响，要用预先吸湿到设计服役（寿命终结时）吸湿量（假定其相当于在设计服役相对湿度下达到平衡）的试件进行试验。首选的吸湿方法是采用 ASTM D 5229/D 5229M，其过程在 6.3 节中作了概括。

这个设计服役吸湿量是用考虑了对具体结构的次要影响的半经验计算得出的（如果采购方或适航当局没有规定），或用比较简单的假设较保守地确定的。前一情况的例子发表在文献2.2.7.3(a)中，其中把全世界的气象数据和基于美国空军飞机的数据相结合，以确定3类美国空军飞机（即战斗机、轰炸机、运输/加油机）的跑道停放环境谱。这个研究采用排序的方法，来选择关于典型碳/环氧树脂复合材料结构吸湿的基准地点和最恶劣地点。这些数据可以用来对具体的应用情况确定设计服役吸湿量，对于一个基地位于热带的超音速飞机，典型的具体设计服役相对湿度可能是81%RH。另一个较保守的方法是，从参考文献，

如关于全世界环境曝露条件的美国军用指南MIL-STD-210（文献2.2.7.3(b)）中选择的昼夜循环的平均相对湿度。由于没有考虑日晒、飞行活动（特别是超声速）以及气象季节变化所带来的干燥过程，这样做通常导致一个较高的设计服役相对湿度（一般为88%）。

基于以上的认识以及其他的历史考虑，MIL-HDBK-17的协调工作组已经同意，合理的飞机设计服役相对湿度上限值为85%RH，同时，在对具体飞机应用没有确定其特定的设计服役吸湿量之前，可以使用这个数值。当试验件在85%RH条件下吸湿达到平衡时，使用这个设计服役吸湿量将避免数据外推的工作。还没有对其他应用确定经过认可的设计服役湿度水平。

对于要提交给 MIL-HDBK-17 的湿热试验数据，应当把试件吸湿到平衡吸湿量，并在材料工作极限温度（MOL）或低于此温度下进行试验（见图 2.2.8(a)-(c)）。由图 2.2.8(a)可见，当温度低于室温时，环境对与基体有关的性能一般影响较小。然而，尽管没有低温MOL，很多材料体系与纤维有关的性能，却可能因为温度变低而不断降低。图 2.2.7.3 比较了拉伸（纤维控制的）和压缩（受基体影响的）响应随温度的变化。由于这些因素，认证/取证的试验计划通常不要求进行低于室温的浸润处理，同时，因为一般不要求确定低温MOL，因此，就仅仅进行最低设计服役温度条件（通常为-55℃（-67℉））下的试验。

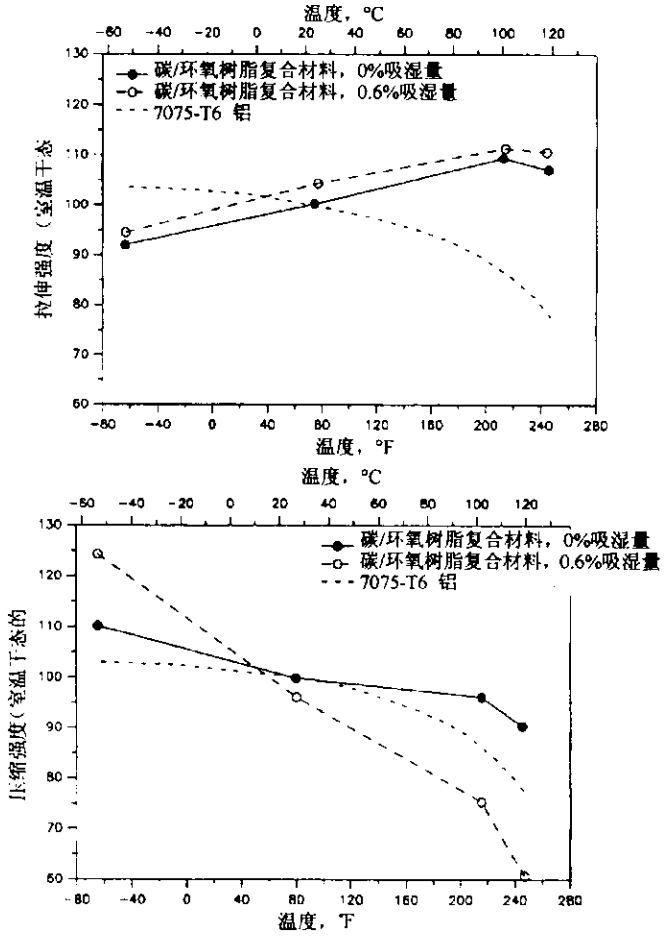


图 2.2.7.3　温度与湿度对强度的影响（文献 2.2.7.3(c)）

2.2.8 材料工作极限（MOL）

正如早先所指出的，聚合物基复合材料的性能受到温度和湿度的重大影响。一般，基体控制的力学性能，其值随着吸湿量增大和室温以上的温度增加而降低。对主要受增强体（纤维）性能控制的那些性能（例如单向拉伸），这种降低的情况在一定的温度范围内可能是相反的、或不出现或极小。对于受有机基体影响的性能（例如剪切和压缩），这种性能退化可能是严重的。此外，这种退化不是线性的。在给定的吸湿量下，随着温度的增加这退化变得更严重，直到某个温度时出现急剧的性能下降，并在超出这温度后这种下降变得不可逆。最好把性能开始急剧下降的温度规定为“特征温度”，它也被定义为材料工作极限（MOL）或最高工作温度。

复合材料的吸湿量对于随着温度升高出现的性能降低有重大影响。如图 2.2.8(a)所示，给定温度下的性能退化随着吸湿量的增加而更为严重。这样，MOL 随吸湿量增加而降低。虽然可以确定很多湿度水平时的不同 MOL，一般的做法是确定在一个“最恶劣”吸湿量下的湿态 MOL。对于某些应用，也可以确定干态的 MOL。

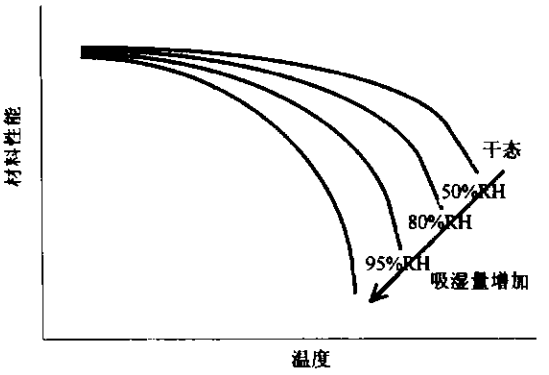


图 2.2.8(a) 温度与湿度对与基体有关的破坏应变的影响

确定 MOL 的目的是，要保证在服役中材料不会在温度稍微增加就会引起重大强度或刚度损失的环境下工作，从而绝对避免不可逆的性能改变。

应当指出，与纤维有关的性能低于室温时可能随温度下降而降低。然而，由于这些性能一般不会随温度下降而急剧降低，在预期最低服役温度下进行试验就已经足够，因而如 2.2.7.3 节所讨论和图 2.2.7.3 所示，不需要确定一般的最低工作温度。

尽管规定具体应用环境的上限可能低于对所用材料确定的 MOL 温度，应当在材料的 MOL 温度下，和相应于实际遇到的最高相对湿度下达到的平衡吸湿量，对每个材料进行表征。对于飞机，一般认为 85%是最恶劣情况的相对湿度。除了室温和低温外，在 MOL 温度下的试验将保证材料能够用于适当的应用情况，同时其最大好处是能够利用每个材料的潜力。可以用线性内插保守地估计在具体应用环境下的材料性能。如果需要，可以在计划中增加一些具体应用环境下的试验，以验证并降低保守的程度。图 2.2.8(b)描述了这个过程。

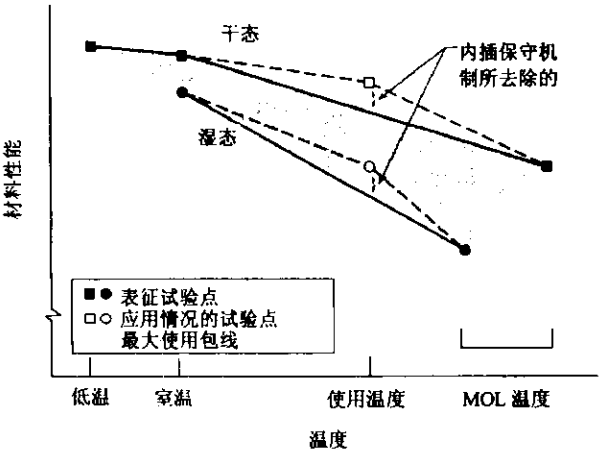


图 2.2.8(b) 材料性能极限的表征

还没有用于确定 MOL 的成熟标准。有一种方法（文献 2.2.8(a)-2.2.8(c)）利用由 DMA

或相似数据确定的玻璃化转变温度（T_g），减掉某个温度裕度ΔT。对于环氧树脂基体的复合材料，通常取 28℃（50℉）作为温度裕度，但是当用其他数据为依据时，也能证明对具体的应用使用较小的裕度是可接受的。虽然玻璃化转变温度（T_g）是一个有用的工具，但这不应当是确定 MOL 的唯一基础。玻璃化转变常常出现在一段温度区间，同时，众所共知，T_g的测量是与试验方法有关的（关于玻璃化转变温度参见 6.4.3 节）。对确定 MOL 有用的其他数据，包括外场经验（对于已经建立了的材料）和在包括测得的 $T_g \pm \Delta T$ 区间的某一温度范围内进行的力学试验。

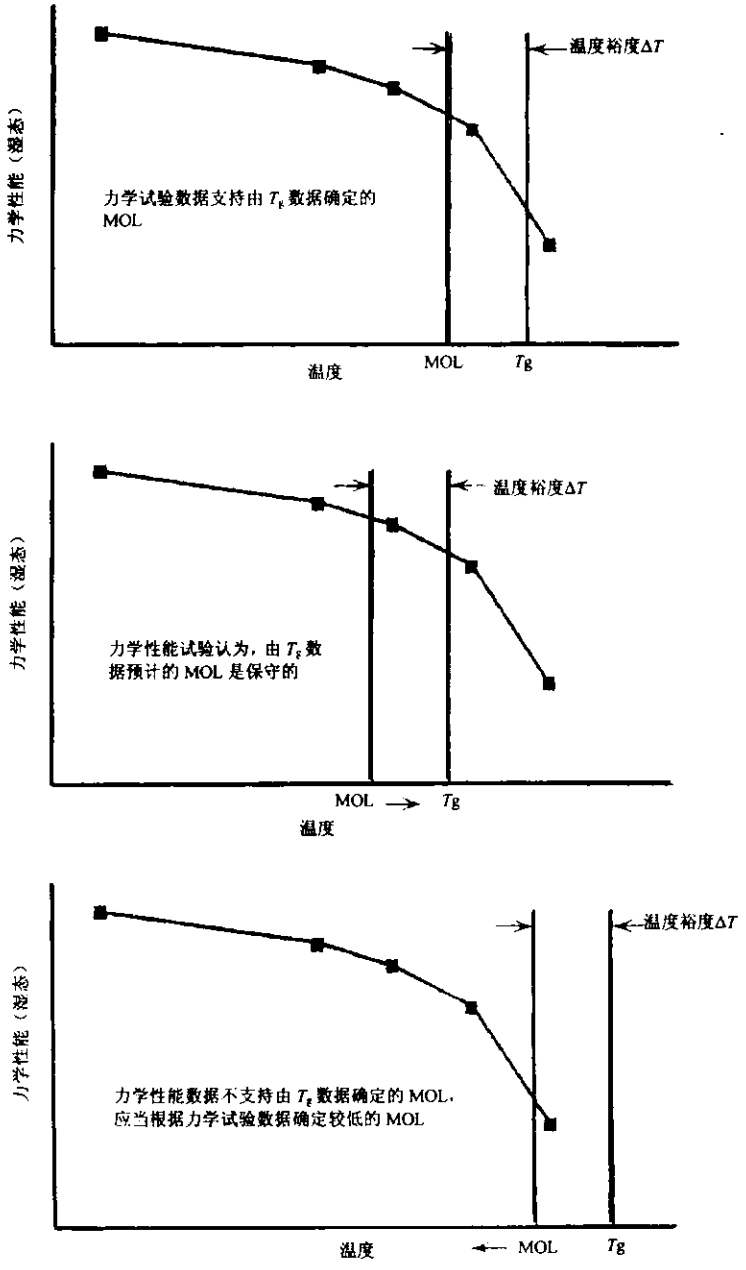


图 2.2.8(c)　利用力学数据和 T_g 数据确定 MOL

评定与基体有关力学性能（在适当的湿态情况下）随温度而变的行为，是用于验证（由 T_g 数据暂定的）MOL 的一个可靠方法。为此，不同研究人员已经使用了短梁强度、面内剪切强度、面内剪切模量和准各向同性板的开孔压缩强度，而后面两种是最成功的 MOL 标志。一般取 4 个或 5 个温度来提供所选性能的趋势曲线。图 2.2.8(c)给出了当用力学试验来验证由 T_g 数据所确定的 MOL 时可能出现的 3 种情况。在第一种情况下，力学数据确证了所选取的 T_g。在第二种情况下，力学数据认为由 T_g 预计的 MOL 是保守的。在第三种情况下，力学数据并不支持由 T_g 数据确定的 MOL，并指出应当选取较低的 MOL 值。由力学性能数据确定 MOL 的一个方法是，选取性能-温度曲线偏离线性达到给定百分数时所对应的温度值。在文献 2.2.8(d)中可以找到一个这样的例子，但是关于同时使用 T_g 和力学试验结果来确定 MOL 的专门准则的标准尚在讨论之中有待定型。不管怎样，它提供了一种定义材料 MOL 的现实方法，即由 T_g 测量值预计 MOL 值，然后用力学性能数据来验证或修正。

前面介绍了一种基于 T_g 和力学性能退化来确定 MOL 的一般方法。此外，还需要考虑其他一些因素，这些因素可能会进一步降低某些特别的应用情况和/或材料类型的有效 MOL。其中有两个因素特别重要：蒸汽压力分层，和“高温”复合材料的应用，下面几节将对其进行讨论。

2.2.8.1 蒸气压力分层

在为聚合物基复合材料层压板建立最高工作温度时，必须考虑的湿度/温度破坏模式（没有机械载荷作用）就是蒸汽压力分层破坏（文献 2.2.8.1(a)-(c)）。如同以前所指出的，聚合物基复合材料（热固性和热塑性的）具有某种程度的孔隙率和吸湿。当基体通过扩散过程从环境中吸湿时，孔隙区域将部分充水。如果把层压板曝露在高于水的沸点的环境中，则水变成蒸气。当温度和相应的蒸汽压力达到某一水平，即超过了层压板材料的湿态层间（即平面法向的）拉伸强度，就出现了分层。

蒸气压力分层模式可能出现在取决于吸湿总量的某个温度范围内，如图 2.2.8.1(a)所示。在湿板的面外拉伸强度曲线（与设计相对湿度和平衡吸湿水平有关）与蒸气压力曲线相交时，预计会出现破坏。为确定新材料体系在某个设计相对湿度范围内的最高工作温度，推荐执行类似于图 2.2.8.1(b)的试验计划。

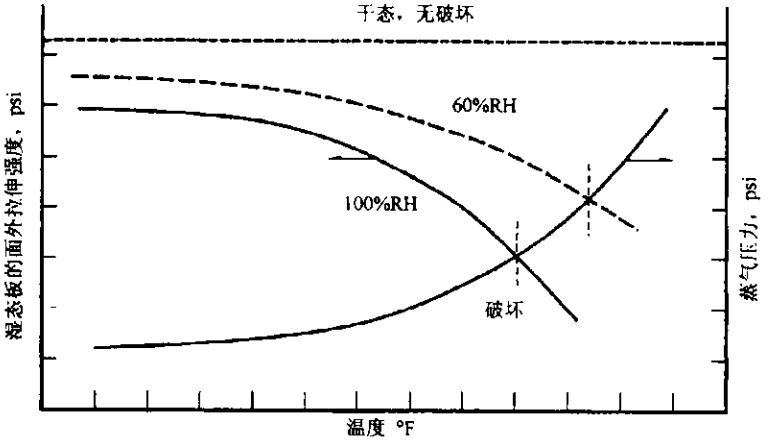


图 2.2.8.1(a) 当内部蒸气压力超过面外拉伸强度时出现破坏

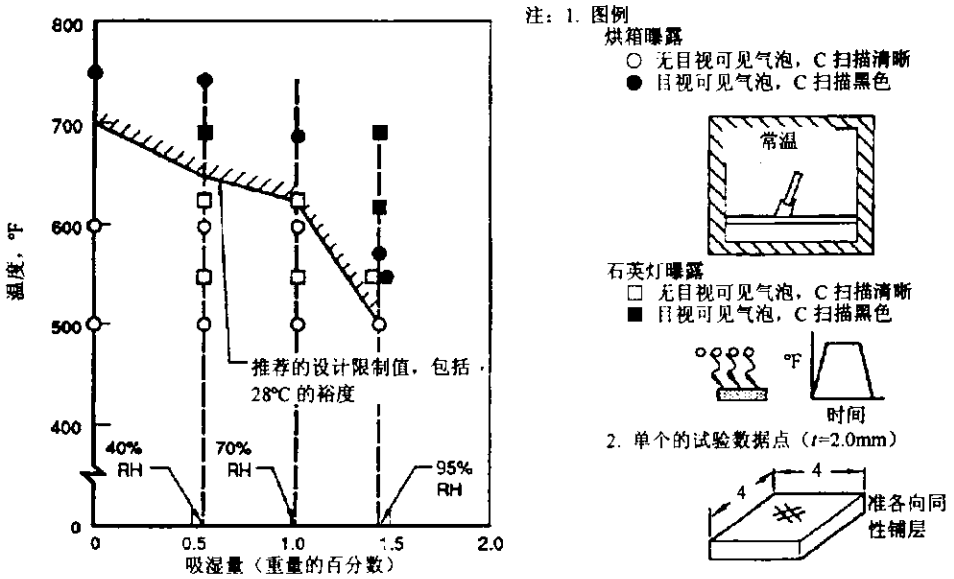


图 2.2.8.1(b)　吸湿量限制了碳/聚酰亚胺使用温度

除了干态板件外，应当在 3 个相对湿度水平下对板件进行浸润处理使其达到平衡。把这些板件曝露在飞行任务的时间-温度剖面（环境）下。进行板件热曝露试验的一个问题是，这个时间-温度曝露应当模拟真实的服役过程加热情况，以便层压板的失水情况在设计应用中具有代表性。板件所经历的加热速率低于设计情况时可能会更多地失水，从而在出现分层前达到一个虚假的较高温度。对于诸如导弹应用中所经历的高加热速率，推荐使用石英灯加热。对于较慢的加热速率，采用计算机控制的烘箱曝露方式可能是容许的。所选择的许用设计温度曲线，应当低于出现分层温度的安全容限（在这个例子中为 28℃（50℃））。

2.2.8.2　高温复合材料体系的MOL考虑

高温复合材料体系的 MOL 还决定于除湿度以外的其他服役环境条件。MOL 取决于真实应用中对任务的寿命要求。零件的寿命与时间、温度、压力和机械载荷有关。

湿态的 T_g 是高温复合材料 MOL 值的指标之一。湿度不影响高温性能而可能在厚层压板截面内引起热气泡。对热气泡的阻抗与零件的吸湿量和厚度、以及零件将会遇到的加热速率有关。

高温复合材料 MOL 值的其他指标有横向微裂纹（TVM）阻抗和热氧化稳定性（TOS）。TVM 是由于层压板在某个温度范围内的热循环所造成的。由于纤维和树脂在膨胀系数上的巨大差别和大多数高温树脂的韧性较低，TVM 可能扩展。这些热应力可能引起 90°铺层在纤维-基体界面处的破坏，这种退化主要影响由树脂/界面所控制的性能如压缩强度、面内剪切强度和层间性能。出现的 TVM 数量取决于使用温度的范围、最高工作温度和热循环的次数。

TOS 是对材料氧化速率的一种度量，也是高温复合材料体系的一个重要性能。聚合物复合材料的热氧化特征与纤维、浸润剂和树脂有关。可以在定性的基础上分别评估这些组分的热氧化稳定性。因为纤维/基体界面是主要的退化区域，真实的性能则要在层压板级别上加以评估。虽然与界面有关的性能受到的影响最大，但所有的性能都可能受到 TOS 的影响。虽然在重大的重量损失以前就有某些力学性能的退化，层压板的重量损失仍是一个特

定材料系统热氧化总量的良好标志。材料的 TOS 性能与时间、温度和氧气流动速率/压力有关。

对于高温聚合物复合材料，可能存在 TVM，TOS 和湿/热曝露之间的相互促进。为了对材料的 MOL 有准确的评定，推荐用一种反映实际应用环境的真实方式，使这些影响同时出现。对于短期的应用，可以通过把层压板曝露在热循环、在温度下老化以及浸润处理的联合环境下直到零件具体的任务寿命，以实验的方式来确定退化的总量。可用环境曝露后的材料，机械加工出一些试件进行试验，从而评定材料的剩余强度。

对于长期应用的情况，可能难于进行这种实时的环境曝露。可能需要建立耐久性模型和加速试验，以便预计这些应用在寿命终结时的性能。可以用耐久性模型预计所形成（与任务中曝露环境有关的）损伤总量和随后的剩余强度性能。可以通过在较高的温度或压力下进行材料老化，以加速材料的氧化，从而加速任务曝露试验。重要的是要使加速试验产生与真实时间曝露同样的损伤机理。为此，推荐要进行某些有限的真实时间曝露试验，以证实损伤机理，并证实耐久性模型的精确性。

2.2.8.3 湿热试验——报告破坏时的吸湿量

对于准备进行湿、热静强度试验的层压板试件，一般要进行预浸润处理到平衡吸湿量。通常，试验结果中报告的是这一平衡吸湿量而不是在破坏时的真实吸湿量。在图 2.2.8.3 中说明了这种现象。在室温（RT）和在 177℃（350℉）下，对带湿态碳/环氧树脂面板的夹层梁试件进行压缩试验。图 2.2.8.3 显示，因为在室温下的试验过程中没有可测量到的失水，这 5 个室温下的梁压缩试件在破坏时的吸湿量（1.25%）与试验前的吸湿量相同，通过破坏后立即切下一块面板、称重、将其干燥、再计算破坏时的吸湿量证实了这一点。这些 177℃（350℉）的试验件破坏前在试验温度下停留了 9 分钟，失水大约 0.5%，吸湿量由 1.25% 变为 0.75%。每个试件都是通过在破坏后立即切下一片面板、称重、将其干燥、再计算得出其在破坏时的吸湿量。必须了解的是，在初始的 1.25%平衡吸湿状态下，沿面板厚度方向上的每个铺层均为 1.25%的吸湿量。在破坏时的 0.75%是面板的平均吸湿量，沿厚度具有明显的分布变化（表面干而中心湿）。

试验的目标应当是使试验过程中的失水和破坏时可能的吸湿量分布的变化为最小。有几种途径可以使湿热试验过程中的失水为最小。如果准备在低于 100℃（212℉）的温度条件下进行强度试验，可以在试验中把试件保持在与原先进行浸润处理时具有相同相对湿度的加湿箱内，以维持试验前的吸湿平衡（无失水），如果试验温度高于 100℃（212℉），这个方法就不行了。另外一个使失水最小的方法是，使在高温试验温度下的时间为最少。使用接触式加热器或石英灯（而不是增压的热空气箱）可以使试件表面温度达到试验温度的时间为最少。当使用加速加热装置时，在试验件厚度中心处稳定在试验温度后才可施加机械载荷。最后，还可通过选择较厚的试件使失水为最小，因为失水首先出现在表面的铺层内。

虽然采取了一些措施以使湿热试验中的失水为最小，仍然必须要用文件形式记录破坏时的吸湿量并与强度数据一起报告。有 3 种方法来获得破坏时的吸湿量。其一是采用模拟试验件材料、铺层、和试验段宽度及厚度的湿度监控试件，监控试件必须采用与试验件相同的制造方法和预浸润处理步骤。在湿热试验过程中，这个监控试件必须和试件一样放入同一个试验箱内，经历同样的热历程。一旦试验件破坏，必须立即把监控试件取出热环境

以防止进一步失水。对这个监控试件称重、干燥、再称重，从而计算出破坏时的吸湿量。第二种得到破坏时吸湿量的方法是，利用文件公布的试验过程时间温度历程预计湿热试验时的失水量，再从试验前的吸湿量中减掉这部分吸湿量，就得到了破坏时的吸湿量。这个方法假定该试验温度下的湿扩散常数以及试件在试验过程中的详细热历程是已知的。第三种，也是最精确和首选的方法是，在破坏后立即切下一段试件的试验段，进行称重、干燥、再称重，从而计算出破坏时的吸湿量。

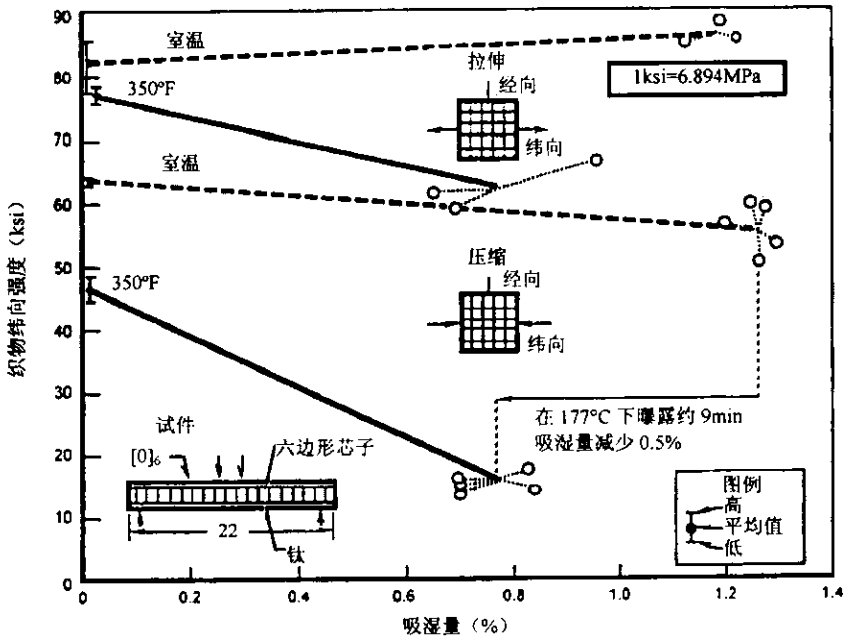


图 2.2.8.3　湿/热强度试验过程中的失水

2.2.9　非大气条件的试验

此节留待以后补充。

2.2.10　由层压板获得单向层的性能

虽然有可能，但通常很难用单一铺层方向的单向试件力学试验，得到有效的或可重复得到的试验结果，特别是在没有足够试验量的试验室中，技术人员不能够专门致力于准备和进行这类试验，情况更是如此。一种替代的办法是，试验一种通常取自$[90/0]_{ns}$系列的正交铺层的层压板，并通过层压板理论计算等效的单向铺层的强度与刚度。已经发现，正交铺层层压板对于试件准备和试验实施中讨厌的次要偏差是非常宽容的，常常得到较高的平均强度和较低的数据分散性。很多人也认为，正交铺层层压板的材料响应对结构层压板更有代表性。这个方法的试验数据处理基础将在 2.4.2 节中讨论。

2.2.11　数据归一化

数据归一化是试验后的一个数据处理过程，试图消除试验数据中因纤维体积含量局部变化所造成的不合实际的人为偏差。下面概括了将纤维控制性能的结果修正为某个固定基准纤维体积含量时结果的过程，2.4.3 节将对此进行详细介绍。

复合材料的大多数材料性能与增强体与基体的相对比例有关。在表征连续增强复合材

料性能时，采样母体内的部分性能值变异只是由于纤维体积的局部变化，而不是由于纤维、基体或纤维/基体界面性能的任何变异。对很多沿增强纤维方向测量的复合材料性能*，性能与纤维体积含量之间的关系基本上是线性的。这就有可能把某些测量的性能修正到某个固定的基准纤维体积含量，得到所谓的归一化性能值。

虽然少量纤维体积含量的变异可能部分是由于纤维总量的变异（以及甚至是由于空隙的变异），但大多数的纤维体积变异则是由于工艺过程产生的局部基体含量变化。

2.2.12 数据文件的编制

在开始实施试验计划以前有一个必需的步骤，即先对有关数据文件编制要求和方法制订计划以使数据能全部用于预定的目标。在确定数据文件编制的范围之前，必须确定获取数据的初始目标和数据可能的长期用途。试验的要求可以从初步选材的快速估计（一到几个试件就已足够），到为一个组织建立向 MIL-HDBK-17 提交的长期的材料性能值数据库（需要大量的试件）。不同的数据文件编制任务可能需要不同阶段的数据记录和评估。在试验室内可能要保存原始数据，甚至传感器的原始信号。对于材料性能的评定与评估，特别是当信息可以追溯到原始的来源时，需要的试验信息可能就不那么详细了。按照 ASTM E-49 委员会的定义，评估是用于“确定性能数据精度与可靠性的过程”（文献 2.2.12(a)）。对 MIL-HDBK-17 数据所期望的是，文件的编制应当足以满足：

- 建立可追溯性与历史记录（由制造、试验和评估日期来识别）。
- 适当地确定材料的谱系和相关的工艺规范。
- 鉴别试验的程序。
- 鉴别影响试验结果的变量。

建立参照数据的其他计划，至少应当具有如表 2.5.6 同样严格的文件编制要求。

在任何试验计划中，数据可能供将来使用，数据文件的编制应当足够完整，以便材料和试验能够复制再现。

文件可以记录在一个原始数据的计算机化数据库中，或者记录在试验室的笔记本或用其他的硬拷贝形式。在保存和评估数据过程的计算机化工作越早进行，保持可追溯性就越容易，并可避免抄录的错误。使用计算机并不能取消错误检查和和评价的要求，无论过程中计算机化程度有多高，每个组织应当有其自身的数据记录和评价规程。在这种规程中包括的考虑事项有，谁负责记录特别的信息——材料标识、工艺、试件准备、检查、试验和破坏试件的存档，以及每个这些步骤的联系信息。每个试验室十分普遍的做法是，对材料识别信息实行有限制的访问。在这个情况下，如果任何数据计划长期使用，就必须明确职责以使材料识别信息与试验室的数据记录相对应。

可以由几个来源得到建立数据文件编制要求的指南。在 MILHDBK-17 第一卷 2.5.6 节，列出了把数据提供给本手册时需要的数据文件编制要求，和推荐用于内部记录保存的一些条款。两个 ASTM 的指南（文献 2.2.12(b)和(c)），为数据记录和数据库的编制提供了主要的指南。ASTM E 1309 讨论了所有复合材料的材料识别问题。ASTM E 1434 对连续纤维聚合物基复合材料力学性能，提供了试验信息和结果的指导。这两个文件应当按模块方式一起使用；首先确定材料然后识别试验方法，并记录结果信息；每个数据元素具有一个下列

* 所谓“纤维控制的”性能。

类型的重要性等级：

- 对试验有效性需要的
- 对材料可追溯性需要的
- 对试验有效性推荐的
- 对材料可追溯性推荐的
- 可选的

这些重要性等级把数据文件编制要求分成两个子集：一个用于材料可追溯性，一个用于试验有效性。一个试验室能不读取材料识别信息就可满足试验有效性要求。应当把材料可追溯性的责任指派给某个可以接近必要消息的人（如同上面所指出的）。用于建立这些内容和相似 ASTM 指南的方法，对数据记录和计算机化的数据库的内容提供了帮助，但对数据库的结构没有不适当的限制。

因为表 2.5.6 规定，除非报告有偏差，都要遵照试验方法的所有部分，所以，在 MIL-HDBK-17 的数据文件编制要求中隐含了这些 ASTM 指南。有几个力学性能的 ASTM 方法涉及到关于数据记录的 E 1309 和 E 1434。其结果，基准由表 2.5.6 引向 ASTM 试验方法，到达数据记录的指南。

另外一个来源的指南，是复合材料材料试验数据大纲（CMTDS），这是由 MacNeal Schwendler 公司的 MVISION 数据库结构内部编制的（文献 2.1.12(d)）。这个大纲集中考虑连续纤维聚合物基复合材料，在一个规定的数据库结构中建立了专门的字段，包括字段名、同义字和预期字段实体的数值赋值，而没有定义要求的等级。考虑设置了大量可能的性能，包括热力学性能和物理性能。在大纲的编制中考虑了 MIL-HDBK-17 和 ASTM 指南推荐的内容，既作为指南的来源又是更一般建议的具体实施。发布的版本中着手处理试验数据问题，性能级信息的草案现在正在编制中。CMTDS 编制的经验正反馈用在目前正进行的 ASTM E 1309 与 E 1434 修订之中。

关于编制材料性能数据库的一般指南，见文献 2.2.12(e)和(f)。

2.2.13 针对应用情况的特殊的试验要求

此节留待以后补充。

2.3 推荐的试验矩阵

2.3.1 筛选材料的试验矩阵

筛选的目的是为了揭示新的候选材料体系的关键力学性能属性和/或不足之处，同时又使试验量为最小。对具体的复合材料体系，筛选过程确定其关键的试验和环境条件，以及任何其他的特殊考虑。合适的试验矩阵设计，可使其与现有产品使用的材料体系进行对比。

筛选试验矩阵设计的一般方法是选择关键的静力试验项目来提供足够的数据，以便评定单层和层压板级的刚度和强度平均值。单层级的试验提供通常在经典层压板点应力分析使用的材料本身的刚度和强度性能，包括拉伸、压缩和剪切载荷。另外，还要在严重的环境下进行单层级的拉伸和开孔压缩试验。层压板级的试验对与应力不连续（如紧固件孔、螺栓挤压或冲击损伤）相关的使用情况，提供进行筛选的强度数据。一些附加的层压板级试验，则用于提供筛选的刚度数据，以便验证通过经典层压板理论，用单层数据来预计层

压板的刚度。这些试验一般都在室温下进行，而环境的影响则用关键的单层级拉伸和开孔压缩试验来进行估计。

在 2.3.1.1 节中，给出了一个典型的力学性能筛选试验矩阵的例子，并进行了讨论。正如 2.3.1.2 节在高温材料的例子中所讨论的，对最严重的环境条件可能还必须考虑附加的因子。对于曝露在工作液体中以及对其他特殊情况的敏感度问题，在筛选评定时可能还要增加一些特殊的试验。在 2.3.1.3 节中，给出并讨论了一个有关液体敏感度的筛选试验矩阵的例子。（具体应用时可能需要对上述试验矩阵进行修正。）

2.3.1.1 力学性能筛选

表 2.3.1.1 是一个推荐的力学性能筛选试验矩阵，这个试验矩阵是为环氧树脂基树脂体系建立的，但对其他的材料体系也有用。在这个筛选试验矩阵中，0°轴向拉伸试验考察纤维控制的性能，而 0°轴向压缩试验则监测纤维/基体之间的相互作用*，它们提供了静强度和刚度性能。±45°的拉伸试验件则用来评定基体的特性，确定剪切模量和有效剪切强度。最后，用冲击后压缩试验来评定其损伤阻抗。试验在 3 种环境条件下进行：低温大气环境（CTA）、室温大气环境（RTA）和高温湿态（ETW）情况。推荐这些试验状态是基于目前所用环氧树脂体系复合材料的结果，这些试验结果表明：CTA 环境对纤维控制的性能最关键，ETW 环境对基体控制的性能最严重。ETW 试样要处理，使其达到在所规定相对湿度下的吸湿量平衡状态。

表2.3.1.1 复合材料静强度筛选试验矩阵

试验内容	试验件数量			评价重点
	CDT	RTA	ETW	
单层：				
0°拉伸	3	3	3	纤维性能
0°压缩		3		纤维/基体相互作用
±45°拉伸		3		纤维/基体相互作用 （0°/90°剪切——单层） （±45°——层压板）
层压板：				
开孔压缩[1]		3	3	应力集中
开孔拉伸[1]		3		应力集中
螺栓-挤压[1]		3		挤压
冲击后压缩[2]		3		冲击损伤

[1]紧固件孔的影响

[2]按NASA RP1092

2.3.1.2 对高温材料体系的力学性能筛选

表 2.3.1.2 给出了一个用于高温聚合物基复合材料的典型力学性能试验矩阵，为了在评估的筛选阶段能恰当地评定高温聚合物基复合材料的耐久性，对表 2.3.1.1 作了一些变化。试验矩阵可以依据研究的目的作改变，但重要的是要评定所有的曝露状态。

在进行力学试验评定前，必须评定预浸料的物理和化学性能。要仔细检测试验用层压

*0°轴向拉伸试验也能揭示某些材料在高应变率时的纤维/基体的相互作用。

板的孔隙率、干态及湿态的玻璃化转变温度 T_g。所推荐的力学试验包括了纤维控制的性能、界面/树脂控制的性能和损伤容限性能。高温静力试验情况的温度，应该低于该材料体系的湿态玻璃化转变温度 T_g。

湿态的曝露状态为 71℃（160°F）/85%RH，直至达到平衡吸湿量。很重要的一点是，在高温湿态试验中要测量试件的干燥情况，并保持其为最小。

热氧化稳定性（TOS）试验应该至少进行 1 000 小时，应该在试验至规定的 100，250，500，750 和 1 000 小时的时间间隔，测量其质量损失，这个试验给出了材料的氧化速率。

表2.3.1.2　高温聚合物基复合材料试验矩阵

力学性能	干态试验温度			湿态[1]	TOS[2]	热循环[3]
	最低温度	24℃	ET1	ET1	ET1	ET1
拉　伸	3	3	3		3	
压缩或开孔压缩OHC		3	3	3	3	3
面内剪切		3	3	3		3
I型断裂韧性或CAI		3	3		3	3

[1] ET1高温试验温度应低于材料体系的湿态玻璃化转变温度。

[2] 应在高于ET1但低于材料体系的干态玻璃化转变温度Tg的情况下，至少进行层压板热老化1 000小时，或在代表1 000小时曝露的加速试验状态下进行热老化。应记录质量损失与时间的关系，即记录100，250，500，750，1 000小时情况下的质量损失。在曝露后应进行显微镜观察。试验件的机械加工应在曝露后进行。

[3] 从最低温度到高于ET1但低于材料体系干态玻璃化转变温度Tg的温度下，对层压板进行热循环试验。试验至少进行500次热循环。试验后测量微裂纹的密度，在曝露后再将层压板加工成试验件。

热循环试验应该至少要进行 500 次。试验的目的，不仅是要确定是否会出现微裂纹，并要确定微裂纹的开裂速率。试验的最低温度应该代表在使用中可能出现的最低值，例如，对飞机结构为-54℃（-65°F）。

对 TOS 试验和热循环试验，其最高曝露温度应在材料体系的湿态玻璃化转变温度 T_g 和干态玻璃化转变温度 T_g 之间。如果最高曝露温度低于湿态玻璃化转变温度 T_g，试验可能不足以区分，同时可能需要更长的曝露时间。当曝露温度高于材料体系干态玻璃化转变温度 T_g，通常会得到在低于干态玻璃化转变温度时不会出现的一个不真实的损伤机理。在对试验件进行机械加工前，应对层压板进行孔隙率和有无分层的无损检测。为了了解与具体曝露情况相关的损伤机理，还应进行显微镜观察，其中包括测量微裂纹的密度。

2.3.1.3　液体敏感性的筛选

过去关于结构复合材料曝露在使用中通常遇到的相关液体（除了水和湿气）中的问题，并不是主要关注的事情，这是因为大多数结构复合材料都是以环氧树脂为基体的，它本身对液体有很好的抗力。通常，采用环氧树脂时，其所允许的因吸收大气中的湿气而导致的性能降，已足以覆盖其他相关液体（例如燃油、液压油等）所可能引起的性能降。虽然在有强酸介质时环氧树脂体系出现加速退化的问题，但大多数工作液体，例如清洁剂和液压油，在本性上是碱性的。但环氧树脂对二氯甲烷（各种油漆清除剂中的一种共同成分）缺乏抗力则是个例外。二氯甲烷还会不断地侵蚀其他的结构聚合物。因而，通常不允许在聚合物基的复合材料上使用化学除漆剂。

鉴于以上的考虑，同样重要的问题是，需要评估新聚合物材料对其可能接触的各种液体的阻抗。好多新的环氧树脂都有一些添加的组分，以改善其韧性等性能，添加的组分可

能会影响环氧树脂对溶剂的阻抗。现在还使用了或正在考虑使用很多其他一些聚合物，它们都具有不同的溶剂敏感性。过去遇到过一个例子，即关于正在研制中的聚砜热塑性结构件的评估，因其对磷酸脂基液压液的阻抗差而被放弃（见文献 2.3.1.3(a)）。某些其他的结构热塑性材料，尽管它们对湿气和液压油具有优异的阻抗，但对燃油的抗力却较差，具有较高芳香物含量的燃油，例如相对于 JP-8，JP-4 似乎会引起更严重的问题（见文献 2.3.1.3(b)）。在所引用的情况中，燃油的浸润似乎主要是大大降低材料（PEEK）的玻璃化转变温度（见文献 2.3.1.3(c)），其结果就是降低了材料的最高使用温度。

使用温度较高的树脂体系，例如双马来酰亚胺（BMI）和聚酰亚胺，容易因高碱性液体的作用而退化。在有高浓度氢氧化物的离子积聚时，这两种聚合物都容易出现功能酰亚胺环的分裂。由于大多数航空公司所用的清洁剂和液压油在实质上是碱性的，其次因为氢氧化物的离子在碳纤维与活性金属之间电耦合时，在树脂边界上局部生成并从而引起降解，因此这是个重大的问题，应该用专门的设计，来满意地处理这个电化学腐蚀问题。引进一种绝缘机制，例如在碳/树脂和金属结构之间的一个树脂/纤维层，将是一种办法，可用来减轻这种因电解驱使的退化而出现的危险，提供排水装置等等也可以减少曝露。如果有曝露在一个坑、池区域内的情况，对层压板的边界加以良好的封严就很重要。通常，把这些材料曝露在碱性的溶液中可能是十分偶然的，因而这也就可能不是个问题。

在可能曝露在有害液体环境时，推荐用以下的评估程序，来评定聚合物树脂体系对此应用情况的适用性。

评估中应当考虑到飞机结构对液体的不同曝露程度。推荐两种液体曝露分类，对每类列出了液体的例子：

类别 I

有可能储存或将与材料长期接触的液体

JP-4 发动机燃油	MIL-T-5624
JP-5 发动机燃油	MIL-T-5624
JP-8 发动机燃油	MIL-T-83133
液压油	MIL-H-5606
液压油*	MIL-H-83282
PAO（Poly Alphaolefin）冷却液	MIL-C-87252
发动机润滑油	MIL-L-7808
发动机润滑油	MIL-L-23699
乙烯乙二醇/尿素除冰液（Class I）	SAE AMS 1432（取代 MIL-D-83411）
机油箱水**	MIL-S-8802 section4.8.15
二氯甲烷氯化物***	ASTM D4701（取代 MIL-D-6998）
SO2/盐喷剂***	---

* Monsanto 低密度航空液压油，民用。

** SAE AMS 2629 喷气机基准液和 3%氯化钠氯化物/水溶液的混合物。

***U.S.海军要求。

类别 II

涂上后擦去（或蒸发）或不会与材料长期接触的液体

碱性清洁液（Types 1 和 2）	MIL-C-87936
MEK 洗涤液	ASTM D740（取代 TT-M-261）
干洗溶剂（Type 2）	P-D-680
烃洗涤液	TT-S-735
聚丙二醇除冰剂（Type 1）	MIL-A-8243
异丙醇除冰剂	TT-I-735

有关这些液体的进一步信息见文献 2.3.1.3(d)-(t)。

还推荐对每一类用不同的曝露程度，在试验或评价其重量损失前通过浸润进行曝露：

类别 I 将材料浸润在液体中，直到重量增益达到平衡（饱和）（除了 MIL-S-8802 的机油箱水腐蚀试验）。

类别 II 将材料在液体中浸润 15 天，以确定最坏的影响。然后进行一些模拟较真实情况的试验，包括意外延长曝露等。

应当进行力学试验和物理试验。在力学试验中，应当包括对准各向同性铺层的开孔压缩试验和±45°拉伸试验。开孔压缩试验与设计许用值有重要的关系，且对基体的退化很敏感。±45°拉伸试验通常被工业界用来比较基体的性能，它对鉴别“潜在的”有害液体很敏感。它提供了是否保持必需的剪切刚度的一种指标，以保证树脂到纤维的性能传递是可接受的。虽然材料刚度损失的准则与材料和应用情况有关，通常认为剪切模量比未曝露时低 20-40%就是重大的，从而需要进一步研究。室温和最大使用温度下曝露后的试验，最少要试验 5 个试件。其试验结果应当与未进行曝露情况进行比较。

对开孔压缩试验和±45°拉伸试验的一种较经济的替代办法，是层间剪切试验或短梁剪切试验，这些试验件易于制造、加工、浸润处理并进行试验。虽然短梁强度试验与设计性能无关，但它对基体的退化敏感，因而可以作为材料评价的一个有价值的指标。和±45°拉伸试验一样，应把室温和最大使用温度下曝露后的试验结果，与未进行曝露情况进行比较，以获得液体曝露的影响。

物理试验中应当包括称重以测量质量变化，显微照相来检查微裂纹，以及可能时包括用扫描电子显微镜检查表面银纹。相对于前者，应当注意的是，因为显然已经达到了饱和状态，接下来未必就会自动终止进一步的性能退化。特别是当涉及到新树脂体系时，应当进行长期曝露于关键液体情况的试验。在文献 2.3.1.3(u)中给出了这类试验的一个例子。因为涉及长时间的曝露，这些试验应当在评估过程的早期就开始进行。

过去的程序是，如果已经证实水或湿气是使性能退化最严重的液体，则在随后的设计试验中，将不包括有别于吸湿处理的其他各种液体曝露试验。在图 2.3.1.3(a)中，对类别 I 的储存液体给出了这样的一个程序。实际上，如果在液体曝露后的材料性能优于湿气曝露的情况，则在随后的试验中只要考虑湿气即可。如果是水以外的某个液体更严重，则在随后的试验中还必须再包括这个液体。

对于涂上后擦去的类别 II 液体，其程序有些差别，因为水不是一个良好对照物。因此，推荐一个具有已认可使用经历的树脂作为对照。这用图 2.3.1.3(b)的决策树来说明，其中建议用 3501-6 环氧树脂的性能进行比较。

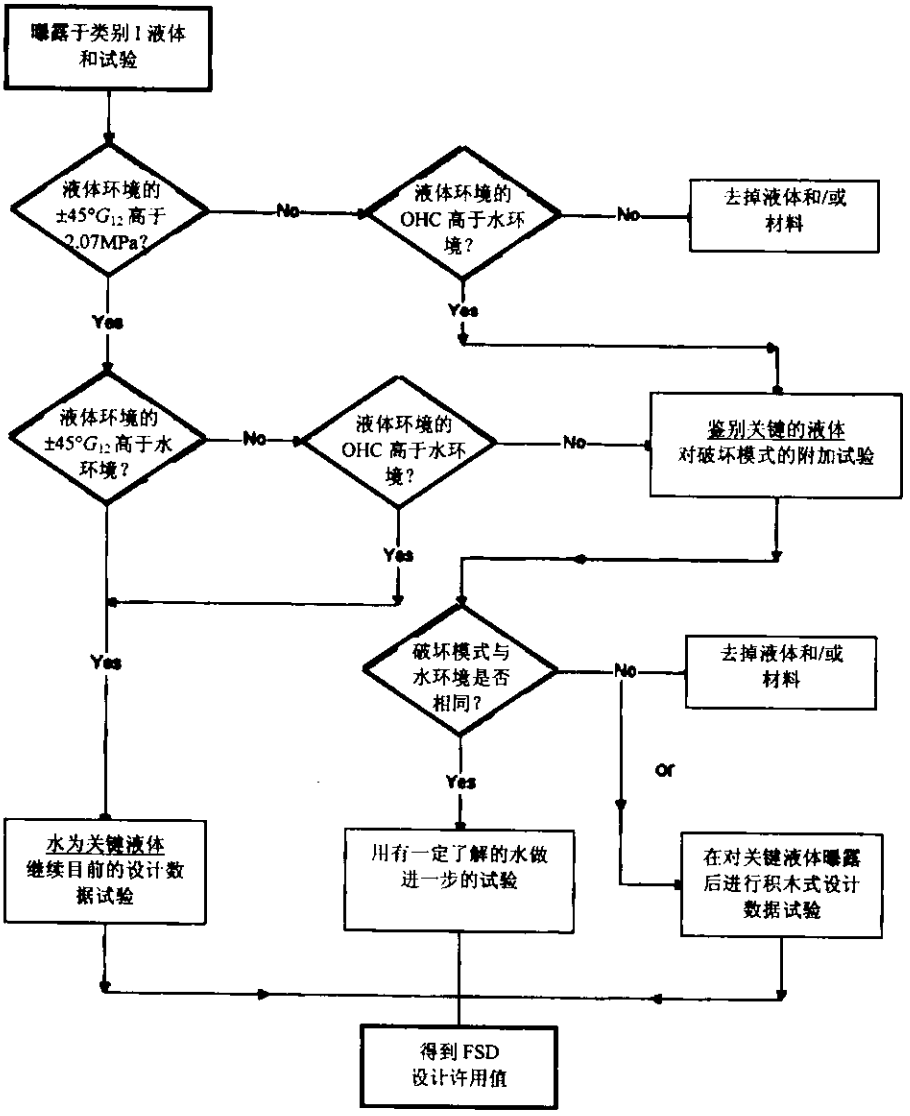


图 2.3.1.3(a)　决策树——类别 I 储存液体

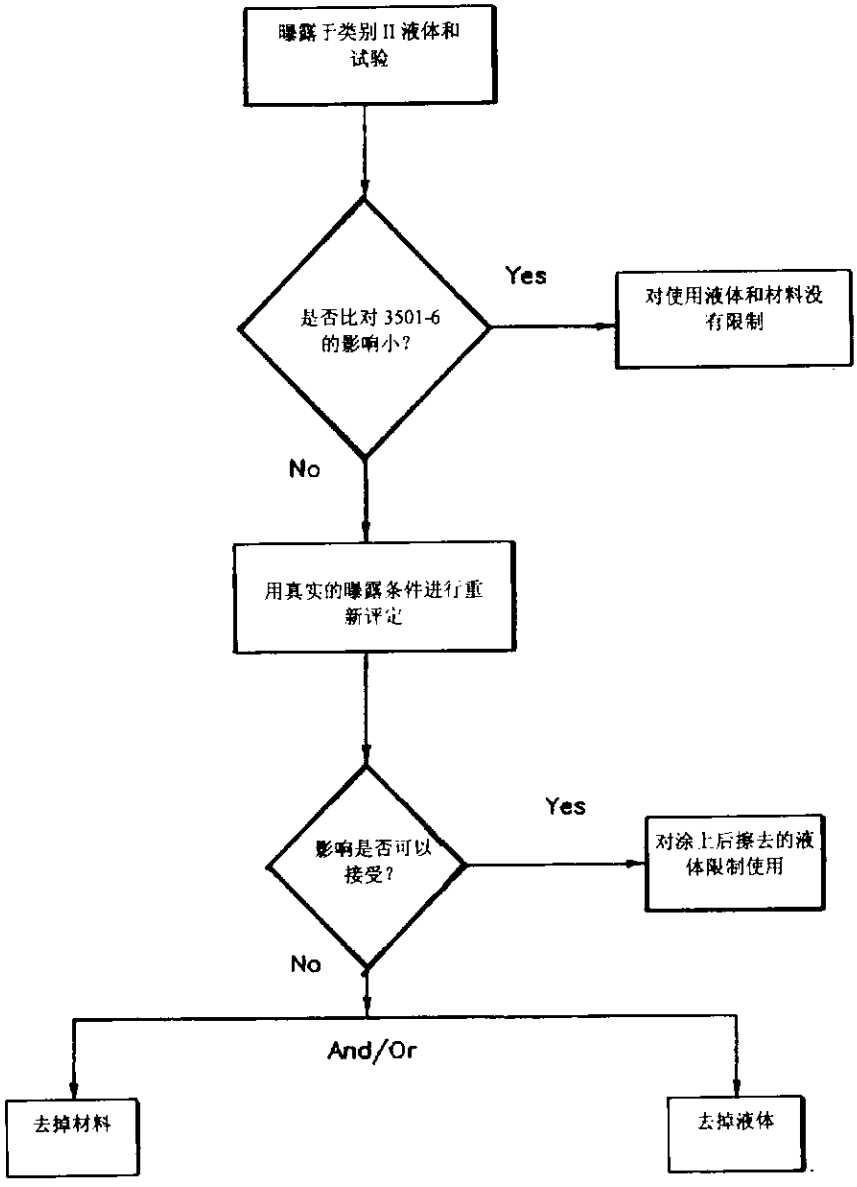


图 2.3.1.3(b) 决策树——类别 II 不长期曝露的液体

2.3.2 材料取证试验矩阵

2.3.2.1 组分试验矩阵

此节留待以后补充。

2.3.2.2 预浸料试验矩阵

表 2.3.2.2 给出了推荐用于预浸料材料的试验矩阵。本表是基于热固性基体得到的，对热塑性基体需要进行修正。

表2.3.2.2 由材料供应商和主承包商进行的推荐的物理和化学性能试验

试验性能	建议的试验方法[1]	每批次的试验数量[2]	试验总数
树脂含量	ASTM D 3529	3	15
挥发分含量	ASTM D 3530	3	15
凝胶时间	ASTM D 3532	3	15
树脂流动性	ASTM D 3531	3	15
单位面积重量	†	3	15
吸湿量	†	3	15
黏　性	†	3	15
HPLC（高效液相色谱法）	†	3	15
IR（红外光谱法）	†	3	15
DMA（树脂浇注体的动态力学分析）	†	3	15
DSC（差示扫描量热法）	†	3	15
RDS（流变动态光谱法）	†	3	15

[1] 在制造预浸料以前，对试验方法进行协调和统一。

[2] 对5批预浸料材料，每一批都应进行试验。

† 试验方法待定。

2.3.2.3 单层试验矩阵

表 2.3.2.3(a)和表 2.3.2.3(b)中，给出了推荐的物理和力学性能试验矩阵，供单层级材料的统计评定。

表 2.3.2.3(b)所示的力学性能试验矩阵，是基于对每种性能在每种条件下至少 30 个试验的要求，（至少 5 批,每批至少 6 个数据），以在确定 B 基准性能时进行参数和/或非参数的分析。如果承包商和采购方或认证当局能取得一致，较少的试验或批次也是可接受的。

表2.3.2.3(a) 固化后单层物理性能试验

物理性能	建议的试验方法	每批预浸料的试验数量[1]	试验总数
纤维含量	ASTM D 3171	3	15
树脂含量	ASTM D3171	3	15
密度	ASTM D 792	3	15
固化后单层厚度	-	10	50
玻璃化转变温度（干态）[2]	-	3	15
玻璃化转变温度（湿态）[2]	-	3	15

[1] 对5批中的每一批都应进行试验。

[2] 干态试验件是指“制造状态”的试验件，它们一直被放置在环境受控试验室的大气环境中。湿态试验件被放置于湿热环境箱中进行环境调节，直至达到承包商和购买方一致同意的平衡吸湿量后，再将它们放入热密封的覆铝聚乙烯袋中，直至进行试验时才取出。进行试验的方式，应使试验件内的吸湿量保持到承包商和认证部门一致同意的水平。

表2.3.2.3(b)　固化后单层力学性能试验

力学性能	试验方法[1] 见本手册中的章节	每批预浸料的试验条件[2]和数量[3]			试验总数
		最小温度干态	室温干态RTD	最大温度湿态	
0°拉伸（经向）	6.7.4.4[4]	6	6	6	90
90°拉伸（纬向）	6.7.4.4[4]	6	6	6	90
0°压缩（经向）	6.7.5.4	6	6	6	90
90°压缩（纬向）	6.7.5.4	6	6	6	90
面内剪切	6.7.6.4	6	6	6	90
0°短梁剪切	6.7.6.4		6		30
					480

[1] MIL-HDBK-17目前还不能只推荐唯一的方法，但在所参见手册中章节鉴别出了一些方法，目前认为它们提交给MIL-HDBK-17的数据是可接受的。

[2] 进行最低和最高温度的试验时，其温度误差应在名义试验温度的±5°F（±2.8°C）范围内。名义试验温度应由承包商与认证方一致认可。干态试验件是指“制造状态”的试验件，它们一直放置在环境控制试验室中的大气环境中。湿态试验件是指先被放置在湿热环境箱中，直至达到承包商和购买方一致同意的平衡吸湿量才从箱中取出的试验件。这些试验件被放置在热密封的覆铝聚乙烯袋中，直至进行试验时才取出。进行试验时，应将试验件中的吸湿量保持在承包商和认证部门一致同意的水平。

[3] 对5批中的每一批都应进行试验。

[4] 对0°和90°拉伸试验，ASTM D 3039和SACMA推荐方法（SRM）4-88在将数据提供给MIL-HDBK-17时是可接受的。

[5] 短梁剪切只用于筛选和质量控制。

2.3.2.4　纤维缠绕材料试验矩阵

在表 2.3.2.4 所示的试验矩阵中，包含了所建议的纤维缠绕结构的力学性能试验。

JANNAF 复合材料发动机箱体分会（Composite Motorcase Subcommittee）推荐，对纤维缠绕采用 ASTM D 3039，ASTM D 3410 和 ASTM D 5379 中关于单向材料性能的平层压板试验件，用于纤维缠绕结构的设计和分析。然而，还没有描述这种方法的统一标准。因此，工业界和政府部门使用了多种制造平层压板的方法（参考文献 2.3.2.4(a)和(b)）。在这两次会议上，包括工业界和政府部门的纤维缠绕方，介绍了各自为单向材料力学性能试验而制造平层压板的技术。

一个主要的问题是，采用圆柱形还是采用矩形的缠绕芯。如果采用圆柱形缠绕芯，芯子的直径是一个因素，直径越大，则在将层压板从芯子中取出并展平进行固化时，其剪切的影响越小。如果芯子是矩形的，则主要问题是如何在缠绕时拉紧纤维。

对纤维缠绕层压板，下列问题一直被关注研究着：

- 用热压罐固化还是非热压罐固化
- 是在固化以前还是以后切割纤维
- 在缠绕芯子上固化，还是取出后在其他的模具上固化
- 是否使用均压板
- 是缠一层、切开并铺贴，还是在切开前缠绕到所需厚度

目前，缠绕制造商似乎是用与最能模拟最终产品所用的工艺技术，来制造板件。ASTM 的 D30.04.05 项目组正在讨论和跟踪这些问题的研究，并在制定制备缠绕层压板的标准方法。

表2.3.2.4 纤维缠绕材料性能试验

力学性能[1]	建议的试验方法[1]	每批预浸料的试验条件和数量[2]			试验总数
试验条件		最低温度干态	RTD	最高温度湿态	
0°拉伸	ASTM D 3039	6	6	6	90
90°拉伸	ASTM D 5450	6	6	6	90
0°压缩	ASTM D 3410（方法 B）	6	6	6	90
90°压缩	ASTM D 5449	6	6	6	90
面内剪切	ASTM D 5448	6	6	6	90
层间剪切	ASTM D 5379	6	6	6	90
					540

[1] 关于这些ASTM试验方法更多的信息，参见6.7节力学性能试验。

[2] 对5批中的每一批都应进行试验。

[3] 进行最低和最高温度的试验时，其温度误差应在名义试验温度的±5°F（±2.8°C）范围内。名义试验温度应由承包商与认证方一致认可。干态试验件是指“制造状态”的试验件，它们一直放置在环境受控试验室中的大气环境中。湿态试验件是指先被放置在湿热环境箱中，直至达到承包商和购买方一致同意的平衡吸湿量才从箱中取出的试验件。这些试验件被放置在热密封的覆铝聚乙烯袋中，直至进行试验时才取出。进行试验时，应将试验件中的吸湿量保持在承包商和认证部门一致同意的水平。

2.3.3 材料验收试验矩阵

此节留待以后补充。

2.3.4 替代材料等效性试验矩阵

2.3.4.1 替代的复合材料供应商的取证

2.3.4.1.1 引言

这些指南适用于下列情况：由一个供应商提供的一种复合材料体系已经获得认证，但需要或想要对替代的材料体系和/或材料供应商进行认证。这种方法假定，对原有材料已建立了大量的数据和经验（对替代体系则没有），并已从这些数据和经验建立了力学性能的统计基准值。另外还假设，为对产品进行认证和证实它的性能，已经做了一些更高级别的试验。

本指南不能覆盖诸如由 E-玻璃纤维换为芳纶纤维这样的巨大变化，关心的重点是那些符合于原来材料规范的那些材料。纤维品种的改变或类似的替换，被看作是一种主要的修改或重新设计，并认为工艺和工装的改变也超出了本节的范围。

2.3.4.1.2 目标和方法

对一种替代材料进行认证时，其最终目的是要能将它取代原来的材料体系，而不致对制造或结构性能带来影响。为实现这一目标，需要定义在诸如成形、制造和使用等不同阶段，控制性能的那些关键材料参数。其理想情况是，在材料组分或单层的级别上，通过测量和比较一些参数，像化学成分、纤维强度、基体强度和复合材料强度等，来进行这样的评价。这在将来也许是可能的，但用目前的技术还达不到。

成功地对一种替代材料取得认证，这本身还不足以允许将它与原来的材料混合使用，来制造同一个给定的部件。不推荐在同一个部件内将两种不同的材料体系混杂使用，除非已进行了适当的评定，证实了它们的相容性。

MIL-HDBK-17 的关注点是 B 基准的单层性能。适当的替代材料认证工作可能需要超越这一级别的评定，而需要进行更复杂的验证，包括分析与试验。这些工作可能要包括层压板、试样、元件以及组合件试验，例如开孔、充填孔、螺栓挤压、低速冲击、疲劳和壁板屈曲试验等。对一种替代材料的认证，所要遵循的一般方法如下：

- 鉴别出材料性能关键参数，并指出它们为什么是关键的；
- 对每一个参数，确定适当的试验、测量方法或评定方法，这些都必须与原来材料所做的试验、测量方法或评定方法严格地对应（例如，同样的试验件形式和同样的试验条件）；
- 对试验、测量方法或评定方法，确定是否通过的准则；
- 准备试验计划并获得必须的批准；
- 进行试验并给出试验报告；
- 通过或拒收。

2.3.4.1.3 材料兼容性

为证实在硬件中所用替代材料与原材料体系是否等价或更优越一些，所必须评定的范围首先与材料的兼容性有关，其次，与硬件结构的复杂性和载荷有关。材料的兼容性用表 2.3.4.1.3 中所给的准则来确定。基准的材料体系，是由某个预浸料厂家，用规定的预浸料生产线生产的一种材料。例如，AS4/3501-6 是由 Hercules 公司的第 3 条生产线生产的，与其最兼容、且为证实等价性需要做工作最少的替代材料，是由 Hercules 公司的第 4 条生产线生产的 AS4/3501-6。兼容性最差的材料体系，则是用不同的基体与纤维、由不同的预浸料生产厂家所生产的材料，因此，Fiberite C12K/934 是一种兼容性最差的材料体系，因而需要做更多的工作来证实其等价性。对表 2.3.4.1.3 中没有包括的那些情况，必须按照与其相应的兼容性程度来进行评定。

表 2.3.4.1.3 材料兼容性准则

兼容性最好						兼容性最差
材料因子	1	2	3	4	5	6
纤维牌号	相同	不同	相同	不同	相同	不同
纤维丝束尺寸	相同	相同/不同	相同	相同/不同	相同	不同
树脂	相同	相同	不同	相同	不同	不同
预浸料厂商	不同	相同	相同	不同	不同	不同
生产线	不同	相同	相同	不同	不同	不同

相同——在替代材料中保持不变　　不同——在替代材料中发生变化

a) 第1列是预浸料供应商和生产线有变化。这种情况现在越来越常见，因为树脂体系在预浸料制造商之间是有许可证的，例如，海军的A-6 re-wing和V-22鱼鹰计划中，ICI Fiberite 得到了Hercules 3501-6的许可证。这种合作的许可证运作，使得预浸料供应商能为顾客提供几乎相同的预浸料，供生产使用。

b) 第2列代表这样一种纤维类型的变化，其中新纤维品种的性能与已获得认证的原纤维基本相当。这种情况的出现，可能是由于经济方面的考虑，或出现在纤维供应中断的情况下。

c) 第3列是树脂的变化。当预浸料供应商能为客户的计划研制出价格更低和/或性能（如损伤容限）更好的新树脂体系时，这种情况是很正常的。

d) 第4列和第5列表明，有预浸料供应商、生产线、和纤维或树脂的改变。当顾客需要另外的供应商，但由于次级供应商受认证的预算限制，因而希望使用相同的纤维或树脂（假定已有树脂和/或纤维的数据库）时，就会出现这种情况。

e) 第6列涉及到对新预浸料供应商使用不同纤维和树脂时的认证问题。这种情况的一个例子是，当用Fiberite C12K/934来代替Hercules AS4/3501-6时的认证问题。这是兼容性最差的情况，因而，为证实可接受要做的工作最多。

2.3.4.1.4　关键的材料或结构性能参数

关键的材料或结构性能参数，是那些可测量的量，它们如果能与原来的数值进行比较，就能用于定量给出在制造或结构性能方面的差别；这些参数与材料和硬件有关，并可能随设计、工装、制造和使用等因素而变化。然而，在表 2.3.4.1.4 中已定义了 5 类参数。这个表中列出了相应于每一类型的典型性能参数的例子。

表2.3.4.1.4　关键材料参数和结构性能参数的例子

物理性能	工艺性能	力学性能	制造性能	硬件结构性能
黏性	固化后的单层厚度	单层性能	钻孔	静强度
树脂含量	固化循环	环境影响	模具	疲劳强度
面积重量	敏感性	损伤容限	无损检测	刚度
流动性	纤维体积	层间剪切	成本	失效模式
玻璃化转变温度	热循环	面外拉伸	订货至交货时间	质量
成形	密度	缺陷扩展	利用率	挤压性能
外置时间	放热曲线	缺陷影响	可重复性	屈曲性能
贮存寿命	毒性	压力瓶试验	可加工性	开孔拉伸
储存要求			一致性	开孔压缩
吸湿				壁板试验
溶剂阻抗				疲劳试验

2.3.4.1.5　合格标准

性能参数的相对重要性和完整性都随部件设计、载荷与应用情况而变化。有的情况下，只要报告其测量值即可，而另一些情况下，其测量值必须满足或超过原来的值。还有的情况下，测量值与原来的值不得有很大的差别，既不能太高也不能过低。例如模量、纤维面积重量、基体含量和固化后的单层厚度等就是这种情况。

在认证计划一开始，就必须确定每个参数的合格标准。必须对指定的每个合格标准，提供其规定的理由。对给定测量值的容差，应当是这个合格标准的一部分。

2.3.4.1.6　评定替代材料用的单层级试验矩阵

在 2.5 节中，规定了 MIL-HDBK-17 数据所用 B 基准单层性能值的最低要求，它可以很快地归纳为，对于所感兴趣的每个环境和性能，至少要从 5 批材料中预备总共 30 个试验件。由于替代材料的认证程序并不打算确定基准值而是要表明与原来材料的一致性，作为准备与原有数据进行比较的第二个数据母体，其试验数量可以减少一些。所需的等价性试验的实际数量，取决于两种材料体系之间的兼容程度。表 2.3.4.1.6(a)和(b)中，分别对单向带和织物材料，给出了所需试验的数量和性能的推荐意见。进行等效性检验试验时，必须用确定基准值试验时相同的方式和试验方法。试验后也必须进行适当的统计分析（见 8.4.3 节），来评估试验结果和评价等效性。

2.3.4.1.7　用于替代材料评定的层压板级试验矩阵

为对替代材料体系进行认证，要考虑的下一更高级别的试验，是层压板的力学性能试验。这个级别的试验要确认关键设计参数的强度（应变）基准值，并应采用与原来材料试验所用的相同层压板来进行。所建议进行的试验见表 2.3.4.1.7(a)。究竟要做多少表 2.3.4.1.7(a)中的试验，取决于材料兼容性系数。表.3.4.1.7(b)给出了建议要做的试验数。

表 2.3.4.1.6(a) 替代材料的单层试验要求——单向带

单层性能	批次数						每批试验件数量						环境条件数量[2]						试验件数量					
	兼容性[1]						兼容性[1]						兼容性[1]						兼容性[1]					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
0°拉伸	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
90°拉伸	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
0°压缩	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
90°压缩	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
面内剪切	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
																			80	120	120	150	150	180

1 兼容性的定义见表2.3.4.1.3。

2 环境条件应为RTD和最恶劣的情况

必须根据每一单独的规范进行质量保证试验。

表 2.3.4.1.6(b) 替代材料单层试验要求——织物

单层性能	批次数						每批试验数量						环境条件数量[2]						试验件数量					
	兼容性[1]						兼容性[1]						兼容性[1]						兼容性[1]					
	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6	1	2	3	4	5	6
经向拉伸	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
纬向拉伸	-	3	3	3	3	3	-	4	4	5	5	6	-	2	2	2	2	2	-	24	24	30	30	36
经向压缩	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
纬向压缩	-	3	3	3	3	3	-	4	4	5	5	6	-	2	2	2	2	2	-	24	24	30	30	36
面内剪切	2	3	3	3	3	3	4	4	4	5	5	6	2	2	2	2	2	2	16	24	24	30	30	36
																			48	120	120	150	150	180

[1] 兼容性定义见表2.3.4.1.3。

[2] 环境条件应为RTD和最恶劣的条件

必须根据每一单独的规范进行质量保证试验。

表2.3.4.1.7(a) 层压板试验的范围

材料兼容性系数	层压板试验	总数	
		单向带	织物
1	无缺口层压板	12	12
2，3	所有的静力试验，2种环境条件	36	36
4，5	所有的静力试验，2种环境条件	36	36
6	要求的所有试验	42	42

表 2.3.4.1.7(b) 建议的层压板试验数量

设计性能	载荷		层压板种类数量		环境条件种类[1]	试验件数量[2]	试验件总数	
	拉伸	压缩	单向带	织物			单向带	织物
静 力								
无缺口层压板强度和刚度	×	×	1	1	2	3	12	12
开孔		×	1	1	2	3	6	6
充填孔	×		1	1	2	3	6	6
冲击损伤	×	×	1	1	1	3	6	6
双剪挤压	×		1	1	1	3	3	3
单剪挤压	×		1	1	1	3	3	3
							36	36
疲 劳[3]								
开孔			1	1	1	3	3	3
冲击损伤			1	1	1	3	3	3
							6	6
							42	42

[1] 当要求2种环境条件时，应为RTD和最恶劣的情况；当要求1种环境条件时，应为RTD。

[2] 1批材料即可。

[3] 重复载荷和剩余强度：常幅，$R=-1$，$n=1\times10^6$次。

2.3.4.1.8 替代材料评定问题的总结

手册中对关键材料性能参数的大多数建议，例如物理特性和工艺特性，通常都已经包括在材料和工艺规范中。其他的参数对应用的依赖关系均更密切，因而，将很难在材料的级别上进行验证。读者不应根据没有对其进行讨论，就推断某个具体的问题是不重要的，必须考虑具体项目或产品相关的所有关键性能参数。

对给定的某些材料体系或工艺的变化，本手册提供了指南以验证单层和层压板级材料性能的要求。可能还需要更高级别的元件/组合件的力学性能验证试验，这取决于关键材料参数或结构参数的变化程度，并取决于具体的应用情况。

为比较不同批次所用的统计方法，将在 8.4.3 节中讨论。

2.3.4.2 对已获认证材料所作变化的评定

本节定义了，当材料供应商对材料体系作了改变时，对之进行评定的一些指南。这里不包括巨大的变化。着重点是满足原来（现有）材料的规范要求。应该考虑所有各级别上的可能变化。

所推荐的评定，目标是要验证计划的变化不会影响物理、结构或制造的要求。这个指南列出了可能的变化，以及为评定一个特定变化的影响而需进行的相应实验/试验。

制订成文的质量计划，是这种方法的一个假定的先决条件。它应描述从接收原材料到发送最终产品的整个制造过程。这个文件应不断更新，并应与 ISO9002 或 MIL-Q-9858A 相一致。质量计划应涉及所用的原材料，按适当顺序给出关键的制造步骤，并列出关键的工艺控制文件，和质量的检验或试验。

在提出一个修改的时候，要进行工艺分析，以确定所提出的改变是否能满足将来的考虑，这可由一个合适的技术专家来完成。在着手进行一个评定计划之前，应该建立筛选可能修改方案的指南。例如设备的常规或运行维护、人员变动、控制仪器的升级等，通常都不会需要进行正式的评定。对产品配方提出改变、取消工艺步骤、改变制造设备，或改变操作顺序等，则都是一些需要进行正式评定的重大修改类型。

关于所提出的工艺修改确定其相对重要性或分类，是通过一个深入的工艺和产品影响分析的逻辑系统而确定的。建议成立工艺评估组（PRT）来进行这个工艺分析，工艺分析要鉴别出：

- 关键的工艺步骤（包括顺序）；
- 在每一工艺步骤中使用的关键设备；
- 每个设备对质量有重大影响的工艺参数（时间、温度、速率、压力）；
- 每一关键工艺参数对质量有重大影响的变化范围；
- 监控和/或控制每一关键工艺参数所使用的、对质量有重大影响的仪器。

2.3.4.2.1 修改的分类

在鉴别出需要考虑所建议的某个工艺修改时，应对所有相关的信息进行全面综合的评估，这包括进行工艺修改的理论基础。应评估该修改对产品下一个使用者的影响，以及在最后使用时对产品的性能产生的影响。

评估的基础，是前面所述的、对产品/工艺进行分析得到的认识。基于对产品影响的评估，将把这工艺修改归属下列 3 类之一：

- **类别 1：“没有影响”**

这个修改实际上是微小的。已知其对产品的质量、物理或化学特性、或性能没有什么影响。此外，该修改看来不会对随后的用户带来操作上或性能上的缺陷。因此，把这种工艺修改归属为“没有影响”。

- **类别 2：“不知道”**

如果根据对提出的修改已有的信息，对所建议的改变还缺乏足够的了解，则必须把这种工艺修改归为“不知道”。

类别 2 是一种临时的分类，它一直保留到能够获得附加的信息为止。不应将归为类别 2 的修改付诸实施。在实施修改以前，必须把类别 2 的修改最终变成类别 1 或类别 3。

- **类别 3：“改变”**

如果对已有的信息进行评估的结论是，所提出的修改可能引起产品特性、质量、性能发生重大的变化，或可能对随后的用户有影响，则必须把这种工艺修改归属为“改变”。

2.3.4.2.2 对每种修改类别需采取的行动

归为类别 1 的修改应正式加以批准。应将变化记录在案，并着手制定适当的工艺变化执行或监控文件。这就使制造商能在一个规定的时间内，在适当的监控下，按一致同意的时间表执行该修改。

表 2.3.4.2.2(a) 与纤维变化有关的验证要求

对变化的描述	试验要求——要试验的批数(A)(B)										
	组分性能		预浸料性能			层压板力学性能					
	Level 1	Level 2	物理性能	工艺性能	力学性能验收	压缩	±45	OHC	OHT	CAI	(C)
	表2.3.4.2.2(d)		表2.3.4.2.2(f)	表2.3.4.2.2(g)	表2.3.4.2.2(g)	ETW	ETW				
新生产线	3	3	2	-	1	1	1	-	-	-	-
前驱体重新定点	3	3	3	-	3	3	3	2	2	-	2
表面上胶	3	3	3	1	3	3	3	2	2	-	2
编织厂家	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
重新定点	2	-	-	-	1	-	-	-	-	-	-
主要的生产线设备	2	(D)	-	-	1	1	1	-	-	-	-
工艺	2	(D)	-	-	1	1	1	-	-	-	-
原材料	2	(D)	-	-	1	1	1	-	-	-	-

注：(A) 预浸料试验使用最有代表性的树脂体系。

(B) 对物理和化学试验，每个试样做3个试验件；对力学性能试验，每个试样做5个试验件。

(C) 断裂韧性或界面胶接试验。

(D) 根据变化的程度决定。

表 2.3.4.2.2(b) 与变更树脂配方有关的验证要求

对变化的描述	试验要求——试验的批数(A)(B)										
	组分性能		预浸料性能			层压板力学性能					
	Level 1	Level 2	物理性能	工艺性能	力学性能验收	压缩 ETW	±45 ETW	OHC	OHT	CAI	(C)
	表2.3.4.2.2(e)		表2.3.4.2.2(f)	表2.3.4.2.2(g)	表2.3.4.2.2(g)						
组分	3	3	2	1	2	2	2	2	-	1	1
组分来源	3	3	1	1	1	1	1	-	-	-	-
工艺	3	3	2	1	2	2	2	-	-	-	-
设备	3	3	2	1	2	2	2	-	-	-	-
重新定点	2	-	1	-	1	1	1	-	-	-	-

注：(A) 预浸料试验使用最有代表性的树脂体系。

(B) 对物理和化学试验，每个试样做3个试验件；对力学性能试验，每个试样做5个试验件。

(C) 断裂韧性或界面胶接试验。

表 2.3.4.2.2(c) 与变更预浸料有关的验证要求

变化的描述	试验要求——试验的批数(A)(B)								
	预浸料性能			层压板力学性能					
	物理性能	工艺性能	力学性能验收	压缩 ETW	±45 ETW	OHC ETW	OHT	CAI	(C)
	表2.3.4.2.2(f)	表2.3.4.2.2(g)	表2.3.4.2.2(g)						
工艺/设备	3	1	2	2	2	2	2	-	2
新生产线	3	1	2	2	2	2	2	-	2
重新定点	2	1	1	1	1	-	-	-	-
新的纤维和/或树脂	3	2	3	3	3	3	3	3	3

注：(A) 预浸料试验使用最有代表性的树脂体系。

(B) 对物理和化学试验，每个试样做3个试验件；对力学性能试验，每个试样做5个试验件。

(C) 断裂韧性或界面胶接试验。

如果是在原材料成分方面的变化，如果在成分未修改前和修改后，最少用 3 批这种成分的试验验证它们是等价，那么就能采用这种“没有影响”的类别。用于验证这种情况的试验矩阵，应该与原材料制造商和复合材料制造商在表述该材料所有重要特性时所用的矩阵相同。

若建议的修改归为“不知道”，为进一步评估和采取行动，应确定附加的信息或试验。

在没有对附加的信息或试验完成评估，修改类别的状态尚未被更改为类别 1 或类别 3 以前，制造商不应实施所建议的修改。

若建议的修改被归为类别 3“改变”，则：

- 不实施该工艺修改，或
- 根据表 2.3.4.2.2(a)-(h)，确定一个等价性试验计划。

在执行等价性试验计划时，应按 8.4.3 节给出的统计方法，将这些数据与现有的产品数据进行比较。如果数据分析表明是等价的，应将得到的数据报告送交给用户，以取得一致意见。如果数据分析表明，这个修改的结果是不等价的，制造商将执行下列办法中的一种：

- 不执行该修改，或
- 与用户一起评估数据文件报告，以确定为实施该修改需采取的措施。

表 2.3.4.2.2(d) 纤维试验矩阵

试 验	Level 1	Level 2
丝束拉伸	×	
丝束模量	×	
密度	×	
单位长度质量	×	
表面特征，如ESCA/界面能量/显微镜评定	-	×

表 2.3.4.2.2(e) 树脂浇注体试验矩阵

性 能	Level 1	Level 2
HPLC	×	
红外		×
DSC		×
凝胶时间	×	
弯曲模量		×
玻璃化转变温度，干态和湿态		×
黏性		×
吸湿量		×

表 2.3.4.2.2(f) 预浸料物理性能试验

性 能	
树脂含量/面积重量偏差	×
流动性	×
玻璃化转变温度，干态和湿态	×
吸湿量	×

表 2.3.4.2.2(g) 预浸料工艺性试验

微裂纹/固化层压板的热循环	×
微裂纹/固化层压板的微结构	×

表 2.3.4.2.2(h) 力学性能验收试验

性 能	室 温	高温干态
拉伸强度和模量	×	
压缩强度	×	×
剪切，短梁剪切或±45	×	×

2.3.4.2.3 执行

- 类别 1“没有影响”——可以基于所批准的评估立即执行这类工艺修改。应继续监控正常的验收试验，以证实对产品没有影响。
- 类别 2“不知道”——在没有得到另外附加的信息以前，不能执行这类工艺修改。只有在其变为类别 1 或类别 3 并得到批准以后，才能执行这类工艺修改。
- 类别 3“改变”——在执行这类工艺修改或产品出厂以前，要求有适当的验证试验、并取得用户的书面通知和同意。

2.3.4.2.4 验证试验矩阵

表 2.3.4.2.2(a)-(h)，按照所建议的变化类型，规定了推荐的验证试验。表 2.3.4.2.2(a)给出了当纤维变化时的指南，表 2.3.4.2.2(b)给出了树脂变化情况的指南，表 2.3.4.2.2(c)给出了当预浸料变化时的推荐意见。每个表的左边一列是变化描述，它最恰当地表达了所建议进行的修改。

在给出了适当的变化描述后，右边的水平行给出了推荐的试验。表 2.3.4.2.2(a)-(c)中，给出了在每一验证水平上所推荐进行的材料批次数。

表 2.3.4.2.2(a)-(c)给出了试验的类型，并在后面的一些表（表 2.3.4.2.2(d)-(h)）中给出了进一步的描述。

对所有的化学和物理试验，每种试样要试验 3 个试验件；而对所有的力学试验，推荐对每种试样要试验 5 个试验件。

预浸料的试验可用最具有代表性的树脂或纤维（取其中与变化无关的那个）。选择中应立足于具有最可靠数据库的那种材料。例如，若对 AS4 纤维作改变，则验证时可以用纤维与 3501-6 树脂组合进行试验，因为这种纤维/树脂的组合拥有最完整的数据库。

2.3.5 一般层压板/结构元件的试验矩阵

2.3.5.1 引言

图 2.3.5.1 这个简化的流程图，综述了一个典型材料/结构认证过程的积木式流程。为了评定材料体系对生产使用的适用性，要做一系列的评估。这些多目标的评定常常是同时并行的，其范围从材料性能到可制造性以及成本等。

由于结构设计概念的复杂性（例如平的硬壳式壁板与共固化的半硬壳式的机身段），为了评定和降低材料与结构设计的风险，可能需要一个广泛的、复杂程度逐步增加的积木式验证试验方法。大家知道，对于设计许用值，复合材料体系的完整的结构认证通常高度依赖于该材料所应用的结构。历史的经验表明，在复合材料产品的硬件设计计划中，在设计研制计划的初期，就必须评价和发现在材料、结构以及可制造性方面的设计缺陷，以满足成本、性能和研制周期等目标。为此，都极其希望能够对任何项目都尽早确定具有高置信度的材料设计许用值。如果能成功地实现这一点，设计研制计划就能集中考虑细节设计、

高级别的设计研制试验、以及可制造性等问题。任何计划所面临的最不利的情况是，其材料的研发或重新选材工作是与细节设计发展是同时并行的。

本节介绍了图 2.3.5.1 中评定层压板级力学性能特征的部分。意图是要确定一系列层压板级试验矩阵，以补充前面2.3.2.3 节和2.3.1.1 节中所规定的单层级力学性能表征试验矩阵，和单层和/或层压板筛选试验矩阵。

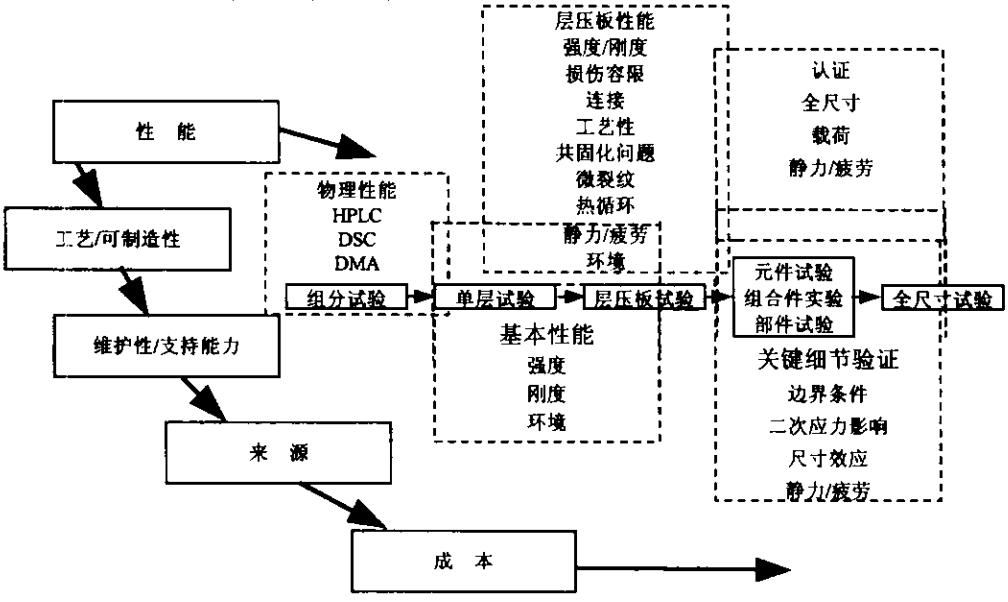


图 2.3.5.1 材料/结构认证

本节中这些试验矩阵的基础是，在推广应用于真实结构以前，几乎所有硬件设计研制计划中都在进行大量类似的层压板级试样试验。对理论/试验相关性，需要附加的层压板级试验数据以证实用于设计许用值预计的数学模型，这些模型通常应用单层的刚度和强度数据（2.3.2.3 节）。另外一种情况是，当没有数学模型或认为数学模型不完善时，也需要用层压板试验数据来确立经验的趋势。在这两种情况下，历来都需要一些层压板级的试样数据，来证实或建立在结构认证中非常重要的一些设计许用值。在每个新的结构研制计划中，常常都要重复这些耗时耗钱的试验。由于在试样级要进行大量的这类试验，所得到的试验数据，当一旦得到后，就应当应用到广泛的应用情况中，并为其他应用计划的认证机构所认可。

这些一般的表征试验，一旦（用 2.3.2.3 节和 2.3.1.1 节中给出的试验矩阵）进行之后，就意味着进一步减少新材料表征工作，并对所试验的材料体系建立起一个能用于其他拟议应用情况的通用数据库。

2.3.5.2 总结

确定了两个层压板级的试验矩阵：(1)层压板强度，(2)螺栓挤压和挤压/旁路强度。这些试验矩阵合起来，应当提供一个统计上有价值的层压板级数据库。这些试验矩阵是对单向带或织物的预浸料所选择的 3 个批次而规定的。依据有无已经验证过的强度预计模型，以及它们是否只使用单层级的强度和刚度数据的情况，有可能只在单层的级别上来考虑批次的影响，从而在后面的试验矩阵中无需多批次的试验。这样，在取得认证机构批准时，可以建议一种对每种试验条件只作 5 个试验件的单批次试验计划，如第 7 章所示。此外要指

出的是，对于其他的载荷条件，如面内剪切，可能还需要在积木式评定中进行更高级别的附加试验，而不是由这些试验矩阵来覆盖。

2.3.5.2.1 层压板强度试验矩阵

如表 2.3.5.2.1 中所详细说明的，推荐在拉伸与压缩两种载荷情况下，对所选择的干冷（CTD）、室温干燥（RTD）、湿热（ETW）试验条件，为一系列选定铺层的层压板进行无缺口强度试验。对材料系统的 3 个批次，每个批次为 2 种层压板构型重复 3 个试验。用一个批次的材料，对 2 种附加的层压板，在每种试验条件下用 5 个试验件进行选择的试验。试验矩阵强调了在极端环境能力（CTD 和 ETW）下对由纤维控制性能的评定，并提供室温干态试验条件（RTD）下的基准数据，其目的是要提供数据，能够在相关层压板的应用范围内和试验条件下，有选择地验证刚度与强度的分析模型。

有限的试验数量就意味着，数据库要使用跨越不同试验条件的回归分析（8.3.5.3 节）。极限温度和湿度条件的精确限度，或者由单层级试验（2.3.2.3 节和 2.3.1.1 节）得出的最低/最高材料工作温度（MOL）确定，或者由制造商和购买方联合给定的使用考虑来确定。

对单向带的表征试验规定了 4 种通用的层压板铺层结构，对织物的表征试验规定了 3 种通用的层压板铺层结构。如表 2.3.5.2.1 中的毯式曲线图所示，所选的 4 种层压板涉及了常用结构层压板的应用范围，重点是纤维控制的正交和准各向同性层压板结构。此外，其实心圆指的是 2.3.2.3 节中所规定的 0°，90°，或±45°（单层级）评定。对织物表征试验，表 2.3.5.2.1 毯式曲线中的实线代表了范围缩小的可能层压板结构，同时用表 2.3.5.2.1 试验矩阵中的 40/20/40 织物层压板，来代替 50/40/10 和 40/40/20 的单向带层压板。在本节的层压板中，也推荐采用 7.2 节中针对机械紧固件接头所规定的铺层顺序。

试验矩阵还要求在严重环境试验条件下，对偏离材料主轴 22.5°的 2 种层压板进行试验，以评定偏轴材料的行为。此外，如果结构的厚度范围大大超过（例如大于 2 倍）基本的“T1”厚度 2-6 mm（0.08–0.24 in），则在表 2.3.5.2.1 中，规定对所有的试验条件要进行第二种 3 批材料系列的“T2”厚度层压板试验。但是如果结构包含层压板其厚度范围偏差在 4 mm（0.16 in）范围内，相信只需要一种厚度的试验矩阵（或许不同于表 2.3.5.2.1 中所建议的“T1”范围）。这就把单向带层压板的试验矩阵减缩到总共 114 个试验（对织物为 104 个）。如果结构厚度范围增大很多，则应该进行第二系列（T2）层压板厚度的试验。这将使单向带层压板试验总数为 184 个（对织物为 174 个）。

2.3.5.2.2 螺栓挤压和挤压/旁路强度试验矩阵

在表 2.3.5.2.2 中详列的试验矩阵用于提供强度数据，以评定挤压和挤压/旁路应变集中对层压板强度的影响。除了用于得到设计数据，确定复合材料的螺接连接分析的设计许用值外，在评定制造缺陷和冲击损伤对层压板影响时，还能用充填孔的强度数据作为参考强度。在本节推荐的试验中，包括了第 7 章表 7.2.5.3(a)，表 7.2.6.2 和表 7.2.7.3 中列出的所有试验。然而，因为想要直接由这些数经验地得出层压板的设计许用值，表 2.3.5.2.2 中还有一些另外增加的试验。这就要求在两种最恶劣的环境条件下，进行 3 批材料的试验。

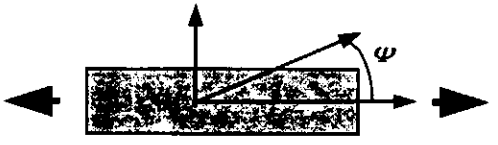
在前面 2.3.5.2.1 节的无缺口层压板强度试验矩阵中用过的 3 种层压板构型，也用于单向带和织物材料在拉伸和压缩下的螺栓挤压和挤压/旁路载荷。单钉连接件评定，覆盖了广泛的紧固件载荷传递试验条件，包括充填孔（100%旁路）、挤压/旁路相互作用（75%和 50%旁路）以及纯挤压（0%旁路）情况。试验矩阵设计中强调了严重的材料试验条件，大

表 2.3.5.2.1　层压板强度试验矩阵

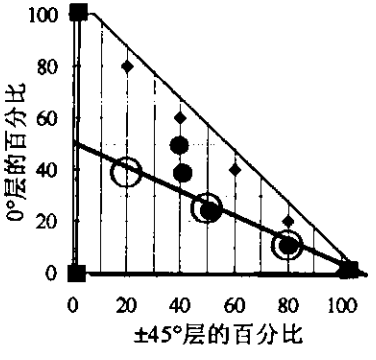
目标：

创建一个通用的层压板级数据库，以评定无缺口层压板对层压板刚度和强度分析模型相关性的适用范围，并为经验方法建立一个选择的、但在统计上有效的数据库。

铺层比例(%) 0°/±45°/90°层	厚度	与加载方向的夹角Φ	压缩 RTD	压缩 ETW	拉伸 CTD	拉伸 RTD
25/50/25	T1	0	9	9	9	9
	T2	0	9	9	9	9
	T1	22.5	-	5	5	-
50/40/10	T1	0	9	9	9	9
	T2	0	9	9	9	9
	T1	22.5	-	5	5	-
40/40/20	T1	0	-	5	5	-
10/80/10	T1	0	-	5	5	-
小计			36	56	56	36
总计						184



Φ 零度层与载荷方向的夹角



■ 单层级试验点（第一卷 2.4 节）
● 层压板级试验点（本试验矩阵）
RTD 室温干态试验条件
CTD 低温干态试验条件
ETW 高温湿态试验条件
○ 织物试验点

注：

假设为 0°，+45°，-45°，90°族系的铺层方向，均衡，对称
9 表示每批 3 试件，3 批
5 表示每批 5 试件，1 批
T1 代表层压板厚度约为 2~6mm（.06 - .25 英寸）
T2 代表第 2 种层压板厚度，*可以选择*,取决于结构所用层压板厚度的上限
对织物用 40/40/20 代替 50/40/10 层压板，而取消 40/40/20

多数试验数据，或是在被基体控制的破坏模式即湿热（ETW）条件下获得的，或者是在被纤维控制的破坏模式即干冷（CTD）条件下获得的。还规定了足够的数据，来确定室温干态的基准条件。规定了拉伸和压缩载荷状态，只进行在拉伸载荷下的纯挤压试验。

试验原理是，首先评定孔的尺寸对层压板强度的影响。规定了 3 种紧固件直径，它们覆盖了实际结构的使用范围。对充填孔的拉伸/压缩、挤压/旁路和纯挤压试验条件，收集其拉伸和压缩强度数据。应该分别使用由 7.2 节的图 7.2.6.3，7.2.7.2 和 7.2.5.2 所详述的试验件。在表 2.3.5.2.2 中，应该选用实际结构应用最多的紧固件直径，作为基准的直径 D1。另外两种紧固件直径（表 2.3.5.2.2 中的 D2 和 D3），应该覆盖所有其他使用的紧固件。基于历史上航宇工业对碳/环氧树脂复合材料结构的实践，对几乎所有的试验件，推荐采用板宽/直径比（*W/D*）为 6，边距/直径比（*e/D*）为 3 作为基准的连接件几何尺寸，（对 25/50/25 铺层，还试验另外两种 *W/D* 比；随着碳/环氧树脂复合材料的发展，或对其他的材料体系，这些值可以改变）。还应选择实际结构中应用最多的紧固件端头形状（凸头或埋头），作为所有试验件构型的基准（表 2.3.5.2.2 中的 H1）。采用 2.3.5.2.1 节中讨论过的层压板厚度 T1，作为所有试验件的基准厚度*。如果需要覆盖实际应用的设计变化，可能需要在表 2.3.5.2.2 中的第二系列层压板厚度 T2。本节中，对层压板的铺层顺序，也推荐采用 7.2 节中对机械紧固件连接件所规定的顺序。

最初进行的试验，应当是准各向同性层压板（25/50/25）试验件，在 RTD 环境和 100%旁路及纯挤压（0%旁路）的载荷条件下的试验，这样就能对拉伸或压缩载荷条件下层压板强度预计的解析或经验模型，作出初始的相关分析（或标定）。可以预期，然后就可以用经过标定的强度估算模型，在试验以前预计其余试验将要得到的结果，这包括准各向同性层压板其余的挤压/旁路试验结果，和对其他两种正交各向异性层压板（对单向带——50/40/10 和 10/80/10，对织物——40/20/40 和 10/80/10）的全部试验结果。这些初始评定后，应接着进行全部所有的环境条件（CTD 或 ETW）试验，从而为建立关键设计状态的许用值，提供统计的验证或基础。与 RTD 试验结果进行比较，这些同样的试验应当能验证一致性和层压板的失效模式。最后，如果需要的话，还要在恶劣环境条件下进行第二系列层压板厚度（T2 和 T3）及紧固件头部形式（H2）的试验，对设计许用值的解析模型或经验的“降低”系数，确定附加的标定系数。

基于典型的设计考虑，只要试验件的边距/直径（*e/D*）比值大于或等于 3，与压缩载荷下纯挤压试验相比较，拉伸载荷下的纯挤压试验给出的是保守的强度值，而得到的失效模式相似。因此，这个试验矩阵的纯挤压试验（0%旁路）只需在拉伸载荷下进行。与此相似，基于压缩载荷中等水平（50%旁路）的挤压/旁路载荷的相互作用所得的设计值，与由拉伸载荷下 75%旁路或中等水平旁路试验得到的设计值相比，通常偏于保守。这样，在某些情况下，只进行压缩载荷下 50%挤压/旁路试验可能就足够了，从而，可以取消压缩载荷下 75%挤压/旁路时的试验，和取消拉伸载荷下 50%挤压/旁路时的试验。对于目前所用的复合材料体系，就其在压缩挤压/旁路载荷下公认的非线性行为，以及在拉伸挤压/旁路载荷下相对线性的材料行为而言，感到这实际是偏于保守的。如果材料行为或设计重量目标要求不太保守的方法，就需要作较多的试验评定，和进行其他挤压/旁路比试验。关于其他的指南，可以参见 7.2.7 节。

---

* 在 7.2.5.3 节中，规定 T1 为 5 mm。

表 2.3.5.2.2　挤压/旁路

铺层比例	厚度	孔径	紧固件端头形式	压缩挤压/旁路							拉伸挤压/旁路								试验总数
				100%旁路			75%旁路		50%旁路		100%旁路		75%旁路		50%旁路		0%旁路		
				RTD	ETW	ETW +ΔT	RTD	ETW	ETW +ΔT	RTD	CTD	RTD	CTD	RTD	CTD	RTD	CTD	RTD	
25/50/25	T1	D1	H1	5	9	9	5		5	5	9	5		5		5	5	9	76
25/50/25	T1	D2	H1	5	9					5	9	5					5	9	47
25/50/25	T1	D2,W/D=8	H1	5								5							10
25/50/25	T1	D3	H1	5	9					5	9	5					5	9	47
25/50/25	T1	D3,W/D=4	H1	5								5							10
25/50/25	T1	D1	H2	5	9					5	9	5					5	9	47
25/50/25	T2	D1	H1		9	9				5	9						5	9	46
25/50/25	T2	D2	H1														5	5	10
25/50/25	T2	D3	H1		9					5	9							9	32
25/50/25	T3	D1	H1														5		5
25/50/25	T3	D2	H1														5		5
25/50/25	T3	D3	H1														5		5
50/40/10	T1	D1	H1	5	9	9	5		5	5	9	5		5		5	5	9	76
50/40/10	T1	D2	H1	5	9					5	9						5	9	42
50/40/10	T1	D1	H2	5	9					5	9	5					5	9	47
50/40/10	T1	D3	H1	5	9					5	9							9	37
50/40/10	T2	D1	H1		9	9				5	9						5	9	46
50/40/10	T2	D2	H1														5	5	10
50/40/10	T2	D3	H1		9					5	9							9	32
10/80/10	T1	D1	H1	5	5		5		5		5	5		5		5	5	5	50
10/80/10	T1	D2	H2	5	5						5	5					5	5	30
10/80/10	T1	D3	H1		5						5							5	15
总　计				60	123	36	15	0	15	60	123	50	0	15	0	15	80	133	725

注：1　T1，D1和H1是层压板厚度、紧固件直径和紧固件端头形状的主值，T2，T3，D2，D3和H2可供选择，取决于层压板厚度范围和紧固件几何形状。

2　9代表要试验3批，每批3个试验件。5代表只要试验1批，每批5个试验件。

如同 2.3.5.2.1 节中的无缺口层压板试验矩阵一样，其有限的试验就意味着，将使用的数据库采用了跨越不同环境条件的回归分析（参见 8.3.5 节）。其极限的温度和湿度条件，或者通过单层级试验（2.3.2.3 节和 2.3.1.1 节）得出的最低/最高材料工作能力（MOL）来准确规定，或由制造商和购买方联合给定的使用条件来确定。为保证获得所用层压板的温度影响的上限，要有选择性地对基体敏感的开孔压缩试验件，进行一组附加的“ETW+ΔT”试验。

如果只需用一种层压板厚度和一种紧固件端头形式就能覆盖使用情况的设计变量，则规定试验总数为 395 个。正如 2.3.5.2.1 节所示，要对两种层压板构型，在严重的环境试验条件下，为 3 批材料体系的每一批进行 3 个试验。要用一批材料，有选择地对两种附加的层压板进行试验，每种试验条件要有 5 个试验件。推荐进行另外 124 个试验，以覆盖第二种紧固件端头形式；如果需要进行第二（191 个试验）和第三（15 个试验）种厚度评定，则推荐再进行 206 个试验。

2.3.6 对基准值的替代方法

2.3.6.1 用于回归分析的单层级力学性能试验矩阵

可以将表 2.3.2.3(b)的试验矩阵进行修改，以进行回归分析。回归分析允许共享在使用不同环境参数（如温度）下获得的数据，有可能增进对中等温度影响的认识。当对 5 批或更多批次的材料，使用 90 个或更多数据点的适当规模的母体时，它具有更多的好处，即可以用比其他情况下所需规模更小的试验数据母体，计算出某种性能在一个环境范围的 A 基准统计值*。当结构的设计使用温度在产品的设计寿命期内是变化的情况下，这种方法也特别有用，这使得对其中每种温度只需要较少的数据。

但要知道，在进行强度数据的统计回归分析时有几个基本的假设，其中包括：

- 在参数变化的范围内，失效模式保持不变；
- 偏差基本不受参数的影响；
- 不属于独立变量的参数（如在对温度作回归分析时的吸湿量）保持不变。

表 2.3.6.1 所示的回归分析单层试验矩阵例子，与表 2.3.2.3(b)给出的点特殊试验矩阵不同，即已经用 3 种高温试验条件代替了“最高温度湿态”条件，在该温度范围内给出了分布较均匀的试验数据。ET2 代表了给定结构的最高使用温度，ET1 代表了高于室温但低于 ET2 的中等高温，而 ET3 代表了材料体系的使用上限温度，如 MOL。所有的温度在干态时低于干态的 T_g，对湿态情况低于湿态的 T_g。所有的温度或者代表了干态材料状态，或湿态材料状态，对给定的回归分析中，干态材料状态与湿态材料状态不混用。关于分布的试验温度，其具体例子包括：

- 177℃（350°F）环氧树脂　　-50℃，23℃，80℃，100℃ 和 120℃
- 232℃（350°F）双马　　-50℃，23℃，120℃，180℃ 和 200℃
- 315℃（600°F）聚酰亚胺　　-50℃，23℃，180℃，230℃ 和 290℃

对提交手册发表的数据，2.5 节中讨论的标准母体采样和数据文件要求仍然有效。

---

* 假设该数据的离散系数（CV）不大于 15%。如果 CV 比较大，为了计算 A 基准值将需要对试验矩阵增加更多的数据点。如果要计算 B 基准值，在该温度范围内只需要 30 个数据点，就能达到同样的置信水平。应该使每一批都尽可能在该温度范围内均匀分布，在任一个试验条件下至少必须取 3 批。

表 2.3.6.1　为回归分析所设计的固化后层压板力学性能试验矩阵

A基准级的矩阵——每个性能5批次/90数据点

力学性能	试验方法[1]	试验条件[2]和每批试验数量[3]					试验总数
	见手册节号	低温	RT	ET1	ET2	ET3	
0°拉伸（经向）	6.7.4.44	3	4	3	4	4	90
90°拉伸（纬向）	6.7.4.4[4]	3	4	3	4	4	90
0°压缩（经向）	6.7.5.4	3	4	3	4	4	90
90°压缩（纬向）	6.7.5.4	3	4	3	4	4	90
面内剪切	6.7.6.4	3	4	3	4	4	90
0°短梁剪切	6.7.6.4	-	6	-	-	-	30
							480

[1] MIL-HDBK-17 目前还不能制定唯一的试验方法建议，但所参见的手册章节明确了一些试验方法，目前认为其所得的数据可被 MIL-HDBK-17 接受。

[2] 进行最低和最高温度的试验时，其温度误差应在名义试验温度的±2.8℃（±5°F）范围内。名义试验温度应由承包商与认证方一致认可。干态试验件是指“制造状态”试验件，它们一直在环境控制的试验室内放置在大气环境中。湿态试验件是指，将它们放置在湿热环境箱中，直至达到承包商和购买方一致同意的平衡吸湿量，然后从箱中的试验件取出，将它们放置在热密封的覆铝聚乙烯袋中，直至进行试验时才取出使用。进行试验时，应将试验件中的吸湿量保持在承包商和认证部门一致同意的水平。

[3] 对 5 批中每批应进行的试验数。

[4] 对 0°和 90°拉伸，向 MIL-HDBK-17 提供数据时可以接受的试验方法是 ASTMD 3039 和 SACMA 推荐的方法(SRM)4-88。

[5] 短梁剪切只用于筛选和质量控制的目的。

重要说明：本试验矩阵是要用于得到干态试样数据。可以通过在湿态重复这个试验矩阵来得到湿态数据，或在结构具体使用温度下，来得到湿热数据。

其他重要说明：　最低温度通常为-54℃（-65°F）

ET2 是最高使用温度

ET3 应该低于材料的 T_g，如果进行干态试验，为干态 T_g，进行湿态试验则为湿态 T_g。

2.3.7　对于使用 MIL-HDBK-17 基准值情况的数据验证

为在设计中直接使用取自 MIL-HDBK-17（或其他来源）的基准值，应该证实，能始终能生产出（与材料试验阶段所评定材料）相同的材料。为此目的，应当进行表 2.3.2.3(b)中所确定的验证试验*。对每个载荷状态总共需要 6 个试验件，试验件或是取自分别制造的 2 批，或是取自 1 批中分别制造的 2 块大板。在 8.4.3 节中，概述了用于证实这些数据与原来的基准值来自于同一母体的统计方法。制造工艺（包括固化循环和模具）和试验方法应该是类似的。与推荐的单层级验证试验的偏离，例如，减少或增加要评定的载荷状态数，取决于承包商和验证机构之间达成的协议。

2.4　数据处理与文件编制

2.4.1　引言

此节留待以后补充。

* 这个试验矩阵设想要计划和进行更高级别的制造工艺重复性的试验（例如层压板、元件和组合件）和评定，直至部件验证。

2.4.2 由层压板得到单层的性能

由于材料的发展，复合材料的力学性能有显著的提高，例如，碳纤维复合材料的拉伸强度和破坏应变在 1980 年代几乎提高了一倍（文献 2.4.2(a)）。然而，由于性能的改进，适用于以前各代复合材料的某些试验方法已不再适合于表征高强度先进材料体系的全部能力。

最严重的问题与基本铺层（单层）拉伸与压缩强度的精确测定有关，这些性能传统上是用单向试验件来表征单向带和相似形式复合材料的。由于材料的性能已经提高，与这些试件有关的缺点就变得很严重。虽然在某些情况下有可能用单向试件得到可接受的强度数据，但在其设计、制造中需要特别小心，从而增加了大量费用。作为一个替代方法，越来越多的工作者采用正交铺层层压板*试验，用经典层压板理论间接计算单层的性能。

有大量的论据支持这种方法。最经常主张的优点是其具有较小数据分散性，较高（比较实际的）强度值，这两方面已经为大量研究者所证实（如文献 2.4.2(a)和(b)）。较高的强度值归因于减少或消除了由于各种原因而出现的提前破坏，这将在以后进行讨论。变异性小则与其对试件质量波动及小的制造缺陷不太敏感有关，这种敏感性的降低反映了这样更接近于结构构型的响应情况。

使用正交铺层试验的最引人注意的原因，也许是这样能够更好地代表实际结构构件中使用的层压板。因为，一般而言，当一个单层与其他不同取向的铺层相邻的时候，其对载荷的响应可能不同于其孤立受力（或相邻的铺层为相同取向）的情况，这就解释了要按照最终使用状态来表征单层性能的理由。在所分析层压板中，与用单一铺层方式得到的值相比，按照这个方式得到的值将更能代表层压板的预期性能值。

虽然这个方法不能解决所有的试验困难，但在先进复合材料工业界已经成为十分普遍的方法，标准化的工作正在进行之中。这个方法确实具有不少优点，因此在编制试验计划时应当予以考虑。有关进一步的信息，可以参见文献 2.4.2(c)和(d)。.

2.4.2.1 方法

确定纵向单层强度的一般方法是选择、制造、并试验一个适当的多向层压板，然后利用经典的层压板理论来计算 0°单向层的拉伸或压缩强度。这个方法采用了几个假设：

- 层压板破坏的机理和应变与未提前破坏的单向试件中的单层一样；
- 在破坏以前层压板和单层二者的应力-应变曲线基本是线弹性的（将简单讨论这假设不成立时所用的方法）；
- 公式中使用的单层的 E_1，E_2 和 ν_{12} 值，在初始破坏是有效的；
- 单层残余应力和损伤（如单层的裂纹）的影响可以忽略。

按照所给的这些假设，显然不是所有的层压板都满足。已发现有一族层压板是有用的、并已有大量的试验数据，即 $[0_x/90_y]_{ns}$ 层压板。在这一族层压板之中，$[0/90]_{ns}$ 是最广泛使用的。虽然这种层压板通常不用于真实结构，但它提供了相邻铺层具有不同铺层取向的环境，此外，所计算的系数（下面将讨论）低得合理。也已成功使用了准各向同性的层压板，但其系数几乎是 0°/90°层压板的两倍，置信度较低。因为具有很多±45°铺层层压板的破坏应变可能没有单向试件那样大，因此不优先使用，±45°铺层使它的 ν_{12} 超过了单层的 ν_{12}。由于同

*这个"正交铺层"的术语是按照在 1.7 节的定义来使用的，这不同于在工业界使用的其他定义。在这里，是"角铺层"和"多向铺层"的同义词，而不是严格地指[0/90]系列的层压板。

化后的冷却过程中的劈裂，某些树脂基体极脆的复合材料不能够保证 0°/90°层压板的制造质量，在这些情况下，必须包括一些±45°的铺层。在一族层压板内铺叠顺序会有一定影响，在有几个相同方向的铺层叠合在一起（厚铺层）的情况下，层压板的压缩强度值通常都低于铺层比较均匀的情况（文献 2.4.2.1）。显然，在所有情况下都必须使用对称铺层的层压板以防止弯曲。

在第三个假设中，假定已经由其他的试验（多半由单向试件）得到了 E_1，E_2 和 ν_{12} 的数值，这并不成为一个严重的问题，因为单向试件的缺点不像对强度测量的影响那样，影响到模量的测定。可以解释的理由是，E_2（以及在某种程度上 E_1）不是直到破坏都保持线性，而它们通常是在比破坏载荷低很多的情况下进行计算的。然而，如同以后将详细讨论的，由于这个方法对于 E_2 的变异相当不敏感，因此这不是什么重大的问题。

为了计算单层强度，要把测得的层压板试验强度乘以一个用经典层压板理论得出的正交铺层系数（CPF）：

$$F_1 = \mathrm{CPF} \times F_x \qquad 2.4.2.1(a)$$

对于$[0_x/90_y]_{ns}$族的层压板，根据各个铺层应变均匀的假设，这个系数可以用以下公式计算：

$$\mathrm{CPF} = \frac{E_1\left[mE_2 + (1-m)E_1\right] - (\nu_{12}E_2)^2}{\left[mE_1 + (1-m)E_2\right]\left[mE_2 + (1-m)E_1\right] - (\nu_{12}E_2)^2} \qquad 2.4.2.1(b)$$

式中，m 是层压板 0°铺层的百分比。（E_1，E_2 和 ν_{12} 根据需要分别采用拉伸或压缩）。

对于$[0/90]_{ns}$层压板（相同数量的 0°和 90°铺层），这个公式变为：

$$\mathrm{CPF} = \frac{E_1\left(\dfrac{E_1+E_2}{2}\right) - (\nu_{12}E_2)^2}{\dfrac{(E_1+E_2)^2}{4} - (\nu_{12}E_2)^2} \qquad 2.4.2.1(c)$$

如同上面提到的，这些公式对于 E_2 的变异性不太敏感，同时对 ν_{12} 的变化只有非常小的反应。对于 $E_1 = 20$ Msi 的$[0/90]_{ns}$层压板，E_2 改变 20%的情况下这个系数的变化小于 2%，而 ν_{12} 变化 20%时其影响可以忽略不计。因此 E_2 和 ν_{12} 的数值不要求很高的精度（当然，对于这系数的精度影响取决于 E_1 和 E_2 的真实比例）。单层的剪切模量与应力有关，因为这些模量对稳定性有影响，从而影响压缩强度，对于软的基体材料可能会有些困难。

很多情况下可能根本得不到 E_2 的数值。如果出现这个情况，有一个替代的方法，即使有 E_2 的数值，这个方法也可能成为首选的办法。这个方法只要从单向试件中测出 E_1，并由所试验的正交铺层层压板得到 E_x。按照假设 1 即层压板和单向试件在相同的应变下出现破坏，可按下式计算单层的强度：

$$F_1 = \frac{E_1}{E_x} F_x \qquad 2.4.2.1(d)$$

已经有报告说明在 E_1/E_x 比值和按照上式得到的系数 F 之间非常一致（文献 2.4.2(a)）。

到目前为止所介绍的这些方法均假设到破坏时具有线性的应力-应变行为。如果不是这个情况（例如某些正交铺层的玻璃纤维/环氧树脂层压板），则可按照以下公式计算纤维方向的单层强度：

$$F_1 = E_1\left(\varepsilon_x + \nu_{12}\varepsilon_y\right)/\left(1 - \nu_{12}\nu_{21}\right) \qquad 2.4.2.1(e)$$

式中，在 x 和 y 方向的应变（ε）是在破坏时的测量值。

如果可以忽略泊松效应，可以把上式简化为：

$$F_1 \approx E_1\varepsilon_x \approx F_x\frac{E_1}{E_x^*} \qquad 2.4.2.1(f)$$

式中，E_x^* 是层压板在破坏时的割线模量。当不知道 E_2 时，这个公式是有用的。

2.4.2.2 拉伸强度试验

仔细设计和制造的单向拉伸试件可以得出先进复合材料的良好结果，但这通常是个别情况而不是一般规律。一个主要的问题是所胶粘加强片在端头处的提前破坏，特别是在其渐渐斜削而不是矩形截面并在整个长度上被夹头夹住的情况下。试验先进复合材料所需要的高载荷，常常在加强片的端头形成强大的剥离力，并随后使复合材料第一层出现层间拉伸破坏。一旦出现这个情况，大部分载荷将由这个外部铺层承受，该层由于拉伸而破坏并使得加强片脱落。由于正交铺层试件试验的载荷较低，多半不会出现这个问题。

Rawlinson（文献 2.4.2(a)）和其他人研究了不同的层压板铺层顺序。两种均衡铺层的 0/90 和 0/±45 层压板所得到的平均强度值，都可与质量最好的单向试件测量值相对应，而且数据的分散性明显降低。此外还证实了，某些这种层压板在试验时可无须粘接加强片而直接用液压夹头进行夹持，这样就进一步节省了试验费用。某些有时被称为“无加强片”的试件，实际上在夹头和试件之间需要一层中间层，例如，在与试件接触一侧带胶的一张砂纸，或者一张涂磨料的金属网（带有保护试验机夹头的塑料）。如果不使用粘接加强片，不应当把 0°铺层放在层压板的外表面，因为夹头会造成其损伤。这样，对于不用粘接加强片的正交铺层试验，则$[90/0]_{ns}$层压板要比$[0/90]_{ns}$好。应当指出，在$[90/0]_{ns}$构型下，表面应变测量对外面 90°层的基体开裂比较敏感。如果使用了粘接加强片，加强片材料的铺层顺序是要考虑的重要问题（文献 2.4.2(b)）（参见 6.7.4 节）。对带加强片的试样，由$[90/0]_{ns}$和$[0/90]_{ns}$层压板得到的结果似乎只有很小的差别。

2.4.2.3 压缩强度试验

和拉伸试验情况一样，先进复合材料试验所需要的高载荷在单向试件试验时也引起了一些问题。在压缩情况下，端头“开花”和纵向劈裂是提前破坏的常见模式。使用正交铺层试件会大大减少或消除这些模式的出现，因为试件破坏会趋向于微屈曲或单层屈曲（文献 2.4.2.3）。此外，报告已经指出准各向同性层压板对加载方法和端部约束不太敏感（文献 2.4.2.3）。其他作者也报告对$[0/90]_{ns}$层压板得到了相同的结果。这就意味着，这样评估的是材料的能力而不是试验方法的能力。

虽然已经普遍使用$[0/90]_{ns}$铺层，但关于所用的“最好”层压板铺层顺序目前还没有一致的意见。根据报告，这些试件给出了高强度值和低数据分散性。由几个数据来源获得的数据（尚未公布）表明，$[90/0]_{ns}$层压板比$[0/90]_{ns}$得到的平均值更高。还没有对这种数值高的情况得出结论性的解释，但已经将其归因于几个因素。首先，有推测说 90°的外层可防止承载的 0°铺层在试件制造或试验中受到损伤，这些损伤如果影响到 0°铺层，可能形成提前破坏的起始点。其次，认为外部 90°铺层的存在增强了 0°铺层的稳定性。如果事实如此，结构分析人员将必须对外部 0°层处于主要压缩载荷方向的具体应用情况，确定由$[90/0]_{ns}$层压板导出的设计性能是否适合。第三，已经知道，0°的外层增大了有加强片试件在测量区域端部的应力集中，而这据信就促使了提前破坏。第四，由于泊松效应所引起的横向拉

伸应力，可能造成外部0°铺层的劈裂。

2.4.2.4 其他性能

由于其对缺口极度敏感造成的提前破坏，一直难于表征单向复合材料的横向强度。为了改善这种情况，有些研究采用了正交铺层的层压板，但这还没有很好的报告。在大多数结构的分析中（除非用于分析的横向强度太低以致导致虚假的“首层”破坏预计）这些强度值的精度对结果没有重大影响，因此继续这个研究的兴趣就比较低。

普遍使用$[+45/-45]_{ns}$层压板的拉伸试验来导出[0/90]（基体控制的)面内剪切强度和模量性能。这个方法得出的强度结果一般是真实材料剪切性能的下限。更详细的内容见本卷的6.7.4节。

2.4.3 数据归一化

出于众多的原因要对力学试验数据进行数据分析，其中包括确定多批次的统计量和以统计为基础的性能值（许用值）、比较不同来源的材料、进行材料选择、评价工艺参数以及质量保证的评估等。如果所试验的试验件具有不同的纤维体积含量，这些计算或直接比较可能是不正确的。归一化是把原始试验值修正成相对于（规定的）某个单一纤维体积含量的数值。以下各小节将讨论归一化的理论、方法和实际应用问题。

2.4.3.1 归一化理论

受增强纤维控制的力学性能与层压板中的纤维体积含量有关。在常用的“混合律”模型中假定，在0%纤维体积时单向层压板的0°拉伸强度等于基体的拉伸强度，而在100%纤维体积时等于纤维束的拉伸强度。因此忽略高纤维含量时贫脂的影响，纤维体积含量和层压板极限强度在整个纤维/树脂比例范围内是线性关系，这是由于在试件横截面内纤维体积百分比与纤维面积百分比是相同的。预期拉伸模量的情况也是如此。这样，具有不同纤维体积含量的试验件，其纤维控制的性能随纤维体积含量线性变化。

有两个因素可能使层压板纤维体积含量产生变化：(1)相对于纤维总量的基体树脂总量（树脂含量）和(2)孔隙率总量（空隙体积）。这些因素导致由材料之间、批次之间、板件之间以及甚至是一个板件内试件之间纤维体积含量的变化。为了数据分析可对材料、批次、板件和试件进行比较，必须把纤维控制的性能数据修正到一个公共的纤维体积含量基础上。如果不这样，将在数据中引入附加的变异源，可能导致错误的结论。数据归一化的过程试图消除或减少纤维控制性能的变异性。

2.4.3.2 归一化方法

因为理论上纤维控制的强度与刚度性能随纤维体积含量线性变化，首先一个显见的方法就是用适当的方法（基体溶解、燃烧、光学技术等）确定试验件真实的纤维体积含量，并利用一个（选取或规定的）公共的纤维体积含量比值把原始数据修正为实际值，如式2.4.3.2(a)所示：.

$$\text{归一化值} = \text{试验值} \times \frac{FV_{\text{归一化}}}{FV_{\text{试件}}} \qquad 2.4.3.2(a)$$

式中：$FV_{\text{归一化}}$=所选的公共纤维含量（体积含量或%）

$FV_{\text{试件}}$=试件的真实纤维含量（体积含量或%)

虽然这看来是个最直接的方法，但有其局限性。最严重的不足是，通常并不测量每个

单独试验件的纤维体积。最多从每块试验板件取有代表性的一片，来估计板件的平均纤维体积含量。因为一个板件内的树脂含量可能变化很大（由于树脂在成形过程中的运动和其他原因）从这个板上切割出来的所有试件其纤维体积含量可能不一样。其结果，就不可能对每个单独的试件进行精确的归一化。此外，将基体溶解的方法对某些材料体系也是有问题的，因此为得到精确、可复现的结果还需要高超的技艺（有关确定纤维体积的信息，参见 6.4.6 节）。

首选的数据归一化方法采用了某种措施来考虑各试验件之间纤维体积的变异。这个方法的基础是纤维体积含量和层压板固化后单层厚度之间的关系。如同早先所述，层压板的纤维体积含量是树脂含量和空隙含量的函数。对于给定的空隙含量，层压板的纤维体积含量完全取决于树脂的含量。此外，对于给定的空隙含量和纤维面积重量，板件的厚度（从而固化后单层的厚度）也只取决于树脂含量。于是，对于不变的纤维面积重量和空隙含量，固化后单层厚度就只取决于纤维体积含量。这种依赖关系就能够用各个试验件的单层厚度（总厚度除以铺层数）对该试验件进行归一化。图 2.4.3.2 给出了固化后单层厚度和纤维体积含量关系的一个例子（在结构复合材料通常感兴趣的纤维体积含量范围即 0.45 和 0.65 内，这实际上是线性关系）。

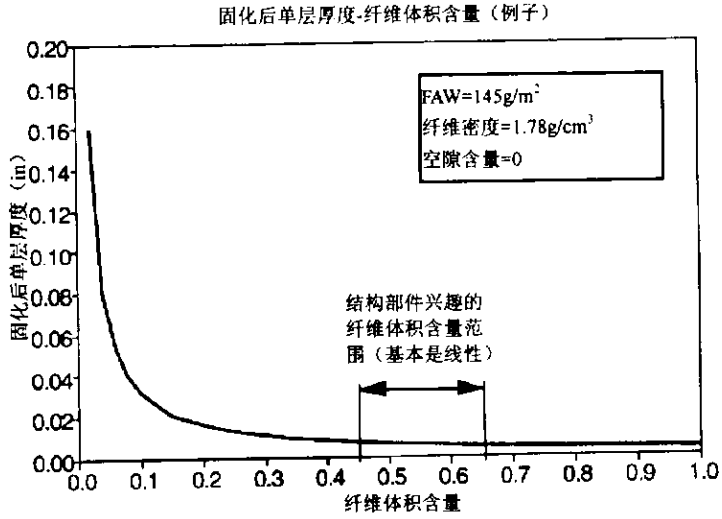


图 2.4.3.2　固化后单层厚度与纤维体积含量相互关系例子.

下面说明每个试验件归一化公式推导过程。用前面讨论的关系式，导出关于 $FV_{归一化}$和 $FV_{试件}$的表达式并代入式 2.4.3.2(a)中。为了说明简单起见，假定度量单位是一致的。

第一步先定义一个等效纤维厚度，它相当于用纤维材料构成一个在长丝之间没有空气间隙的实体均匀厚度板的厚度：

$$t_f = \frac{FAW}{\rho_f} \qquad 2.4.3.2(b)$$

式中：t_f=实体纤维层的等效厚度

FAW=增强纤维的纤维面积重量

ρ_f=纤维密度

于是，在一个层压板中的纤维百分数就是这个纤维层的厚度除以层压板的总厚：

$$FV = \frac{t_f}{CPT} \qquad 2.4.3.2(c)$$

式中：FV=纤维体积含量

CPT=层压板的固化后单层厚度

由式 2.4.3.2(b)和 2.4.3.2(c)得到

$$FV = \frac{FAW}{\rho_f CPT} \qquad 2.4.3.2(d)$$

这就是在图 2.4.3.2 例子中的曲线公式。接着可得到

$$FV_{归一化} = \frac{FAW_{名义}}{\rho_f CPT_{归一化}} \qquad 2.4.3.2(e)$$

和

$$FV_{试件} = \frac{FAW_{试件}}{\rho_f CPT_{试件}} \qquad 2.4.3.2(f)$$

式中：$FV_{归一化}$=所规定或选取的归一化纤维体积含量

$FV_{试件}$=试件的纤维体积含量

$FAW_{名义}$=由某个材料规范或其他来源得到的纤维面积重量

$FAW_{试件}$=试件真实纤维面积重量

$CPT_{归一化}$=相应于归一化纤维体积含量的固化后单层厚度

$CPT_{试件}$=真实试件的单层厚度（试件厚度除以铺层数）

式 2.4.3.2(e)和 2.4.3.2(f)联立，得到：

$$\frac{FV_{归一化}}{FV_{试件}} = \frac{FAW_{名义}}{FAW_{试件}} \frac{CPT_{试件}}{CPT_{归一化}} \qquad 2.4.3.2(g)$$

再把式 2.4.3.2(g)代入 2.4.3.2(a)，得到归一化的值：

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{FAW_{名义}}{FAW_{试件}} \frac{CPT_{试件}}{CPT_{归一化}} \qquad 2.4.3.2(h)$$

从而，可以将试验值乘以所给的纤维面积重量与固化后单层厚度的比值，把每个试件归一化。按照如下重新排列后的式 2.4.3.2(e)，计算归一化的固化后单层厚度：

$$CPT_{归一化} = \frac{FAW_{名义}}{FV_{归一化}\rho_f} \qquad 2.4.3.2(i)$$

虽然式2.4.3.2(h)描述了原先式2.4.3.2(a)的模型，但如果把式2.4.3.2(h)转变为以下形式，就不再需要计算 $CPT_{归一化}$：

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{FV_{归一化} CPT_{试件} \rho_f}{FAW_{试件}} \qquad 2.4.3.2(j)$$

把这 $FAW_{试件}$的值定义为各个单独试件的真实纤维面积重量，但它不是按照每个试件测量。然而，由于纤维面积重量在一批材料内一般变化不很大，通常用每批纤维面积重量的平均值（或者，如果可能用每卷的平均值）进行归一化就足够了。对于用树脂传递模塑（RTM）或其他非预浸料工艺过程制造的层压板，应当使用织物或预成形件的批或卷的平均面积重量。当假设以批次的纤维面积重量来近似批次内试件纤维面积重量时，式 2.4.3.2(j)变成：

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{FV_{归一化} CPT_{试件} \rho_f}{FAW_{批次}} \qquad 2.4.3.2(k)$$

在实际应用中，纤维面积重量通常以 g/m^2 为单位，纤维密度则为 g/cm^3，而单层厚度可能以 in 或 mm 为单位。对于这些单位，需要对式 2.4.3.2(k)的分子采取一个变换系数；如果单层厚度为英寸，变换系数为 25 400；如果单层厚度为毫米，变换系数为 1 000。采用这些系数，式 2.4.3.2(k)变为：

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{25\,400 FV_{归一化} CPT_{试件} \rho_f}{FAW_{批次}} \qquad 2.4.3.2(l)$$

或

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{1000 FV_{归一化} CPT_{试件} \rho_f}{FAW_{批次}} \qquad 2.4.3.2(m)$$

式中：$FV_{归一化}$=规定的或选择的归一化纤维体积含量

$CPT_{试件}$=真实试件单层厚度（试件厚度除以铺层数），in（式 2.4.3.2(l)）或 mm（式 2.4.3.2(m)）

ρ_f=纤维密度，g/cm^3

$FAW_{批次}$=批次平均纤维面积重量，g/m^2

如同早先所述，空隙含量影响到纤维体积含量。如果把孔隙率“加”到层压板内，厚度会增大而纤维体积含量会下降。但是，对于给定的纤维面积重量，纤维体积含量的改变将是同样的，无论厚度改变的原因是什么（是树脂含量改变或空隙含量改变）。这样，用式 2.4.3.2(l)或 2.4.3.2(m)进行归一化时，没有必要对空隙体积进行任何修正。当然，这要假设空隙含量不那么大或局部集中，不会降低基本的承载能力。.

一种混合方法同时采用了用试验方法得到的单个试件厚度和纤维体积的数据（基体溶解、燃烧、光学技术等）。这个方法由式 2.4.3.2(n)给出：

$$归一化值 = 试验值 \times \frac{CPT_{试件}}{CPT_{批次平均}} \frac{FV_{归一化}}{FV_{批次平均}} \qquad 2.4.3.2(n)$$

式中：$CPT_{试件}$=真实试件单层厚度（试件厚度除以铺层数）

$CPT_{批次平均}$=批次平均固化后单层厚度，由很多板件或试件厚度测量值计算得出

$FV_{归一化}$=规定的或选择的归一化纤维体积含量

$FV_{批次平均}$=批次平均纤维体积含量，由批次内板件大量试验确定的纤维体积计算得出

在式 2.4.3.2(n)中，首先用试件单层厚度把试验值修正到批次平均单层厚度。这基本上把数据归一化到一个公共的纤维体积含量——大概为批次平均纤维体积含量。然后进一步修正式 2.4.3.2(n)的第二个比值，把批次平均纤维体积含量修正为归一化的纤维体积含量。当没有纤维面积重量的情况下，这个方法是有用的。但是这个方法需要另外一个假设，即用于试验确定批次平均纤维体积含量的试件，具有等于 $CPT_{批次平均}$的平均单层厚度。通常的情况不是如此，因为批次平均固化后单层厚度可能是由大量板件的很多测量值确定的，而批次平均纤维体积含量则可能是由比较少的试件得出。如果仔细地选择纤维体积的试件使其代表批次的单层厚度，则可成功应用这个方法。

2.4.3.3 归一化的实际应用

通常的做法是对由单向带、织物和粗纱制造的层压板，将纤维控制的单层和层压板强

度（无缺口和有缺口两种情况）和模量进行归一化。虽然已经观察到纤维体积会影响各种由基体控制的性能（例如面内剪切和层间剪切），但对这些影响还没有清晰的模型，因此不对这些性能进行归一化处理。在本手册的第二卷中，对单向层压板所有强度与刚度的力学性能值给出了归一化的值，但下列的性能除外：90°（横向）拉伸和压缩、层间（3-或 *z*-方向)拉伸、层间剪切、面内剪切、短梁强度、挤压、挤压/旁路、应变能释放率和泊松比。

对于用缠绕工艺由粗纱或相似形式材料制造的层压板，在归一化时有其独特的问题。这种结构不具有通常意义上的层：这个缠绕“层”的厚度取决于纤维束的带宽、缠绕的间隔、以及在缠绕中纤维束的扩展。因为不能直接使用名义的单层厚度和纤维面积重量，不可能用单层厚度和纤维面积重量进行归一化，必须利用归一化的纤维体积含量与纤维体积含量平均测量值之比，对这些材料的试验数据归一化（式 2.4.3.2(a)）。

纤维控制的性能归一化后，由于纤维体积含量差别所造成的变异减少，归一化后的离散系数应当小于未归一化的情况。然而，所发现的情况并不总是如此，归一化不能总获得所预期的分散性下降，这有很多的原因：

- 如果测量的固化后单层厚度接近归一化厚度，同时纤维面积重量接近名义值，则修正系数将是小值，并可能基本上与这些数量测量时的误差同一量级。
- 破坏起始的模式有可能随纤维体积含量而变。例如，当纤维体积含量在一个给定范围内增加时，测量的（未归一化）压缩强度可能增大。但在某个点，由于已经超过了基体支持纤维的能力因而出现宏观尺度上的失稳破坏，增加的纤维并不能增加强度。在这个情况下，强度与纤维体积的关系遭到破坏，因而数据分散未必由于归一化而减小。
- 试验件的缺陷可能引起提前破坏。如果某些试件由于缺陷而破坏，而其他的达到了材料的真实极限值，归一化的结果将是不可预计的。
- 如果离散系数已经是小量（例如小于 3%），将不能预期归一化能使其有进一步减少，因为对大多数复合材料性能，所观测到的这个变异水平几乎已是最小的了。

归一化以后数据分散没有改变一般不是要关心的问题。但是，如果归一化以后数据分散明显增大，则应研究其原因。

2.4.4 异常数据的处理

检测异常数据点（比一个数据集内其他观测结果高很多或低很多的观测结果）是统计分析的一个部分，这将在第一卷 8.3.3 节进行讨论。虽然 8.3.3 节警告，在找到这个错误的原因以前反对抛弃异常数据，但有些情况下可以（也应当）根据判断把异常值去掉。下面几节试图对判断过程增加某些内容，以使应当保留的异常值不会意外被抛弃，同时不要保留那些应当抛弃的异常值。

根据这个讨论的宗旨，假定试验目的是对按照规定的程序和参数来成形、浸润处理和试验，进行材料性能的表征。如果是这种情况，试验数据的变异性应当（理想地）只反映材料的变异性（原材料质量、组分工艺变异性、混合比等）、工艺参数变异性（在试件制造工艺控制范围内）、试件在试验以前的环境历程变异性（在控制范围内）以及试验机参数在容差以内的变异性。在实际中还有因为未知或不可控因素造成的不可避免的变异。然而，超出这些不可避免的和容许的变异源之外的，就是加大观测数据分散性的误差源。这些附加的变异性可能是由于内部制造的原因、工艺参数超过允许的控制限、试验夹具或试

验机的缺陷和其他任何可检测或不可检测的因素造成的。处理异常数据的任务就要确定(根据物理迹象和判断)这数据变异是反映了容许的材料和工艺变异性(此时要保留异常数据)，还是由于外部的错误（此时要抛弃异常数据）。

检出异常数据后（或者目视检查数据，或者用统计检验），首先应当根据物理的迹象识别其原因。在下面列出几个举例的情况，可用以作为抛弃异常数据的依据（所列举的内容还不完整）：

- 材料（或一个组分）超出了规范的标准；
- 一个或多个板件或试件制造参数超出了规定的容差范围；
- 试验件的尺寸或取向超出了规定的容差范围；
- 在试验件中检测出（不是所研究的）缺陷；
- 在试件的吸湿预处理中出现错误（或者浸润处理参数超出了规定的容差范围）；
- 以某种特定并可确认的方式不适当地设置了试验机和/或试验夹具；
- 以某个特定并可确认的方式不适当地安装了试验件；
- 试验参数（速度、试验温度等）超出了规定的范围；
- 试验过程中试验件在夹头内打滑；
- 试验件的破坏模式不是所试验要求的模式（加强片脱落、非预想的弯曲、在测试段以外破坏等）；
- 验证产生异常数据的可疑条件而进行的试验；
- 没有适当进行归一化的数据。

一旦完成了物理迹象的搜索而不成功，则开始判断的过程。有很多方法来评定那些没有找出物理解释的异常数据。下面建议一个可能的过程，其流程如图 2.4.4 所示。

当检测出一个异常值时，这本身可能是、也可能不是一个要关注的问题。如果把它夹杂在数据中并不影响基准值的计算，并且没有导致其他的工程问题，则可简单地将其保留而不再加以考虑。.

如果在单个批次或单个数据集内检出了一个异常数据点，同时，如果还有另外附加的数据集（制造、浸润处理和试验的情况相同），有很多考虑可用来支持判断的过程调用。如果反之，如果没有可以使用的附加数据集，或者在把几个数据集加以联合（汇集）以后才检出异常值（见第一卷 8.3.1 节），则只有很少的选择可考虑，而判断将更带有主观性。

对于单个数据集中有一个异常值，如果还有附加数据集可用，首先考虑并确定所考察的异常值是否在其他数据集的非异常值范围内。如果它在其他数据集的非异常值范围内，推荐将此异常值保留。

如果单个数据集中的异常值也超过了其他数据集的非异常值范围，下一个选择就是从与原异常值数据所对应的相同零件或板件中取出试件并重新试验，以获得重新试验的数据。如果重新试验的数据拒绝这异常数据，可以用这个重新试验的数据集替代原先的整个数据集，然后把这替换的数据集和其他的数据集相联合。如果重新试验的数据依然存在异常值，则保留原先的数据，并将其和其他的数据集进行联合，也可以把这个重新试验的数据集增加到数据总体之中。无论是否更换原先的数据，接着都要检查联合数据集的异常值。如果在联合数据集中没有检测出异常值，则无需对其进行删除。

如果在联合的数据集内有若干异常值（或者在单个数据集内有异常值但没有可用的附

加数据集），这个判断过程变得更具有主观性。在此情况下，建议只考虑删除高的异常值。通常，如果一个高的异常值如此之高以致根据经验和其他来源的相似试验结果已经显然超出了已知的或预期的材料能力，则可以将其删除。如果在单一的数据集存在低异常值并且没有可用的附加数据集，应当试验一些附加的批次并重复判断的过程。没有附加批次的信息，重新试验同样的单一批次试验是不充分的。

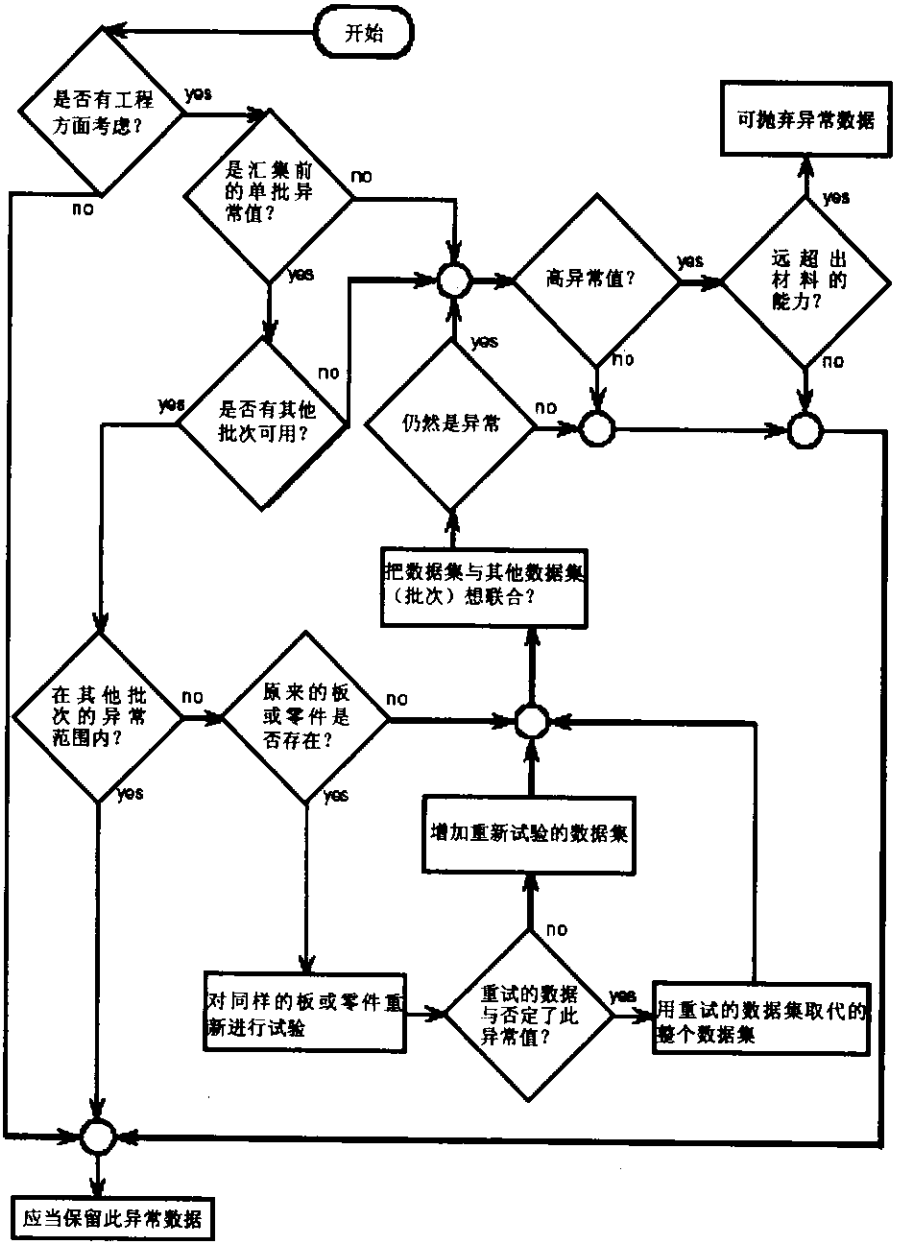


图 2.4.4　处理未查明原因异常数据的判断过程

注意，这个判断过程不是去确认具体的原因，也不实际检验源于不正常变异的可疑数据。这个判断过程试图建立一批信息以便得出结论：这（由预期的材料、工艺、或试验变异之外的某个因素引起的）不正常变异极有可能是异常值的根源。应当在确定并量化物理原因的所有努力都失败后才使用这种处理异常值的方法。用这个判断过程决定的任何数据

删除，都应当在文件中详细说明理由。

2.4.5 数据文件编制

此节留待以后补充。

2.5 为向 MIL-HDBK-17 提交数据的材料试验

2.5.1 引言

2.5 节介绍把材料性能数据在 MIL-HDBK-17 第二卷发表时的要求。可以从 MIL-HDBK-17 协调委员会或秘书处得到一个数据来源信息包，以帮助数据提交者向本手册提供数据。这个信息包中提供了关于数据准备的建议和一个软盘，盘中包含有 ASCII 文本文件和电子制表文件，制表文件中有关于试件、批次和材料信息的推荐表格形式。整个数据提供和评价的过程已在 1.5 节中说明，并概括在图 2.5.1 中。

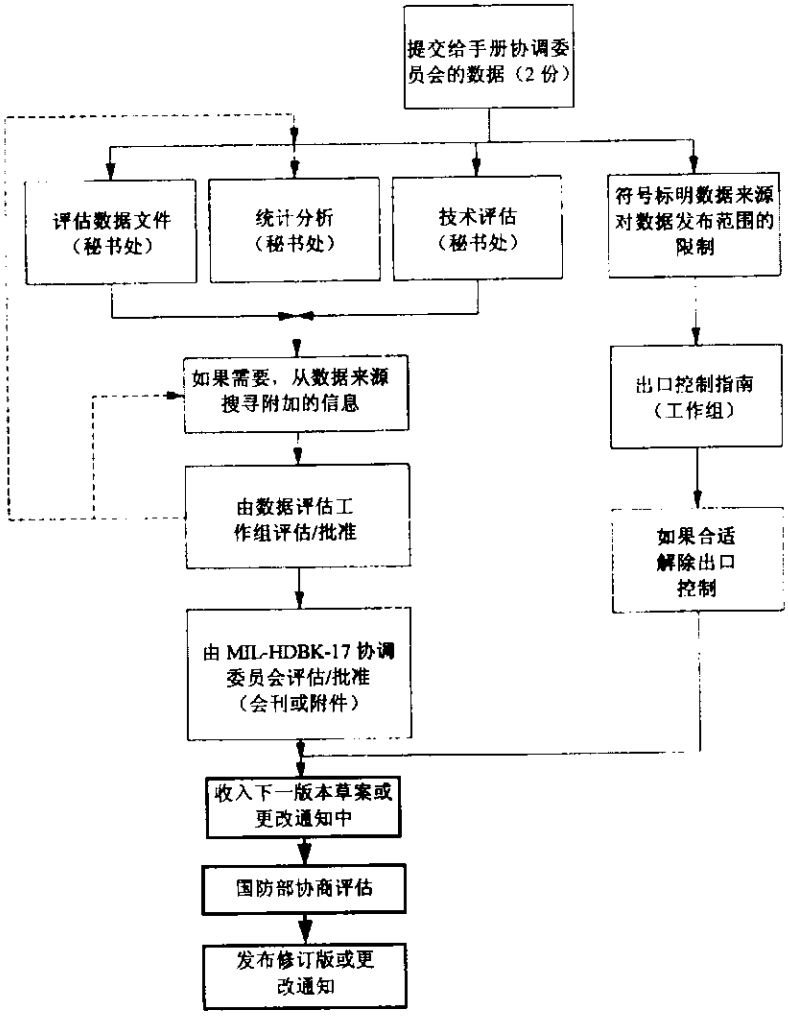


图 2.5.1 数据提交与评估的过程

所提供并可能公布的材料性能数据集，可被归类于后面介绍的某个 MIL-HDBK-17 数据类别，然后检查看其材料与工艺（2.5.2 节）、采样（2.5.3 节）、浸润处理（2.5.4 节）、试验方法（2.5.5 节）和数据文件编制（第 2.5.6 节）等是否满足 2.5.7-2.5.11 节中所讨论的性能要求。在这手册中只对 B 和 A 类数据给出 B 基准值。（如果有足够的数据，使用一个 A 类标志并同时提供 A-值和 B-值）。MIL-HDBK-17 数据类型是：

1. A75——充分采样数据

   以统计为基础的材料性能，满足手册最严格的母体采样、数据文件编制和试验方法要求。在手册中给出 A-值和 B-值。在摘要汇总表中用大写字母 A 标示。

2. A55——简化采样数据

   以统计为基础的材料性能，满足手册最严格的数据文件编制和试验方法要求，具有用于某些用途的减缩母体采样（见第三卷第 4 章“积木式方法”）。在手册中给出 A-值和 B-值。在摘要汇总表中用小写字母 a 标示。

3. B30——充分采样数据*

   以统计为基础的材料性能，满足手册最严格的 B-值母体采样、数据文件编制和试验方法要求。在手册中给出 B-值。在摘要汇总表中用大写字母 B 标示。

4. B18——简化采样数据

   以统计为基础的材料性能，满足手册最严格的数据文件编制和试验方法要求，具有适于对某些应用的 B-值减缩母体采样（见第三卷第 4 章“积木式方法”）。在手册中给出 B-值。在摘要汇总表中用小写字母 b 标示。

5. M——平均数据

   平均材料性能，满足手册最严格的数据文件编制和试验方法要求。这个数据类型一般适用于模量和泊松比数据以及其他通常不用基准值的性能数据。在摘要汇总表中用大写字母 M 标示。

6. I——临时数据

   数据不满足 B 和 A 数据类型要求的具体采样或数据文件编制要求。可以把临时数据再分为两类：

   - 数据满足 B 和 A 数据类型的数据文件编制要求，但试验的批数或试件重复数不够。有可能将这些数据与其他的数据汇集，构成一个满足 B 和 A 数据要求的适当样本母体。
   - 尽管母体采样满足 B 和 A 数据类型要求，但不满足数据文件编制要求。这些数据不能用于以后的数据汇集。

7. S——筛选的数据

   代表少于 3 批的数据，或为了批准目的由筛选试验得到的数据。筛选数据类型的目的是尽快使有用的新材料数据和其他信息进入手册，即使只有如 2.1.2.2 节和表 2.3.1.1 的推荐试验矩阵所述的有限数据集。

注意，对于不是要把数据包括到 MIL-HDBK-17 中的情况，关于某个具体应用情况的材料数据类型选择需要合同承包方和适航当局之间一致同意。

---

* B30 数据类型相当于 MIL-HDBK-17B 到 E 版本中正式批准的类型（Fully Approved class）。

2.5.2 材料和工艺规范的要求

提交给本手册的所有材料，应当按对关键物理和力学性能有要求的材料规范进行制造，同时其工艺过程应当符合对关键工艺参数进行适当控制的工艺规范。

2.5.3 采样要求

如 2.2.5.1 节所指出的，基准值的大小与获得的数据量、所代表的批次数以及各批次间生产一致性有关。在本手册中只对 B 和 A 类数据提供基准值。每种类型的最低采样要求见表 2.5.3。

表 2.5.3 MIL-HDBK-17 数据类型的最低采样要求

标 志	符 号	说 明	最低要求	
			批 数	试件数
A75	A	A基准——充分采样	10	75
A55	a	A基准——简化采样	5	55
B30	B	B基准——充分采样	5	30
B18	b	B基准——简化采样	3	18
M	M	平均	3	18
I	I	临时	3	15
S	S	筛选	1	5

数据文件编制要求的核心是数据库建立过程的完全可追溯性和可控制性，这个过程从材料生产开始、经过采购、制造、机械加工、环境浸润处理、测量、试验、数据采集、数据归一化以及最后的统计解释。这个过程中有关单层/层压板力学试验的关键信息项目见表 2.5.6，应当作为材料性能确定的一部分加以记载。提交给秘书处的任何数据都应包括带有标记（•）的项目。在为证明提交数据的 B，A 和 M 数据类别的文件中必须包括带标记（⊗）和所有带标记（•）的项目。为确认统计异常值，秘书处应可追溯与得到所有其他信息。所有信息都按单层/层压板级力学性能试验的需要列出。在不适用处*，不需要单独的文件项目或文件组。

2.5.3.1 关于数据类型B和A的附加要求

材料供应商应当用生产设施来准备各批预浸料。前面几批预浸料（直到第 5 批）应当用不同批组的纤维和基体组分（当批次大于 5 时无须如此）。对于每种情况和性能，批次的重复试件应当从至少两个不同的试验板件上取样，这些板件至少要分别覆盖两个工艺循环。应当用超声检查或其他适当的无损检测技术对试验板件进行无损评估。不应当从质量有疑点的板件部位截取试验件。试验计划（或报告）应当记录层压板设计、试件采样细节、制造方法（包括材料可追溯性信息）、检测方法、试件截取方法、标记方案和试验方法。

2.5.3.2 数据汇集

为了得到足够的数据来计算材料性能的基准值，希望有能力把多个相似但不等同的数据集相汇集。所汇集的数据集可以来自由不同制造商、同一制造商在不同地方、或同一制造商在工艺稍有改变时生产的材料。

---

* 例如，紧固件类型和拧紧的条件适用于螺栓挤压试验而不适用于拉伸试验。因此，对挤压试验需要报告这个信息，而拉伸试验就不需要。

关于适合进行数据汇集的决定由 MIL-HDBK-17 的数据评估工作组作出，这个工作组将检查所有试验性能的批次间变异性（8.3.2.2 节)。在开始进行一个利用数据汇集的新试验计划以前，建议要得到 MIL-HDBK-17 的数据评估工作组的事先批准。然而，由 MIL-HDBK-17 数据评估工作组批准进行某个具体数据的汇集过程本身，并不能保证在试验结束后该材料数据集是可以进行汇集的。推荐在投入大量资源进行大规模试验以前，对数据的可汇集性作初步的调查研究。

对几个制造商希望共同建立提交给 MIL-HDBK-17 的 B 基准数据的情况，MIL-HDBK-17 的数据评估工作组已经预先批准了一个数据汇集程序。必须具有并采用标准的材料及工艺规范。最低采样要求是最少 3 个制造商，各自至少用 3 个不同批次的材料生产板件。按照 2.5.3.3 节所讨论的，必须从 5 个不同的预浸料批次中采样至少 9 批，并要遵照 2.5.3.3 节中有关各批重复件、加工处理、检测、计划编制以及报告等项要求。

2.5.4 浸润处理要求

此节留待以后补充。

2.5.5 试验方法的要求

当把数据提交给 MIL-HDBK-17 考虑包括到本手册第二卷中时，具体使用的试验方法标准以下面的概念为基础。理想地，应当由一个独立自主公认的标准组织（其中可以包括来自材料供应商、最终用户、学术界、或政府的代表），对试验方法的适用性、精确度和偏差进行严格的评价。应当能在可参照的公开发表的出版物中得到这个评价和试验方法，并包括不同试验室间的验证（round robin）试验。在很多情况下还没有满足上述准则的试验方法，因此必须为数据提交选取不太满足严格要求的方法（以下的 2 或 3）。

根据材料的结构复杂性等级（2.1.2.1 节)和性能，MIL-HDBK-17 协调委员会已经确定了一些具体的试验方法，用于准备提交数据供本手册考虑加入第二卷的情况。这些方法将在第 3 到 7 章中指定或说明，它们满足以下的一个或多个要求：

1. 适用于先进复合材料和可共同使用的方法，已经完成了下列工作：
   - 在一个公认的标准制订组织主持下的 Round robin 试验（不同试验室间的验证试验）；
   - 对精确度和偏差的严格评价；
   - 在公认的标准制订组织的公开文献中发表。
2. “共同习惯”的方法，它还没有按上面的(1)进行标准化，但在复合材料工业界通用，在可参照的公开文献出版物中能得到，已开始正规的标准化进程。
3. 对于具体的结构或加工/产品形式还没有满足以上要求的标准方法时，由 MIL-HDBK-17 协调委员会一致同意选择的其他试验方法。这方法可能已由 MIL-HDBK-17 工作组或由其他组织建立，并已开始正式的标准化进程。

用于向这个手册提交数据的这些试验方法，在进行试验时必须满足表 2.2.4 中概括的本手册建议。对于 B 和 A 类数据，需要完全认可的试验方法。对 I 类数据可以接受临时试验方法，而对 S 类数据可以接受筛选试验方法。

2.5.6 数据文件编制要求

本节简要说明当要把数据包括到MIL-HDBK-17第二卷中时必需的数据文件编制要求，数据必须满足向本手册提交数据是有效的数据文件编制要求。表2.5.6中给出了在本手册公布数据时是有效的数据文件编制要求。注意，这些要求今后会有修改，因此，最新权威版本的数据文件编制要求可能与表略有区别，必须从秘书处或协调委员会得到这个最新权威版本。

表 2.5.6 文件编制要求

材料识别——所有复合材料都需要
● 材料识别 ● 材料种类（例如，C/EP) ▼ 材料采购规范
基体材料——所有复合材料都需要
● 商业名称 ● 制造厂商 ● 制造日期，最早与最晚 ● 每批的批号 ● 名义密度与试验方法
增强材料——所有复合材料都需要
● 前驱体类型（即PAN，人造纤维) ● 商业名称 ● 制造厂商 ● 制造日期，最早和最晚 ● 每批的批号 ● 表面处理（Y/N) ▼ 表面处理种类 ● 表面处理剂（浸润剂）识别与总量 ● 密度（每批料平均）与试验方法 ● 名义长丝支数 ● 捻度
预成形件
● 预成形件织构 ● 预成形件标识 ● 预成形件制造厂商 ● 预成形件制造方法——模塑，缝合，RFI等 ● 预成形件层数 **2-D 织物** ▼ 织物制造厂商/机织厂商 ● 织物种类（机织构型） ● 织物标准样式编号（玻璃纤维织物特有） ● 织物浸润剂识别 ● 织物浸润剂含量 ● 每英寸的织物经向和纬向纱束支数 ● 每批的纤维面积重量* ● 织物纬向纤维（如果不同）

* 见零件说明，纤维面积重量

3-D 机织材料（包括三轴织物）

- 联锁描述
- 经向纤维长纱支数
- 纬向纤维长纱支数
- 斜向纤维长丝支数
- 机织纱长丝支数
- 经纱百分数
- 纬纱百分数
- 斜角纱的角度（关于轴线纱，正角）
- 斜角纱百分数
- 机织纱百分数
- 厚度方向纱的百分数
- 节距长度
- 经线长纱支数
- 纬线长纱支数

缝合信息

- 缝合形式
- 缝合线
- 缝合轴向间距（针距）
- 缝合行距
- ▼ 缝线的旦尼尔
- 缝线长纱支数
- 偏轴纱支数
- 偏轴纱角度

编织信息

- 编织描述
- 轴向纤维类型
- 编织纤维类型
- 轴向纤维长丝支数
- 编织纤维长丝支数
- 编织角
- 轴向纱百分数
- 编织纱百分数
- ▼ 编织物中轴向纱间隔

缠绕描述

- 缠绕描述

预浸料

- 单层的制造厂商
- 制造日期
- 材料的批号
- 商业名称
- 材料形式——单向带/织物
- 每批次的纤维面积重量*
- 每批料的总树脂含量

*见零件说明，纤维面积重量

▼ 挥发物含量 ● 稀纱布材料类型 ● 稀纱布织物形式
工艺——所有复合材料都需要
▼ 工艺规范 ● 铺贴图解（包括袋压材料，稀纱布，吸胶材料等） ⊗ 零件制造厂商 ● 制造日期（完成日期） ● 增强材料使用过程（如何使纤维/预成形件成为一体）——见第二卷，表1.4.2(b) ● 固化工艺类型（零件是如何固化/模塑成形的）——见第二卷，表1.4.2(b) ▼ 增粘剂公共名称 ▼ 增粘剂材料类型（例如环氧树脂） ▼ 增粘剂形式——气溶胶/液体 ▼ 增粘剂制造厂商
工艺过程说明——所有复合材料需要相应种类
热压罐/烘箱/压机固化 ● 近零吸胶/吸胶工艺 ● 把未固化零件放入热压罐/烘箱/压机的温度（包括范围） ● 达到固化条件的升温升压速率 ● 后固化条件——温度、压力、持续时间， ● 达到后固化条件的升温升压速率 ● 后固化条件——温度、压力、持续时间， ● 冷却速率 ● 取出零件的温度 ● 其他关键控制参数 **RTM（不适用于RFI）** ● 在树脂注射以前的脱气步骤 ● 初始的模具温度 ● 预成形件插入温度 ● 加热速率，注射树脂以前的浸渍时间和温度 ● 使用真空（Y/N）和Hg柱高度（in）） ● 注射速率（cm^3/min）、温度和压力 ● 固化温度、压力和持续时间 ● 冷却速率和取出零件的温度 ● 附加后固化（Y/N）——温度、持续时间、在模具内/自由放置
零件说明——所有复合材料都需要
● 形式（板件、管等） ● 铺层数 ● 铺层编码 ● 纤维面积重量*，名义值，按照批次或零件和试验方法 ● 名义纤维体积含量*和试验方法 ▼ 树脂含量（重量或体积），名义值和试验方法 ⊗ 空隙含量，名义值，按照批次或零件和试验方法

* 需要每批或每块板件的纤维体积含量或纤维面积重量（FAW）。对预浸料，可以用批次或卷的平均 FAW。对其他材料，可用组合增强材料（织物、编织物或预成形件）的批料或卷的平均 FAW。如果使用附加的面外增强材料，例如缝合，可以在加上面外增强材料以前得出这个（例如未缝合织物的）批次或卷的平均 FAW。

● 密度，名义值，按照批次或零件和试验方法 ● 单层厚度，名义值，按照批次或零件和试验方法 ● 玻璃化转变温度（湿和干态，名义值）和试验方法
试件准备——所有复合材料都需要
● 试件取向 ⊗ 加强片胶接固化温度（名义值）
力学试验——所有复合材料力学试验都需要
● 试件数 ● 试验方法（列举与标准方法的所有差别，包括报告的要求。假定除所列的差别外均遵照这试验方法） ● 适用标准的日期 ● 试验日期 ● 每个试件的厚度 ● 试件浸润处理的标准方法 ● 浸润处理温度* ● 浸润处理湿度 ● 浸润处理时间 ● 浸润处理环境（如果不是试验室的大气环境），如果可能，流体的标准标识 ● 平衡（Y/N） ⊗ 吸湿量，规定是吸湿量或是摄取量 ● 试验温度 ● 开始加载以前在试验环境下经历的时间 ● 紧固件类型和拧紧条件（挤压、机械紧固件连接（MFJ）、充填孔） ● 孔的直径（开孔/充填孔、挤压、MFJ） ▼ 孔的间隙，划窝角和深度（充填孔、挤压、MFJ） ● 每个连接板（挤压，MFJ）的名义厚度、宽度和材料
● 边距（挤压、MFJ） ● 夹具拧紧（如SACMA RM-1） ● 试验终止时的剪切应变（剪切） ● 破坏模式识别和位置 ● 所有未归一化的（原始）数据 ● 模量和泊松比计算方法 ● 得出拐点强度的方法（挤压） ● 得出比例极限的方法（挤压） ● 计算断裂韧性的方法（断裂韧性）

● 提交秘书处时需要的

⊗ 对B和A类数据，提交秘书处时需要的，

▼秘书处需要的，如果可能则提供

2.2.12 节提供了数据文件编制的一般建议。数据文件编制要求的核心，是数据库建立过程的完全可追溯性和可控制性，整个过程包括从材料生产、经过采购、制造、机械加工、浸润处理、测定、试验、数据收集、数据归一化直到最终的统计解释。关于复合材料力学试验的关键信息项目汇总见表 2.5.6，应当在任何这类材料性能测定的文件报告中包括这些内容。提交给秘书处的任何数据中应当包括带有标记（●）的项目。在提交证明所提交数

* 如果浸润处理用多步处理的方法，每步都要提供浸润处理的信息

据的 B，A 和 M 数据类别的文件内，必须包括带有标记（⊗）的项目以及带有标记（●）的项目。秘书处希望提交带有标记（▼）的项目，如果可能，这个信息将出现在第二卷中。在第一卷 2.2.12 节中讨论了关于于内部文件编制的建议。秘书处应当可追溯并可得到所有合理的信息，以便确认统计异常值。

这个表中的项目都是按照力学性能试验需要的信息列出的。这个文件编制要求按照制造中各个阶段可能的形式进行分组，并确定了所有复合材料都需要的组别。所有的材料类型都需要材料标识、基体材料和增强材料各组。在预成形件和预浸料组内的项目，则根据材料制造的附加步骤按照各个制造形式标明。例如 2-D 织物的预浸料将需要预成形件组的 2-D 织物部分和预浸料组。应当使用工艺过程说明内的适当的节。其余各组适用于所有的力学性能试验。注意，这些项目的分组按照其是否需要包括特定制造阶段的相应信息决定。对于大多数的项目，这也就是获得该信息时的制造形式。对于后面的分组有少数例外情况。例如，关于稀纱布的信息包括在预浸料组中，因为其需要稀纱布的信息。纤维面积重量应当在最适当的制造阶段来测量。有些个别的文件项目如果不适用就不需要使用它们*。

其他类型试验或材料等级所需要的信息是相似的。例如，预浸料性能试验将需要预浸料、增强材料、基体和（也许）织物信息，同时需要关于试件准备和试验方法的相应信息。

2.5.7 数据归一化

应当对某些类型的数据进行归一化，以提供一致的性能表达并能进行合理的材料对比。对于力学性能，由秘书处对单层/层压板强度与刚度性能进行数据的归一化，但不包括单向层压板的 90°（横向）拉伸和压缩、层间（3-或 *z*-方向）拉伸、层间压缩、层间剪切、面内剪切、短梁强度、挤压和挤压/旁路、应变能释放率以及泊松比。应当按以下优先顺序用 2.4.3 节的方法进行手册中力学性能数据的归一化：

- 根据试验件测量的纤维体积含量，如式 2.4.3.2(a)所示；
- 根据试件固化后单层厚度和批次的平均纤维面积重量，如式 2.4.3.2(k)所示；
- 根据试件固化后单层厚度和批次的平均纤维体积含量，如式 2.4.3.2(n)所示。

除非数据评价工作组认为其他的数值更加合适，单向带的数据归一化为 60%纤维体积含量，而织物的数据归一化为 57%纤维体积含量。其他性能的归一化方法还有待批准。

2.5.8 统计分析

手册的所有数据均按照 8.3.1 节的流程图进行分析。在（根据 8.3.2 节）可以忽略其批次间变异性之处，所采用数据的模型是观察的显著性水平大于 0.05 的第一数据模型。按照下列顺序考虑模型——Weibull、正态、对数正态以及非参数模型。统计方法的选择包括对于数据汇集的考虑（2.5.3 节），要经过数据评价工作组的评估并得到批准。

2.5.9 单层和层压板的力学性能

手册的每种材料的力学性能值将在第二卷的数据汇总中列出。

---

* 例如紧固件类型和拧紧状态适用于螺栓挤压试验但不适用于拉伸试验，因此对挤压试验需要报告这个信息，对拉伸试验就不需要。

2.5.9.1 得自层压板的单向性能

2.4.2 节给出了由层压板“反推”单向材料单向层力学性能的方法。将按照图 2.5.1 的程序，考虑把这个方法得出的数据包括到手册中。虽然 2.4.2 节的方法适用于很多铺层情况，但还在继续探索其他的可能性，到目前为止，只有$[90/0]_{ns}$层压板被 MIL-HDBK-17 协调委员会认为是可接受的。

2.5.9.2 强度和破坏应变

强度和破坏应变的手册值均应当满足 2.5.3 节对每个性能和每种条件的采样要求。对于准备包括在母体内的数据，必须认为其破坏模式对所用的试验方法是可接受的。将按 2.4.3 和 2.5.7 节对强度进行归一化。将按照 8.3.1 节所述对强度和破坏应变进行完整的统计处理，包括异常值检出、数据汇集试验、分布的确定以及 B 基准值计算。

2.5.9.3 弹性模量，泊松比和应力/应变曲线

在一个固定应变范围计算的弹性模量（杨氏模量或剪切模量）与泊松比的手册值，应当满足 2.5.3 节对每个性能和每种条件的采样要求。弹性模量应当按照 2.4.3 和 2.5.7 节进行归一化，并对结果按 8.3.1 节所述方法进行统计分析。将列表给出模量的最小值、平均值、最大值以及离散系数（CV）值，并列表给出泊松比的平均值。报告中应当包括计算方法和每个性能的应变范围。如果提供了应力/应变数据，将用 8.4.4 节介绍的方法计算平均应力/应变曲线，并按照第二卷，1.4.2 节给出报告。

2.5.10 化学性能

此节留待以后补充。

2.5.11 单层和层压板的物理性能

物理性能（如果可能，在 23±3°C（73±5°F））的手册值将在每个材料的数据汇总中列出。如果可能，另外的值将以温度或其他参数的函数形式用图给出。

2.5.11.1 密度

应当对测定任何力学性能每批材料，在规定的温度（没有特定要求时使用 23±3°C（73±5°F））下由最少 3 个试件平均得出密度的手册值。

2.5.11.2 组分

此节留待以后补充。

2.5.11.3 平衡吸湿量

应当按规定的相对湿度和温度（没有规定要求时使用 85%RH，82°C（180°F）），由每个情况最少 3 个试件平均得出平均吸湿量的手册值。如果能够得到平均吸湿量随温度和相对湿度变化的补充信息，应当以图的形式给出这些值。

2.5.11.4 湿扩散率

应当在规定的温度（没有规定要求时使用 82°C（180°F））下，由每个温度最少 3 个试件平均得出湿扩散率的手册值。如果能够得到湿扩散率随温度和相对湿度变化的补充信息，应当以图的形式给出这些值。

2.5.11.5 湿胀系数

应当按照与热膨胀系数相同的方式（2.5.12.1 节），得到并报告湿胀系数的手册值。

2.5.11.6 玻璃化转变温度

应当对干材料和湿材料状态，由每种状态最少 3 个试件平均得出玻璃化转变温度的手册值。6.4.3 节中讨论了关于玻璃化转变温度测试和湿态保持的指南。

2.5.12 热性能

热性能的室温值将在汇总中列出。如果可能，将把其他热性能值与温度函数关系按第二卷 1.4.3 节在单张图中用图给出。应当对规定的温度或温度范围确定每个性能。在表 2.5.12 中对不同基体材料给出温度不另行规定时准备使用的默认值。所有材料的室温默认值是 23°C（73°F），对所有默认温度值的容限是±3°C（±5°F）。

表 2.5.12 手册中热物理数据的隐含温度

基体材料族	默认高温		默认温度范围	
	°F	°C	°F	°C
环氧树脂	220	104	73~275	23~135
双马来酰亚胺	350	177	73~450	23~232
PEEK	220	104	73~250	23~121
聚酰亚胺	550	288	73~600	23~315

2.5.12.1 热膨胀系数.

应当按照规定的温度范围（在没有规定要求时，使用表 2.5.12 中相应基体材料的默认温度范围），对每个温度范围用至少 5 个试件的平均得出线性平均热膨胀系数（CTE）的手册值。应当清楚注明热膨胀的参照温度。

2.5.12.2 比热

应当按照规定的温度（在没有规定要求时，使用默认的室温），对每个温度用至少 3 个试件的平均得出常压的比热手册值。

2.5.12.3 热传导率

应当按规定的温度范围（在没有规定要求时，使用表 2.5.12 中相应基体材料的默认温度范围），对每个温度范围用至少 3 个试件的平均得出平均热传导率的手册值。

2.5.12.4 热扩散

应当按规定的温度（在没有规定要求时，使用表 2.5.12 中相应基体材料的默认高温作为中间温度），对每个温度用至少 3 个试件的平均得出热扩散率的手册值。

2.5.13 电性能

此节留待以后补充。

2.5.14 疲劳

疲劳定义为重复机械载荷在适当的环境条件作用下所造成的性能变化。对于设计成纤维控制的铺层形式并具有最低面外载荷的聚合物基复合材料结构，通常不认为疲劳是一个制约设计的性能，但受高周疲劳载荷的构件是例外，例如旋翼桨叶、螺旋桨叶片和发动机

风扇叶片。这些结构会遇到大量循环载荷（高达 5×10^8），因而其设计不能只考虑静力和损伤。在这些应用情况中，疲劳是一个重要的性能。可以用试样、元件和构件试验的“积木式”设计/验证方法来保证足够的疲劳寿命。

应当在不同的研制水平上处理疲劳问题：

- 基本材料性能筛选——主要目的是比较不同的材料以便材料选择的过程。
- 设计许用值——目的是以足够的重复试件试验和情况来表征所选的具体材料，以确保（通过分析）所完成的设计具有适当的性能。这一级试验的另外用途，是为进行更高水平（更复杂）的元件和构件试验确定疲劳放大系数。

关于用单层疲劳数据导出层压板的疲劳许用值还没有公认的做法，因此，推荐生成以结构特定层压板为基础的许用值。ASTM D3479“针对拉-拉疲劳的纤维、树脂基复合材料”是一个推广的试样试验方法，可以用作疲劳试验方法的指南。注意，这个已经发布的试验方法是用于拉-拉疲劳的，而一般对复合材料更危险的是压-压和拉-压疲劳。

下面是某些关于试件疲劳试验的一般指南。疲劳数据是在设计关键试验条件（即-54°C（-65°F）、室温或湿/热）下产生的。设计关键试验条件对应用情况的依赖很大。对于湿/热试验，应当在试验以前使试件达到想要的吸湿水平，并在实际疲劳试验过程中保持这个吸湿水平。这个想要的吸湿水平本身又依变于应用情况，可能是某个规定相对湿度的平衡吸湿量，或者是平衡水平的某个百分数，或者是由具体应用环境、零件几何特性和计划服役寿命所规定的某个其他条件。作为举例，文献 2.5.14(a)（J. Rouchon）中包含了某个适航机构所采用的方法。

和得到静力设计许用值的过程一样，在疲劳试验中也可使用缺口。这个方法可能是非保守的，因为与无缺口的试件相比，缺口试件在最大应力横截面的材料量大为降低。如果试件试验的目的是考虑材料和工艺过程变异对疲劳性能的影响，则无缺口试件是更适当的构型。无缺口试件的破坏将从试件中固有的随机破坏位置开始，而有缺口试件的破坏则限于从试件中的制造缺口处起始。

如果疲劳试验的目的是对工艺过程变异提供结构水平的估价，则采用真实的制造异常可能更加合适。在循环载荷环境下，复合材料结构上的制造异常如分层、脱胶、纤维断裂是重要的，因为，对无扩展损伤容限方法中必须表明它们没有明显扩展；或者，对有扩展的损伤容限方法，在构件的寿命期间将其检查出来以前，它们不会扩展到临界长度。通常推荐用元件、构件和组合件级的疲劳试验，来证实允许的制造异常极限，并用以建立使用中的检测要求。

可以用 3 个 R 比值，即 R=0.1（拉-拉）、R=10.0（压-压）和 R=-1.0（拉-压）来评价面内材料性能的疲劳数据。设计疲劳载荷情况可能没有指出完整的载荷谱情况，但用这 3 个 R 比值就可构成一个 Goodman 图（文献 2.5.14(b)），来帮助预计任何给定 R 比值时的疲劳。对于层间的性能，推荐执行两个低 R 比即 R=0.1 和 R=-1.0。对于面外（厚度方向）的疲劳，不需要 R=10.0，因为这不是一个通常会出现的破坏模式。对层间剪切疲劳的 R=10.0 与 R=0.1 是一样的，所以不进行 R=10.0 的试验。

试验通常按载荷控制的方式进行，由于 PMC 的线弹性性质，一般不需要进行应变控制的试验。除非把试验频率设置成使用中的频率，设置的试验频率不应当使试件内的温升大于 2.8°C（5°F），通常使用的试验频率是 5-10 Hz。所有试件应当是热耦合的，以保证在

整个疲劳试验中可以忽略对试件的加热。在试验过程中使用服役频率可能是重要的，因为已经证明，增加试验频率可能增大某些材料/试验构型的疲劳寿命。

疲劳试验件的破坏模式评估与静力试验件的情况同样重要。如果出现一个不合适的破坏模式，可能产生错误的数据。通常要避免的不想要的破坏模式包括加强片脱胶、非测量段的破坏以及在几何过度区域的纤维劈裂。为了在试件的疲劳试验中出现适当的测量段破坏模式，疲劳试件设计与制造质量非常重要。

试验中选择的应力水平，应当在半对数疲劳应力-循环数图（*S-N* 图）上提供合适的数据间隔，并在所感兴趣的循环数区域提供破坏点。有关低周疲劳（LCF）40 000 循环数结构的一个循环数范围例子是，在 10^3 到 10^5 循环之间产生破坏点。每个曲线所需要的数据点数目不同，取决于其预期的用途。对于材料筛选，一般 8 个数据点就足够确定疲劳的特性。对于设计许用值，推荐对三批次使用 15 个数据点。回归分析或 Sendeckyj 方法（文献 2.5.14(c)和(d)）是分析这个数据及建立 B 基准和 A 基准设计许用值曲线的有效方法。

疲劳设计许用值曲线有两种用途。首先，可用一个 B 基准或 A 基准值来确定某个特定循环数的应力最大值。另外一个用途是用关键设计性能疲劳数据的数据分布，确定载荷/寿命放大系数，用于元件或构件试验。因为通常只对少量元件或构件进行疲劳试验，必须增大这个试验的载荷/寿命来考虑材料和工艺方面的分散性。即使有以基于经验的技术来预计 PMC 结构的寿命，也需要元件或构件试验来证实，因为在试件试验或设计分析中没有考虑到一些和具体特征有关的影响，例如铺层递减及制造的复杂性。在 FM 报告（文献 2.5.14(e)）中介绍了这种载荷/寿命放大方法和一种可靠的统计方法，以保证以有限数量的试验件获得所需的耐久性。载荷/寿命增大方法还可用于考虑难于在元件或构件试验中再现的环境效应。

正如以前所讨论的，复合材料中大多数的疲劳问题涉及高周应用情况。大多数飞机结构承受具有变幅值和变最大值的载荷范围（谱载荷），这些结构不具备高周特征。谱载荷出现了另外的复杂情况，事实证明这复杂性是难于在寿命预计时加以考虑的。已证明对金属结构发展的累积损伤方法对复合材料是无效的，这就必然需要日益依赖经验的方法来进行寿命验证而不是进行寿命的预计。

参考文献

2.1.1(a) Rouchon, J., "Certification of Large Aircraft Composite Structures, Recent Progress and New Trends in Compliance Philosophy," presented at the 17th ICAS, Stockholm, Sweden, 1990.

2.1.1(b) Whitehead, R. S., Ritchie, G. L., and Mullineaux, J. L., "Qualification of Primary Composite Aircraft Structures," presented at the USAF ASIP Conference, Macon, GA, 27-29 November, 1984.

2.1.1(c) Whitehead, R. S., and Deo, R. B., "A Building Approach to Design Verification Testing of Primary Composite Structures," Proceedings of the 24th AIAA/ASME/AHS SDM Conference, Lake Tahoe, NV, May 1983, pp. 473-477.

2.2.4 Fields, R. E, "Improving Test Methods for Composites," ASTM Standardization News, Oct. 1993, pp. 38-43.

2.2.7(a) ASTM Test Method D 570 "Water Absorption of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.7(b) ASTM Practice D 618 "Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.7(c) ASTM Test Method D 5229/D 5229M "Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.7(d) Ryder, J.T., "Effect of Load History on Fatigue Life", AFWAL-TR-80-4044, July 1980.

2.2.7.1 Hedrick, I. G., and Whiteside, J. B., "Effects of Environment on Advanced Composite Structures," AIAA Conference on Aircraft Composites: Emerging Methodology for Structural Assurance, San Diego, CA, 1977.

2.2.7 3(a) Whiteside, J. B., et al, "Environmental Sensitivity of Advanced Composites," Volume 1, Environmental Definition, AFWAL-TR-80-3076.

2.2.7.3(b) MIL-STD-210C, Climatic Information to Determine Design and Test Requirements for Military Systems and Equipment.

2.2.7.3(c) Sanger, K.B., "Certification Testing Methodology Structures", Naval Air Development Center Report NADC-86132-60 on Federal Aviation Administration Report DOT/FAA/CT-36/38, Jan 1986, p. 38.

2.2.8(a) Hedrick, I.G., and Whiteside, J.B., "Effects of Environment on Advanced Composite Structures," AIAA Conference on Aircraft Composites: Emerging Methodology for Structural Assurance, San Diego, CA, 1977.

2.2.8(b) Schneider, P.J., Conduction Heat Transfer, Addison-Wesley, 1955.

2.2.8(c) Whiteside, J.B., et al., " Environmental Sensitivity of Advanced Composites," Vol.I Environmental Definition, AFWAL-TR-80-3076.

2.2.8(d) Whitehead, R.S. and Kinslow, R.W., "Composite Wing/Fuselage Program," Vol. IV Test Results and Qualification Recommendations, AFWAL-TR-88-3098. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 2 Guidelines for Property Testing of Composites 2-93

2.2.8.1(a) Garrett, R.A., Bohlmann, R.E., and Derby, E.A., "Analysis and Test of Graphite/ Epoxy Sandwich Panels Subjected to Internal Pressures Resulting From Absorbed Moisture," Advanced Composite Material Environmental Effects Symposium, Sept. 1977.

2.2.8.1(b) Ashford, L.W., "Analysis and Test of Carbon/Bismaleimide Laminates Subjected to Internal Pressures Resulting From Trapped Moisture," Proceedings of the 18th International SAMPE Technical Conference, Oct. 1986.

2.2.8.1(c) Kim, H.J., Bohlmann, R.E., "Thermal Shock Testing of Wet Thermoplastic Laminates," Proceedings of the 37th International SAMPE Symposium, March 1992.

2.2.12 (a) ASTM Guide E 1485, "Development of Material and Chemical Property Database Descriptions, " ASTM Annual Book of Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.12 (b) ASTM Guide E 1309, "Identification of Composite Materials in Computerized Material Property Databases", ASTM Annual Book of Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.12(c) ASTM Guide E 1434, "Development of Standard Data Records for Computerization of Mechanical Test Data for High-Modulus Fiber-Reinforced Composite Materials," ASTM Annual Book of Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

2.2.12 (d) Composite Material Test Data Schema, Version 1.0, 2 February 1996, available from http://mil-17.udel.edu/ .

2.2.12(e) Rumble, Jr., J. R., and Smith, F.J., Database Systems in Science and Engineering,Adam Hilger, Philadelphia, 1990.

2.2.12(f) The Building of Materials Databases, ASTM Manual 19, C. H. Newton, ed., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1993.

2.3.1.1 "Standard Tests for Toughened Resin Composites, Revised Edition," NASA Reference Publication 1092 - Revised, July 1983, Available NTIS.

2.3.1.3(a) NASA Contract NAS1-11668.

2.3.1.3(b) Curliss, D. B., Carlin, D. M., and Arnett, M. S., "The Effect of Jet Fuel Absorption on Advanced Aerospace Thermoset and Thermoplastic Composites," Wright Patterson Air Force Base.

2.3.1.3(c) Corrigan, E., Thermoplastics Conference, February 1990.

2.3.1.3(d) MIL-T-5606, Hydraulic Fluid, Petroleum Base; Aircraft, Missile, and Ordnance.

2.3.1.3(e) MIL-T-5624, Turbine Fuel, Aviation, Grades JP-4, JP-5, and JP-5/JP-8 ST.

2.3.1.3(f) MIL-L-7808, Lubricating Oil, Aircraft Turbine Engine, Synthetic Base.

2.3.1.3(g) MIL-A-8243, Anti-Icing and Deicing-Defrosting Fluid.

2.3.1.3(h) MIL-S-8802, Sealing Compound, Temperature-Resistant, Integral Fuel Tanks and Fuel Cell Cavities, High Adhesion.

2.3.1.3(i) MIL-L-23699, Lubricating Oil, Aircraft Turbine Engine, Synthetic Base, NATO Code Number O-156.

2.3.1.3(j) MIL-T-83133, Turbine Fuels, Aviation, Kerosene Type, NATO F-34 (JP-8) and NATO F-35.

2.3.1.3(k) MIL-H-83282, Hydraulic Fluid, Fire Resistant, Synthetic Hydrocarbon Base, Aircraft, Metric, NATO Code Number H-537.

2.3.1.3(l) MIL-C-87252, Coolant Fluid, Hydrolytically Stable, Dielectric.

2.3.1.3(m) MIL-C-87936, Cleaning Compounds, Aircraft Exterior Surfaces, Water Dilutable.

2.3.1.3(n) P-D-680, Dry Cleaning and Degreasing Solvent.

2.3.1.3(o) TT-I-735, Isopropyl Alcohol.

2.3.1.3(p) TT-S-735, Standard Test Fluids, Hydrocarbon.

2.3.1.3(q) ASTM Specification D 740, "Methyl Ethyl Ketone," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 6.04, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. (supersedes TT-M-261).

2.3.1.3(r) ASTM Specification D 4701, "Technical Grade Methylene Chloride," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.05, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. (supersedes MIL-D-6998).

2.3.1.3(s) SAE AMS 1432, "Fluid, Deicing/Anti-icing, Runways and Taxiways, Potassium Acetate Base," SAE, Warrendale, PA. (supersedes MIL-D-83411).

2.3.1.3(t) SAE AMS 2629, "Jet Reference Fluid for Sealants," SAE, Warrendale, PA.

2.3.1.3(u) Tanimoto, E. Y., "Effects of Long Term Exposure to Fuels and Fluids on Behavior of Advanced Composite Materials,"

NASA Contract Report 165763, August 1981.

2.3.2 4(a) JANNAF CMCS Test & Inspection Panel Meeting, 23 May 1991.

2.3.2 4(b) Military Handbook 17 Filament Winding Working Group Meeting, 18 September 1991.

2.3.7 Tomblin, John S., Ng, Yeow C., and Raju, K. Suresh, " Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems" DOT/FAA/AR-00/47, April, 2001.

2.4.2(a) Rawlinson, R.A., "The Use of Crossply and Angleply Composite Test Specimens to Generate Improved Material Property Data," Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium, April, 1991, pp. 1058-1068.

2.4.2(b) Hart-Smith, L.J., "Generation of Higher Composite Material Allowables using Improved Test Coupons," Proceedings of the 36th International SAMPE Symposium, April, 1991, pp. 1029-1044.

2.4.2(c) Wilson, D.W., Prandy, J., and Altstadt, V., "An Analytical and Experimental Evaluation of 0/90 Laminate Tests for Compression Characterization," presented at the D-30 Symposium, ASTM Spring Meeting, Pittsburgh, PA, 1992.

2.4.2(d) "Standardization of Test Methods for Laminated Composites," Materials Sciences Corporation Technical Progress Report, MSC TPR 3244/1706-002, AMTL Contract No. DML04-89-C-0023, July, 1992.

2.4.2.1 Farley, G.L., Smith, B.T., and Maiden, J., "Compression Response of Thick Layer Composite Laminates with Through-the-Thickness Reinforcement," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 11, July 1992, pp. 787-810.

2.4.2.3 Chatterjee, S.N., Wung, E.C.J., Ramnath, V., and Yen, C.F., "Composite Specimen Design Analysis - Volume 1: Analytical Studies," Technical Report AMTL TR 91-5, prepared by Materials Sciences Corporation, January, 1991.

2.5.14(a) J. Rouchon, " Certification of Large Airplane Composite Structures, Recent Progress and New Trends in Compliance Philosophy", 17 ICAS Congress, Stockholm 1990

2.5.14(b) John Goodman, "Mechanics Applied to Engineering" Longmans, Green, & Co., Ltd. London, 1899

2.5.14(c) Sendeckyj, G.P. "Fitting Models to Composite Materials Fatigue Data," ASTM STP734, 1981, p.p. 245-260

2.5.14(d) Sendeckyj, G.P. "Effect of 应力 Ratio Effect on Fatigue Life of Composites" presented at 8th Annual Mechanics of Composites Review, Dayton, OH, 5-7 October, 1982, AFWAL-TR-83-4005 (April 1983) 2.5.14(e) Whitehead, R.S., Kan H.P., Cordero, R., and Saether, E. "Certification Testing

第3章　增强纤维的评定

3.1　引言

本章叙述用作表征应用于有机基复合材料增强纤维的化学、物理和力学性能的一般技术和试验方法，包括以单向的纱、纱束或纤维束，和双向织物形式的增强材料。纤维表征一般需要先进实验技术，并且实验室必须具有测定纤维性能的良好装备与经验。一般也公认，很多情况下，增强复合材料中显现的纤维性能的测定，最好用复合材料完成。3.2至3.5节推荐了评定碳纤维、玻璃纤维、有机（聚合物）纤维及其他特殊增强纤维的一般技术和试验方法。3.6节包含可用于评定纤维的试验方法实例。

大多数增强纤维经表面处理或具有在纤维生产过程中涂敷的表面处理剂（例如浸润剂），以改善操作性能和/或促进纤维-树脂粘合。表面处理影响浸渍过程中纤维的润湿性，以及使用时纤维-基体粘合的干态强度和水解稳定性。由于直接关系到复合材料性能，任何改进表面化学的处理效果一般通过复合材料本身的力学试验来度量。在纤维质量控制中浸润剂的数量和其组分的一致性是重要的，并且测量这些参数是纤维评定的一部分。

3.2　化学技术

有各式各样的化学和光谱技术以及试验方法来表征增强纤维的化学结构和化学组分。发现碳纤维的碳含量在90%-100%之间变动。一般标准和中等模量PAN（聚丙烯腈）碳纤维的碳含量是90%-95%，其剩余物质大部分是氮。当考虑在高温条件下（在260°C或500°F以上）使用含这些纤维的复合材料时，其微量组分以及微量元素可以是极其重要的。有机纤维通常包含大量的氢以及一种或多种另外的元素（例如氧、氮以及硫），这些能够通过光谱分析来鉴定。玻璃纤维含二氧化硫*，通常还含有氧化铝和氧化铁，还可能含有氧化钙、氧化钠和钾、硼、钡、钛、锆、硫以及砷的氧化物，这取决于玻璃类型。

3.2.1　元素分析

各种定量的湿式重量分析和光谱化学分析技术可以应用于分析研究纤维中组成和微量元素。可以用ASTM试验方法C 169来确定硼硅酸盐玻璃纤维的化学组分（文献3.2.1(a)）。

ASTM D 3178提供了一种适用于碳和氢分析的标准化方法，经改进以处理碳和聚合物纤维（文献3.2.1(b)）。通过在一个封闭系统中燃烧已称重量样品，经充分氧化和除去干扰物质之后，并在吸收塔中固定燃烧产物来测定碳和氢浓度，将碳和氢浓度表示为纤维的总干重量百分数。ASTM D 3174（文献3.2.1(c)）描述了可通过灰分剩余物分析测定金属杂质的有关试验。

另一方面，已有各种能够快速分析研究增强纤维中的碳、氢、氮、硅、钠、铝、钙、镁及其他元素的商用分析仪器。对于元素分析，可以采用X-射线荧光、原子吸收（AA）、火焰发射和感应耦合等离子体发射（ICAP）光谱技术。操作说明书和方法细节可由仪器制

---

* 译者注：似应为二氧化硅。

造商处得到。

因为碳和聚合物纤维中的微量金属可能对纤维氧化率有影响，所以它们是很重要的。通常将存在的金属表示为原始干纤维的百万分之几，并能够通过分析灰分残余物测定。一般用火焰发射光谱法进行半定量测定。当要求定量值时，采用原子吸收法。关于碳纤维的氧化，由于钠有催化碳氧化的可能性，因而钠通常是最受关注的。

3.2.2 滴定

可以用滴定技术来测定纤维表面上基团的潜在化学活性，例如，可通过测量 PH 值来测定在碳纤维制造或后处理过程中引入的可水解基团的相对浓度（3.6.1 节）。但是，由于低水平的表面官能度，所以滴定技术一般不用于工业碳纤维。

3.2.3 纤维结构

X-射线衍射光谱法可用于表征结晶或半结晶纤维的整体结构。结晶度和微晶取向对碳纤维和聚合物纤维的模量及其他关键性能有直接影响。

利用工业电源供应和衍射仪装置的 X-射线粉末衍射法来表征碳纤维的结构。将纤维研磨成细粉末，然后利用 CuK 辐射取得 X-射线粉末衍射图样。通常用计算机分析图样以测定下列参数：

- 平均石墨层间距：由 002 峰位。
- 平均晶体大小 L_c：由 002 峰宽。
- 平均晶体大小 L_a：由 100 峰宽。
- 平均晶格尺寸，a-轴：由 100 峰位。
- 峰面积与漫射面积之比。
- 002 峰面积比总衍射面积。
- 100 峰面积与总衍射面积。
- 100 峰面积与 002 峰面积之比。
- 结晶度指数：由已知晶化的与无定形碳的 X-射线衍射比较。

结晶体纤维状材料的 X-射线散射表明存在明锐的和漫衍射图样，这些图样表明散布的结晶相具有无定形区。结晶度指数的概念源于来自纤维的部分散射是漫射的，并因此形成所谓无定形背景的事实。因此，评价结晶度的简单方法是通过把衍射图样分离成结晶体（明锐的）和无定形（漫射的）成分而获得。结晶度指数是结晶度的相对度量，并非绝对数值结果，对于建立与纤维物理性能的关系是有用的。

广角的 X-射线光谱和红外光谱技术也已发展用于测定聚合物纤维中结晶度和分子取向。试验与结果解释要求专用设备、先进计算机模型和高技术水平的专门知识。

3.2.4 纤维表面化学

通常对纤维进行表面处理以改善纤维和树脂基体材料之间的粘合性。采用气体、等离子体、液体化学试剂或电解处理以改良纤维表面，进行表面氧化或许是改良纤维表面最普通的方法。

目前对纤维表面结构、由于表面经历不同的纤维表面处理得到的改性，以及这些改性对复合材料性能的相对重要性尚未完全了解。该问题的出现是由于涉及小表面积

（0.5-1.5 m^2/g）和极低浓度的官能团。如果由一种特定物质覆盖20%的表面，此数量仅相当于每克纤维1 μmol的化学基团。应对未经浸润剂处理的纤维进行表面表征。经溶剂脱除浸润剂后的纤维残余浸润剂会对大多数技术有干扰，而由于氧化作用和碳化产品，热解技术会改变纤维表面。

下列技术已用于表征纤维表面：

1. X-射线衍射——提供关于晶粒尺寸和取向、石墨化程度和微孔特征方面的信息。
2. 电子衍射——给出微晶取向、三维有序和石墨化程度。（因为仅穿透1 000Å，所以对于表面更好）。
3. 透射电子显微镜术（TEM）——在所有通常可用的显微技术中，该技术提供的分辨率最高。对于纤维表面的直接 TEM 分析，可用超薄切片术制备样品，通常约厚50 nm。TEM提供关于表面精细结构和显示原纤和针状微孔。
4. 扫描电子显微镜术（SEM）——给出结构和表面形态。对于测定纤维直径和识别纤维表面上形态特征（尺度、碎片、沉积物、凹点），SEM是一项有用的技术。
5. 电子自旋共振（ESR）光谱——给出微晶取向。
6. X-射线光电子能谱（XPS）或化学分析电子能谱法（ESCA）——测量原子中由低能X-射线激发的核心电子结合能。通过略微改变这些核心电子能量给出有关官能团类型和浓度的信息，来揭示表层区10-15 nm厚（最初几个原子层）的化学环境方面变化，表面敏感性是由于这些电子的深度在1-2 nm之间。

   使用 XPS 或 ESCA 可以测定碳纤维中总氧含量与总碳量之比及氧化的碳（包括羟基、醚、酯、羰基和羧基官能团）与总碳量之比。
7. 俄歇电子能谱（AES）——高能电子（1-5 keV）射向表面上产生在原子的内层能级中空位。这些空位代表已激发的离子，其可以经历去激活作用并因此产生俄歇电子。通过分析研究能量范围为0-1 keV的全部反向散射的俄歇电子的特征能量，可能获得最初30或40原子层（大约30 nm）的元素成分，有时能从分析数据获得分子的信息。
8. 离子散射能谱（ISS）——用离子作为分子探针来识别最外表面层上的元素。仅能得到原子信息，而且灵敏度取决于原子的元素。
9. 二次离子质谱（SIMS）——为了通过质量能谱进行直接分析，用受控的带有加速离子溅射过程来除去表面原子层。SIMS可用于识别表面分子和测定其浓度。
10. 红外光谱（IRS）或傅立叶转换红外光谱（FTIRS）——是一种吸收振动光谱技术，用于获得有关表面化学组分的分子信息。IRS提供关于表面分子化学组分的定性和定量信息。IR分析的质量取决于纤维组分，并直接与样品制备期间精心操作的情况相关。

    如果可以用IR显微镜直接检验纤维，对于直径在0.015-0.03 mm之间的纤维，无需制备样品。可将有机纤维压制成（高达1 000/m^2）纤维网格薄膜。
11. 激光拉曼光谱—— 一种补充IR并且应用比较简单的吸收/振动的分光技术，几乎不需要制备样品。对于直接分析，纤维可以在入射光束的路径中定向。纤维样品必须对高强度入射光是稳定的，并应不包含发荧光物质。
12. 接触角和润湿测量法——提供一种纤维表面自由能的间接测量方法，用于预测界

面相容性和与基体材料的热力学平衡。可通过直接测量接触角、物质吸收或表面速度来得到接触角与润湿测量信息。如果采用光学法，很难测量小直径纤维（<10μm）的接触角。如果已知纤维的尺寸，通过测量将纤维浸入已知表面自由能的液体时产生的力，可以用简单的力平衡来测定接触角。该试验通常采用的仪器是Wilhelmy天平（文献3.2.4(a)）。

接触角θ也可以用显微Wilhelmy技术间接测量（文献3.2.4(b)-(e)），把单根纤维部分地浸入液体中，并且测量由于液体表面张力施加于纤维上的力。接触角根据关系式$F=C\gamma_{LV}\cos\theta$确定，式中F是经浮力校正测量的力，C是纤维的周长，γ_{LV}是液体的表面张力。该结果可以用来测定纤维表面自由能和极性影响及色散分量对自由能的贡献（文献3.2.4(c)和(d)）。

13. 物理吸附和化学吸附测量法——可用惰性气体或有机分子的吸附来测量纤维表面积。为获得准确的表面积评定，重要的是表面用单层完全覆盖，已知被吸附气体占据的面积，而且在微孔里不吸收大量的气体。当用有机分子的吸附代替气体吸附时，产生另外的复杂情况，因为可能必须知道吸附的分子取向以计算表面积。吸附也可能仅在特殊的活性部位发生，如果使用溶液，溶剂分子也可能被吸附。通过氧的化学吸附和解吸测量可以测定纤维表面的化学反应性。通过吸附测量往往能容易地探测到由表面处理所引起形貌变化（例如气孔、裂纹和裂缝）。流动微量热法对直接测量吸附热是有用的技术（文献3.2.4(f)）。
14. 热解吸附测量法——通过在真空中热处理使纤维上的挥发性产物解吸附。热失重量分析（TGA）法、气相色谱（GC）法、质谱（MS）法、红外光谱（IRS）法分析，或组合高温热解GC/MS，或TGA/IRS法可用来识别由纤维表面解吸附的成分。依据纤维类型而定，在150°C以下可观察到CO、NH、CH和各种有机分子。
15. 通过滴定、库仑（电量）和射线照相技术进行官能团的化学鉴别。

3.2.5 浸润剂含量和化学组分

纤维上所含浸润剂的数值用含浸润剂纤维干重量的百分数表示，一般通过加热溶剂萃取纤维来测定：然后洗涤洁化过的纤维、干燥并称重。ASTM试验方法C 613（文献3.2.5）叙述了利用Soxhlet萃取设备的适用方法，但是使用实验室加热板与烧杯的类似萃取方法也是很普遍的。为了准确测定，关键是要选择一种能定量除去全部浸润剂而不溶解纤维的溶剂。

对于较难溶解的浸润剂，也采用热清除技术，并是最为实用的。必须预先确定时间、温度和大气环境，以确保脱除浸润剂而不严重影响纤维。为更加准确，还必须由控制试验了解浸润剂分解残余物的精确数量和纤维由于氧化作用产生的失重。SACMA推荐的试验方法SRM 14-90“碳纤维浸润剂含量的测定”说明了用于碳纤维的热解技术。

通过对用适用溶剂萃取纤维离析出来的材料进行光谱和色谱分析，可以测定浸润剂化学成分和批与批之间的化学一致性。萃取的溶剂一般使用丙酮、四氢呋喃和二氯甲烷。用液相和气相色谱法和漫射红外光谱法来分析研究或“指纹识别”萃取液的化学成分。

3.2.6 吸湿量

纤维或纺织品的吸湿量或回潮率可以用3.6.3节中所示方法测定。在应用该方法时必须

小心操作，因为可能去除水分之外的易挥发物质。如有可能，应使用未涂浸润剂的纤维进行试验。基于试件的干重，吸湿量可以用水分质量百分数来表示。

3.2.7 热稳定性和抗氧化能力

测量纤维和纤维表面对氧化作用的敏感性，用在给定时间、温度和氛围下的失重表示。这在评定准备用在曝露于高温下塑料中的碳纤维和有机纤维时是特别重要的，因为高温使复合材料长期性能下降。热失重分析法（TGA）可用来测定碳和有机纤维的热分解温度T_d，并评估挥发物、有机添加剂和无机残余物的相对量。

在ASTM D 4102中给出测定碳纤维失重的标准方法（文献3.2.7(a)）。试验方法研究了关于纤维曝露的变化，并给出类似的结果（文献3.2.7(b)）。为了使试验结果中变异性减至最小，在进行TGA分析时，关键是适当控制气体流速和流动。

3.2.8 耐化学性

此节留待以后补充。

3.3 物理技术（固有的）

应用于聚合物基复合材料中重要纤维的物理性能分成两个类别：为长丝本身所固有的（内在的），和源于长丝成为纱、纤维束或织物的结构（非本征的）而导出的。前者包括密度、直径和电阻率；后者包括支（码）数、横截面面积、捻度、织物结构和面积重量。密度和导出性能用于和复合材料产品结构和分析所需的计算。密度和支数是质量保证的有用度量。对于航天和飞机的非结构应用方面，长丝直径和电阻率是重要的。

3.3.1 长丝直径

纤维的平均直径可以通过使用配备有图像分解目镜的读数显微镜或镶嵌一组纤维的试样横断面显微照片测定。因为纤维并不总是理想的圆柱，有效直径可由纱或纤维束的总横截面积除以束中长丝的数目来计算。横截面积也可由单位长度质量与密度比值估算。对于无规律的、但具特性形状的纤维，在计算平均纤维直径时可能需要面积系数。

光学显微镜检查能够提供有关纤维直径和直径随长度变化方面的信息。光学显微镜的分辨率上限大约为十分之一微米，因此不能用光学显微镜很好表征小于一微米的形态。在3.6.4节中说明测定纤维直径的详细方法。

其他技术，如扫描电子显微镜法（SEM）在测定纤维直径和截面特性时，能提供比光学显微镜法更高的分辨率，能够观察细至5 nm的纤维表面形态。此外，通过SEM提供的大视野景深有助于定义纤维表面上的三维特性和定义纤维形貌。

3.3.2 纤维密度

3.3.2.1 概述

纤维密度不仅是纤维制造中重要的质量控制参数，对于纤维复合材料空隙含量测定也是需要的，如ASTM D 2734“增强塑料的空隙含量”中所述（文献3.3.2.1(a)）。纤维密度还可用作识别纤维的判别参数，例如：纤维密度结果能够容易地辨别E和S-2玻璃（E-玻璃

是2.54 g/cm^3（0.092 lb/in^3），S-2是2.485 g/cm^3（0.090 lb/in^3））。

通常，通过测量纤维代表性样品的体积和称重来测定密度，然后综合这些值间接地完成密度计算。用一个质量分析天平，很容易测量重量。但是测定体积，有几种方法可使用。最普遍的方法是使用简单的Archemedes（阿基米得）方法，该法就是已知密度液体的排量法。也可通过观测试验材料沉在按密度分级液体中的水平进行密度的直接测量（文献3.3.2.1(b)）。

排量技术中，对于体积测定几乎总是使用专用液体。但是，使用气体介质代替液体来测定纤维体积是有利的，其一个优点是将与液体表面张力有关的误差减到最小。通常将气体法称为氦比重瓶法，当使用气体排量法时，在室温下表现为理想气体（最好为高纯度氦）的有限数量气体，测量其压力变化来确定试验样品体积。对于测量纤维的体积和密度，氦比重瓶法是尚未认定的试验方法，然而已经证明其为可行的技术（文献3.3.2.1(c)和(d)）。将此方法用于纤维尚无试验标准或指南，但在MIL-HDBK-17试验工作组内部已编制了试验方法（见6.4.4.4.1节）。

ASTM D 3800（文献3.3.2.1(e)）专门用于得到纤维密度。此标准包括3种不同的液体排量方法：方法A与D792液体排量法极为相似（文献3.3.2.1(f)）；方法B是将将低密度的液体与高密度液体（包含纤维）慢慢地混合，直到纤维悬浮；方法C，简单地参考D 1505，是一种密度梯度法。

关于D 1505和氦比重瓶法的详细指南，参见手册本卷的6.4.4.3-6.4.4.5节。注意，6.4.4节专门涉及复合材料，但除去3.3.2.2-3.3.2.3节中下加的注解之外，讨论的方法完全适用于纤维测量。

3.3.2.2 ASTM D 3800，高模量纤维密度的标准试验方法

ASTM D 3800中采取的方法分成三个方面。除推荐的浸液仅着眼纤维外，方法A和D 792是相同的，所关注的是纤维完全湿润和避免夹裹微气泡。方法B依靠小心地将两种不同密度的液体混合（带有浸入的纤维），当纤维悬浮在混合液体中时，用液体比重计或液体比重瓶来测定液体的密度，悬浮纤维的密度等于液体的密度。方法C是D 1505，通过文献作为D 3800的一部分插入的。

在给出了对于液体排量方法（方法A）与D 792相同的仪器和方法，并指出方法B和C与D 1505有许多共同之处后，读者可参考6.4.4.2-6.4.4.5节，此处，只是讨论为纤维所特有的试验问题。

实验者需要注意避免夹裹气泡、液体吸收和与纤维浸润剂涂层有关的问题（如果有的话）。直观的感觉立即会想到很难浸润透的纤维形式——无捻粗纱，要产生有意义的数据就要求完全浸润。要密切注意长丝间区域，这在D 1505中不是严重的问题，因为纤维在插入之前可以分割及散开。因为是直接测量，与纤维样本大小不相关，浸入的许多细纤维碎片可供直接查证纤维密度差异之用。要记住，小碎片会花费数小时才沉降到其平衡密度水平，不能十分强调必须达到完全湿透。为此目的，使用高浸润、真空除气的液体会大有帮助。还要记住，纤维是溶液之外气泡成核作用的主要几何结构，如果液体未完全除气，无气泡粗纱能够迅速地形成新的气泡。

复合材料纤维的表面积与体积之比极高。对于圆柱形的形状，S.A./V=2/R，式中R是半径，仅为几微米。对于7 μm（0.028 mil）的纤维，此比值为143 000:1。因此，确保纤维和

液体之间的相容性非常重要。玻璃纤维和聚乙烯纤维在这方面完全不受影响；然而像芳纶肯定会受影响。液体浸渍时间应保持在最低限度以避免液体扩散进入纤维中。

经常认为这类问题是由纤维独自造成的，事实上通常是因给纤维涂了界面浸润剂（为改善与基体树脂粘接）。切实可行的是研究浸润剂，因为它是一种与纤维完全不同的材料（具有不同的吸收和化学特性）。因为浸润剂用于纤维的外表面，即使很薄的涂层也会迅速地变得很重要。例如：具有通常1%（重量）浸润剂涂层（假定密度为1.2 g/cm^3（0.043 lb/in^3））的7 μm（0.028 mil）直径碳纤维，给出的最终产品具有98.5%纤维和1.5%浸润剂（按体积）。为了精确操作，在测量纤维密度之前要除去浸润剂。

3.3.2.3 对6.6.4.4.1节的推荐方法修改（氦比重瓶法），用于测量纤维密度

通常，氦比重瓶法似乎更适用于纤维体积/密度的测量（尽管这还有待于严格试验），这主要是由于惰性气体介质回避了纤维湿润透的问题，而在使用液体浸渍法时这是受关注的问题。对6.6.4.4.1节中方法推荐的修改为：

- 制备纤维样品，将纤维切割至试样池的高度，将其竖起放以获得最好的包装；
- 填充试样池到至少为其全容量的30%；
- 以与浸没试验同样的方法预处理纤维；
- 按照步骤2中说明。

3.3.2.4 MIL-HDBK-17数据提交的密度试验方法

由下列方法产生的数据目前可被 MIL-HDBK-17 接受，并可考虑收入第二卷中。

表3.3.2.4 用于提交MIL-HDBK-17数据用的纤维密度试验方法

性 能	符 号	正式批准、临时和筛选用数据	仅供筛选用数据
密 度	ρ	D 3800A，D3800C，D 1505，3.3.2.3*	D 3800B**

*当用此方法产生用于随后确定复合材料空隙体积的数据时，试验样品必须占据试样池容积的 30%。

**由于精度限制，不推荐来自此方法的数据用于确定复合材料空隙体积。

3.3.3 电阻率

凡在需要之处，建议将电阻率的测定作为核对工艺温度和用以确定符合特定电阻规范的控制措施。电阻率是一个受碳纤维结构各向异性影响显著的性能。可对单根长丝或纱进行测量。当在欧姆表或类似仪表上读数时，测定值为每给定纤维长度的电阻。接触电阻可通过获得两种不同纤维长度的电阻并计算由于较长的长度引起的差值来消除。此差值则转换为单位长度电阻值，然后乘以用一致的单位表示的纤维或纱束的面积。电阻率表示为Ω-cm，Ω-m 或Ω-in，并且指的是沿轴线方向的值，很少报道横向电阻率。测定碳纤维布或碳纤维毡电阻的方法在 3.6.5 节中说明。

3.3.4 热膨胀系数

尽管在实验室之间进行这些测量确实存在良好的相符性，但通常没有测量纤维热膨胀系数（CTE）的标准方法。CTE是与方向相关的，受纤维各向异性的强烈影响。碳纤维通常具有负的轴向CTE和略正的横向CTE。能够直接或改进后使用商用仪器（如DuPont 943型热机械分析仪或等效设备）来测量轴向的CTE。

纤维的CTE也可由单向纤维增强复合材料测得值导出。激光干涉测量法和膨胀测量法是最常用的技术。包括一些应用于未浸渍纤维的其他技术也已获得满意的结果。当试验复

合材料时，可以使单向纤维平行或垂直定向于测量方向，来获得轴向或横向的CTE。要进行分析，必须已知纤维的模量、基体的模量和CTE和纤维载荷。为了核对结果，最好是用不同纤维载荷对复合材料进行测量。

3.3.5 导热性

纤维的导热性一般由单向增强复合材料轴向导热性的测量值分析确定，但已经对纤维束和单根长丝进行了一些测量，这些测试值与根据复合材料测量确定的值很一致（文献3.3.5(a)）。两种类型测量均要求操作者的娴熟技巧和先进设备，或许最好是交给热物理实验室进行。对各类碳纤维，已经建立了轴向导热性和轴向导电性（或电阻率）之间意义明确的关系。因为电阻率是比较容易测量的，导热性的合理估算可由电阻率测量值得到（文献3.3.5(b)）。可用脉冲激光技术测量热扩散率来确定薄复合材料的横向导热性。如果已知纤维的比热容，则能计算导热率。

3.3.6 比热容

此性能用如ASTM D 2766所述的量热计测量（文献3.3.6），这也不是一个简单的测量，而最好交给有经验的实验室处理。

3.3.7 热转变温度

可用差示扫描量热法（DSC）、差示热分析（DTA）或热机械分析（TMA）测试设备测量玻璃化转变温度T_g，如果纤维是半晶体的，还可应用于测量晶体熔化温度T_m。在ASTM标准D 3417和D 3418中给出了测量有机纤维T_g和T_m的一般方法（文献3.3.7(a)与(b)）。

3.4 物理技术（非固有的）

3.4.1 纱、纤维束或无捻粗纱的支数

支数一般表示为单位重量的长度如每磅的码数，或其倒数线密度表示为单位长度的重量。后者通常是测定值，通过在空气中准确地称量精确长度的纱、纤维束和无捻粗纱重量测定。

3.4.2 纱或纤维束的横截面积

该性能与其说是测量的，倒不如说是计算出的。但是，在随后预浸料和复合材料的纤维加入量计算，以及在其他物理和热物理性能计算中，该性能是非常有用的，常常用它作为纤维制造的质量保证标准。横截面积通过线密度（单位长度重量）除以体积密度（单位体积重量）来得到，使用统一的单位。应注意到该值仅包括纤维束内全部单丝横截面积的累计总数。横截面积不受长丝间的任何间隙影响，也与任何基于纱或纤维束“直径”的计算无关。

3.4.3 纱的捻度

捻度定义为纱或其他纺织纱束中单位长度绕轴捻回的圈数。捻度有时是为改善操作性能所需要的，而在另外的一些场合中，因为其限制纱或纤维束散布所以是不合需要的。可

以按照ASTM D 1423所述的直接方法进行测量（文献3.4.3）。

3.4.4 织物结构

织物的性能，如可操作性、铺覆性、物理稳定性、厚度和纤维性能转化成织物的有效度等，全部取决于织物结构。对此文件来说，按照使用的纤维（按类型和长丝支数）、织物类型如“平纹”或“缎纹”、和按经纱或纬纱方向织物每英寸的纱数来定义织物结构。用于航空和航天应用的碳纤维织物，最普遍采用的织物类型是平纹、四经破缎纹、5综缎纹和8综缎纹。对于给定的纱，从平纹组织到8综缎纹组织，织物的物理稳定性逐步降低和铺覆性依次提高。为了保持满意的稳定性水平，朝着8-综缎纹组织织物的方向每英寸必须依次增加更多的纱，因此重量最轻的织物属平纹组织类型。有许多用于纺织工业中与结构有关试验，这些已超出了此文件的范围。结构测量的主要标准是测定棉纱支数（ASTM D 3775）、长度（ASTM D 3773）、宽度（ASTM D 3774）和重量（ASTM D 3776）（文献3.4.4(a)-(d)）。第三卷2.5.1节中提供了关于织物的补充信息。

3.4.5 织物面密度

尽管此性能与前述的纱支数有关，织物面密度本身对复合材料结构和分析的计算是有用的。织物面密度表示为单位面积织物的重量。在给定纤维体积装入量条件下，织物面密度与纤维密度控制了浸渍织物固化后的单层厚度。它要按照ASTM D 3776中所述的方法来测量（文献3.4.4(d)）。

3.5 纤维的力学试验

3.5.1 拉伸性能

重要的是注意在试件破坏时纤维应力与试验相关，如表 3.5.1 表明以长丝、浸渍的纤维束和单向层压板试验的典型碳纤维在断裂时纤维拉伸应力的差别。这些数据反映一个事实，即复合材料拉伸强度取决于包括界面特性以及纤维与基体性能等许多因素。这些数据强调需要规定纤维试验的对象，因此对于验收试验，推荐采用代表复合材料行为的材料形式测量纤维强度。对于碳纤维，推荐做浸渍纤维束试验；对于硼纤维，推荐做单丝试验。

表3.5.1 试验方法对所测的拉伸强度的影响

试 验	测得的纤维拉伸强度名义值			
	典型的碳纤维 标准模量		典型的碳纤维 中等模量	
	MPa	ksi	MPa	ksi
长 丝	4100	595	5380	780
纤维束	4000	580	5450	790
层压板	3830	555	4590	665

3.5.1.1 长丝拉伸试验

单丝拉伸性能可使用ASTM D 3379“高模量单丝材料的拉伸强度和杨氏模量”进行测定（文献3.5.1.1），该方法概述如下：

从待试验材料中随机选择单丝。长丝中心线安装于专门开缝的加强片上。在恒速移动的十字头试验机的夹紧装置中夹紧加强片，以使测试样品是沿轴线方向对正的，然后加载至断裂。

对于该试验方法，用面积仪对显示在高倍放大显微照相机上典型数量的长丝横截面测定其面积。也可使用面积测定的替换方法，如光学测量仪器、图像分解显微镜、线性重量密度方法等。

拉伸强度和杨氏模量由载荷伸长记录和截面积测量进行计算。试样如图3.5.1.1所示。

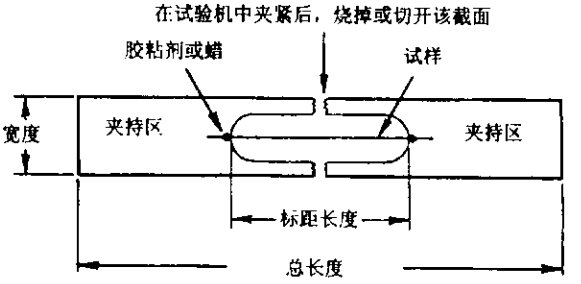


图 3.5.1.1　典型的试样安装方法（文献 3.5.1.1）

3.5.1.2　纤维束拉伸试验

对碳和石墨纤维，推荐使用ASTM D 4018“碳和石墨纱、纱束、无捻粗纱和纤维束（文献3.5.1.2）的连续长丝拉伸性能”或其等效方法，该方法概述如下：

对树脂浸渍的纱、纱束、无捻粗纱或纤维束拉伸加载至断裂测定其性能。浸渍树脂旨在提供固化后的纱、纱束、无捻粗纱或纤维束具有足够的机械强度，这样可产生能够保持试件中单丝的均匀载荷的刚性试验样品。为使浸渍树脂对拉伸性能的影响减至最低，应遵守以下要求：

- 树脂应与纤维相容；
- 固化后试样中树脂的数量（树脂含量）应是产生有用试验试件所需的最低量；
- 纱、纱束、无捻粗纱或纤维束的单丝应是很好准直的；
- 树脂的应变能力应显著地高于长丝的应变能力。

ASTM D 4018方法I中的试验样品要求特殊的浇注树脂端加强片和夹具设计（图3.5.1.2(a)和(b)），以防止高载下试样在夹具中滑动。只要试验样品在试验机中心线上保持轴向对准，并且高载下试样没有在夹具中滑动，用端部加强片安装试样的替代方法是可接受的。

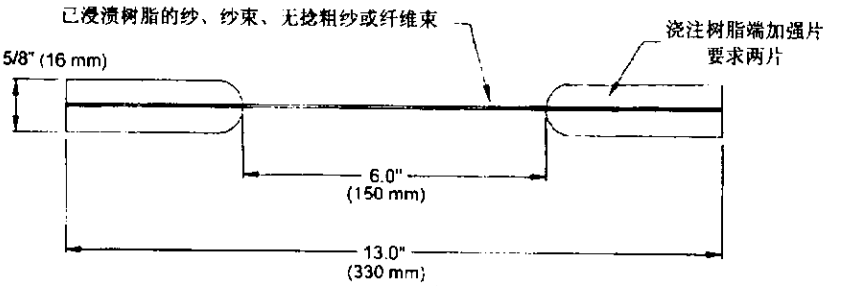


图 3.5.1.2(a)　带浇注树脂加强片的试验试样（文献 3.5.1.2）

方法II中的试验样品不要求特殊的夹紧机制。标准橡胶-贴面的夹紧装置应满足要求。

3.5.1.3 用单向层压板试验测定的纤维性能

一般最有代表性的复合材料性能测量方法，是将纤维和树脂结合为固化的层压板进行试验。重要的是了解层压板性能是既随纤维又随树脂而变的。表3.5.1.3表明测量的力学性能与不同的改性环氧树脂的依赖关系。要考虑的另一个因素是层压板的纤维体积含量。对碳纤维层压板，已经发现55%至65%的纤维体积含量，可以得到归一化纤维性能的一致测量。因为目标是确定纤维性能，数据必须归一化为100%纤维体积含量。这可简单地按下列公式进行：

$$性能(100\%) = \frac{性能 \times 100}{纤维体积含量} \qquad 3.5.1.3$$

层压板试验应按ASTM D 3039实施（文献3.5.1.3）。层压板力学试验在6.6节中进一步讨论。

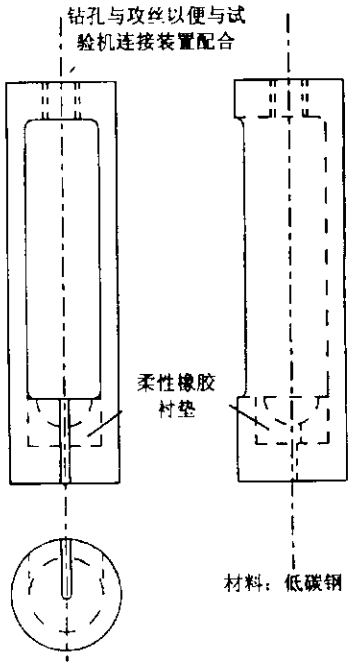


图 3.5.1.2(b) 高载拉伸试样的夹具

（文献 3.5.1.2）

3.5.2 长丝压缩试验

可以用动态回弹试验测量单丝的压缩强度。当前这试验方法正在研制中并不普遍采用。

表3.5.1.3 树脂对层压板性能的影响

纤维	树脂	拉伸强度		拉伸模量	
		(MPa)	(ksi)	(GPa)	(ksi)
AS4	A	3 630	527	221	32.1
AS4	B	3 450	500	225	32.7
AS4	C	3 000	435	223	32.4
AS4	D	2 980	432	220	31.9

拉伸强度与模量数据归一化至 100%纤维体积含量

3.6 试验方法

3.6.1 pH 值的测定

（文献3.6.1）

3.6.1.1 范围

该方法叙述了用pH计测定碳和石墨纤维以及织物的pH值的程序。应该用不含浸润剂的纤维进行测量。由于在商品纤维上有少量的表面官能度，所以这些测量需要极端小心。

3.6.1.2 仪器

该方法需要的仪器如下：

- pH计最好配备有玻璃及甘汞电极或单个复合电极，其准确度应为±0.005 pH值，并

符合ASTM E-70“用玻璃电极测定水溶液pH值的方法”中的要求。

- 带有盖玻璃、100 ml容量的无唇烧杯。
- 加热板。
- 剪切试样的剪切机。
- 煮沸蒸馏水用1-2 L容积的大耐热玻璃烧瓶。在25°C（77°F）条件下，水的pH值应该在6.9-7.1之间。如果通过煮沸不可能符合此范围，可以用极稀的NaOH或HCl调节pH值。

3.6.1.3 步骤

- 通过剪成小的正方形12.7-19.0 mm（0.5-0.75 in）制成足够3.0 g的布样品。通过将样品切成12.7-19.0 mm（0.5-0.75 in）的长度制备纱样。
- 3 g的样品加30 ml煮沸的蒸馏水，覆盖一片表玻璃并非常缓和地煮沸15 min。用Berzelius或无唇的烧杯防止水的过量损耗。大约过15 min后，应剩余4或5 ml浆液。
- 将带盖的烧杯置于冷水盘中并冷却至室温。烧杯一直盖盖，以防止吸收可能存在于房间内的化学烟雾。冷却后去掉盖玻璃，但不要冲洗。
- 当试验准备工作全部就绪时，用可靠的缓冲剂将pH计标准化。在烧杯中放置缓冲剂，将电极浸入并精确校准pH计至相同值。应选择与待试验样品具有同样范围pH值的缓冲剂。缓冲剂与样品的温度应相同，差别不超过±1°。
- 校准pH计后，从缓冲剂中取出电极，用蒸馏水彻底地冲洗并用清洁的吸收棉纸擦干。
- 将电极放在浆液中并慢慢地交替方向旋转烧杯，直至得到恒定的pH值。

3.6.2 碳纤维上浸润剂数量的测定

3.6.2.1 范围

本方法说明测定碳纤维上浸润剂的步骤，表示为纱的质量分数。

3.6.2.2 仪器

该方法需要的仪器如下：

- 分析天平——Mettler B5-H26型。科学产品目录No.B1253号或相当产品；
- Scheibler干燥器——包括Coors干燥器板，内径为250 mm，科学产品目录No. D1450-5号或相当产品；
- Coors坩埚——40 ml容量，外沿直径47 mm，40 ml h.科学产品目录No. C8450-8号或相当产品；
- Thermolyne马弗炉——型号No.F-A1730，最高温度1 093°C（2 000°F），炉膛尺寸：241 mm（宽）×216 mm（高）×343 mm（深）（9.5 in×8.5 in×13.5 in）或相当产品；
- 不锈钢烧盆——（16规格）。尺寸：229 mm（宽）×76 mm（高）×254 mm（深）（9 in×3 in×10 in），具有密配合的不锈钢盖，盖的全部边有12.7 mm（0.5 in）抓边。烧盆必须具有与其相连的3.2 mm（1/8 in）不锈钢管以便氮气净化。内部制造的。

3.6.2.3 材料

本方法需要的材料如下：

- 燥石膏（无水硫酸钙）或相当产品——指明和未指明晶状的；
- 氮气——标准纯度。

3.6.2.4 步骤

1. 将大约1.5 g（0.003 lb.）纱样品缠绕成一个小的25-40 mm（0.98-1.57 in）直径线圈并将线圈放在干燥器中2h；
2. 用清洁干燥的镊子，从干燥器中取出绕制线圈样品并称重量准确至0.1 mg。记录为W_1；
3. 从干燥器中取出一个清洁干燥的坩埚，并将绕制线圈样品放进其中。称坩埚加的纱重量并记录为W_2。注意：戴清洁干燥棉纱手套以防止坩埚吸潮；
4. 将坩埚加样品放在烧盆中并将其盖上盖。建议在距烧盆底部19.0 mm（0.75 in）处放一个有12个44.4 mm（1.75 in）直径孔的不锈钢架子，以防止坩埚翻倒；
5. 以7.5 S.C.F.H.（标准ft^3/h）的速率，用氮气净化烧盆至少45 min；
6. 在系统净化时，将马弗炉的温度控制设定为450°C（842°F）并开动；
7. 当净化时间完结和炉的温度已达到时，把烧盆放置在炉中并加热1 h。注意：为了安全起见，当向热马弗炉中放入或取出烧盆时，戴保护的石棉手套或相当物品。此试验的整个加热和冷却阶段持续用N_2净化；
8. 加热1 h后，从炉中取出烧盆并放置在有保护的冷却区域中；
9. 从烧盆中取出坩埚并放于干燥器中冷却至室温；
10. 冷却后，称坩埚加样品的重量并记录为W_3。

3.6.2.5 计算

通过测定重量损失百分率计算浸润剂的量，如下式：

$$浸润剂含量=\frac{W_2-W_3}{W_1}\times 100 \qquad 3.6.2.5$$

3.6.2.6 再次使用坩埚的准备

在坩埚再次使用之前，将坩埚放在马弗炉里，并在空气中 700°C（1 292°F）条件下至少 2 h，烧尽所有残余物。将坩埚从炉中取出后冷却到室温，用清洁压缩空气吹净。将清洁坩埚存入干燥器中。

3.6.3 吸湿量或回潮率测定

3.6.3.1 范围

本方法可用于测定纺织品中水分的含量，按纺织材料有关术语中的定义（ASTM D 123，文献3.6.3.1），可以在接收时或者在进行试验的标准大气环境中处于平衡吸湿量时对纺织品测定。

3.6.3.2 仪器

该方法需要的仪器如下：

- 玻璃称量瓶，容量大约100 ml，配备毛玻璃盖，或带一个紧配合盖的铝称重小罐，

容量大约100 ml；

- 干燥器，含无水氯化钙（$CaCl_2$）或其他适用的干燥剂；
- 化学天平、能称重至0.5 mg；
- 烘箱，保持105-110°C（221-230°F）。注意，也可以使用用于纺织品实验室的一般干燥试样至恒重的专用设备（调温箱等）。这里提到的仪器和在3.6.3.4节中说明的步骤是为没有这种专用设备的实验室提供的。

3.6.3.3 试样制备

切割试验用样品，大约需要 2 g。取布样品时使用 Alfred Sutler 公司切样器或相当设备，用切样器切割略大于 50 mm（2 in）直径的圆盘。四个圆盘通常重约 2 g。取纱样品时，使样品形成小的线圈，一端系紧来固定就位。

3.6.3.4 步骤

- 在 105-110°C（221-230°F）下将玻璃称量瓶干燥至恒重。将称量瓶和盖分别放入烘箱中。加热 1 h 后，将盖盖上，将称量瓶移至干燥器中并令其冷却至室温。短暂地取走盖以均衡压力，盖着盖称重容器。反复加热、冷却和称重，直至空称量瓶的重量差别在±0.001 g 范围之内。
- 将待试验试样放在容器中，加盖并称重。用此重量减去空容器的重量(1)以得到试样在空气下的干重，重量 A。
- 将揭开盖子的称量瓶和试样放在烘箱中，在 105-110°C（221-230°F）的温度下烘 1.5 h。盖上盖将容器移至干燥器中。当容器冷却至室温时，短暂地取走盖以调整压力，盖回盖，并称重。反复加热不少于 20 min 的周期，冷却并称重直至重量差别在±0.001 g 范围之内。用此重量减去空容器的重量以得到试样的烘干重量，重量 B。当纺织品在所述条件下加热时，除水分之外还可能除去易挥发材料。如果已知该可能性或有疑问的，应报告纺织品重量损失百分数，或可以包括挥发物及水分。

3.6.3.5 计算

按下列公式计算试件的吸湿量：

$$吸湿量,\% = \frac{A-B}{A} \times 100 \qquad 3.6.3.5(a)$$

按下列公式计算试样的回潮率：

$$回潮率,\% = \frac{A-B}{A} \times 100 \qquad 3.6.3.5(b)$$

式中：A=试样的空气干重量

B=试样的烘干重量

3.6.4 纤维直径的测定

3.6.4.1 说明与应用

本方法说明用配备图像分解目镜的显微镜测定纤维平均直径的步骤。该仪器测量放在玻璃载片上物件的横切距离，因此，只有当纤维实质上是真实的圆柱时，这才是有效的直

径测量。因为不同类型的纤维具有特征的形状，对于不规则形状的纤维有可能使用这种方法，其办法是用显微照相术来测定待测量的特定类型纤维的面积系数。

图3.6.4.1是表示仪器中光学系统示意图。在图像分解器中，在显微镜物镜和目镜之间插入棱镜系统以产生显微镜视场的双重图象。此棱镜系统通过测微螺旋可精确旋转，依据棱镜的转动在视野范围内物体的双重图象彼此横交。通过读出测微计所需的棱镜旋转的量完成测量，棱镜旋转量是按要求测量的轴向，将物体的双重图象精确地置于边到边所需的量。在物体的平面中完成测量。

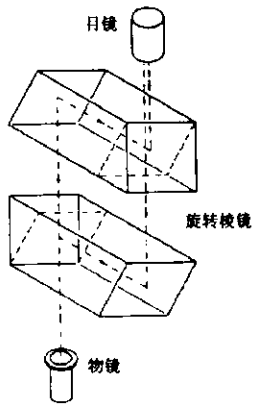


图 3.6.4.1　影像分解显微镜的光学

表 3.6.4.1 中给出了各种常规显微镜物镜可获得的精度和尺寸限制。

表3.6.4.1　精度和尺寸限制

物镜放大倍数		读数精度		可以完全地剪切出的物体最大尺寸	
5×	(N.A.0.15)	2.0 μm	0.00008 in	1.0 mm	0.04 in
10×	(N.A.0.28)	1.0 μm	0.00004 in	0.5 mm	0.02 in
20×	(N.A.0.50)	0.6 μm	0.000026 in	0.25 mm	0.01 in
40×	(N.A.0.65)	0.32 μm	0.0000128 in	0.12 mm	0.005 in

3.6.4.2　仪器

该方法需要的仪器如下：

- Unitron显微镜，单目的MLU型，配有5×，10×，20×和40×目镜，配备Vickers AEI 10×图像分解目镜，或等效品；
- 显微镜灯，A.O.Spencer，Fisher目录#-12-394或等效物；
- 玻璃显微镜载片（例如，Fisher目录No.12-550）；
- 切割样品用利刀或剃刀片。

3.6.4.3　校准

按仪器带的说明书显微镜进行组装和校准，如果由于任何原因，需使用不同的目镜或物镜，对新的零件仪器必须再校准。

3.6.4.4　制备载片

从样品中选择代表性的纱束并排列成平齐的纤维束，把纤维束放在备用的玻璃载片上并用手指使其就位。用锐利工具切割纱束以保证端头平滑齐平。把纱束放在干净玻璃载片上，使得齐平端头靠近载片的一边。(见图3.6.4.4)切割纱束，得到大约0.5 mm (0.19 in) 的片段。这些片段将按均匀图样以细粉末状撒在载片表面上。

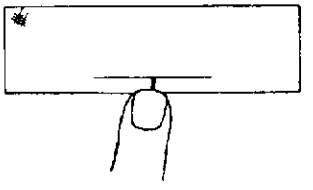


图 3.6.4.4　放置纱束于清洁载片上，使齐平端头靠近载片的一边

3.6.4.5　测量步骤

- 放置载片在显微镜下，并随机地选择单根纤维。纤维将出现为平行的红和绿色线。

- 旋转图像分解器直至纤维平行于测微计转筒的轴，并且两个图像端头是齐平的。
- 清晰聚焦。旋转测微计直到红和绿色图象重叠形成单根黑线。继续旋转直到红和绿色线再次分离，并且在两色线之间显示光线带。反向旋转和慢慢地使得彩色图像一同后退直到它们刚好接触，应该看到的既不是细亮线也不是黑线，记录测微计读数。假如要转动测微计太远以致于黑色线出现逆转并再开始。这将消除机构中间隙的影响。
- 继续旋转测微计直至图像完全地重叠和在对边上正好要分离。非常慢转动测微计直至粗黑线完全消失，在这一点，红和绿色影象应该刚好接触，中间没有光线，记录该测微计读数。在两个读数之间差等于两倍测量物体的宽度。
- 选择其他的纤维继续测量直至测量完20个片段。均匀移动载片以消除两次测量同一片段的可能性。

3.6.4.6 计算

列出在第5条中20次测量取得的测微计读数所有差值。该数除以2，然后将结果乘以显微镜校准因子来获得直径测量值，以微米表示。计算20次测量值的平均值。

若上述计算的直径测量值用于计算强度测定值的横截面积，则见3.6.4.1节。例如，Thornel 25纤维的面积可以计算如下：用按此方法测定的平均直径计算面积，把它乘以面积系数得到实际面积。（对Thornel 25，已经测定的面积系数为0.66。）

3.6.5 电阻率的测定

3.6.5.1 范围

此方法说明测定碳与石墨布及毡电阻的步骤。此方法用作核对工艺温度和确定材料与特定电阻率规范符合性的控制手段。

3.6.5.2 仪器

该步骤需要如下设备：

- 夹紧布的夹具；
- 真空管伏-欧计。Triplet #850或等效仪表；
- 剪刀或其他切割样品的工具。

3.6.5.3 样品制备

对布，从每卷待试验布取出45.7 cm（1/2 yd）长、全幅宽的片段，从中切取5条经向和5条纬向的布条，每条3.2 cm（1.25 in）宽，27.9-30.5 cm（11-12 in）长，布条位置要分布在布样品的整个面上，拆开每个布条到最接近25.4 mm（1 in）宽的那根线。对于毡样品，从每卷待试验毡取得45.7 cm（1/2 yd）长、全幅宽的片。使用一个25 mm×305 mm（1×12 in）金属模板，按“经向”切割5条并按“纬向”切割5条，布条位置要分布在毡样品的整个面上。

3.6.5.4 步骤

- 调节电阻夹具的银钳口以提供254 mm（10 in）的试验长度；
- 在夹具中夹紧样品并测量电阻。

3.6.5.5 计算

观测的电阻除以10以得到Ω/□值（见3.6.5.7节)。测定5根布条的平均电阻并按每英寸宽度欧姆值记录在数据单上。

3.6.5.6 校准和维护

对织物和毡的测量用真空管伏欧计。应该用NBS（国家标准局）标定的标准电阻箱每六个月校准一次伏欧计和夹具。任何需要伏欧计维护的事件（更换管子等）后，都应再校准，不考虑六个月例行的校验期。

每次换挡使用伏欧计时，应核对零点与满刻度的调整。如果伏欧计未能适当地调零和满刻度，必须由电气维修部门检查。调零点是对导线和仪表电阻误差的补偿。

3.6.5.7 计量单位的定义

对布和毡的电阻测量用每正方形（单位面积）的欧姆值表示，它与块状碳测得的电阻率不同。当考虑给定的等级时，织物电阻值与电阻率成正比。例如：相同的材料在石墨化之后，碳布具有比石墨布更高的电阻。

正方形（单位面积）的尺寸不影响布或毡的电阻值。这可用在固体矩形样品的电阻和电阻率之间关系的标准方程式证明。

$$P=\frac{RTW}{L} \text{或} R=\frac{PL}{TW} \qquad 3.6.5.7(a)$$

式中：P=电阻率

R=样品电阻

L=样品长度

T=样品厚度

W=样品宽度

对于具有等同的电阻率（P）的材料，如铜，给定厚度的一平方英寸的电阻将是：

$$R=\frac{PL}{TW}=\frac{P}{T}\frac{1}{1} \qquad 3.6.5.7(b)$$

因为 T 和 P 是常数，一平方英寸的电阻可写成：

$$R=K\frac{L}{W}=K\frac{1}{1}=K \qquad 3.6.5.7(c)$$

如果正方形是两倍大的（2×2），正方形的电阻将保持不变。

$$R=K\frac{L}{W}=K\frac{2}{2}=K \qquad 3.6.5.7(d)$$

因此，织物的电阻报告为Ω/□。用户对正方形可选用任何单位，英寸、厘米、英尺或码。

参考文献

3.2.1(a) ASTM C 169, "Chemical Analysis of Soda Lime and Borosilicate Glass," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 15.02, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.2.1(b) ASTM D 3178, "Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Coal and Coke," 1984 ASTM Book of Standards, 5.05, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.2.1(c) ASTM D 3174, "Ash in the Analysis Sample of Coal and Coke from Coal," 1984 ASTM Book of Standards, 5.05, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.2.4(a) Adamson, A.W., Physical Chemistry of Surfaces, Wiley, New York, 1980, p. 344.

3.2.4(b) Hammer, G.E. and Drzal, L.T., "Graphite Fiber Surface Analysis by X-ray Photoelectron Spectroscopy and Polar/Dispersive Free Energy Analysis," Applications of Surface Science, Vol 4, 1980, p. 340.

3.2.4(c) Dynes, P.J. and Kaeble, D.H., "Surface Energy Analysis of Carbon Fibers and Films," J. Adhesion, Vol 6, 1974, p. 195.

3.2.4(d) Kaeble, D.H., "Surface Energy Analysis of Treated Graphite Fibers," J. Adhesion, Vol 6, 1974, p. 239.

3.2.4(e) Drzal, L.T., Mescher, J.A., and Hall, D.L., "The Surface Composition and Energetics of Type HM Graphite Fibers," Carbon, Vol 17, 1979, p. 375.

3.2.4(f) Rand, B. and Robinson, R., "A Preliminary Investigation of PAN Based Carbon Fiber Surfaces by Flow Microcalorimetry," Carbon, Vol 15, 1977, p. 311.

3.2.5 ASTM C 613-67, "Resin Content of Carbon and Graphite Prepregs by Solvent Extraction," 1988 ASTM Book of Standards, Vol 15.03, ASTM, Philadelphia, PA, 1988.

3.2.7(a) ASTM D 4102-82, "Thermal Oxidative Resistance of Carbon Fibers," 1988 ASTM Book of Standards, Vol 15.03, ASTM, Philadelphia, PA, 1988.

3.2.7(b) Eckstein, B.H., "Weight Loss of Carbon Fibers in Air," 18th International SAMPE Technical Conference, 1986.

3.3.2 ASTM D 3800-79, "Density of High Modulus Fibers," 1988 ASTM Book of Standards, Vol 15.03, ASTM, Philadelphia, PA, 1988.

3.3.2.1(a) ASTM D 2734, "Standard Test Method for Void Content of Reinforced Plastics," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

3.3.2.1(b) ASTM D 1505, "Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

3.3.2.1(c) Ghiorse, S.R., data presented to MIL Handbook 17 Testing Working Group, Santa Fe, NM, March 1996.

3.3.2.1(d) Ghiorse, S.R. and Tiffany, J, "Evaluation of Gas Pycnometry as a Density Measurement Method," Proceedings of the 34th MIL-HDBK-17 PMC Coordination Group, Schaumberg, IL, September 1996.

3.3.2.1(e) ASTM D 3800, "Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 3 Evaluation of Reinforcement Fibers

3.3.2.1(f) ASTM D 792, "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

3.3.5(a) Piraux, L., Nysten, B., Haquenne, A., and Issi, J.P., "Temperature Variation of the Thermal Conductivity of Benzene-Derived Fibers:, Solid State Comm., Vol 50(8), pp. 697-700, 1984.

3.3.5(b) Kalnin, I.L., "Thermal Conductivity of High Modulus Carbon Fibers," ASTM STP 580 Composite Reliability, 1975.

3.3.6 ASTM D 2766, "Specific Heat of Liquids and Solids," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 05.02, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.3.7(a) ASTM D 3417-83, "Heats of Fusion and Crystallization of Polymers by Thermal Analysis," 1987 ASTM Book of Standards, Vol 08.03, ASTM, Philadelphia, PA, 1987.

3.3.8(b) ASTM D 3418-82, "Transition Temperatures of Polymers by Thermal Analysis," 1987 ASTM Book of Standards, Vol 08.03, ASTM, Philadelphia, PA, 1987.

3.4.3 ASTM D 1423, "Twist in Yarns by the Direct Counting Method," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.4.4(a) ASTM D 3775, "Fabric Count of Woven Fabric," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.4.4(b) ASTM D 3773, "Length of Woven Fabric," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.4.4(c) ASTM D 3774, "Width of Woven Fabric," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.4.4(d) ASTM D 3776, "Weight (Mass Per Unit Area) of Woven Fabric," 1984 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.

3.5.1.1 ASTM D 3379-75, "Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single Filament Materials," 1990 Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

3.5.1.2 ASTM D 4018-81, "Tensile Properties of Continuous Filament Carbon and Graphite Yarns, Strands, Rovings, and Tows," 1990 Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

3.5.1.3 ASTM D 3039-76, "Tensile Properties of Fiber-Resin Composites," 1990 Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, 1990.

3.6.1 "Determination of pH," Union Carbide Corp., Carbon Products Div., WC-2090, 12-6-66 3.6.3.1 ASTM D 123-86, "Terminology Relating to Textiles," 1987 ASTM Book of Standards, Vol 07.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1987.

第4章　基体表征

4.1　引言

复合材料中基体的功能是使纤维保持在要求的位置，并提供将外部载荷导入纤维的路径。因为基体材料强度通常比纤维强度低一个数量级或更多，复合材料结构内部纤维的定向要使纤维承受主要的外部载荷。虽然这种能力使复合材料大获成功，但也不能忽视基体材料的强度及其他性能。基体材料性能对复合材料将如何工作会有比较大的影响，特别对于面内压缩、面内剪切、对冲击损伤的阻抗和其他层间特性，特别是曝露于潮湿和高温条件时。

各类的聚合物树脂体系用作纤维增强复合材料的基体部分。这些体系通常分成两大类：热塑性材料和热固性材料。热塑性材料是非反应性的固体，在适当的加工温度和压力条件下，能软化、熔融和直接浸润增强纤维束，并且在冷却时硬化成所要求的形状。热固性材料是反应性的材料，由有机树脂及化学“固化”所需要的其他成分组成。在与增强纤维结合之前，热固性材料可以处于不同的形式（液体、固体、薄膜、粉末、粒料等），以未固化状态，并且可以是部分反应的。在复合材料加工期间，热固性材料不可逆地反应形成固体。除有机组分之外，热固性体系也可能含添加剂，如催化剂、填料和工艺助剂，这些可能是无机的或含金属的物质，还可能包括热塑性或弹性体的填料。尽管一些多成分的体系设计成刚好在使用之前成分混合，可能不需要冷冻贮存，但由于它们的反应特性，大多数未固化的热固性材料必须在冷冻条件下贮存。热塑性塑料和热固性材料均可用于预浸渍增强纤维以生产预浸料，而像RTM工艺（树脂传递模塑）通常更适合于热固性材料。

本章重点是试验和表征基体材料及其组分的方法，考虑化学、物理、热和力学性能，以及试验试件制备和试验试件的环境浸润，并阐明热固性（不但是固化的而且是未固化的状态）和热塑性材料的试验。

本章包括的性能主要是树脂配方设计师和材料供应商感兴趣的，复合材料最终用户也会发现一些基体性能是有用的，特别对工艺循环研究，和较小范围内初始筛选以及选材方面。若干基体性能以及试验也适用于质量保证，特别在如果供RTM或类似工艺使用的树脂与增强材料是分别购买时。

4.2　基体试件制备

4.2.1　引言

对这些固体（固化后的）状态聚合物的物理和/或力学表征，需要未增强的（纯树脂）基体材料试件。试件制备可用的方法受正研究的基体材料类型强有力控制。主要变量包括热固性的与热塑性的比较、在不同加工阶段的黏度、加工温度、逸出挥发分的数量和处于制造状态的脆性程度。在用未固化的聚合物工作时，人身安全始终是关注的事，并且应该查阅适当的材料安全数据记录表（MSDS）。

4.2.2 热固性聚合物

所考虑的热固性聚合物，即那些用作复合材料基体的材料，在固化工艺期间的某个点上一般有足够低的黏度以利流动。因此，它们可以浇注成平板形式以提供坯料，由此坯料可以机械加工精制试件；或模压成更加复杂的几何形状，必要时直接制造净尺寸试件。

当浇注作力学试验试件用的纯（未增强的）聚合物时，关键是将空隙、夹杂物和类似缺陷等在尺寸与数量上均降低到最低程度。大多数用作基体的热固性聚合物，甚至那些认为是增韧的，仍往往比较脆，因此它们的强度极限受关键缺陷尺寸强有力控制。

夹杂物可能存在于从供应者处获得的不纯树脂中，或在制造过程引入（例如，清洁不当的模具、空气污尘微粒、组分未充分混合等）。当使用脱模剂时，也必须小心避免污染聚合物。

缺陷可能以表面划痕、边缘碎片和模痕形式出现。空隙通常由夹裹固化过程初期逸出的挥发分所引起。在固化过程给聚合物加压，有可能抑制挥发分的逸出，或至少减到最少。但更常用的方法是在固化周期最初阶段（聚合物还在混合料容器中或已经在模具中）施加真空，这要在升温过程的一个或多个时间点，并是在黏度最低的时候进行，因此，真空烘箱是有用的。

真空可能引起挥发分强逸出，故要求容器或模具有足够的体积包容起泡的聚合物直至气泡破裂。如果是制造单个平板，一个简单的包括五块钢板的盒式模具，即用螺钉紧固件结合在一起的底部和四块足够高的侧面就可正常工作。该盒在固化后可以拆开，以便取出聚合物基体板，并且容易清理。单一的聚合物板条也可以用这种方式制造，把宽度与所需聚合物基体试件相同的薄钢条直立于一个长边上，间隔按所需聚合物试件厚度。

因为挥发分正在排出，应该用一个冷阱在蒸汽通过泵之前将其凝结，来保护真空泵本身。

如果正在用空腔模具制造单个的净尺寸试件，一个弹性材料的漏斗适于包容大量挥发分,随气泡破裂聚合物将向下流回模具。在剩余的固化时间，漏斗能留在原地。在清除时，漏斗能够弯曲从而易于除去其上固化的残余聚合物。

单一试件空腔模具能够用金属制造，由于钢的热膨胀较低和表面硬度较高，所以通常用钢而不是铝。这些一般是两片剖开的模具，以便固化的试件脱模。用围绕固定的模型浇注便捷制造的弹性模具，是一种有吸引力的替代品。能够沿其长度方向切开固化的模具，以把它从模型周围取走，这种切开也可使其以后被撬开，从而易于取出浇注于其中的聚合物试件。无论如何，单一试件模具通常是用细铁丝有效地绑在一起。模压试件只需很少甚至不需进一步加工就可用于试验，最多，并且主要是为了美学的需要，可能需用砂纸轻轻地把模压缝打磨掉。

如果随后不用真空除去挥发分，可以由底部填充模具以使夹裹的空气减到最少，但这会增加复杂程度，且通常并不需要。同样地，如果聚合物的黏度太高无法用重力填充的话，可采用压力迫使其进入模具。此外，无论用什么方法，通常不需要考虑用作基体材料的聚合物的复合材料加工要求。

作为制造平面纯基体板的盒式模替换物，可以在两块垂直配置平板之间浇注聚合物，用垫片保持所需浇注聚合物板厚度间隔，并环绕三个边密封，然后把聚合物注入顶部开口边，板可以是金属或玻璃。但是，该技术并不总是成功的，由于在聚合物的两个表面模具

的限制，且很难完全排气，所浇注的聚合物板会因从固化温度冷却过程热收缩的差异引起的应力，而产生裂纹。同时，聚合物比模具一般具有更高的热膨胀系数，可能收缩离开模具表面，产生斑纹表面。这些局部凹陷一般是非常浅的，并能够通过随后对浇注板表面打磨来除去。但是，热残余应变与这些表面不规则遗迹的形成有关（在偏振光下能够观察到），并且难以退火去掉，此外，夹裹的空气气泡或挥发分必须经过很长的路径才能到达自由表面，使得无空隙的聚合物板的制作更难实现。

4.2.3 热塑性聚合物

用于复合材料的热塑性聚合物一般是高加工温度（325-450°C（620-840°F））体系，必须使用更高温度模具材料。供制造纯试件用的基体聚合物倾向于以薄膜或颗粒形式供货，一般需要压力注射或压固，由于其可达到的最低黏度往往比热固性材料高而使得实施起来更复杂。在模塑热塑性塑料时，虽然因为热塑性塑料一般是完全聚合的，挥发分的逸出通常不是一个问题，但是夹裹空气可能仍是个问题。因此，在成形加工期间利用真空可能仍是合乎需要的。

这些高温热塑性塑料往往没有热固性聚合物基体材料那末脆，因此，在模塑操作期间，由于板和模具的收缩差异而引起聚合物板的裂纹的问题较少，但裂纹仍能够发生。

4.2.4 试件机械加工

对于热固性和热塑性材料，如果纯基体试件已经模压成最终形状，均不需要另外的制备。一般用于实心棒状扭转试验，有时用于拉伸与压缩试验的哑铃形圆柱试件是这种实例之一。

热固性聚合物的拉伸、压缩和 Iosipescu 剪切试件通常由平板或板条机械加工而成，而不是模压到净尺寸的。虽然商品热塑性塑料的单个扁平哑铃形试件一般是（注射）模塑至最终尺寸，但高温热塑性基体材料通常不这样做。相反地，平面矩形毛坯是模压的，并且哑铃状试件是由毛坯机械加工成的。

使用砂轮较容易加工不同的聚合物。如果要求，在从模压板切割成单个试件之前，其表面可以打磨。虽然有时使用金刚石砂轮，或甚至齿状带锯刀，一般用薄磨料刀将板切割成试片和试件毛坯，哑铃状试件则还需磨至最终尺寸。Iosipescu 剪切试件中切口同样能磨制，要使用异形砂轮和多次通过。可以把试件叠在一起进行加工，以便彼此互相支持。

虽然并不想要，但大多数聚合物基体试件可能容许研磨引起的微划痕和碎裂的边，但是某些聚合物对这些表面缺陷极其敏感。必须小心地用细（例如细至 600 粒号）金刚砂布将全部试件测量长度范围内的表面和边缘磨平。在用新的聚合基体工作时，一开始应对磨过的和表面抛光过的拉伸试件试验，以确定聚合物对表面缺陷的敏感性。因为最终抛光增加额外的人工费用，最好是仅在必要时才这样做。

4.3 浸润处理和环境曝露

用于基体材料本身（固化或压实后），与用于使用这些基体的复合材料有着非常相似的问题，第一卷的 6.3 节详细地讨论了后者。尽管如此，仍然有几个明显的差别，会对如何将 6.3 节中的信息用于未增强的基体材料产生影响，包括以下方面：

- 无增强材料，大多数基体材料是接近各向同性的。在此情况下，基于各向异性的吸湿处理限制或考虑（如由于试件通过边缘吸湿，所以对试件形状比比较关注等）不再适用；
- 未增强基体材料的传输特性（热和潮湿）与复合材料明显不同。例如，与含相同树脂体系的纤维增强复合材料相比较，未增强（“纯的”）环氧树脂兼备明显更高的扩散常数和平衡吸湿量；
- 已有用于基体材料性能的补充试验方法，一般不用于复合材料，如 4.5.7 节中讨论的基体材料吸湿量试验方法。

4.4 化学分析技术

化学表征技术列于表 4.4 中。元素分析和官能团分析提供关于化学成分的基本和定量信息。光谱分析提供关于分子结构、构造、形态和聚合物物理化学特性方面的详细信息。色谱技术将样本成分相互分离，并且因此简化组成的表征以及可能进行更准确的分析。采用光谱技术来监控通过气相或液相色谱分离的成分，能大大提高表征法，甚至能对多数微量组分提供鉴别和定量地分析研究的手段。

4.4.1 元素分析

元素分析技术如离子色谱法、原子吸收法（AA）、X-射线荧光法或发射光谱法可用于分析研究具体的元素，如硼或氟。必要时，也可用 X-射线衍射来鉴别晶体成分（如填料），和确定某些树脂结晶度的相对百分率。

4.4.2 官能团和湿法化学分析

在确定预聚物的摩尔质量时，反应性官能团的分析特别重要。为了表征单一环氧树脂成分，对特殊官能团滴定和湿法化学分析是有用的技术，但在分析研究复杂的树脂配方时，应用有限并可能提供误导结果。

4.4.3 光谱分析

对鉴别聚合物和聚合物前驱体，红外光谱法（IRS）比其他吸收或振动光谱技术可提供更多有用信息，并且多数实验室通常具备这种手段。IR 提供有关聚合物样本化学性质的定性和定量两方面信息，即结构重复单位、端基和支链单位、添加剂和杂质（文献 4.4.3(a)）。目前已有用于直接比较和鉴别未知物的普通聚合物材料光谱的计算机化数据库。计算机软件可从未知光谱中减去标准聚合物的光谱，用来估计其浓度，并或许能确定样品中是否还存在另一种聚合物。

红外（IR）光谱对分子中振动基团偶极矩的变化敏感，因此提供了鉴别树脂成分的有用信息。IR 光谱由树脂成分的溶解性提供树脂化学组成的指纹，并且不限于此（文献 4.4.3(b)-4.4.3(d)）。实际上，气体、液体和固体可以通过 IR 光谱分析研究。在技术方面的进步已导致傅立叶变换红外光谱（FTIR）的研制，这是一种快速扫描和存入的计算机辅助 IR 技术。多重扫描和红外光谱的傅立叶变换提高了信噪比和改进了光谱判读。此外，FTIR 衰减全反射（ATR）和扩散反射率技术可以应用于热固性复合材料的质量保证，来评定其

固化程度，即残余环氧化合物浓度（见 5.5.3 节）。

表4.4 化学表征的技术

元素分析	常规分析技术
	X-射线荧光法
	原子吸收法（AA）
	ICAP
	EDAX
	中子活化分析
官能团分析	常规湿法化学技术
	电位滴定法
	库仑滴定法
	射线照相法
光谱分析	红外（片、薄膜、色散、反射）、傅立叶变换IR（FTIR）、光声FTIR、内反射IR、IR显微镜、分色性
	激光拉曼
	核磁共振（NMR）13C，1H，15N；常规（可溶样品）、固体状态（机加工或模压样品）
	荧光、化学发光、磷光
	紫外-可见光（UV-VIS）
	质谱分析（MS）、选择冲击MS、场解吸MS、激光解吸MS、次级离子质谱分析（SIMS）、化学电离MS
	电子自旋共振（ESR）
	ESCA（化学分析用电子能谱）
	X-射线光电子
	X-射线发射
	X-射线散射（小角-X-射线散射）
	小角中子散射（SANS）
	动态光散射
色谱分析	气相色谱（GC）或GC/MS（低相对分子质量化合物）
	热解-GC和GC/MS（热解产品）
	液面上GC/MS（挥发分）
	反向GC（热力学交互作用参数）
	尺寸排除色谱（SEC）、SEC-IR
	液相色谱（LC或HPLC）、HPLC-MS、多维/正交LC、微孔LC
	超临界流体色谱（SFC）
	薄层色谱（TLC）、2-DTLC

虽然激光拉曼光谱不象 IR 那样通用的，但是作为一种鉴别技术可补充 IR，而且应用起来是比较简单的（文献 4.4.3(a)）。只要试件对高强度入射光是稳定的，且不含发荧光物质，几乎不需要样本制备。固体试件仅需要切割至能放入样品容器。用透明试件直接得到透光光谱，对于半透明的试件，可在试件中钻一个孔作为入射光的通道，通过分析研究垂直于入射光束的光散射得到透光光谱。通过对由其前表面反射的光进行分析，得到不透明或高度散射试件的光谱。对于直接分析，粉末样本简单填塞进一个透明玻璃管里，纤维可以定向于入射光束路径中。

4.4.4 色谱分析

对于可溶解的树脂材料，高效液相色谱法（HPLC）是多用途和经济可行的质量保证技

术（文献 4.4.4(a)-(g)），HPLC 包括液相分离和分离树脂成分的监控。将配制的树脂样本稀释溶液注射入一个液体流动相中，该液体流动相通过填塞了固定相的管柱泵出以便于分离，然后进入检测器内。检测器监测分离成分的浓度与其信号响应，记录与注射后时间的关系，从而提供样本化学成分的“指纹”。如果样本成分已知和充分溶解，并且如果有成分的标准，就可以得到定量信息。尺寸排除色谱（SEC），作为一种 HPLC 技术，对确定热塑性树脂的平均相对分子质量和相对分子质量分布特别有用（文献 4.4.4(g)）。最近的进展是对 HPLC 测试设备的改进和自动化，成本比较低和便于操作与维修。

一种有效但技术上更为需要的直接分析研究聚合物的技术是热解 GC/MS（气相色谱法/质谱法）。在这种情况下，只需使样本小到能安装到高温热解探针上，通过对得到的光谱与标准光谱进行比较，不仅能鉴别聚合物类型，而且能快速定量地鉴别挥发分和添加剂，并且有时能够测量聚合物支链和交联密度。

还进行了其他的色谱和分光技术研究（文献 4.4.3(a)，4.4.4(h)，4.4.4(l)）。气相色谱法（GC）、GC 液面上气体分析和 GC 质谱法，对分析研究残余溶剂和一些更易挥发的树脂成分是有用的。热分析-GC-质谱联用法可用于鉴别在固化期间易挥发的反应产物（文献 4.4.4(m)和 4.4.4(n)）。

4.4.5 相对分子质量和相对分子质量分布分析

评估聚合物相对分子质量（MW）、相对分子质量分布（MWD）和链结构的技术列于表 4.4.5。对于分析研究聚合物 MW 和 MWD，尺寸排除色谱法（SEC）是最通用和广泛使用的方法。一旦已知聚合物的溶解性特征，能够选择适合的溶剂用于稀溶液的表征。THF（四氢呋喃）是 SEC 最常选择的溶剂，但是也使用甲苯、氯仿、TCB、DMF（二甲基甲酰胺）（或 DMP,即邻苯二甲酸二甲酯）和间甲酚。如果溶剂中聚合物的 Mark-Houwink 常数 K 和 a 是已知的，就能用尺寸排除色谱法（SEC）确定聚合物的平均 MW 和 MWD（文献 4.4.5(a)）。如果常数是未知的或聚合物具有复杂结构（例如，支链、共聚物或聚合物的混合物），SEC 还可能用来估算 MWD 及其他聚合物结构和化学组成有关的参数。尽管 SEC 表明可溶解的非聚合成分存在，但是高效液相色谱法（HPLC）是表征剩余单体、低聚物及其他可溶解的低 MW 样品成分的更好的技术。

还使用光散射、渗透压测定法和黏度测定法来分析研究聚合物 MW。尽管沉降法很少应用于合成物聚合物，但对于表征具有很大相对分子质量聚合物的 MW，这是一项极好的技术。这项“特殊的”技术有些凭经验或用途有限，因此往往是较少使用。

对表征聚合物链结构很有希望的新技术也列于表 4.4.5 中。最有可能的新技术之一是动态激光散射。不同于 SEC，动态光散射能够用于任何可溶性聚合物，与温度或溶剂无关，并且不需要用于标定的聚合物标准。图 4.4.5 给出了通过激光散射测量聚（1，4-苯二甲酰对苯二胺）（即 Kevlar）的 MWD。（文献 4.4.5(b)）。

如同指明的那样，用浓硫酸作为溶剂、使用极少的样本和单一溶液能够完全表征聚合物的 MWD。

稀释溶液黏度测定法是一种测定可溶性聚合物的特性黏度数或固有黏度[η]的简便技术（文献 4.4.5(a)），仪器便宜，而且便于组装与操作。聚合物的[η]取决于其在溶剂中的流体动力学体积，并与聚合物的 MW 有关。

表4.4.5 聚合物相对分子质量、相对分子质量分布和链结构

标准技术	测量的参数	原 理
尺寸排除色谱法	平均相对分子质量和 MWD，也提供有关聚合物链支化、共聚物化学组成和聚合物形状方面的（SEC）信息。	液相色谱法技术。按照溶液中分子大小分离分子，并采用各种检测器监测浓度和鉴别样品组分。要求用标准聚合物标定。
光散射法（Rayleigh散射）	重均相对分子质量 M_w(g/mol)、Virial 系数 A_2(mol-cc/g^2)。转动半径 $<R_g>$ z(A)、聚合物结构、各向异性、多分散性。	由稀释溶液测定散射光强度，取决于溶液浓度和散射角度。要求溶解度、离析，并在有些情况下要求聚合物分子分级分离。
膜渗透压测定法	数均相对分子质量 M_n(g/mol)、Virial 系数 A_2(mol-cc/g^2)。对相对分子质量在 5000 < MW < 10^6 范围的聚合物结果良好，必须除去较低 MW 的物质。	测定在聚合物溶液与通过半透膜分离的溶剂之间压力差。基于聚合物混合的热力学化学势的依数性方法。
汽相渗透压测定法	除是最适合 MW < 20 000 g/mol 的聚合物的技术外，其他与膜渗透压测定法相同。	涉及溶剂从饱和蒸气相等温转化为聚合物溶液，并测维持热平衡需要的能量。依数性。
黏度测定法（稀释溶液）	黏均相对分子质量 M_η(g/mol)，通过特性黏度 $[\eta]$(ml/g)关系式$[\eta]=KM_v$ 测定，式中 K 和 a 是常数。	采用毛细管或转动黏度计来测量由于存在聚合物分子引起溶剂黏度的增加。无确定的方法，需要标准。
超离心法或沉降法	用关系式 $M_{sd}=S_w/D_w$ 定义沉降-扩散平均相对分子质量 Msd。数均和 Z 均相对分子质量 M_n 和 M_z。用关系式 $S=kM^a$ 测定 MWD，式中 k 和 a 是常数。也提供有关聚合物分子大小和形状的信息。	用带光学检测的强离心力场以测量沉降速度与扩散平衡系数 Sw 和 Dw。测量经压力与扩散校正的聚合物稀溶液沉降迁移提供沉降系数 S。容许分析含溶液凝胶。
特殊技术	**测量的参数**	**原 理**
沸点升高测定法	用于 M_n < 20 000 g/mol 时的数均相对分子质量 M_n(g/mol)，。	通过稀溶液中的聚合物，测量沸点的升高。依数性。
冰点降低测定法	用于 M_n < 20 000 g/mol 时的数均相对分子质量 M_n(g/mol)，。	通过稀溶液中的聚合物，测量冰点的降低。依数性。
端基分析	通常用于 Mn<10 000g/mol 时的数均相对分子质量 Mn(g/mol)。上限取决于所用分析方法的灵敏度。	通过专门化学或仪器技术测定聚合物单位重量或浓度的聚合物链端基数或浓度。
比浊法	重均相对分子质量 M_w(g/mol)和 MWD，基于溶解度考虑和非常稀的溶液中聚合物的分段沉淀	在等温或用不良溶剂配制的溶液缓慢冷却的条件下，用光学技术测量用非溶剂滴定时聚合物溶液的沉淀程度。
色谱馏分	相对分子质量分布。需要绝对 M_w 技术来分析馏分。	将聚合物涂在二氧化硅颗粒上装进恒温柱中，并依照用溶剂梯度洗脱分离。随相对分子质量增大聚合物溶解度减少。
熔融流变测定法	重均相对分子质量 M_w (g/mol)和重量分数差示相对分子质量分布半经验方法。	涉及振荡形变过程中聚合物的扩散松弛时间谱测量的动态熔融流变方法。
交联聚合物凝胶溶液分析	凝胶部分，交联密度	采用萃取、过滤和离心法将可溶性聚合物与可溶性聚合物的凝胶分离，并分别测定 MW。
溶胀平衡	网络结构，交联密度，在交联 M_c 之间链的数均相对分子质量。	测定浸入溶胀液体中交联聚合物的摩尔体积与溶胀聚合物的密度。应用混合的部分摩尔自由能理论。

表4.4.5（续） 聚合物相对分子质量、相对分子质量分布和链结构

有希望的技术	测量的参数	原 理
激光散射（准弹性、线加宽或动态）法	与瑞利光散射加迁移扩散系数相同，相对分子质量分布和有关凝胶结构信息。	同上所述，但也涉及散射光的中心瑞利线的低频线加宽测定。稀溶液中和浓溶液中的聚合物均可以分析。
场流动分数法（FFF）	平均相对分子质量和 MWD。要求标定。	依照聚合物在溶液中的大小与形状将其分离。应用除场/梯度（热、重力、流动、电等）以外类似色谱法的洗脱技术，垂直于流过毛细管或带形通道溶液的轴向，并采用单相。
非水反向高性能液相色谱HPLC与薄层色谱TCL法	平均相对分子质量和 MWD。要求标定。	液相色谱技术，基于在非水二元溶剂流动相与非极性固定（装填的）相之间聚合物分子平衡分布。
超临界流体色谱法（SFC）	平均相对分子质量和 MWD。要求标定。	在超临界（100bar，250℃）条件下，涉及使用流动相的液相色谱技术。
小角度中子散射（SANS）	重均相对分子质量 M_w(g/mol)、Virial 系数 A_2(mol-cc/g^2)。转动半径 $<R_g>$ z(A)	测量稀溶液中或与另一种聚合物掺合的聚合物中子散射动量矢量。散射角与聚合物浓度是变化的。使用氘化的溶剂。已研究稀固体溶液和聚合物掺合物。

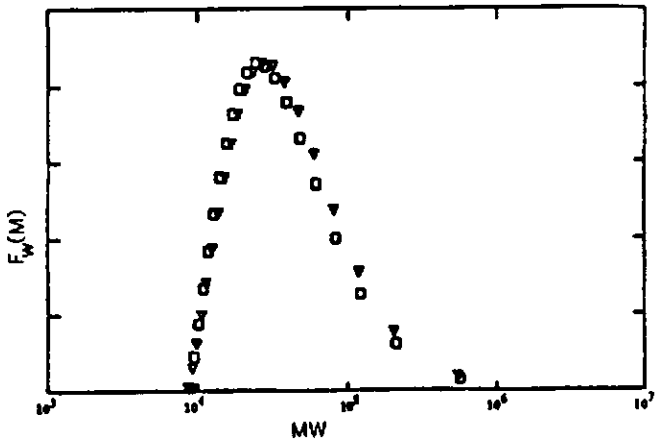


图 4.4.5 用动态激光散射得到的浓硫酸中 Kevlar 的相对分子质量分布（MWD）

4.4.6 树脂材料表征的一般程序

在开发制备和表征聚合物与聚合物前驱体（热固性树脂和树脂配方）样品的方法时，应仔细考虑以下问题：

- 聚合物或预聚物的固有特性是什么？
- 某些操作将引起样本中不可逆变化吗？
- 表征技术对样本有什么样的要求？
- 有必要将聚合物或预聚物与其他的样本成分分离吗？

应该认定聚合物化合物和预聚物成分的性能与纯聚合物和聚合物前驱体的性能常常相差很大。其他成分，如填料、添加剂、工艺助剂、颜料、残余催化剂、杂质、溶剂及其他聚合物、低 MW 低聚体和单体的存在对聚合物性能影响极大。

对于一项特定分析，必须决定试件是否需要修改还是特别处理。化学结构、热转化行为和溶解性确定了能够用试件做什么。如加热或萃取这样的操作，会变更试件的形态或改变试件的化学成分，从而会影响其性能，并损害某些试验方法的有效性。许多表征技术要求修改聚合物试件或具有特定的形状或形式，如果试件与试验标准不是准确地一致，试验可能是无效的。另一方面，为了应用某些技术（例如 MW 分析的光散射和膜渗透压测定法），将聚合物与非聚合成分完全分离是很重要的。

在开发表征方法时，聚合物或预聚物类型的知识是重要的。如果材料是未鉴别的，可以用一系列简单试验（图 4.4.6(a)中的水平 I），首先回答样本实际上是否含有聚合物这个问题，然后确定它的特性并鉴别聚合物或预聚物。

水平 I 的试件修改仅包括从样本上剪下或切割下小薄片，如有可能，通过研磨进一步减小试件尺寸。为了便于热和光谱分析及溶解度试验，试件应该具有大的表面积。在取出一部分作分析之前，应将液体和非均匀的试件充分混合。仅使用 10 mg 样本就能进行一次试验。

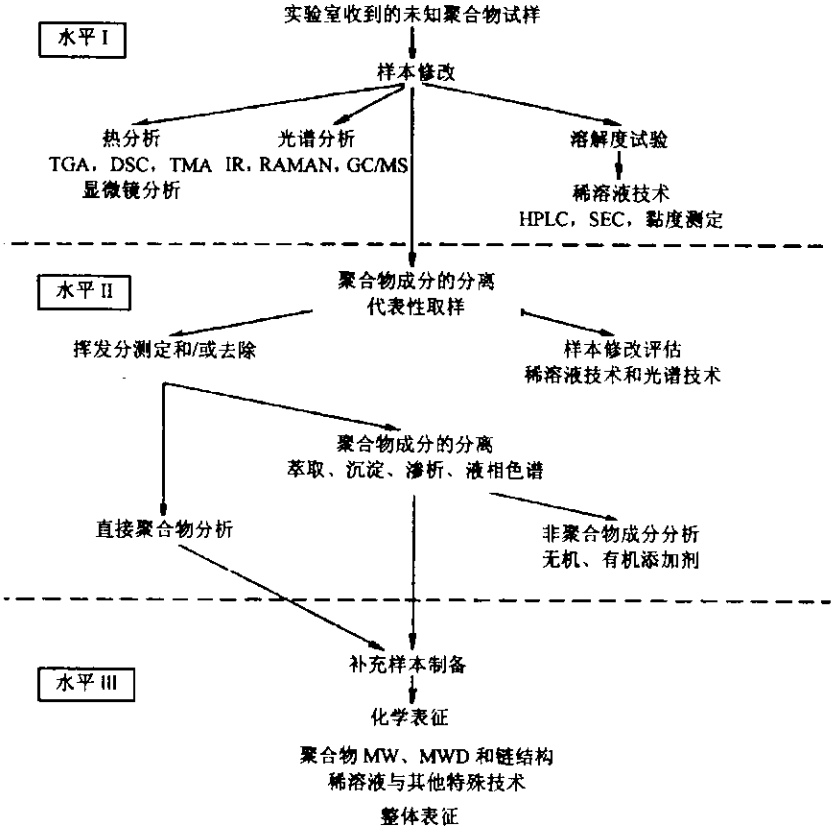


图 4.4.6(a)　聚合物/预聚物表征程序图

用水平 I 中的试验得到的结构和组分信息，来帮助发展更先进试件制备流程和支持使用更详细或专门化的表征技术。水平 II 主要关心的是代表性取样和确保试件修改方法（切割、研磨、模塑等）不会损害待评估的聚合物特性。水平 II 还阐明样本化学组成的“定量”情况（聚合物百分数、添加剂、挥发分，和无机及其他有机残余物），必要时鉴别非聚合物成分。

图 4.4.6(b)中说明了一般的聚合物分析程序图。聚合物样品应是均匀的和具有大的表面积。一旦除去挥发性组分，能够直接分析研究聚合物，或可将各种技术（例如：萃取、沉淀、过滤、液相色谱）用于分离聚合物。如果需要，应用特殊方法制备化学表征用的聚合物样本，化学表征包括相对分子质量、相对分子质量分布和链结构评定，以及整体表征（在图 4.4.6(a)中的水平 III）。

只要有可能，应该用附加的技术作树脂材料的化学质量保证。如 HPLC 以及 IR 光谱这样的技术基本上是相互不同的，它们对有关树脂化学组成提供了直接，但不同的的信息。如果应用合适的试验方法，HPLC 和 IR 光谱通常能足够有效地检测出树脂化学成分的差别或变化。DTA（差热分析）和 DSC（差示扫描量热计）通过提供关于预浸料的操作性能（即 *Tg* 和树脂的反应程度）和可加工性信息对 HPLC 和 IR 光谱进行补充。挥发性组分的 TGA（热解重量分析）和 GC 液面上气体分析技术是辅助的，但是重要的技术。如果对成分浓度的认识是加工树脂的关健，或如果这些成分存在能够对固化的复合材料性能与耐久性有不利影响，应该使用分析研究特定成分或元素的专门技术。由力学、流变学和介电分析技术提供的信息与预浸料的化学成分有关，并因此对更直接的化学技术予以补充。

但是，建议在应用非化学技术方面要慎重，因为当试图建立测量的参数与化学成分的联系时，得到的资料很复杂和并经常是不明确的（见 5.5 节）。

聚合物样品（细粉末或薄膜）

挥发分除去和/或测定
干燥后重量损失
TGA（热重分析）
液面上气体分析（GC/MS）
吸湿分析

聚合物成分离析
萃取法
溶解法
过滤法
沉淀法
离心法

化学表征技术
元素分析法
官能团分析法
光谱分析法
色谱分析法

聚合物相对分子质量、相对分子质量分布和链结构
稀溶液技术
其他特殊技术

整体表征技术
热分析法
显微镜检查法
形态学法
力学试验法
杂项

图 4.4.6(b)　聚合物分析一般程序图

4.5 热/物理分析和性能试验方法

基体材料的物理性能将影响加工方法和确定适合于所制造复合材料的应用类型。热分析方法用于确定玻璃化转变和晶体熔融温度、热膨胀、热分解、反应热及其他在基体材料中的热事件。流变学方法提供有关与温度有关的流动行为的信息。此外，也能评估热固性树脂的与固化相关的特性。可以采用其他方法来确定基体材料的形态和密度。在以后几节里讨论的分析技术用来确定热塑性和热固性材料的物理性能。

4.5.1 引言

此节留待以后补充。

4.5.2 热分析

热分析技术，如热重分析法（TGA）、差示热分析法（DTA）、差示扫描量热计法（DSC）、热机械分析法（TMA）、动态力学分析法（DMA）和扭辫分析（TBA）提供与树脂的化学组成和可加工性有关的有用信息。

热重分析（TGA）监测与温度有关的样品重量变化。虽然 TGA 主要用来研究降解过程，但也可以用作质量保证技术，以提供有关预浸料材料中挥发分、树脂、纤维和无机残余物的信息（文献 4.5.2(a)）。因为不同材料经常在不同的温度和速率条件下降解和挥发，通过在其差示热分析图中的差别可能反映组成的差别。由 TGA 确定热氧化降解率对于估算树脂材料的寿命周期是有用的（文献 4.5.2(b)）。

差示扫描量热法（DSC）和差示热分析（DTA）技术经常地用于表征树脂和复合材料（文献 4.4.4(g)，4.4.3(b)，4.5.2(c)和 4.5.2(d)）。DSC 和 DTA 监测材料中与温度有关的焓变化（DSC 是直接地而 DTA 是间接地），并因此提供可用于预浸料材料质量保证的类似资料。DTA 测量环氧树脂试件和参比材料之间的温差（$\triangle T$）；而 DSC 测量放热率（dH/dt）或试件相对于参比物的热焓吸附。DTA 和 DSC 测量(1)保持在相同温度条件下（等温的）试件和参比材料与时间有关的热变化；或(2)在相同加热速率（动态）下加热的试件和参比材料与温度有关的热变化。

对于质量保证方面的应用，DTA 和 DSC 通常在动态模式下运行，用在铝试件容器中称重试件和一个空的容器用作参比。动态 DTA 和 DSC 测量预浸料树脂的玻璃化转变温度 Tg 和反应热$\triangle H$，但不直接提供有关化学成分的信息。通过监测放出的随温度或时间而变的热部分，能够得到关于固化范围和固化动力学信息。DSC 和 DTA 还可用于评估熔融温度 T 和估算热塑性树脂和复合材料的结晶度。因为用于 DSC 的试件大小平均值仅约 10 mg（0.00002 lb），在获得代表性材料方面的操作必须特别小心。多个试件操作是可取的。

热机械分析（TMA）用于连接 DTA 和 DSC 以研究预浸料树脂和固化层压板的热转变特性（例如 Tg）。TMA 模拟线膨胀测试仪，以测量试件在动态或等温加热条件下的热膨胀及热收缩。可调节的载荷是用一个特别设计停放在试件表面上的探针来施加的。采用灵敏的位移装置以监测材料的“名义”热响应。因为热转变特性与预浸料树脂化学成分和固化范围有关，TMA 能够用作质量保证技术。

如同以前所讨论过的，TGA 提供样本的热分解温度 T_d 的指示，并用来估算挥发分、聚合物、非聚合物添加剂和无机物残余物的相对量。DSC 或 DTA 用于评估热固性树脂的

固化范围和固化特性，以确定聚合物的 T_g；如果聚合物是半结晶的，则用于确定它的晶体熔融温度 T_m。ASTM 标准 D 3417 和 D 3418（文献 4.5.2(e)与 4.5.2(f)）中给出了建议的测量 T_g 和 T_m 方法。TMA 还可以用来确定 T_g 和获得关于聚合物热变形温度和热膨胀系数的更多信息。对于粒化或模塑样本，可用一个刀片或切片机切割样本至接近样本容器的尺寸（厚度和直径）。如果样本已切割或已经以薄膜或片状形式并具有厚度不大于 0.04 mm（0.015 in）时，可以用冲床或打孔器切割成适当尺寸的圆盘。

换句话说，可用热载台显微镜来观测热变形温度和粉末状样本的流动开始。起初粉末颗粒具有锐利的尖毛边。随样本受热和趋近热变形温度，边缘首先变模糊，然后微粒开始成团块。最后，对于半晶态聚合物为 T_m，或在玻璃状聚合物的情况下为 T_g 温度，发生流动并成为清晰熔融或液态形式。配备有交叉偏振器的显微镜，对于定义晶-晶转变和半晶态聚合物熔融的开始是有用的。

4.5.3 流变分析

热塑性或热固性树脂的加工性能取决于流动特性，流动特性通过流变分析来表征。用测量恒定剪切条件下与温度有关黏度的方法来获得有关流动特性的信息。这些方法包括黏度计或毛细管流变仪的使用。因为热固性材料的黏度还取决于固化程度，所以，也可用其他的方法来获得固化时流变性的信息。

动态力学分析（DMA）、扭辫分析（TBA）和各种力学频谱计可用来测量树脂与频率、温度及固化程度有关的流变响应。DMA 和 TBA 均能够提供关于聚合物的储能模量、损耗模量、复数黏度和 $\tan\delta$ 的信息。此外，能够获得关于固化热固性树脂的凝胶化、玻璃化和 T_g 方面的信息（文献 4.3.1(c)和 4.5.3(a)-(c)）。流变性技术最经常用于优化工艺参数，但是，因为流变性能与树脂化学组成和形态有关，流变性技术也可用于树脂的质量保证。

动态介电分析（DDA）技术能够提供有关基体材料流动行为和固化特性方面的信息。DDA 还要用电气测量来监测与频率、时间和温度有关的工艺过程中，树脂在介电常数、损耗因子、电容和/或导电性方面的变化。测量的电参数对树脂黏度变化有明显的响应，并经常用于研究和优化预浸料工艺参数，如树脂流动和凝胶时间/温度。因为化学成分对热固性树脂的电性能和固化特性有影响，DDA 技术也可用于质量保证（文献 4.5.3(c)-(j)）。

适用于流变分析的 ASTM 试验方法（文献 4.5.3(k)-(o)）包括：

- ASTM D 2393“环氧树脂的黏度和有关成分”。测定环氧树脂体系和/或混合配方液体组分黏度的方法。
- ASTM D 3835“用毛细管流变仪测定热塑性塑料的流变性能的方法”。描述了在与工艺设备相同的温度和剪切条件下热塑性塑料流变特性的测量方法。
- ASTM D 4065“测定和报告塑料的动态力学性能。通过自由振动和谐振或非谐振强迫振动技术获得流变性信息的实际操作方法。
- ASTM D 4440“用动态力学方法对聚合物熔体的流变性测量方法”。在一定温度范围内通过非谐振强迫振动技术测定热塑性塑料流变性能的实际操作方法。
- ASTM D 4473“使用动态力学的方法对热固性树脂固化行为的测量方法”。在一定温度范围内，通过自由振动和谐振以及非谐振强迫振动技术，用以提供测量测定有载体的与无载体的热固性树脂固化特性方法的实际操作。

在 ASTM D 4092 中提供与动态力学分析相关术语的定义（文献 4.5.3(p)）。

4.5.4 形态

基体材料的形态将取决于聚合物的类型。通过固化时涉及的成分转化率以及官能度，控制热固性材料中高度交联网络的形成。依据固化度说明它们的交联程度，固化度能够通过热分析以及光谱方法确定。

在微观尺度上，半结晶热塑性塑料包含三维有序（晶体）区域以及缺乏长程有序区域（无定形）。一般来说，结晶区由球晶组成，球晶是由成核点辐射出多层结晶的聚集。材料的受热历程、以及纤维及填料的存在，将影响球晶的尺寸以及数目和结晶度（文献4.5.4(a)-(b)）。在结晶区中的差别也会对力学性能有影响（文献4.5.4(c)-(d)）。

结晶区的分析通过各种技术实现。结晶的尺寸和定向程度能够通过X-射线衍射、电子显微检查法和双折射法研究，而一般用偏振光显微镜来分析球晶。通过X-射线衍射、比容和熔化热能够确定结晶度。比容法需要测定样品以及材料完全无定形和晶体样品的比容。熔化热方法涉及定量分配样品和材料完全晶化样品的熔化热。熔化热能够用ASTM D 3417测定（文献4.5.2(e)）。

非结晶的热塑性塑料可以显示出不同水平的分子取向。液晶聚合物也许有一及二维有序区域，这种有序能够由热分析评估。无定形热塑性塑料一般缺乏长程有序，可能经历依赖加工技术的取向。通常，分子取向可能在材料中产生各向异性。但是，纯树脂样品的形态特征可能与制造的复合材料中获得的那种形态特征很不相同。

4.5.5 密度/比重

4.5.5.1 概述

按ASTM D 2734“增强塑料的空隙含量”中说明测定复合材料的近似空隙含量时，需要基体密度（文献4.5.5.1(a)）。在给定种类的聚合物内，也用密度来鉴别或表征基体材料。例如：在半晶质的热塑性基体中，特定聚合物的结晶度将改变聚合物的密度。

几乎总是假定复合材料基体的密度大致相同，不论其是在复合材料或是浇注的纯树脂板中，并且实际上始终使用纯树脂值。有必要指出由于工艺历程中的差别，复合材料基体密度与浇注的纯树脂密度可能不一致。复合材料中的基体经历不同的热、压力和空间环境，包括纤维/基体界面的表面状态。理论看法已使许多人相信整块基体的密度值比复合材料中得到的值要低（文献4.5.5.1(a)），但是尚未得到实验验证。更进一步，如果密度确实存在差别，才会提出这一差别是否足够重要的问题。

极少例外，密度的测定是通过固化基体树脂代表性样本的体积和重量测量，然后综合这些值计算密度间接完成的。用一个质量分析天平很容易测量重量，但是，有好几种方法可用于测定体积。最普遍的方法使用简单的Archemedes（阿基米得）方法，该法就是已知密度液体的置换法*。可通过观测试验材料沉没在分等级密度液体中的水平进行密度的直接测量（文献4.5.5.1(b)）。

置换技术中使用的液体几乎是专用的。但是，使用气体介质代替液体来测定试件体积是有利的，优点之一是将与液体表面张力有关的误差减到最小。通常将气体置换法称为氦比重法，当使用氦比重法时，通过测量有限数量氦的压力变化确定试验试件体积。氦测比

---

* 对一种快速方便、但准确度较差的密度测定方法，读者参考ASTM D 2734，试验方法C中规定的测微计技术。该方法通过简单尺寸测量得到试件体积，并仅在有限特殊情况适用于精加工。

重法是尚未标准化的测量固化基体树脂体积和密度的试验方法，然而已经证明其为可行的技术（文献 4.5.5.1(c)和(d)）。由于此方法用于树脂尚无试验标准或指南，在 MIL-HDBK-17 试验工作组内部已建立了试验程序（见 6.6.4.4.1 节）。

目前有两个专门用于获得固化基体树脂密度的 ASTM 标准，它们是涉及液体置换法的试验方法 D 792（文献 4.5.5.1(e)），和涉及密度梯度法的 D 1505（文献 4.5.5.1(b)）。

为详细指导如何实验获得固化基体树脂的密度，读者可参考手册本卷的 6.6.4.6-6.6.4.7 节。注意，6.4.4 节专指复合材料，但除如 4.5.5.2 节下面注释的之外，讨论的方法是完全适用于固化的基体树脂。

4.5.5.2 用于测量固化树脂密度的推荐方法对6.6.4.2、6.6.4.3和6.6.4.4节（D 792、D 1505和氦测比重法）的变化

测量的复合材料密度与纯树脂样品的密度相比，之间的差别很小，并在试件制备的范围内。纯树脂试件一般更脆一些，并在机械加工过程中有可能开裂。由树脂比较软（与复合材料相比）和各向同性性质，使用细砂纸比较容易获得良好的边缘质量。

4.5.5.3 提交MIL-HDBK-17数据用的密度试验方法

目前 MILHDBK17 正在接受通过下列试验方法产生的数据（表 4.5.5.3），考虑包括在第二卷的内容中。

表4.5.5.3 提交MIL-HDBK-17数据用的树脂密度试验方法。

性能	符号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
密度	ρ	D792、D1505、4.5.5.2*	D 2743C

*当该方法用于产生复合材料空隙体积的相继测定时，试验样品必须至少占据 30%的试验池体积。

4.5.6 挥发分含量

树脂材料的挥发分含量是预浸料制作者、RTM 制作者和使用湿法铺贴工艺制造者所关心的。挥发分的不适当控制可能影响预浸料的操作和最终层压板的质量。材料性能与材料具有包含在配方中的溶剂部位密切相关。挥发分含量指的是在试验温度条件下挥发的溶剂、树脂成分及其他组分。剩余物一般称为树脂固体和填料，树脂固体包括能溶入有机溶剂的材料（通常是聚合物的组分），填料一般是不可溶解的无机物材料。挥发分的试验一般作为质量控制检验进行。

具体的方法与材料相关，但这些方法通常包括在规定温度条件下，将材料放入空气循环炉或真空炉中经过规定的时间。重量损失用重量分析测量。时间和温度的选择要使挥发分完全消失，而树脂固体不挥发或降解。ASTM D 3530“碳纤维预浸料的挥发分含量”（文献 4.5.6(a)）介绍了用于碳/环氧树脂预浸料的标准烘箱曝露试验方法，虽然用户要当心，温度可能对其他树脂体系不适用，但该方法也可用作大多数热固性树脂的指南。在 ASTM 标准中，时间是固定的，但要选择代表零件加工周期的温度。

有时使用热重分析（TGA）来代替烘箱曝露方法。热重分析是一种仪表化的方法，该法将小试件放在微量天平上。在不断监测试件重量的同时，仪器会自动逐渐升高温度。用于挥发分含量的 TGA 方法应该规定用于确定挥发分含量的加热速率、气体和流量、试件尺寸以及温度范围。虽然没有已建立的测定树脂中挥发分的 TGA 方法的 ASTM 程序，ASTM E 1131“用热解重量分析法进行组分分析”（文献 4.5.6(b)）给出了一般指导。在研究或解

答挥发分定性/定量测定的环境问题时，可以使用如 TGA-FTIR 以及液面上气相色谱法（文献 4.5.6(c)）的其他技术。

4.5.7 吸湿量

在成形工艺过程中，潮湿可能延迟固化、产生挥发分或引起其他不合需要的反应，这取决于树脂体系。对于受影响的树脂体系，需要控制及测量吸湿量。一般采用基于费歇尔滴定法的自动湿度计来测定多数树脂种类的吸湿量。把一个小样本，通常为 5 g 的液态树脂，放进含费歇尔试剂以及溶剂（一般为甲醇）的测定池中。在两个电极之间通电流，在与水和费歇尔试剂的定量系列反应中产生碘。ASTM D 4672“聚氨基甲酸乙酯原材料：多元醇中含水量的测定”中描述了反应与试验（文献 4.5.7(a)）。

测定吸湿量的替代方法是使用加热小试件（一般用 10 g 固体）的仪器。水分通过氮气载体蒸发和转运到一个电解池中。水反应形成磷酸，然后通过流过池的电流定量地测定。该试验的标准是 ASTM D 4019“用五氧化二磷的电量再生测定塑料中水分的方法”（文献 4.5.7(b)）。

4.6 静态力学性能试验方法

4.6.1 引言

当在各种用于复合材料的候选体系中进行选择时，知晓基体材料的静态力学性能会是非常有用的。如果必须提高一种特定的复合材料性能，合理选择替代的基体材料可能就足以满足需要了。例如，用弹性模量仅略高一点的基体取代，就有可能将纤维微屈曲问题减至可接受的程度。剪切强度或剪切破坏应变得到提高的基体也会提高相应的复合材料性能。

同样，如果是要用细观力学分析从组分性能来预测复合材料性能，则必须要知道详尽的基体材料静态力学性能。即使被称为“脆性的”聚合物也经常显示非线性的拉伸和压缩应变响应，这种非线性性质是不可忽略的。更重要的是多数聚合物呈现明显的非线性剪切应力-应变响应。因此，不仅必须测定初始的刚度性能（E^m、ν^m、G^m），而且还需测定直至破坏的完整的应力-应变曲线。这会对特别的应变测试设备提出挑战，如在以后几节里所讨论的那样。

通常，用作复合材料中基体材料的聚合物不配制成纯料（未增强的）形式使用，因而，它们的黏度和挥发分含量可能不适于浇注成无空隙的纯树脂片材、板块，及其他力学试验试件制备需要的形式，如 4.2 节中讨论的那样。尽管如此，获得在以后几节里叙述的力学试验所需要优质试件是特别关键的，并且必须给予特别注意。

4.6.2 拉伸

F_m^{tu}，F_m^{ty}，E_m^t，ν_m^t，ε_m^{tu}

4.6.2.1 引言

纯（未增强的）基体拉伸试验一般按 ASTM D 638 进行（文献 4.6.2.1(a)）。虽然此标准最初（在 1941 年）是为商品热塑性塑料写的，但对于用作复合材料基体的高性能热固性材料和高温热塑性塑料的试验，是可直接遵循的。另一个标准 ASTM D 882（文献 4.6.2.1(b)）

是为薄塑料片材设计的试验方法，也是可用的。在此标准中指出："1.0 mm（0.04 in）或更厚的塑料拉伸性能应该按照试验方法 D 638 测定"，也就是说 ASTM D 882 一般不用于纯基体试验。

4.6.2.2 试件制备

最通常采用扁平哑铃试件（即哑铃形状、按 ASTM D 638 术语）。如 4.2 节中所讨论的那样，这些试件一般是由浇注的平板材料机械加工制成，而不是模压到最终尺寸。重要的是遵守 4.2 节中讨论的板制造保护措施，以便保证保持合格的材料质量。同样，必须控制试件机械加工的质量。如 4.2 节中所讨论的那样，有些基体聚合物比较脆，对在机械加工期间偶然导致的表面划痕和边缘碎裂很敏感。事实上，通常有些基体聚合物对加工面的粗糙度很敏感，并要求进行磨光作为最后一道制备工序。纯聚合物拉伸试件通常不贴加强片，哑铃形使它成为不必要。

当对高性能复合材料基体材料进行试验时，如 ASTM D 638 所建议的，优先选用 I 型试件或其他类似的几何形状，并且是最常使用的。此几何形状被推荐用于通常使用的 7.0 mm（0.28in）或更薄的试验件。如图 4.6.2.2 所示，165 mm（6.50 in）长的试件为 19 mm（0.75 in）宽，在 57.0 mm（2.25 in）长的标距长度区减到 13 mm（0.50 in），过渡半径为宽裕的 76 mm（3.0 in）。如果这些试件不在测量段破坏，建议用 II 型试件。它具有相似几何形状，但测量段截面宽度仅 6.0 mm（0.25 in）而不是 13 mm（0.50 in），也就是说它比 I 型试件的测量段截面降低更多。在 ASTM D 638 中还规定其他 3 种试件类型，但通常不用于基体聚合物试验方法。

如 ASTM D 638 所讨论的，对拉伸试验有时候用哑铃形试件，但这样的试件势必比扁平试件更难制造和夹紧。文献 4.6.2.2(a)和(b)中详细介绍了对圆棒试件尺寸和几何形状影响的实验研究。也可以用薄壁管进行拉伸试验，但该试件几何形状比圆棒试件更难制造和夹紧，ASTM D 638 中纳入了薄壁管试件几何形状和夹紧的细节。

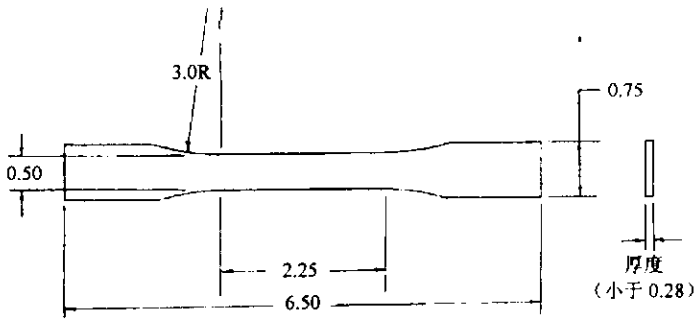


图 4.6.2.2 ASTM D 638I 型扁平哑铃拉伸试件几何形状（全部尺寸以 in 表示）

4.6.2.3 试验仪器和测试设备

通常用楔形夹头装置对扁平哑铃试件进行试验。机械和液压夹头通常起同样作用，虽然并不经常使用，但也可以满意地使用螺旋夹紧装置，这是因为纯聚合物试件的拉伸强度不是很高，因此仅需适中的夹紧力。相应地，由于泊松收缩，固定位置螺旋致动夹紧装置中的滑动通常不是严重的问题。

螺钉致动夹紧装置经常包括平滑金属或橡胶夹紧表面，而多数楔形块有尖锐的锯齿。因此，在试件和这些楔形夹持面之间使用某些类型加垫材料，一或两层金刚砂布就行了。

ASTM D 638 还讨论使用磨料线网和塑料板。

虽然在 ASTM D 638 标准中还没提及，但在试验室中得到越来越多应用的所谓火焰喷涂夹持板，已经证明特别有效。这些夹持面一般是在镍（或钴）基体中用碳化钨粒子喷涂。这些夹持面一般非常平滑，并是非侵蚀性的，其表面粗糙度类似于约 150 号金刚砂布。但是，它们具有极好的夹持力，相当于锯齿状的夹紧。这样的夹持面对螺钉致动夹紧装置同样会是一种良好的选择。

虽然 ASTM D 638 推荐用引伸计测量应变，但是已经表明应变片至少具有同样效果（文献 4.6.2.2(a)和(b)），甚至对比较脆的聚合物。如果要测定泊松比，必须使用双轴引伸计（或两个线性的引伸计）。相应地，为此用一个双轴应变片也很方便。

4.6.2.4 提交MIL-HDBK-17数据用的拉伸试验方法

目前 MILHDBK17 正在接受通过下列试验方法产生的数据，考虑包括在第二卷内容中。

表4.6.2.4 提交MIL-HDBK-17数据用的树脂拉伸试验方法

拉伸性能	符 号	正式批准，临时和筛选数据	仅筛选数据
极限强度	F_m^{tu}	ASTM D 638	
屈服强度	F_m^{ty}	ASTM D 638	
模 量	E_m^t	ASTM D 638	
泊松比	ν_m^t	ASTM D 638	
破坏应变	ε_m^{tu}	ASTM D 638	

4.6.3 压缩

F_m^{tu}，F_m^{ty}，E_m^t，ν_m^t，E_m^{tu}

4.6.3.1 引言

尽管仿佛没有任何内在的理由，纯聚合物基体材料的压缩试验比拉伸和剪切试验通常少得多。压缩试验一般没有更多的困难，尽管因为“关键缺陷尺寸”对破坏的影响没那么严重，压缩极限强度一般很高，大多数聚合物基体在拉伸和压缩下的弹性响应是相似的（文献 4.6.3.1(a)和(b)）。

ASTM D 695（文献 4.6.3.1(c)）指导硬质塑料的压缩试验，并是常用的试验方法。该方法确定了短柱（或管）的轴向压缩加载，或防柱屈曲横向约束的哑铃扁平试件。

通常使用短柱试件。测量压缩强度的试件横截面可能是方的或圆的，长度是横向尺寸的两倍（即试件纵横比为 2）。测定强度推荐的试件尺寸是横截面尺寸为 12.7 mm（0.50 in），长为 25.4 mm（1.0 in）。推荐同样横截面尺寸但 2 倍长的试件来测量模量和补偿屈服应力。

4.6.3.2 试件制备

一般使用圆的而不是方形截面短柱试件。浇注无空隙的 12.7 mm（0.50 in）的厚板（如 4.2 节中所讨论的）用来切割方试件是很难的，特别是热固性聚合物。还有，在浇注这样的厚板时，由于在固化期间放热反应，过量发热可能是一个问题。作为次要的考虑，任何取自此厚浇注件的剩余材料对其他纯基体的试验，如拉伸、剪切、热或湿膨胀试验不是特别有用。

通常更常用的是浇注 12.7 mm（0.50 in）净直径圆柱，然后简单地将它们切割成要求长

度。固然也能浇注正方形的试件，但一般是更容易制造具有圆形腔的模具。

因为通常用 3.2 mm（0.12 in）或更薄的纯聚合物板机械加工的试件作拉伸和 Iosipescu 剪切试验，用同样的浇注板制造压缩试件常常也很方便。在这种情况下，ASTM D 695 建议使用类似于拉伸试验用的哑铃扁平试件（按照 ASTM D 638），但长仅是其一半。

不论正在制备的是短柱体还是平面哑铃试件，必须对试件端头的平行度，和它们对试件纵轴（加载方向）的垂直度给予特别的注意。在 ASTM D 695 中给出推荐的容限（文献 4.6.3.1(c)）。还必须评估试件表面的粗糙度对压缩强度的影响，不论其是浇注的还是机械加工的，某些聚合物对表面不完善性比对其他的缺陷敏感得多。ASTM D 695 简单地说明“全部机械加工操作应该小心进行，以便产生光滑表面。”

4.6.3.3 试验仪器和测试设备

短柱试件只不过是在两个平台之间加压。如果用试验机平台，重要的是它们要平且平行，并与试验机的加载轴垂直。ASTM D 695 说明了小压力机，这是一种非常方便的代用品。这种独立的装置包括一个刚性构架，该刚性构架具有线性球轴套，它能对沿轴向自由移动的淬硬钢加载活塞导向，但要与淬硬钢试件支座仔细地对中。

当对平面哑铃压缩试件进行轴向压缩试验时，必须提供侧向支承以防止柱总体屈曲。为此在 ASTM D 695 中规定应有支持夹具。SACMA 推荐方法 SRM 1（文献 4.6.3.3）说明一种用于同样目的，但使用容易得多的改良夹具。

虽然在 ASTM D 695 中推荐用引伸计测量应变，但已经表明，即使对比较脆的聚合物应变片至少也有同样的效果（文献 4.6.3.1(a)和(b)）。如果测定泊松比，必须使用双轴引伸计（或两个线性的引伸计）。相应地，为此用一个双轴应变片也是方便的。

4.6.3.4 局限性

- 短柱压缩试件——或者必须模压特殊的，要切出 12.7mm×12.7mm（0.50in×0.50in）正方形截面试件的 12.7 mm（0.50 in）厚板；或者必须使用专门的 12.7mm（0.50in）正方形或圆形截面模具。如果遵循 ASTM D 695，必须试验两种不同长度的试件，分别测量压缩强度和模量。同样地，或者必须特别仔细地将试验机对中，或者必须使用小压力机。
- 横向支持扁平哑铃试件——因为试件必须是哑铃形的，所以试件制备是稍费时的。此外，需要一个专门的横向支持夹具。

4.6.3.5 提交MIL-HDBK-17数据用的压缩试验方法

目前 MILHDBK17 正在接受通过下列试验方法产生的数据，考虑包括在第二卷内容中。

表4.6.3.5 提交MIL-HDBK-17数据用的树脂压缩试验方法

压缩性能	符 号	正式批准，临时和筛选数据	仅筛选数据
极限强度	F_m^{cu}	ASTM D 695*	
屈服强度	F_m^{cy}	ASTM D 695*	
模量	E_m^c	ASTM D 695*	
泊松比	ν_m^c	ASTM D 695*	
破坏应变	ε_m^{cu}	ASTM D 695*	

*SACMA SRM 1 试验夹具也是可接受的支持夹具。

4.6.4 剪切

F^{su}, F^{sy}, G^{m}

4.6.4.1 适用的试验方法

树脂基体材料的剪切性能一般用实心圆棒的扭转试验或在标准试验夹具中的标准Iosipescu试件（V-形缺口梁）测定。ASTM E 143是适用于前一种情况（文献4.6.4.1(a)），ASTM D 5379适用于后一种情况（文献4.6.4.1(b)）。动态力学分析（DMA）（文献4.5.3(m)）也适用，但一般不用。

4.6.4.2 扭转试件制备

最初，实心棒浇注为均匀直径的棒，或者在玻璃管中浇注，固化后敲破取出；或在柱塞形内腔钢模中浇注，并在固化后从尾端推出。目前一般使用哑铃形圆柱试件。尽管也使用其他的模具材料，但这些实心棒一般浇注在钢或硅橡胶模具中。金属模具一般沿它的直径剖开，使固化的试件能脱模。硅橡胶模具一般地沿半径剖开，以便固化的试件能掰开取出（和除去其本身最初模压形成的花纹）。模具下端是封堵的，树脂由顶端注入（或有时由底部注射，对低黏度体系有必要时要加压）。带芯子的试件也已不常使用，它要用一个直径不变的硅橡胶芯子，该芯子在固化后能从一端拔出，形成管状的试件。

4.6.4.3 Iosipescu剪切试件制备

Iosipescu试件通常由平板机械加工得到，平板或者在开模中浇注，或者在低黏度树脂的情况（如高温热塑性塑料）下注射模压得到。试件还可以模压成净尺寸的，但迄今尚未知是否已经做成。

4.6.4.4 试验仪器和测试设备

用扭矩能力比较低的扭转测试装置来试验实心棒状试件，而标准Iosipescu剪切试验夹具和Iosipescu试件一起使用。把应变片（一般是±45°双轴应变花）粘贴到实心棒或Iosipescu试件的表面来测量剪切模量，和完整的剪切应力-剪切应变曲线直至破坏。

4.6.4.5 局限性

- 实心棒扭转试验（ASTM E 143）——剪切应变从扭转试件轴线为零到试件表面处为最大值。几乎所有的树脂材料，即使那些通常认为是脆性的，在超过弹性极限后，剪切都表现出明显的非线性，因此应变变化是非线性的。应变片测量的剪切应变是表面应变。相应地，在非线性的范围里剪切应力的计算必须考虑非线性。（当试验非线性的材料时，在Iosipescu试件的测量段，剪切应变是均匀的，不需要特殊的考虑）。

  实心（或空心的）棒状试件必须专门制备，而不是从与拉伸和压缩试件相同的平板材料上切割下来。

  在许多实验室中，没有要求的扭矩范围内的扭转试验机。
- Iosipescu剪切试验（ASTM D 5379）——必须要有标准Iosipescu剪切试验夹具。

  对于非常韧的树脂，在试件破坏之前夹具可能降至最低点（非常大的剪切应变）。

  对于非常脆的树脂，试件会在加载点处压碎可能要用加强片。

4.6.4.6 提交MIL-HDBK-17数据用的剪切试验方法

目前 MILHDBK17 正在接受通过下列试验方法产生的数据，考虑包括在第二卷内容中。

表4.6.4.6 提交MIL-HDBK-17数据用的剪切试验方法

剪切性能	符 号	正式批准，临时和筛选数据	仅筛选数据
极限强度	F^{su}	ASTM E 143和D 5379	
屈服强度	F^{sy}		
模 量	G^{m}		

4.6.5 弯曲

F_m^{fu}，F_m^{fy}，E_m^{f}

4.6.5.1 引言

如前面在 4.6.3 节中指出的，由于拉伸时关键缺陷尺寸敏感性较高，所测量的纯聚合物极限拉伸强度一般远低于极限压缩强度，因此，聚合物弯曲试件倾向于在拉伸表面或附近破坏（取决于关键缺陷位置）。这样，一般更为合理的是用如 4.6.2 节所述的聚合物基体拉伸试验直接测试拉伸强度。

因此，即使复合材料做弯曲试验，但一般不做纯聚合物的弯曲试验。由于试验试件和试验仪器简单，复合材料仍然在做弯曲试验，并不是为了获得通用的数据值，这些值往往很有限。当复合材料在类似的几何构型和载荷情况下实际使用时是一个例外。

如果要进行纯聚合物的弯曲试验，ASTM 标准 D 790（文献 4.6.5.1）可用作一般指南。

4.6.5.2 试件制备

弯曲试验试件是简单的聚合物基体矩形条，具有恒定宽度和厚度。因此，它能容易地用适当厚度的模压板机械加工得到，采用 4.2 节中所述技术和预防措施。根据 ASTM D 790 对聚合物建议的跨距与试件厚度之比为 16，并考虑每个尾端至少悬垂 10%（但不小于 6.4 mm（0.25 in）），得到试件长度。除最小宽度不应小于 12.7 mm（0.50 in）外，试件宽度不应超过支持跨距的四分之一。例如当对 2.5 mm（0.10 in）厚聚合物基体材料试验时，试验跨距应为 41 mm(1.6 in)，因此试件总长约 53 mm(2.1 in)，试件宽度为 12.7mm(0.50in)。

4.6.5.3 试验仪器和测试设备

ASTM D 790 允许采用三点或四点加载，没有指明哪个优先。要注意，对三点加载，最大拉伸应力出现在与加载点相对的局部表面。对四点加载，最大拉伸应力出现在加载点之间的整个表面上，同样是在加载点相对的表面。因此，根据关键缺陷存在更高的几率，从统计学上，能够预期四点弯曲得到的测量弯曲强度较低。但是，这些差别经常小于正常的数据分散性，特别是对于较脆的聚合物基体材料。

ASTM D 790 确实建议，试件要用圆柱支持和加载，圆柱直径可高达试件厚度的 3 倍，但不小于 6.4 mm(0.25 in)）。因此，4.6.5.2 节中以 2.5 mm（0.10 in）厚聚合物试件作为实例，圆柱直径应在 6.4 mm(0.25 in)）和 7.6 mm（0.30 in）之间。因为在目前的情况下，夹具一般带有标准尺寸的圆柱，例如，很可能是 6.4 mm(0.25 in)）或 12.7 mm（0.50 in），这样 6.4 mm(0.25 in)）直径圆柱会是合适的。在所有的情况下，目标是使用直径足够大的圆柱，以便最大限度地减少对试件产生的压痕、或由于直接处于圆柱之下的应力集中产生的局部破坏。

ASTM D 790 建议利用试验机横梁位移或试件中点挠度来测定弯曲应变及模量。还可以使用粘贴于试件中点拉伸表面的应变片。

4.6.5.4 提交MIL-HDBK-17数据用的弯曲试验方法

目前 MILHDBK17 正在接受通过下列试验方法产生的数据，考虑包括在第二卷的内容中。

表4.6.5.4 提交MIL-HDBK-17数据用的树脂弯曲试验方法

弯曲性能	符 号	正式批准，临时和筛选数据	仅筛选数据
极限强度	F_m^{fu}	ASTM D 790	
屈服强度	F_m^{fy}	ASTM D 790	
模量	E_m^{f}	ASTM D 790	

4.6.6 冲击

此节留待以后补充。

4.6.7 硬度

此节留待以后补充。

4.7 疲劳试验

用低于破坏载荷的载荷对试件的循环加载进行未增强树脂的疲劳试验验，来确定到破坏的时间或循环数。可以采用多种加载条件，包括弯曲、裂纹张开、拉伸、压缩，或拉-压交变载荷。加载经常用最小与最大载荷之比来表征，例如拉-拉疲劳，R=0.1。一般选用足够低的加载频率进行一系列试验，以避免试件发热，这种发热可能导致热引起的破坏。载荷或变形在选择的值之间循环，直至破坏，并且画出最大载荷或某些其他载荷强度的指示值与到破坏循环数对数的曲线。在几个载荷水平的每一级进行多个试验，这些试验结果的图称为 *S-N* 曲线。

因为在可预测的方法中，纤维增强复合材料的疲劳阻抗不取决于未增强基体的疲劳阻抗，关于这种试验的详细建议未包括在本手册中。复合材料疲劳试验的讨论可在 6.9 节中查到。

4.8 粘弹性试验方法

与弹性相反，粘弹性性能的试验方法涉及对这些性能时间的相关性的表征。这种时间相关性是由聚合物树脂的粘弹性引起的。可通过测量在恒定载荷下随时间而变的变形（蠕变试验）、或通过在恒定变形下测量随时间而变的载荷（应力松弛）来实施些试验；或通过使材料经受更多复杂的载荷或变形历程来确定材料响应的弹性和粘性成分。对于粘弹性材料表征，动态力学分析是循环载荷的实例。动态力学分析讨论可以在 6.6.3 节中查到。

因为在可预测的方法中，纤维增强复合材料的粘弹性或时间相关性能不取决于未增强基体的粘弹性响应，关于这种试验的详细建议未包括在本手册中。复合材料粘弹性试验方法的讨论可在 6.11 节中查到。

参考文献

4.4.3(a) Siesler, H.W., and Holland-Moritz, K., *Infrared and Raman Spectroscopy of Polymers*, Marcel Dekker, New York, 1980.

4.4.3(b) May, C.A., Hadad, D.W., and Browning, C.E., "Physiochemical Quality Assurance Methods for Composite Matrix Resins," *Polymer Eng. Sci.*, Vol 19, 1979, pp. 545-551.

4.4.3(c) Koenig, J.L., "Quality Control and Nondestructive Evaluation Techniques for Composites Part II: Physiochemical Characterization Techniques. A State-of-the-Art Review," U.S. Army Aviation R & D Command, AVRADCOM TR 83-F-6, May 1983.

4.4.3(d) Garton, A., "FTIR of the Polymer-Reinforcement Interphase in Composites," *Polymer Preprints* , Vol 25(2), 1984, pp. 163-164. 4.4.4(a) Hagnauer, G.L., "Quality Assurance of Epoxy Resin Prepregs Using Liquid Chromatography," *Polymer Composites*, Vol 1, 1980, pp. 81-87.

4.4.4(b) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "Quality Assurance of an Epoxy Resin Prepreg Using HPLC," *Materials 1980 (12th National SAMPE Tech. Conf.)*, Vol 12, 1980, pp. 648-655.

4.4.4(c) Hagnauer, G.L., "Analysis of Commercial Epoxies by HPLC and GPC," *Ind. Res. Dev.*, Vol 23(4), 1981, pp. 128-188.

4.4.4(d) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "High Performance Liquid Chromatography: A Reliable Technique for Epoxy Resin Prepreg Analysis," *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.*, Vol 21, 1982, pp. 68-73.

4.4.4(e) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "Quality Assurance of Epoxy Resin Prepregs," *Plastics in a World Economy, ANTEC '84*, Society of Plastics Engineers 42nd Annual Technical Conference and Exhibition, 1984, pp. 330-333.

4.4.4(f) Mestan, S.A., and Morris, C.E.M., "Chromatography of Epoxy Resins," *J. Macromol. Sci., Rev. Macromol. Chem. Phys.*, Vol C24(1), 1984, pp. 117-172.

4.4.4(g) ASTM Test Method D 5296, "Molecular Weight Averages and Molecular Weight Distribution of Polystyrene by High Performance Size-Exclusion Chromatography," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.4.4(h) Kowalsha, M. and Wirsen, A., "Chemical Analysis of Epoxy Prepregs - Market Survey and Batch Control," *Natl. SAMPE Symp. Exhib. [Proc.]*, Vol 25 (1980's Payoff Decade Adv. Mater.), 1980, pp. 389-402.

4.4.4(i) Lu, C.S., and Koenig, J.L., "Raman Spectra of Epoxies," *Am. Chem. Soc., Div. Org. Coat. Plast. Chem.*, Vol 32(1), 1972, p. 112.

4.4.4(j) Poranski, C.F. Jr., Moniz, W.B., Birkle, D.L., Kopfle, J.T., and Sojka, S.A., "Carbon-13 and Proton NMR Spectra for Characterizing Thermosetting Polymer Systems I. Epoxy Resins and Curing Agents," Naval Research Laboratory, NRL Report 8092, June, 1977.

4.4.4(k) Happe, J.A., Morgan, R.J., and Walkup, C.M., "NMR Characterization of Boron Trifluoride- Amine Catalysts Used in the Cure of Carbon Fiber/Epoxy Prepregs," *Compos. Technol. Rev.*, Vol 6(2), 1984, pp. 77-82. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 4 Matrix Characterization

4.4.4(l) Morse, G.A., "Primary Amine Analysis in Polymers," *J. Polm. Sci., Chem. Ed.*, Vol 22, 1984, pp. 3611-3615.

4.4.4(m) Hunter, A.B., "Analysis of Reaction Products of Polyimide by High Pressure DSC with GC/MS," *Proc. 12th N. American Thermal Conf.*, Williamsburg, VA, September 1983, p. 527.

4.4.4(n) Chen, J.S., and Hunter, A.B., "Chemical Characterization of Composites," *Polymer Preprints*, Vol 22, August 1981, p. 253.

4.4.5(a) ASTM Test Method D 2857 "Dilute Solution Viscosity of Polymers," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.4.5(b) Naoki, M., Park, I-H., Bunder, S.L., and Chu, B., "Light Scattering Characterization of Poly(ethylene terephthalate)," *J. Polym. Sci., Polym. Phys. Ed.*, Vol 23, 1985, p. 2567.

4.5.2(a) Bellenger, V., Fontaine, E., Fleishmann, A., Saporito, J., and Verdu, J., "Thermogravimetric Study of Amine Cross-Linked Epoxies," *Polym. Degrad. Stab.*, Vol 9(4), 1984, pp. 195-208.

4.5.2(b) Flynn, J.H., and Wall, L.A., "General Treatment of the Thermogravimetry of Polymers," *J. Res. Nat. Bur. Stds.*, Vol 70A, Nov/Dec 1966, p. 487.

4.5 2(c) Carpenter, J.F., "Assessment of Composite Starting Materials: Physiochemical Quality Control of Prepregs," *AIAA/ASME Symp. on Aircraft Composites*, San Diego, CA, March 1977.

4.5.2(d) Schnieder, N.S., Sprouse, J.F., Hagnauer, G.L., and Gillham, J.K., "DSC and TBA Studies of the Curing Behavior of Two Dicy-Containing Epoxy Resins," *Polymer Eng. Sci.*, Vol 19, 1979, p. 304.

4.5.2(e) ASTM Test Method D 3417 "Heats of Fusion and Crystallization of Polymers by Thermal Analysis"; *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.2(f) ASTM Test Method D 3418 "Transition Temperatures of Polymers by Thermal Analysis," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3(a) Gillham, J.K., "Characterization of Thermosetting Materials by TBA," *Polymer Eng. Sci.*, Vol 16, 1976, p. 353.

4.5.3(b) Enns, J.B., and Gillham, J.K., "Time-Temperature-Transformation (TTT) Cure Diagram: Modeling the Cure Behavior of Thermosets," *J. Appl. Polym. Sci.*, Vol 28, 1983, pp. 2567-2691.

4.5.3(c) Zukas, W.X., MacKnight, W.J., and Schneider, N.S., "Dynamic Mechanical and Dielectric Properties of an Epoxy Resin During Cure," *Chemorheology of Thermosetting Polymers*, ACS Symp. Ser., Vol 227, Am. Chem. Soc., Washington, DC, 1983, pp. 223-250.

4.5.3(d) Crozier, D., and Tervet, F., "Rheological Characterization of Epoxy Prepreg Resins," *SAMPE J.*, Nov/Dec 1982, pp. 12-16. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 4 Matrix Characterization 4-31

4.5.3(e) May, C.A., Dusi, M.R., Fritzen, J.S., Hadad, D.K., Maximovich, M.G., Thrasher, K.G., and Wereta, A., Jr., "Process Automation: A Rheological and Chemical Overview of Thermoset Curing," *Chemorheology of Thermosetting Polymers*, ACS Symp. Ser., Vol 227 Am. Chem. Soc., Washington, DC, 1983, pp. 1-24.

4.5.3(f) Hinrichs, R.J., "Rheological Cure Transformation Diagrams for Evaluating Polymer Cure Dynamics," *Chemorheology of Thermosetting Polymers*, ACS Symp. Ser., Vol 227 Am. Chem. Soc., Washington, DC, 1983, pp. 187-200.

4.5.3(g) Roller, M.B., "Rheology of Curing Thermosets: Critique and Review," in *Plastics in a World Economy*, ANTEC '84, Society of Plastics Engineers 42nd Annual Technical Conference and Exhibition, 1984, pp. 268-269.

4.5.3(h) Baumgartner, W.E., and Ricker, T., "Computer Assisted Dielectric Cure Monitoring in Material Quality and Cure Process Control," *SAMPE J.*, Jul/Aug 1983, pp. 6-16.

4.5.3(i) Senturia, S.D., Sheppard, N.F., Jr., Lee, H.L., and Marshall, S.B., "Cure Monitoring and Control with Combined Dielectric/ Temperature Probes," *SAMPE J.*, Jul/Aug 1983, pp. 22-26.

4.5.3(j) Chowdhury, B.B., "Significance of Thermally Stimulated Discharge Current for Epoxy Resins," *Am. Lab.*, January 1985, pp. 49-53. 4.5.3(k) ASTM Test Method D 2393, "Viscosity of Epoxy Resins and Related Components," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3( ) ASTM Test Methods D 3835, "Rheological Properties of Thermoplastics with a Capillary Rheometer," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3(m) ASTM Practice D 4065, "Determining and Reporting Dynamic Mechanical Properties," *Annual Book of ASTM Standards*,

Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3(n) ASTM Practice D 4440, "Rheological Measurement of Polymer Melts Using Dynamic Mechanical Procedures," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3(o) ASTM Practice D 4473, "Measuring the Cure Behavior of Thermosetting Resins Using Dynamic Mechanical Properties," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.3(p) ASTM Terminology D 4092, "Definitions and Descriptions of Terms Relating to Dynamic Mechanical Measurements on Plastics, *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.4(a) Cebe, P. and Hong, S.D., "Crystallization Behavior of Poly(ether-ether-ketone)," *Polymer*, Vol 27, August 1986, p.1183.

4.5.4(b) Blundell, D.J. and Osborn, B.N., "The Morphology of Poly(ether-ether-ketone)," *Polymer*, Vol 24, August 1983, p. 953.

4.5.4(c) Lee, Y. and Porter, R.S., "Crystallization of Poly(etherether-ketone) (PEEK) in Carbon Fiber Composites," *Polymer Eng. Sci.*, Vol 26, 1986, p. 633. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 4 Matrix Characterization 4-32

4.5.4(d) Seferis, J.C., "Polyetheretherketone (PEEK): Processing-Structure and Properties Studies for a Matrix in High Performance Composites," *Polymer Composites*, Vol 7, 1986, p. 158.

4.5.5.1(a) ASTM D 2734, "Standard Test Method for Void Content of Reinforced Plastics," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, West Conshohocken, PA.

4.5.5.1(b) ASTM D 1505, "Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, West Conshohocken, PA.

4.5.5.1(c) Ghiorse, S.R., data presented to MIL Handbook 17 Testing Working Group, Santa Fe, NM, March 1996.

4.5.5.1(d) Ghiorse, S.R. and Tiffany, J, "Evaluation of Gas Pycnometry as a Density Measurement Method," Proceedings of the 34th MIL-HDBK-17 PMC Coordination Group, Schaumberg, IL, September 1996.

4.5.5.1(e) ASTM D 792, "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," *Annual Book of ASTM Standards*, ASTM, West Conshohocken, PA.

4.5.6(a) ASTM Test Method D 3530, "Volatiles Content of Carbon-Fiber Prepreg," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.6(b) ASTM Test Method E 1131, "Compositional Analysis by Thermogravimetry" *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 14.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.6(c) ASTM Test Method D 4526, "Determination of Volitiles in Polymers by Headspace Gas Chromatography" *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.7(a) ASTM D 4672 "Polyurethane Raw Materials: Determination of Water Content in Polyols" American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.5.7(b) ASTM Test Method D 4019, "Moisture in Plastics by Coulometry," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.2.1(a) ASTM Test Method D 638, "Standard Test Method for Tensile Properties of Plastics", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.2.1(b) ASTM D 882, "Standard Test Methods for Tensile Properties of Thin Plastic Sheeting", *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.2.2(a) Odom, E.M., and Adams, D.F., "Specimen Size Effect During Tensile Testing of an Unreinforced Polymer," *Journal of Materials Science*, Vol 27, No. 7, 1992, pp. 1767-1771.

4.6.2.2(b) Odom, E.M., and Adams, D.F., "The Mechanical Response of a Thermosetting Polymer," Report UW-CMRG-R-91-104, Composite Materials Research Group, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, May 1991.

4.6.3.1(a) Odom, E.M., and Adams, D.F., "Specimen Size Effect During Tensile Testing of an Unreinforced Polymer," *Journal of Materials Science*, Vol 27, No. 7, 1992, pp. 1767-1771.

4.6.3.1(b) Odom, E.M., and Adams, D.F., "The Mechanical Response of a Thermosetting Polymer," Report UW-CMRG-R-91-104, Composite Materials Research Group, University of Wyoming, Laramie, Wyoming, May 1991.

4.6.3.1(c) ASTM D 695, "Standard Test Method for Compressive Properties of Rigid Plastics," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.3.3 SACMA Recommended Method SRM 1, "Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, Virginia.

4.6.5.1 ASTM D 790, "Standard Test Methods for Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating Materials," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.4.1(a) ASTM Test Method E 143-87, "Shear Modulus at Room Temperature," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

4.6.4.1(b) ASTM Test Method D 5379-93, "Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

第5章　预浸料材料表征

5.1　引言

高性能复合材料的可加工性和性能，取决于制造复合材料的纤维/预浸渍材料（预浸料）树脂的化学组成。一般而言，预浸料是由用 28-60 质量分数的反应性和化学上复杂的热固性树脂配方或热塑性树脂浸渍的“改性”或表面处理的玻璃、石墨或芳纶纤维组成。例如，典型热固性树脂配方可以包含若干不同类型的环氧树脂、固化剂、稀释剂、橡胶改性物、热塑性塑料添加剂、促进剂或催化剂、残余溶剂和无机材料、以及各种各样的杂质和合成副产物。此外，这样的树脂在预浸料加工期间经常是“分阶段”或部分地反应，并在运输、处理和贮存期间可以经历组分的变化。虽然热塑性塑料可能较少经历组分的变化，但聚合物相对分子质量（MW）、相对分子质量分布（MWD）和结晶形态具有对其预浸料和复合材料的可加工性和性能有较重要的影响。在树脂化学组成中偶然的或微小变化可以引起加工中的问题，并对复合材料的性能与长期性能具有有害影响。

需要现代的分析技术和关于纤维、纤维表面处理以及树脂类型和配方的详尽知识来表征预浸料和复合材料。表征涉及纤维、纤维表面和主要的树脂成分的识别与定量以及应该包括有关杂质或污染物存在的信息。对于热固性树脂和复合材料，表征应该包括预浸料树脂反应和热/流变性以及热/力学行为的性质及范围的说明。在热塑性塑料的情况下，也应分析研究聚合物相对分子质量分布、结晶度和时间/温度黏度曲线。但是，只有很少数实验室配备或具有有知识的技术人员来充分表征预浸料和复合材料，并且在发表的研究报告中很少有叙述纤维类型和树脂化学/形态中的变化如何影响复合材料的物理性能和长期性能。此外，直到最近，还认为预浸料化学组成是专利，仅推荐工艺条件，并且验收主要基于所制造试件的力学试验。本章旨在提供表征技术概述，更准确地说，对用于高性能有机基复合材料制造的树脂和预浸料材料的化学和物理表征，阐明现代化技术的应用。

5.2　表征技术——概述

按照最近的考察（文献 5.2(a)），复合材料前驱体的表征和质量保证最普遍使用的技术是：

- 高效液相色谱法（HPLC）
- 红外线（IR）光谱法
- 热分析法
- 流变分析法

HPLC 和 IR 光谱法提供单一树脂成分以及预浸料树脂的快速筛选和质量控制指纹的能力，并且它们可以被预浸料与复合材料制造者方便地使用（文献 5.2(b)-(f)）。热分析技术，如热重分析法（TGA）、差示热分析法（DTA）、差示扫描量热法（DSC）、热机械分析法（TMA）、动态力学分析法（DMA）和扭辫分析法（TBA）严格地讲不是化学分析技术；但是，它们提供关于树脂的化学组成和可加工性的有用信息（文献 5.2(g)）。同样，流变

性和介电技术经常用于评估固化期间热固性树脂的化学黏性性能（文献 5.2(h)），并且对于热固性的和热塑性树脂的工艺过程监控和工艺过程控制，越来越乐于采用这样的技术。

在第 4 章中叙述的许多化学和物理分析技术也可用于表征预浸料材料。在 5.5 节中介绍了 HPLC、IR 光谱法、热分析技术和流变性方法。

5.3 取样

预浸料一般按订货人的要求来描述，该要求可以包括制造者的商品名称、树脂类型（例如 121°C（250°F））和批号、纤维类型和形式（带、织物、无捻粗纱等）、预浸料批和卷号以及制造日期。一般也指定运发货日期和预期储存期以及推荐加工条件。通常，预浸料是以浸渍织物或单向带卷的形式发货。（对于机织芳纶和玻璃纤维，一般宽度是约 97 cm（38 in）；对于机织石墨是 107 cm（42 in）；对于带是约 30 cm（12 in）。预浸料层用薄的、可除去的塑料或带涂层纸薄膜分开，在分析研究预浸料时除去这些薄膜。

为了检验均匀性，建议从指定预浸料卷的中心和前端（要先去掉一些）的每侧剪下片段。对特殊分析或试验需要的样本数量和数目取决于树脂的均质性和预浸料纤维的均匀性。对于一些技术，如 HPLC，可能需要提供 0.5-2.0 g 预浸料的代表性样本。其他利用较小试件（10-20 mg）的技术（例如 DSC），可以要求多个试样以提供“平均”值或试验结果。

在处理与贮存期间必须小心操作，使样本不受污染或以任何方式改变。样本应该放入清洁、干燥、可密封的容器中，并仔细地贴上标签。容器决不能与样品起反应，并必须采取预防措施使预浸料不曝露于潮湿中也不使其长时间处于非冷藏状态。对于反应性的预浸料树脂如环氧树脂，建议预浸料贮存在-18°C（0°F）条件下的密封包装中。当从冷冻贮存容器中取出时，在开封以前应该使其达到室温，以防止水分凝结在样本上。

5.4 物理特性和性能试验

5.4.1 增强材料的物理描述

复合材料用增强材料的物理描述应该使用 ASTM D 3878 的标准定义来说明（文献 5.4.1）。在预浸料中，长丝应当用树脂均匀地浸湿。用目测检查应没有可观察到的微粒。

5.4.1.1 直线定位

在单向预浸料中，当使用适当的辅助工具目测检验以测量角度对准时，长丝束必须平行于预浸料的纵向，角度应在 0.5°之内。

5.4.1.2 间隙

单向的预浸料中，在长丝束之内或在长丝束之间任何间隙一般应遵守规范要求。一般指南提供如下：

- 宽度方向上应没有超过 0.76 mm（0.030 in）的间隙；
- 平均宽度 0.76 mm（0.030 in）的任何间隙长度不应超过 0.61 m（24 in）；
- 彼此成一直线和相隔不大于 25 mm（1 in）的间隙应认为是一个间隙，不管其数量多少；
- 具有超宽或超长的间隙应认为是有缺陷的，应作为做标记或替换预浸料的根据。

5.4.1.3 宽度

单向预浸料带的宽度容限应该按照规定，一般为±0.76 mm（±0.030 in）。

5.4.1.4 长度

应提供每卷预浸料的长度。应该规定对单卷预浸料的长度限制。换句话说，供应商和用户可以商定预浸料重量或每一卷面积的限制。

5.4.1.5 边缘

应该规定可接受的边缘波纹度。在用适当的直线规测量时，30 cm（12 in）长带的典型合格值应是离边缘 0.76 mm（0.030 in）。

5.4.1.6 拼接

在任何带的卷上，若工艺是连续的、在纤维或树脂批量方面没有的变化时，可以允许拼接预浸料。这样的拼接应适当地标记为一个非一致性的区域。

5.4.2 树脂含量

预浸料的树脂含量可以通过由预浸料纤维萃取的树脂测定，萃取时使用一种可完全溶解树脂材料而不溶解纤维的溶剂。在 ASTM C 613 中描述了 Soxhlet 萃取法（文献 5.4.2(a)）。ASTM D 3529 提供了测定碳纤维-环氧树脂预浸料树脂含量的方法（文献 5.4.2(b)）。萃取高相对分子质量或热塑性树脂可能要求专门的方法和溶剂。在 5.5.1 节中概述了测定环氧树脂预浸料中树脂含量的替代方法。

5.4.3 纤维含量

用于测定树脂含量的方法经常提供预浸料中的纤维含量的信息。换句话说，只要纤维不降解，可应用酸降解法（ASTM D 3171）从纤维上除去基体树脂（文献 5.4.3）。对于碳和芳纶纤维，浸提方法不是优选的，因为这类纤维易受氧化降解。5.5.1 节说明了测定玻璃、碳和芳纶纤维/环氧树脂预浸料的纤维和树脂含量的方法。

5.4.4 挥发物含量

预浸料的挥发物含量可通过 ASTM D 3530 方法测定（文献 5.4.4）。也可用热重分析（TGA）估计预浸料中挥发物的质量分数。

5.4.5 吸湿量

可用按 ASTM D 4019 的库仑分析法（文献 5.4.5）或基于 Karl Fischer 微量水分滴定法的自动湿度计测定预浸料的吸湿量。

5.4.6 无机填料和添加剂含量

预浸料树脂中无机填料和添加剂的定量测定需要十分小心。例如，可按照 5.5.1 节中说明的方法测定预浸料树脂中无机填料和添加剂的质量分数。假定有机树脂材料完全溶于四氢呋喃（THF）中，而无机填料和添加剂是不可溶解的，按步骤 6 制备的溶液可以用离心法沉淀不可溶解成分。沉淀物至少要用溶剂洗涤 3 次，干燥，然后称重。

5.4.7 面积重量

预浸料材料面积重量（单位面积的质量）可用 ASTM D 3776 规定的方法测定（文献 5.4.7）。

5.4.8 黏性和铺覆性

黏性指预浸料粘附于其自身或其他的材料表面的能力，在确定预浸料对于部件/零件制造的适合性时，黏性是一个关键因素。没有测量黏性的定量方法。经常用主观的术语如高、中和低来描述黏性。虽然没有普遍接受的测定黏性的方法，但是一些复合材料制造者使用 Monsanto 黏性测试仪来获得预浸料黏性的相对指标。铺覆性也是主观的术语，铺覆性与预浸料对于复杂表面容易操作与顺从情况有关。

5.4.9 树脂流动度

在规定的试验条件下，树脂流动度涉及预浸料树脂的化学组成、反应程度和/或形态，以及树脂含量。在加工层压板时，预浸料可加工性和树脂含量受树脂流动度的影响。试验条件（温度、压力、预浸料层数、吸胶铺层数量）取决于树脂类型。预浸料的树脂流动度可通过 ASTM D 3531 规定的方法测定（文献 5.4.9）。

5.4.10 胶凝时间

胶凝时间与热固性预浸料树脂的化学成分和反应程度有关。预浸料可加工性受树脂凝胶时间的影响，试验温度取决于树脂类型。预浸料的凝胶时间可通过 ASTM D 3532 规定的方法测定（文献 5.4.10）。

5.5 试验方法

以下方法是能用于预浸料表征的分析技术实例。

5.5.1 环氧树脂预浸料的树脂萃取法

该方法适用于测定玻璃、碳和芳纶纤维/环氧树脂预浸料的纤维和树脂含量。除非使用适当等级的溶剂，依据这种方法配制的溶液能直接用于 HPLC 分析。应遵循推荐的取样、试件处理方法和标准实验室安全规程。

1. 从预浸料片段上切割矩形试样（大约 1 g）并在分析天平上称重（±0.001 g 或更精确）。记录重量为 W_0（g）。
2. 将试件放入 25 ml 锥形烧瓶（配备毛玻璃塞）中，并加入约 20 ml THF（四氢呋喃、新鲜的、HPLC 等级、在玻璃器皿中蒸馏过的、没有加抑制剂的）。
3. 塞住烧瓶并使试样浸泡在 THF 中至少 4 h。.
4. 将烧瓶放置在涡流混合器上并搅拌 1 min。
5. 将 THF 溶液小心轻轻倒入 50 ml 容量瓶内。纤维应群集留在 25 ml 烧瓶内。
6. 加约 10 ml THF 清洗 25 ml 烧瓶中纤维，在涡流混合器上混合，并将 THF 溶液轻轻倒入含主要溶液的 50 ml 容量瓶内（步骤 5）。
7. 重复步骤 6。
8. 加 THF 以填充容量瓶至 50 ml 标记处。

9. 小心地从 25 ml 锥形烧瓶取出石墨纤维（使用镊子），将纤维包在 Kimwipes 或等效物中，放在贴标签的纸包封中，将封套放在通风橱空气流中，并使纤维干燥一夜。另一方面，可以通过把带有纤维的封套放在真空烘箱（配合适当的除水阀）中来除去残余的 THF，真空烘箱设定在 40°C 和保持真空至少 1 h。
10. 从 Kimwipes 中取出纤维并在分析天平上称重。记录纤维量为 W_f（g）。
11. 计算树脂溶液的浓度（见步骤 8）并将浓度记录为 C_0（μg/μl）。在 HPLC 数据分析中，该浓度将是有用的。

$$C_0 = \frac{(W_0 - W_f)}{0.050}\ \mu g/\mu l \qquad 5.5.1(a)$$

12. 在涡流混合器上混合树脂溶液（取自步骤 11），并立即用 0.2 μm 聚四氟乙烯膜过滤器过滤约 4 ml 树脂样本溶液进入一个清洁的干玻璃瓶内。立即盖上瓶盖以防止污染和溶剂损失。该溶液将用于 HPLC 分析。烧瓶中剩余（未过滤的）溶液可用于测定可溶解的树脂含量和不溶解物的含量（步骤 16 和 17）。
13. 计算可萃取的树脂含量和纤维含量，不对存在于预浸料树脂中和保持在纤维上的挥发物和不溶解成分进行校正。

$$\text{wt\%能萃取的树脂} = 100\% \times \frac{(W_0 - W_f)}{W_0} \qquad 5.5.1(b)$$

$$\text{wt\%纤维} = 100\% - \text{wt\%能淬取的树脂} \qquad 5.5.1(c)$$

14. 可以把玻璃纤维放入茂福炉中，并在 650 至 800°C 下加热以除去不可萃取的表面材料。冷却至室温后，再称量纤维和记录其重量为 W_f 。
15. 计算玻璃纤维预浸料中不可萃取的纤维表面材料的数值：

$$\text{wt\%不可萃取的} = 100\% \times \frac{(W_f - W_f')}{W_0} \qquad 5.5.1(d)$$

16. 不溶物含量。还可用 0.2 μm Teflon 膜（聚四氟乙烯膜）过滤器过滤按步骤 8 制备的溶液，来测定可萃取的或 THF-可溶解的树脂含量。使用一根吸移管，将一部分（例如 10 ml）滤液转入一个预称重的铝盘（重量 W_A），然后将铝盘放入通风橱以蒸发溶剂。滤过的空气或氮气流可以直接吹过盘的表面上方来加速蒸发。在除去 9 ml 或更多的溶剂后，留下油状残余树脂，可将盘放在真空炉内并在 50°C 下加热数小时以除去剩余溶剂。冷却至室温后再称盘重（W_A'），并计算树脂含量：

$$\text{wt\%可溶树脂} = 100\% \times (W_A' - W_A) \times 5/W_0 \qquad 5.5.1(e)$$

利用式 5.6.1(b)和(e)测定树脂重量百分数有差别，可以归因于在预浸料中存在挥发物和不溶解物（非纤维的）成分。

17. 不溶解物含量。不溶解物成分的量可用下面的方法测定。可以对部分取自步骤 12 的溶液进行离心以沉淀不溶解物成分。用溶剂洗涤沉淀物至少 3 次，干燥并称重。

5.5.2 玻璃、芳纶和石墨纤维预浸料的 HPLC/HPSEC 分析方法

在涡流混合器上混合树脂溶液（按 5.5.1 节，步骤 12 配制），并立即用 0.2 μm 聚四氟乙烯膜过滤器过滤约 4 ml 树脂的样本溶液后倒入一个清洁的干玻璃瓶内。

立即盖上瓶盖以防止污染和溶剂损失，现已准备好样本用作 HPLC 分析。

如果不是立即进行 HPLC 分析，样品溶液应保存于阴凉黑暗场所。如果小心存储，THF 溶液将保持稳定状态，在制备数周后进行分析研究不会对 HPLC 分析有明显影响。

5.5.2.1 反相HPLC分析

可用任何一个市场供应的 HPLC 仪器进行环氧树脂预浸料分析。推荐一种积分器/记录器或最新的 HPLC 数据分析系统用作数据采集、制图和给出报告。为简单和与大多数市场供应的 HPLC 设备相容，选择 HPLC 工作条件。

- HPLC 系统：水联合型-244 仪器带有 M6000A 溶剂输送系统、M720 系统控制器、710B WISP 自动注射系统、M440 UV 检测器和 M730 数据模块。也可使用其他厂商的类似系统。
- 溶剂：乙腈（在玻璃器皿中蒸馏的）和用取自微孔隙的 Milli-Q2（Millipore 公司，Bedford，MA）或等效水净化系统的蒸馏水配制的试剂级水。推荐用氦清除溶剂杂气。
- 柱：水联合μBondapak C18.（也可使用其他厂商的类似柱管）。
- 注射体积：10 ml
- 流速：2.0 ml/min

流动相（溶剂程序）

时　间	%乙腈	%水	曲　线
0	45	55	*
12 min	100	0	7
16 min	100	0	*
20 min	45	55	6

检测器：UV 254 nm　　运行时间：20 min.

5.5.2.2 筛析色谱法（SEC）分析

预浸料树脂的 SEC 分析可利用如上所述的 HPLC 测试设备进行。

- 溶剂：THF（在玻璃器皿中蒸馏的）。为了优化结果，应对 THF 保持净化氦气。
- 柱：IBM SEC A 型和 C 型、5 μ（来自其他厂商的柱管，如 Waters μStyragel（聚苯乙烯型交联共聚物）1000、500、100、100⇄，也是可接受的）。
- 注射体积：10 μl　　流速：1 ml/min
- 检测器：UV 254 nm　　运行时间：15 min
- 计算：把积分峰值面积转换为面积百分数（%面积）。

5.5.3 傅立叶转换红外光谱法（FTIR）

把若干滴树脂/THF 溶液（按 5.5.1 节、步骤 12 配制）置于磨光盐板（尽可能为 KBr）的表面。一俟 THF 蒸发完，就分析研究样品。用配有 7500 型计算机的 Perkin Elmer1550 或 1 700 型 FTIR 分光光度计或等效仪器，来扫描和记录表面上带有与没带有样品的盐板光谱（500-4 000 cm）。应在室温下，于纯净、干燥氮气环境中，用盐板和样品进行分析。根据样品，可以要求 100-200 光谱扫描以优化光谱分辨率。盐板上程度不同的样品沉积物也可能是必需的。绘制减去盐板光谱获得的样品光谱图、给出报告和存入计算机软盘中。

5.5.4 差示扫描量热计法（DSC）

可利用 DuPont 仪器 9900 热分析仪/控制器和 912 型 DSC 附件或等效仪器进行该试验。

- 试件：放在铝样品盘内的预浸料（10-30 mg）
- 参照物：空的样品盘
- 加热速率：10°C/min
- 温度范围：室温至 350°C
- 环境：干燥的净化氮气
- 数据处理：数据存入计算机软盘和绘制热流 d*H*/d*t*（μW/sec）-温度（°C）曲线图。
- 反应热：热分析仪提供的校准程序和积分程序来计算热固性的预浸料树脂的反应热 ΔH 。
- 玻璃化转变：可能需要一个 DSC 测定池附带的冷却装置，以便测量热固性预浸料树脂的玻璃化转变温度 *T*g，即因为这种树脂 *T*g 值一般低于室温，经常必须在 -50°C 或更低的温度开始温度扫描。可用软件程序来帮助热分析仪确定 *T*g 值。

5.5.5 动态力学分析法（DMA）

将预浸料单层切割成 1.1cm×1.7cm 试片，并且试片是装在 DuPont 982 或 983 型 DMA 附件上。用 DuPont 9900 或 1090 控制器进行测试和绘制结果曲线图。也可使用等效仪器。

- 加热速率：5°C/min
- 温度范围：室温-350°C
- 气氛：干燥的净化氮气
- 数据处理：数据存入计算机软盘和绘制储能模量和 tanδ 与温度的曲线图。
- 玻璃化转变：阻尼峰的最高温度指定为 T_g 值。
- 凝胶：当在一个窄的温度范围内杨氏模量开始急剧增大（若干数量级）时，发生凝胶。胶凝温度取决于加热速率和机械频率。因此，当报告 DMA 胶凝温度时，应该包括加热速率和频率。
- 胶凝时间：在等温模式里，通过快速加热样品至要求的温度、保持温度恒定和监控杨氏模量随时间变化来确定凝胶时间。将胶凝时间定义为模量开始急剧增加（若干数量级）的时间。

5.5.6 流变性表征法

对这个试验采用流变动态光谱仪（RDS）或等效系统。从单层预浸料上切下 3 个 25 mm 直径圆片来制备样品。把 3 个铺层叠加并放置在流变仪的平行板之间。

- 加热速率：2°C/min
- 温度范围：室温-开始凝胶（对于热固性材料）
- 气氛：空气或氮气覆盖层
- 几何形状：25 mm 直径平行板
- 间隙：一般 0.8 mm，但可以按照样本特征值调节
- 数据报告：剪切模量（储能与损耗）和绘制复数黏度与温度曲线图。

参考文献

5.2(a) Kaelble, D.H., "Quality Control and Nondestructive Evaluation Techniques for Composites - Part 1: Overview of Characterization Techniques for Composite Reliability," U.S. Army Aviation R & D Command, AVRADCOM TR 82-F-3, May 1982.

5.2(b) Hagnauer, G.L., "Quality Assurance of Epoxy Resin Prepregs Using Liquid Chromatography," *Polymer Composites*, Vol 1, 1980, pp. 81-87.

5.2(c) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "Quality Assurance of an Epoxy Resin Prepreg Using HPLC," *Materials 1980 (12th National SAMPE Tech. Conf.)*, Vol 12, 1980, pp. 648-655.

5.2(d) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "High Performance Liquid Chromatography: A Reliable Technique for Epoxy Resin Prepreg Analysis," *Ind. Eng. Chem., Prod. Res. Dev.*, Vol 21, 1982, pp. 68-73.

5.2(e) Hagnauer, G.L., and Dunn, D.A., "Quality Assurance of Epoxy Resin Prepregs," *Plastics in a World Economy*, ANTEC '84, Society of Plastics Engineers 42nd Annual Technical Conference and Exhibition, 1984, pp. 330-333.

5.2(f) Kowalsha, M. and Wirsen, A., "Chemical Analysis of Epoxy Prepregs - Market Survey and Batch Control," *Natl. SAMPE Symp. Exhib. [Proc.]*, Vol 25 (1980's Payoff Decade Adv. Mater.), 1980, pp. 389-402.

5.2(g) Carpenter, J.F., "Assessment of Composite Starting Materials: Physiochemical Quality Control of Prepregs," *AIAA/ASME Symp. on Aircraft Composites*, San Diego, CA, March 1977.

5.2(h) Crozier, D., and Tervet, F., "Rheological Characterization of Epoxy Prepreg Resins," *SAMPE J.*, Nov/Dec 1982, pp. 12-16.

5.4.1 ASTM Terminology D 3878, "Definitions of Terms Relating to High-Modulus Reinforcing Fibers and Their Composites," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.1.7 ASTM Practice D 3951, "Commercial Packaging," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.09, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.2(a) ASTM Test Method C 613, "Resin Content of Carbon and Graphite Prepregs by Solvent Extraction," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.2(b) ASTM Test Method D 3529/D 3529M, "Resin Solids Content of Carbon Fiber-Epoxy Prepreg," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.3 ASTM Test Method D 3171, "Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.4 ASTM Test Method D 3530/D 3530M, "Volatiles Content of Carbon Fiber-Epoxy Prepreg," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA. MIL-HDBK-17-1F Volume 1, Chapter 5 Prepreg Materials Characterization

5.4.5 ASTM Test Method D 4019, "Moisture in Plastics by Coulometry," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 08.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.7 ASTM Test Method D 3776, "Weight (Mass) per Unit Area of Woven Fabric," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 07.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.9 ASTM Test Method D 3531, "Resin Flow of Carbon Fiber-Epoxy Prepreg," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

5.4.10 ASTM Test Method D 3532, "Gel Time of Carbon Fiber-Epoxy Prepreg," *Annual Book of ASTM Standards*, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

第6章　单层、层压板和特殊形式结构的表征

6.1　引言

随着新的性能、可靠性和耐久性需求的提高导致硬件设计向着结构效率的高水平方向发展，复合材料的应用不断地增加。此外，官方的要求变得更为严格以确保结构的完整性被保持在适当的水平。其中，一些设计的创导者在不断增强的认识中得到结论：航空航天结构的认证或取证要求分析、测试和相关文件的广泛综合。

更进一步，由于复合材料所固有的大量的设计变量，为保证硬件合格性及鉴定过程的完善性，分析建模甚至比金属结构变得更为必要。在所有结构分析模型中所固有的特性是材料的物理和力学性能的表征数据。理想情况下，这些分析模型将允许分析人员直接根据一般（单层）材料数据库来预测全尺寸结构响应（如稳定性、变形、强度、寿命）。事实上，在设计开发（元件、组合件、部件）和全尺寸结构试验阶段以及在一般（试样）层次上的评估中均要求建立试验数据。

第6章的目的是提供表征单层、层压板的物理和力学性能试验方法的指南。

层压板是一种由一种材料或多种材料的两层或多层结合在一起而制成的产品，同时一个单层是指层压板中的一个单独的铺层或一个层片。构成每层的材料一般是由在热塑性或热固性树脂基体中嵌入碳、玻璃或有机（聚合物）纤维增强材料所组成的。虽然在复合材料中仍保持它们的原有特性，但各组分的联合提供了特定的特性和性能。

很多技术被用来表征复合材料的化学、物理和力学性能。本章的目的在于提供有关可能被用于分析和评价这些性能的技术资料。在各节中所讨论的测试方法未必适合所有类型的复合材料。现在，更多的研究工作引导去探讨增强材料和树脂的化学和形态变化如何影响复合材料的物理性能和长期行为。在可能的情况下，对于现存试验方法的限制范围也将讨论。

6.2　试件的制备

6.2.1　引言

本节对本标准中详述的试验件的加工和制备给出了一般的建议。这些建议涉及到试件的可跟踪性、试验件*的制作、试件部位、结构形式和机械加工。

用于结构设计的材料性能有效性依赖于所测试的试件质量。如果试验目的是提供不同材料的比较性信息，则其关键是要使由于试件制备所产生的变异最小。如果正要生成的数据是想要得到许用值，其目的是要反映基础材料和在生产中预期会发生的加工之间的相互作用。不论在何种情况下，必须谨慎注意试件制备过程，以便使得在加工过程中自然发生的变异为最小。试件加工应该按照 ASTM D 5687（指导试件制备的平复合材料板件制备的

*试验件是从中可提取单个试件的任意结构。这种试验件可以是一个经特定加工的板件以便开发材料性能，或者它可以是用于试验目的一组生产零件。

标准指南（Standard Guide for Preparation of Flat Composite Panels with Processing Guideline for Specimen Preparation）执行，即使非平直的试验件也能从 ASTM 指南中获益。

6.2.2 可跟踪性

应该追溯所有试件的材料批号、组号、卷号、工艺和试验件，所要求的机构可以选择要求每个试件在试验件内部位的可跟踪性。

规范或采购文件应该要求批号、组号、卷号的可跟踪性，以及批次验收试验的有关资料。建议当购入未固化材料时，要求提供所有可追溯的信息与材料一同交付，它包括卖方资格证明、验收试验结果的材料检验数据。进行研究的机构应审阅这些资料以保证在试验件和试件加工的过程中有足够可跟踪的信息。

在加工以前所贮备的预浸材料应该具有储存经历的记录，应记录诸如进出冷藏库的累积时间这样的信息。

对于试验件，应该记录其预浸料批号、组号、卷号和有关加工信息。需要在整个试件加工过程中保持的另一条信息是铺层的方向。完成这一工作的一个方法是通过使用证示线的方法，正如在下一节中所要讨论的。

6.2.3 试验件的制造

以下是制造试验件时应该考虑的重要项目条款：

1. 试验件应该按照工程图的要求或按照草图来制造。绘图的要求或草图应该详细说明:铺层材料、试验件的基准方位、铺层方位、材料和工艺规范或者等价的工艺文件以及检验要求。
2. 关键材料和工艺的识别，如预浸生产批号、组号、卷号、热压罐运行、压力或其他压实方法以及铺贴顺序等都应该进行记录。储存这些信息是为了保持试验件的可跟踪性。在取出试件后，在多余的材料上同样应该保存这份可跟踪性材料。
3. 对于每个试验件，试验件的识别码和证示线应能永久被识别。在加工手段制造模具上应该建立一个证示线以便作为在试验件上铺贴纤维方位的参考。对于手工铺层方法，在铺贴和固化过程中必须识别要保持的证示线作为基准方位。在铺上的铺层和该线之间的角度公差取决于在材料加工过程中的工艺规范。在自动化工序中，应该确定建立参考方位的其他方法。一旦建立，该证示线应该转换到试验件上，并且在试件截取过程中保持。
4. 一般推荐，对于固化试验件由边缘起始至少 25 mm（1 in）的材料要被裁剪掉。试验件的一条机加边缘可用作为它的永久保留的基准方向。
5. 需求部门（或若有需要，适当的质量保证机构）应该检查试验件。这种检查应该在试件加工之前完成，以保证它们满足控制工艺规范或适宜的等价文件中的所有要求。如果试验件不能满足全部要求，则需求机构以及当可应用时用户代表应该提供试验件的最终去向。

6.2.4 试件制造

以下是制造试件时应该考虑的重要项目条款：

1. 试件应该是从满足所有工艺、工程图和试件制图要求的范围内的试验件中截取。

2. 应该按照由需求机构提供的切割图来确定试件在试验件上的位置。如果试验件不能通过检验标准，需求机构可以选择切出一些与试验件缺陷相关的试件，得到该缺陷对代表全尺寸结构的试件响应的影响。

   注释：在确定试件部位时，考虑使用在切割操作中取出的材料。

3. 试件的识别码应该在试验设计图中被确定，在试验说明书中作为参考，且在数据表中记录。试件的识别码应该在每个试件上做永久性标记。应该注意使识别码位于试件的破坏区域以外。
4. 对于试件太小无法完全标注识别码的情况，只需在试件上标明唯一的序列号。建议应小心地将小试件置于标有试件全部识别码的口袋中。
5. 假如要知道试件在试验件中的位置，试件应在截取之前做标注，这个标注应该允许在切割后还能知道所有试件和多余材料的部位。
6. 试件的基准边应该与采用证示线规定的方位对齐。在较小的子级试验件被机械加工且同时用于制成几个试件的情况，则基准线或边缘应该利用证示线转换到这个子级试验件上。这个转换线应该相对于证示线的方位在±0.25°之内。
7. 在切割前，应该由需求机构或独立的评审者确认试件的位置和方位。
8. 试件应该按规定的适当的机加方法从所制造的试验件中截取。试件可以用不同的机加工具进行加工。通常，最终切割刀具应该被很好的研磨、硬化加工并且在高的工具速度下无摇摆地运转。切割应该使层压板的过加热最小。
9. 在选择试件类型时，应该考虑与带加强片试件相关的附加费用和机械加工。在各个试验方法中要对与试件加强相关的限制和问题加以说明。若要求粘接的加强片，应该对胶粘剂固化进行评估以确定它与复合材料体系和加强片材料（如果不同的话）是否相容。如果在粘接工艺中产生的加强片构型是不在试件构型的几何要求之内，可能要求对加强片进行进一步加工。
10. 在试件中的孔应该按照适用的工艺规范进行钻孔。
11. 所要求的任何紧固件应按照适用的工艺规范进行安装。
12. 在试验前应该对全部的试件进行检验以保证符合所采用的标准。各个试件的厚度变化应该在应用的试验方法的公差以内。当采用精密公差试验装置时，较大的变化可能引起不适当的载荷，这些变化可能表明试件加工不当（例如丢层或树脂渗出）。

6.3 浸润处理和环境曝露

6.3.1 引言

浸润处理是在后继试验之前材料曝露于一个潜在的改变性能的环境中的过程*。本节关注于承受潮湿曝露（各种类型液体中的浸泡，但特别是在潮湿的空气中）的材料的处理。当然还有很多其他类型的浸润环境。一个不完全的清单包括：次大气环境（中等的低温）、低温（很低的温度）、高温（干态）、氧化、低地球轨道模拟（包括曝露于单原子氧）以

* 非大气环境的试验是另一个课题，而对于力学试验在节 6.5.3 中论述。

及曝露于各种类型辐射之中。对于在其他环境中的处理问题，本节将不进行明确的讨论。一个相关的、但更为困难的材料浸润处理的外延与长期老化相关（例如 10 000-80 000 或更多小时的曝露），在实际的工程应用上它要求发展加速浸润处理的方法。尽管在以后的小节中将讨论用于基本浸润处理的一些非常有限的和受制约的加速指南，但长期老化过程的加速是一项前沿课题，超出了本节的范围。

不论是未增强树脂、聚合物复合材料基体或聚合物基纤维的中的大多数的聚合物材料都能从周围环境中吸收比较少、但可能很重要的水分*。假设不存在裂纹或其他通过毛细作用的途径，吸湿质量变化的物理机理通常假定是遵循 Fick 定律的质量扩散（类似于热扩散问题的吸湿在 6.4.8 节中讨论）。进入或从内部吸出的 Fick 水分扩散发生得比较缓慢，比热扩散中的热流要低几个数量级。不过，在一个潮湿环境下若给予足够的曝露时间，大量的水分仍可能被吸入材料之中。被吸入的水分可能引起材料的膨胀，特别是在较高的温度情况下，可能软化和减弱基体和基体/纤维界面，这对很多力学性能是有害的，这些问题常常成为在结构应用中设计的推动力。吸收的水分有效地降低材料的最高使用温度（见 2.2.7 节和 2.2.8 节），由玻璃化转变温度的降低可证明这个影响（于是对 T_g 试验结果特别关注）。

两种主要的材料浸润处理是：固定时间浸润处理，即将材料试件曝露于吸湿环境一个规定的时间周期；平衡浸润处理，即直至材料与处理环境达到平衡状态时试件才停止曝露。在筛选材料时，虽然固定时间浸润处理仍然是普通使用的，但这样通常导致材料吸湿状态沿厚度方向在实质上是非均匀，因此，随后的试验可被更多地认为是定性的评估，而不是定量的结果。除了某些筛选级的目的，或作为具体结构应用级试验的一部分，认为在 6.3.2 节中综述的固定时间浸润处理是不充分的或没有代表性；只有在 6.3.3 节中讨论的平衡浸润处理提供了可比较材料响应的真实评估。

当吸收的水分是可能的设计内容时，材料试验程序既应评估吸湿材料特性（扩散速率和平衡含量），又应评估平衡吸湿曝露之后吸收的水分对关键设计性能的影响。已经建立了 ASTM 浸润处理/材料性能试验方法，即 ASTM D 5229/D 5229M（文献 6.3.1），以阐述浸润处理的参数和方法，这是保证在浸润处理期间可得到均匀的厚度方向平衡**。ASTM D 5229/D 5229M 还定义了如何确定吸湿性能，并且在 6.6.8 节中更详细地讨论为此目的应用。

6.3.2 固定时间浸润处理

如上所述，固定时间浸润处理只有有限应用***，通常它不可能提供所期望的沿材料厚度方向均匀的浸润处理。固定时间方法的缺点在图 6.3.2 中予以说明，该图是模拟 IM6/3501-6 碳/环氧在 60°C（140°F）和 95%RH 条件下曝露 30 天的情况。利用已知的湿扩散系数和平衡吸湿量，绘制各种层压板厚度的计算平均吸湿量曲线图，呈现为光滑曲线。从该曲线可以看出，在这个温度下的固定期间内，尽管时间相当长，可能达到平衡的最大

---

*尽管像聚丁二烯这类聚合物不吸收水汽，使得可以不需要吸湿处理，但认为这些材料是罕见的例外。另一方面，大多数增强材料，包括碳、玻璃、金属和陶瓷等纤维系列是不吸湿的。因而，除了像芳纶等聚合物纤维外，实际上，通常假设水汽吸收仅限于聚合物基体。

**讨论集中于沿厚度的吸湿；然而，面内吸湿会局部控制边缘附近，并且，在边缘区域占总曝露面积的相当大部分的情况下，甚至可以控制全部吸收过程。

***应该特别避免固定时间浸润处理方法的例子包括：ASTM D 618（文献 6.3.2(a)），ASTM D 570 （文献 6.3.2(b)）和 SACMA RM 11－88 方法 1（文献 6.3.2(c)）。

层压板厚度是 0.89 mm（0.035 in）。对于更大的厚度，由于内部的吸湿水平将低于平衡吸湿量，沿着厚度吸湿的分布将不再均匀，6.3.3 节中的例子对此作了进一步说明。

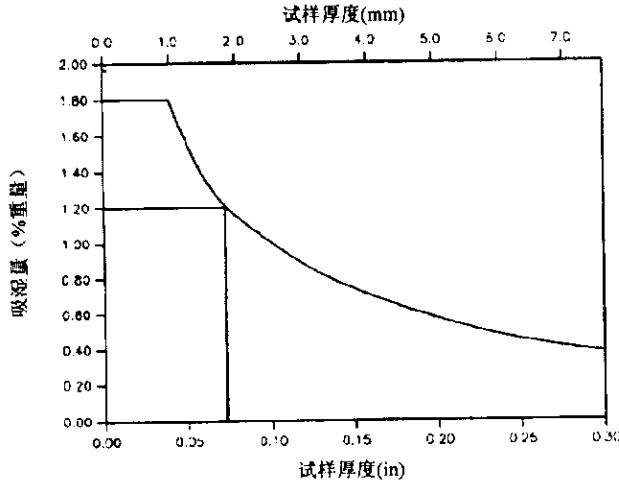


图 6.3.2　在 60℃（140℉）/95%RH 条件下经 30 天曝露后碳/环氧层压板两侧边吸湿

如 6.3.3.1 节中所讨论的，对具有较低目标相对湿度的情况，通常是设法把材料置于较高相对湿度的条件下用较短的时间来加速浸润处理，其目的是在材料中引入与较低相对湿度下进行平衡浸润处理后相同的平均吸湿量，虽然吸湿量分布沿厚度方向将会不太均匀。用图 6.3.2 说明的采用单一湿度水平、固定时间浸润处理的例子，在 78%RH 下的平衡（对于这个材料为 1.2%平衡吸湿量）只能近似 1.8 mm（0.070 in）厚度处的吸湿量。对厚度大于 1.8 mm（0.070 in）的情况，该平均吸湿量将是不够的，而对于厚度小于 1.8mm（0.070 in）的情况，平均吸湿量将高于所要求的状态。再次说明，固定时间浸润处理方法是不适当的。

从以上的例子可以看到，由固定时间浸润处理得到的总吸湿量与厚度有关。然而，由于在不同的材料中液体的扩散系数不同，即使厚度不变，固定时间浸润处理不能对所有的材料*产生均匀的的材料状态。因此，不应把基于固定时间浸润处理的试验结果用作设计值，甚至一般不应用作两个不同材料的定性比较。然而如 2.3.1.3 节所讨论的，对航空航天流体的定性评估，可以把固定时间浸润处理与弯曲试验（它对表面曝露敏感）结合用于某种目的。

6.3.3　平衡浸润处理

为评价吸湿量对材料性能在最恶劣条件下的影响，将试件预处理至设计使用（寿命终止）的吸湿量（在下文中假定为相当于在设计使用相对湿度下的平衡）再进行试验。优选的浸润处理方法采用 ASTM D 5229/D 5229M（文献 6.3.1），该试验方法包含浸润处理程序以及确定两个 Fick 吸湿材料性能：湿扩散系数和平衡吸湿量（水分重量百分比）。

ASTM D 5229/D 5229M 是一个重量分析试验方法，该方法是将试件曝露于潮湿环境中并绘出水分质量增量与经历时间平方根间的关系曲线。质量/时间平方根关系曲线的初始部分是线性的，它的斜率与湿扩散系数相关。由于表面附近材料的吸湿量开始趋向平衡，该曲线的斜率逐渐地变小，最后，由于材料的内部趋于平衡，在随后的称重之间的差别将会

*包含不同树脂含量生成的特定材料体系。

变得很小，并且曲线的斜率将接近于零，在这点上，可以说材料达到平衡吸湿量。这个过程在图 6.3.3(a)，(b)中作了说明。图 6.3.3(a)给出了试件在潮湿曝露期间总质量增加与时间平方根的关系；不同的曲线说明由于不同的温度所引起的不同响应。对于 67℃（150℉）状态（在图 6.3.3(a)中用菱形表示），6.3.3(b)给出了几个初始时间段沿试件厚度的吸湿量分布图，说明了表面附近吸湿量急剧上升，而在试件中部吸湿量增加则比较慢。

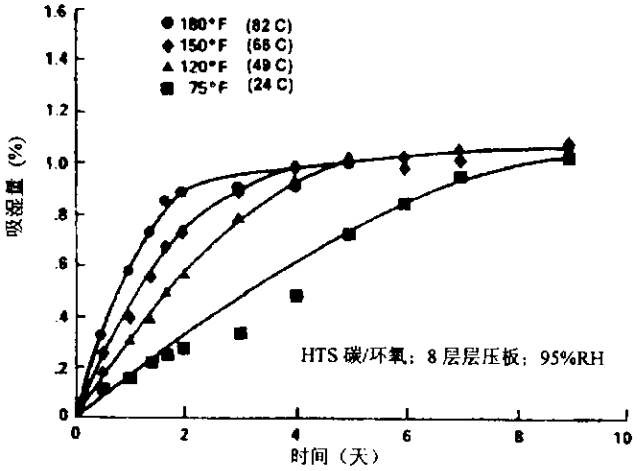


图 6.3.3(a)　典型的吸湿响应（文献 6.3.3(a)）

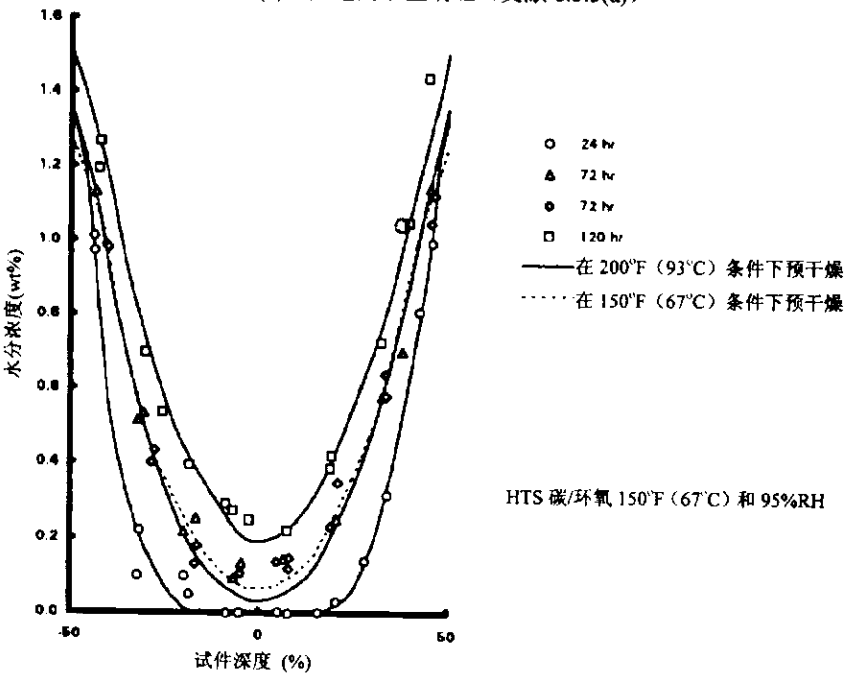


图 6.3.3(b)　沿厚度吸湿分布与时间的关系曲线（参考文 6.3.3(a)）

SACMA RM 11R-94（文献 6.3.3(b)）用文件形式给出了一个类似的、但更为局限且并非完全等效的浸润处理程序和平衡吸湿量（但非扩散系数），该方法首先拿三个试件在

85%RH 条件下达到吸湿平衡*，然后对试验的试件进行真实的 SACMA 浸润处理，当进行浸润处理试件的重量增量达到平衡吸湿量的 90%时终止，与 ASTM D 5229/D 5229M 方法处理的结果相比较，在测试试件中得到的吸湿量要低一些。举例来说，当用两种方法来评估时，具有 1.0E-06 mm^2/s（1.6E-09 in^2/s）扩散系数 2.5 mm（0.1 in）厚的板与真实的（非常长期的）1.50%平衡吸湿量会用 24 天达到 1.45%（ASTM）或用 21 天达到 1.43%（SACMA）的有效平衡。在后来的浸润处理中，ASTM 方法将用 24 天再得到相同的 1.45%吸湿量，而 SACMA 浸润处理方法将用 13 天得到 1.29%（0.9×1.43）的吸湿量。

当采用浸润处理时，相对湿度是与应用有关。如在 2.2.7.3 节中更为详细的讨论那样，MIL-HDBK-17 协调委员会已经同意飞机设计使用相对湿度的合理上限值是 85%，并且，对一个具体的飞机应用，当其设计使用吸湿量尚未具体确定时，可以采用该值。对其他应用情况，可被接受的设计使用吸湿量还没有建立。

6.3.3.1 加速浸润处理时间

由于达到平衡的吸湿处理可能需要非常长的时间，强烈希望加速这个过程。尽管认为某些含有两步骤的、加速浸润处理循环是可接受的，例如，使用一个初始高湿度（95+%RH）阶段以加速水分的增加，接着在较低的最终湿度水平（85%RH）下实现平衡，但我们必须十分注意不要选择会改变材料、变更扩散物理过程或两者均改变的加速环境。由于湿扩散系数是如此强烈地依赖于温度，故通过升高浸润处理温度来加速的想法有很大的诱惑力**。然而，在潮湿的高温下长期曝露可能改变材料的化学性质***。在 177°C（350°F）固化的环氧基材料是通常不能在高于 82°C（180°F）下进行浸润处理以避免该问题的发生；在较低温度下固化的材料可能需要在低于 82°C（180°F）下进行浸润处理。同时，虽然一个初始高的相对湿度阶段是可接受的，但曝露于增压蒸汽或沉浸在热/沸水中的这种极端情况是不可接受的加速吸湿方法，这是因为已经发现从 100%湿度****情况中会产生不同的结果。

6.3.3.2 程序提示

虽然 ASTM D 5229/D 5229M 的程序说明和要求相当全面，还要强调下述各项事宜：

- 在开始浸润处理之前，强烈建议要从文献中或根据先前的试验获得有关该材料吸湿响应的知识。
- 在吸湿性能的测量中，实际试件最初必须是干的，同时初期质量测量的精确度和计时是至关重要的。但对于材料浸润处理的需求来说，对初始吸湿量的了解未必重要，或者可以适当地同时分别用其他试件确定。因此，通常浸润处理不是从材

---

*尽管 SACMA RM 11 的 1988 版本使用不同的平衡定义，而 1994 版本采用 ASTM 的定义，但有一点不同：参考时间周期（对平衡的最小称重时间间隔）固定为 24 小时，扩散率足够高时是不会有差别的。例如，对于 SACMA RM 11R-94 优选的 1 mm（0.040 in）厚度，当水分扩散率低于 2.3E-07 mm^2/s（3.6E-10in^2/s）（数值较低）时，两种定义开始出现偏差。当扩散率低于 2.3E-7 mm^2/s（3.6E-10 in^2/s）时，由 SACMA 计算的平衡吸湿量将开始偏离 ASTM 值。这个扩散率交点是厚度的函数；对最大 SACMA 厚度 2 mm（0.080 in），交点增加到 9.3E-07 mm^2/s（1.4E-09 in^2/s）的扩散率。当确定低扩散率材料的平衡吸湿量时，应该采用对扩散率和试样厚度两者都敏感的 ASTM 定义。

**举例来说，图 2.2.7.1(a)中所示的材料，若将温度从 67°C（150°F）升至 82°C（180°F），就会使材料的湿扩散率从 2.9E-07mm^2/s（4.5E-10in^2/s）增至 6.3E-07mm^2/s（9.8E-10in^2/s），大大降低了浸润处理的时间。

***当然，“高”温的定义是相对于所研究的材料体系，不能在此严格地论述。

****在文献中报导的差别，部分可能是由于过高的浸润处理温度，但即使沉浸在中等温度的水与水汽相比，似乎会在很多聚合物中产生不同的响应。在已知某些情况中，基体成分溶解于水。

料干燥阶段开始。浸润处理也不要求在确定湿扩散系数的曝露过程初期进行精确、重复的称重。于是，不同时确定吸湿性能的浸润处理是较快的和劳动强度较低的。

- 如果要求得到吸湿性能，较快和较少工作强度的方法是建立另外两组专门的吸湿性能试件：很快达到平衡的“薄”组，和用最低的试验灵敏度可靠地获得水分增重与时间平方根关系曲线稳定斜率的“厚”组。在 6.6.8 节中对该过程有更详细的讨论。

虽然吸湿性能的确定和平衡浸润处理两者的过程是相似的，为什么在浸润处理阶段很少要求同步测定吸湿性能还是有一些实际原因的。

进行吸湿量的测量可以采用真实试件称重，或通过在它们现场的“伴随件”的称重，伴随件是从同块板上切割下来并与试件采用相同时间进行浸润处理的试件。当试件太小或太大或者包含其他材料时，例如试件含加强片或夹层结构试件，就要求伴随件。所使用的伴随件要始终伴随试件或相关的试件组经历全部接下来的浸润处理历程。

由于典型的聚合物复合材料的增重比较小（在 1%的数量级），必须选择适当的质量测量设备。对于质量大于 50 g 的较大的试件，通常精度到达 0.001 g 的天平是满足要求的。对于质量小于 5 g 的较小试件，要求读出能够到 0.0001 g 的精密分析天平。对于重量小于 5g 的试件，不推荐直接进行水分质量的监控，而应该使用伴随件来替代。

在接近浸润处理的终止时，微小的称重误差或环境箱相对湿度少量的偏差，特别是在相对湿度方面略微的降低，可能人为地使材料似乎已达到平衡状态，事实上，此时材料仍然在吸湿。温度越低（较低的扩散系数），这些误差变得越重要。尽管由 ASTM D 5229/D 5229M 表述了平衡的文字定义，鉴于存在这些试验误差的可能性，明智的工程师应完成下列工作：

- 即使材料在满足平衡定义之后，要审查环境箱的记录以确保在基准时间周期（称重时间间隔）中没有出现环境箱内相对湿度的降低。假如发现这种降低已经发生，要继续曝露直至环境箱达到稳定，再进行第 2 项。
- 即使材料在满足平衡定义之后，继续曝露，并要表明满足连续几个基准时间周期的准则。

假如所要求的基准时间周期并不能与合理的人为称重的时间表相匹配，于是可以采用一个更为有规律的时间间隔，并且 ASTM D 5229/D 5229M 要求（在基准时间周期内质量变化小于 0.01%）按比例地调整时间间隔。例如，如果对于平衡所要求的基准时间周期被确定为 115 000 s（32 小时），则试样在 24 小时间隔或是 48 小时间隔后秤重，调整的质量变化要求分别为从 0.01%-0.0075%（24/32×0.01）或 0.015%（48/32×0.01）。

尽管许多较新的模型有固态控制，但大量环境箱是通过监控“干球”（真实的）和“湿球”（湿度降低）温度来控制环境箱的湿度，环境箱的湿度是根据由厂家提供的表格或换算法来转换成当量相对湿度。这些环境箱控制相对湿度的能力取决于温度计读数的精度。在这些环境箱内特别重要的是定期清洁贮水槽、置换纱芯以及保持纱芯与湿球温度计之间适当的接触（文献6.3.3.2）。控制干球温度以及干球和湿球温度差的环境箱在改善环境箱相对湿度的控制上通常优于控制干球和湿球温度。

如果包含干燥步骤，不论是在浸润处理之前作为起始步骤或是具有烘箱干燥实验步骤的一部分，应当心避免出现可能在材料中产生热裂纹的过高的干燥温度和高热偏差。

对于一个特定材料和相对湿度，另一种形式的平衡浸润处理是利用平衡浸润处理的试验数据，来建立达到平衡所要求的最短曝露时间与层压板厚度间关系的表格或绘制的曲线图。这个方法要求进行一些前期试验和计算，但省略了许多否则会要求的重复称重。必须保持环境箱环境的连续记录，以证明得到合适的曝露。

6.4 测试仪器及标定

6.4.1 引言

对于复合材料的试验与表征，可重复地精确测定变形和位移是至关重要的。本节将讨论用于应变测量的各类测试仪器，并且针对各种试验类型、材料形式、试验条件和数据要求，提供有助于选定适当方法的指南。为了生成可被包含在MIL-HDBK-17中的数据，仅仅那些分类于ASTM E 83类型B-2或更好的引伸计是可以接受的（文献6.4.1）。

6.4.2 测试用试件尺寸测量

6.4.2.1 引言

事实上所有力学性能试验要求进行测试试件的尺寸测量。测量的类型随具体试件的几何形状和试验要求而改变，可能包含试件长度、宽度、厚度、标距、孔径和紧固件直径等。所要求的精度通常由试验方法或规范规定，但一般取决于是如何进行测量的。某些测量是提供简单的信息，而其他的一些测量值用于计算（例如，将载荷转换至应力），还有一些测量需要用来证明所要求的几何形状的符合性。以下 5 节讨论（按照精度递减的顺序）通常用于测量试件长度的各种装置，接下来的一节有关专用的孔径测量装置，最后一节是讨论尺寸测量装置的标定。

6.4.2.2 标定显微镜

在目镜中带有标定刻度的显微镜对测量小试件尺寸能够提供非常精确的手段。采用放大倍数在 50×-200×范围内的显微镜通常能获得小至 2.5 μm（0.0001 in）的分辨率。虽然这个技术通常比千分尺测量更消耗时间，但还是存在一些只有光学方法可供选用的情况。例如，在试验期间标距部分破坏以后，含加强片试件的厚度可能成为问题，用光学方法可以测量和/或证实粘接加强片下面仍然完整的层压板厚度。在标定显微镜下，能够容易观测并测量加强片胶层之间的层压板厚度（尽管在质地粗糙的试件上存在偏差）。然而，除了这样的特殊情况外，通常直接用千分尺测量更为可取。

6.4.2.3 千分尺

千分尺是测量小尺寸的最普通的精密仪器。虽然有些型号的测量值可达到数英寸，或甚至数英尺，但它们一般仅能在 25 mm（1 in）的间距内连续测量，而对于不同的间距则要采用接杆。为此，对测量大于 25 mm（1 in）的尺寸，采用卡钳常常更为方便。

标准的 25.4 mm（1 in）千分尺*是测量试件厚度最通用的仪器。对于宽试件，测量距试件边缘几英寸或更远处的厚度有深度延伸的千分尺。读数可能是刻在管状物上的刻度（选

*注意到在本节中提供的 SI 相当尺寸是可变换的（Asoft=conversion），即提供了用于测量仪器和刻度的 SI 尺寸，但尺寸未必需要变换到 SI 标准尺寸。

择带有游标刻度的）、机械数字显示或电子数字显示。大多数仪器最小刻度是 0.0001 in（0.0025 mm），并且通常估计到第五位小数。

有几种类型的测量面，一般归纳为四种：平面、球面、刀形和点。在给定仪器上的两个面可能为相同或不同的类型（例如一个面平直和一个面为球面）。在复合材料的应用中不推荐点式面，因为它们可能穿透表面（点式表面一般用于测量螺纹的根部直径）。刀形面（刀刃）对测量短标距试件上粘接加强片之间的试件厚度很方便，然而，应仔细检查这种试件在标距上是否存在加强片的胶接剂。如果存在胶接剂，测得的层压板厚度会错误地变厚。

平面和球形（球）面适合于大多数试件的宽度和厚度测量，当在这两种表面类型之间选择时，应该考虑层压板表面的质地。对于“玻璃样光滑”的表面，双平面、双球面或球面-平面均适宜，然而，假如表面是有纹理的（例如由于粗糙的机织织物，或来自加工过程中的剥离层），一个平直表面会接触到纹理上的“小丘”，测量结果值会错误地扩大。因此优先使用能够置入纹理“谷底”或压住“小丘”的球面。虽然误差的百分比随给定的表面条件而变化，但对于厚试件这点通常并不重要。然而，对于薄（2-3 层）试件，测量可以造成重大的结果偏差，因为利用双球面和双平面的千分尺所得出的测量值之间一般可以观测到 0.038-0.076 mm（0.0015-0.0030 in）的差异。一面光滑和另一面有纹理的试件可以用球面/平面千分尺来估测。

除了独立的千分尺外，一些试验机将千分尺集成进入其体系之中，使得试件尺寸直接变为电子信号输入。该系统通常提示用户将试件置于千分尺中以便测定试件的宽度、厚度和可能的其他测量，然后利用这些测量值进行计算。因为测量面属于前面所讨论的分类，相同的考虑是适用的。

6.4.2.4 刻度卡钳

刻度卡钳是具有平行的、类似钳夹的测量面和用于读出在固定面和移动面之间距离刻度数的装置。尽管有测量直至几英尺尺寸的型号，但对于复合材料试件测量，长度 15 cm 和 30 cm（6 in 和 12in）是最通用的。刻度可以刻在卡钳的长度方向，或可采取刻度盘或数字电子读出器。虽然一个刻度盘（带有辅助的游标刻度）和数字读出器具有 2.5μm（0.0001in）的分辨率，但其精确度更为通常地限定于±0.025 mm（±0.001 in）。

卡钳可方便地用于测量试件的长度和宽度，特别是在 2.5-30 cm（1-12 in）范围内，因为这个范围通常超出为 1 in（25 mm）的千分尺的容量。此外，一些卡钳有测量尖端（尖嘴），设计这样的测量尖端可以进行内部以及外部测量。具有这样的设计，卡钳可以用于测量孔的直径（例如，在开孔的拉伸和压缩试件中）。一般来说，设计用于内部测量的尖嘴能够适合 6.35 mm（0.25 in）或更大的孔，有些能够读出小至 3.18 mm（0.125 in）的内部尺寸。

卡钳可能不特别适于测量试件的厚度，特别是当试件表面是有纹理的情况。对于这样的测量，一般宁愿采用球面仪器（见上述 6.4.2.3 节），而不愿采用卡钳（它具有平面或刀刃测量面）。

6.4.2.5 精密刻度尺

有各种长度的精密刻度尺，最普通的是 15 cm 和 30 cm（6 in 和 12 in）。这些工具类似于尺子，通常是由钢制成并且使其更为精密和具有较细的刻度。每个仪器一般有四个刻度，沿着每条边的边缘有一个。最细的刻度通常是 0.4 mm 或 0.25 mm（1/64in 或 0.01 in）。

0.25 mm（0.01 in）的读数一般要采用放大镜去清楚地辨别刻度。尽管可用精密刻度尺进行要求任何这种分辨率的测量，但通常用卡钳或其他仪器更方便。

6.4.2.6 尺子和卷尺测量

这些工具通常刻度为 1.6 mm（1/16 in），虽然有些，至少在它们总长度的一部分的最小刻度是 0.79 mm（1/32 in）。它们一般用于以描述为目的而记录的测量，但不用于更为精确的测量。例如，尺子可能被用于鉴别两组试件：一组是具有 4 in 名义标距长度，另一组是具有 6 in 名义标距长度。

6.4.2.7 专用孔径测量装置

正如在前面 6.4.2.4 节中所指出的，虽然有一些卡钳设计成可用于内径测量，但也有用于这种测量的专用仪器，这些仪器包含伸缩式计量器、小孔计量器和标定销。伸缩式计量器具有两个弹簧加载的柱塞以形成“T”顶部的“T”形装置，在柱塞端部的测量面是曲的，它自身的中心靠着孔的内壁。一旦进入适当的位置通过转动一个在“T”干上的有凸边的螺杆锁定时，从孔缩回仪器。用标准的千分尺测量两个被锁定的柱塞面之间的距离来确定孔的直径。伸缩式计量器的缺点是：(1)为覆盖孔尺寸所在的区域必须采用几个测量器构成的一组；)由于其尺寸，没有测量小于 8 mm（5/16 in）直径孔的测量器。

除了用一个可调整的开裂球代替柱塞以外，小孔计量器与伸缩式计量器相似。该开裂球置入孔内，并通过转动仪器筒来使其扩大直至球面正好接触到孔壁。于是，该仪器从孔中移出，以伸缩式计量器同样的方式来利用标准的千分尺测量。这些测量器也必须成组使用以覆盖孔的尺寸范围，与伸缩式计量器不同的是，它们可用于测量小于 3.175 mm（1/8 in）直径的孔。

数套已知直径的标定销也可以用于测量孔的直径。不同尺寸的销子插入孔内直至紧密接触但不要太紧，即获得适合的状态。于是，孔的直径就取自销子直径。事实上销子对任何尺寸都是可用的，同时一般以 0.00127 mm（0.0005 in）增量来分等级。需要一个非常广泛的组合以覆盖孔名义尺寸的区域。

就可用的仪器来说，对于测量复合材料试验用试件的孔径，卡钳或小孔计量器是最有用的和经济的。

6.4.2.8 尺寸测量仪器的标定

为了保持诸如千分尺和卡钳等力学测量仪器所述的精度，必须周期地对其进行标定。一般而言，在高等级的（ASTM，ANSI 等）美国标准中还没有详细的标定方法可用。一般采用计量块来标定这些仪器，在公司内部规范中包含一些特定的方法。某些 ISO 文件论述这方面的问题，读者可参考在 ISO 技术委员会 3 权限下制定的有关限制和配合方面的标准以及 ISO 10012-1（文献 6.4.2.8）。

6.4.3 载荷测量仪器

6.4.3.1 引言

可重复地准确测量载荷（力）的能力是复合材料试验和性能确定的关键。本节将讨论各种用于载荷测量的仪器，以及提供保证这种测量精度的指南。载荷测量仪器的分类和确认将在以下文件中讨论：ASTM E 4“试验机的力确认的标准操作”（文献 6.4.3.1(a)）、

ASTM E 74“用于检验试验机力指示的测力仪器标定的标准操作”（文献 6.4.3.1(b)）和 ASTM E 467“在轴向加载疲劳试验系统中检验有关位移的常幅动态载荷的标准操作”（文献 6.4.3.1(c)）。加载设备的标定也在 ISO 5893 的“橡皮和塑料试验设备一拉伸、弯曲和压缩类型（常值速率往返移动）一说明”（文献 6.4.3.1(d)）中进行了讨论。

注释：在试验机的情况中力定义为磅-力或牛顿，1 磅力是为 1 磅质量提供 9.80665 m/sec^2（32.1740ft/sec^2）的加速度所需要的力，1 牛顿是为 1 千克质量提供 1 m/sec^2 的加速度所需要的力。这个力是用于确定在试件上所加的载荷。通常在力学试验说明书和 MIL-HDBK-17 中载荷与力是可以互换的。

6.4.3.2 测力传感器

在力学性能试验室中最为通用的力测量仪器类型是应变计测量的测力传感器。这些仪器由弹性元件组成，在载荷作用下该元件以均衡、一致和可重复的方式变形。在测力传感器中的弹性元件配有应变计用以测量变形。用各种记录装置和数据采集系统可容易地读出应变计电路的输出。测力传感器中的应变计形成一个精细地平衡的全桥，因此用一个参考的激励电压就能标定测力传感器，此后电桥电路的输出将只取决于外部调节电路。因此，当没有载荷作用时，则要保证电桥处于平衡条件（在热平衡条件下）。当环境可能要求对测力传感器进行加热和/或冷却时，应该避免具有内部信号调节电路的测力传感器。在测力传感器的设计或选择中的一个重要因素是测力传感器抵抗由于不适当但又不可避免的误操作所形成的错误输入的能力，例如在试验中偏轴加载和测力传感器的加热/冷却。测力传感器抵抗偏轴加载和热飘移的能力是取决于弹性元件的设计及传感器中应变计的位置。（参考 6.4.2.4 节中有关应变计部分）。一个很好设计的测力传感器可以具有 0.01%（测力传感器的全量程输出）的可重复性，以及每华氏度 0.001%（全量程）的热稳定性。

6.4.3.2.1 设计和规范考虑

应该选择测力传感器使其能够提供与要求的数据相一致的最高精度。在试验中的关键点（模量弦点、破坏载荷）处，指示载荷精确到实际载荷的 0.1%以内将会保证高质量的试验结果。有多种多样的测力传感器构造形式：

- 弯曲梁测力传感器是由简单悬臂梁构成,并粘贴有测量挠度的应变计。该梁可以是利用单应变计（四分之一桥）、双应变计（半桥）或四个应变计（全桥）来进行测量。当采用双应变计时，它们以这些应变计的应变相加的方式连接，有效地使电路的灵敏度提高一倍。当采用四个应变计时，可以将它们安排得使之达到四倍的灵敏度，或对在梁中应变梯度的非线性进行补偿。若成本问题是一个考虑因素，当测力传感器存在破坏的可能性时，拟采用弯曲梁测力传感器。当正确使用时，采用这种类型的测力传感器是可能达到高的精度。“S”型梁测力传感器是特定形式的弯曲梁测力传感器，它允许以低廉的测力传感器设计来实现“同轴”加载。弯曲梁测力传感器能够抵抗梁的扭转载荷和热效应，但是在高应变处，当还要得到可重复的结果时，一些设计有明显的非线性。
- 剪切梁测力传感器，是一种最简单的形式，它利用工字梁元件腹板上均匀的剪切受力状态作为测量表面。精确的测力传感器通常是利用径向对称布局的 8 或 12 件剪切梁类型的力学元件，它们与利用剪切梁中的 4 件设计良好的电桥电路组合，使得测力传感器可以抵抗偏轴载荷。
- 环形测力传感器，实质上是所谓的检验环，是由一个环形弹性元件构成，当在径

向相对的点加载时环形测力传感器变形为椭圆形。这种类型的测力传感器可以具有高的精度，但它对于抵抗偏轴载荷方面却很差。

6.4.3.3 其他载荷测量系统

下面对于有时要使用的其他类型载荷测量设备作简要的概述。这些系统一般用于特定的用途，或基于较陈旧的技术，故不推荐作为获取 MIL-HDBK-17 数据之用。

LVDT 装置——采用一个 LVDT（线性变量微分变换器，见 6.7.2.4.4）作为应变测量设备的测力传感器有时也可见到。这种类型的测力传感器可以像粘贴应变计类型的传感器一样精确，但稍微有点粗糙。

固态载荷传感器——为测量冲击时的载荷，此时应变变化率超出了粘贴箔式应变计的测力传感器精确指示载荷的能力，采用压电或压阻半导体应变测量元件（见“应变计技术”（文献 6.4.3.3））作为专用的测力传感器。半导体应变计是对温度变化特别敏感，并会随着温度的变化迅速产生零位偏移，因此，它们只能用于热平衡状态。

Bourdon 管等——在日常应用中还有较陈旧的试验机，它们依赖于 Bourdon 管和其他设计巧妙的机械装置来指示载荷。Bourdon 管是一个按螺旋、半圆形或螺旋状形成并填充了液体的密封管。在增压后，液体使管子产生可再现的移动，机械地作用于读出仪器或指针上。应该只依赖这些试验机上的指示刻度盘作为载荷水平的相对指示。在所有的情况中，这些试验机都应重新配备电子测力传感器和更易标定的指示器，以达到更高的精度。

标定的配重——蠕变试验机通常是不等臂的静止-配重加载类型。用于这些机器上的配重一般是铸铁并且应该按照 ASTM E 617 的 6 级来标定（注意，这是在 ASTM E 617 中给出的最低精度等级并有 0.01%的公差）。臂长测量和刀口状态应该按试验机制造商的说明书来校验。

杠杆——具有集成杠杆系统和梁平衡或复式刻度盘上指示载荷的刀口的试验机应该重新配备电子载荷指示器以简化标定和数据采集。

6.4.3.4 仪器和标定

试验机的标定（更正确地，校验）和测力传感器需要“A 级”载荷标准。那些标准一般是高精度的测力传感器或测力环。载荷标准必须具有不超过被测载荷 0.25%的不准确度。因此，可能用于标定的最小载荷至少必须是该不准确度的 400 倍。ASTM E 4 允许用于试验的载荷装置的不准确度达到满量程的 1%。ASTM E 74 含有标定载荷测量装置的详细说明和分析，任何负责标定这些装置的人员都应该对其进行仔细研究。满足 ISO 要求机器持有一个允许误差的滑动刻度，最大允许误差对 A 级试验机为满量程的±1%，而对 B 级为±2%。按 ISO 5893 标定的测力传感器，等级 A 满足了 ASTM E 4 的测力传感器要求，尽管 ASTM E 4 对试验机有一些未包含在 ISO 标准中的附加要求。ISO 和 ASTM 两个标准均包含其他细则，这样使得它们是不能严格地进行相互转换。

6.4.3.5 预防措施

为保证测力传感器读数的精度应该遵循某些预防措施。

- 在所有的情况中，仔细阅读商用测力传感器的说明书或仔细分析自制测力传感器的电桥电路。可能会进行非线性输出的曲线拟合，但应该谨慎小心以确保拟合方程的正确并且要正确地应用。

- 测力传感器应该按规定的时间间隔来进行标定，以按 ASTM E 4 和 E 74 检验它的性能。标定设备应该跟踪国家标准例如 NIST，并且它的读数和精度应该超过被标定的设备的读数和精度的 4 倍或更多。
- 无论什么情况，只要发生非正常加载条件，例如超载、冲击或弯曲（偏轴加载），测力传感器的标定应被重新确认。参考适用于超载公差的各个测力传感器的说明书。
- 对没有明确规定试验期间温度变化容差的测力传感器，应该假定其在温度升高或降低情况下是不精确的。因此，应该注意把测力传感器及其电缆与温度变化和/或温度梯度隔离开。
- 必须仔细确保施加载荷的轴线与测力传感器指出的加载轴线尽可能地接近。应该避免偏轴加载，偏轴加载可能造成读数的不精确和可能对测力传感器或加载系列的其他零件造成损伤。
- 一般来说，应该确定将用于给定试验的测力传感器的最大量程，使得预估的破坏载荷在测力传感器最大量程的 15%和 85%之间。如果期望的载荷小于测力传感器最大量程的 15%，用户应该确保在试验范围内已经完成了适当的标定。这种标定可能超出 ASTM E 4 的常规标定范围，所以可能需要作特殊的安排。当所用的仪器允许测力传感器的“量程修正”，例如当 100 000 lb 测力传感器通过放大可能在 10 000 lb 的范围内应用的情况下，该测力传感器必须在作为 10 000 lb 容量的测力传感器的那些环境下单独标定。应该对所有提供的“量程”进行类似地单独标定。在预期的数据大于最大量程的 85%时，不赞成在试验中使用该测力传感器，这是由于一个无法预料的的高载荷可能超出测力传感器的最大量程。

6.4.4 应变/位移测量设备

6.4.4.1 引言

对于复合材料的试验与性能表征，可重复地精确测定变形和位移是至关重要的。本节将讨论用于应变测量的各种类型的测试仪器，并且针对各种不同的试验类型、材料形式、试验条件和数据要求，提供有助于选定适当方法的指南。在 ASTM E 83 中讨论引伸计的分类和鉴别（文献 6.4.1）。引伸计的分类取决于最大预期误差。A 级具有最小预期误差，以下依次按顺序排列为 B-1，B-2，C，D 级。对 A 级的标定是非常难于完成的，仅有那些分类于 ASTM E 83 中的 B-2 级或更好的引伸计是可以被接受用以获得包含在 MIL-HDBK-17 中的数据。

6.4.4.2 LVDT（线性变量微分变换器）挠度计

LVDT 是电磁设备，该设备的设计是将铁磁芯放置在一个变换器（由三个线圈构成）内部，从而产生一个线性交流电压和相位变化，这个信号被解调生成一个直流输出。LVDT 适用于线位移和角位移两种情况。可得到长度在 3 m（10 ft）以内的 LVDT，它们的输出线性度约为 0.1%，而其最大分辨率为 25 μm（1 μin）。给定的 LVDT 精度通常限制在总量程的 0.01%。将 LVDT 的铁芯与试件接触时它可直接作为挠度计来使用；它可以与一个连动装置一起使用，或者可以把它插入接触式引伸计之中。高温 LVDT 可以被用于铁芯达到居里温度的情况，但是，通常利用延伸段或连动装置以避免将它们曝露于恶劣的环境之中。

必须对 LVDT 在使用过程中将要曝露的温度下进行标定。

6.4.4.3 接触式引伸计

接触式引伸计和压缩计是用来测定试件上两点间相对位移的仪器。接触式引伸计必须与试件表面夹紧，其夹紧的方式要使接触点不产生滑移且引伸计不会对试验产生影响。引伸计是比较复杂的仪器，该仪器依赖组合应变计或 LVDT 将其接触点的相对位移转化为线性相关的输出。现有引伸计的固定标距范围为 12-15 mm（0.500-2.00 in），而其输出的线性度为 0.1%，且它们可以分辨直至 25 μm（1 microinch）的位移。此分辨率不具有精度或标定的含意。一个制造得很好的接触式引伸计能精确到满量程的 0.01%，并且可以测量应变达到 1.00（100%）。接触式引伸计的可重复性依赖于维持初始标距为常值，因此，当使引伸计与一个试件相接触时，在零刻度的情况下总是采用该标距。

可以获得用于液氮温度下的接触式引伸计，而对于延伸的时间周期，其他的引伸计则可安全地曝露于温度达 260°C（500°F）的试验条件下。可采用延伸段或连动装置使得可以在曝露于温度高达 1 600°C（3 000°F）的试件上远距离使用引伸计。ASTM E 83 要求在引伸计的使用温度下对其进行标定。每当引伸计受到超出正常范围的变形，或处于恶劣的环境下，或受到野蛮地操作以及刀口边缘或触点的位置改变时，必须对引伸计标定进行校验。

6.4.4.3.1 接触式引伸计的应用

当存在以下一个或多个条件时，与粘贴式应变计相比，优先选用引伸计：

- 单个粘贴式应变计的价格超出相当的引伸计的价格。
- 层压板的构型会引起粘贴式应变计覆盖处的非均匀应变场。
- 应变将超出粘贴式应变计的实用范围（0.03 或 3%）。
- 要求测量一个复杂结构或组装件的净变形（例如胶接或螺接的连接）
- 当试件浸润处理或预浸润处理不允许进行应变计适当粘贴的情况。

在下列情况下不推荐应用引伸计：

- 配有触点或刀口边缘的引伸计可能引起缺口敏感材料的提前破坏。
- 对于应变的快速改变，大惯性质量的引伸计有着不可预知的响应。
- 当与引伸计接触的试件突发破坏时将导致引伸计的损伤以致要求对其进行维修和重新标定或更换。

6.4.4.4 粘贴式电阻应变计

应变计是由精密蚀刻的金属箔或丝（通常置于聚酰亚鞍薄膜基底上）所形成的结构，它们是被永久性地粘贴至试件表面上致使该表面的应变场立即传递至应变计。在应用中，应变计构成惠斯登（Wheatstone）电桥的一部分，它使应变作为格栅电阻变化的函数来进行精确地测定。应变计由合金（康铜、高电阻镍铬合金）制成，此类合金变形超出比例极限时，呈现出应变灵敏度（电阻对长度变化之比）的变化比较小（文献 6.4.4.4）。

应变计具有固有无限分辨率（受到应变计系数校定精度的限制），其精确地测定应变微小的变化的能力仅仅受到所采用仪器的制约。

应变计是多用途的：

- 应变计可以直接用于试件或可以用来构成引伸计或梁弯曲挠度计。
- 几个应变计可以放置在一个试件上的不同方位以便用于同时测定多轴性能。

- 几个应变计可以放置在一个试件上的各种不同的位置而具有相同的方位以便检测应力集中问题。

6.4.4 4.1 应变计的选择

应变计有多种类型，如果要得到精确的和具有重复性的结果，选择适当的应变计是至关重要的。聚合物基复合材料是比较差的热导体，因此，相对于 120Ω应变计而言，通常选择 350Ω或电阻值更高的应变计，对于给定的应变，较高电阻的应变计在低电流下工作，这样可使自-加热而产生的误差较小（文献 6.4.4.4.1(a)）。

因为在机织复合材料中应力是通过比较大的重复单元的相互作用来传递，应变计必须足够大以使与机织有关的任何应变梯度形成一体。对于复合材料试件所选择的栅格尺寸一般将比类似金属试件的要大。鉴于试件尺寸限定了所采用的应变计的尺寸，通常采用的栅格尺寸为 3.17，6.35 和 12.7 mm（0.125，0.250 和 0.500 in）。由于边缘效应是难于预测的，要避免将应变计安装到非常紧靠试件边缘之处。最后，要将应变计优化地制成在限定的温度范围内的功能元件，而且留意生产商关于不同类型应变计的最大工作温度的推荐建议是重要的（文献 6.4.4.4.1(b)）。

6.4.4.4.2 表面准备和应变计的粘贴

如果要获得可靠的数据，必须仔细评估表面制备和粘贴技术。这些技术的细则将在 6.2 节和文献 6.4.4.4.2 中得知。当打磨复合材料时，要特别小心以使得表面层纤维受到最小损伤。应注意到，对于热塑性材料应变计的粘贴特别困难。

6.4.4.4.3 应变计的电路

一个或几个应变计在一个电阻电桥中起着可变桥臂元件的作用，如图 6.4.4.4.3 所示的具有 4 个桥臂的惠斯登电桥是最为通用的。该图表示一个 1/4 电桥，具有单一主动的测量片和 3 个丝状结构（此 3 个丝状结构消除电路中引线电阻的影响）。P+和 P-表示电桥的激励电压，S+和 S-表示输出信号，R1 和 R3 为等值的固定电阻。当 R2 和 RG（应变计的电阻）相等时，电桥处于平衡，且在 S+和 S-之间无电流通过。在相邻桥臂（如 R2 和 R3）上的数值相等、符号相同的电阻变化对于电桥来说为零输入。在相对桥臂（如 R1 和 R3）上的数值相等、符号相同的电阻变化则是在数值上被相加。这个结果在应变测量中是有用的：在第一种情况中，可以将一个测量片放置在试件材料的一备用件上，且如果该第二个测量片是位于回路的 R1 处（故与 RG 相邻），然后使之处于试验条件下，它将对试件和主动测量片的热响应进行补偿。在称之为半桥的第二种情况中，一个试件具有两个都置于同一常应变场的主动测量片，第二个测量片位于 R2 处（故与 RG 相对），于是测量片输出将被相加，读数除以 2，则给出具有两倍分辨率的平均应变。接触式引伸计通常采用四个测量片按照“全桥”形式来进行

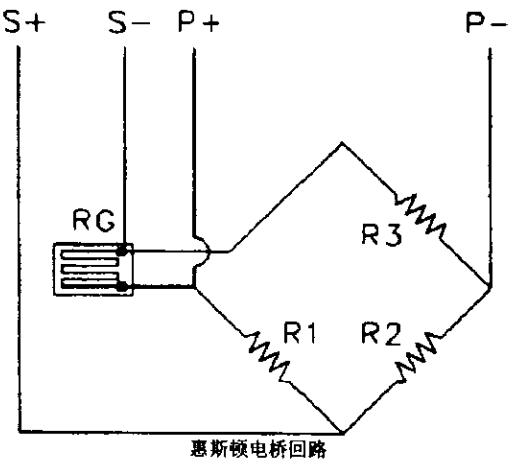


图 6.4.4.4.3 惠斯顿电桥

设计，它通过有效地相加所有桥臂的输出而使电桥能够更好地被利用（设置相邻的桥臂使之处于等值和反号的应变场）。在被动桥臂存在的所有情况中，它们被称作为“全桥”，并且成为与应变计联合使用仪器中的必要部分。

6.4.4.4.4 应变测量仪器

应变计所采用的仪器（以及采用应变计作为其主动测量元件的引伸计）通常是恒定电压类型。给电桥电路提供在 2-10 V 间的稳态直流激励电压，而输出电压在微伏量级。采用具有低漂移和优良稳定性的高增益的仪表放大器来使输出达到伏特量级。

在仪器中激励和放大器的组合称为调节器。现有的调节器具有固定的或可变的激励电压。可采用可变激励调节器在高激励电压（高信号燥声比）下达到高分辨率，或在低电压下扩展应变范围。对于用在不能有效进行热散逸的聚合物基复合材料上的 350Ω应变计，避免采用高于 10V 的激励电压从而避免应变计的自-加热，这是一个好的建议（文献 6.4.4.4.4）。具有固定激励电压的调节器通常提供可变的放大器增益来改变输出比例。利用一个固定电压调节器使得应变计出现过热的可能性较少。

6.4.4.4.5 应变测量仪器标定

应变调节器的线性度通过采用应变模拟来进行校验。当采用 350Ω取为平衡点或零点时，可以通过采用一个具有从 0.01-100 Ω范围的高精度十进制电阻箱替代主动测量片并采用下列方程来模拟应变值：

$$\Omega = 0.0007\varepsilon_{sim} + 350 \qquad 6.4.4.4.5$$

式中：Ω=模拟目标应变所建立的十进制电阻箱（Ω）

ε=被模拟的目标应变（με）。

当固定激励调节器按此方法已被校验且认定可接受时，试验前没有必要进一步标定。将调节器的输出简单地乘以 2/K，其中，K 为应变计厂商提供的应变计系数。

当调节器提供可变激励时，要求进行分级标定。

6.4.4.4.5.1 分级标定（对于1/4电桥）

当采用一个可变激励调节器时，通常选择激励电压来使调节器输出（带宽）达到试验预期的最大应变水平，这就提供在试验范围内的最大分辨率。利用电路中一个主动测量片（通常为一个不受载的真实试件），使调节器输出为零。在电路中放置一个与电桥电阻器并联的精密电阻，选取该电阻的值使得当它的布线与测量片并联时，合成电阻正好模拟已知应变即所谓分流值时所需要的。于是，调节激励电压值，使调节器读数显示一个等于 2/K 乘以分流值之值。经仪器换算后，在标定应变值下所指示的应变将是正确的，但是在其他应变水平上稍有误差。在任何不同的应变水平上经修正的应变可以根据文献 6.4.4.4.1(b)来进行计算：

$$\varepsilon = 2\varepsilon_i / (2 + K(\varepsilon_s - \varepsilon_i)) \qquad 6.4.4.4.5.1$$

式中：ε=修正的应变（με）

ε_i=指示的应变（με）

ε_s=分流的应变（με）

K=应变计的灵敏系数

这里简要地提及惠斯登电桥的分级标定，但实际上它是一个很复杂的问题，建议严谨

的科研人员要细心研究文献 6.4.4.4.5.1。

6.4.4.5 其他方法

现存一些测量变形的方法，但由于其不可靠或难于应用，它们看来在聚合物基复合材料性能的测定中仅得到有限的应用。然而，在适当的环境下，这些技术能得出用其他有方法不能获得的有价值的数据，因此，这里将对它们进行有限度地描述。

6.4.4.5.1 变形测定的光学方法

存在着几种基于光学现象的应变测量方法：光弹、莫尔（Moire）干涉图、激光变形测定等。光弹法和莫尔法可用于校验有限元计算结果，并且可用于研究试验用试件或结构上的应力分布。对于测试试件的设计和固定，这些技术的应用在试验几何形状优化方面是一个重要的手段。

在高温、小半径和粗糙表面使得应变计的使用会不可靠的情况下，激光引伸计的非接触特性特别引起关注。

6.4.4.5.2 电容式引伸计

现有接触式引伸计是利用固定在试件表面的两个探头间空气间隙的电容来测定应变的。这些探头仅仅对于非常小的标距才是精确的，且由于它们易被损坏而不能记录直至破坏的应变。可以利用它们测定在非常高的温度（>500°C 或 1 000°F）下材料的模量。电容式引伸计很难标定和要求复杂的调节装置。它们不可能被标定得比 ASTM E 83 B-2 级更好。

6.4.4.6 对纺织复合材料的特殊考虑

纺织复合材料的非均匀性要求在足够的的标距上来测量应变和位移，以便能代表整体（平均）试件的响应。为了确定在应变测量中应变计尺寸的影响，在文献 6.4.4.6(a)中给出有关由 2-D 三轴编织，3-D 机织和缝合单向机织层压板所构成复合材料的研究成果。

一般来说，应变计长度应该比纺织物单胞的长度要大，并且宽度应该不小于长度的一半。对于选择应变计的特殊标准采用文献 6.4.4.6(b)。引伸计的标距也应该大于单胞尺寸，以便获得平均的或宏观的位移。对于最小标距的这些建议应适用于热载荷以及机械载荷的情况。

尽管在文献 6.4.4.6(a)和 6.4.4.6(b)中并没有提到，对于单胞长度大于 12.7 mm（0.5 in）情况，可以将几个片首尾相连地排列，以避免采用更为昂贵的特别定制的应变计。

6.4.5 温度测量设备

6.4.5.1 引言

表征复合材料单层或层压板的许多性能都依赖于温度。于是，温度是为完全表征材料所必须测量的变量之一。现有许多手段和技术可用于测量温度，但不是所有的方法都能提供所期望的结果或在试验持续期间达到在要求的环境中应具备的功能。温度测量设备可分为两类：接触式的和非接触式的。通常遇到的 5 种接触式温度测量仪器为：热电偶、电阻测温仪（金属的电阻测温仪（RTD）和热敏电阻）、双金属仪、玻璃温度计和状态改变仪。通用的非接触式温度测量设备是红外线探测仪。

6.4.5.2 热电偶

热电偶是由不同金属合金的两个片或丝组成并在一端连接。参考图 6.4.5.2，在该交汇点温度 $T1$ 的改变将导致在另一端之间电动势力（emf）V_{ab}的变化。当温度升高时，热电偶的 emf 输出增高，虽然不一定是线性变化的。开口端的 emf 不仅是交汇端温度 $T1$（即在测量点处的温度）的函数，也是开口端温度 $T2$ 的函数。只有在保持 $T2$ 为一个标准温度时才能认为所测量的 emf 是随温度 $T1$ 变化的直接函数。工业上可接受的适用于 $T2$ 的标准是 0°C（32°F）；因此，大多数的表格和图表都采取 $T2$ 是在该水平。在工业仪表中对 $T2$ 的实际温度与 0°C（32°F）的差异通常在仪器内进行电子修正。该 emf 的调整称之为冷端（CJ）修正。倘若补偿导线是由热电偶合金或热电相当的材料所制成，在输入和输出端之间补偿导线温度的变化不影响输出电压。举例来说，如果热电偶是在炉子里测量温度并且显示读数的仪表离它有一段距离，两者之间的连线可以通过附近另一个炉子且不受其温度的影响，除非它变得太热以至于融化金属丝或永久地改变了它的电热性能。

热电偶具有超出其他接触式传感器的优点，这是因为它们简单、牢固、不昂贵、不要求外部电源，可以用于广泛多样的形式中，并可在很大的温度范围上应用。热电偶的缺点是非线性、产生的电压很低和要求一个外部基准温度。

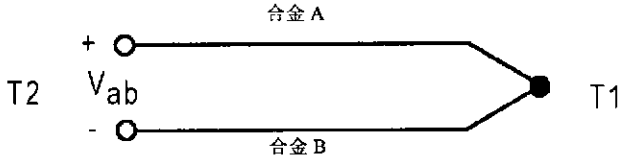


图 6.4.5.2 热电偶交汇点示意图

必须选择热电偶以满足使用条件的要求。一般仅推荐可给出的尺寸和类型。一些要考虑因素包括服役长度、温度、周围环境和要求的响应时间。较小的测量计在高温下以牺牲使用寿命为代价来提供较快响应。较大尺寸的测量计以牺牲响应时间为代价来提供较长的工作寿命。通常，明智的作法是通过一个合适的保护管或钻孔的管来保护热电偶元件。

有不同金属组合或“标定”的热电偶。最通用的 4 种热电偶分度号是 J，K，T 和 E。尽管最高温度随着热电偶所采用的金属丝直径而变化，每个分度号都有不同的温度范围和环境要求。

- 类型 J：[铁（+）铜镍合金（-）]
  推荐的最高工作温度是 760°C（1 400°F）
- 类型 K：[镍铬合金（+）镍基热电偶合金（-）]
  推荐的最高工作温度是 1 260°C（2 300°F）
- 类型 T：[铜（+）铜镍合金（-）]
  推荐的最高工作温度是-200-350°C（-328~662°F）
- 类型 E：[镍铬合金（+）铜镍合金（-）]
  推荐的最高工作温度是 900°C（1 652°F）

6.4.5.3 金属电阻测温计

电阻测温计（RTD）依赖于材料电阻的温度相关性。它们通常由具有小而精确的正温度系数的纯金属制成。一个典型的金属 RTD 是由缠绕在心轴上的纯铂丝并装入保护套内所构成。通常心轴和套子是玻璃或陶瓷的。铂丝的电阻随着温度而线性地升高或降低。利用

测量金属丝的电阻，就可确定它的温度。由铂丝制成的 RTD 具有很好的性能，且从 -259~600°C（-434~1 112°F）均呈线性。

虽然 RTD 的响应比热电偶更为稳定和线性，但 RTD 不能如热电偶一样用于那样广泛的温度范围。较大的热质量和较差的热耦合使得对温度变化的响应缓慢。除了对温度之外，RTD 对机械应变以及热应变的响应使它对载荷及振动敏感。与热电偶不同，RTD 不是自身提供动力。由于电流必须通过设备以提供可测量的电压，设备易于自身加热。如果使用一个大电流、使用一个小的 RTD 或者若 RTD 没有很好的热耦合，则自身加热是特别实际的问题。

6.4.5.4 热敏电阻

热敏电阻由随着温度改变呈现大的电阻变化的陶瓷半导体材料组成。市场上，存在正温度系数（PTC）和负温度系数（NPC）两种仪器。随着温度的增加电阻亦增加被称为 PTC 热敏电阻。随着温度的增加而电阻减少被称为 NTC 热敏电阻。然而，多数热敏电阻是 NTC 型的。

根据电极连接到陶瓷体的方法，热敏电阻一般分为两个主要的类别。第一类由珠形热敏电阻组成，而第二类由镀金属表面接触热敏电阻组成。所有的珠形热敏电阻具有烧结到陶瓷体内的铂合金导线。作为一个类别，珠形热敏电阻比镀金属表面接触热敏电阻更为稳定。珠形热敏电阻通常尺寸较小并有较快的热时间常数值，在很多温度测量应用中这是个优点；然而，珠形热敏电阻有较低的耗散值，在大多数应用中该值导致较大的自加热效应。镀金属表面接触热敏电阻更易于加工，因此，较珠形热敏电阻便宜。然而，镀金属表面接触热敏电阻通常在 150°C（300°F）下检测并在 105°C（221°F）或更低温度下具有最好的连续操作稳定性。

热敏电阻对温度变化非常敏感，同时它可以探测由其他仪器不可能发现的温度变化。虽然热敏电阻非常精确，但与热电偶和 RTD 相比它的测量范围较小。由于电流必须通过仪器以提供可测量的电压，该仪器趋向于自身加热。热敏电阻比其他温度测量仪器也更易碎。

6.4.5.5 双金属仪

双金属温度指示仪利用不同金属热膨胀率的差别。两个不同的金属片条粘接在一起，当加热时，复合物的一边相对另一边将膨胀，所导致的弯曲通过机械联动转换为温度读数。该仪器是轻便的且不要求动力，然而，它们不像其他温度测量仪器那样准确，不能用于点测量，并且不能生成容易记录的数据形式。假如一枝笔连接到指示器上，它们可用于获得周围环境温度的定性记录，并在移动的纸上划出迹线。

6.4.5.6 玻璃温度计

由液柱球形温度计为代表的玻璃温度计不需要动力，并且即使在重复热循环后仍然稳定。而另一方面，它们不能生成容易记录的数据，同时对瞬态温度变化它们不能产生好的响应。由于它们必须要沉浸在被测温度的介质中，它们不能用于点测量。它们的主要用途是测定试验环境的温度。

6.4.5.7 状态变化仪

状态变化温度传感器由各种标签、小球、蜡笔、漆或液晶所组成，一旦到达某个温度时它们的外观会出现变化。响应时间一般以分钟来计算，因此对于瞬态温度变化它们不能

产生好的响应，精度较其他类型传感器要差，除了液晶显示的情况以外，状态的变化不能还原。状态变化传感器能方便地定性确认材料是否达到或超过某一温度。

6.4.5.8 红外探测仪

红外（IR）探测仪是用于测量表面发射辐射量的非接触式仪器。在绝对零度以上的温度下，所有的物质都发射电磁能，发射能量的水平和频率与温度成正比。在很多的工程情况中，多数辐射在红外范围内。假如表面的发射特性是已知的，它的温度可由特定波长的红外线能量水平来推断。最简单的 IR 探测仪设计是由将 IR 能量聚焦至一个探测仪上的透镜所组成，探测仪将能量转换为电信号，在对周围环境温度变化校准后，将该电信号显示为温度的单位。

IR 温度计（IRT）具有适合于光学、电子学、工艺、浆料和保护围栏等广泛地多种多样的结构形式。基本的 IRT 设计包含收集目标物辐射能量的透镜；将能量转换成电信号的探测仪；使 IRT 标定与被测物体发射率特性相匹配的发射率调节器；以及周围环境温度补偿电路以保证不会把由周围环境引起的 IRT 温度变化转换为最终输出。

单波长的温度测定法设计是测量在指定波长下从表面上辐射的总能量。这些设备测量和评估被截取的热射线的强度或亮度。强度，或更一般来说，辐射率是在一个热谱的窄波长带中测量的，根据温度范围和被测材料类型来规定带宽的选择。结构形式可以在很大的范围内变化，从具有简单遥控计量表的手提式探头，到具有同步观察目标物和温度，并带有记忆和/或输出打印功能的复杂的便携式仪器。

双重和多重波长温度测定法应用于苛求绝对精确的地方以及产品正在经受物理或化学变化之处。双重波长温度测定法包括在两个不同的波长下测定光谱的能量，如果发射率在两个波长下具有相同的数值，目标物的温度可从仪器直接读出。比率测量的优点是温度读数与发射率波动和/或视觉途径的昏暗度完全无关。该技术一般用于高于炽热（700°C（1 300°F））温度，而低至 200°C（400°F）的测量也是可能的。

红外探测仪的优点在于它们为非接触式的，倘若可以获得视觉通路，它们可用于测量非常高的温度，和恶劣环境下的温度。一个缺点为在关注的温度下的表面发射率必须是已知的（这个信息不总是已知的）。此外，仪器将对视场的所有温度值取平均。假如目标物没有完全充满视场，则它的背景温度将对读数起作用，如果目标物不是理想的发射器，它会反映仪器能探测到的其他来源反射的红外能量。

6.4.5.9 温度测量设备的标定

任何温度测量仪器的有效性取决于它的精度和重复性。如同其他的测量仪器，温度设备必须标定和进行定期检验以维持可信度，即它们显示的输出相对于真实值是在某个已知的偏差之内。温度设备的标定和确认在概念上是简单的，并且仅仅涉及把所关心的设备与基准设备曝露在相同的温度下。在标定情况下，输出的任何偏差都可校正；在检验情况下注明在容差内或容差外。对这个文件的实际应用来说，标定和检验将一并考虑并将称之为“标定”。关于温度测量的一般性信息在文献 6.4.5.9(a)和(b)中可查到。

温度测量设备几乎总与某些类型的读数或控制仪器相连接，那些仪器也必须标定。通常能把仪器与探头和要标定的装配件包括在一起成为一个系统。优先选择这种形式是因为系统的所有元件是在一起考虑的，这样导致更高的精度并可节省相当多的时间。有关它的标定要求和方法，用户应参考专门的仪器操作手册。此外，有关温度设备标定的更为完善

的资料可从下列 ASTM 规范中获得：

- ASTM E 220“用对比技术的热电偶标定”（文献 6.4.5.9(c)）
- ASTM E 77-92“温度计检验和认定的标准试验方法”（文献 6.4.5.9(d)）
- ASTM E 1502“有关基准温度的冰点元件的使用”（文献 6.4.5.9(e)）

注意，虽然这些标准一般针对特定的传感器，很多实际情况也可将其用于其他的传感器类型，特别是用于与给定温度传感器或系统手册中提供的说明一致的情况。

对于探头的一般标定方法是将它们与基准标准物一起自然地置于已知温度环境中，该标准物应源于国家标准和技术研究院（NIST）的标准。探测器标定装备的关键元件示于图 6.4.5.9 之中，包括：

- “标定器”（此设备用于产生已知温度）。
- 基准的标准探头——通常与被标定的探头同一类型。
- 读数设备（一般为 5½位分辨率的高分辨率数字万用表或对于探头提供缩放比例和冷端补偿的指示器）
- 冰点基准（用于定位热电偶的开口端——*T2*——在 6.4.5.2 节中讨论的适当基准温度）。它仅在标定热电偶类型的探头时才需要，同时提供热电偶探头的冷端基准，否则要对冷端作补偿。

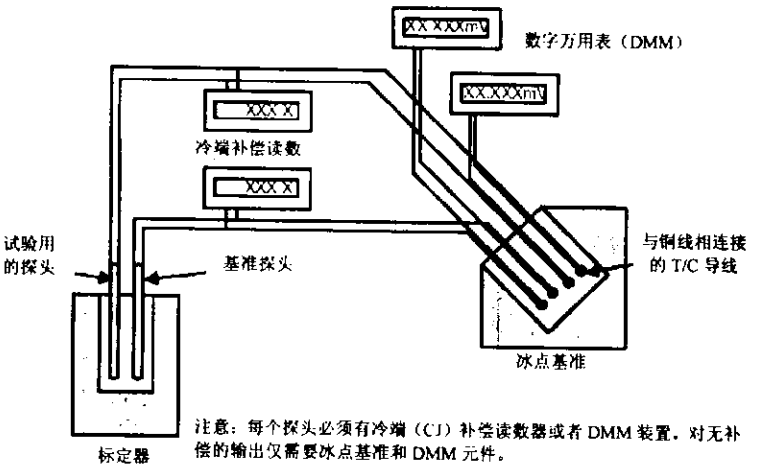


图 6.4.5.9　典型的标定设置

标定器

标定器是一个加热或冷却源，用以提供所标定仪器放置处的热环境。标定器必须具有优异的温度控制能力，必须是极端地热稳定和没有温度梯度。空气流通的炉子通常还不够稳定和显示有比较高的热梯度。最常用的标定器是为探头标定专门设计的，为如下的三种类型中之一：块状标定器、流动液体浴室、液化粉末浴室。

块状标定器是由一个电源单元组成，它对探头插入的固体材料块（通常为铜）均匀地加热或冷却。块状标定器是清洁的和易于维护，但温度改变比较慢。重要的是，要使探头很贴近地放进块内，因此当标定不同的探头时常常需要许多不同尺寸的热“井”。块状标定器通常的温度范围是-40-648℃（-40~1 200℉）。

流动液体浴室只是在放入探头的浴室中流动着温度受控的液体。这种形式的标定器是三种形式中最为低廉的，但有着相对受限的温度范围，一般为-20~130℃（-5~266℉）。

更为特殊和昂贵的浴室能延伸这个范围至-160~630°C（-250~1 170°F）。

液化粉末浴室标定器采用气体，通常是低压空气或氮气，来液化干燥的粉末颗粒，一般为氧化铝。这种浴室具有极好的热传导特性，并且是清洁的和比流动液体浴室更易维护。它们有特别高的温度范围，然而通常在低温下它们的功能降低。通用温度范围是 50~600°C（122~1 112°F）。可提供温度为-70~980°C（-100~1 800°F）扩展范围的粉末浴室。

基准标准探头

基准标准探头是经标定并源于 NIST 的简单的温度探头。显然，要标定的探头的最终容差中必须计入基准探头的标定容差。当标定没有连接读数仪的热电偶探头时，重要的是，基准标准与所标定的探头是同类型的热电偶。这就保证两个探头在 *T2* 冰点基准处有相同的行为特征。当进行一个系统的标定时，这并不是实质性的问题，因为连接到探头的仪器会提供独立的冷端补偿。类似地，假如基准标准不是单机状态探头，而是一个由可进行冷端补偿的基准探头和读数器所组成的标定系统，则探头不必是同类型的。

所有温度测量设备已限定了温度范围，在该温度范围上它们具有非常好的响应特性。因此，本质上，是要确认基准标准探头在其使用的整个范围内具有良好的特性并被很好地标定。

读数装置

取决于所选用的鉴定标准类型和被标定的探头，读数装置可以大不相同。如果采用基准标准或标定的温度探头时没有进行缩放比例和/或冷端补偿的读数装置，推荐的读数装置为 5½位的数字万用表（DMM）。这个精确的仪器允许将要读的热电偶输出在 0.001 mV 以内，这是已出版的 NIST 热电偶参照表所达到的精度。

假如采用自测量输出装置，它的精度（和校验的精度）必须足以提供至少四倍于标定要求的精度。

冰点基准

冰点基准用于在标定探头时使开端温度 T_2 达到 0°C（32°F）标准值。同样，只有当标定标准或者被标定的探头没有另外形式的冷端补偿时，冰点基准才是必需的。冰点基准箱通常只是良好控制和受到监控的冰室。电子冰点也是可采用的，它大大地简化了装置。重要的是，要注意到从热电偶 T_2 端（它在冰点基准中处于 0°C（32°F））至读数设备的连线应该只用铜，这保证了装配件的 emf 响应是如热电偶参照表所设定的。

6.4.6 数据采集系统

此节留待以后补充。

6.5 试验环境

此节留待以后补充。

6.5.1 引言

此节留待以后补充。

6.5.2 实验室大气试验环境

此节留待以后补充。

6.5.3 非大气环境的试验环境

6.5.3.1 引言

复合材料会受到非实验室大气环境曝露的影响，因此必须对其进行试验以确定这些影响。在试验方案中必须包含实验室低温环境条件以及实验室高温环境条件以确定各自的影响。下面内容涉及对实验室高温和低温环境条件的指南。许多不同的试验规范的适宜性可能取决于材料的用法。对于地面应用的正常环境条件是从-55℃（-67℉）那样冷到高至 180℃（350℉）。在空间条件下将扩展到感兴趣的-160~230℃（-250~450℉）性能带。低温条件（低于-160℃（-250℉））对储存罐的使用可能是有意义的。特定情况规定在前缘或发动机部件附近使用的复合材料可短时达到及超过 315℃（600℉）的极限。用户必须确定对于材料的特殊应用所限定的内容，该限定可能使得要在应用中所使用的材料上完成适当的非实验室大气环境试验。

本节的目的是提供给用户在不同于标准实验室条件下材料试验的指南，下面讨论低于和高于室温的试验条件。与非实验室大气环境试验相关的更进一步的指南可从 SACMA SRM 11R-94“复合材料层压板环境调节的推荐方法”中得知。

6.5.3.2 低温环境试验

在低于实验室环境试验温度下进行试验可能是少有的挑战。可能需要特殊夹具或润滑油以保证所测量的性能是材料相关的性能，而不是由于滑移面的结冰或粘连形成的性能。材料可能变得更脆以并改变其失效模式。可能需要专门的仪器来记录在较低温度下的材料性能。用于加强片或应变计的胶粘剂应是这样的类型，该类型在寒冷的温度下仍保持它们的伸长率。

低至-55℃（-67℉）的试验温度是通常的并将在此讨论。在试验箱内的试验装置必须预冷直至在试验温度下达到稳定状态，在试验前应使夹具达到稳定。冷却介质可以是液态氮（LN_2）、液体二氧化碳（LCO_2）或冷冻室，常温度测量采用 J，K 或 T 型热电偶（T/C）。更多的温度测量信息参见 6.4.5 节。在实际试验之前，应采用模拟试件以确定冷透时间，应该使用与试验用试件相同的材料和铺层方位来制备模拟的试件。为了确定冷透时间，应在模拟试件的中心线处钻一个孔以插入 T/C 热电偶，记录达到所要求试验温度的时间，在进行正式试验时要利用该时间，使得试验用试件处于适合的试验温度之下。应控制冷却速率使热冲击和出现损伤和/或微裂纹的可能性最小。

试验夹具的结冰可能是产生异常试验结果的原因。必须检查夹具的清理状况以保证存在自由滑移表面。在低温下应使用合适的润滑剂或不用润滑剂以防止任何夹具对试验结果的影响。

在试验时应将热电偶（T/C）与试验用试件表面接触。在到达试验温度后通常应该采用 5-10 分钟或由实际试验情况所确定的时间作为冷透时间。应该经常注意，要具有合适的安全设备以预防冷灼伤。如果使用 LN_2 或 LCO_2 来冷却环境箱时，必须谨慎小心，以确保不要耗尽室内氧气。

6.5.3.3 高温环境试验

完成在高温环境温度下的试验时，必须考虑试验试样的温度和吸湿量。可能需要特殊的夹具以便适应高温。在进行一个试验项目之前应该评估胶粘剂失效的可能性和试验用试件干燥的可能性。可能要求特殊的润滑剂以防止由于粘住或凝固所引起的固定作用。必须使用根据所要求的温度而特制的仪器以保证所记录的数据是有效的。必须鉴别和使用具有正确温度变化率的应变计、引伸计和胶粘剂。在试验期间可能要求特定的应变计箔或背衬材料以便能经受住试验期间的高温。可能要求对仪器在试验温度下进行附加的标定。

这里讨论的是直至 180°C（350°F）的高温环境试验温度。必须加热在环境箱中的试验装置直至稳定在试验温度下。应该使得夹具在试验前达到稳定。带有试件的试验夹具的加热或仅是试件的加热通常是在电加热箱内完成。通常用 J，K 或 T 型的热电偶（T/C）来进行温度测量。在实际试验之前应该采用模拟试件以确定热透时间。应该用与试验用试件相同的材料及铺层方位来制作模拟试件。为了确定热透时间，T/C 热电偶应该嵌入在模拟试件的中心线处钻的孔中。记录达到所要求试验温度的时间。在进行正式试验时要利用该时间，使得试验用试件处于适合的试验温度之下。应控制加热速率使热冲击和出现损伤和/或微裂纹的可能性最小。

过快的加热速率可能引起试验用试件或胶粘剂的炭化或熔融。在滑移面上应该使用合适的润滑剂，例如二硫化钼，以保证试验夹具自由移动。

在试验时应将热电偶（T/C）与试验用试件表面接触。假如试验状态是干燥的，在到达试验温度后标准热透时间是 5-10 分钟。假如试验状态是潮湿的，在到达试验温度后，标准浸透时间可能是 2 分钟，以防止试验用试件过分干燥。

假如吸湿量是试验变量，除非在试验中控制湿度，否则在试件浸透时间前后和试验前后应采用称重的方式来评估试验用试件的干燥情况。有关浸润处理的指南见 6.3 节。应该经常注意，要有合适的安全设备以预防灼伤。

对中等的试验条件，即低于 93°C（200°F），持续时间短的试验可选择控制湿度的环境箱。当进行高于 93°C（200°F）的试验时，精确的湿度控制是不切实际的，试件的干燥情况要受到关注，特别是在疲劳试验情况下。试验前的热透时间要短（小于 3 分钟）以便使干燥最少。

在高于 180°C（350°F）温度下进行的试验，必须使用为高温而设计的专用的应变计和应变计胶粘剂、引伸计和夹具。需要用能承受特殊高温的加强片材料和加强片胶粘剂以预防加强片的失效。在其他温度下，这些材料可能不适用。

热电偶是最通用的温度测量传感器。可以使各种各样的 T/C 型热电偶，但是最通用的是 J，K 和 T。某些特定的情况可以规定使用热敏电阻（RTD）。关于温度测量的更多信息参见 6.4.5 节。

6.6 热/物理性能试验

单层和层压板的物理分析方法提供有关制作的复合材料完整性方面的信息。采用热分析方法来确定玻璃化转变和晶体熔融温度、热膨胀系数和反应的残余热。下面各节所讨论的补充分析方法用于确定纤维的体积含量、空隙体积、密度、尺寸稳定性和湿增重。

6.6.1 引言

在第 4 章 4.5.2 节中描述的热分析技术也可用于评估复合材料。从热分析中获得的信息包括玻璃化转变温度、晶体熔融温度、膨胀/收缩性能、热稳定性和热固性材料的固化程度。

6.6.2 固化度

由于实现复杂或粗厚零件的受控分段制造已成了先进的工艺方法的一部分，复合材料固化程度的表征变得越来越重要。以采用非热压罐工艺为最终目的，可用加筋件或其他结构细节的压实和分段来使大型复杂零件的装配更容易实现。压实和分段也是制造粗厚零件的至关重要的方面，以防止树脂的迁徙和纤维的弯曲。

几种不同的热分析技术通常用于在纤维增强有机基复合材料的固化度测量。它们包括测量残余固化放热程度曲线的差示扫描量热法（DSC）或动态热分析（DTA）和测量玻璃化转变温度的动态热力学分析（DMA）或热力学分析（TMA）。在以下 6.6.3 节中讨论 T_g 测量中的一些细节。

6.6.3 玻璃化转变温度

6.6.3.1 概述

聚合物基复合材料的玻璃化转变是指基体材料在加热期间由玻璃态至橡胶态或在冷却期间从橡胶态至玻璃态的一种由温度所导致的变化。在玻璃化转变期间，由于聚合物链的长距离分子流动性的起始或冻结，导致基体刚度的改变达到二至三个数量级。出现玻璃化转变的温度是与聚合物链的分子结构和交联密度相关的，但是该温度也同样取决于用于测量的加热或冷却速率，如果使用动态力学技术，也取决于试验频率。除了刚度的变化之外，在材料的热容量和热膨胀系数方面的变化也标志了玻璃化转变，从而，至少存在某些二阶热力学转变的表征（见文献 6.6.3.1）。

玻璃化转变经常地是用玻璃化转变温度（T_g）来表征，但由于这种转变常常出现在很宽的温度范围内，采用单一温度来对它进行表征可能引起一些混淆。必须详细说明用以获得 T_g 的试验技术，尤其是所用的温度扫描速率和频率。也必须清楚地阐明依据数据来计算 T_g 值的方法。报告的 T_g 值可以是反映玻璃化转变开始或中点温度，这取决于数值处理的方法。

曝露在高湿度环境之下，聚合物基体会吸收环境中的水分并被其塑化。这种增塑的效应之一通常是 T_g 值显着降低。一个高度交联的树脂（例如一种基于四官能团的环氧化合物如 TGMDA）可能初始 T_g 值很高，但它可能会比那些交联度不太高的体系降低更为剧烈。测量由吸湿而增塑的复合材料的 T_g 值有一些实验上的困难。按照测量要求加热测试试件将至少驱除一些吸收的水分，从而影响被测定的性能。

由于在玻璃化转变发生处基体刚度的降低和这些聚合物基体在橡胶态中的低强度，在高于玻璃化转变情况下，基体不再具有有效传递载荷至纤维的功能或遏止纤维屈曲的作用。虽然在玻璃化转变范围内，与时间有关的材料性能如蠕变柔度可能比准静态的力学性能对温度更敏感，因此 T_g 值经常用于定义复合材料的上限使用温度。对环氧基复合材料，已建议在 T_g 值和材料使用极限（MOL）之间有 28°C（50°F）的安全裕度（见 2.2.8 节）。对于最初地估算 MOL 或为了校验以前选择的 MOL，该方法是有用的。然而，因为玻璃化转变经常出现在一个温度范围内，并且 T_g 的测量值高度地依赖于所采用的方法，应该考虑补充

的力学性能试验，尤其是对于新材料体系（见 2.2.8 节）。

6.6.3.2 T_g的测量

已经用几种不同的方法来表征聚合物材料中的玻璃化转变，并且其中多数也适用于纤维增强材料。

6.6.3.2.1 差示扫描量热法（DSC）

由于复合材料的热容量在玻璃化转变时发生变化，差示扫描量热法（DSC）可用于确定 T_g。玻璃化转变是按照热流量与温度的关系曲线出现偏移时进行测定的（见图 6.6.3.2.1）。许多热量计配备了可用于计算 T_g 值的软件。用 DSC 探测纯净树脂试件的 T_g 值比较容易，但在复合材料试件中树脂含量比较少，并且树脂交联越高，在热容量方面的变化越是小。因此，有时很难探测高度交联固化的复合材料的 T_g 值（见文献 6.6.3.2.1）。

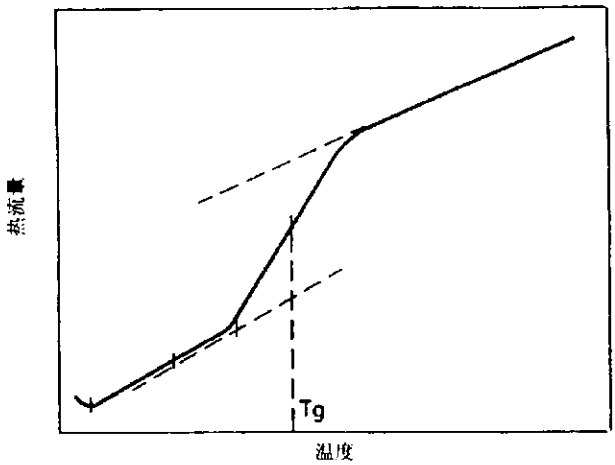


图 6.6.3.2.1 差示扫描量热法（DSC）

6.6.3.2.2 热力学分析（TMA）

也可用热力学技术（TMA），例如膨胀、弯曲或渗透热力学分析，来确定 T_g 值。在膨胀 TMA 中，测量的热膨胀系数α随温度而变化。如上所述，在玻璃化转变期间α经历着变化，由拟合高于和低于玻璃化转变范围的热膨胀数据所得曲线的交点来确定 T_g 值。图 6.6.3.2.2 说明了用于各种 TMA 技术的试件几何形状与数据处理方法。

在弯曲 TMA 方面，对矩形试件施加弯曲载荷，并且测量尺寸随温度的变化。在图 6.6.3.2.2 中阐明了一种用于计算 T_g 值的曲线拟合技术。T_g 值的弯曲 TMA 测量与热变形温度（HDT）的测量类似，这是由于在两种情况中试件都按弯曲方式加载。HDT 试件可能是全尺寸的弯曲测试试件，并且是以三点弯曲或悬臂梁方式加载。测量位移随温度的变化，并且 HDT 是在位移达到某些预定值处的温度。在 HDT 试验期间，采用全尺寸试件使水分损失最小，但弯曲的 TMA 和 HDT 测量技术共有的不足即为所获得的 T_g 或 HDT 值会对复合材料试样中增强纤维的模量敏感以及将视纤维的性质而给出不同的结果。

如图 6.6.3.2.2 所示，针入模式 TMA 技术测量材料的硬度。该技术的缺点之一是，如果探针接触到增强纤维，基体的 T_g 值将得不到精确测量。

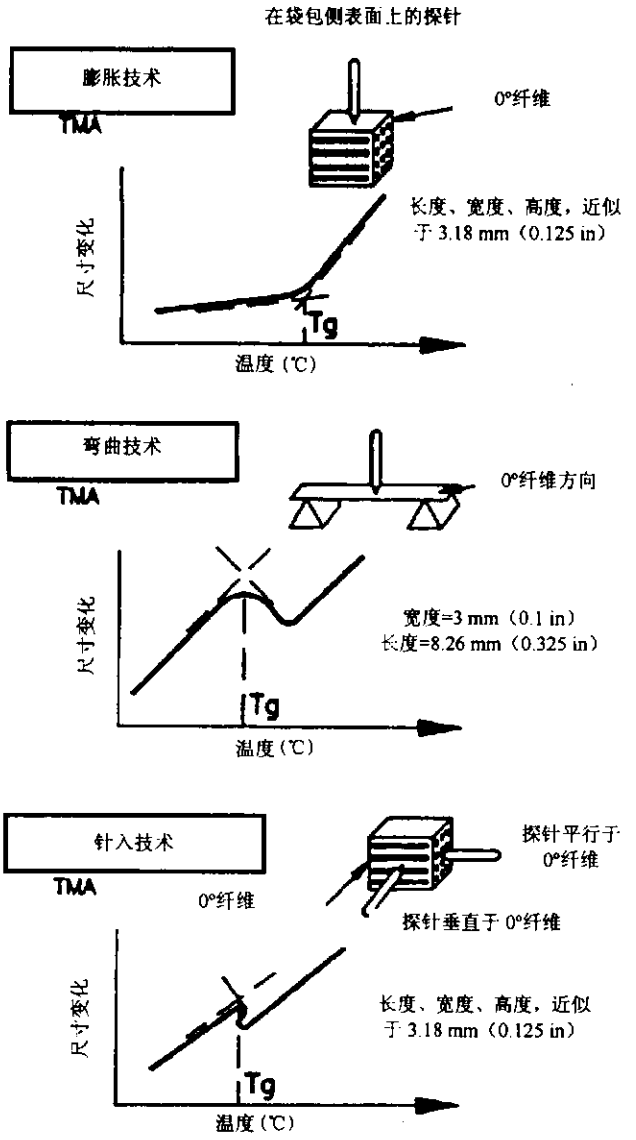


图 6.6.3.2.2　热力学分析（TMA）——典型尺寸示图

6.6.3.2.3　动态力学分析（DMA）

动态力学分析（DMA）是最通用和优先选择的表征有机基复合材料玻璃化转变的方法。已经用于复合材料 DMA 的类型有几种，包括扭摆分析（TPA）和其他引起共振的技术，以及在承受拉伸、扭转和剪切时的强迫振动测量。进行这些强迫性测量使用若干 DMA 仪器，这些仪器是由杜邦（Du Pont）、佩金埃尔默（Perkin Elmer）、聚合物实验室（Polymer Laboratory）、流变计（Rheometrics）、TA 仪器和其他公司制造的。

所有这些 DMA 技术得出随温度而变的动态储能、衰减模量、衰减正切（tanδ）或对数衰减率（Λ）的曲线图（见图 6.6.3.2.3(a)）。tanδ 和 Λ 正比于衰减模量（E''或 G''）和储能模量（E'或 G'）之比，它们反映了在每一加载周期中消散的能量，并在玻璃化转变期间出现峰值。可以按几种不同的方式由 DMA 数据来确定 T_g 值，这可能是在 T_g 值报导上存在差别的原因。如图 6.6.3.2.3(a)所示，T_g 值的确定可以基于储能模量曲线转变的起点或中点、

或是 tanδ 最大、或损耗模量最大处的温度。显而易见，对于同一组 DMA 数据，这些用于计算 T_g 值的方法可能得出有明显差异的数值。正如上面所讨论的，所用的温度扫描速率和频率也将影响其结果。

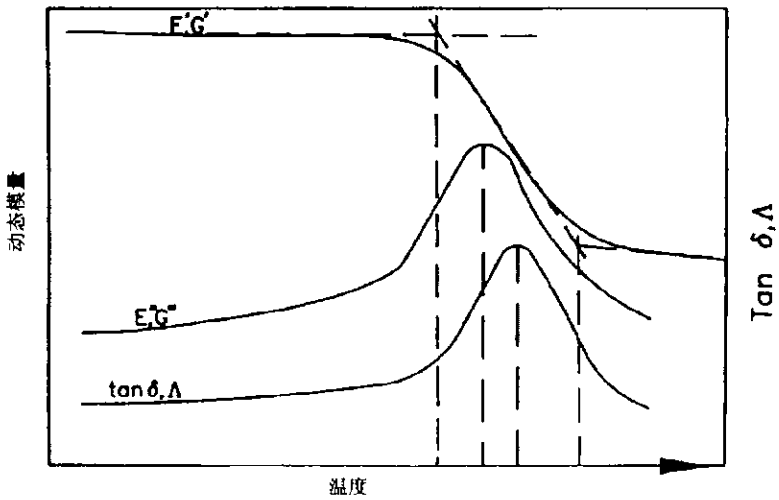


图 6.6.3.2.3(a)　热力学分析（DMA）

ASTM D 4065 对于塑料的 DMA 是适用的，该标准覆盖了强迫和共振两方面的技术（文献 6.6.3.2.3(a)），这个标准描述的试验技术与用于纤维增强塑料中的技术是相同的。此外，新发布的 SACMA 方法（SRM 18R-94）推荐在定向的纤维-树脂复合材料中用 DMA 技术测量 T_g 值（文献 6.6.3.2.3(b)）。SACMA SRM 18R-94 规定在 1 Hz、每分钟 5°C（9°F）加热速率下进行强迫振动的测量，以及根据动态存储模量曲线图计算起始的 T_g 值。如果要从 T_g 值计算相容材料的使用极限（MOL），应该制定有关试验变量的规范以及温度安全裕度，否则，由于增加或降低加热速率或频率可能改变所测量的 T_g 值。

正如上面所讨论的，在一个潮湿的复合材料中由于试件被加热而变得干燥使 T_g 的测量更为困难。通过密封试件的技术设法阻止这种干燥现象可能在减缓重量损失方面是有益的，但却不能完全将其阻止。如果试件足够厚，干燥现象主要就会发生在外表面处，结果形成一种变宽的或甚至是双峰的玻璃化转变（见图 6.6.3.2.3(b)）。较低的温度区域将反映仍然是潮湿的试件内部的 T_g，较高的温度区域将反映干燥材料的 T_g。衰减正切或对数衰减率曲线会变宽，或展现双峰或一个峰值和一个台肩，可借助相对峰值高度来指明在试件中潮湿和干燥的材料量。在潮湿试件的 T_g 测量中，转变的低温部分可能是更感兴趣的区域，建议计算起始的 T_g 可能是一个合适的保守方法。

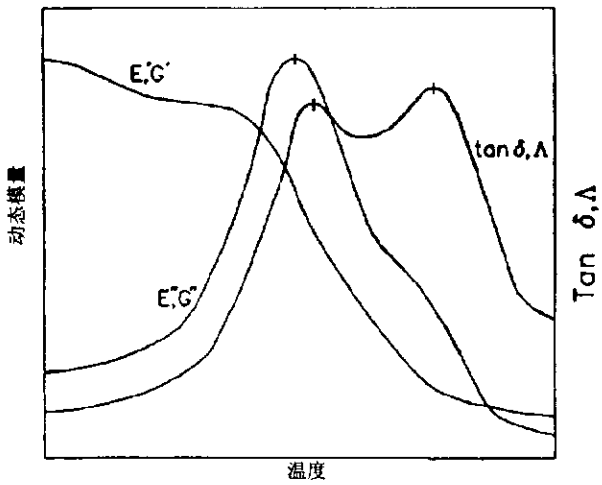


图 6.6.3.2.3(b)　潮湿复合材料的 DMA

6.6.3.3 适用于MIL-HDBK-17数据提交的玻璃化转变试验方法

由如上所述的 DMA 生成的数据目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。此外，除用于测量的专用设备之外，还必须包括加热速率和频率以及必须规定根据数据计算 T_g 所用的方法。如果采用诸如扭转摆锤的共振方法，在玻璃化区域的频率还应与数据一道被包含。

6.6.3 4 晶体熔融温度

半晶质的热塑性复合材料的晶体熔融温度（T_m）可由 DSC 或 DTA 试验获得。此外，可以进行结晶度的估算。由于半晶质热塑性复合材料的性能可能取决于基体树脂的结晶度，结晶度就成为重要的参数。预浸料加工成复合材料所需的加热可能对结晶度以及晶体结构产生影响。

6.6.4 密度

6.6.4.1 概述

复合材料的密度对评估体积重量或进行热与动力学分析是直接有用的，并对基于其他测量的各量，如热传导性（利用比热和扩散系数）和空隙体积（利用纤维和树脂密度）的推算也间接有用。这些应用将决定最佳的试验方法，而每个方法都有不同的精度和偏差（见 2.2.4 节），使用难易程度也不同。上面最后提到的应用，确定复合材料空隙体积，可能对确定密度的要求更迫切。为了确定空隙体积精度在 0.5%以内或更高，必须知道复合材料和组分的密度精度大约在 0.005 g/cm^3（1.8×10^{-4} lb/in^3）以内或更高。

密度能够直接地测量或根据分别的体积和质量测量来进行计算。按照这两个途径，分析焦点将是集中在目前使用的三个主要的密度试验方法上，它们是：(1)由液体（最常用的是水）排液量得出的阿基米得的体积确定法，如 ASTM D 792 所规定的标准（文献 6.6.4.1(a)）；(2)由观测悬挂在密度梯度柱中的测试材料的水平直接进行密度测量，如 ASTM D 1505 所规定的标准（文献 6.6.4.1(b)）；(3)由已知数量的惰性理想气体的压力变化（氦测比重法）来进行测试试件体积的测量，如 ASTM D 4892 所规定的标准（文献 6.6.4.1(c)），该方法适用于非复合材料，但经 MIL-HDBK-17 修正以便适用于复合材料，如 6.6.4.4.1*节所述。

尽管所有三个试验方法一般都能提供精确的密度值，但并没有表明氦测比重法用于确定空隙体积具有充分的精度（见在节 6.6.4.6 中的评估结果），虽然这可能会随着今后的加工工艺和仪器的改进而有所变化。对于复合材料的典型应用，在 ASTM D 792 所述并经如下修改的阿基米德方法则因其低成本、相对简单和高精度（当适当地使用时）更为受到青睐。尽管同样精确，但密度梯度技术是较少采用的，这是由于高的劳动成本和低的生产率（因为在柱体达到稳定时所确定的一个测量结果可能要花费几小时）。同时，试件在柱状的液体中的长时间曝露对后续的过程如基体的溶解可能是不期望的。每一种试验方法在下面诸节中作详细描述。

在位移技术中几乎只用液体。然而，用气体介质取代液体的方法来确定试件体积有某

*作为快速、简便但精度较低的密度确定方法，读者可查阅在 ASTM D 2734 试验方法 C 中所规定的千分尺技术（文献 6.6.4.1(d)）。这方法利用简单尺寸的测量而获得试件的体积，但仅在有限的特定情况中才适用于精确要求。

些优点，一个优点是使与液体表面张力相关的误差最小。气体位移法常常称为氦测比重法。当采用氦测比重法时，由测量有限量气体的压力变化来确定试验用试件的体积。对于测量复合材料的体积和密度，氦测比重法还不是标准试验方法，然而已经显示它是一个可行的技术（文献 6.6.4.1(e)，(f)）。由于作为复合材料的应用还不存在试验标准或指南，在 MIL-HDBK-17 试验工作组范围内已研发了一个试验方法，该方法已包含在 6.6.4.4.1 节之中。在由 ASTM 或另一个标准认证组织采用一个适用于复合材料的标准方法之前，这个方法将一直有效。

6.6.4.2 ASTM D 792，由排液量法测量塑料密度和比重（比密度）的标准试验方法

通常用 ASTM D 792 来测量复合材料的密度，这是 ASTM D-20 委员会对塑料制订的标准。这个标准实际上描述测量试件体积的方法，并把该值与重量的测量值一起计算密度。获得精确的体积测量是获得可靠的复合材料密度值的关键。

这个方法是基于将试件在空气中的重量与完全沉浸入一个已知密度的液体（多数为水）中的重量相比较。当用水作为介质时，为高精度加工必须除气，或是除离子或是蒸馏。必须注意成核的气泡，该气泡多半会出现在粗糙的表面例如机械加工边缘。同时，机械加工表面通常更是多孔渗水的且或许不能完全浸湿。建议要对于这些表面进行精密的详查以验明在表面空穴内没有可视的微气泡。如果出现微气泡，要变换至更高级的浸润液或加入表面活性剂（例如，在每 200ml 水中加入四滴 Cole-Palmer8790 微实验清洁溶液）以优化所得结果。

通常，试件越大，结果越好。当试件的尺寸和重量接近于零时，体积以及重量的测量限制开始影响密度值。推荐的最小测试试件是 1 g（对碳/环氧大约是 0.6 cm^3（0.037 in^3），对玻璃/环氧大约是 0.4 cm^3(0.0024 in^3))。在该尺寸的试件的精加工要求天平精度为 0.0001g（2.2×10^{-7} lb.）。

D 792 试验方法规定试件应该放置在 23±2℃（73.4±3.6℉）以及 50±5%RH 的标准实验室大气环境中至少 40 小时后再实施室温试验。如果正在进行的是判断差异的试验，容差是±1℃(±1.8℉)和±2%RH。对于用于浸润的液体并非水的情况，温度的容差是±0.5℃(±0.9℉)。为了提高精度，ASTM D-30 委员会推荐将材料放入烤箱干燥至平衡以确定初始重量（文献 6.6.4.2(a)，(b)）。

提供了两种技术：试验方法 A，利用水作为浸润液体；试验方法 B，用非水的其他液体，例如煤油。当试件比水轻，或在水中将引起试件出现物理变化，如膨胀时，常常采用试验方法 B。

ASTM 试验方法 D 792 的优点和限制

选择这个方法的主要优点是实用性和精确性（当谨慎地操作时），并且它是到目前为止最经常使用的方法。除了质量分析天平外，所需要的设备是简单的和廉价的。采用审慎的技术，一般可以获得在±0.005 g/cm^3（$\pm1.8\times10^{-4}$ lb/in^3）范围内的精度。仪器包括天平、横越天平盘子的梁、导线或单丝、烧杯、钳子、温度计、水或其他液体、以及若试件的密度小于液体可能要一些使之下沉的重量。

在花费大约一天的时间来实施该技术以能获得可重复性结果后，试验方能开始进行。采用 D 792，一般可以每小时测试 4 至 6 个试件，然而，伴随着采用这个技术还存在一些冗长乏味的工作且实际的生产率是较低的。

如同这里提到的所有密度方法，要小心地进行试件制备，特别是边缘质量。在切割试件时必须小心以避免密度变化。要留心的其他问题是试件尺寸、表面浸润（某些实验人员加入微量表面活性剂到水中）、在测量期间的液体吸收和水温（真空除气将使水变冷，会稍微改变它的密度）。D 792 取决于液体介质，同时要关注捕获和/或附着的气泡问题。为了优化结果，要求高浸润和脱气的液体。

6.6.4.3 ASTM D 1505，利用密度-梯度法测量塑料密度的标准试验方法

ASTM D 1505 明显不同于 D 792，在这个方法中试件密度是直接测量的，不用计算，它通过把试件飘浮在一个装有已知变密度液体混合物的玻璃柱内的方法来确定密度。采用这个技术，只要所选液体介质对试件是惰性的，就可很好地用于复合材料试件的测试。这个试验对于跟踪随时间发生物理变化的材料、检查一致性和鉴别材料是有用的。报告指出该方法是较为精确的，且可能比 D 792 方法更为精确（文献 6.6.4.3）。

该方法采用两个途径：一个密度逐渐增加的液柱（试验方法 A），和两个密度连续变化的液柱，其中，试验方法 B 采用逐渐减小密度大的液体，而试验方法 C 采用逐渐增加密度大的液体。当正确充填柱体时，梯度相当稳定和呈线性。用标定过的测定体积的量筒（液体比重瓶）来第一次近似起始液体的密度，用标定的沉入漂浮物来确定液体密度随着柱体高度的线性变化。通过记录试件漂浮位置的水平，试件的密体可能从在该高度液柱的已知密度相比较而获得。这个试验的正确性和精确度是由沉入漂浮物随着柱状液体与高度的的密度线性变化来确立的。

ASTM D 1505 的优点和限制

市场上购买用于这个方法的设备要几千美元。这里包括各色俱全的柱状液体和漂浮物。因此为了节约，可以利用标准实验室的玻璃器皿和元器件来组装设备，但是在能进行试验之前，预期要在机械加工和装配上花费时间。

充填柱体以达到线性梯度的方法最好用“巧妙”来描述，预计要投入几天至一周时间来学习该方法。柱体的灵敏度由试验人员控制，一个熟练试验人员能调整柱体精度在 0.001 $g/cm^3/cm$（9.2×10^{-5} $lb/in^3/in$）范围之内。能够调高或调低柱体的灵敏度以便与试验的需求相匹配，灵敏度是依据起始液体的密度差来确立。

一旦柱体准备完毕，应该用镊子在顶部仔细地将试件放入。为了防止气泡附着试件，在旁边放置少量的液体混合物来预先浸润试件是有帮助的。如同 D 792，如果出现气泡，通过玻璃和透明的液体通常能够看到它们，尽管在 D 1505 方法中要矫正这种情况没有很多能做的工作，一旦试件被浸入，要重新得到不遭受破坏的梯度是非常困难的。

D 1505 试验本身就是要花费时间的。填充柱体必须是缓慢地和谨慎地进行以保持梯度，且一般要花费几个小时。一旦试件被浸入，使试件停留于柱体中的平衡高度要花费时间。假如需要测量许多试件，一个柱体不可能处理所有试件，于是将不得不设置几个梯度柱体．还要考虑破碎和重新充填的需要。

当采用这里提到的所有密度方法时，在切割试件中必须仔细操作以避免密度变化。与采用液体介质相关的问题与上面 6.6.4.2 节最后一段对于 D 792 所提到的内容相同。

6.6.4.4 采用氦测比重法测定复合材料的密度

在电子和自动控制方面技术的发展，已经有可能用气体取代液体来精确和可靠地确定复合材料（以及纤维和基体树脂）体积。氦测比重法是一种用于测量所有类型固体体积的

方法，它包括粉末及开孔和闭孔材料。使这种适应性成为可能是因为所用的介质是一种理想的惰性气体，通常是能渗透到极小的孔洞中的氦气。最常推荐的气体是高纯度氦气，因为它是完全惰性的。高纯度的氮气是氦气的好的替代品。

氦测比重法不是一个新技术。采用液体和气体的比重瓶在 ASTM 的试验标准中已经用了许多年了。然而，最近，氦比重瓶已复杂得足以用于精确确定体积。1989 年，ASTM 采纳了 D 4892 标准，该标准用氦比重瓶确定非复合材料的体积/密度达到三位数。

对采用氦测比重法测定复合材料密度产生兴趣来自于它在准确性和精度两方面与 D 1505 具有相同的潜能，而且与 D 792 相比在相同的时间内具有更高的效率和更易于使用。使用气体介质的另一个明显的优点是它确保可往复地渗透入表面小孔。用液体介质时，实验者没法知道有多少百分比的表面孔还未被充填。

氦测比重法利用波义耳（Boyle）定律测量固态物体的体积，该定律指出密闭气体体积的降低与压力增加成正比。氦气和双原子的氮气两者均可使用，这是因为在室温下它们具有理想气体的特性。氦测比重法通过对两个经标定的已知体积进行两次精密的压力测量来利用这一特性。它们是容器体积和容器体积加上通常称为“附加体积”的较小的膨胀体积。测量第一个压力是利用密闭在放置了试验材料的主测量容器的所有气体。在这个压力值确定后，打开阀门将主容器和膨胀容器连接在一起，从而记录了第二个、较低的压力。采用理想气体定律，利用下面 6.6.4.4.1 节中的方程即可确定主容器中所测试材料的体积。

氦测比重方法的优点和限制

使用气体介质的明显优点是它保证可重复地渗透进入表面小孔，用液体介质时实验者没法知道有多少百分比的表面孔还未被充填。

当试样体积对于试验容器体积之比（V_s/V_c）较低时，这个方法的精度开始降低。试验表明，如果这个比值接近 30%或更高，比重瓶将接近它的最佳性能（文献 6.6.4.1(e)，(f)），这并不是说，当比值低于 30%时不能获得有用数据。对于低于 1%的低比值精度和偏差仍然是相当有用的（文献 6.6.4.1(e)，(f)）。由所需的精度来确定具体试验所需的比值，例如，要一位有效数字，则对 V_s/V_c 就没有限制；然而，假如需要三位有效数字，则比值 V_s/V_c 变得十分重要且该值应等于或大于 0.3。

气体的压力对温度是敏感的。要进行试验来检测测量容器内的温度波动。已经发现，不论采用何种容器体积，不论新鲜氦气是如何以常值流入和膨胀，测量容器的内部温度都是极为稳定的（文献 6.6.4.1(f)）。

在插入测量容器时，试验用试件的形状可能会引起某些问题。现在销售的比重器现货通常是圆柱形的，假如测试试件被限于为某些矩形形状，由于几何不相容性可能难于获得大于填入容器体积的 30%。市场上可提供的比重器就是如此，这是因为尽管可以用于任何固体物体，但它们是为最常见的粉末应用而设计的。这个问题可通过切割复合材料试件以适应容器几何形状来矫正，例如叠层盘形试件。

高质量氦比重器，如在这项工作中所用的，是一个复杂的、基本费用在 10 000 美元量级的分析仪器。很像一个实验室分析天秤，一旦购买该仪器，除了要花几天时间来熟悉设备和操作过程以外，将不需要太多的花费用于试验。

因为比重器是自动化的，不需要花费很多体力。除了试样制备和浸润处理，实验者仅需要在每次运行后换一下试件。一旦运行，比重瓶以每小时 20-30 测量值的速度来搜集数

据。自动化的一个重要方面是它极大地降低了由于操作者之间的技术和“技艺”所引入的试验结果的差异。

当采用这里提到的所有密度方法时，必须小心切割试件以避免引起密度改变。

6.6.4.4.1 用于确定复合材料密度的氦测比重试验方法

氦测比重法还不是正式承认的测量复合材料密度的方法。由于尚不存在这个方法的试验标准或指南，这里给出了方法的指南。在采用标准试验方法以前，这个方法一直有效。

背景

固体物体的体积和密度利用波义耳定律来测定，该定律指出密闭气体体积的降低与压力增加成正比。氦气和双原子的氮气两者在室温下都具有理想气体的性能。正如上面注意到的，氦测比重法通过对两个已知体积进行两个压力的精密测量来利用这一特点，它们是容器体积和容器体积加上通常称为“附加体积”的较小的膨胀体积。用于计算测试试件体积的方程是

$$V_s = V_c + \frac{V_a}{1-(P_1/P_2)} \qquad 6.6.4.4.1$$

式中：V_s=试件体积

V_c=事先标定的无试件的容器体积

V_a=事先标定的附加体积

P_1=当所有气体被密闭在主容器时的压力

P_2=当气体充填到两个容器时的第二压力

在比重器运行前，利用体积标定标准对 V_c 和 V_a 进行标定。所作的假设为容器的温度是常值、两个容器的体积是常值以及所用气体的克分子量是常数。利用分析天秤测得测试材料的重量并提供给比重器以获得试件的密度。

试验表明，当 V_s/V_c 比值接近 30%或更高时，比重器将接近于它的最佳性能。这并不是说当比值低于 30%时不能获得可靠的数据，但性能开始有所降低。

重要的是，注意到气体介质保证能充填最小的表面小孔，而由于表面张力，其他液体沉浸方法也可能做到，也可能做不到，在进行比较时，要记住这一点。当表面小孔未被充填时，密度数据会偏低。因此，与氦测比重法所得的数据相比，液体沉浸方法可能获得稍微偏低的密度值。该密度偏差会不会引起关注，则取决于表面孔的数量以及液体与复合材料之间浸湿情况。

设备

氦比重器（在 ASTM D 4892 中规定了比重器，注 4 在这里可采用）；体积标定标准；带有调压阀的高纯度氦气或氮气瓶；分析天秤；干燥器；一次性的塑料手套或镊子（用于移动试件）。

试件制备

由试件的切割过程所产生的热和压力能局部地改变试件密度。复合材料试件应该用细砂纸磨光，并且擦去任何残存的松散的灰尘。试件形状与试验无关，但为了保证有足够的材料进入测量容器，要求考虑试件的几何形状。对于圆柱形容器，推荐的形状是比容器直径小 2.0 mm（0.080 in）的圆形试件。试件的直径可以更大些，但不能太大以至于存在挤压容器壁的危险。这些盘状试件应摞起放置以便尽可能多地填入容器。假如可以接受较低的

精度，就不需要考虑容器体积被充填的百分比（除非试件体积特别小），即使当 V_s/V_c 接近1%时也会得到有用的结果（文献 6.6.4.1(e)，(f)）。

工序

1. 按 ASTM D 618“浸润处理用于试验的塑料和电子绝缘材料”对测试试件进行预浸润处理（文献 6.6.4.4.1.(a)），或为了提高精度，按照文献 6.6.4.2.(a)的建议和文献 6.6.4.2(b)所述内容，将试件放入干燥平衡箱。将试件储存在 23℃（73.4℉）下的干燥器中直至将它们准备好以进行试验。
2. 通常，按照制造商的使用说明书确定复合材料的密度。这里给出有关试验步骤的清单和评述意见。
   - 将氦气（或氮气）气源经减压阀连接到比重器的气体入口。
   - 应用电缆把打印机和计算机（如果已装备）连到比重器的输出接口。
   - 比重器电源打开后，将它加热至平衡工作温度，该温度一般高于大气环境温度 2-3℃（3.6-5.4℉）。
   - 若比重器还未标定，按用户手册规定的标定程序操作。比重器应该一次次重复标定，特别是，如果大气环境温度有明显改变或有波动的情况。比重器可达到与标定用标定标准一样的精度。要确认所用的标准是满足适当的规范。假如对标准的精确性存在怀疑，利用一个试验，如 D 792，进行现场验查。可以通过国家标准和技术研究院获得经认证的标准（文献 6.6.4.4.1.(b)）。
   - 一旦标定，比重器就可以运行。移去密封盖，打开主容器至大气环境空气之中。将预先称重的测试试件放入容器，把盖子放回原处并开始运行。在测量开始前，比重器一般用氦气来自身净化几分钟。这用于两个目的：确保仅有氦气在容器内和从试件表面带走剩余水汽。此时，实际测量开始运行。
   - 假如比重器是自动控制的，它将对相同试件进行重复运行达到预先选定的次数，完成后，将打印包括相关标准差的平均体积和密度的测试汇总表。如果需要，自动化设备将把原始数据输到个人电脑上。一旦输送完毕，比重器便可重复进行测量循环。
   - 更换试件，重新密封测量容器并开始新的运行。如果环境温度稳定，可以连续使用而不需重新标定。

6.6.4.5 氦测比重法实验结果的概述

测试了一个高质量的氦比重器（Quantachrome Ultrapycnometer 1000）以确定其作为测量复合材料体积/密度设备的能力。作为这个试验的结果，可得出以下的结论（对于所有的结论，可参见文献 6.6.4.1(e)，(f)）：

- 对于经鉴定的所用试件体积值，D 792 方法更为精确，该方法最大偏差为 0.003g/cm^3（1.1×10^{-4} lb/in^3）。更为一般地来说，数据在 NIST 标准的 0.001g/cm^3（3.6×10^{-5} lb/in^3）范围内变化。
- 在测量容器充填 30%以上的情况下，比重器数据最大偏差为 0.003 g/cm^3（1.1×10^{-4}lb/in^3）。更为一般地来说，数据是在标准的 0.002 g/cm^3（7.2×10^{-5} lb/in^3）

范围内变化。在充填30%以下的情况下，最大偏差为0.015 g/cm^3（5.4×10^{-4} lb/in^3）并且随着V_s/V_c的下降精度明显降低。

- 两种技术的标准差是相当的，并与比重器的数据紧密相关，显示出对所有数据点更为严密或具有相等的值。氦比重器的标准差一般为0.0002-0.0008 g/cm^3（7×10^{-7}-2.9×10^{-6} lb/in^3）时，D 792方法的标准偏差为0.001 g/cm^3（3.6×10^{-5} lb/in^3）。由比重器记录的最大标准偏差为0.003 g/cm^3（1.1×10^{-4} lb/in^3），在两个实例中记录的D 792方法的最大标准偏差为0.004 g/cm^3（1.4×10^{-4} lb/in^3）。
- 比重器数据读数总是有稍微低于实际密度值的趋势，好象是出现一个常值偏移量。目前对于产生这个偏低偏移量的原因尚不清楚

气体和液体介质之间的一个差别是气体对于温度的变化更敏感。最初关注冷氦气的周期性流入和由于膨胀氦气的进一步冷却，由于这种情况会引起错误的低压记录。试验表明，在试样容器中的热环境极为稳定，最恶劣的氦气温度情况复原时间是9秒钟。能达到的最恶劣情况最大偏差值是-2.1℃（-3.8℉），它发生在膨胀后的50 ms之内。从该数据所得到的结论是，气体膨胀不是一个问题，同时由于试样容器的热质量使得氦气很快被重新加热。更进一步，气体膨胀情况的200次重复显示温度恢复曲线没有改变或容器温度对于时间的曲线没有任何下降，这就表明，试样容器具有充足的热容量以维持无限期的稳定温度环境。

6.6.4.6 提交MIL-HDBK-17数据适用的密度试验方法

由下述试验方法生成的数据目前正在被MIL-HDBK-17考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表6.6.4.6 提交MIL-HDBK-17数据适用的密度试验方法

性 能	符 号	正式批准、临时和筛选数据	仅为筛选数据
密 度	ρ	D792，D1505，6.4.4.4.1*	D2734C

*当该方法用于生成随后要确定复合材料空隙体积的数据时，测试试件必须至少占有试验容器体积的30%。

6.6.5 固化后单层厚度

注意：在这里的所有讨论中，术语“固化后”指的是充分加工后的状态。对热固性材料，它表示化学固化的意思。对热塑性材料，它表示充分压固后的状态。

6.6.5.1 概述

在硬件使用中，从重量和尺寸符合性（相适应）观点，复合材料零件的厚度是一个重要的性能。零件的厚度由铺层的层数、现存的基体树脂数量（树脂含量）、增强纤维的数量（纤维体积）和孔洞的数量（空隙体积）所控制的。在树脂转移模塑（RTM）情况，模具的尺寸规定了厚度（通过控制树脂含量）。如果假设在结构内各层的树脂、纤维和空隙的量不改变，则每层的厚度乘以层数代表了零件的厚度。实际上，树脂、纤维和空隙的比例从一层到另一层可能有些变化，这个变化的数值很大程度上随工艺参数而改变。例如，在固化期间的表面渗出可能使外层比内层树脂含量要低，这取决于树脂在零件厚度方向的流动性。然而，一般而言，固化后单层平均厚度乘以层数能合理地估算零件厚度。

由于试验板用层压板一般是按模拟生产零件工艺的方式进行加工，也可用板件固化后的单层厚度估算零件的厚度。此外，在计算纤维体积和随后的力学试验数据的归一化时也可用试验板件固化后的单层厚度（关于归一化见2.4.2节）。

确定固化后单层厚度一般包括在几个部位测量层压板（板件或零件）厚度、取厚度的平均值并除以铺层中的层数。层压板厚度可直接（采用仪器，例如千分尺）或间接（用超声波仪器）方法进行测量。以下的6.6.5.2节和6.6.5.3节将简要地讨论测量层压板厚度的直接和间接方法的应用。6.6.5.4节讨论SRM 10R-94，它是仅有的现行测量固化后的单层厚度的标准。

6.6.5.2 利用直接方法测量厚度

深测爪千分尺一般用于测量层压板表面不同部位的厚度，虽然这是一个相当直截的方法，但还是有几个问题要考虑。

首先是有关板或零件尺寸和形状的问题。假如要测量的层压板很长和很宽，千分尺可能无法深入至内部。这个问题可以用悬挂在刚性构架上的刻度盘指示器或类似装置来克服，但通常要牺牲精度。同时，如果层压板有曲率，千分尺的测爪可能妨碍测量头使其无法达到层压板表面。另一个重要的问题是层压板表面的纹理。关于这个问题的详细讨论读者可参考6.4.2节。若层压板的尺寸和形状不存在问题，球形面的千分尺提供了一个直接测量厚度的低成本的精确方法。

6.6.5.3 利用间接方法测量厚度

脉冲反射式超声设备可用于测量层压板的厚度。这个技术利用了这样一个事实，即声波可以直接穿透层压板而从其背面反射且传播的时间可被测量。若由已知厚度的测试试件来确定通过层压板材料的声速，于是可以计算未知的层压板厚度。ASTM E 797-90（文献6.6.5.3(a)）描述了这个方法的实施过程，但并不包括有关复合材料层压板测量的详细信息或细节。

应用超声方法的一个优点是仅要求接近一个表面。这点对测量封闭结构蒙皮厚度，或不可能用千分尺测量的大层压板厚度很重要。然而，其缺点也很显然。第一，相对其他选择，所需设备可能很昂贵。第二，必须在已知厚度的试件中进行标定。由于声速对每个材料都不同，对每个要试验的特定材料都必须进行标定。进一步的复杂问题是速度受层压板内纤维与基体树脂比例的影响，事实上，SACMA方法SRM 24R-94（文献6.6.5.3(b)）利用这个特性来估计预浸料的树脂含量。第三，如前面在6.6.5.2节中所讨论的，表面纹理也是一个问题。

因为存在明显的不足，能用千分尺和类似设备可直接测量之处就不推荐这个测量方法。

6.6.5.4 SRM 10R-94，对铺层层压板的纤维体积、树脂体积百分比和计算的平均固化后单层厚度的SACMA推荐方法

这方法有关固化后单层厚度部分（文献6.6.5.4）规定要用球面千分尺在层压板表面上至少10处取出厚度读数，建议不要从接近边缘25 mm（1 in）处取读数，计算层压板的平均厚度再除以层数以获得固化后单层平均厚度。该方法建议，若层压板厚度变化超过0.2mm（0.008 in），可再细分层压板以进行纤维体积的计算。这间接地认为，不应在这种情况下计算得到单个固化后的单层厚度。

6.6.5.5 提交MIL-HDBK-17数据适用的固化后单层厚度的试验方法

当提交数据到MIL-HDBK-17考虑作为包含在第二卷中的内容时，满足SRM10R-94要求的方法是可接受的。此外，可以用从板件得到的测试试件的测量厚度来计算固化后单层

厚度，只要至少有 10 个分布在整个板件上的试件（使得与 SRM 10R-94 相当）。

6.6.6 纤维体积（V_f）含量

6.6.6.1 引言

固化聚合物基复合材料纤维体积（用分数或百分数表示）通常由基体溶解、烧蚀、面积重量和图象分析方法获得。通常这些方法用于由多数材料形式和工艺所制造的层压板，但对于长丝缠绕材料或其他不能构成离散层形式的材料不能使用面积重量方法。每个方法有各自的长处和缺点。其他较少使用的方法将不作讨论。

6.6.6.2 基体溶解

基体溶解方法是包含在 ASTM D 3171“由基体溶解获得树脂基复合材料的纤维含量”（文献 6.6.6.2）之中。这个技术基于用不伤害增强纤维的适当液体进行基体的溶解。取决于树脂，可采用三种不同的方法：方法 A，浓缩硝酸；方法 B，硫酸和过氧化氢的混合物；方法 C，乙烯乙二醇和氢氧化钾的混合物。例如，一般来说，所有三个方法对环氧都适用。尽管方法 B 对韧性体系更适用，但方法 B 比方法 A 对一些纤维类型的伤害更为严重。方法 B 对双马、聚酰亚胺和热塑性材料通常都适用。方法 A 和 B 两者对于芳纶纤维均会产生伤害，因此，对于芳纶纤维复合材料最好选用方法 C。

可能的误差原因：

- 若纤维被溶解液体严重伤害，试验结果将有误差。建议测试仅有纤维的受控试样以确定在试验期间纤维的质量变化，从而来验证该方法。
- 一些韧性树脂体系具有添加剂，例如人造橡胶或热塑性材料。假如这些添加剂不被溶解液体溶解，它们可能附着到纤维上引起错误的结果。
- 树脂的不完全溶解。
- 试样的尺寸必须足够大以便被精确地表征和称重。
- 精确度依赖于密度测量的精确性。

6.6.6.3 烧蚀

烧蚀方法在标准试验方法 ASTM D 2584“固化增强树脂的烧蚀”中描述。该技术确定了固化聚合物基体复合材料的烧蚀，该烧蚀可认为是树脂质量。对已秤重的试件加热至树脂基体被氧化和转变为挥发物质。在除去残留灰烬后，再秤剩余物（增强纤维）重量并计算损失百分比。为计算纤维体积要求纤维密度和复合材料密度（至三位有效数字）。

可能的误差原因：

- 在这样的试验条件下，如果纤维重量增加或减少，结果将是有误的。（为此，这方法不适用于芳纶纤维而对于碳纤维则要求进行专门的温度控制）。
- 若存在填充物，必须与树脂一起被氧化。
- 在试验期间树脂（及填充物，若存在的话）分解不完全。
- 任何挥发物如水分、残余溶剂等将引起误差，除非它们少到可以忽略。
- 若试样加热太快，可能出现不燃残余物（纤维）的机械损耗，从而引起错误的结果。

6.6.6.4 面积重量/厚度

在 6.6.6.2 节和 6.6.6.3 节中讨论了确定纤维体积的方法，该方法是通过化学或热的方法破坏性地把纤维从基体中分离，测量在试样中纤维的质量，从而来确定纤维体积。正如 2.4.3 节中有关归一化的讨论，对纤维面积重量和纤维密度的给定值，存在着层压板（或试件）厚度和纤维体积两者间的关系。这个事实提供了另一个无损确定纤维体积方法的基础。

一般来说，该方法包括测量层压板或试件的厚度，并利用测量的厚度、层压板的层数和先前确定的纤维面积重量和纤维密度来计算纤维体积。采用方程 6.6.6.4(a)或一个相当的形式。

$$V_f = \frac{\mathrm{FAW} \times n}{t \times \rho_f} \times k \qquad 6.6.6.4(a)$$

式中： V_f=纤维体积含量

FAW=纤维面积重量（每层单位面积的质量）

n=在层压板中的层数

ρ_f=增强纤维的密度

k=单位变换系数（若需要的话）

计算的纤维体积是增强纤维对总体积的贡献。尽管空隙含量确实对层压板厚度（因而纤维体积）有影响，但它却不是在计算中的一个系数，这是由于它对总体积的贡献与树脂或任何其他非增强组分的贡献方式是相同的。由于计算需要层数，这方法仅适用于能确定纤维面积重量、有明显的层的材料形式。

这个一般性的方法以文件形式记录在 SRM 10R-94（文献 6.6.6.4(a)）中，它参考了 SACMA 推荐的其他确定纤维面积重量和纤维密度的方法。由这个方法所定义的试件是层压板件，但其概念可扩展到单个的测试试件或使用的零件。这方法注意到，用于纤维体积计算的纤维面积重量和纤维密度必须能代表所评估的试样（板件、试件或零件）。这是重要的一点。虽然树脂含量一般可能是影响纤维体积的主要因素，但纤维面积重量和纤维密度也对这个方法的精确性有重要影响。在计算中不应使用这些参数的“典型”或“数据页”值。SRM 10R-94 推荐，至少，要用各个预浸料卷的纤维面积重量和批次平均纤维密度。如果精心测量了厚度（见文献 6.6.5）和采用了适当的纤维面积重量和纤维密度值，这个方法能达到相当的精确度，该方法可能比严重依赖于实验室技术的破坏性方法更为可靠。

对某些类型的试件，厚度测量的精确性可能不足以得出精确的纤维体积。特别是，非常薄的试件无法取得三位有效数字的精度。此外，对于具有不规则表面的试件，不可能可靠地测量厚度。作为直接地测量试件厚度方法的替代，可利用方程 6.6.6.4(b)来计算：

$$t_c = \frac{M}{A \times \rho_c} \qquad 6.6.6.4(b)$$

式中：t_c=计算的层压板（或试件）的平均厚度

M=试件的质量

A=试件的表面面积

ρ_c=测得的复合材料试件密度

联立方程 6.6.6.4(a)和 6.6.6.4(b)则给出下述借助于层压板试件质量、密度和面积表示的纤维体积含量表达式：

$$V_f = \frac{FAW \times A \times \rho_c \times n}{M \times \rho_f} \times k \qquad 6.6.6.4(c)$$

当质量以 g，FAW 以 g/m^2，密度以 g/cm^3 和面积以 in^2 为单位时，k=1/1550。

由于这个方法的变异性，试件必须从层压板或零件中截取，要使得它的边缘被干净地切割而没有任何碎屑。理想的试件应该是矩形，使得可从试件的长和宽来计算面积。若可能的话，试件应该在至少离开任何层压板（零件）的边缘 25.4 mm（1 in）处被切割，以使得由于纤维损伤所引起的边缘效应最小。由具有适当精度的天平来秤重以获得试件质量，并用阿基米德或其他适当的方法来测量密度（见本册的 6.6.4 节）。在文献 6.6.6.4(b)中可得到更详尽的细节。

可能的误差原因：

- 采用不适当的测量设备引起在测量厚度上的不精确，特别是有纹理的表面（见 6.4.2 节）。
- 在切割试件时引起的边缘损伤或由于测量设备或技术的不适当产生的表面积计算（这方法中的面积变化）不精确，特别是对于形状不规则的试件。
- 试件上所测量的厚度变化太大（在该情况中计算的平均纤维体积不代表试件的所有区域）。
- 在固化期间纤维严重受损（展开）（与预浸料的测量值相比，它使试件中的纤维面积重量明显降低）。
- 采用不能代表试件中纤维的纤维面积重量和/或纤维密度值。

6.6.6.5 用图像分析法确定纤维体积

6.6.6.5.1 背景

图像分析方法提供了一个测量纤维体积的技术，该技术排除了废弃的化学物的产生，并同时提供了关于空隙体积在层压板的方位和沿厚度方向纤维分布的信息。这个技术的基本假设是，对纤维在随机横截面上的二维分布的评估代表了体积纤维分布。这个假设对于常数截面纤维是有效的，例如在单向带层压板中可以发现这种情况，但对于机织层压板是无效的。这个技术对聚合物基体中的碳纤维，以及对于具有适当反差的其他纤维/基体组合很适用。对于诸如玻璃纤维等情况，它不能被很好地使用，这是由于在玻璃纤维和周围基体间的低反差使得很难精确测量。对于这种评估还没有工业界的标准试验方法。因此，本节将概括地叙述该方法。图像分析法的计算机软件有商业供货。

6.6.6.5.2 设备

该技术要求使用金相学试件制备设备、一个至少达到 400 倍放大倍数并具有将图像转化为数字照相机功能的反射光显微镜、一个带有图像采集卡和图像分析软件的计算机。虽然具有自动图像采集系统，这个分析工作也可由手动的试件平移和聚焦来完成。软件宏的使用能减少纤维体积测量过程所要求的时间，宏允许使用者自动操作重复的软件指令。

6.6.6.5.3 试件制备

用标准的金相技术来制备一小段层压板。典型的试样边长为 2 cm（3/4 in）。横截面沿层压板的厚度方向截取。横截面相对于层压板的方位取决于所要评估的层压板内纤维的方向。能用图像分析技术评估铺层方位从 0°到约 60°的层压板的纤维体积。在铺设角大于 60°

以上的情况下，纤维边缘的清晰度由于表面下的纤维而变得扭曲。若要评估的是 0/90 铺设的层压板，可以将层压板在 45°方向截取，以便能评估所有层的纤维体积。若要测量 0/±60 层压板的纤维体积，横截面可沿 0°方位，以便能够评估所有的层。

抛光试件的表面应该展现纤维和基体之间清晰的轮廓。应该在尽可能高的放大倍数下进行纤维体积测量，这在某种程度上取决于被检测的纤维，但对于大多数纤维应使用的放大倍数至少在 400-1 000 倍，以便在观察的视场中能达到 30-100 根纤维。当进行面积测量时，在分析中可包含部分纤维。若要确定各个纤维的面积，这是不现实的。一个典型的图像如图 6.6.6.5.3 所示。

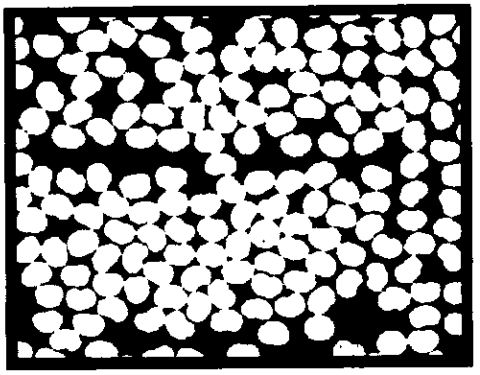


图 6.6.6.5.3　典型的灰度图像（M55J 纤维）

6.6.6.5.4　图像分析

纤维体积图像分析技术的目的是区别纤维和基体。将图像采集为亮度色标，用亮度门槛值来选择纤维和基体之间的轮廓点，通过评定如图 6.6.6.5.4(a)所示图像的直方图的值来确定门槛值水平。一般来说，一旦对给定的横截面选定了门槛值，当采集了该试件另外的图像时，该门槛值不必再改变。在采集图像以确认门槛值水平准确性时，显示直方图是一个好的作法。用门槛值水平来将灰度图像转变成双色图像（6.6.6.5.4(b)），在该图中纤维不是黑色就是白色而基体则是相反（白色或黑色）。计算机将计算黑色和白色象素的数目，纤维象素与图像中象素总数之比就是纤维体积。

当自动控制的图像系统可被程序化以分析整个横截面时，这可能需要多达 1 000 幅图像。利用 20-50 试样由手工操作系统即能获得精确的结果。试验显示，在纤维/树脂均匀地分布之处，只要少至 20 个试样，平均纤维体积值收敛至恒定值。手工采样应分布遍及整个横截面。

单个画面分析的典型步骤为：

1. 放置试件。（人工/自动移动放置试件的台面）
2. 显微镜聚焦。（在较老的计算机上人工聚焦要使用实时监控器，而较新的计算机具有足够快的采集速率而不必使用监控器。）
3. 采集图像。（用于测量纤维体积的图像可以是单个画面或是多个画面的平均。集成几个图像能弥补一个图像的低发光度。考察直方图将指出图像是否适于评定。）
4. 鉴别对应于纤维的象素。（应该检查直方图以保证所选择的门槛值是正确的）
5. 生成双色图。（高于门槛值的象素将是黑的，而小于门槛值的象素将是白的。）
6. 计算白色和黑色象素的数量。（一般来说，只需得到一种颜色的数量。在画面中

象素的总数保持常值，这样对于给定的图像，纤维象素的数目就是全部所需记录的。）

进行纤维体积测量所要求的时间可以通过采用在图像分析程序内的宏而加快速度。在显微镜聚焦后（步骤 2），通过对于启动采集序列的一次键击可以将宏启动（步骤 3 至步骤 6）。可以显示直方图，使操作者能够检验所选的门槛值是否合适。某些图像软件程序具有自动控制的门槛值运算。

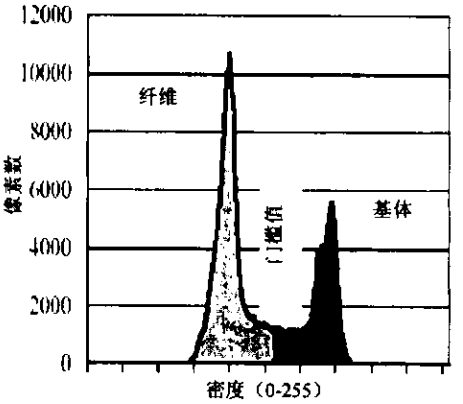


图 6.6.6.5.4(a)典型的亮度色标纤维和基体分布的直方图

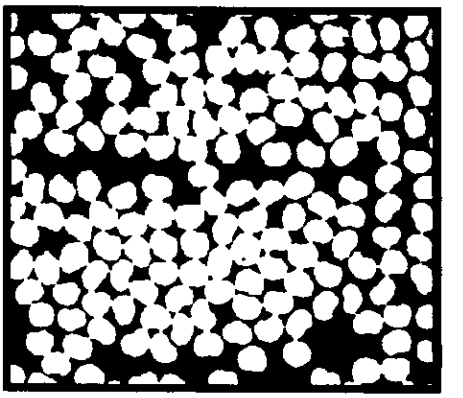


图 6.6.6.5.4(b) 双色纤维图像

6.6.6.5.5 误差源

- 聚焦不好或不清洁的透镜可能扭曲图像，从而将给出不准确的结果。
- 低劣的横截面的金相制备技术使得难于得到精确的门槛值。
- 放大倍数不够将导致纤维的糟糕的清晰度。
- 显微镜光线不足或空白场图像的不正确使用将使亮度分布发生畸变。照亮表面的白炽灯泡中的灯丝可能不均匀，使试件表面光亮度分布不均匀，从而得到发生畸变的直方图。这个问题可以通过创建一个从获得的图像中减去的空白场图像而得到修正。空白场可以将显微镜聚焦稍差或聚焦于抛光的放置材料表面清洁区域来得到。图 6.6.6.5.5(a)和(b)阐明了这个修正。

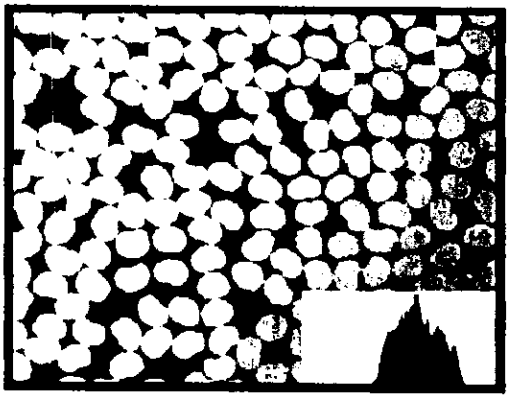


图 6.6.6.5.5(a) 具有照明度变化的横截面的亮度色标图像和直方图

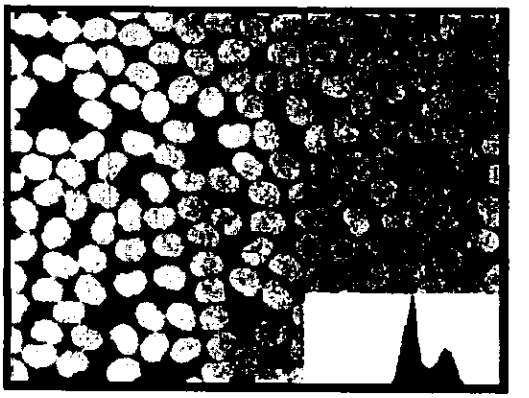


图 6.6.6.5.5(b) 用空白场补偿的照明度变化的亮度色标图像

6.6.7 空隙体积（V_v）含量

6.6.7.1 引言

增加复合材料的空隙体积（以分数或百分数来表示）可能对其力学性能起着负面的作用。固化聚合物基复合材料的空隙体积可以通过溶解和图像分析评定来获得。溶解评估法是采用组分含量和密度数据来计算体积空隙含量。图像分析估算是由显微图的方法而获得。

6.6.7.2 溶解评估法

确定空隙含量最普通的试验方法在 ASTM D 2734“用于增强塑料空隙含量的试验方法”中描述（文献 6.6.7.2）。利用层压板内树脂和纤维重量百分比（见 6.6.6 节），连同层压板（见 6.6.4 节）、纤维（见 3.3.2 节）和树脂（见 4.5.5 节）的密度来计算空隙体积含量。（纤维和树脂密度通常从材料供应商获得）。

这个方法对于密度和组分重量百分数的变化很敏感，因此重要的是，要使用代表被测试样内组分密度的纤维和树脂密度，且精确到三位有效数字。偶然情况下，可能计算出负的空隙含量，试验的精度在±0.5%的量级，因此，在-0.5%-0%之间的计算值一般可认为是零。对较大的负值，应对在技术上和方法上可能的错误进行研究。应注意到，试样的位置和尺寸要能代表材料，并且要足够大以使试验误差最小。

可能的误差原因：

- 若试样未经精确切割，体积测量可能不准确。
- 若试样在密度确定前未经干燥，层压板密度可能不准确。
- 若确定的密度值少于三位有效数字，空隙体积可能不准确。

6.6.7.3 利用图像分析确定空隙体积

6.6.7.3.1 背景

在 6.6.6.5 节中所述的图像分析技术也能用于确定空隙体积百分数。这个技术假设，孔隙率在整个层压板内基本上是相同的，因此，随机的横截面就能成为一个精确的代表。若出现重大的线性（沿纤维长度）孔隙率，这个假设是不正确的。一个典型的亮度色标图像如图 6.6.7.3.1(a)所示。

空隙体积测量包括采用三个峰值来代替两个峰值的直方图如图 6.6.7.3.1(b)所示。第一个峰值代表纤维，第二个峰值代表基体（树脂），而第三个峰值代表空隙。然后利用三种颜色来表示直方图的区域（白色、灰色和黑色，或由使用者选择的其他颜色）。然后按 6.6.6.5 节中所述，用所测每个颜色的面积对总测量面积之比，来进行面积百分比的测定。这里假设在三个面积之间存在着适当的对比度。

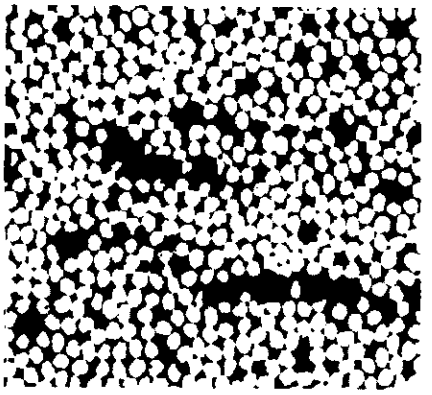


图 6.6.7.3.1(a) 取自 400×下含空隙层压板的典型亮度色标图像

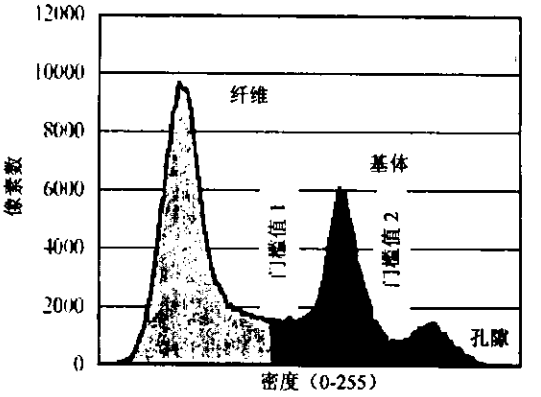


图 6.6.7.3.1(b) 图 6.6.7.3.1(a)所示图像的亮度分布直方图

设备和试件制备与 6.6.6.5 节中所述相同。当仅测量空隙体积或当空隙分布不均匀时，可以用较低的 100-200 倍的放大倍数。图像分析也与 6.6.6.5 节中所述相同。

6.6.7.3.2 误差源

- 在空隙体积测量中非均匀空隙分布可能导致重大误差。图 6.6.7.3.2(a)和 6.6.7.3.2(c)表示在图 6.6.7.3.1(a)中所示的空隙周围的面积。图 6.6.7.3.2(b)和 6.6.7.3.2(d)分别是反映图 6.6.7.3.2(a)和 6.6.7.3.2(c)的直方图。在横截面上空隙分布是不均匀的，因此测得的空隙体积随放大倍数降低而减少。利用 400，200，100 倍放大倍数所获得的单个图像，得出的空隙体积分别是 7.71%，2.17%和 0.78%。当 100×图像几乎包含了层压板的整个厚度时，从这个图像所测得的空隙体积是最精确的。对于更厚的层压板，100 倍的放大倍数仅为层压板厚度的一部分。纤维体积测量精度也随着放大倍数的下降而降低。在较低放大倍数下进行的空隙体积测量比用其进行纤维体积测量具有更高的精度。
- 在离散相中的基体变体（热塑性韧化粒子）可能会与空隙混淆。
- 便用的放大倍数越低，有效象素尺寸越小。

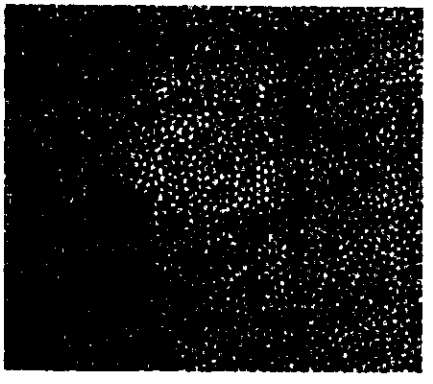


图 6.6.7.3.2(a) 取自 200×下含空隙层压板的典型亮度色标图像

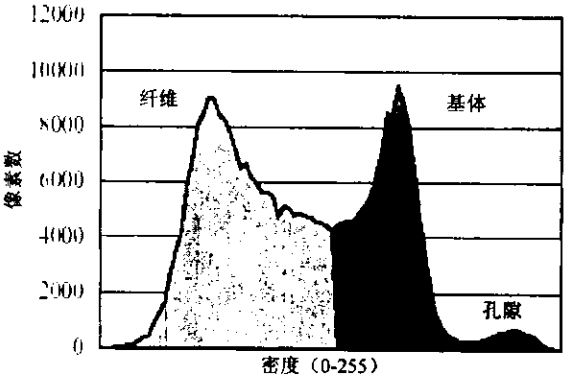


图 6.6.7.3.2(b) 图 6.6.7.3.2(a)所示图像的亮度分布直方图

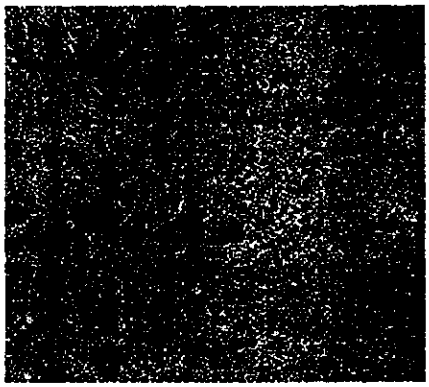


图 6.6.7.3.2(c) 取自 100×下含空隙层压板的典型亮度色标图像

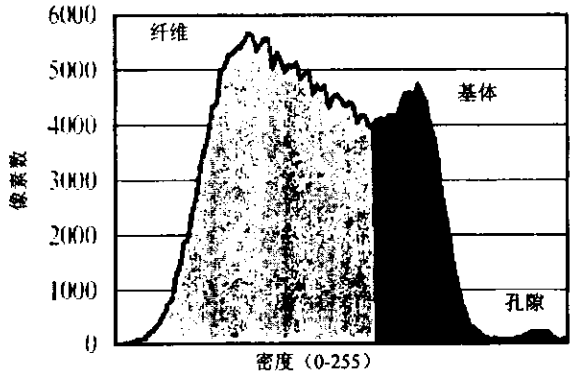


图 6.6.7.3.2(d) 图 6.6.7.3.2(c)所示图像的亮度分布直方图

6.6.8 湿扩散系数

沿厚度方向的水分/液体扩散系数：D_3 或 D_z

水分/液体平衡含量：M_m

面内水分/液体扩散系数：D_1，D_2 或 D_x，D_y

许多聚合物材料吸收水分，虽然以不同的数量和不同的速度。在潮湿空气中最为广泛地遇到湿气，但吸湿也在水（和盐水）的沉浸中明显地见到。液体曝露的其他形式，例如液压油或发动机燃油或甚至（如在生物医学应用中）体液，在某些应用的使用期中也可能遇到，它们都被认为是潮湿问题而适用于这个讨论*的目的。

最通常采用的湿扩散模型，并为许多材料证明遵循得相当好的模型，是 Fick 扩散。这个模型的一维例子（与水分浓度无关的扩散系数）如下所示；它直接地类似于更为普遍研究的热扩散方程：

$$\frac{dc}{dt} = D\frac{d^2c}{dz^2} \qquad 6.6.8(a)$$

式中：C=水分浓度（g/mm^3）

T=时间（s）

D=湿扩散系数（mm^2/s）

z=扩散的坐标方向（mm）

仅有的湿扩散系数标准试验方法（将在下一节讨论的 ASTM D 5229）假设，测试材料具有象单相 Fick 材料一样的性能。用于计算湿扩散系数的这个试验方法中的程序对其他性能材料将不是准确的。非 Fick 材料的主要例子是含有提供水分迁移直接路径的连通微裂纹的材料。为确定材料是否为 Fick 材料，需要进行试验、检验性能和计算扩散系数，然后将预估性能与试验结果相比较。若试验性能不符合 ASTM 标准中的指南，或试验/分析相互吻

*存在着术语“水分”的几个可能定义。它已被用于表示液体蒸气，或它的冷凝物、或甚至大量的大多数液体本身。在这些形式的一种或更多种中，它已经被限于水本身，或应用于其他液体。尽管术语“液体”对本节涉及的内容是有值得商榷的更为精确的术语，但术语“水分”被保留作为一般性用法，这主要是由于在讨论这些问题中历史上强调和术语的用法。例如用于描述吸收液体平衡含量的字母“M”是取自“Moisture”的字头。所以，为达到便于该讨论的目的，扩展水分定义到所有吸收的液体。

合不好，扩散可能不符合单相 Fick 模型。然而，采用在标准中没有包含的方法，若多相 Fick 性能模型与试验结果符合较好，能够用试验期间采集的数据计算多相 Fick 性能的扩散系数。并且，即使对不符合单相 Fick 性能的材料，也能由这些试验确定平衡吸湿量。

还有确定吸湿量的其他方法，但由于昂贵、缺乏标准化和/或其他限制而不被广泛使用，且不作进一步讨论。较新的这样的方法之一是核磁共振（NMR），在核磁共振图象机中将该方法用于非导电材料（这里把碳纤维排除在外）无损地确定水分浓度的空间分布。

聚合物复合材料的两个与水分相关的主要特性是沿厚度方向湿扩散系数常数 D_3 或 D_z，（湿扩散速度）和平衡吸湿量 M_m。M_m 是平衡时确定的总吸收水分，表示为全部材料重量的百分数。对于给定材料，湿扩散系数实际上仅对给定环境和扩散方向是一个常数，这是因为它通常随温度而发生剧烈改变。在另一方面，平衡吸湿量并不明显地随温度变化，但在潮湿空气情况下确实随相对湿度水平而改变。（关于这些性能的使用和应用的重要背景材料描述于第一卷 2.2.6-8 节和 6.3 节之中。）

一般来说，聚合物复合材料的湿扩散系数不是各向同性的。面内湿扩散系数（D_1，D_2 或 D_x，D_y）比 D_3 或 D_z 高一个数量级不是不正常的。像热扩散系数和热传导率一样，一般的扩散模型认为湿扩散系数是二阶张量，数学上，它的变化（变换）按张量变换法则是方向的函数。尽管可能试图忽略边缘的表面积，该表面积仅构成全部表面积的一个小的部分，但在有限尺寸的测试试件中沿着边缘的湿扩散可能是至关重要的。了解到这点，通常的方法是限制沿边缘的扩散，使得可以忽略它的影响。面内湿扩散系数很少被精确地量化，目前还没有用于确定面内扩散系数的标准试验方法。

倘若潮湿曝露没有使材料开裂或化学上没有变化，解湿性能是与吸湿性能相反的。事实上，好的去湿性能是 Fick 性能定量指示之一。

6.6.8.1 标准试验方法

- ASTM D 5229/D 5229M
- SACMA RM 11R

严格适用于确定两个主要性能的仅有的标准试验方法是 ASTM D 5229/D 5229M（文献 6.6.8.1(a)）。另一个只适用于确定平衡吸湿量的试验方法是 SACMA RM 11R（文献 6.6.8.1(b)）。SACMA RM 11R 基于 ASTM 标准中所用的相似方法，它适用于不太严格的性能确定，并且限于 85%RH 潮湿空气的单一的固定环境。这两个试验方法都是测定重量的实验。一块材料最初进行称重，并在曝露于所研究的液体环境期间周期性地称量。从这些数据中能够确定沿厚度方向湿扩散系数（仅 ASTM）和平衡吸湿量（ASTM 和 SACMA 两者）。

两个试验方法，特别是 ASTM D 5229，很适用于在试验方法文件中的这个课题。任何感兴趣的、要想更好地了解此课题的人员应该由阅读试验方法以及本手册中供参考的上述相关章节开始。这些标准的主要文献是 6.6.8.1(c)。此外，进一步的阅读将包括在 ASTM D 5229 中所指定的其他文献。

由试验方法本身当前尚未涉及的值得注意的试验事项：

- 对单个测试试件，ASTM D 5229 规定了必须严格遵守的要求，即要以在相同试件上的相同试验来确定湿扩散系数和平衡吸湿量。然而，更为实际的作法是，测试两个不同几何形状的试件以获得这些性能：一个为薄试件，利用该试件可以比较

快地确定最大的吸湿量，另一个为厚试件，由该试件可以获得一个极为稳定的水分质量增益对于时间平方根曲线的初始线性斜率。两个试件的方法提供了比在1992年该标准初始版本描述的方法更为精确和划算的的结果。期望尽可能快地修订 ASTM D 5229，以便包含这个概念。

- 尽管 ASTM 试验方法采用基于扩散系数的指南来评估平衡是否满足（例如对较高扩散系数的试件，最后两次称重之间允许的最大质量变化（用于确定何时达到有效平衡）是较低的），SACMA 试验方法采用固定的 24 小时参考时间周期。尽管 SACMA 试验方法固定了试验参数和得到可变的误差，但 ASTM 试验方法所采用的途径本质上是调整试验参数以得出固定的最大误差。

重要的是要注意到，聚合物的湿响应变化很大。存在着一些类别的聚合物及其复合材料，由于它们的分子结构，对于任何评估程度，它们本质上不吸水。这些试验方法对于这种材料不可能产生有意义的结果。一种这样的聚合物为聚丁二烯。

经粗略的调查，还存在看来没有明显的湿度重量变化响应的其他聚合物，但实际上它们具有低的扩散常数。然而，给出充分的曝露时间，这些聚合物将最终吸收值得注意的水分重量。某些高性能的热塑性材料和热固性材料属于这类型。

这个问题的另一极端是快速吸收（和释放）水分的聚合物，使得为避免大的测量误差，必须对重量测量、标定和环境箱控制特别小心。用于减少这些材料试验敏感性的最方便的解决方案是简单地增加测试试件的厚度。聚醚酰亚胺就是这类材料。

尽管并未严格地归入本节的范围，但值得注意到的是，现行的大多数聚合物基夹芯结构芯子材料吸收水分并受到水分的影响。特别是当蜂窝芯子对于其本身的吸湿响应进行评估或在受控的吸湿量条件下作为曝露的芯子进行力学试验时，表面面积相对于芯子壁的厚度（通常小至 0.076 mm（0.003 in））是如此的大，以致使材料能快速吸收/释放水分。因此，对于环境试验或浸润处理，曝露的芯子对试验方法非常敏感。

6.6.8.2　提交MIL-HDBK-17数据适用的湿扩散性能试验方法

在表 6.6.8.2 中的试验方法所生成的数据目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表 6.6.8.2

性　能	符　号	正式批准、临时和筛选数据	仅为筛选的数据
面内湿扩散系数	D_1，D_2（单层） D_x，D_y（层压板）	——	——
厚度方向湿扩散系数	D_3（单层） D_z（层压板）	D 5229	——
平衡吸湿量	M_m	D 5229 SRM 11R（仅为 85%潮湿空气）	——

6.6.9　尺寸稳定性（热和吸湿）

在复合材料中尺寸的变化一般是温度和/或吸湿量的函数。利用机械、光或电的传感器可以检测试样在长度或体积上的变化，并将其作为温度或时间的函数而记录下来。业已使用了测量线膨胀的几种技术，例如刻度盘量规、千分尺、望远镜、直线位移差动变压器式传感器（LVDT）、干涉仪和 X-射线衍射图。

6.6.9.1 尺寸稳定性（热）

α，α_{11}，α_{22}

6.6.9.1.1 引言

众所周知，随着温度的变化大多数材料会改变其尺寸。事实上，大多数材料随温度增加而膨胀。各向同性材料一般包括块状金属、聚合物和陶瓷材料，按照定义，它们沿所有方向相等地膨胀。用于增强这些块状材料的增强纤维可以是也可不是各向同性的。例如，无机的纤维如玻璃、硼和其他陶瓷是各向同性的，而有机纤维例如碳、芳纶（即杜邦的Kevlar）、聚乙烯（即 Allied's Spectra）和其他材料不是各向同性的。

即使采用各向同性纤维与各向同性基体的组合所形成的复合材料将不是各向同性的。可能比基体更刚硬的定向排列的纤维使得所产生的复合材料沿排列方向的刚度高于在其横向的刚度。相应地，各向同性的增强纤维的热膨胀与基体的热膨胀一般是不同的。在纤维方向纤维和基体平行膨胀，而在横向它们依次膨胀。于是，沿轴向复合材料热膨胀强烈地受控制于（刚硬）纤维的热变形。在横向，热膨胀与该方向纤维和基体的相对量以及它们各自的热膨胀成比例。也就是，即使对于各向同性纤维在各向同性基体内的情况，复合材料的热膨胀也是各向异性的，它受到由各组分的力学和热性能、纤维排列方向和存在的纤维和基体的相对量所构成的复杂形式的控制。

对各向异性纤维，尽管可以预计或可测量，但所形成的复合材料的热各向异性甚至更为复杂。如碳、芳纶、聚乙烯这样的各向异性纤维，在纤维轴向具有负热膨胀系数，而在横向（直径方向）具有比较高的正热膨胀系数，从而有着特定的应用。由于纤维轴向刚度比基体刚度高许多，所形成的复合材料很可能具有负的轴向热膨胀系数（尽管横向膨胀系数是正的）。事实上，由一个具有适当轴向刚度和负热膨胀系数的纤维与一个给定刚度和（正的）热膨胀系数的基体的组合，可以实现零轴向热膨胀的复合材料（尽管将再次获得一个正的横向膨胀）。于是，复合材料的热膨胀性能可被裁剪以适应特定的应用，就像力学性能一样。

通常热稳定性是用热膨胀系数（CTE）来定义，以符号α 表示。典型的单位是 10^{-6}/K（每一度绝对温度的微应变）。由于 CTE 是按照膨胀与温度曲线的斜率来计算的，这里假设在感兴趣的温度范围上为线性膨胀。然而，膨胀未必是线性的，这取决于材料和温度范围。当在感兴趣的温度范围上膨胀为非线性时，通常的作法是，分割为近似于线性的子区域来计算各自的 CTE。于是，一般来说，CTE 为温度的函数，对于给定材料 CTE 不是一个唯一的数值。

用于基体材料的聚合物种类，如环氧、双马来酰亚胺、聚酰亚胺和高温热塑性材料，与金属和陶瓷相比具有较高的 CTE 值。在高于它们的玻璃化转变的温度情况下，比低于它们的转变温度情况具有更大的 CTE 值，这个特性可用于确定玻璃化转变温度（见 6.6.3 节）。具有几个聚合物组分的材料可能有多重玻璃化转变，使得膨胀对温度的曲线更为复杂。

6.6.9.1.2 现有的试验方法

有 4 个 ASTM 标准，它们控制了非增强（纯的）聚合物及其复合材料的热膨胀的试验测定。ASTM D 696（文献 6.6.9.1.2(a)）是这些标准中最为简单的一个，它仅适用于-30~30°C（-20~90°F）的比较窄的温度范围。关于这个狭窄范围的原因是，标准主要打算用于测试塑料（日用品塑料），它们的特性限定了使用温度的范围。设备本身，玻璃质的硅膨胀计

（经常称为熔融石英或石英管膨胀计，尽管不在此 ASTM 标准之中）能够用于更大的温度范围。实际上，ASTM E 228（文献 6.6.9.1.2(b)）利用类似的设备并且规定了-180~900℃（-290~1 650℉）的使用温度范围，尽管对超过 500℃（900℉）的使用给出一些小的告诫。这个标准打算用于较为广泛的测试材料，包括金属、塑料、陶瓷、耐火材料、复合材料和其他材料。

ASTM E 831（文献 6.6.9.1.2(c)）利用热力学分析（TMA）来测量热膨胀。TMA 的工作原理就像玻璃质硅膨胀计的原理，这样使用的温度范围是相当的。ASTM E 831 指出使用温度范围为-120~600℃（-180~1 100℉），并建议，根据具体的仪器和所用的标定材料，这个范围可以扩大。

按 ASTM D 696，玻璃质硅膨胀计被限定用于大于 1 με/K 热膨胀系数的测量。ASTM E 831 对 TMA 建议了 5 με/K 的下限，这个较低的分辨率是由于 TMA 设备中使用较小的试件。在任一情况下，这个分辨率水平对大多数块状材料是适宜的，无疑适用于大多数金属材料和聚合物，虽然对于某些陶瓷是在边缘状态。显然，它对于上面提到的设计具有热膨胀系数接近零的那些复合材料不合适。

ASTM E 289（文献 6.6.9.1.2(d)）利用干涉测量法，它允许热膨胀系数的测量可低达 0.01με/K。ASTM E 289 指出的使用温度范围为-150~700℃（-240~1 300℉），同样还建议，根据所用的仪器和标定的材料，这个范围可以扩大。比起膨胀计来说，干涉测量法要求操作者具有更高技艺和更为谨慎，并具有较复杂的仪器。

除了使用膨胀计或干涉测量法的 ASTM 标准方法外，也可用粘贴的箔式应变计来确定 CTE。一般来说，测试材料测量的热膨胀与同一环境箱内准确地已知 CTE 的参考材料相比较。尽管不是 ASTM 或其他标准方法，文献 6.6.9.1.2(e)给出了用应变计测量热膨胀的全部细节。使用温度范围取决于要测量的材料和所用的应变计类型。按文献 6.6.9.1.2(e)，最精确的应变计能够用于-45~65℃（-50~150℉）的温度范围，尽管采用其他类型应变计这个范围还可能稍微扩大。然而，一个同等重要的限定是，在与应变计材料刚度有关的温度下测试材料的刚度，刚硬的应变计可能局部地增强测试材料，导致错误的低的 CTE 结果。

6.6.9.1.3　测试试件

不论是纯聚合物或复合材料，热膨胀试件一般都为柱状的，并且在测量的方向具有与提供的材料及试验设备所允许的长度。试件越长，长度变化越大，于是，对于给定的仪器分辨率，CTE 的测量更为精确。尽管试件的横截面形状是无关紧要的，但试件横截面一般为圆形、正方形或矩形。在试验期间通常要对试件施加一点小的轴向压力，以使标定设备与试件的端部保持接触，这能导致高温时低刚度材料，如某些未增强聚合物，的柱屈曲。事实上，即使在重力作用下试件下垂也能导致在该材料内的不正确的变形。于是，试件的横截面形状与实际情况越接近越好，即方形或圆形。

按 ASTM D 696 的通用指南，用于膨胀计测试试件的一般长度为 50-130 mm（2-5 in），横向尺寸为 6-13 mm（0.25-0.50 in）。按 ASTM E 831 规定，TMA 试件长度应为 2-10 mm（0.08-0.40 in），而横向尺寸不超过 10 mm（0.39 in），若在报告中注明的话，也允许采用其他长度。通常 TMA 设备构型本身限制了试件尺寸。对干涉测量法，ASTM E 289 规定最理想的长度是 10-20 mm（0.4-0.8 in），而横向尺寸为 5-12 mm（0.2-0.5 in）。

推荐这些小尺寸主要是由于 Fizeau 干涉计的几何形状和在参考物和测试试件中达到最

小的内部温度梯度的可行性。Michelson 方法是更为通用的，除了激光本身经由的连贯性长度外，它对任何试样的尺寸或形状都不限制，这也同样取决于所使用具体激光的频率稳定性。一个典型的应用是将反射面（镜子）放置在试件的端点或靠近端部，之间相隔的距离是任意的，可从接近零至约 200 m。在多数情况中，不用试样的端部是明智的，这是因为很多材料，特别是复合材料、层压板或夹芯结构，在靠近边缘或端部出现应力状态的变化，这些区域与内部或大部分区域相比将呈现不同的 CTE 值。

因此，修改 ASTM D 289 的工作正在进行。

6.6.9.1.4 试验设备和使用仪器

三种所用的通用设备是膨胀计、热力学分析仪和干涉计，如已在 6.6.9.1.2 节中所介绍的，在相应的 ASTM 标准中充分地描述了这些设备。

6.6.9.1.5 提交MIL-HDBK-17数据适用的CTE试验方法

由下列试验方法（表 6.6.9.1.5）所生成的数据目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表 6.6.9.1.5 提供 MIL-HDBK-17 数据适用的热膨系数试验方法

材料类型	性能（符号）	正式批准、临时和筛选数据	仅为筛选的数据
聚合物基体（未增强的）	α_m	ASTM E 228 ASTM E 831 ASTM E 289*	ASTM D 696
纤维轴向膨胀高的复合材料	α_{11}，α_{22}	ASTM E 228 ASTM E 831 ASTM E 289**	ASTM D 696 （仅 α_{22}）
纤维轴向膨胀低的复合材料	α_{11}	ASTM E 289	ASTM D 696
	α_{22}	ASTM E 228 ASTM E 831 ASTM E 289*	ASTM D 696

注：*不要求分辨率水平。

**对 α_{22} 不要求分辨率水平。

6.6.9.2 尺寸稳定性（吸湿）

β，β_{11}，β_{22}

6.6.9.2.1 引言

由于吸湿引起的尺寸稳定性习惯上用湿膨胀系数（CME）来定义，它用符号β（是在希腊字母中紧随着α 的第二个字母，α 一般用于表示热膨胀系数 CTE，是适用于热尺寸稳定性的类似量）。复合材料在不同的方向有不同的 CME 值，而一般未增强（纯）聚合物在所有方向膨胀相同。

未增强聚合物的湿膨胀系数方便地以单位 10^{-3}/wt%M 来表示，而增强聚合物的湿膨胀系数值方便地由单位 10^{-6}/wt%M 或 ppm/ΔM 来表示。热膨胀系数一般用 10^{-6}/°C（με/°C）来表示。由于温度变化和吸湿变化所导致的应变分别正比于$\alpha\Delta T$ 和$\beta\Delta$M，可认为湿膨胀对于尺寸稳定性的作用大于热膨胀的作用。

在聚合物和聚合物基复合材料中的吸湿通常引起体积的膨胀（胀大）。大多数天然纤维和芬芳聚酰胺纤维，例如芳纶（文献 6.6.9.2.1(a)），吸收水分。有一个迹象，即许多碳

纤维例如 AS4、IM6 和 IM7（参考文 6.6.9.2.1(b)，(c)）也吸收水分。此外，许多人造纤维显示出具有负的湿膨胀系数。聚乙烯纤维（例如 Allied 系列）也吸收水分，但它们保持相对地尺寸稳定，特别是在纤维轴向，这是因为刚硬的分子结构。一般来说，聚合物基体要求由于吸收水分而出现一定的膨胀量。对于单向排列的碳纤维聚合物基复合材料，CME 数值一般在纤维方向每百分重量变化为百万分之 50-60（ppm/ΔM），在横向（垂直于纤维方向）以及厚度方向为 3 000-8 000 ppm/ΔM。对于层压板，例如准各向同性铺层，其面内 CME 值一般是在 200-500 ppm/ΔM 范围内。

目前还没有关于吸湿尺寸稳定性试验的 ASTM 或其他标准。对于未增强（纯）聚合物和它们的复合材料，试验方法的详细表述、使用设备的类型、以及典型的试验结果等被包含于文献 6.6.9.2.1(d)中，文献 6.6.9.2.1(e)综述了这些信息。对于实心层压板的湿膨胀系数（CME）测量在文献 6.6.9.2.1(f)中进行了描述，同时有关复合材料夹芯板的描述包含在文献 6.6.9.2.1(g)，(h)之中。ASTM C 481（6.6.9.2.1(i)），ASTM D 5229（6.6.9.2.1(j)），ASTM E 104（6.6.9.2.1(k)）提供了包括建立相应的吸湿环境的一般试验技术支持。当测量吸湿导致的应变时，在层压板厚度方向保持均匀吸湿量的重要性在文献 6.6.9.2.1(l)中进行了讨论。

用作基体材料的各种聚合物，例如环氧、聚酰胺、双马来酰亚胺、聚酰亚胺和高温热塑性材料（PEEK，PEKK，PPS，PAS，聚酰亚胺-酰亚胺等），呈现不同的湿膨胀系数。然而，认识到在给定聚合物类型内不同种聚合物在湿膨胀系数上的重大差别也同样是重要的。

正如在 6.6.8 节中所讨论的，各种聚合物基体以明显不同的速率（湿扩散系数）吸收水分，同时在饱和状态下具有非常不同的吸湿量。就是说，认识到吸湿对尺寸稳定性总的影响为 CME 和吸湿重量百分比的乘积这一点是重要的；以及出现该影响的速率取决于湿扩散系数。这也同样随着温度、应力水平和诸如微裂纹等损伤状态而发生重大变化。温度突变（热峰值）或应力（机械-吸收效应）对性能都有重要影响，例如水分吸收、蠕变率和力学的刚度特性。

6.6.9.2.2　试件制备

不论是纯聚合物或是复合材料，湿膨胀试件一般都是很薄的，以减少使其吸湿平衡水平达到相当大的百分数所要求的时间。湿扩散系数可以由重量变化相对于时间关系曲线的初始部分来确定，但是湿膨胀系数还要求对平衡或总重量变化的了解。典型的试件厚度是在 1.27 mm（0.050 in）的量级。试件的其他尺寸要做得足够大（例如 76-254 mm（3-10 in）长及 25-76 mm（1-3 in）宽），以使得重量和尺寸变化两者都能精确地测定。在两个相对表面上具有的大面积与最小的边缘面积相组合的这种试件的几何特性也展示了第二个优点，即当减少试验数据时满足一维扩散的假设。

湿膨胀试件可以被制造成所要求的厚度或从较厚的材料经机加工而成，为此，表面研磨通常起到很好的作用。

6.6.9.2.3　试验设备和仪器

为获得湿膨胀系数必须测量两个量，即总尺寸的变化和总重量变化。类似于 CTE，CME 是热力学特性，因此必须建立这样两个量的可重复和平衡的数值。这同样要求用于外推直至无限时间的局部应变和重量变化的方法，无限时间指在试样内不存在应变和质量梯度。

一种测量技术是在相同环境箱中用两个同样的试件，一个试件在分析天平上称重，而

用某种类型的膨胀计监控另一个试件的长度。称重达到接近于 0.1 mg 的分析天平和可以测量μin 的膨胀计（干涉仪）一般是适用的。可能要求将分析天平和膨胀计的电子部分设置在环境箱之外。例如，可以把重量增益的试件悬挂在箱内而通过一条细金属丝连接到分析天平上，石英管膨胀计可以伸进箱内，而其电子元件留在箱外，这就使得在相同试样上同时测量重量和长度成为可能。为避免读数失误，重要的是不允许水汽凝结到试件或悬挂的金属丝上。可以把小型加热元件按要求放在这些关键部位，以保持局部温度稍微高于周围环境温度，避免在这些关键部位出现凝结。

按照第一卷 6.3 节的通用指南，试件应该完全干燥，使得随后的测量以零吸湿状态为基准。由于吸湿速率随温度升高而迅速增加，为减少试验时间，通常的作法是，在加热箱内进行试验，同时保持规定的相对湿度，这可以高达 98%RH（足以停留在低于 100%RH 的水平，使得试件或支持金属丝上的水汽凝结不会成为无法克服的问题）。规定可接受的环境箱温度达到某个对这种测试材料允许的范围。然而，由于湿扩散速率强烈地依赖于温度，以及大多数聚合物随着吸湿而显著膨胀，可能在试件的厚度方向引起大的吸湿（因此，还有应变）梯度，即使在比较薄的情况。这些应变梯度会引起表面微裂纹，导致错误的尺寸变化测量（也导致非真实的吸湿重量增益）。例如，对于碳/环氧复合材料，作为一般规定，环境箱温度不得超过约 77℃（170℉），并具有大约为 66℃（150℉）的安全上限。

尽管可采用高温来加速吸湿试验，但这不保证所测的 CME 与温度无关。于是，在一个温度下所进行的测量可能不代表在其他温度下的 CME。这只能由多个温度下的试验确定。

对于一个在规定的温度下实施的给定试验，湿膨胀对于吸湿量的曲线图可能是非线性的，尽管它们大抵是线性的。因为 CME 是所绘的曲线的斜率，于是它将不是常数。

6.6.9.2.4　提交MIL-HDBK-17数据适用的CME试验方法

当前尚没有关于湿膨胀系数试验的 ASTM 或其他标准。提交考虑的数据必须包括试验方法的详细描述。

6.6.10　热传导性

6.6.10.1　引言

聚合物基复合材料的热传导性是适用于所有热流情况所需的热响应性能。对稳态和瞬态的热流情况均有可用的测量方法。在本节描述了稳态方法。

达到稳态时，试件厚度方向的热传导率λ是根据傅立叶（Fourier）关系式来确定的

$$\lambda = Q/(A \times \Delta T / L) \qquad 6.6.10.1$$

式中：Q=计量段热流率

A=垂直于热流的计量段面积

ΔT=横过试件的温差

L=试件厚度

在方程 6.6.10.1 中各个参数的单位为：

Q——W

A——m^2

ΔT——K

L——m

λ——W/(m·K)

瞬态方法实际上为热扩散系数的确定方法，热传导率可以根据热扩散系数来导出，在6.6.12 节中进行了描述。

6.6.10.2　可用的方法

对于稳态热传输特性，有几种 ASTM 试验方法，可将它们分为两种类型之一：作为无条件（或主要的）测量法（C 177），除非为了确认精度或建立对认可标准的跟踪能力，该方法不需要热流基准标准；或作为比较（或二次的）法（E 1225，C 518），在该方法中其结果直接取决于热流基准标准。下面概括地描述了这些方法。

聚合物基层压板测试方法的选择通常取决于测量方向。可以采用 C 177 来完成面外的测量，但是偶而也采用 E 1225 的比较法。在薄层压板上完成的面内测量，要求通过层叠若干层压板在一起而构成试件直径。通常优先选用 C 177 方法，有时候也有采用 E 1225 方法试件所得结果的报道。对于具有任一方位的层压板，闪光扩散法（flash diffusivity method）（E 1461）也是一种可行的选择（见 6.6.12 节）。其优点包括测试时间较短和试件尺寸较小。

6.6.10.2.1　ASTM C 177-97

被称之为防护热板法的 ASTM C 177-97（文献 6.6.10.2.1(a)）是一个无条件的测定方法，它覆盖了热流的测量以及当平板试件表面与处于常温下的固态的、平行的边界相接触时适于该试件的相关试验条件。此试验方法对低热传导材料是理想的，且它可应用于各种试件以及很宽的环境条件。

图 6.6.10.2.1 给出了理想化系统的主要部件：两个等温的冷表面单元和一个防护热板。防护热板由计量的面积中心件和一个同心的防护环组成。某些设备具有共面的二级防护。在这三个部件之间的夹心部分为被测量的材料。图 6.6.10.2.1 呈现了测量的双边模式，即试件实际上是由两件构成。在这样情况下，测量所得出的结果为两件的平均值，因此，要使两块试件尽可能地相同是重要的。在单边操作模式中试件是由放置在加热表面组件的一侧的单件构成，为了指导该模式的应用，可参见描述了 ASTM Practice C 1044 的文献 6.6.10.2.1(b)。

图 6.6.10.2.1 的布局图要求，要谨慎处理关于热流损耗和正确使用热防护环，以及关于温度差精确测量和温度传感器分离的问题。防护热板提供了用于测量的动力并决定了实际的测试体积，即实际被测量的试件部分。主防护环的功能是减少在仪器内的横向热流。图 6.6.10.2.1 以图示说明通过采用等温表面和在试件内的常热流线的构型来达到正确的（理想的）状态。

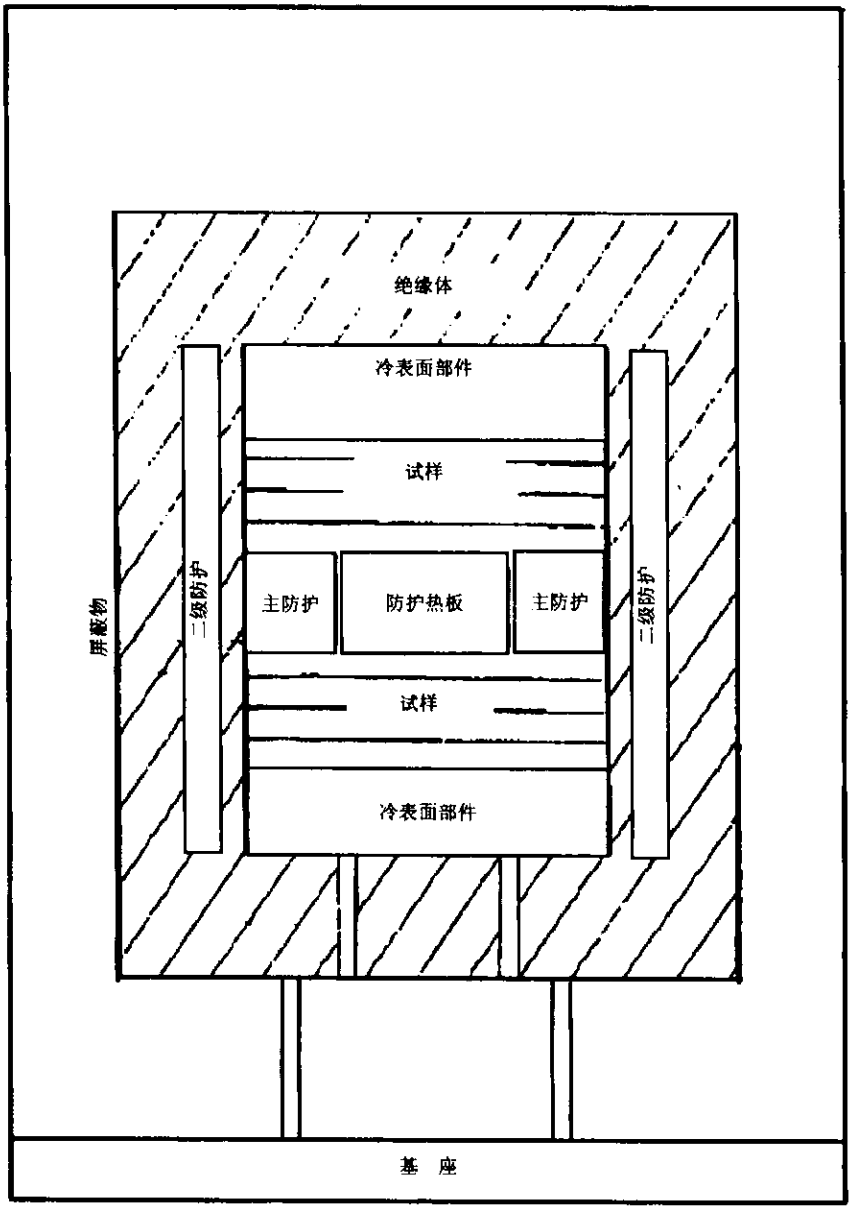


图 6.6.10.2.1 防护热板设备部件的机械元件的总布局图

必须采取措施来保证热均衡地流过试件。在真空条件下，板和试件间的非常微小的空间是除辐射热传递外的无穷大的热阻。冷热部件和试件表面之间良好的热接触可通过施加可再生的恒定夹持力至防护热板设备上来改善，例如可使用常值力弹簧来产生压力。另一个有效的解决办法是在板和试件之间放置一个可压缩的导热软材料薄片或含纤维的衬垫来改善热接触的均匀性。

为符合这个试验方法的要求则要建立稳态条件和测定在计量段中单向热流 Q，计量段面积 A，热和冷表面温度 T_h 和 T_c（在式 6.6.10.1 中 $\Delta T=T_h-T_c$），试件的厚度 L 以及任何可能影响计量段热流的其他参数。

6.6.10.2.2　ASTM E1225-99

ASTM E 1225-99 或防护纵向热流技术（文献 6.6.10.2.2）是一种比较试验方法。因此，必须采用具有已知热传导率的基准材料或转换标准。这个试验方法适用于大约在 90K 和 1300K 之间的温度范围具有有效传导率约在 $0.2<\lambda<200$W/(m·K)的材料。通过降低精度要求，它的应用可以超出这一范围。

该技术的一般特性如图 6.6.10.2.2 所示。将一个测试试件在载荷下嵌入到两个已知热性能材料的类似试件（计量杆）之间。在试验过程中通过顶部保持在高温之下而将底部坐落在冷源之上以形成温度梯度。利用具有近似相同温度梯度的纵向防护加热器使得热损耗最小。在稳态平衡条件下，根据所测量的各个试件中的温度梯度以及基准材料的热传导率来导出热传导率。

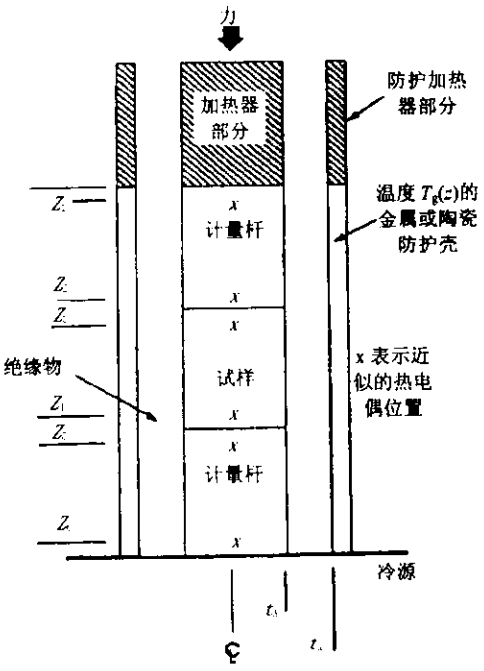


图 6.6.10.2.2　标明温度传感器可能位置的比较-防护-纵向热流体系示意图

基准材料的热导率（热传导率与长度的比值）应该与试件的热导率尽可能地匹配，以保证温度梯度的近似性和较好的精度。当计量杆和试件为等直径的正圆柱时，该技术被描述为截杆法（cut-bar method）。当横截面尺寸比厚度大时，它被描述为平板比较法（flat slab comparative method）。实际上，只要计量杆和试件具有相同的传导面积，任何形状都可以采用。

此试验方法要求在计量杆到试件界面有均匀的热传递，通常是利用施加轴向载荷连同在界面处的导热介质来获得的。该组件是由绝缘体包围并封闭在防护壳内。稳态情况下，根据顺着两个计量杆和试件所测量的温度来计算各截面的温度梯度。于是，可以利用式(6.6.10.2.2)来确定热传导率的值 λ_s，式中 Z_i=从柱体的上端面进行测量时热电偶的位置（见图 6.6.10.2.2），T_i=在位置 Z_i 处的温度，λ_m^1=顶部计量杆热传导率和 λ_m^2=底部计量杆热传导率。

$$\lambda_s=[(Z_4-Z_3)\lambda_m^1(T_2-T_1)]/[(T_4-T_3)2(Z_2-Z_1)]+[\lambda_m^2(T_6-T_5)]/[2(Z_6-Z_5)] \qquad 6.6.10.2.2$$

该结果是高度理想化的情况，因为它假设在柱体和绝缘体之间无热交换且在每个计量杆至试件界面处进行均匀的热传递。在文献 6.6.10.2.2 中进行了有关这些假设所引起误差的讨论。

6.6.10.2.3　ASTM C518-98

ASTM C518-98（文献 6.6.10.2.3(a)）描述了采用热流计测量通过平板试件的稳态热传递。这是一个比较的或二次的测量方法，因为要求对已知热传导性能的试件进行仪器标定。此试验适用于低导热材料。为满足这个试验的要求，测试试件在热流方向的热阻应该大于 0.10 m2·K/W，而边缘热损耗应该通过采用边缘绝缘和/或防护加热器来加以控制。

热流计的重要部件为两个等温板的装配件、一个或多个热流传感器和测量温度的设备以及热流传感器的输出部分。采用一个或者两个试件。三个通用的实验构型如图 6.6.10.2.3 所示，必要时要使用控制环境条件的设备。

热流传感器是一个产生电压输出的装置，该输出随通过传感器的热流而改变。在试验方法 C 1046（文献 6.6.10.2.3(b)）中描述了各种各样类型的热流传感器。一般用于试验 C 518-98 中的梯度类型通常由具有一个温差电堆的芯子所构成，测量芯子两端的电压。要求利用标定标准来进行热流传感器的正确标定以及精确测定板的温度和板之间隔。该方法在 C 518-98 中进行了细致的描述。

此实验方法是要建立通过测试试件的稳态单向热流，试件支持在两块等温平行板之间，一块是热板和一块是冷板。热流率 Q 由热流传感器上所测量的电压输出来获得。于是，通过对 Q，热板和冷板之间隔 L，横截面面积 A 以及越过试件的温差 $\triangle T$ 的测定，用式(6.6.10.1)来计算热传导率。

C 518-98 方法已被用于试件厚度达到约 25 cm 并在 25 cm 厚度情况下板的温度从-195 到 540°C 的 10-40°C 的大气环境条件中。试验方法 E 1530-93（文献 6.6.10.2.3(c)）类似于 C 518-98 方法的原理，但是所进行的修改是为了适应具有较高热导率的较小的测试试件。与此方法相应的试件具有厚度小于 1.2 cm 且热传导率在 $0.1<\lambda<5$ W/(m·K)范围内。

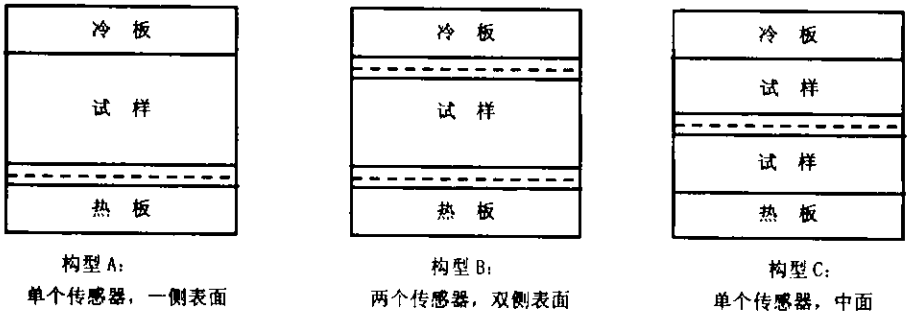


图 6.6.10.2.3　典型热流计量仪器结构形式示意图

6.6.10.2.4　适用于平板的傅立叶（Fourier）热传导试验方法

这里将给出应用于热传导板件材料的一个附加的方法，此方法不是 ASTM 标准。该试验方法特别适合于确定某些材料的热传导率，这些材料的厚度比横向尺寸小很多，且热传导率至少为 30 W/(m·K)。根据传感器的位置和几何特征，上限可能高达 1 500 W/(m·K)。尽管此方法记为无条件的方法，但是强力推荐，其结果可与用相同实验装置测试的相当尺寸的已知标准建立联系。

这个试验方法用与距离有关的微分温度来估计稳态一维热传递特性，通过采集热流从加热板件的一端到由冷源吸热的另一端时来自板件表面的必要数据来完成。此方法适用于热流横截面积保持不变的板件，热传导率用式 6.6.10.1 来计算。

此方法的目的是为了满足确定元件总的热性能而不是仅仅估计局部值的非破坏性热传导率测量的需要。多点同时测量使得可以在一个大的区域上获得数据。这对于诸如复合材料这样的材料特别重要，这些材料中导热增强体在部件上的分布可能随位置而变。这个方法的非破坏特性通过使用可移动的加热器和温度传感器来实现，而且，液态沉浸吸热设备还使得各种尺寸的元件无需任何机械加工或依一定尺寸制造试件便可进行沉浸，在进行评估昂贵的或最终用途部件的情况时特别重要。

由于自身的特点，使得这个方法在评估具有各向异性性能的材料中是有用的。利用单向热传导的这个方法使其容易进行单向性能的测定而无需完成复杂的数据处理。

仪器的组成包括液态的沉浸吸热设备、液态的冷却器（5-30℃ 范围）、Kapton 层合热-箔制加热器、铂电阻测温计（RTD）、压敏膜胶粘剂、含涂层的玻璃纤维绝缘体（5 cm 厚且热传导率低于 0.1 W/(m·K)）、一个经良好校准的直流电源（即在至少为 2 A 的电流上有不低于 60 V 的直流电压）、精确测量电压和电流的仪器以及用于温度传感器的信号处理器。可选择但希望使用计算机数据采集系统。

液态沉浸吸热设备必须是一个依附于冷却器的封闭的循环系统，该冷却器使得能够几乎无限地从测试试件中吸热，图 6.6.10.2.4(a)表明了该系统的示意图。这个系统的作用像一个热交换装置，而将试件夹在其中。应使用像等量乙二醇和水的混合物这样的液体作为循环的冷却液。

热源可使用含有致密配置各种元件的箔式加热器，这些加热器应能够至少承受 200℃。对热传导很差的各向异性材料，可能需要铝衬垫，这将确保沿试件表面的均匀热流。

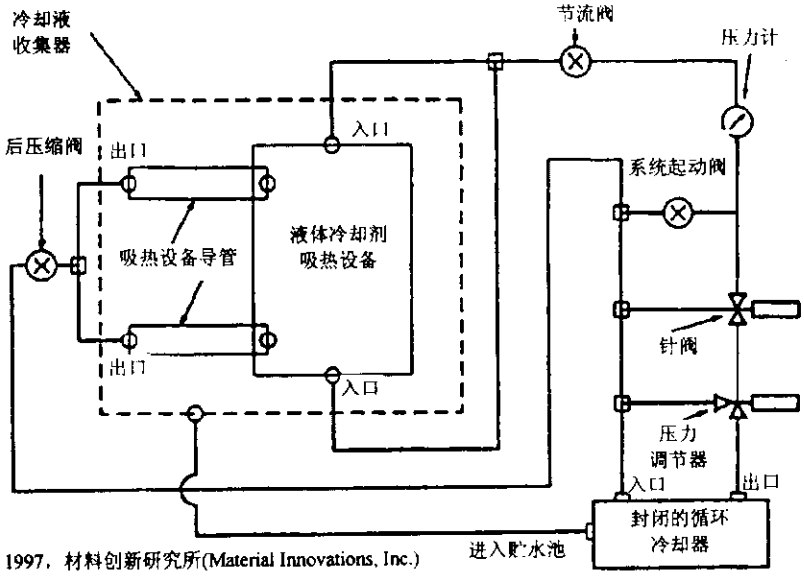


图 6.6.10.2.4(a)　MII 液态沉浸吸热设备管路示意图

测量电压的仪器设备应具有 1 mV 分辨率；电流测量具有 1 mA 分辨率；温度测量具有 0.01℃ 分辨率；如果采用数据采集系统还应具有将数据传递至该系统的能力。

测试试件应具有各个边相互成 90°的矩形或正方形的构型。在任何部位的横截面面积偏离平均横截面面积不应超过 5%。应将所有表面清除灰尘和油污。推荐：最小宽度至少为 25 mm（1 in），最小厚度至少为 0.075 cm，以及在热流方向的最小长度至少为 10 cm。较大的表面尺寸一般在测量中将得到附加的温度分辨率。对较小的表面面积，要在试验之前应就有关足够分辨率的问题进行分析。

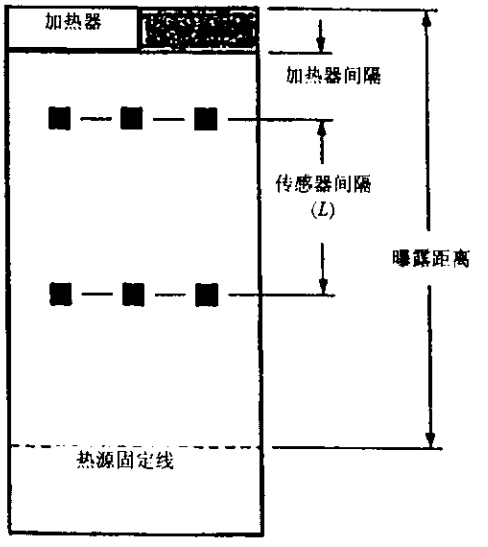
用导热压敏胶粘剂将热箔式加热器和电阻测温计贴在表面上。在试件厚度超出 0.50 cm 的情况下，则要求在端点加热。为避免在温度测量范围内存在沿测试试件厚度的温度梯度，要求采用这个方法。一个典型的布局图如图 6.6.10.2.4(b)所示。

利用安放在测试试件两个表面的加热器，加热的部位应在板件的顶部边缘。电阻测温计按两行放置。从加热器至顶部行需要有一个测量距离以便使得电阻测温计监测到均匀的热流，电阻测温计太接近加热器可能受到热输入效应的影响。从顶部行至底部行需要有一个测量距离以便使得在试验过程中温度梯度超过 1.50°C。应该将两行电阻测温计作为一套放置在热源和冷源之间一半的部位。重要的是要确保在胶粘剂胶层中不存在气泡或分层。

所有配线应该水平离开试件表面，以便使得接近试件的沿金属丝的温度梯度为最小，这将使热短路最小化。

试验程序首先是测量所有必需的尺寸数据。该测量应该包括对厚度和宽度至少测量 5 次、电阻测温计相对加热元件间距的测量以及诸如测试距离、电阻测温计水平间距和整个板件长度等基准数据。

将测试试件浸入液态冷却吸热装置中，并将其在冷源复式接头之间夹住。应使至少 25mm（1in）的板件材料与液态冷却剂冷源相接触以保证适当的吸热。



1997，材料创新研究所（Material Innovations, Inc.）

图 6.6.10.2.4(b)　热传导试件传感器部位示意图

通过纤维绝缘体来充分绝缘测试试件曝露的距离，要求这一步是为了确保绝热系统处于平衡状态。

要使得试验能够在冷源温度下维持平衡。记录在冷源温度下所有电阻测温计的初始温

度，用这些数据将传感器调零。

对测试试件通电达到约 100 kW/m^{2}的热流。可以根据测试试件的热传导率和想达到的目标试验温度采用其他热流。确定热流的唯一要求是必须存在足够的能量以达到适当的温度梯度分辨率，以及热损耗相对总热输入可忽略不计。

记录在加热状态达到平衡的最终温度和功率参数。应将平衡定义为测试时每 10 分钟所有温度传感器的温度变化小于一度。

试验数据的记录应包括描述材料的所有信息；所有的尺寸数据；在稳态条件下所采集的初始和最终温度以及所有电阻测温计最终温度的平均值。

热传导率根据式(6.6.10.1)来计算。量 Q 由加热器的电压和电流乘积来得到；用厚度与宽度的乘积计算横截面面积 A；直接测量两行电阻测温计在热流方向的间距 L。首先将各个电阻测温计所记录的每个数据点值转换为归一化值来分析温度数据。通过获得冷源温度的初始（稳态）测量值和加热后试验温度的最终（稳态）测量值之间的温差来完成归一化。此归一化值是对两行电阻测温计中的每一行所取的平均值，取两行电阻测温计平均归一化值的温度差得到式(6.6.10.1)中所用的温度改变量ΔT。

最终的的报告应包括以 SI 单位制（W/(m·K)）表示的热传导率、平均试验温度和大气环境温度。

必须使结果与一个具有相同实验布局、条件和电源参数而测试的当量尺寸的已知“标准”建立关系，该标准应该为已被适当表征的普遍接受的材料，并且应具有与测试试件尽可能接近的热传导率。（通常“标准”为铝或铜板）。该传导率结果值要用下式给出的修正因子（CF）来进行归一化。

CF=[(可接受的“标准”值)/(“标准”测量值)]×[未知测量值]

通常试验结果的归一化要求 3%至 5%的修正，这是为了计及在配线中或通过绝缘体所引起的热耗损。应该认为超出 10%的热耗损是有问题的，在接受数据之前应进行较为细致的分析。

6.6.10.3　提交MIL-HDBK-17数据适用的热传导率试验方法

由下面试验方法(表 6.6.10.3)所得到的数据目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表 6.6.10.3　提交 MIL-HDBK-17 数据适用的热传导率试验方法

性　质	符　号	正式批准、临时和筛选数据
热传导率	λ	C 177 E 1225 C 518 傅立叶试验方法（Fourier Test Method）

6.6.11　比热

6.6.11.1　引言

比热的定义为单位质量材料在单位温度变化时材料内能的改变量。实际上，在常压或常焓下的比热，C_p，是被测定的量，在标准国际单位制中以 J/(kg·K)表示。

6.6.11.2　现有的方法

用于测定聚合物基复合材料比热的标准试验方法是 ASTM E 1269-95（文献 6.6.11.2），

基于差动扫描热量计（DSC）。该试验一般应用于热稳定固体且正常工作范围为-100~600°C，可以覆盖的温度范围取决于所采用的仪表及试件托架。

6.6.11.2.1 ASTM E 1269-95

DSC 试验方法简要综述如下。把空铝盘放入试件和标准托架，一般用象氮气和氩气这样的惰性气体作为包围的气层。在较低的温度下记录一条等温基线，然后在关注的范围上按程序通过加热，Q(W)，来使温度增加。在较高的温度下记录另一条等温基线，如图 6.6.11.2.1 下部所示（文献 6.6.11.2.1）。于是对应于每一个给定的试件盒的试件质量 M，此试验方法被重复地进行着，并且记录吸收能量与时间的变化轨迹。

在理论上，这样得出的数据足以用来计算试件的比热，但实际上标定方法很重要，将在下面进行讨论。推荐使用在 5-20°C/min 范围内的热速率，通常采用 10°C/min 的速率。

为确定比热，必须定量测量施加到测试试件的能量与温度的关系，因此，必须在热流和温度模式两方面标定用于这些测量的仪表。

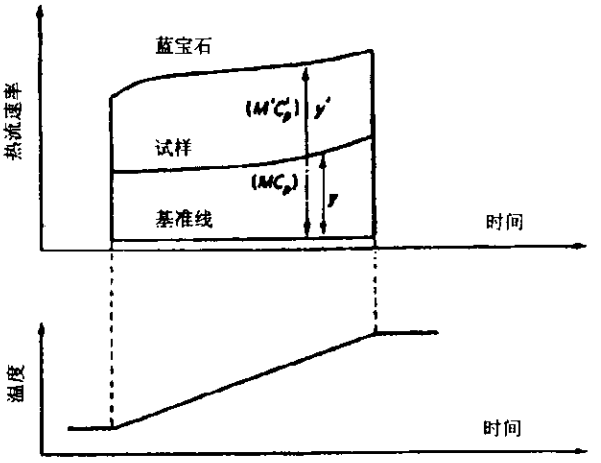


图 6.6.11.2.1 利用比率法测定比热

由于比热不是急剧变化的温度函数，通常按常规标定仪表的温度模式仅偶而进行校验。温度标定是通过观测基准材料的熔融变换来实现的，该标定应在未知的试件比热测定中所覆盖的温度范围上来完成。表 6.6.11.2.1 中列出了适于用作 DSC 温度标定标准的材料（文献 6.6.11.2）。

表 6.6.11.2.1 标定材料的熔融温度

标定材料	熔融温度	
	(℃)	(K)
苯甲酸	122.4	395.5
銦	156.6	429.8
锡	232.0	505.1
铅	327.5	600.7
锌	419.6	692.7

热流信息是至关重要的，通过采用比热已充分确定的基准材料来进行在这种模式中的标定。已知的标定方法为速率法（Ratio Method）。推荐的基准材料为合成蓝宝石（α-铝氧化物），在文献 6.6.11.2 中给出了人造蓝宝石的比热容，C'_p。

用一个给定的蓝宝石质量 M'，现在重复进行上述热扫描方法，且记录下一条新的曲

线。利用图 6.6.11.2.1 中在相同温度处的两个纵坐标之差及质量比，按照下式计算试件比热

$$C_p = C'_p(y/y')(M'/M) \qquad 6.11.2.1$$

式中：y——在给定温度处试件托架和试件热曲线之间的垂直位移

y'——在给定温度处试件托架和蓝宝石热曲线之间的垂直位移

DSC 方法的显着特点为相当短的测试时间及毫克级试件尺寸。由于采用如此小量的试件材料，试件必须均匀且有代表性。如果试件取自于大尺寸的聚合物基复合材料板时，第二个条件可能很难满足，这是由于板不同区域制造的变异性。可以通过测量若干取自板不同部位的试件并且将所得结果取平均值，来着手解决此问题。

由于湿度演化或材料分解所引起的试件质量损耗，对于聚合物基复合材料，DSC 试验方法的应用可能也会遇到困难，但这个问题可以通过采取适当的预防措施来解决。

6.6.11.3 提交MIL-HDBK-17数据适用的比热测试方法

由 DSC，Procedure E 1269，所得到的数据，目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

性 质	符 号	正式批准、临时和筛选数据
比热	C_p	E1269

6.6.12 热扩散

6.6.12.1 引言

热扩散是由瞬态热流状态导出的材料热响应性能。如果给定密度和比热，可以利用热扩散系数，α，由以下关系式确定材料的导热系数

$$\lambda = \rho C_p \alpha \qquad 6.6.12.1$$

式中：λ——导热系数

ρ——密度

C_p——比热

式(6.4.12.1)中参数的单位为

λ=W/m·K

ρ=kg/m^3

C_p=J/kg≌K

α=m^2/s

6.6.12.2 现有试验方法

标准试验方法，闪光法，ASTM E 1461-92，用于确定均匀不透明的固体材料的热扩散（文献 6.6.12.2(a)）。采用特殊的预防措施，此方法也可用于某些透明材料及复合材料。已经用这个技术，测定了 0.1-1 000 mm^2/s 范围内的热扩散系数值，并且通常能够在真空或惰性气体环境下进行 100-2 500K 的测量。闪光法是在文献中所报导的用于聚合物基复合材料热扩散系数测定的最通用的方法。

试验 E 1461-92 是来自试验方法 C 714 的更为详尽的形式（文献 6.6.12.2(b)），但通过提高测量精度它适用于更广的材料、应用和温度范围。C 714 方法仅用于碳和石墨。

6.6.12.2.1 ASTM E 1461-92

这个试验方法被认为是无条件测量方法，这是由于不需要热流动基准标准。图6.6.12.2.1(a)所示为闪光法中所用仪器设备的基本特性，它们是闪光源、试样托架及环境控制箱、温度响应检测仪和数据采集与分析系统。闪光源可以是激光、闪光灯或电子束。通用的试件为前表面面积比闪光束小的薄圆盘。通过炉子或低温恒温器来控制试件的初始温度。检测仪可以是附在试件背面标定过的热电偶，或红外传感器，或聚焦于背面的光学高温计和对闪光束进行防护的过滤器。

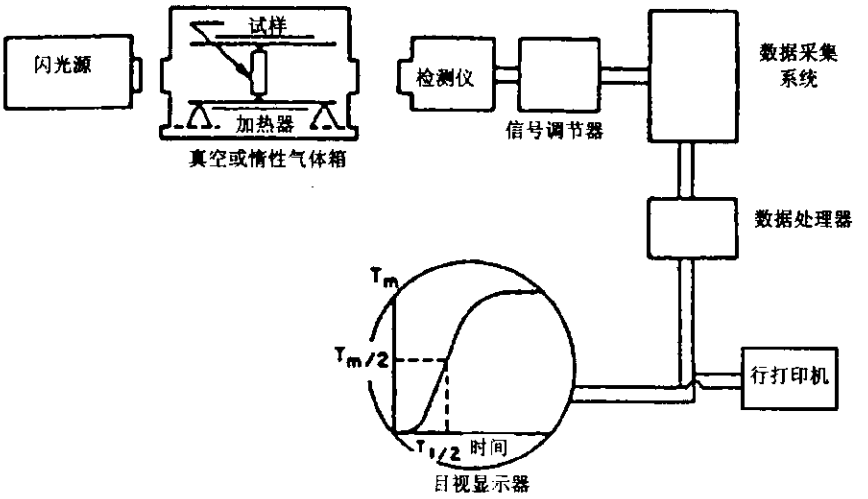


图 6.6.12.2.1(a) 闪光扩散仪器设备（图示）

为了实施闪光试验，在试件正面启动脉冲光源，能量则被试件吸收。记录所引起的背面温升。由考察所测得的温升曲线来确定基线温度、最大温升（ΔT_{max}）和热脉冲的起始时间。

根据试件厚度和背面温度达到其最大值的某个百分数所要求的时间来计算热扩散系数值。该方程为

$$\alpha = k_x L^2 / t_x \qquad 6.6.12.2.1(a)$$

式中，k_x为一个相应于x%温升的常数，t_x为温升达到ΔT_{max}的x%时所要求的时间。k_x的值由取自文献6.6.12.2(a)的表6.6.12.2.1(a)给出。背面温升一般为1-2 Kelvin。

表 6.6.12.2.1(a) 对应于不同温升百分数的常数 k_x 值

x（%）	k_x	x（%）	k_x
10	0.066108	60	0.162236
20	0.084261	66.67	0.181067
25	0.092725	70	0.191874
30	0.101213	75	0.210493
33.33	0.106976	80	0.233200
40	0.118960	90	0.303520
50	0.13879	...	...

通常，采用半温升时间（达到ΔT_{max}时间的一半），此时式6.6.12.2.1(a)变为

$$\alpha = 0.13879 L^2 / t \qquad 6.6.12.2.1(b)$$

可以对在温升和半温升时间内的试验数据归一化，并与理论模型进行对比以检验有限脉冲时间、辐射热损耗或非均匀加热的影响，这可通过将温升除以最大温升来实现，即使坐标无量纲化，时间被半温升时间除而得到无量纲横坐标。表 6.6.12.2.1(b)给出了对理论模型的归一化的温度-时间的值。图 6.6.12.2.1(b)所示为接近理想情况实验的归一化曲线实例。存在有限脉冲时间影响和辐射热损耗的试验结果分别由图 6.6.12.2.1(c)和图 6.6.12.2.1(d)来表示。在完成对测试试件温度响应数据的检测后，遵循文献 6.6.12.2(a)中所述方法，再进行任何必要的修正。

表 6.6.12.2.1(b) 理论模型的归一化温度-时间值

$\Delta T/\Delta T_{max}$	$t/t_{1/2}$	$\Delta T/\Delta T_{max}$	$t/t_{1/2}$
0	0	0.7555	1.5331
0.0117	0.2920	0.7787	1.6061
0.1248	0.5110	0.7997	1.6791
0.1814	0.5840	0.8187	1.7521
0.2409	0.6570	0.8359	1.8251
0.3006	0.7300	0.8515	1.8981
0.3587	0.8030	0.8656	1.9711
0.4140	0.8760	0.8900	2.1171
0.4660	0.9490	0.9099	2.2631
0.5000	1.0000	0.9262	2.4091
0.5587	1.0951	0.9454	2.6281
0.5995	1.1681	0.9669	2.9931
0.6369	1.2411	0.9865	3.6502
0.6709	1.3141	0.9950	4.3802
0.7019	1.3871	0.9982	5.1102
0.7300	1.4601	...	...

一般而言，试件直径为 0.6-1.8 cm（0.2-0.7 in），而厚度为 0.15-0.4 cm（0.06-0.16 in）。为使热损耗修正达到最小程度，要求在较高温度下采用较薄的试件。优化的试件厚度取决于预估的扩散系数值，且应被如此选定使得背面达到其最大值一半的时间落在 40-200ms 范围内。能量闪现的持续时间应少于背面达到其最大值一半的时间的 0.02。如果不满足该条件，必须进行有关有限脉冲时间效应的数据修正。

正在不同试验室间进行验证（round robin）的试验方案已指出，对于各种材料的热扩散系数，能够达到高于 5%的测量精度。存在两个造成试验不确定性的主要原因。一个在于 L 的测定，该不确定性很重要，这是由于测试试件比较薄且厚度是以二次方项出现。第二个原因在于检测仪及与其相连的放大器的响应时间，它必须不大于半时间值的 0.1。一般来说，光学仪器具有可以接受的响应时间，而热电偶比较慢，且应该对标定源或间歇电子束的响应时间进行细心的校核。

闪光法的优点是试件几何形状简单、试件尺寸小、测量迅速、易于利用单一仪器来测量热扩散值范围很大的材料。而且，测量时间短减少了污染的机会和曝露于高温引起的试件性能变化。闪光法已被推广用于二维热流的情况，因而可以测量大的试样以及沿轴向和径向两个方向的扩散性。

应用闪光扩散法出现的问题是：(1)试件材料所呈现的对于光束的部分透明度，以及(2)

多相试件材料的各组分，例如复合材料的增强纤维和基体，所呈现的热传导性的不同。第一个问题通常是将吸光材料（例如石墨）薄层涂在试件的前表面来解决。如果存在第二个问题，热脉冲倾向于优先通过具有高热扩散性的组分相，因此在试件背面的温度分布图可以是非平面的，而且显著偏离理论模型。实际上，有时对具有比例较高的高热传导系数纤维沿热流方向铺设的复合材料，能观察到这种效应。倘若如此，闪光法无法应用。

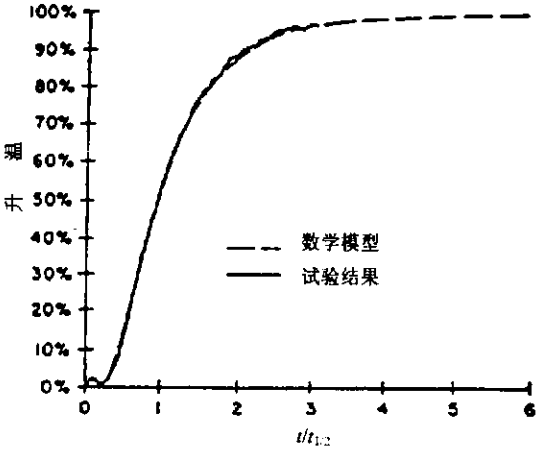


图 6.6.11.2.1(b)　无量纲温度响应曲线与数学模型的对比

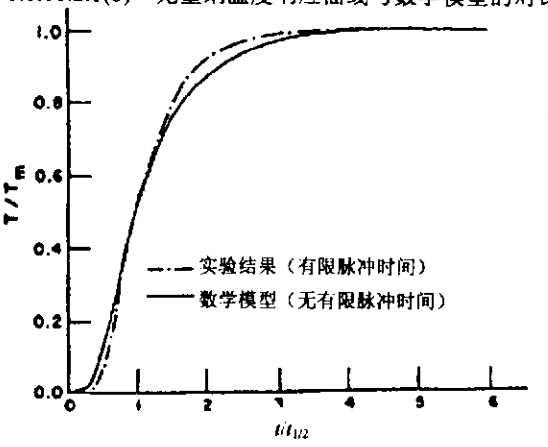


图 6.6.12.2.1(c)　归一化背面温升：数学模型（无有限脉冲时间影响）与具有限脉冲时间的实验值的对比

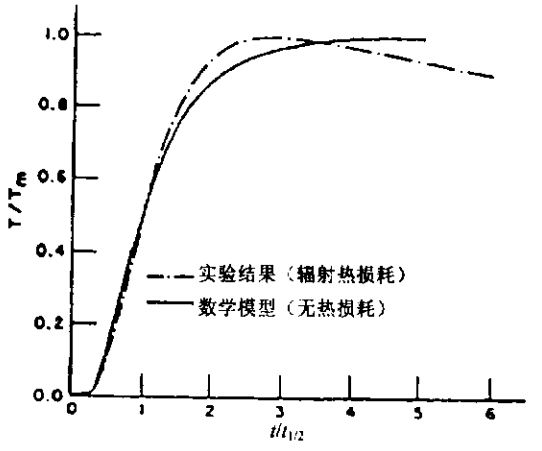


图 6.6.12.2.1(d)　归一化背面温升：数学模型（无热损耗）与具有辐射热损耗的实验值的对比

6.6.12.2.2 ASTM C 714-85

这个试验方法覆盖测量精度低于 5%而温度达到 500°C 情况下的碳和石墨热扩散系数的测定。它要求采用一个厘米级直径和半厘米级厚度的圆盘试件。此方法对于分析用于小试件的石墨中的低的硫含量很灵敏，因此，它适合用于核反应堆，即使很低浓度的硫也会引起关注。

将此方法概括如下。在试件的前表面吸收来自闪光灯的高强度、短持续时间的热脉冲，并且记录后表面温度随时间的变化。根据试件厚度及后表面温度升至其最大值一半所需要的时间，由式 6.6.12.2.1(a)来计算热扩散系数。试验 E 1461-92 的理论考虑和实验警告直接用于试验 C 714-85，此处它们应用作参考（文献 6.6.12.2(a)）。

6.6.12.3 提交MIL-HDBK-17数据适用的热扩散试验方法

由闪光法（方法 E 1461）所得到的数据目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

性 质	符 号	正式批准、临时和筛选数据
热扩散	α	E 1461

6.6.13 出气

空间用的光学设备和部件曝露于各种各样的粒子和分子污染源。许多这样的污染源不被包含在此手册的范围之内，但是，当选择或规定材料时，必须分析材料出气引起的分子污染。分子污染会降低太阳电池的功率输出，并且可能显著降低光学元件的流通量，特别是紫外线（UV）。例如，完成第一次飞行使命的 Hubble 太空望远镜的 WF/PC-1 传感器反射镜曝露于地球的大气，受到了光聚合作用而产生了浓厚的分子污染。因此，紫外线的波长 1216Å 的反射率从 0.72 降至 0.005。虽然反射镜上的任何分子污染都会降低 UV 反射率，但试验和飞行数据已表明，当被污染的反射镜曝露于足够强的紫外线辐射下，反射率降低得特别厉害（文献 6.6.13(a)）。

污染控制工程是 NASA 持续支持的一个项目，文献 6.6.13(a)中给出了较充分的说明。现有两个 ASTM 试验方法，它们用于测量由测试材料可能出气所产生的分子污染量。采用 ASTM E 1559 来获得在设计光学系统中模拟放气和污染的有用的数据。ASTM E 595 主要是一个筛选技术，它被 NASA 用于制成有助于材料选择的可能的污染分类的表格（文献 6.6.13(b)）。

ASTM E 595（1999），“在真空环境中出气引起的总体质量损耗和聚集的挥发性凝聚材料的标准试验方法”

在该试验中，首先将材料研磨成粉末并达到标准的吸湿量。然后，将材料放置到仪器之中。试样存放在 125°C（257°F）的低于 7×10^{-3} Pa（5×10^{-5} torr）的真空中达 24 小时，此后再测量两个参数：总的质量损耗（TML）及聚集的挥发性凝聚材料（CVCM）。CVCM 为凝聚于存放于 25°C（77°F）的板上的质量。在完成 TML 和 CVCM 所要求的曝光和测量之后，也可以得到另一个参数，即回收的水蒸气量（WVR）。这个试验方法主要是材料的甄别技术，对计算系统或元件上的实际污染它不是有效的，这是由于构型和温度上的差别所造成的。在 NASA RP 1124（文献 6.6.13(b)）中，在节 C（SectionC）中仅列出 TML 的最大值等于或低于 1.0%和 CVCM 最大值为 0.10%的那些材料以示区别。在可能情况下，

通常推荐和可以根据方案要求来选择具有低于这些限定的材料。

ASTM E 1559-93，“航天材料污染出气特性的标准试验方法”

此 ASTM 试验方法可以用来测定出气速率的数值，该值对建立预估在航天飞机表面的分子污染演化和该污染的迁移及沉积的模型所用的动力学表达式是必需的，文献 6.6.13(a) 描述了这个数学模型。

测量是通过将材料试样放置于泻流室来进行，使得由泻流室小孔逸出的出气流将冲击三个为观测小孔而设置的石英晶体微量天平（Quartz Crystal Microbalances，即 QCM）。第四个 QCM 为可选的。泻流室存放在处于常温的高真空箱之中，且有一个小孔对准 QCM。控制 QCM 使其达到选定的温度，依据低温 QCM 上的聚集测定总的出气率。在等温试验终结时，按照某种控制方式加热 QCM 以便测定沉积的蒸发特性。

E595 对于 TML 和 CVCM 中的每一个进行总的测定，而 E1559 则测定在时间进程中试样的质量损耗、在各个不同的温度下在时间进程中 QCM 凝聚的质量以及当升温时在时间进程中从这些 QCM 蒸发的质量。随 QCM 的共振频率而变的质量损耗和凝聚材料被间接测定。

试验方法 A 是采用规定构型和温度的标准试验方法。包含适用于多种材料的该数据的在线数据库（文献 6.6.13(c)）由 Marshall 航天飞行中心（Marshall Space Flight Center）来维护。试验方法 B 考虑了航天飞机系统的具体温度、构型和 QCM 凝聚器表面光洁度的使用。

6.6.14 吸收率和发射率

此节留待以后补充。

6.6.15 热循环

此节留待以后补充。

6.6.16 微裂纹

此节留待以后补充。

6.6.16.1 引言

此节留待以后补充。

6.6.16.2 制造工艺引起的微裂纹

此节留待以后补充。

6.6.16.3 热循环所引起的微裂纹

此节留待以后补充。

6.6.16.4 机械加载/循环所引起的微裂纹

此节留待以后补充。

6.6.17 热氧化稳定性

此节留待以后补充。

6.6.18 阻燃性和烟雾生成

6.6.18.1 引言

对于有机基复合材料在被占据的空间中的应用，特别关注的一个问题是偶然的（或有意的）失火可能导致结构损坏的可能性。这里潜在的问题出自于两方面的原因。首先，热导致聚合物粘接剂被削弱。热塑性粘接剂开始蠕变，当产生的火焰使其局部温度升高超过玻璃化温度时将出现流动；而热固性粘接剂降解为炭或气化（或两者）。于是，粘接剂的作用降低，复合材料失去强度。如果在结构中复合材料仅仅起到次要的或修补的作用，局部的、热导致的复合材料破坏或许是不严重的，还有时间来修复损伤的材料。然而，如果受影响的复合材料部件为像飞机机翼那样主要的关键结构的一部分，结构可能破坏。

问题的第二个方面可能使第一个方面的问题显著扩大。粘接剂可能起火并支持火焰在复合材料表面的蔓延，而且还要释放热量及产生可能有毒的烟雾。于是，局部的、外部的起火可能引起涉及复合材料的较大结构范围的燃烧，而复合材料则成为助燃的燃料。在诸如船舶、飞机那样的有限的、封闭的空间中，不断蔓延的火焰可能导致烧穿状态，在该状态下封闭体内所有易燃的材料开始燃烧。在诸如桥梁那样的开放的空间下，渐渐增大的火焰显然增加结构损坏的机率。同样，当复合材料不作为主要结构仅仅起次要作用时，将会降低出现有危险性后果的可能性。对于地震加固，问题变得有点复杂。火灾伴随着地震，但它们具有延缓初始震动的倾向。如果地震引起的火灾没有损坏结构上的复合材料加固件，结构可能容易经受住初震的考验，仅只成为火灾后出现的余震的牺牲品。

与许多易燃材料相比，复合材料具有固有的优点，它有助于阻止最坏的后果（大火的牵连）发生。这是由于在某些情况下其惰性纤维重量含量（通常）高达 70%的缘故。纤维置于聚合物树脂之中使得向火焰提供的燃料减少。当由于加热引起的气化使复合材料最外层失去其树脂时，它们的作用变为绝缘层，降低热渗透进入复合材料内部及来自其深处的气体演化（文献 6.6.18.1(a)-(c)）。

6.6.18.2 火焰蔓延试验方法

有关许多复合材料的应用，对可居住环境，火焰蔓延的可能性应该是首要被提出和克服的问题。有些令人意外的是，除了有限的隔舱火焰蔓延的研究外，这个问题只受到很少的关注。在为数不多的复合材料表面火焰蔓延的研究中，大多采用火焰沿横向和向下蔓延的试验，这些是相对较慢的火焰蔓延模式，它们在机械学上不同于蔓延速度快得的多的火焰向上扩展。横向/向下模式的性能好未必意味着向上蔓延的性能好。然而，相反的情况可能是成立的，即对于向上蔓延的阻力应有助于产生对于横向和向下蔓延的阻力。

需要测定遏止火灾蔓延的可能性，包括阻碍热从外火达到复合材料的表面或抑制树脂对于该火的固有响应。一个极端的情况是复合材料总体对火焰的绝缘。这已被作为解决火卷入的危害和结构崩溃威胁的建议。足够厚（例如 5 cm（1.97 in））的纤维绝缘层可以使复合材料的温度低于它的起燃温度（减少火连带的危害）而且也可在 30 分钟或更多时间内低于它的玻璃转化温度（减少结构崩溃的威胁）。

阻燃树脂为一个解决火焰蔓延问题的可能的方法，但是它们仅仅是减少复合材料的可燃性，这就是在火焰蔓延发生前转化为对较大外部火源的抗力。在未发表的 NIST 试验中，用溴处理的乙烯基酯/玻璃复合材料本质上呈现出改变的起燃特性，但要求稍微强的表面热通量来支撑十分高的火焰蔓延（1.2 m，即 3.94 ft）；其增加量从 3-5 kW/m^2 至大约 10 kW/m^2。

这是否充分与否，取决于所采用的复合材料和起燃源，看来它还是来自于经验。如果其他性质与应用相兼容，选择诸如酚醛树脂那样的强碳化树脂可以提供较大的益处。

正如前面所指出的，对于非复合材料的应用，发泡型防火涂料是已制定的防火技术。关于它们对于防护复合材料的能力，已经进行了有限的研究，这些研究关注包括某些发泡型防火涂料在内的各种涂料的性能来延迟起燃，降低热释放率，抑制横向火焰蔓延以及在标准温度-时间曝露中延长复合材料抗火能力的程度和持续时间。这些研究表明，仅有限的少数商用涂料才具有在大火的、剧烈的特定热曝露期间具有逗留在适当位置的能力。（文献 6.6.18.2(a)-(c)）。

在联邦航空条例 25.853 中规定了对于运输机的阻燃要求。试验方法、附加的要求以及实现该方法所需要的其他资料包含于“航空材料火灾试验手册”（Aircraft Materials Fire Test Handbook）DOT/FAA/AR-00/12 之中（文献 6.6.18.2(d)）。

6.6.18.2.1　ASTM E 84——建筑材料表面燃烧特性

（文献 6.6.18.2.1）

在地面结构中复合材料的内部应用很可能归入现有建筑物或结构规范要求，这经常意味着在 ASTM E 84 风洞试验中对于某些指定的性能级别的要求。

E84 风洞试验测量在并流空气流动中的火焰蔓延。风洞没有采用辐射加热器来预热试件，但取而代之的是，流过系统的空气是被燃烧器和沿试件长度向下推进的火焰来加热，通过试件表面的热空气提供了使得未燃烧材料达到其起燃温度所需要的能量。

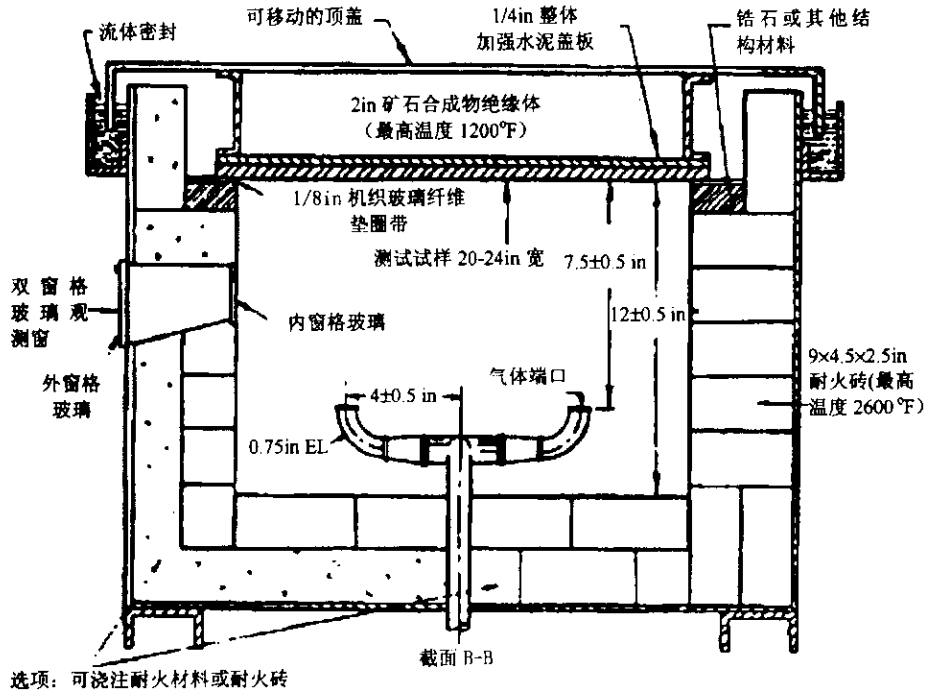
用于仪器设备的起燃源是两个位于试件下方 305 mm（12 in）位置处的燃烧器。该燃烧器发射沿试件长度从 305 mm（12 in）位置处向下大约 0.9-1.2 m（2.95-3.93 ft）的甲烷弥漫的火焰来冲击试件。试验箱和元件的布局图如图 6.6.18.2.1 所示。

试件为 7.3×0.51 m（23.95×1.67 ft）的矩形。试件和托架安放到位成为风洞顶棚。剩余的壁是由耐火砖排列而成。热电偶放在 4.0 m 和 7.2 m（13.12 ft 和 23.62ft）处。利用在风洞进气道端部的节气闸来调节新鲜空气流。控制流动速率使得在风洞中的速度为 121 cm/s（47.64 in/s）。

钢排气系统连在风洞的排气端，通过排气系统的气流是通过试验箱的连续气流。在排气烟道中测定烟昏暗度，采用光度计系统测量光透射率的降低，光路通过垂直于排出气流的烟道。

测量值包括火焰在一个测量的距离内蔓延所经历的时间、排气温度和光传输的百分数。通常计算值包括火焰蔓延和烟扩展指数。

试验已表明，按在全尺寸箱体中所测量的火焰特性相同的序列对“性能良好”的材料进行排列。这里，“性能良好”一词，在本质上，意谓材料行为像在火中的木头（即把材料烧焦并在多数测试期间位于风洞的顶部）。在一个给定类型全尺寸试验中正确地排列材料火焰特性是对于一个试验方法的最低要求。



英制单位	国际单位	英制单位	国际单位
1/4 in	6.3 mm	20 in	508 mm
2 in	51 mm	9×4.5×2.5 in	230×115×65 mm
4±0.5 in	102±13 mm	1 200°F	649°C
7.5±0.5 in	191±13 mm	2 600°F	1 427°C
12±0.5 in	305±13 mm		

图 6.6.18.2.1　用于 ASTM E 84 试验方法的试验加热炉横截面

6.6.18.2.2　ASTM E 162——采用辐射热能源的材料表面燃烧特性

（文献 6.6.18.2.2）

另一个实验室规模的火焰蔓延测试为 ASTM E 162。ASTM E 162 的方法包括火焰蔓延指数的测定，它是能量释放率和平均火焰向下方蔓延速度的乘积。尽管当材料燃烧时这些量随时间而改变，公式中表示该指数为一常数以便为分类不同材料提供通用的度量。

固定试件在测试设备中使其与辐射热源成某个角度，这迫使在试件上边缘点燃，并且如果火焰蔓延，它将向下扩展。

152.4 mm（6 in）宽、457.2 mm（18 in）长以及不大于 25.4 mm（1.0 in）厚的试件被放置在试件托架中，它坐落在用空气和气体作为燃料供应的 304.8mm×457.2mm（12in×18in）辐射板的前面。辐射板是由耐火的多孔材料构成并应可以在高达 815°C（1 500°F）下工作。在试验开始时一个小的引燃火焰被施加于试件的顶部中心，当火焰前沿前进 381 mm（15 in）或曝露时间达 15 分钟后便完成了试验。

记录曝露时间和试件是否毁坏，以及诸如流动、滴下物等观察到的任何燃烧特性。记录平均火焰蔓延指数。

6.6.18.2.3　ISO 9705火灾试验——关于表面产物的全尺寸房间试验

（文献 6.6.18.2.3）

目前还没有用于火焰向上蔓延可能性的小尺寸试验。最接近的相关试验为全尺寸的，它包括横向和同时发生的火焰蔓延（类似火焰向上蔓延），这就是 ISO 9705，它已被推荐适用于高速航空器的内表面材料（包括复合材料）。这是一个整个房间的试验，并且对于评定复合材料可能十分昂贵。作为一个封闭的试验，对用于诸如桥梁或码头等开放空间中的复合材料，可能过于严厉；然而，对于诸如轮船的舱面船室那样的封闭空间，该试验是十分适宜的。封闭空间提供了增强的热反馈效应，这是由于热熏累积的结果，而在开放的火焰曝露情况下这是不存在的。

全尺寸房间墙角火焰试验方法被发展用来评价关于火焰在实际的房内和越出房外蔓延的材料潜能。尽管此方法主要为内衬材料编制，该试验也可用于测试整个建筑组件。此试验提供从材料开始点燃至烧穿时的数据。

“标准”构型是由 3.6 m×2.4 m（11.81 ft×7.87 ft）面积和 2.4 m（7.87 ft）高的箱体构成，该箱体具有一个位于 2.4 m（7.87 ft）侧壁中间的门道。ISO 9705“标准方法”采用丙烷气体炉，它在前 10 分钟为 100 kW 而在接着的 10 分钟变为 300 kW。在一个类似的建议的 ASTM 标准中规定采用 176 kW 丙烷炉。两个方法均要求把气体炉放在一个角落以便使火焰接触到墙壁和天花板。

“标准”构型要求候选材料覆盖墙壁（除去门道墙壁）和天花板。将试件安放在与预定现场应用相当的构架或支持系统上，采用适用于预期应用的背衬材料、绝缘体或空气间隙。

试验测定墙壁和天花板或部件可能对火焰增长产生影响的程度。因此，要规定在室内和排气系统的仪器以便测量：(1)室内热流量；(2)由火灾产生的总的热释放；(3)如果出现烧穿，火焰通过门口涌出的时间。对于烟雾和有毒气体危害的测量也给出了规定。

6.6.18.2.4　ASTM E 1321——确定材料起燃及火焰蔓延性能

（文献 6.6.18.2.4）

LIFT 方法，ASTM E 1321，结合了两个各不相同的试验方法：一个是测定起燃，而另一个是测定横向火焰蔓延。

试件托架使试件固定于垂直方位。放置一个从垂线方向起始为 75° 角的平行于试件的辐射面板，该布局图如图 6.6.18.2.4 所示。起燃试验要求采用 150×150 mm（5.90×5.90 in）的试件，它们曝露于接近均匀的热流中。采用在不同热通量水平下的一系列试验来得出起燃时间和辐射热通量的关系图。根据该分布图，来测定适于起燃的最小热通量。

火焰蔓延试验采用 150×800 mm（5.90×31.49 in）试件。将这些试件曝露于在空间上分段的热流中，该热流比在热端上面计算的最小热通量高 10 kW/m^2，此流通量明显地在试件另一端衰减至低的水平。在基于起燃试验所确定的时间内预热该试件。在预热时间结束后，起燃使得水平方向引燃。于是，记录在试件上的火焰蔓延速率与热通量的关系。

记录的数据包括起燃的最小热通量、起燃所需的表面温度、热惯性值、火焰热参数和火焰前沿速度与热通量的关系。

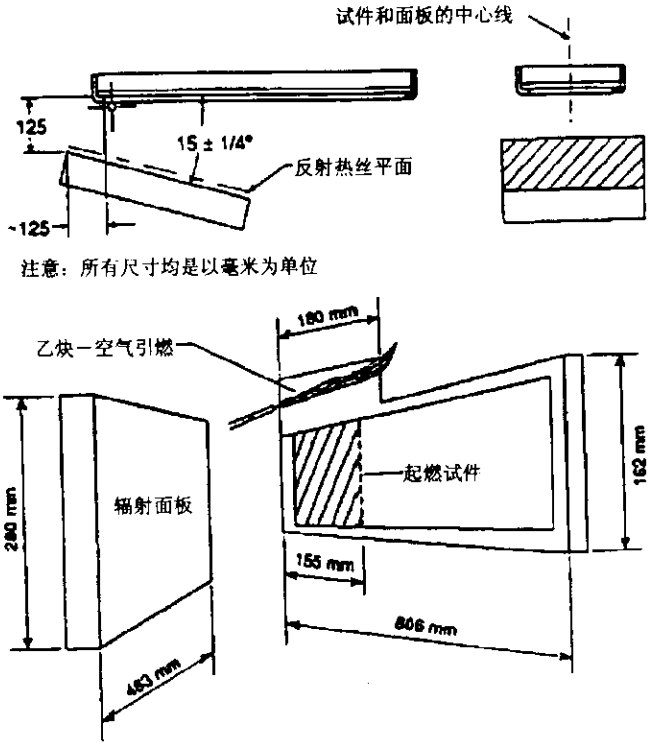


图 6.6.18.2.4　ASTM E 1321 试验方法的示意图

6.6.18.3　烟雾和毒性试验方法

燃烧气体生成定义为在燃烧过程期间从材料中析出的气体。在燃烧期间析出的最常见的气体是一氧化碳和二氧化碳，连同 HCL，HCN，以及取决于给定复合材料基体树脂化学成分的其他物质。历史上，人们遭受燃烧产物的伤害和死亡比由于直接热/火焰曝露还要多。已经制定了不同的试验方法来评估燃烧材料所产生烟雾的潜在毒性，这些试验方法对火焰曝露（无火焰与有火焰比较）很敏感。试验方法采用生物测定（动物试验）或分析技术来确定燃烧材料毒效（文献 6.6.18.3(a)和(b)）。

6.6.18.3.1　ASTM E 662——固体材料生成烟雾的光密度率

（文献 6.6.18.3.1）

由 ASTM E 662 确定的 NBS 烟雾室是用于检验材料在无火焰与火焰模式下所产生的烟雾。将试件单独曝露于辐射热源（无火焰模式）或带有引燃火焰（火焰模式）。辐射热由电辐射加热器提供，加热器为 76 mm（2.99 in）直径的圆形，它被安放在平行于试件的垂直方位。加热器施加 25 kW/m^2 的热通量至试件表面。

试件的引燃点火利用多重火焰的预混合丙烷/空气燃烧器来完成，燃烧器位于试件的底部。燃烧器设计得使某些火焰直接冲击试件表面，而某些则平行于试件表面向上投射。仪器设备如图 6.6.18.3.1 所示。

试件为 76×76 mm（2.99×2.99 in）的方形，厚度可以改变直至 25 mm。将试件沿垂直方位支持。试件、托架、燃烧器和加热器放置于具有长宽高等于 914×610×914 mm（2.99×2.00×2.99 ft）的试验箱中。除了在底部和顶部的通风口外，将该试验箱密封。仅当室内的压力变为负值时，才打开通风口。

利用从底部至顶部的垂直路径变换的照相系统测量烟雾昏暗度，采用白炽灯作为光源，用光电倍增管作为接收器。

被测量的值包括外部施加的热通量及传输的光，计算的值则包括光密度率。

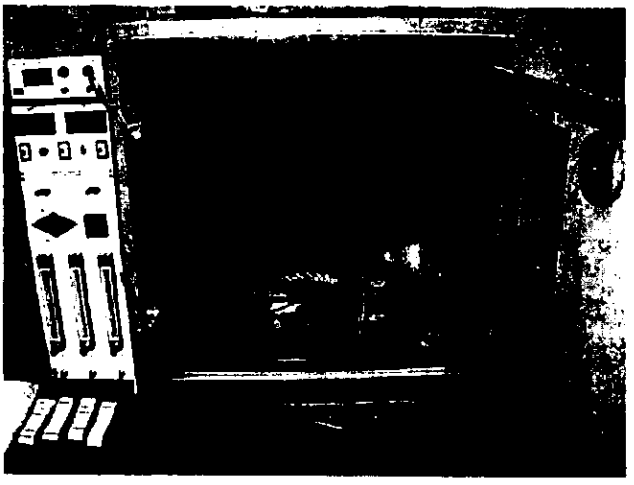


图 6.6.18.3.1　ASTM E 662 烟雾室的照片

6.6.18.3.2　NFPA 269——开发用于火灾灾害建模的毒效数据

（文献 6.6.18.3.2）

国家消防协会（The National Fire Protection Association, 即 NFPA）已将 NFPA 269 用于火灾灾害建模。这是采用解析和生物鉴定技术的小尺寸试验方法。在该试验中，试件在曝露于 50kW/m^2 辐射通量达 15 分钟期间用电火花起燃。在密封箱中用 30 分钟聚集所产生的烟雾。在测试期间内，测量 CO，CO_2，O_2 的浓度，并且对浓度-时间曲线下面积积分来计算浓度-时间乘积（Ct）的值。根据材料组分来选择测定 HCN，HCL 和 HBr。用测试试件的 Ct 乘积和质量损耗来计算试验的有效剂量百分数（FED），在计算中利用该值来预测试件的 30 分钟 LC_{50}（30-minute LC_{50}）。LC_{50} 是致命毒效的度量。它是由在规定的曝露和曝露后时间内预计产生测试动物 50%死亡率的浓度-响应数据，统计计算得到的气体或烟雾的浓度。然后，用比较试验来确认这个预测的 LC_{50}：该试验在曝露箱中，由产生预测值 LC_{50} 那样尺寸的试件产生的烟雾，将六支老鼠曝露于其中。根据在 30 分钟曝露和曝露后的 14 天内死亡的老鼠数目确定 LC_{50} 预测值的有效性。。用这种方式可能确认，所监测的有毒物质是造成所观测到结果的实际原因。所得出的 LC_{50} 值适用于烧穿前，还要提供另外的计算以便算出适用于烧穿后的 LC_{50}。此修正系数是根据受控通风的烧穿后出现的所增 CO 浓度。

6.6.18.4　热释放试验方法

最近几年来，有关火灾的研究及火灾动力学认识的发展已使得热释放率（HRR）作为主要的火灾危害指标凸现出来。可以用热释放率来描述一组给定的燃料负荷、几何构型和通风条件情况下的火灾灾害，而且火灾灾害分析应该包括由小尺寸热释放率试验所得出的材料相应的火灾响应参数。基于热释放率测量的可能的火灾灾害评估也推广用于复合材料。热释放率，特别是其峰值，为确定火灾环境的范围、蔓延和抑制要求的主要特性（文献 6.6.18.4(a)和(b)）。

6.6.18.4.1 ASTM E-1354——利用氧消耗热量计所得的材料和产品的热和可见烟雾释放率（文献 6.6.18.4.1）

ASTM E-1354 测量曝露于受控的辐射热水平下的材料的小试件响应，并被用于测定热释放率、可燃性、质量损耗率、燃烧的有效热和可见烟雾生成。实验室规模的火灾试验方法通常称为锥形热量器，涉及应用氧消耗原理并由图 6.6.18.4 表示。氧消耗原理陈述如下：对于多数易燃物，存在一个唯一的常数，13.1 MJ/kg O_2，它与在燃烧反应期间的热释放量和从空气中消耗的氧气量相关。采用这个原理，仅仅需要测定燃烧系统中的氧气浓度以及流动速率。通过试件的空气流一般规定为 24 升/秒（24 liter/s），这得到了在高燃料依赖性的燃烧条件。

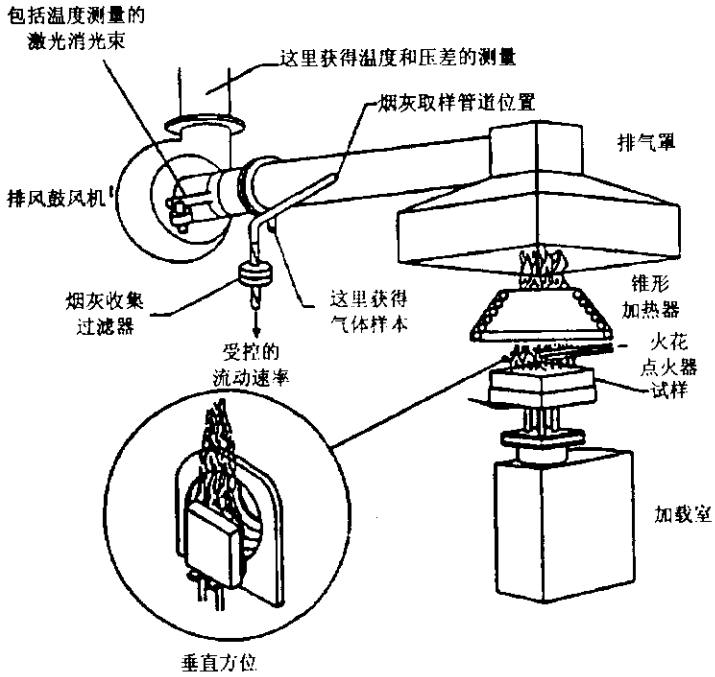


图 6.6.18.4.1 ASTM E 1354 示意图

将被测试的材料或产品的试件切成 100×100 mm（3.94×394 in）大小，厚度则取决于被测试的产品的类型，其范围从 6-50 mm（0.24-1.96 in）。要保护试件边缘免受燃烧，试件可以位于水平方向也可以位于垂直方向。试件是由称之为锥形热量器的截锥形电加热器来加热。对于试件的辐射度可指定为从零至 110 kW/m^2 中的任何所希望的值，但是要求 25，50，75 和 100 kW/m^2 的特定的热伤害，这些热伤害相当于小的 A 级火灾、大的垃圾桶火灾、相当大的火灾和油田的火灾。试件引燃点火由电火花来提供，由于提供了均匀、受控的辐射度，起燃时间自身，当测量时，构成了一个适当的起燃试验。将试件装在一个加载室上，记录它的质量并连同其他仪器数据来得出质量耗损率的数据。烟雾测量系统由横过排气管发射的 He-Ne 激光束构成，单色光由固态检测器监控。第二个检测器用作提防漂移和激光功率波动影响的参考。将光学系统设计为自清洗的并且不采用光学窗户。试验条件的详尽的规范要求规定辐射度、试件方位、采用火花起燃、试验辐射度和任何特定的试件制备技术。

在锥形热量器中得出的数据构成非常大的数据集并可以用多种方法来进行分析。记录的数据如下：

- 热释放峰值速率（kW/m^2）
- 在从起燃时间起始的各种不同时间期限上的平均热释放速率（kW/m^2）
- 有效的燃烧热（MJ/kg）。由于燃烧是不完全的（如同在真实的火灾中），它将低于氧气瓶的燃烧热值
- 试件质量损耗百分数（%）
- 起燃时间（s）
- 平均烟雾昏暗度（m^2/kg）。来自材料的烟雾量的有理单位 m^2，表示烟雾消失截面。这是用试件质量损耗总量（kg）来进行的归一化
- 每一个被测试气体种类的平均产量（kg/kg）

6.6.18.4.2 ASTM E 906——材料和产品的热和可见烟雾释放率

（文献 6.6.18.4.2）

ASTM E 906 基于热电堆法，这里采用温升来确定材料的热释放率。热电堆法测量在 35 kW/m^2 辐射热通量下材料的热释放。仪器设备是由置于被绝缘的金属盒内的燃烧室构成。辐射源包含四个标称电阻为 1.4 Ω的碳化硅加热元件。将试件曝露于室内辐射度为 $35kW/m^2$ 的辐射加热源之下。

试件的尺寸为 150×150 cm（59×59 in），对于每一种材料至少测量三个试件。起燃由来自试件托架上方的甲烷炉的引燃火焰引起。通过仪器的总的空气流动速率为 40 升/秒，而以 10 升/秒速率的空气流动经过燃烧室，剩余的 30 升/秒流量则通过凹形壁段。利用由 5 个 K 型热电偶组成的热电堆来测量流入空气和流出气体的温度。热电偶热接点沿隔板上方烟道的对角线分布。相对于进入燃烧区的空气温度，离开烟道的气体的温升给出了该材料热释放率的度量。

6.6.18.5 抗火灾试验方法

火灾的强度和持续时间变化很大，为给定的舱室选择与潜在火灾威胁更匹配的那些组件，了解某些建筑物的组件对于各种火灾威胁的抵抗力的知识是重要的。这里，对火灾的抵抗力是指在火灾期间材料继续发挥其结构作用的能力。

6.6.18.5.1 ASTM E-119——建筑结构和材料的火灾试验

（文献 6.6.18.5.1）

有关对火灾抵抗力的试验方法为 ASTM E-119，它采用通常称为标准时间-温度曲线的方法。保险业试验室（Underwriters Laboratory）利用此试验方法来提供用于建筑结构中的所有组件的火灾等级。

在此试验中，将结构部件置于加热炉的环境并达到所要求的期限。如果在试验结束之前没有达到规范的边界点，该部件被认为对于诸如 30 或 60 分钟那样的试验期限是可以接受的。要以这样的方式加热炉子使得炉内的温度遵循一条标准的时间-温度曲线。试图把如图 6.6.18.5.1 所示的曲线与在完全燃烧房间的火灾条件联系起来。部件可以在有载荷或无载荷的情况下进行试验。如果部件是在有载荷的情况下进行试验，将该部件加载至产生理论计算得到的最大设计应力水平。地板和屋顶件及承重壁总是在载荷下进行试验。另外，必

须将第二个试件曝露于水龙带管流之中来模拟人工救火和快速冷却。

规定试验试件尺寸为：承重墙和隔断 9.3 m^2；非承重墙和隔断 9.3 m^2；支柱组 2.7 m^2；地板和屋顶 16.7 m^2。

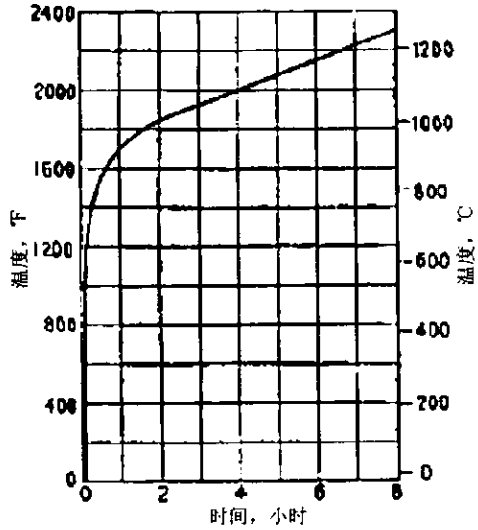


图 6.6.18.5.1　ASTM E-119 时间温度曲线

6.6.18.5.2　ASTM E-1529——确定大的油气田火灾对结构元件和组件影响以及UL 709——结构钢防护材料的快速起火试验

（文献 6.6.18.5.2(a)和(b)）

烧穿后火灾的显著特点之一为迅速产生高温和高热通量，曝露于其中的结构元件受到的热冲击比在 ASTM E-119 中所观察到的快得多。ASTM E-1529 的火灾曲线就是用于处理这个问题。曝露于由自由燃烧的油气田特大火灾所引起火灾状态的结构元件和组件是这个试验关注的焦点。由这个试验模拟的场景为自由燃烧油气田特大火灾的明亮的火焰现场中结构元件和组件被整个连续吞没的情况。

试验装置向测试试件的所有曝露表面提供的平均表面热通量为 158±8 kW/m^2。该热通量在试验起始的前 5 分钟内达到并在测试期间一直保持。在试验开始 3 分钟后，试验环境至少达到 815℃（1 500℉），而在试验经过 5 分钟后的所有时间内保持在 1 010℃ 和 1 176℃（1 850℉ 和 2 150℉）之间。由于油气田火灾通常出现在室外环境，提出了加速风化和老化试验的方法以便模拟在室外环境中的风化和老化。按组件经得起不允许能使棉废弃物起燃的火焰或热气通过的火灾情景的时间段，给出了火灾持久性的级别。

在 UL 1709（结构钢防护材料的快速起火试验标准）中叙述的温度条件类似于前面 ASTM E 1529 所提到的条件。然而在 UL 1709 中记述的热通量（204±16 kW/m^2）比 ASTM E 1529 提到的（158±8 kW/m^2）要高。UL 1709 火灾曲线在试验开始 3 分钟后，至少升到 815℃（1 500℉），而在试验开始 5 分钟后的所有时间内处于 1 010℃（1 850℉）和 1 180℃（2 150℉）之间。与 ASTM E-1529 和 UL 1709 相对比，在开始 5 分钟结束时，ASTM E-119 火灾曲线仅上升 538℃（1 000℉），而在 60 分钟结束时达到 927℃（1 700℉）。

6.7 电性能试验

6.7.1 引言

在某些应用中，复合材料的电性能很重要。引起关注的性能包括电介质常数、电介质强度、体积电阻系数、表面电阻系数以及电阻、散逸和耗损因子。这些值可能受到温度和环境的影响，也可能受到固化剂类型、填料和在复合材料中采用的纤维的影响。下面的ASTM 试验方法可以用来确定聚合物基复合材料单层和层压板的电性能。

- ASTM D 149 “工业用动力电频率下固体电绝缘材料的电介质击穿电压和电介质强度的标准试验方法”。确定固体绝缘材料电介质强度的方法。
- ASTM D 150“固体电绝缘材料 A-C 损耗特性和电容率（介电常数）的标准试验方法”。当标准是集总阻抗时，用于确定固体绝缘材料的相对介电常数、逸散因子、损耗指数、功率因子、相位角和耗损角的方法。
- ASTM D 495“固体电绝缘体高电压、低电流、干弧阻的标准试验方法”。此试验方法用于材料的初步甄别，而不应在材料规范中采用。
- ASTM D 2303“绝缘材料的液态污染、斜面跟迹和腐蚀的标准试验方法”。用于定量评估绝缘材料经受表面放电作用相对能力的试验方法，这种放电作用类似于在污垢和大气凝结而成的水汽影响下在使用中可能出现的现象。

6.7.2 电介电常数

此节留待以后补充。

6.7.3 电介质强度

此节留待以后补充。

6.7.4 磁介电常数

此节留待以后补充。

6.7.5 电磁干扰

此节留待以后补充。

6.7.6 静电放电

此节留待以后补充。

6.8 单轴静态力学性能试验

6.8.1 引言

6.8 节讨论测定层压复合材料单轴静态力学性能的试验方法。本节的目的是对最通用的方法提供简要的评述，提醒读者注意各种方法的局限性，并鼓励采用标准试验方法最终使得由多种途径获得的试验数据组合达到一致性的结果。有关 MIL-HDBK-17 数据报告的统

计学数据分析要求，读者参见第 8 章。

本节将反映复合材料试验方法发展的当今动态，许多方法最初的产生是源于增强塑料试验，但是已经完成（或正在进行）某些修改以便适用于先进复合材料。近年来，在使用者当中，存在未经正规标准化程序片面修改现行规范的倾向，导致有所失控的试验结果。一般地说，在 6.8 节中不讨论这些被修改的标准，除非是特定的修改变为共同所采用的或认为方法的讨论是有建设性的。所包括的试验方法是复合材料工业界中所采用的有代表性的方法，应在审阅标准化文件和用户材料规范之后，再进行方法的选定。具体的试验方法可覆盖单层级试验、层压板级试验或两者兼有之，视试验方法而定。在适当的节中，讨论每个试验方法涉及的范围。

重要的是了解 6.8 节所提到的各方法的区别，以及向 MIL-HDBK-17 提交数据的方法。

- 合同承包商所采用的试验方法要与用户和/或验证机构一致。为使读者对通用的方法有一个广泛的了解，在 6.8 节中对诸多方法进行了评述。某些方法已经被正式列为标准（ASTM 和其他标准），而某些方法则为“普遍惯用”的方法。某些方法具有各不相同的限制条件，将根据有关文件资料来指出这些条件。提及或略去一个特定的方法并不是自行要求或限制其使用。涉及到的具体方法是让使用者能够完成符合工业实际的试验；然而，并不认为这些标准的内容是被 MIL-HDBK-17 的任何标准或机构所认可的。
- 当向 MIL-HDBK-17 提交数据以收入手册第二卷时，必须采用特定的方法。在 6.8 节中许多小节末尾的表格指出为提交数据哪些方法是可以接受的，这些方法是按 2.5 节给出的准则选择的。鼓励读者在合同中和内部工作中也采用这些方法以提高标准化水平。

当选择和采用一个特定的机械强度试验方法时，不能过分强调获得适当的破坏模式的重要性。对于很多的试验类型，还没有建立“适当”和“有效”的通用定义，当观察或推测到不是所期望的或有疑问的模式时，有必要进行进一步的分析。如果由试验所得的破坏模式不同于预期的情况，数据可能并不代表所要测定的性能。此外，如果在一组试件中破坏模式不一样，所得数据的统计分析变得毫无意义，这是由于引入与所要测定的性能无关的附加变化因素。因而，报告破坏模式，且当分析指出破坏模式不可接受时而取消和废弃相关数据是至关重要的。

应注意到，破坏模式的分析不一定仅限于对破坏的测试试件的物理检测。其他证据可以从考察另外的一些因素来获得，诸如

- 由背对背应变计数据得到的弯曲曲线
- 校验试验机和/或试验夹头的对中性
- 考察用于将试件安装和正确地与夹头对中所采用的严格程序
- 校验试验夹具可能出现的损伤或误操作

ASTM 已开始将破坏模式的实例和编码引入至它的标准试验方法之中。例如，ASTM D 3039 的 1993 年修订版（聚合物基复合材料拉伸性能的标准试验方法）记述了试件破坏的九种类型并定义了描述各种形式破坏的三个字符的代码系统。该代码的第一个字母用来识别破坏形式（成斜角、夹头、分层等），第二个字母指出破坏的区域（测量段、夹头处等），第三个字母表示破坏的部位（顶部、底部、中部等）。在拉伸试验的特定情况中，加强片

或加强片胶粘剂破坏会是不可接受的破坏模式，这是由于没有测定层压板的拉伸强度极限。

在 6.8 节各小节中，并不是重复介绍破坏模式的例子，而是建议读者认真研究破坏模式的文件并参考存在这些例子的特定的试验方法中所提供的实例。

6.8.2 拉伸性能

面内拉伸性能：

单向板：$E_1^t, F_1^{tu}, \varepsilon_1^{tu}, \nu_{12}^{tu}$　　$E_2^t, F_2^{tu}, \varepsilon_2^{tu}, \nu_{21}^{tu}$

层压板：$E_x^t, F_x^{tu}, \varepsilon_x^{tu}, \nu_{xy}^{tu}$　　$E_y^t, F_y^{tu}, \varepsilon_y^{tu}, \nu_{yx}^{tu}$

面外拉伸性能：

单向板：$E_3^t, F_3^{tu}, \varepsilon_3^{tu}, \nu_{31}^{tu}, \nu_{32}^{tu}$

层压板：$E_z^t, F_z^{tu}, \varepsilon_z^{tu}, \nu_{zx}^{tu}, \nu_{zy}^{tu}$

6.8.2.1 概述

许多拉伸试验方法的基本物理特性是非常类似的：将具有直边工作段的柱状试件在端部夹持并承受单轴拉伸载荷。这些拉伸测试试件的主要差别是试件的横截面和载荷引入的方式。试件横截面可以是矩形的、圆形的或管状的；它可以在整个长度上是直边的（“直边”试件）或从端部（大的面积）到工作段（小的面积）成锥度形的*。在某些情况下，直边试件可以利用加强片式的载荷作用点。

对于承受单轴拉伸载荷的柱状试件，存在三个值得注意的例外情况：(1)夹层梁试验，该试验通过夹层梁的整体弯曲来产生面板内的平面应力状态，使拉伸面板成为有效的试件；(2)环试验，该试验是借助夹紧装置将径向扩展（或一个这样的近似）施加于一个细的、高半径厚度比的环，以产生在环内薄膜（面内）拉伸应力；以及(3)实心层压曲梁试验，该试验是借助夹紧装置施加一个张开的弯曲力矩，以产生受弯区域内厚度方向的拉伸应力。

对于层压板材料的面内拉伸性能有若干现存的和正在编制的标准，而对于面外性能却并非如此。对于层压板厚度方向的拉伸性能，只是最近才开始受到关注并有可能成为适用于标准的试验方法，因此相对来说是不成熟的。

通过改变试件的构型，很多拉伸试验方法能够用来评估不同的材料形式，包括单向层压板、机织材料和一般层压板。然而，某些试件/材料构型的组合相对于其他组合是比较健全的（对试件制备和试验条件的变化不太敏感）。最不健全（对使用者最敏感）的构型为单向试件。例如，由于试件制备或试验条件的改变或两者皆有而可能出现的在一个 0°单向试件中纤维/载荷的不平行度，它可以导致强度降低，对于初始的 1°不平行度其强度降高达 30%。该试件对载荷引入的方式也非常敏感，并要求在试件制备以及试验条件两方面高度完善的试验室条件才能取得令人满意的结果。粘接的端部加强片，是在 1960 年代末期为使最大限度地减少高强度单向材料中载荷引入的问题而采用的方法，但实际上，如果没有恰当地应用和具有高超的技艺，它们可能引起试件提前破坏（甚至出现在非单向试件中）。因为多数 0°单向试件是呈现突发性的破碎而破坏，它使真实的破坏模式变得不清晰，通常不能依靠低劣的试验/试件制备条件来提供物理数据。

单向材料的试验所带来的困难已导致更多地采用牢固得多的$[90/0]_{ns}$类型层压板试件

* 尽管已经存在许多不同类型的含锥度试件，通常将它们视为一类，称为“狗骨”试件。

（也称为“正交”铺层试件）。可以通过采用在 2.4.2 节中所讨论的方法，根据正交铺层试件的层压板强度（当已知单层的弹性性能时），来得出当量的单向层强度 F_1^{tu}。当上述未经文件确认的试验技术改进连同采用正交铺层测试试件时，简单得多的无斜削加强片或甚至无加强片试件现在变得是可行的，它使得具有一般资质但却没有单向试验经验的实验室，同样能获得等效于达到最佳的单向数据结果。虽然仍在进行并且在某些情况下可能最好选择或要求单向试验时，对于单向材料的单层拉伸试验，目前一般认为直边、无加强片的 $[90/0]_{ns}$ 类型试件是最低廉、最可靠的构型。对于非单向材料形式和对于其他一般层压板，这类直边、无加强片构型也同样被很好地采纳。另一个优点是，与 0°单向试件不同，$[90/0]_{ns}$ 类型试件的破坏通常不会掩盖由于试验/试件制备条件不当所引起的踪迹。

6.8.2.2 面内拉伸试验方法

6.8.2.2.1 直边试件拉伸试验

- ASTM D 3039/ D 3039M，聚合物基复合材料拉伸性能的标准试验方法
- ISO527，塑料拉伸性能的确定
- SACMA RM 4，定向纤维-树脂复合材料的拉伸性能
- SACMA RM 9，定向正交铺层纤维-树脂复合材料的拉伸性能
- ASTM D 5083，采用直边试件的增强热固性塑料拉伸性能的标准试验方法

早在 1971 年发布的 ASTM D 3039/D 3039M（文献 6.8.2.2.1(a)）是用于直边矩形试件的最初的标准试验方法。作为对 D 3039 进行重大的改写并于 1993 年批准的结果，使得随意制作加强片、大量原来含糊、未写入文件、和/或随意试验和报告参数的状况被澄清、写入文件和/或做出强制性指令。ISO 527（文献 6.8.2.2.1(b)）的第 4 和第 5 部分（目前处在草拟国际标准阶段）和两个 SACMA（先进复合材料供应商协会）的拉伸试验方法、SRM 4（文献 6.8.2.2.1(c)）和 SRM 9（文献 6.8.2.2.1(d)）基本上是依据 ASTM D 3039，因此相当近似。

尽管在 ASTM D 3039 和 ISO 527 之间还有一些细小的差别，但在努力协调 ASTM D 3039 和 ISO 527，以便使它们在技术上是等效的。最初想要将 SRM 4 和 SRM 9 作为 ASTM D 3039 具有限定条件的子集，但由于其偏离 ASTM D 3039 过大而使得它们不能成为严格等效的试验方法；一个使 ASTM/SACMA 协调一致的成果正在进行讨论但还没有开始*。最后一个直边试验方法，ASTM D 5083（文献 6.8.2.2.1(e)），是与用于塑料的 ASTM D 638 狗骨拉伸试验的直边对等标准（在 6.8.2.2.3 节中讨论）。尽管 ASTM D 5083 在概念上类似于 ASTM D 3039，但 ASTM D 5083 还没有发展到用于先进复合材料，不能被推荐。

在所有这些试验方法中，通常利用楔形或液压夹头通过试件端部的机械剪切界面把拉伸应力施加到试件上，采用应变计或引伸计来测量试件测量段的材料响应，随后确定材料弹性性能。

如果采用端部加强片，引用加强片的目的是试图以最小的应力集中将来自夹头的载荷分布到试件上。采用含加强片拉伸试件的多向层压板的适当的破坏模式的图例如图 6.8.2.2.1(a)所示。然而，加强片的设计仍然存在一些技术问题，而且设计不当的加强片界

---

*ASTM D 3039 包含在 SRM 4 和 SRM 9 中未涉及的弯曲和破坏模式限制，而且在其他方面，诸如厚度测量、浸润调节和数据报告，也是不同的。ASTM D 3039 比 SRM 4 和 SRM 9 也要详尽得多。这些差别加起来可能产生不同的试验结果。

面将使破坏发生在邻近加强片部位达到一个不可接受的比例，导致非常低的试件强度。由于这个原因， ASTM 尚未颁布单纯的标准加强片设计方法，当必须使用加强片时，若要使结果可以接受，仍优先选择易于应用、价格便宜、无斜面的 90°加强片。最新的对比工作进一步证实，一个成功设计的加强片更多地取决于采用足够韧的胶粘剂而不是加强片的角度。应用具有韧性胶粘剂的无斜度加强片将优于已应用的胶粘剂韧性不够的斜削加强片。因此，对于粘接加强片的采用，胶粘剂的选择是最为至关重要的。

图 6.8.2.2.1(a) 采用含加强片试件的多向层压板典型拉伸破坏

避免粘接加强片问题的最简单方法是不使用它们。在不含加强片或采用摩擦加强片的情况下，可成功地进行许多层压板（大部分为非单向）的试验。在精细锯齿状的楔型夹头中，采用金钢砂布界面的高强度的碳/树脂材料以无加强片、$[90/0]_{ns}$ 类型层压板构型进行测试的实例如图 6.8.2.2.1(b)所示。火焰喷涂无锯齿夹紧装置也已经成功地用于无加强片的拉伸试验。

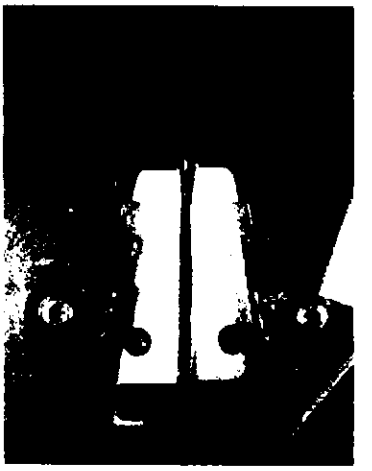


图 6.8.2.2.1(b) 采用金钢砂布夹紧界面的无加强片试件的拉伸试验

其他影响拉伸试验结果的重要因素包括试件制备的控制、试件设计公差、浸润调节控制和吸湿量变化、试验机引起的不对中和弯曲的控制、厚度测量的一致性、传感器的适当选择和仪器标定、破坏模式的文件编制和描述、弹性性能计算细节的定义和数据报告指南。这些因素是由 ASTM D 3039/D 3039M 在适当处进行详细的描述和控制。虽然 ISO 527 的第 4 和第 5 部分和 SRM 的第 4 和第 9 部分在很多方面类似于 ASTM D 3039/D 3039M，但它们不能提供与 ASTM D 3039 同等程度的指南或指导。由于这个原因，最好选择 ASTM D 3039。

总之，通过对细节特有的注意和适当的关照，直边试件试验通常是简明的并且能给出好的结果。然而，针对所测试材料和结构构型，必须适当选择试验参数，这就要求培训和经验。

直边试件拉伸试验的局限性：

- 粘接的加强片——接近粘接加强片终端处的应力场为显著三维的，在这个部位临界应力趋于峰值。对于以降低峰值应力为目的而进行的粘接加强片的设计还不是十分清楚，它与材料和构型有关；设计不当的加强片可能使结果大大降低。因此，当所得出的破坏模式是合理的情况下，通常采用无加强片或无粘接加强片构型。
- 试件设计——尤其是在 ASTM D 3039 中，有大量包括在标准中的试件设计方案，它们需要用来覆盖在试验方法范围内的各种材料体系和铺层构型。这些可供选择的方案可能使新手非常为难，并且可能选择对试验结果产生负面影响的不适当的试件设计。

- 试件制备——试件制备对试验结果是非常重要的。尽管或许可以说这对于几乎所有复合材料力学试验都是正确的，但对于单向试验它显得尤为重要，单向拉伸试验也不例外。纤维排列、试件锥度控制和试件机械加工（当保持对中时）是最至关重要的步骤。对于破坏应变很低的材料体系或试验构型，如 90°单向试验，平面度也是特别重要的。边缘机加工艺（避免机械加工引起的损伤）和边缘表面光洁度对于由 90°单向试验得出的强度结果也是特别关键的。

6.8.2.2.2 长丝缠绕管

ASTM 标准试验方法 D 5450/ D 5450M，环向缠绕聚合物基复合材料圆筒的横向拉伸性能

ASTM D 5450 叙述 90°拉伸性能的试验，特别用于环向缠绕单向圆筒的试验。这个试验方法在有关长丝缠绕材料试验方法的 6.12.1 节中进行比较详尽的讨论。

6.8.2.2.3 宽向斜削试件

- ASTM 标准试验方法 D 638，塑料拉伸性能
- SAE AMS “蝴蝶领结（Bowtie）”拉伸试件

ASTM 试验方法 D 638（文献 6.8.2.2.3(a)）是为塑料制定且限于应用在塑料范围，该方法采用一个平直的、具有直边测量段的宽向带锥度的拉伸试件。不管传统作法如何，该试件也已被评价和用于复合材料。试件的锥度是在两端宽的夹紧区和窄的测量段之间通过大的圆弧连接来实现的，从而得出的形状使得采用“狗骨试件”的试件绰号是有道理的。锥度使得该试件特别不适宜于 0°单向材料的试验，这是因为大约一半的夹持端纤维在未达到测量段处即被中断，由于基体无力承受从中断的纤维至测量段处的载荷的剪切作用，而造成在圆弧处由于劈裂而破坏。

虽然，在某些时候 ASTM D 638 试件构型已经被成功地用于纤维增强复合材料和一般非单向层压板，但某些材料体系仍然对圆弧处的应力集中敏感。由于其意图是用于塑料，试件是被模压成形，而对于层压材料，试件必须被机械加工、研磨和按程序加工来成形。该试件还存在测量段比较小的缺点，对于表征重复单元大于 6.4-13 mm（0.25-0.50 in）的测量段宽度的粗机织，它是相当不适宜的。由于该意图的局限性，标准化的方法不足以覆盖先进复合材料所要求的试验参数。

所谓蝴蝶领结（Bowtie）拉伸试件是由于其含有缩小横截面的平面形状，尽管它从未被列为标准试验方法，但在很多方面它类似于 ASTM D 638 试件。通过在若干 SAE AMS 复合材料（基于纤维）规范中的应用，蝴蝶领结试件已经达到间接的标准化*。虽然在新材料规范中很少采用它，但它还是被包含在若干现存的公司内部基于纤维材料的材料规范之中。由于具有类似于 ASTM D 638 试件的几何特征，而存在类似的一些不足和制约。该形状基本上限用于纤维增强材料和/或非单向层压板。由于制备缩小的截面需要通过机械加工、靠模铣切和研磨，并且边缘的表面抛光和在面积缩小的过渡段切线的机械加工均要求苛刻，故试件制备特别重要。由于测量段仅 13 mm（0.5 in）宽，故在粗织物的情况下，该试件也不能很好地工作。

---

* 在此次编写时，含有蝴蝶领结拉伸试件的四个已知 SAE 规范为：AMS 3844A（文献 6.8.2.2.3 (b)），AMS 3845A，AMS 3847B 和 AMS 3849A。作为例子，仅第一个被完全提及。

值得肯定的是，据报导，蝴蝶领结试件在过渡段对破坏的敏感性比 D 638 试件稍微低一些，并也已被用作为一个最后求助的手段，特别是非大气环境的试验环境严酷性使得直边试件存在很难夹住问题的情况。

业已提出了其他的宽向锥度试件构型，但到目前为止，研究已表明其中每一种方法都存在至少一个使其不适于一般应用的缺点，因此将不作进一步的讨论。

先进复合材料宽向锥度拉伸试验的局限性：

- 标准化——虽然将 ASTM D638 试验列入标准，但它还没有发展到用于先进复合材料，而主要应用于模量较低的无增强材料或加入随机方位纤维的低增强体积含量材料。将蝴蝶领结试验列入标准仅仅是在延续利用有限个数的 SAE AMS 材料规范的意义上。对于一般应用，还没有将其规范化。
- 试件制备——对于机械加工层压试样的锥度，要求特别精心。
- 价格——试件制作比无加强片的直边试件较为昂贵。
- 应力状态——圆弧过渡区可能对破坏模式起支配作用并导致强度结果降低。宽向锥度试件不适宜于单向层压板，而且仅限用于织物或非单向层压板以能使破坏出现在工作段。
- 有限的工作段——有限的试验宽度使其不适宜于粗织物。

6.8.2.2.4　开口-圆盘环向拉伸试验

ASTM 标准试验方法 D2290，利用开口圆盘法测定环或管状塑料及增强塑料的表观拉伸强度

ASTM D2290 的方法 A（方法 B 和 C 仅适用于塑料）（文献 6.8.2.2.4）用一个将环向拉应力加至试验环上的开口-圆盘加载夹具，对环向缠绕的窄环加载。这个试验方法产生于复合材料早期，主要是用于长丝缠绕材料的拉伸性能，它被更为可靠和更有代表性的试验方法所取代已有很长的时间了。虽然不对其不足之点进行评论，但这些不足包括材料形式/工艺的局限性、在夹具开口处存在无法计及的弯曲力矩、特别小的测量段以及无法监控应变响应。对于提交 MIL-HDBK-17 数据，不推荐该试验方法，但是在长丝缠绕工业中，看来它还是作为质量控制的试验而得到某些有限的应用。

6.8.2.2.5　夹层梁试验

ASTM 标准试验方法 C 393，平直夹层结构的弯曲性能

如图 6.8.2.2.5 所示的夹层梁试验已得到标准化，即 ASTM C 393（文献 6.8.2.2.5）。虽然其主要意图是作为夹层芯子剪切性能评估的弯曲试验，然而也允许将其应用范围扩展至面板拉伸强度的确定。虽然该应用没有被同样列入试验方法的文件范围内，但它已被用于复合材料拉伸试验，特别是用于测定单向材料的 90°特性，或用于在极端非大气环境下纤维控制的性能试验。

这个试验方法对 90°单向带性能的一个实际应用例子如下。用适当的胶粘剂将一片 13mm 厚，3 mm 芯格，130 kg/mm^3（0.5 in 厚、1/8 in 芯格、8.1 lbm/ft^3）的铝蜂窝芯子胶接到测试层压板上。通常在此胶接步骤进行期间，一个受压面板也被胶接至芯子的另一侧。为了减少由于不同材料所引起的热膨胀问题，通常选择压缩面板与拉伸面板具有相同的材料和方位但厚度是其两倍，以确保破坏发生在拉伸面板处。然后，用湿金刚石锯从夹层层压板中切割测试试件。试件的尺寸为 25 mm（1 in）宽和 200 mm（8 in）长，芯子条带沿

试件长度方向。试验装置采用支持跨度 180 mm（7 in）和加载跨度为 76 mm（3 in）的四点加载方式。在所有支点处都采用 25 mm（1 in）正方形、3 mm（1/8 in）厚的橡胶垫来施加作用和反作用载荷，通过相同面积的 6 mm（1/4 in）厚的钢加载板来依次分别加载。至每块加载板上的载荷是经过架在加载板横槽上的 13 mm（1/2 in）直径的钢棒来实施。该加载机构将载荷分布到梁上并防止芯子的面外压损。试件与加载装置的示意图如图 6.8.2.2.5 所示。

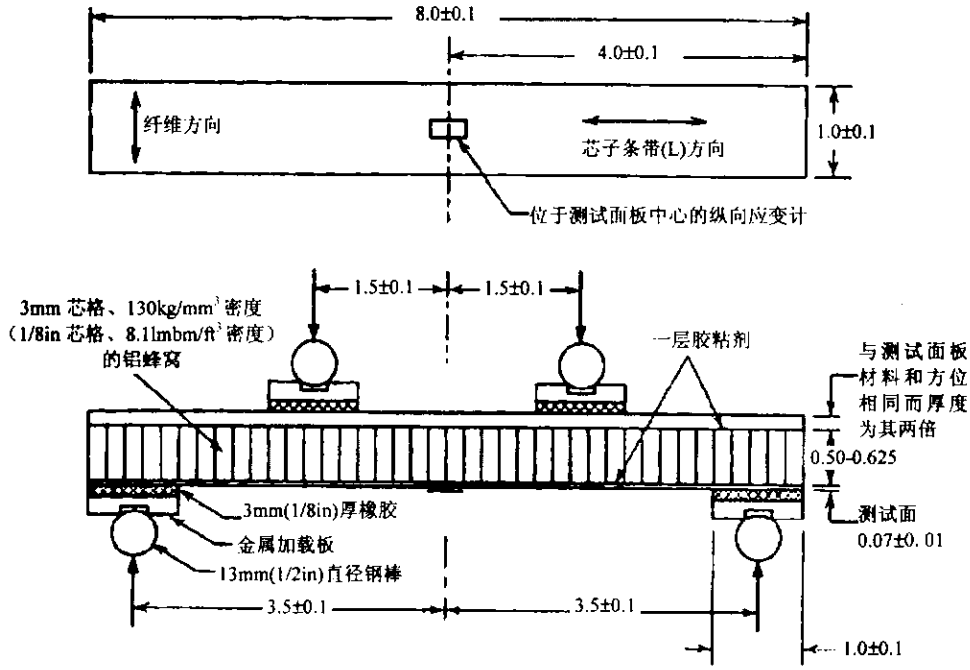


图 6.8.2.2.5　适用于层压材料 90°单向拉伸试验的夹层梁试验试件及夹具示意图

有人认为该测试试件对于搬运和试件制备损伤的敏感性比 D3039 类型 90°试件要低，从而得到较高的强度和试验引起的变异要小。然而，该试件一侧的浸润处理是个问题，这是因为所要求的浸润时间要长 4 倍或更多，且这样的浸润可能产生胶粘剂的胶接破坏。因此胶粘剂的选择是重要的并且可能要求胶粘剂对浸润处理的保护。在这样的情况下，要求浸润处理的伴随件，为了模拟试件本身的单边曝露，它必须是试验面板厚度的两倍。

夹层梁拉伸性能试验方法的局限性：

- 价格——试件制造比较昂贵。
- 应力状态——在拉伸情况下对于夹层芯子应力状态的影响还未被研究，可能是一个要关注的问题。
- 标准化——尽管在技术上该试验已被标准化，但它的实际应用以及其局限性还没有被充分地研究和成文。
- 浸润处理——如上所述，比较难。

6.8.2.3　面外拉伸试验方法

6.8.2.3.1　引言

专门适用于复合材料的面外拉伸的试验方法目前还没有发布的标准。现在被航宇工业采用或正在进行研究的两个基本方法包括：胶接在两个夹持块之间层压试件的直接面外加

载（基于对类似的非复合材料试验方法的修正）和曲梁的间接面外加载。两个理念正在被ASTM考虑作为复合材料应用中可能的标准。

6.8.2.3.2 ASTM C 297/C 633/D 2095直接面外加载修正版

- 采用正方柱形加载块，或
- 采用圆柱形加载块

已用于其他材料体系面外加载的三种类似的ASTM标准试验方法已被用于复合材料：ASTM C 297（文献6.8.2.3.2(a)），ASTM C 633（文献6.8.2.3.2(b)）和ASTM D 2095（文献6.8.2.3.2(c)）。在针对复合材料的修正中，将层压试件粘贴到柱形金属加载块上，该块体在面外方向受到拉伸试验机的拉伸。该金属加载柱体不是方的就是圆的。方形试件通常为50 mm（2 in）宽，而圆形试件的直径范围为20-50 mm（0.8-2 in）。强度由破坏前的最大载荷除试件测量面积来简单地确定。

如果试件足够厚，可以用应变计来确定弹性模量。厚试件也可允许具有缩小直径的测量段截面，若面外强度超出试件/加载块界面的胶接强度时，这可能是需要的。

有人证明说，圆形试件得到较均匀的应力分布（低应力集中）。然而，两种构型中的任一种对于试件制备因素，特别是试件边缘的表面光洁度和载荷与加载块的对中，都非常敏感。两种典型的试件构型如图6.8.2.3.2(a)所示。

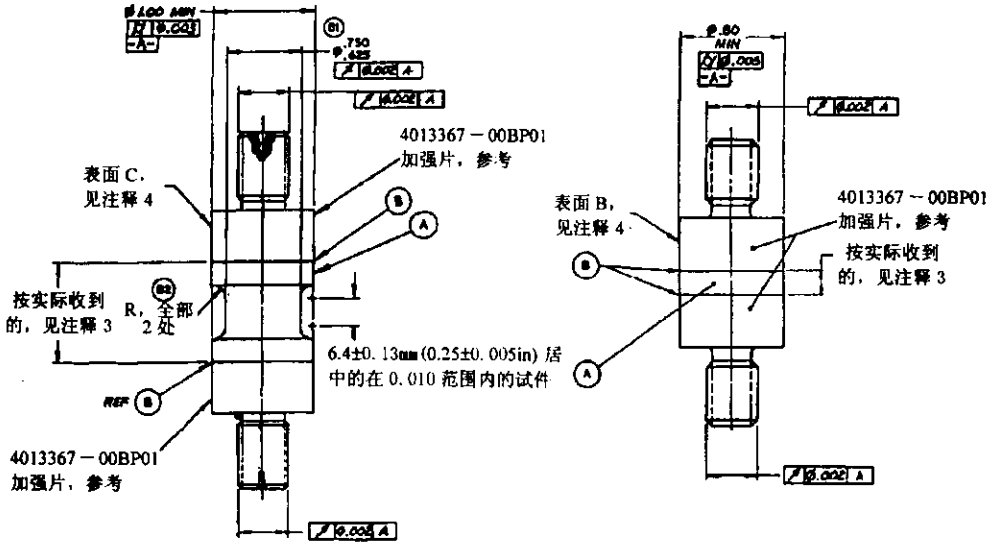


图6.8.2.3.2(a) 两种典型的直接面外拉伸试件构型

每一个ASTM试验方法利用各自的方式来引入载荷至加载块体。ASTM C 297在两端基本上是采用万向铰。ASTM C 633（仅为圆形）把螺纹刻在每个加载块体的对应端并依赖试验机对中来消除弯曲。ASTM D 2095所采用的夹具在一端处消除弯曲自由度中的一个而在另一端处消除其他的弯曲自由度。这三个方法分别如图6.8.2.3.2(b)-(d)所示。

直接面外拉伸试验方法的局限性：

- 标准化——尽管存在三种类似的用于其他材料体系的标准，但目前还没有适用于层压复合材料方法的标准。该方法还正在进行研究之中。
- 价格——由于重复性的、有代表性的数据所要求的严密公差，试件制备相对昂贵。

- 试件制备——试验结果对于在胶接期间加载块体的对准性以及层压板边缘的机械加工质量和表面光洁度特别敏感。这意味着层压板本身必须平直。另一个考虑是由于层压板面内热膨胀系数（CTE）和端部块体 CTE 之间的显著差别而引起因 CTE 失配所导致的热应力。在端部块体胶接期间以及在非大气环境试验期间，这是特别重要的。

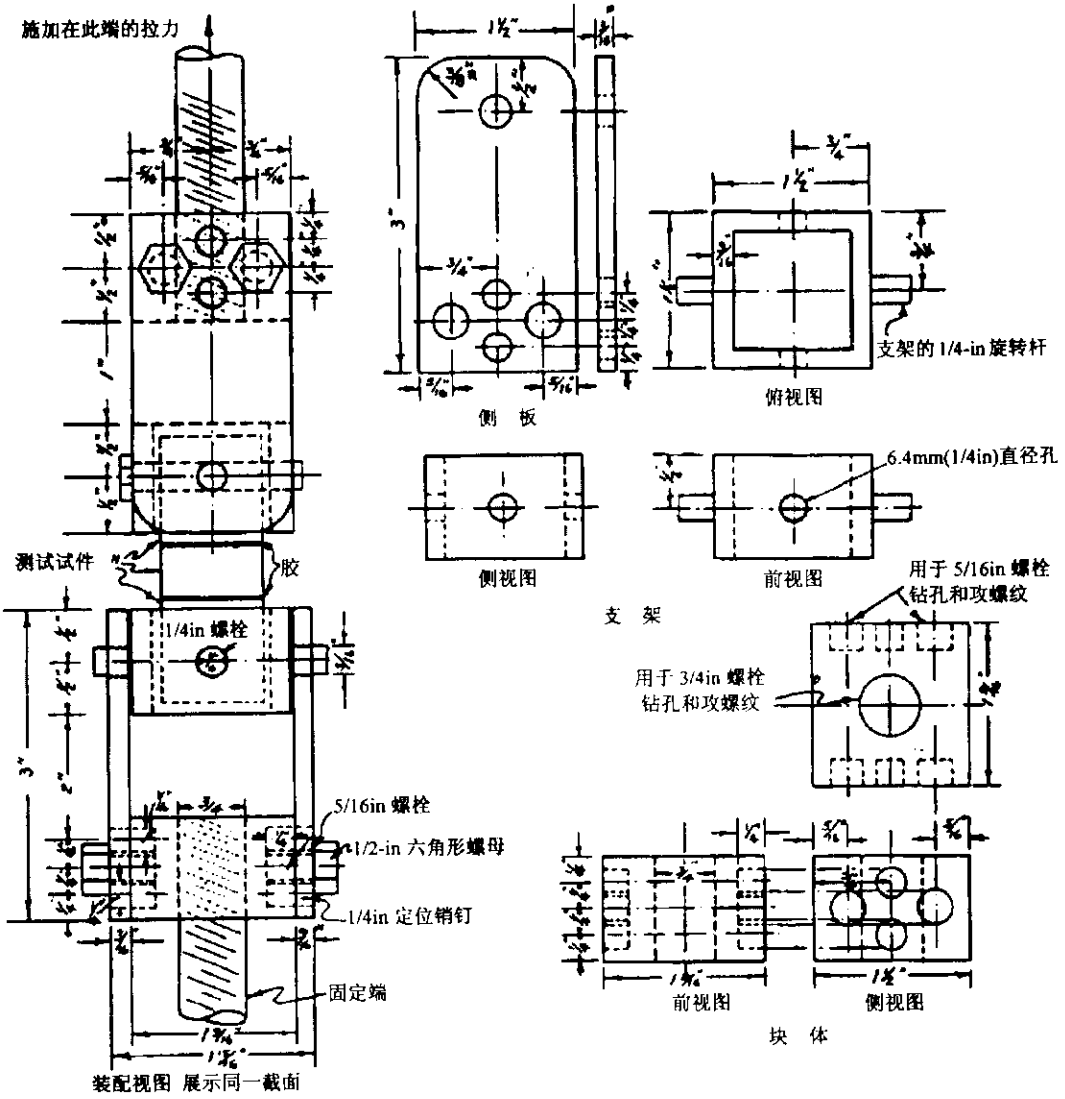
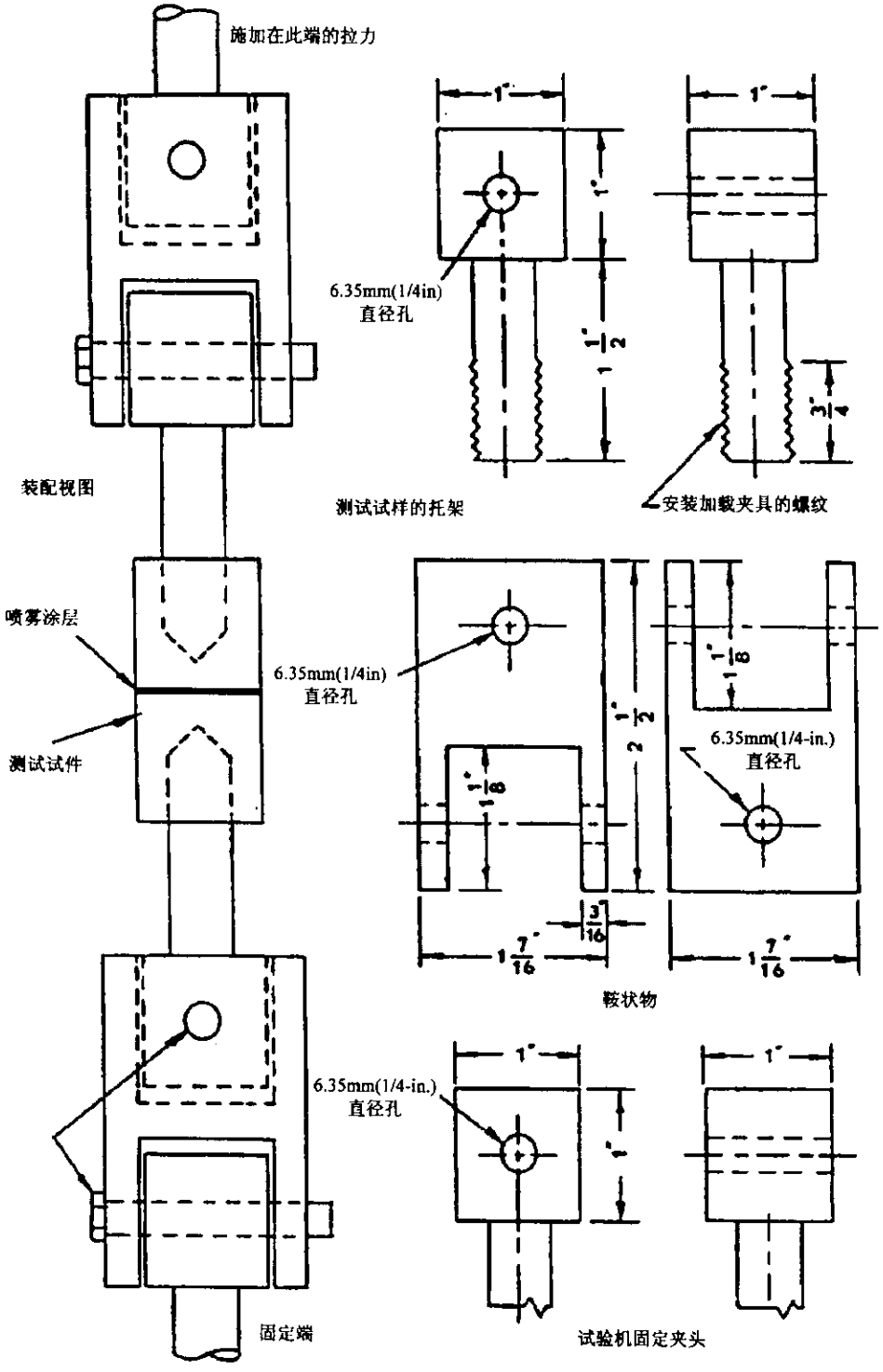


图 6.8.2.3.2(b)　ASTM C 297 加载夹具



公制当量换算

in.	3/16	1/4	3/4	1	1 1/8	1 9/16	1 1/2	2 1/2
(mm)	(4.8)	(6.4)	(19)	(25.4)	(29)	(37)	(38)	(64)

图 6.8.2.3.2(c)　ASTM C 633 端部块体

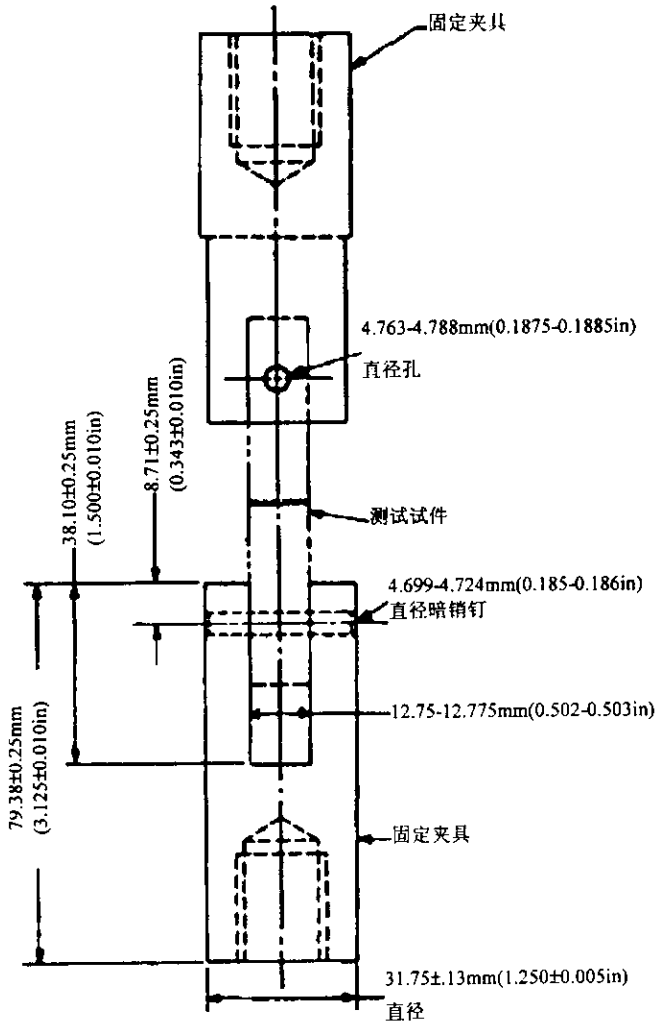


图 6.8.2.3.2(d) ASTM D 2095 加载夹具

6.8.2.3.3 面外拉伸强度的曲梁方法

此项技术的优点是在承受张开力矩的曲层压梁弯头内导出面外拉伸载荷。若干研究人员已经发表了该技术在各种不同变量情况下的研究结果，探索试件尺寸、试件形状（90°小圆弧或“C”形）以及加载方法（采用施加张开拉伸载荷的连接夹具或四点弯曲夹具）（文献 6.8.2.3.3）。在概念上，典型试件构型如图 6.8.2.3.3 所示。

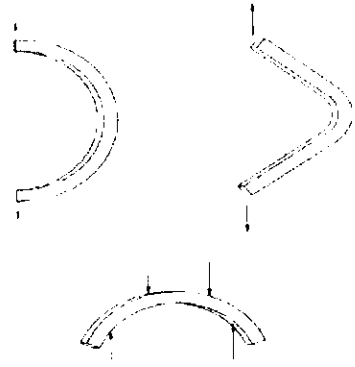


图 6.8.2.3.3 曲梁的加载方法

局限性：

- 标准化——尽管对于可能的标准化，ASTM D-30 正在进行评估，但目前尚无标准。
- 结果的不一致性——早期研究表明，结果大大取决于几何形状和尺寸。
- 材料响应——不同于关于厚层压板的直接面外加载方法，对于面外应变不可能用

仪表对试件进行测量，因此无法测定模量。

6.8.2.4 提交MIL-HDBK-17数据适用的拉伸试验方法

由下列试验方法所得到的数据（表 6.8.2.4）目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表 6.8.2.4 提交 MIL-HDBK-17 数据适用的拉伸试验方法

	符 号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
		单层性能	
0°面内强度	$F_1^{tu},\varepsilon_1^{tu}$	D3039，SRM 4，SRM 9（仅正交铺层）	–
0°面内模量、泊松比	E_1^t,ν_1^t	D3039，SRM 4，	–
90°面内强度	$F_2^{tu},\varepsilon_2^{tu}$	D3039，SRM 4，D5450	–
90°面内模量	E_2^t	D3039，SRM 4，D5450	–
面外强度	$F_3^{tu},\varepsilon_3^{tu}$	（不推荐）	–
面外模量、泊松比	$E_3^t,\nu_{31}^t,\nu_{32}^t$	（不推荐）	–
		层压板性能	
x 面内强度	$F_x^{tu},\varepsilon_x^{tu}$	D3039	–
x 面内模量、泊松比	E_x^t,ν_{xy}^t	D3039	–
y 面内强度	$F_y^{tu},\varepsilon_y^{tu}$	D3039	–
y 面内模量	E_y^t	D3039	–
面外强度	$F_z^{tu},\varepsilon_z^{tu}$	（不推荐）	–
面外模量、泊松比	$E_z^t,\nu_{zx}^t,\nu_{zy}^t$	（不推荐）	–

6.8.3 压缩性能

面内压缩性能

单向板：$E_1^c,\nu_{12}^c,F_1^{cu},\varepsilon_1^{cu}$　　$E_2^c,\nu_{21}^c,F_2^{cu},\varepsilon_2^{cu}$　　$E_3^c,\nu_{31}^c,F_3^{cu},\varepsilon_{32}^{cu},\nu_{32}^c$

层压板：$E_x^c,\nu_{xy}^c,F_x^{cu},\varepsilon_x^{cu}$　　$E_y^c,\nu_{yx}^c,F_y^{cu},\varepsilon_y^{cu}$　　$E_z^c,\nu_{zx}^c,F_z^{cu},\varepsilon_z^{cu},\nu_{zy}^c$

6.8.3.1 概述

自上世纪 70 年代初期以来，复合材料的压缩响应一直是致力研究的项目和试验课题。研究至今，现已存在许多测试受压复合材料的方法，但还没有意见一致的值得推荐采用的方法。

对复合材料进行压缩试验，要采用适当仪器测定压缩模量、泊松比、极限压缩强度和/或破坏应变。测定这些性能是通过采用专门设计的试验夹具：(1)在试件工作段要引入均匀的单轴应力状态；(2)要使应力集中最低；(3)要使得使用和加工尽可能简单；(4)要使试件体积最小。压缩数据用于不同的用途，包括研究、质量控制和产生设计许用值。

对于一个特定的压缩试验方法，其品质的度量包括关于强度和模量的低离散系数，以及所获得的模量值相对于由其他压缩试验方法所得出的相应值的关系。尽管相对的压缩强度通常也用作为压缩试验品质的另一个度量，在不同压缩试验之间压缩响应固有的差别意

味着必须把试验夹具、导致的破坏模式以及应用情况与所得到的强度一起考虑。由某些试验方法所得出的压缩强度可能被认为是“人为高”的值，这是由于夹具/试件的约束可能遏制了某些“实际”破坏模式。一般来说，设计夹具要使得破坏发生在工作段之中，而要有意地抑制诸如端部开花和压杆屈曲等一些破坏模式，如果允许发生，它们将导致“人为低”的强度。在适度约束和过度约束、人为低和人为高的压缩强度之间的比较研究，是造成出现种种可能的试验方法和无法对一个可接受的方法达成一致的原因。如何权衡这些折衷办法的问题在观念上存在差别，压缩试验方法的最终选定取决于试验计划的目的。

业已表明，对于测量单一材料体系的压缩强度，当采用不同的试验方法测定时其结果是不相同的。查明对于结果的变异性有着显著影响的其他参数包括制造方法、纤维排列的控制、不适当的和/或不精确的试件加工、若采用加强片时不适当的加强方法、试验夹具的低劣质量、试件在试验夹具中的放置不当、夹具在试验机中的放置不当以及试验程序不当。

回顾许多现有的压缩试验方法发现，可以将它们概括地分为三类：(1)通过剪切将载荷引入试件工作段，(2)通过直接压缩（端部加载）将载荷引入试件工作段，(3)通过端部加载与剪切联合将载荷引入试件工作段。现已被 ASTM 委员会 D-30（ASTM Committee D-30）在 D 3410-95 中发布的关于纤维增强复合材料的两个压缩试验方法（文献 6.8.3.1(a)）和在 D 5467-97 中发布的一个方法（文献 6.8.3.1(b)）主要通过剪切将载荷引入至试件工作段。ASTM D 695（文献 6.8.3.1(c)）、SACMA SRM-1R-94（文献 6.8.3.1(d)）和 SRM-6-94（文献 6.8.3.1(e)）采用端部加载。ASTM D 6484（文献 6.8.3.1(f)）是一个联合加载试验方法。

可以将压缩试验方法进一步分类为对工作段有支持或无支持两种。无支持工作段定义为在整个压缩试验过程中没有物体与工作段中的试件表面接触。有支持的工作段是在工作段中的试件表面和/或边缘具有由试验夹具或辅助装置所提供的支持。除去 ASTM D 5467（夹层梁方法）之外，在本节中讨论的所有试验方法均采用具有无支持工作段的试件。对于压缩试验方法的更为完善的讨论和这里未涉及到的试验方法的描述可参见文献 6.8.3.1(g)-(l)。

6.8.3.2 面内压缩试验

下面描述的面内压缩试验方法一般用来得出轴向或横向加载单向复合材料试件的极限压缩强度、破坏应变、模量和泊松比，典型厚度范围为 1-10 mm（0.040-0.400 in）。除去 ASTM D 5467（夹层梁方法）之外，下面讨论的所有试验方法也适用于特定的正交各向异性层压板，包括$[0/90]_{ns}$类型层压板。由于消除了单向试件产生的与试件和夹具相关的敏感性，$[0/90]_{ns}$ 层压板试验已变成一个普遍采用的方法。如果所要求的单层压缩数据来自于$[0/90]_{ns}$层压板，则需要有数据处理程序。在 2.4.2 节和 SACMA SRM 6 可以找到有关采用$[0/90]_{ns}$层压板测定单层性能的讨论，和相应的数据处理方法。

通常可以将这里讨论的试验方法用于试件厚度大于上面指出的厚度的情况。有关厚度大于 10 mm（0.400 in）层压板测试的附加说明可以从第三卷第 10 章中获得

面内压缩试验的一般局限性：

- 试验方法敏感性——业已表明，当通过不同的试验方法进行测量时，单一材料体系所测得的压缩强度是不同的。这样的差别的存在可以归结为是由于试件的对中性的影响、试件几何特性的影响和夹具的影响，即使已做出许多努力来力图消除这些影响。在 ASTM D 3410-95 中的两个试验方法和在 ASTM D 5467-97 中的一

个试验方法之间试验结果差别的例子可以从文献 6.8.3.2(a)和(b)中得知。

- 材料和试件制备——压缩模量，特别是压缩强度，对拙劣的材料制造方法、由不适当的试件加工引起的损伤和缺乏纤维对准控制是敏感的。尽管还不存在保证纤维排列对准的标准方法，应尽可能小心地保持纤维相对试件坐标轴的排列。令人满意的处理方法包含如下：在接近平行于纤维方向的一个边缘切断固化的单向层压板来确定 0°方向，或在平行于 0°方向铺设少量颜色鲜明的长丝束纤维（在碳层压板中的芳纶和芳纶或玻璃层压板中的碳）作为预浸料产品的一部分或作为板制造的一部分。

6.8.3.2.1 ASTM D 3410/ D 3410M——利用剪切加载具有无支持测量段的聚合物基复合材料压缩性能

由 ASTM 在试验方法 D3410（Test Method D 3410）中发布了两个压缩试验方法（文献 6.8.3.1(a)），并且在历史上称其为 Celanese（D 3410，Procedure A）和 IITRI（伊利诺斯州学院技术研究院，Illinois Institute Technology Research Institute D 3410, Procedure B）。Celanese 和 IITRI 方法与许多其他已发表的方法一样带有最初研发该方法所在组织的名字。Celanese 和 IITRI 方法建议采用含加强片或无加强片的矩形试件并用楔形夹头来传递载荷。

ASTM D 3410 的局限性：

- 材料形式——限于连续纤维或不连续纤维的增强复合材料，对于该复合材料，其弹性性能相对于试验方向为特殊正交各向异性的。
- 试件夹具特性——尽管 Procedure A 和 Procedure B 两者均通过斜削的楔形夹具来传递载荷至试件，但在 Procedure A 中的楔形面为圆锥形的而在 Procedure B 中的楔形物为平直的。已经得知，Procedure A 中的圆锥形楔形物存在锥体的安放问题（文献 6.8.3.2(a)）。在 Procedure B 中采用的平直楔形夹具设计用来消除此楔形安放问题（文献 6.8.3.2(a)）。可能对试验结果产生显著影响的夹具特性为楔形夹具配合面的表面光洁度。由于这些表面经受滑动接触，它们必须被抛光、润滑和无刻痕及其他的表面损伤。
- 应变测量仪器——尽管不排除使用压缩计，出于对可用空间的考虑使得采用应变计变为基本的要求。对于 Procedure A 和 Procedure B，为了试件的数目最小化，要求采用背对背的应变计。

ASTM D 3410，Procedure A

Procedure A 没有广泛采用，并正在考虑从 ASTM D 3410 中除去。于是将不在这里作进一步的讨论。有关细节在 ASTM D 3410-95 中提供。

ASTM D 3410，Procedure B

设计用于此试验方法的夹具主要目的是为了消除在 Procedure A 中涉及的圆锥形楔形夹具的安放问题（文献 6.8.3.2(a)）。替代圆锥形楔形夹具，这个试验方法的夹具是由坐落在矩形箱体内的平直楔形夹块组成（图 6.8.3.2.1）。此方法的夹具比 Procedure A 的夹具要大和重很多，因此能适应较大的试件。在该夹具中采用的测试试件一般为含加强片的矩形截面试件，推荐的尺寸为 140-155 mm（5.5-6.0 in）长、10-25 mm（0.50-1.0 in）宽以及具有 10-25 mm（0.50-1.0 in）长的工作段。采用此试验方法的测试试件具有其所要求的最小厚度，并规定是标距长度、材料模量及预期材料强度的函数。与 Procedure A 相同，作用至

夹具上的载荷是通过剪切从楔形夹头传递到试件加强片，并且通过剪切从加强片传递至测试试件。试件加强片区域的复杂应力状态被转化为试件工作段中的单向压缩。压缩强度是根据破坏载荷来确定而采用应变计或压缩计来测定模量和破坏应变。

ASTM D 3410 Procedure B 的局限性：

- 加强片和公差——由此试验方法所得到的数据表明它们对加强片的平直度和平行度很敏感，因此应注意确保满足试件公差要求。这就要求在加强片粘接到试件上以后，对加强片表面进行精细研磨。此试验方法所用的夹具必须经精密机加和精确装配，并精确地安装到试验机上。

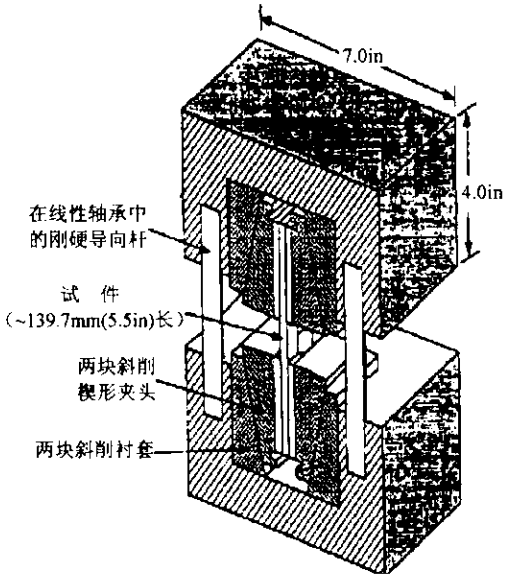


图 6.8.3.2.1 ASTM D 3410-95 Procedure B 试验夹具和试件略图

6.8.3.2.2 ASTM D 6484——利用联合加载压缩（CLC）试验夹具的聚合物基复合材料层压板的压缩性能

正如此标题所意味的，这个试验方法是向试件施加端部载荷和剪切载荷的组合。典型的试验夹具如图 6.8.3.2.2 所示，它由四个成对夹住测试试件端部的块体组成。与试件接触的夹持块体的表面是粗糙的，以便增加有效摩擦系数而有助于传递剪切载荷。通过调整每一对块体上四个螺钉的扭矩，可以控制剪切载荷与端部载荷之比。目的是要施加足够的扭矩，使得试件的端部不被端部载荷压碎或别的方式的破裂，但该扭矩仅比所需量略高一点。加大试件端部的夹紧力会增加引起的厚度方向应力以及夹持块工作段端部的轴向应力集中。尽管这是一个目标，但是，业已表明（文献 6.8.3.2.2(a)），螺钉扭矩（夹紧力）的上端值存在着相当大的容许值。

由于采用有利的联合加载载荷引入方式，有可能测试多种复合材料和层压板而不必采用加强片。加强片总会在试件工作段的端部产生额外的应力集中（文献 6.8.3.2.2(b)-(d)），不用加强片还会大大降低试件制备费用，并消除各种潜在误差来源和造成数据分散性的因素，这些因素包括加强片材料厚度和胶粘剂胶层厚度的变化。试件端部被压碎是很可能的，对这样的层压板用联合加载，试验比较容易进行。

标准的 CLC 试件为 140 mm（5.5 in）长，这有 12.7 mm（0.50 in）工作段长度（无支

持长度）。简单地改变试件的总长，就可以获得较长或较短的工作段。对于大多数应用情况，推荐试件宽度为 12.7 mm（0.50 in），但标准夹具能适应直至 30.5 mm（1.2 in）的任意宽度试件。通常采用的试件厚度为 2.0-2.5 mm（0.080-0.100 in）的量级。然而，夹具将适应任意实际厚度的试件。太薄的试件会出现屈曲。如果试验材料的正交各向异性率过高（不能得到足够高的组合加载剪切分量），厚试件将会出现端部压碎。

至于 ASTM D 3410，可以对含加强片试件，甚至单向复合材料进行试验。组合加载比带加强片试件的剪切加载要稍好一些，组合加载时的夹持力不那样高，从而原先注意到的应力集中将不会那样显著。

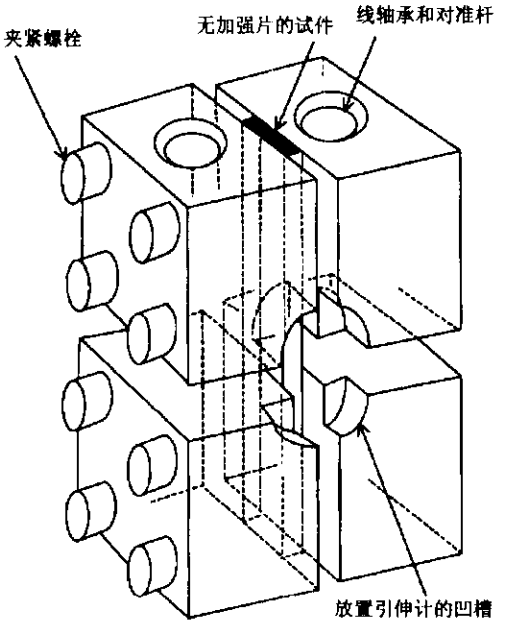


图 6.8.3.2.2　ASTM D 6484 采用无加强片试件组装好的试验夹具示意图

- 材料形式——多数特殊正交各向异性层压板构型可以用无加强片试件来进行试验。例外的情况是 0°层比例高的层压板。对 0°层比例高于 50%的的层压板进行试验可能产生端部压碎。也能对无加强片的织物和编织复合材料进行试验。高度正交各向异性的单向复合材料试件必须带加强片进行试验。
- 试验夹具特性——此试验方法依赖于在试件-夹具界面的高有效摩擦系数，以便传递大的剪切力而保持加紧力为最小。热-喷射碳化钨粒子的夹紧表面工作性能良好。必须对每一对夹具端部块体进行适当的机械加工，并且，在它们的外端必须很好地匹配以便当夹紧试件端部时，它们形成垂直于测试试件轴线的平直平面。还必须将试件制备成具有垂直于试件轴线的平直的端部。安装试件到夹具中要使得试件的每一端与一对夹具块体的外端相齐平。于是，当通过平直的压盘来施加压力时，该力通过夹具端部块体和试件端部两者同时进行传递。
- 应变测量仪器—— 一般组合加载压缩试验夹具一侧带有凹槽，使压缩计可以连到试件工作段的边缘（图 6.8.3.2.2）。然而，与 ASTM D 3410 中的情况一样，一般无支持段只有约 12.7 mm（0.50 in）长，限制了可用的连接空间。在建议监控受载时试件弯曲和屈曲的情况下，由于要达到所要求那样长的长度，更难将引伸计连

到测试试件的每一表面，于是，通常改为采用应变计。它们可以含有非常短的起作用的工作段长度，因而适合于有限的空间。为了减少试件的数目，要求采用背对背应变计，来核验试件的弯曲和屈曲。

ASTM D 6484 的局限性：

- 试件尺寸——将标准夹具设计得可在 63.5mm（2.5 in）范围上夹持无加强片试件的每一端。于是，为了设置工作段，试件必须长于 127 mm（5.0 in）。标准夹具将适应的最大试件宽度为 30.5 mm（1.2 in）。当试件厚度增加时，轴向压缩应力沿厚度的分布将变得更不均匀。即使该夹具能用于更厚的试件，但要指定一个实际的上限。
- 材料形式——不能用无加强片试件来测试高正交各向异性复合材料。为防止端部压碎所要求的非常高的加紧力，会导致夹紧块的工作段端部出现不可接受的应力集中。

6.8.3.2.3 ASTM D 5467——采用夹层梁的单向聚合物基复合材料的压缩性能

夹层梁方法（文献 6.8.3.1(b)）由蜂窝芯夹层梁构成，该梁承受四点弯曲载荷使得上面板处于受压状态（图 6.8.3.2.3）。受压面板（上面板）为 6 层单向层压板，而下面板则为同样材料但其厚度为上面板的两倍。将两块面板胶接至一个厚的铝蜂窝芯上而使其分隔开。当梁承受四点弯曲时，上面板被设计为受压破坏。梁被加载直至弯曲破坏，若采用应变计和压缩计便可得到压缩强度、压缩模量和破坏应变的测量值。

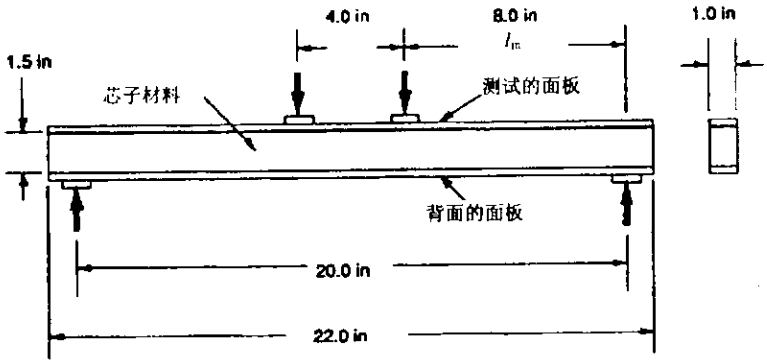


图 6.8.3.2.3 ASTM D 5467 试件和加载形式示意图

ASTM D 5467 的局限性：

- 材料形式——此试验方法限于单向材料。
- 试件复杂性——夹层梁试件相当大，试件制备比 ASTM D 3410 和 ASTM D 6484 所用试件较为复杂和昂贵。
- 泊松比——由于鞍形面的弯曲，由此方法所获得的泊松比的有效性已被置疑。

6.8.3.2.4 ASTM C 393——平直夹层结构的弯曲性能

这个试验方法（文献 6.8.3.2.4）为一系列设计用于夹层结构的测试方法中的一个，该试验方法适用于承受到如 ASTM D 5467 同样方式的面内弯曲的平直、夹层结构性能的测定。设计 ASTM D 5467 仅是为了提供受压面板的数据，而 ASTM C 393 用来测定整个夹层板的弯曲和剪切刚度、芯子的剪切模量和剪切强度、或面板的压缩或拉伸强度。这个试验

方法对芯子和面板材料没有限制，试件为矩形截面，而芯子、面板及跨度的几何尺寸是材料性能的函数，按达到所期望的破坏模式来确定。尽管还没有广泛用于复合材料性能的测定，但此试验方法确实考虑了 ASTM D 5467 未涉及的测试试件的设计。因为确定材料性能的公式可能不适用于某些试件几何特性或芯子/面板组合，在将这个试验用于复合材料性能测试时应该很谨慎。

这个试验方法在确定[90°]层压板拉伸性能的应用包含在第一卷 6.8.2.2.5 节之中。

ASTM C 393 的局限性：

- 材料形式——此试验方法对于芯子材料或面板材料的形式没有限制。确定材料性能的公式可能不适用于某些试件几何特性或芯子/面板组合。
- 试件几何特性——此试验方法限于矩形夹层结构，芯子、面板及跨度的几何尺寸是材料性能的函数，按达到所期望的破坏模式来确定。确定材料性能的公式可能不适用于某些试件几何特性或芯子/面板组合。

6.8.3.2.5　ASTM D 695——刚性塑料的压缩性能

这个方法是由 ASTM D-20 委员会制订，用于无增强和增强刚性塑料的压缩试验。此方法可以采用两种试件。第一种一般用于无增强塑料，它具有正圆柱或棱柱的形式，其长度是它的主要直径或宽度的两倍。对于棱柱形试件优先选用的试件尺寸为 12.7×12.7×25.4 mm（0.50×0.50×1 in），而对于圆柱形试件则为 12.7 mm 直径×25.4 mm（0.50in 直径×1 in）。较小直径的杆或管也可以用于试验，只要它们足够长使得试件长细比达 11:1 至 16:1。将试件放置在压缩机的刚硬钢表面之间进行测试，并加载直至破坏。

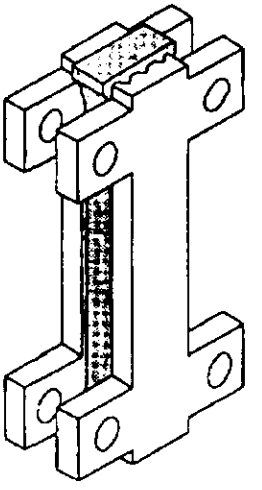


图 6.8.3.2.5　ASTM D 695 试件和试验夹具示意图

文件确认的标准中的第二种测试试件适用于“增强塑料，包括高强度复合材料和厚度小于 3.18 mm（0.125 in）的高正交各向异性层压板”。它采用平直的、无加强片的狗骨形试件，79.5 mm（3.13 in）长并具有 12.7 mm（0.50in）递减宽度工作段。两个具有纵向槽、比试件稍微短些的 I 形（防屈曲）支承板轻轻地夹住试件表面，通过支承板传递的力与施加载荷相比可以忽略不计（冗余载荷路径）。将试件放置在支承板之间后，直接施加压缩载荷至试件的端部直到破坏，来确定压缩强度。

在 D30 的不同试验室间的比较试验研究（round robin）中，对于[0]AS/3501 和[0]E-Glass/1002 层压板，采用具有夹具支持的平直狗骨形试件进行了评估(文献 6.8.3.2(b))。根据这项研究得出的结论认为：此试验方法不适用于测定所研究的这种形式高模量复合材料的压缩强度。（可以用此试验方法对其他类型，如 E-Glass 织物增强复合材料进行成功的测试）。为试图修正 ASTM D 695 试验方法的这一部分以便适用于高模量复合材料，已经制订了带加强片的直边试样。此外，还对此试验方法增加了用于支持夹具-试件装配的 L 形基座。ASTM 未进行这些修正，也未编入 ASTM D 695。涉及这些修正的讨论包含在下面有关 SACMA SRM 1R 试验方法的节中。

ASTM D 695 压缩试验方法的局限性：

- 材料形式——这个文件所发布的内容规定，它限于未增强和增强刚性塑料，包括高模量复合材料。由 ASTMD-30 委员会所实施的不同试验室间比较试验研究（round robin）发现，这个方法用于高模量复合材料强度的测量是无法接受的（文献 6.8.3.2(b)）。然而，应该注意到，对于该系列试验尚存在某些置疑（文献 6.8.3.2(b)）。

6.8.3.2.6 SACMA SRM 1R，定向纤维-树脂复合材料压缩性能

已经制订了 ASTM D 695“刚性塑料压缩性能的标准试验方法”用于高模量连续纤维复合材料的修订稿，并已由 SACMA 编制成文件 SRM 1R（文献 6.8.3.1(d)）。尽管基本保留了 D 695 方法的简单夹具，但其修订稿是利用带加强片直边试件来测定压缩强度而且采用 L-形基座来支持夹具-试件装配。必须用无加强片的单独试件来测定模量。两种试件均比 D 3410 试件短些，为 80 mm（3.18 in）长、13 mm（0.5 in）宽和 1-3 mm（0.040-0.120 in）厚。虽然工作段不受支持，但它非常短（4.8 mm（0.188 in））。

这个试验方法得出的压缩强度值比由 D 3410 Procedures A 和 B 得到的稍微高一些（5-10%）。一个可能的原因是端部加载产生的工作段应力状态更为均匀。然而，对于 ASTM D 695，如果夹紧力过高，夹具引起的横向支持的冗余载荷路径可能相当大。SRM 1R 规定，夹紧螺栓所受的扭矩为 0.7-1.0 Joules（6-10 in-lb），有关这个问题的进一步的讨论见文献 6.8.3.1(l)。连同压缩强度试件的试验方法示意图如图 6.8.3.2.6 所示。

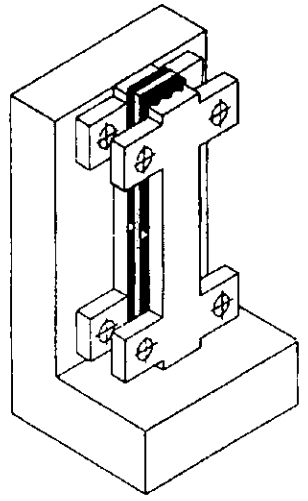


图 6.8.3.2.6 SACMA SRM 1-88 试验夹具和试件示意图

SACMA SRM 1R 压缩试验方法的局限性：

- 概述——此试验方法要求分别采用强度和模量试件。短的试件工作段使得用于强度的试件具有小的试验段容量。
- 材料形式——由手册协调组说明的此试验方法的特定范围是仅适用于单向试件 0° 方向性能及织物试件 0°方向性能。仅当试件机织/编织的单胞小于试件工作段（4.8 mm（0.188 in））时，此试验方法才适用于基于织物的材料。
- 压缩强度——如同前面所讨论的，用此试验方法获得的压缩强度测量值一般比 ASTM D 3410 方法所得的值要高。避免由于螺栓夹紧扭矩过高而导致冗余载荷路径是重要的。
- 破坏应变——由于强度试件的测量区域对于应变计来说不够大，而且（无加强片的）模量试件的几何特性不适于加载至破坏，故由这个试验方法不能得出破坏应变。因此，不可能在多数真实的应力-应变响应曲线上，观测到包括监控试件弯曲应变以评定工作段载荷是否正常的应力-应变响应。

6.8.3.2.7 SACMA SRM 6——定向正交铺层纤维-树脂复合材料的压缩性能

除了仅限用于正交铺层层压板的材料形式外，这个试验方法（文献 6.8.3.1(e)）与 SACMA SRM 1R 是相同的。采用这个限制是由于此方法是由正交铺层层压板测定强度并

应用折算系数来确定单向复合材料压缩强度。

如这个方法（与 SACMA SRM 1R 相同）的概述，其程序为对$[90/0]_{ns}$（例如，n=3 或 6）层压板*压缩加载直至破坏，然后将这个层压板的压缩强度乘以一个系数来确定构成$[90/0]_{ns}$层压板的单向层有效强度如下：

$$\sigma_{c,uni} = F \times \sigma_{c,lam}$$

式中：

$$F = \frac{2E_{11}}{E_{11} + E_{22}}$$

单向复合材料的模量（E_{11}和E_{22}）必须由单向复合材料试验分别来测定。在 2.4.2 节中提供了有关用正交铺层层压板数据来折算单向复合材料数据的局限性及假定条件的更为完整的讨论。

SACMA SRM 6 压缩试验方法的局限性：

- 概述——此试验方法要求分别采用的强度和模量试件。对于测量强度试件，试件工作段短使得试件体积小。在这个试验方法中折算系数的使用是假设将其用于线弹性的材料响应。
- 材料形式——限于定向连续纤维增强且主要由预浸料或类似产品制成的正交铺层聚合物基复合材料。当试件机织/编织的单胞尺寸大于试件工作段（4.8 mm (0.188in)）时，短的标距使得它不能用于基于织物和编织的材料。
- 压缩强度——与 ASTM D 595 和 SACMA SRM 1R 一样，如果夹紧力过高，由夹具引起的、通过横向支持的冗余载荷路径可能是个大的问题。与 SRM 1R 一样，SRM 6 规定夹紧螺栓所受的扭矩达 0.7-1.0 J（6-10in-lb）。在文献 6.8.3.1(l)中对此作了了进一步的讨论。
- 破坏应变——由于强度试件的测量区域对于应变计来说不够大，而且（无加强片的）模量试件的几何特性不适于加载至破坏，故由这个试验方法不能得出破坏应变。因此，不可能在最为实际的应力-应变响应曲线上观测到包括通常用作评定适当工作段载荷的试件弯曲应变监控的应力-应变响应。

6.8.3.2.8　厚度方向压缩试验

由于对沿厚度方向压缩数据需求不足的历史原因，还不存在经标准化的或广泛被接受的试验方法来测定复合材料层压板厚度方向（z 方向）的压缩强度、模量或泊松比。已在有限的文献中报导了这些数据（文献 6.8.3.2.8(a)和(b)），并且已采用从厚截面层压板切出的简单的直边试件来获得这些性能。

6.8.3.3　产生提交MIL-HDBK-17数据的压缩试验方法

由下列试验方法（表 6.8.3.3）所提交的数据现在正被 MIL-HDBK-17 考虑接受作为包含在第二卷中的内容。

---

* 例如，对于碳/树脂复合材料，n=3 一般用于当测试面积重量大于或等于 100g/m^2 时的层压板铺层，而 n=6 适用于面积重量小于 100g/m^2 的情况。

表 6.8.3.3 提交 MIL-HDBK-17 数据适用的压缩试验方法

性 能	符 号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
单层性能			
0°面内强度	$F_1^{cu}, \varepsilon_1^{cu}$	D 3410，D 6484，D 5467 SRM 1R[1,2]，SRM 6[1,2]	—
0°面内模量、泊松比	E_1^c, ν_{12}^c	D3410，D 5467[3]，SRM 1R[2]	—
90°面内强度	$F_2^{cu}, \varepsilon_2^{cu}$	D3410，D 6484，SRM 1R[1,2,4]	—
90°面内模量、泊松比	E_2^c, ν_{21}^c	D3410，D6484，D5467[3] SRM 1R[2,4]	—
面外强度	$F_3^{cu}, \varepsilon_3^{cu}$	不推荐	—
面外模量、泊松比	$E_3^c, \nu_{31}^c, \nu_{32}^c$	不推荐	—
层压板性能			
x 面内强度	$F_x^{cu}, \varepsilon_x^{cu}$	D 3410，D 6484	—
y 面内强度	$F_y^{cu}, \varepsilon_y^{cu}$	D 3410，D 6484	—
x 面内模量、泊松比	E_x^c, ν_{xy}^c	D 3410，D 6484	—
y 面内模量、泊松比	E_y^c, ν_{yx}^c	D 3410，D 6484	—
面外强度	$F_z^{cu}, \varepsilon_z^{cu}$	不推荐	—
面外模量、泊松比	$E_z^c, \nu_{zx}^c, \nu_{zy}^c$	不推荐	—

[1] 对于 ε_1^{cu} 和 ε_2^{cu}，还未经批准

[2] 当试件机织/编织的单胞尺寸大于 4.8mm(0.188in)的工作段时，对于基于织物的材料，还未经批准

[3] 对于 ν_{12}^c 和 ν_{21}^c，还未经批准

[4] 仅批准适用于正交铺层基于织物试件的纬向性能

6.8.4 剪切性能

6.8.4.1 概述

面内剪切性能[*,**]： $G_{12}, F_{12}^{so}, F_{12}^{su}, \gamma_{12}^{su}$ $\quad G_{xy}, F_{xy}^{so}, F_{xy}^{su}, \gamma_{xy}^{su}$

面外剪切性能： $G_{23}, F_{23}^{so}, F_{23}^{su}, \gamma_{23}^{su}$ $\quad G_{yz}, F_{yz}^{so}, F_{yz}^{su}, \gamma_{yz}^{su}$

$G_{31}, F_{31}^{so}, F_{31}^{su}, \gamma_{31}^{su}$ $\quad G_{zx}, F_{zx}^{so}, F_{zx}^{su}, \gamma_{zx}^{su}$

短梁剪切性能： $F_{31}^{sbs}, F_{zx}^{sbs}$

已证明复合材料的剪切试验，是要定义一个严格正确试验方法的力学性能试验中难度最大的领域之一，特别是在面外方向。已经得到了若干试验方法，下面仅叙述其中的某些方法。这些方法中的大多数最初制订时并非用于连续纤维增强复合材料，而是像金属、塑料、木材或胶粘剂那样的材料。对于复合材料，很多方法还没有完全标准化，但没有一个

---

* 注意到，这里剪切性能一般采取独立的下标，例如，$F_{23}^{su} = F_{32}^{su}$ 等。对于常用的工程材料，在主材料坐标系中，这是通常所接受和一般来说是精确的假定。然而，在非均衡多向层压板中，剪切刚度、剪切强度或两者均可能与方向有关。在这样的层压板中，该情况的出现主要来自于在相对于载荷方向为偏轴方向纤维的拉伸和压缩特性上的差别。

** 横观各向同性是对于许多材料体系的一个通常的假定，它意味着 $G_{12} = G_{13}$。

方法是没有缺陷或局限性的，虽然某些方法比另一些方法显然更合乎需要。

尽管关于剪切模量测量精度一般是认同的（对正确进行的试验），但复合材料剪切试验所面临的最大困难为剪切模量的测定。边缘效应、材料耦合效应、基体或纤维/基体界面的非线性特性、不理想的应力分布或正应力的存在的综合效应使得根据现有剪切试验方法来进行剪切强度测定变得相当值得怀疑。由于这个不确定性，对每一个给定的应用情况，用于结构应用的剪切强度数据应该按照情况来逐一进行评估。

对复合材料剪切试验经验逐渐增加，包括公布的和未公布的，已使得对于每一个试验方法的长处和不足有着较多的了解。在 1991 年秋季，ASTM D30 委员会会议上，对剪切试验方法的 D30.04.03 节进行了讨论并得出了以下结论中的前面两个。在 1993 年春季会议期间，该委员会又附加了第三个结论。这些结论正在被包含于现有的和未来的 ASTM 标准剪切试验方法之中：

- 尽管某些试验方法对于给定的工程目的可被最终用户认定为可以达到适用于特定材料体系所能接受的程度，但对于各种材料体系还不存在能够得出在理想纯剪切应力状态下直至破坏的已知的标准（或非标准）试验方法。
- 若试验方法不能始终如一地得出纯剪切的合理近似或按非剪切破坏模式引起破坏，则由该试验方法获得的强度不应被称为“剪切强度”。
- 鉴于从现有剪切试验所得出的极限强度值不足以确信能够提供关于材料体系比较的适当判据，故目前建议附加一个 0.2%的偿补强度（0.2%偿补量，除非有其他的规定）。

对于很多长丝复合材料所具有的高度非线性应力-应变特性，特别是具有高延伸率的材料体系，通常在实际试件破坏前就终止了剪切试验。遵循 MIL-HDBK-17 的引导，如果破坏没有预先出现，ASTM D30 目前推荐在 5%剪应变时结束剪切试验。其理由包含在下面的讨论中。

- 结构层压板的实际用法——设计典型的结构层压板要使纤维置于主要承载方向。在剪切情况下，剪切载荷通常是通过适当角度铺层的纤维的拉伸和压缩来承受。根据基础材料力学，由于在给定层基体中的剪应变，不可能比相对第一层呈 45°角的其他层纤维轴向应变大两倍，于是我们可以认为，剪应变的工程应用值的上限为拉伸或压缩纤维应变的两倍。由于多数韧性结构纤维破坏通常不超过 2.5%，在结构层压板中的剪应变的实际上限则可为 5%。在此剪应变下终止剪切测试数据是一个切合实际的建议，这样节省了时间并得到在更多结构上可达到的、因而更有意义的极限剪切强度下限的估计值。
- 常规剪切试验方法的局限性——由于纤维的过分剪切，在±45°拉伸剪切试验和 V 型缺口梁（Iosipescu）剪切试验中均存在着运动学上的制约。Kellas 等人的研究工作（文献 6.8.4.1）表明，在高应变下±45°层几何特征的初始状况发生了重大改变。基于他们对于纤维剪切和剪应变间关系的估计，对于这些试验，超出 5%剪应变的试验结果是值得怀疑的，于是该剪应变成为适用于这些试验方法的实际的应变上限。

  导致类似限制条件的另外一个问题则涉及到一般应变计的使用。如果采用应变计来进行应变测量，当其用于某些试验是可行的并被其他人所要求的情况下，约 3%

拉伸应变的典型的应变计限制大致等于 6%剪应变，使此值成为实际剪应变测量的限制，它类似于运动学在数值上的制约。

- 层压板试验——诸如±45°拉伸剪切那样的一些剪切试验方法，由于其固有的特性仅能用于测试某些类型的层压板。并且，对于现有的剪切试验方法，由于存在像测定材料极限剪切强度那样的困难，多向层压板剪切强度的测试更是问题。尽管这里讨论的几个剪切试验方法可以用来测定层压板应力-应变曲线的主要部分，并利用它得出剪切模量，但是还没有已表明可用来测定多向层压板极限剪切强度的标准试验方法。采用胶接、带锥度加强片的 ASTM D 4255 的一个修正（轨道剪切试验方法）业已被建议用于多向层压板的剪切强度的测试，但是对数据的关注还不足以将该修正标准化或让 MIL-HDBK-17 推荐其普遍应用。MIL-HDBK-17 试验工作组将继续在这个领域开展研发工作。

6.8.4.2 面内剪切试验

6.8.4.2.1 ±45°拉伸剪切试验

- ASTM D 3518/D 3518M-94，利用±45°层压板拉伸试验得到聚合物基复合材料面内剪切响应的试验方法
- SACMA SRM 7-88，定向纤维-树脂复合材料面内剪应力-应变性能

关于面内剪切性能的这个试验（文献 6.8.4.2.1(a)和(b)）是由具有$[\pm 45]_{ns}$系列铺层的试件的修正 ASTM 试验方法 D3039 拉伸试验所构成。可证明在该试件中远离夹持区的面内剪切应力为所施加的平均拉应力的简单函数，于是使得材料剪切响应的直接计算变得可能。此试验方法具有测试试件简单、不需要夹具、以及能用引伸计或应变计进行应变测量的优点。

最初仅将其应用于单向材料，标准的 1994 年版本现包括许多机织织物材料，但此试验方法在本质上限定用于在 1-2 材料平面内的性能测定。在历史上，SACMA 版本一直是 ASTM 标准一个受限定的子集；尽管在过去两个方法的现行的版本间业已存在着较小的差别。然而，这里列出的版本具有几个明显的差别。1994 SACMA 试验方法没有包括 1994 年对于 D 3518 所进行的若干重要的改变，尽管试验的基本物理特性保持相同，但数据折算的细节现已明显的不同，因此两个版本不是完全等效的。目前，D 3518 定义弦向模量是从 2 000-6 000 剪切微应变（对应于 SRM 7R-94 中的 500-3 000）并且在 5%剪应变（或破坏，取决于那一种情况首先出现）下终止试验，而 SRM 7R-94 仍仅按照极限载荷来定义强度。D 3518 也已加进了偏置强度，而 SRM 7R-94 没有将此包含在内。

虽业已表明，当剪切应变水平超出 1.3%时，应力-应变响应被低估了（文献 6.8.4.2.1(f)），但已证明±45°试验和其他剪切试验方法之间的模量测定有良好的一致性（文献 6.8.4.2.1(c)-(e)）。在航宇复合材料结构界中很多人认为尽管该试件的应力状态可能不“纯”，但它的响应确实模拟了结构层压板中的实际应力状态和铺层相互作用。所得的响应引出一个“当量的”剪切模量，对于设计者来说它可能是比较实用的。

ASTM 标准原先的版本缺少对于几个试验参数的充分定义，已经发现它们对于该试件的极限强度具有重要的影响。业已表明（文献 6.8.4.1），试件破坏不是由于面内剪切，而更多是由于复杂的交互作用所引起，此交互作用对于材料韧性、铺层顺序、层数、层厚、边缘效应及表面层约束是敏感的。D 3518 的 1994 版本提供了改善此状况的附加控制：

- 已经利用“5%剪应变下的剪应力”来替代“极限剪切强度”，这是由于目前一致认同该试验不能测定真实的极限材料强度。这个新的量类似于老的极限强度值，但由于它难以计算，所以对许多材料体系，它们不会严格等效，甚至可能有显著差别。
- 加进了偏置剪切强度（对于材料对比，是比原有的“极限”剪切强度更有意义的量）。
- 如果试件在 5%剪切应变时还没有破断，则终结试验。
- 把弦向剪切模量改为用一个应变范围（2 000-6 000 剪切微应变），它与拉伸弦向模量应变范围（1 000-3 000 剪切微应变）是一致的。
- 规定了关于层铺设的要求，以保证避免最脆的破坏模式，并增加使数据对比变得更为有意义的可能性。

查阅文献或在 ASTM 标准本身中的讨论，以便了解更多的细节。

±45°拉伸剪切试验局限性：

- 材料和层压板形式——限于可得到完全均衡和对称的±45°试件的材料。如上所述，铺层顺序、层数和层厚对于试件强度有直接影响。低层数层压板和重复（或非常厚）层对于强度具有有害的影响，在新标准中是有限制的。
- 非均质材料——假设材料相对于试验段的尺寸是均质的。对于试验段宽度具有比较粗的特征的材料形式，如具有粗的重复图案形式的机织和编织纺织物，则要求较大的、目前尚无标准的试件宽度。
- 应力状态的不纯性——在工作段中的材料不是处于纯面内剪切状态，因为在整个工作段存在面内正应力分量，且在接近自由边界处存在着复杂的应力场。尽管认为这个试验方法能提供可靠的初始的材料响应，并且能很好地建立进入非线性区域的剪应力-应变响应，但所计算的破坏剪应力值并不代表材料强度，这就是为什么目前 ASTM 标准规定在 5%剪应变下终止试验的原因。
- 大变形的影响——可能出现在韧性材料试件中纤维极端剪切的情况，随应变增加会引起纤维方位的逐渐变化，造成与结果计算中所采用的纤维方位假设相抵触，这就是为什么目前在 5%剪应变下终止试验的第二个原因。

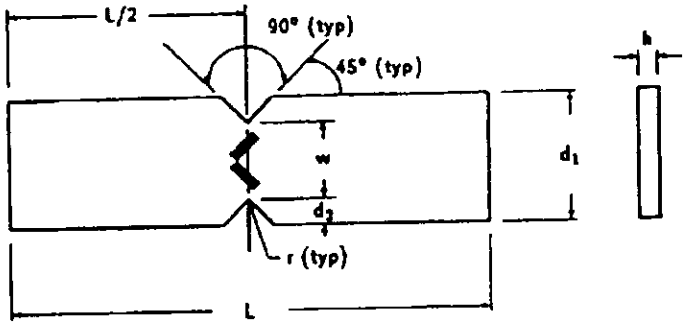
6.8.4.2.2 Iosipescu 剪切试验

ASTM D 5379/D 5379-93，利用 V-形缺口梁法测定复合材料剪切性能的试验方法

适用于复合材料的 V-形缺口梁剪切试验（通常在文献中称为 Iosipescu 试验）已经由 ASTM D-30 委员会在 ASTM D 5379/D 5379M-93 中进行了标准化（文献 6.8.4.2.2(a)）。早在上世纪 50 年代末期和 60 年代初期，用于强度和模量的 V-形缺口梁剪切试验的概念已被 Arcan（文献 6.8.4.2.2(b)-(d)）和 Iosipescu（文献 6.8.4.2.2(e)-(g)）认同在金属上是适用的。随后其使用受到了限制，直到 1980 年代初 Wyoming 大学在 NASA 资助下开始就试件和夹具的改进方法进行详尽研究（文献 6.8.4.2.2(h)和(i)），接着又修改了夹具（文献 6.8.4.2.2(j)和(k)），并且后来的 Wyoming 构型形成了 ASTM 标准的基础。现已对此方法进行了广泛的研究，有关另外的研究工作见文献 6.8.4.2.2(l)-(r)。历史上早期的观点在文献 6.8.4.2.2(h)和(s)中给出，然而，讨论的其余部分集中于已经由标准确认的构型。

在此方法中，如图 6.8.4.2.2(a)所示，具有中央对称 V-形缺口矩形平直片条形式的材料

试件在机械式试验机中，由如图 6.8.4.2.2(b)所示的专用夹具来进行加载。根据相对于加载轴线的材料坐标系统方位，可以评估面内或面外剪切性能。



名义试件几何尺寸	
d_1=20.0 mm (0.75 in)	d_2=4.0 mm (0.15 in)
h=按要求	L=76.0 mm (3.0 in)
r=1.3 mm (0.05 in)	W=12.0 mm (0.45 in)

图 6.8.4.2.2(a) V-形缺口梁试样示意图

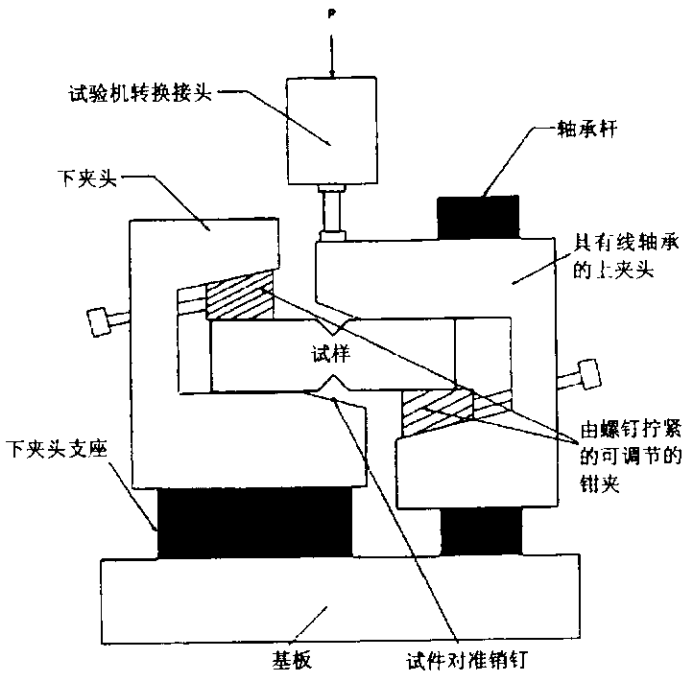


图 6.8.4.2.2(b) V-形缺口梁试验夹具示意图

尽管该标准仅致力于在材料坐标系统中性能的测定，但也可以用于测定一般多向层压板初始应力-应变响应。然而，载荷引入试件的方法一般不能承受多向层压板所能抵抗的高得多的载荷，因此，对大多数材料体系，这个试验方法用于多向层压板时限于表征弹性模量和应力-应变曲线的初始部分。已成功地测试了一些多向材料，例如通常称为片状模塑料（SMC）的不连续增强、多向模塑材料，但是这样的材料仍然是例外而不是通例。

试件插入至夹具之中是利用位于沿载荷作用线的缺口，经由使试件处于夹具中央的对

中工具来实现。当监控载荷时，通过试验机的横梁来连接和向下驱动夹具的上半部。夹具两个半部之间的相对位移使缺口试件受载。通过在试件的中部（远离缺口处）沿加载轴线放置并与加载轴线成±45°的两个应变计元件，便可测定材料的剪切响应。

可以看出，V-形缺口梁（VNB）概念其目的在于达到如图 6.8.4.2.2(c)所示剪力和弯矩图的非对称弯曲加载的理想情况。试件工作区是处于常值剪力而弯矩为零的区域。试件缺口影响沿加载方向的剪应变，使得比没有缺口情况所见的剪切分布更为均匀*。剪切分布的均匀度为材料正交各向异性的函数；在$[0/90]_{ns}$类型层压板上已经获得最佳的所有面内剪切结果。然而，尽管点-加载的理想情况显示在试件的工作段内处于常剪力和零弯矩，但实际上夹具对试件施加的是分布载荷，它会对剪应变分布的非对称性及对正应力分量产生影响，该影响对于$[90]_n$试件特别不利。

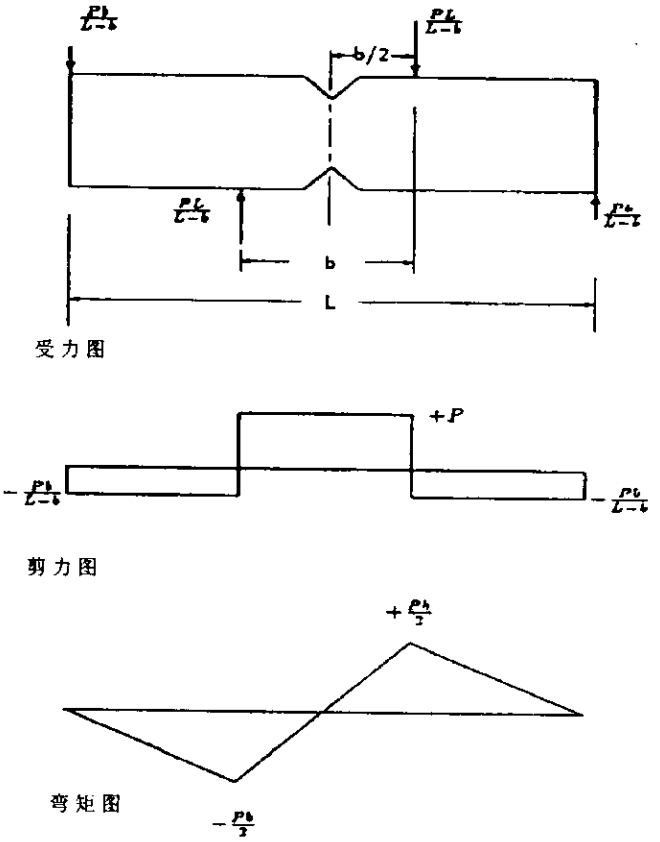


图 6.8.4.2.2(c)　理想受力、剪力和弯矩图

V-形缺口梁切试验的局限性：

- 非均匀材料——相对于工作段尺寸的大小，假设材料是均匀的。相对于工作段的尺寸具有比较粗的特征的材料，例如采用大支数的长丝束（如含 12 000 或更多的长丝的丝束）的织物或某些编织结构，不应采用这样的试件尺寸来进行试验。
- 应变场的均匀性——计算中假定在缺口之间存在一个均匀的剪应变状态。实际均匀度随着材料正交各向异性的程度和加载方向而改变。最近研发出来的新型应变

* 受剪切的各向同性梁具有抛物形状的剪应力分布图。

计栅片专门用于此试验方法。在该应变计上的主动应变片分布在缺口之间，并给出改善了的平均应变响应的估计量。当采用常规应变计时，已经表明，对于单向材料面内剪切模量的最精确的测量结果来自于$[0/90]_{ns}$试件。

- 载荷偏心——在加载过程中可能发生试件的扭转，该扭转影响强度的试验结果，特别是影响弹性模量的测定。建议每次试验取样至少有一个试件要利用背对背应变花来进行测试以估计扭转的影响程度。
- 破坏测定——在某些材料和构型中，破坏并不总是显而易见的。参见标准试验方法（文献 6.8.4.2.2(a)），以便获得更多的资料。
- 仪器——要求采用应变计

6.8.4.2.3 轨道剪切试验

ASTM D 4255-83，复合材料层压板面内剪切性能的测试指南

1983 年 ASTM D-30 委员会发布了 D 4255（文献 6.8.4.2.3(a)），它是用两种轨道剪切方法中的任一种测定复合材料层压板面内剪切性能的标准。为了解这些方法的精度和偏差，由 D-30 进行的不同实验室间的比较（round robin）试验表明，当时各实验室之间的试验结果存在着太多的变异性。尽管在那个时候对于这种差异的原因还不是十分了解，由于轨道剪切试验已被广泛采用，强烈希望建立用于该试验的标准。尽管同时附有防止出现误解的说明，但仍完成和发布了标准，以便为想要采用轨道剪切试件的人员提供一个共同的平台。

自从 D 4255 最初发布以来，对初始 round robin 数据的分散性可能产生影响的若干试验因素已变得更为了解了。在写本手册的时候（1997），正在制订该标准的修订版，它将修正在最初版本中存在的几个明显的不足。不管修订的标准是否会改善/减少变异性和是否会增强新用户的信心，特别是经改善后具有竞争力的较为简单和花费较少的试验方法的实质性研究会在以后有进一步的了解。

尽管标准限于面内试验，但它能够用于测试材料剪切或多向层压板剪切性能。然而，由于施加载荷至试件的标准装置一般不能适应多向层压板的较高的强度要求，如同表征模量或初始剪切应力-应变响应的 D 5379 Iosipescu 剪切试验，该标准的现行版本还是有限制的。由于利用这个途径进行偏轴情况下剪切强度的测定是最为有希望的方法之一，需要编制用于多向层压板的带粘接斜削加强片的标准条文。然而，在对 D 4255 所进行的有关带粘接斜削加强片的修订可以被列入标准或被 MIL-HDBK-17 推荐之前，还有许多的工作要做。

由于在整个试件上剪应力状态不是均匀的，并且通常观测到破坏起始于工作段中心区之外（例如在板受约束的角处），故现已标准化的这个试验不是总能得出可靠的剪切强度的数据（文献 6.8.4.2.3(b)）。尽管三轨试验要求大约 150 mm×150 mm(6 in×6 in)的较大的试件尺寸，但它具有比较纯的应力状态（文献 6.8.4.2.3(c)）。

D 4255-83 轨道剪切试验的局限性：

- 试件尺寸——两个方案要求的试件尺寸均比其他剪切试验大。
- 仪器——要求采用应变计
- 应力状态——已知应力状态是非均匀的，且破坏模式一般受到起始于工作段之外的非剪切破坏的影响。
- 数据分散性——从 round robin 试验所得的高的数据分散性，至少就其目前的形式，令人对这些方法得出重复性数据的能力产生怀疑。

6.8.4.2.4　10°偏轴剪切试验

由 Chamis 和 Sinclair 首先报道的这个方法（文献 6.7.6.2.4），采用纤维方位与加载方向成 10°角的直边矩形单向拉伸试件（图 6.8.4.2.4）。注意到，试件材料仅限于单向长丝层压板。如同上述 ASTM D 3518 试件，该试件也不处于纯剪状态下而受到来自复合应力状态的影响。这个试验所得出的结果与其他剪切试验方法，如 ASTM 试验方法 D 3518 或 D 5379 相比较，一般模量较高，强度明显低。在本质上，此试验方法限于用来评价在 1-2 面内的剪切响应，因此不能应用于层压板的剪切评估。

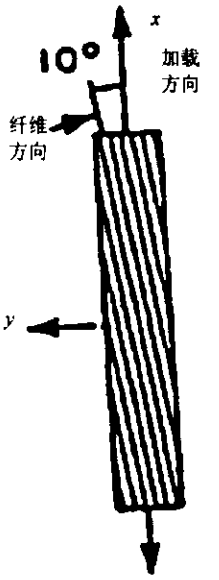


图 6.8.4.2.4　10°偏轴拉伸剪切试验

10°偏轴剪切试验的局限性：

- 材料形式——限于单向层压板。
- 应力状态——已得知存在显著偏倚的应力状态，引起过于刚硬的初始响应和提前破坏。
- 缺乏标准化——还从未被标准化。

6.8.4.2.5　管扭转试验

- ASTM E 143-87，室温下的剪切模量试验方法
- MIL-STD-375，环向缠绕聚合物基复合材料圆筒面内剪切性能的试验方法
- ASTM D 5448/D 5448M-93，环向缠绕聚合物基复合材料圆筒面内剪切性能的试验方法

自从 1959 年以来，管的扭转试验已经由 ASTM 通过试验方法 E 143-87 进行了标准化（文献 6.8.4.2.5(a)）。尽管使用范围宽广，且在技术上不排除用于复合材料，但试验方法 E 143 的编制主要是为了用于金属。然而，其理念也已经应用于复合材料，这里存在的挑战性问题即为施加载荷至试件而不引起夹持所导致的破坏，典型的夹持安装图如图 6.8.4.2.5 所示。一个特别适用于缠绕复合材料管的扭转试验方法已被编制并已发布作为军事标准，MIL-STD-375（文献 6.8.4.2.5(b)）。MIL-STD-375 已提交至 ASTM 作为非军事标准，并且经过少量的修改后已被批准为 ASTM D 5448/D 5448M-93。试验方法 D 5448（文献 6.8.4.2.5(c)）由一个 100 mm（4 in）名义直径的环向缠绕管构成，该管两端夹持且通过夹具使其扭转至破坏。业已表明，由该试验能够得出良好的试验结果，并且在理论上对于测定面内剪切强度和模量均为理想的。注意到，由于该 MIL-STD 试验方法已被美国国防部（U.S.DoD）撤消，因此它应该不再被提及；它已由 ASTM 试验方法所取代。

尽管不在现行试验标准的范围内，在本质上限于面内应用的这些试验可以应用于层压板试验以及单层试验。然而，在多向层压板中，可能难于达到试件在工作段内破坏，这是由于当偏轴纤维存在时所产生的较高的载荷。对于层压板试验，通常会要求进行加载点修正。

扭转管方法的局限性：

- 材料形式——如果没有采用长丝缠绕材料，管制作所要求的工艺过程可能与结构中所采用的过程明显不同。
- 试件制作费用——试件的制备所要求的异乎寻常的费用可能造成显著负担。

- 应力集中——如 Guess 和 Haizlip 所指出的，端部夹持处存在应力集中（文献 6.8.4.2.5(d)），除非采取特殊的预防措施，容易造成在夹持区内的破坏。
- 仪器——要求采用应变计。

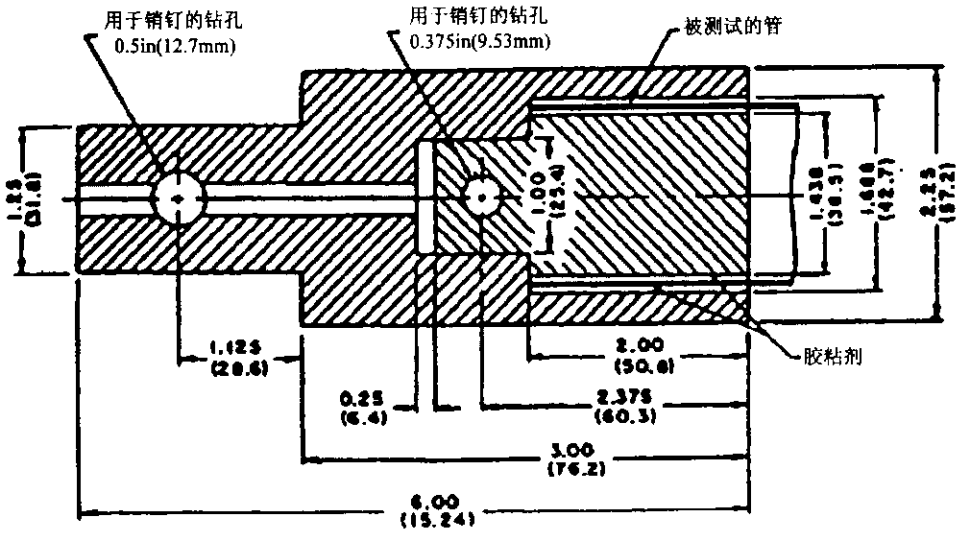


图 6.8.4.2.5　典型的扭转管剪切夹具（文献 6.8.4.2.5(d)）

6.8.4.3　面外剪切试验

6.8.4.3.1　短梁强度试验

- ASTM D 2344-84，采用短梁法测定平行纤维复合材料表观层间强度的试验方法
- SACMA SRM 8-88，采用短梁法测定定向纤维-树脂复合材料的表观层间剪切强度

ASTM 试验方法 D 2344（文献 6.8.4.3.1(a)），通常称为短梁强度(SBS)试验，该方法试图量化平行纤维增强复合材料的层间（面外）剪切强度*。用于该试验的试件为由平直层压板切出的比较厚的短梁。该试件所受的支持使其成为一个简支梁且载荷作用于试件跨度的中点。通过采用短、厚“梁”，力图减小弯曲应力而加大面外剪应力。

然而，在加载点处引起的接触应力大大地影响了沿梁的厚度和沿梁的轴向长度两个方向的应变分布。如果存在的话，所导致的破坏很少是真正的纯剪切破坏，而变为由试件中出现的复杂应力状态所导致的结果，正如由 Berg 等人（文献 6.8.4.3.1(b)）和其他人士所指出的那样。

遗憾的是，过去通常应用此试验（且某些人仍在应用）来建立用于结构设计准则的设计许用值。在缺少任何其他选择的情况下，尽管不好，但是可以理解。然而，在 6.8.4.3.2 节中所讨论的 V 形缺口梁方法的可利用性，使得对于性能测定利用短梁强度试验成为过时的方法。

短梁强度试验应仅用于定性测试，例如材料工艺的研发和控制。尽管没有现行标准，作为定性控制试验，采用层压板构型比采用单向材料更为普遍。

---

*目前一个完全相当、但受较多限制的 D 2344 的子集已经作为 SACMA 8R-94 由复合材料厂商公布（文献 6.8.4.3.1(c)）。然而，可以预料，除非 SACMA 8-88 也被并行地进行修改，否则两个文件将会因为对于 ASTM D2344 正在进行的修订而造成分歧。

目前正在修订和更新 ASTM 标准，使得 SBS 标准能用于均衡对称层压板测试。有关的方法是 SACMA SRM SR-94（文献 6.8.4.3.1(c)）。

短梁强度试验的局限性包括：

- 应力状态——已知应力状态具有明显的破坏性且是三维的。所得到的强度是面外剪切强度的拙劣的估测值。
- 破坏模式——破坏模式常常具有多种模式。
- 无模量/材料响应——该试件的测试设备是不实用的，因此不能获得模量和应力-应变数据。

6.8.4.3.2 Iosipescu剪切试验

在 6.8.4.2.2 节中，已描述了用于面内剪切试验的这个试验方法和试件的几何特征。当进行面外剪切性能的测试时，改变在层压板中纤维的方位以便引起在所要求的横向平面内的剪切作用。该试验方法为仅有可以接受的面外剪切试验。具有纤维与测试方向成偏轴的层压板，例如三维织物的面外剪切试验，受到有关面内 Iosipescu 试验一节中讨论的相同限制和局限性（6.8.4.2.2）。

6.8.4.3.3 ASTM D 3846-79——增强塑料面内剪切强度的试验方法

尽管标题如此，ASTM 试验方法 D 3846（文献 6.8.4.3.3）通常并不用作为面内剪切强度试验（采用先进复合材料术语中最通用的面内定义），但事实上它是一个面外剪切强度试验，因而同样被包含于有关面外剪切试验这一节中。

这个试验主要试图用于随机-弥散纤维-增强热固性片状塑料，作为 6.8.4.3.1 节中所述的短梁强度试验，即试验方法 D 2344（文献 6.8.4.3.1(a)），的一个替代。该试验是由双缺口试件构成，该试件受到来自支持夹具（与在试验方法 D 695 压缩试验中所采用的夹具相同）的压缩载荷，在位于两个中心反向配置方形缺口之间的试件平面发生面外剪切破坏。虽然此试件能够（或已经）用于测试连续纤维层压增强塑料，但并不建议用于先进复合材料层压板。Herakovich 等人发现试件通过机械加工形成强迫层压板出现剪切破坏的缺口对试件中应力分布造成了负面影响。为此，在工作段存在非均匀、多轴应力状态情况下，引起对于强度计算准确性的怀疑。

D 3846 缺口压缩试验的局限性：

- 应力状态——在工作段内的高度三维、非均匀应力状态引起由该试验得出的强度值为真实面外剪切强度的异乎寻常拙劣的估测值。
- 无模量/材料响应——该试件的测试设备是不实用的，因此不能获得模量和应力-应变数据。

6.8.4.4 提交MIL-HDBK-17数据适用的剪切试验方法

由表 6.8.4.4 中的试验方法所提交的数据现在正被 MIL-HDBK-17 考虑接受作为包含在第二卷中的内容。

6.8.5 弯曲性能

还没有推荐用于测定复合材料层压板弯曲性能的试验方法。即使存在经批准的弯曲试验方法，但对于结果的有效性仍存在着某些争议。

在航宇工业中，弯曲试验主要是用于质量控制。ASTM D 790，“未增强和增强塑料及

电绝缘材料的弯曲性能”最初是为塑料编制的，但后来它经修改并批准用于复合材料（文献 6.8.5）。在某些情况下，ASTM C 393，“平直夹层结构的弯曲试验”，已被修订用于复合材料层压板（文献 6.8.2.2.5）。

表 6.8.4.4 提交 MIL-HDBK-17 数据适用的剪切试验方法

性能	符号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
面内剪切强度（单层）	F_{12}^{so}，F_{12}^{su}	D 3518 SRM 7 D 5379 D 5448	—
面内剪切强度（层压板）	F_{xy}^{so}，F_{xy}^{su}	—	—
面内剪切模量（单层）	G_{12}	D 3518 SRM 7 D 5379 D 4255 D5448	—
面内剪切模量（层压板）	G_{xy}	D 5379 D 4255	—
面外剪切强度	F_{23}^{so}，F_{23}^{su} F_{31}^{so}，F_{31}^{su}	D 5379	— —
面外剪切模量	G_{13}，G_{23} G_{xz}，G_{yz}	D 5379	—
短梁强度	F_{31}^{SBS} F_{xz}^{SBS}	—	D 2344 SRM 8

6.8.6 断裂韧性性能

6.8.6.1 概述

在诸如木材、玻璃、金属、岩石和混凝土等结构固体中的断裂通常起始于某些裂纹或类缺口的缺陷，它们引起在这样的缺陷附近出现高应力。Inglis（文献 6.8.6.1(a)）指出，在尖锐缺口尖端附近，局部应力集中的严重性。Griffith 提出了基于热力学第一定律的断裂准则（文献 6.8.6.1(b)），他假定：裂纹扩展而引起的应变能降低用于产生新的裂纹表面。应变能释放率（G）定义为由于无限小自相似的裂纹扩展所引起的应变能降低（或势能的增加），并且当此变化率达到临界值（G_c）时将会出现裂纹的灾难性扩展。对于在承受拉应力σ的薄板或厚板中的长度为 $2a$ 的穿透裂纹，能量释放率可以用σ，a 和材料性能来表示。Irwin（文献 6.8.6.1(c)）指出，在各向同性材料中，可能有三种独立的运动学移动形式，通过该移动，上、下裂纹面相互间可以出现相对位移。这些移动以图示的方式由图 6.8.6.1 来表示。Griffith 仅考虑了第一种模式（I 型或张开型）。Irwin 指出，裂纹尖端的应力可以由三参数方程组来表达。这些被称之为 I 型、II 型和 III 型应力强度因子的参数 K_I，K_{II} 和 K_{III} 为裂纹尺寸和所施加载荷的函数，而且这些参数的临界值左右着裂纹失稳扩展的现象。已经证明，基于应力强度因子临界值的破坏概念等效于由 Griffith 所提出的临界应变能释放率（G_{IC}，G_{IIC}，G_{IIIC}）所表示的概念。只要破坏是通过自相似裂纹扩展而引起，Irwin 也建议采用总能量释放率的临界值作为控制破坏的参数。这些概念也已经被推广用于正交各向

异性材料（文献 6.8.6.1(d)）。

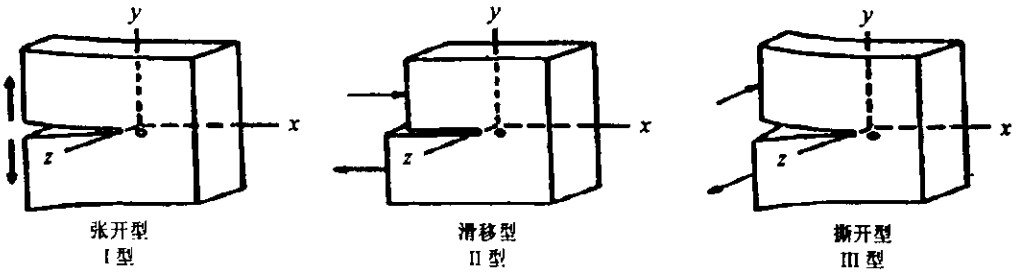


图 6.8.6.1　裂纹扩展的基本模式

在预测金属结构的破坏方面，断裂力学的应用已经得到广泛的认同（文献 6.8.6.1(e)-(g)），并且已经制订了多种试验方法用于测定 K_{IC}（或 G_{IC}），以及当可能出现稳定裂纹扩展的情况下的裂纹扩展阻力曲线。而且，这些年来，已出现了适用于金属航空结构疲劳的断裂力学设计方法，该方法是基于定期检测以便监控可见裂纹并利用幂律型的裂纹扩展规律来预估剩余寿命（文献 6.8.6.1(h)-(i)）。已经做出了多方面的努力试图采取基于断裂力学的方法来预估具有穿透裂纹或缺口的薄层压板的破坏（文献 6.8.6.1(j)）。然而，业已发现，由于在裂纹尖端附近大量的亚临界表面损伤，将薄的层压板按正交各向异性或各性同性板来处理的线弹性断裂力学不再能应用。通常采用半经验修正法来预估薄的含缺口层压板的强度（文献 6.8.6.1(k)）。在另一方面，断裂力学方法似乎对于解决含穿透裂纹或深表面缺陷的厚层压板问题却能获得较好的结果（文献 6.8.6.1(l)-(n)）。也已证明，最初提出用于在金属中模拟稳定裂纹扩展（随载荷增加）的裂纹扩展阻力曲线或 R-曲线的概念对于预估含缺口短切纤维复合材料的断裂是有用的（文献 6.8.6.1(o)）。尽管在刚才叙述的问题中断裂力学的应用已经受到很大限制，但是目前在工业界中它还正在被广泛地应用于处理包括分层断裂的各种问题。分层（在层压板层间的富树脂区）可能存在制造状态缺陷或由于下列各种原因产生，其中包括：(1)在界面处小空隙的聚集，(2)外来物冲击以及(3)接近诸如自由边界、孔、丢层、横向铺层裂纹或胶接连接等不连续处的特殊应力场。分层破坏的基本概念与前面讨论的概念是相同的。然而，应变能释放率为由于分层的无限小的扩展所释放的能量（如较早对于在板中的穿透裂纹所进行的描述），通常利用它预估灾难性的断裂，并且已经提出了各种试验方法来确定三种不同加载模式（如图 6.8.6.1 所示的 I，II 和 III 型）的临界值（经常称为韧性）。已经设计了一些试验来确定在混合型情况下的失效准则（模式相互作用）。下一节给出某些关于试验方法和性能在实际应用中使用的一般性讨论。随后的各节将涉及某些试验方法。

6.8.6.2　一般性讨论

应注意到，尽管此处涉及的课题是相当前沿的而且也已完成了很多研究试图来获得：(1)模拟在载荷不断增加情况下稳定分层扩展的 R 曲线，以及(2)为预测在循环载荷作用下分层扩展的分层扩展速率，但是仅有一个试验方法被列入标准。测试试件通常含有不粘接插入物形式的嵌入分层，并且已被广泛地用于单向玻璃或碳纤维增强复合材料。试验设计要使得分层扩展方向与纤维方向一致。断裂韧性值或其他特性有时可能随着分层趋势而改变，该分层趋势围绕着多相基体材料的各种不同的相而偏移。而且，具有韧性胶粘剂层片的脆性基体复合材料可能得到不同的性能，它们取决于分层扩展区域，也就是夹胶膜、脆性基

体或界面。采用具有在同方位的两个偏轴铺层之间，或两个不同方位的铺层之间的嵌入分层的非单向试件，可以引起通过层裂纹而使分层改变其路径，并且使得对于该情况的数据分析变得困难。如果分层扩展不在纤维所在的方向，即使它保持共面，也很可能使性能会有所改变。机织织物复合材料可能呈现出比单向层压板更大的分散性，且由于在这样材料中典型的结构布局可能呈现出稳定分层扩展（R 曲线）的趋势。

在单向脆性基体复合材料中所观测到的分层扩展阻力（对于稳定扩展通常在 I 型试验中观测到）的主要原因是由于穿过分层面纤维的桥接现象。这样的桥接是由于一般存在于单向复合材料中的纤维相互嵌套所引起，因此，起始的韧性值应在分层扩展的较后阶段得到的值中分别进行辨识。这个值应代表自然分层的韧性，并常常用于获得保守的设计准则。通常不用由试验所得的 R 曲线获得一般的材料性能数据。然而，它们通常用来比较相同材料的试件、板件或批料之间纤维基体粘接程度，或者比较具有相同纤维而不同基体的复合材料。拙劣的粘接通常导致较大的纤维桥接，因而，G_c 随分层长度增长较大。

在没有受到纤维桥接强烈影响的材料中，一个有竞争性的机制可能起支配作用。当分层从嵌入物开始扩展时，观测到跳跃型的特性（与随后的扩展情况相比较得出较高的韧性值）。对于 I 型试验，在这样情况下略去第一点且采用随后的扩展的结果（位移控制试验使其成为可能）。对于 II 型和混合型试验，破坏通常是灾难性的，基于这个原因，通常采用由 I 型载荷、楔形嵌入或者其他方法引入预裂纹（超出嵌入物的分层延伸）。

很多试验采用具有单一分层尖端的梁型试件。随载荷增加，测量加载点挠度并且通过目视或采用其他辅助装置或设备来观测分层扩展。在某些情况中，观测到灾难性分层扩展（如在 II 型试验中）和注意到所能达到的最大载荷。否则（在位移控制试验中），在分层出现扩展同时载荷下降的那一点以前，载荷-位移图一直保持线性。在这样的材料中，可以观测到非线性起始于任何分层明显扩展之前。出现这样的特性是由于非弹性的材料响应或在尖端前缘处亚临界损伤扩展所造成。利用在非线性或分层扩展起始点处所测定的载荷、挠度和分层长度的测量值来计算与断裂或亚临界损伤扩展有关的临界能量释放率。在某些情况中，采用由载荷、挠度、分层长度和/或材料（或梁）刚度表示的能量释放率的近似闭合形式的表达式来进行数据处理。当不能测量挠度或存在关于刚度的某些不确定性时，一个替代的方法是首先完成对试件（或类似试件）的柔度标定，这里柔度

$$C=\frac{\delta}{P} \qquad 6.8.6.2(a)$$

δ是与施加载荷 P 相对应的挠度，对于各种不同分层的值，将长度 a 拟合为一个精确或近似的关系式（基于力学或多项式原理）。由下式来表示能量释放率

$$G=-\frac{1}{b}\frac{\mathrm{d}U}{\mathrm{d}a} \qquad 6.8.6.2(b)$$

或

$$G=\frac{1}{b}\frac{\mathrm{d}V}{\mathrm{d}a} \qquad 6.8.6.2(c)$$

式中，b 为试件宽度和 a 为分层长度。U 和 V 分别为应变能和势能，两者均用位移来表示。

现在，

$$U=\frac{1}{2}P\delta=\frac{1}{2}\frac{\delta^2}{C} \qquad 6.8.6.2(d)$$

和

$$V=-\frac{1}{2}P\delta=-\frac{1}{2}\frac{\delta^2}{C} \qquad 6.8.6.2(e)$$

故由此得出，对于位移控制试验（δ指定）

$$G=\frac{\delta^2}{2bC^2}\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}a}=\frac{P^2}{2b}\frac{\mathrm{d}C}{\mathrm{d}a} \qquad 6.8.6.2(f)$$

可以证明，对于载荷控制试验，相同的关系式也成立。此方法不适用于混合型试验，这是由于能量释放率的各个分量不能按照这样的方式进行计算，除非它们对总能量释放率的贡献是已知的。

正如在上节所讨论，对于所提供的特定模式可以采用临界应变能释放率预测单一模式的灾难性断裂，当然，沿分层前缘能量释放率为常数。如果这些释放率在前缘范围内是变化的，通过令由有限元或其他应力分析方法确定的一点处的该量的最大值等于临界值（在文献中已报道有关这种计算所进行的大量研究，但其超出本节的范围），可以获得保守的估计。这样的估算常常足以达到设计的要求，除非由于结构或其他约束条件使得分层受到抑制。采用 R 曲线概念，可以利用类似的方法来估算稳定扩展曲线和失稳点。利用试验测定的指数定律型扩展法则，可以估计在循环载荷作用下这样的分层扩展，这里，能量释放率的最大值（或范围）为控制参数。然而，采用 R 曲线来预估稳定裂纹扩展和利用指数定律来估计每一循环的扩展量的方法还没有被工业界接受，这是由于某些迹象表明，它们不是总能得出一般性的表征（文献 6.8.6.2(a)）。

当存在混合型状态时，问题变得比较复杂，三种模式的韧性值彼此显著不同。为预估准静态断裂已提出了各种断裂准则。关于 I 型和 II 型复合情况下的准则的评述可以从文献 6.8.6.2(b)中得知。在各项不同模拟循环载荷作用下分层扩展的研究工作中，已经建议采用能量释放率或应力强度因子的标量函数（$f=G_{\mathrm{I}}+G_{\mathrm{II}}+G_{\mathrm{III}}$就是一个简单的例子）的最大值（或范围）的指数定律型扩展法则。

6.8.6.3 I型试验方法

6.8.6.3.1 双悬臂梁（DCB）试验，ASTM D 5528

（文献 6.8.6.3.1(a)）

试验装置的示意图如图 6.8.6.3.1(a)所示，该图图示了两种类型的加载连接。试件大约为 125 mm（5 in）长、20-25 mm（0.81 in）宽和 3-5 mm（0.12-0.20 in）厚。图 6.8.6.3.1(b)给出了施加至两臂的载荷 P，相应的位移δ和所获得的典型的载荷-位移曲线。在这些曲线上的数字表示对应各种分层长度的结果且是在分层扩展中所获得的。NL 表示非线性的起始点，它通常是由于亚临界裂纹扩展或材料非线性所引起的。常常利用该曲线来完成柔度的标定。在文献 6.8.6.3.1(a)和(b)中提供了有关数据处理的各种方法、其他的细节以及为避免几何非线性对试件尺寸的限定等有关资料。如上节所述，已经发现，该试验适用于单向试件。当把它用于其他铺层或材料形式时，应该谨慎。对于纯 I 型变形，要求满足对中面的对称性。

对于大的 a/h（a 为分层长度和 h 为层压板厚度）情况，适用于能量释放率的渐近表达式由文献 6.8.6.3.1(c)和 6.8.6.3.1(d)给出，即

$$G_1 = \frac{96P^2(a+\alpha h)^2}{E_{11}b^2h^3} \qquad 6.8.6.3.1(a)$$

式中，b 为梁的宽度、E_{11} 为单向复合材料的轴向杨氏模量，α为取决于轴向剪切和杨氏模量之比的常数。当每个梁臂为均衡的、对称于中面的层压板且不存在任何弯曲扭转耦合的情况下，如果以当量的梁臂弯曲模量来替代 E，也可以采用式 6.8.6.2(e)中的关系式。将式 6.8.6.2(f)代入式 6.8.6.3.1(d)并对 a 进行积分，可得下列适合于大的 a/h 的关于柔度 C 的公式。

$$C = C_0 + \frac{64(a+\alpha h)^3}{E_{11}bh^3} \qquad 6.8.6.3.1(b)$$

式中，C_0是积分常数。常数α可选为

$$\alpha \approx 1.45\sqrt{\frac{E_{11}}{G_{13}}} \qquad 6.8.6.3.1(c)$$

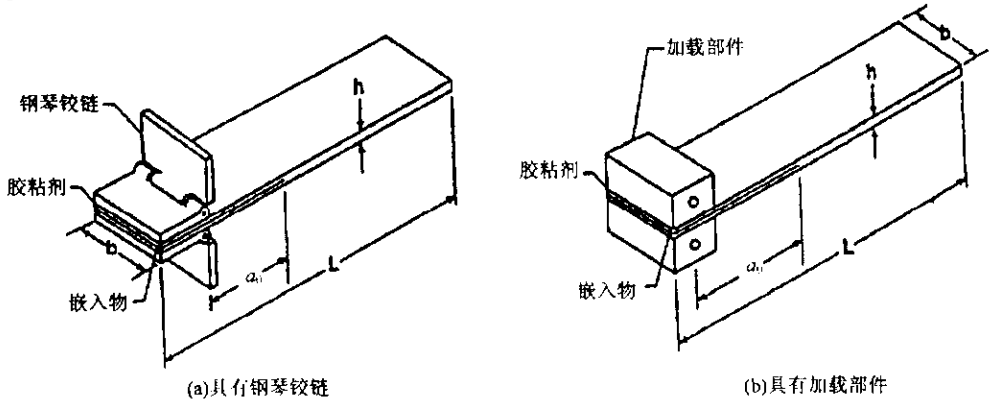
式中，G_{13}为沿厚度的剪切模量。

业已提出（文献 6.8.6.3.1(b)和 6.8.6.3.1(d)），对于普通玻璃和碳纤维增强复合材料，可选择 C_0等于零。而且，h 和在式 6.8.6.3.1(b)的第二项或(a)中的分母项应由拟合所测量的柔度使之适合于式 6.8.6.3.1(b)来确定。所以，如果以一直线来拟合 $C^{1/3}$作为 a 的函数图形（a 为横坐标，于是当该线延伸时会与横坐标 x 在 $x=-\alpha h$ 处相交），并且该线的斜率给出$(64/E_{11}bh^3)^{1/3}$之值。于是，可以将这些值代入式 6.8.6.3.1(a)以便计算 G_1。应该指出，在很多情况中，与长度 a 相比较αh 可以被略去，式 6.8.6.3.1(a)和(b)的结果与若将两臂作为端部固支悬臂梁对待所得的结果是相同的。

当在分层扩展点处 P 和δ两者均可以被测量时，在 ASTM 标准（文献 6.8.6.3.1(a)）中提出的用于 G 的计算的另一方法是利用公式

$$G_1 = \frac{3P\delta}{2b(a+\alpha h)} \approx \frac{3P\delta}{2ba} \qquad 6.8.6.3.1(d)$$

当与 a 相比较αh 可以忽略时，第二个表达式是有效的。此方法被称为修正的梁理论方法。在文献（文献 6.8.6.3.1(b)）中，已提出了各种不同的数据处理方法。可注意到，如果将在非线性起始点处所测量的 P 和δ代入式 6.8.6.3.1(d)，所得出的 G_1为其临界值的一个保守的估计值。



(a)具有钢琴铰链　　(b)具有加载部件

图 6.8.6.3.1(a)　双悬臂梁试件

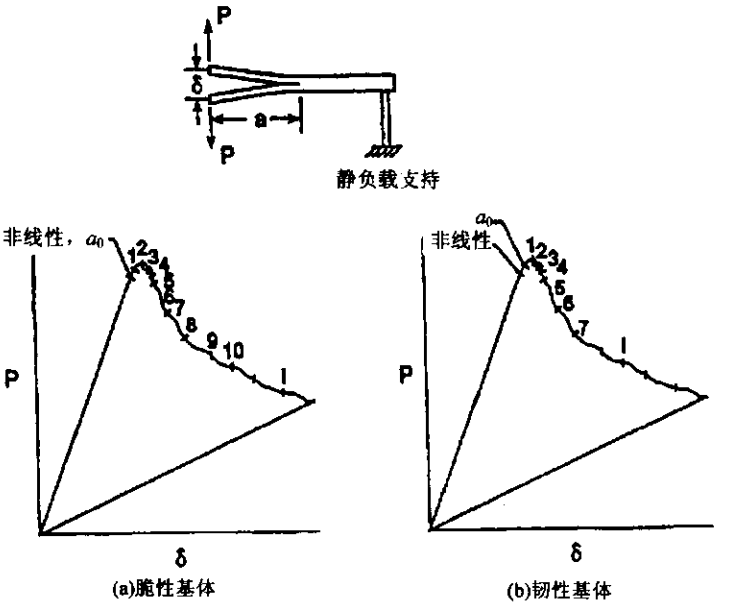


图 6.8.6.3.1(b)　由 DCB 试验所得的载荷位移曲线

6.7.8.3.2　其他I型试验

双悬臂梁试验是测定 I 型断裂韧性使用最为广泛的方法。在连接加载装置存在问题的情况下，建议在两个梁间采取楔形嵌入物。已经采用的另一个方法是在粘接到基底的薄膜之间的圆形分层进行液压加载，该方法对于某些特殊的应用情况可能是有用的。

6.8.6.4　II型试验方法

6.8.6.4.1　端部缺口弯曲（ENF）试验

ENF 试件的示意图如图 6.8.6.4.1 所示。一般来说，试件为 150 mm（6 in）长、25 mm（1 in）宽和 3-5 mm（0.12-0.20 in）厚。嵌入物大约为 25 mm（1 in）长。三点加载梁的跨度 $2L$ 为 100 mm（4 in）量级，留出大约 25 mm（1 in）超出端部支持的外伸段。设计要使得在三点弯曲载荷情况下分层将沿层压板试件的中面扩展（文献 6.8.6.4.1(a)）。对于中面而言，层压板应是对称的。嵌入的和预裂的分层以不稳定方式进行扩展，于是，仅可测量 II 型断裂起始的韧性值。近来，已经提出一个稳定化处理的方案（文献 6.8.6.4.1(b)），这里，试验受到控制使得在分层前缘处达到恒定的剪切位移。然而，在前缘前部的亚临界损伤可能影响在起始以后的测量。

对于大的 a/h（a 为分层长度和 h 为层压板厚度），关于能量释放率的渐近表达式由文献 6.8.6.4.1(c)给出如下

$$G_{II}=\frac{9}{2}\frac{P^2(a+\alpha h)^2}{E_{11}b^2h^3} \qquad 6.8.6.4.1(a)$$

式中，P 为在跨度中点的载荷，b 和 E_{11} 分别为梁的宽度和单向复合材料的轴向杨氏模量，α为可以按下式选定的常数

$$\alpha\approx 0.065\sqrt{\frac{E_{11}}{G_{13}}} \qquad 6.8.6.4.1(b)$$

G_{13} 为沿厚度的剪切模量。对于上、下半部不存在弯-扭和拉-剪耦合而可能存在拉-弯耦合的

层压板，也已提出采用类似公式的建议（文献 6.8.6.4.1(c)）。采用 6.8.6.3.1 节对 DCB 试验所描述的方法，对于大的 a/h 值，可以证明柔度 C 由下式给出

$$C = C_0 + \frac{3(a+\alpha h)^3}{E_{11}bh^3} \qquad 6.8.6.4.1(c)$$

式中，C_0 为积分常数。

在文献 6.8.6.4.1(c)中，已经建议，借助接近于由式 6.8.6.4.1(b)所给出的α估算值，采用曲线拟合方法来进行式 6.8.6.4.1(c)的拟合。依照其他研究人员的建议，可选择 C_0 为不含任何分层的梁的柔度，于是，可以完成 $C^{1/3}$ 作为长度 a 的函数的直线拟合，以便确定α和 $(3/E_{11}bh^3)^{1/3}$。通过采用具有嵌入分层的长梁和变换梁的支持情况以获得各种不同的α 值，从而顺利地完成柔度的测定。

设计了一个 ASTM "round robin" 试验方案以用于 ENT 试验，且 ASTM D30.06 分会计划基于此试验方案草拟一个建议的标准试验方法。材料非线性和韧性胶粘剂夹层对于 II 型断裂的影响也已进行了研究（文献 6.8.6.4.1(c)）。

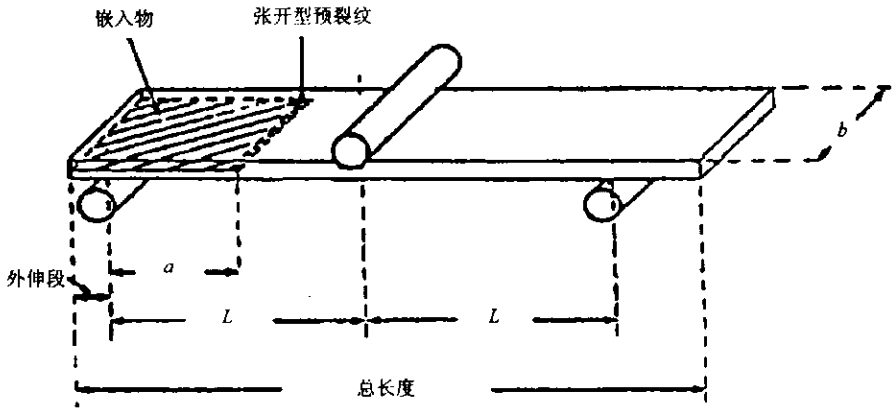


图 6.8.6.4.1　试件几何特征与加载

6.8.6.4.2　其他II型试验

也已提出了这样的建议，即在 ENF 试验中使用同样形式的厚层压梁弯曲加载，但在支持和中央载荷间具有嵌入的分层（见文献 6.8.6.4.1(c)），但对该试件很难进行柔度测量和预制裂纹。然而，已经发现，含圆形和椭圆形嵌入分层的较宽的板型试件，对于表征这种分层在混合型下的扩展，及沿分层边界变化的每种模式的贡献是有帮助的（文献 6.8.6.4.2）。

6.8.6.5　III型试验方法

目前尚还不存在公认可接受的测量III型韧性的方法。已经提出采用裂开的悬臂梁（文献 6.8.6.5(a)），但在该试件中看来是存在某些 II 型的影响（文献 6.8.6.5(b)）。已用锥形扭转试验来表征胶粘剂的胶接（文献 6.8.6.5(c)），研究表明，III 型韧性可能比在 II 型中的韧性值要高。在复合材料工业中，通常的做法是采用 II 型值来估计 III 型断裂的临界值。

6.8.6.6　混合型试验方法

如 6.8.6.2 节所述，在具有曲线前缘的自然分层中，不仅能量释放率沿前缘变化，而且还呈现混合型情况。混合型的影响也出现于具有直线前缘的分层之中（边界分层和胶粘剂连接就是例子）。在这样的情况中，尽管小的 III 型影响也可能存在，但 I 型和 II 型影响起

主导作用。基于这个原因，已经做出了多方面的努力来试图表征在 I 型和 II 型影响的联合作用下的分层断裂，并且接下来对于其中的一些进行讨论。

6.8.6.6.1 混合型试件或裂纹搭接剪切（CLS）

CLS（crack lap shear）试件（文献 6.8.6.6.1）模仿用于胶接连接的类似试件。此试件为拉伸试样，在该试件的中部某些层被终断（图 6.8.6.6.1）。此试件已在工业界中得到广泛的应用。I 型和 II 型分量是基于应力分析（有限元或其他方法）来进行计算的。几何非线性的影响也已被研究。

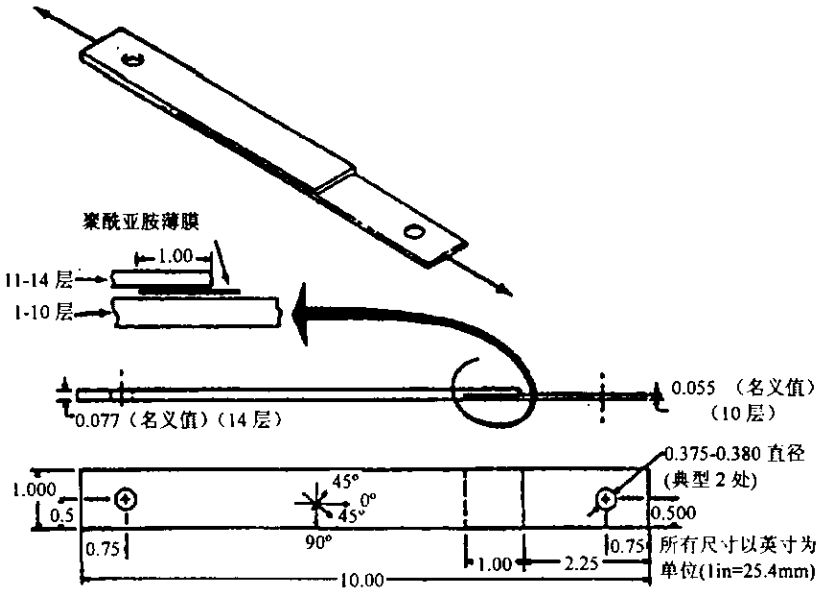


图 6.8.6.6.1 混合型裂纹搭接剪切试件

6.8.6.6.2 混合型弯曲（MMB）试验

通过综合用于 DCB 和 ENF 试验的试验方案，这个试验近来已被提出（文献 6.8.6.6.2(a)和(b)），并且此试件与那些试验所采用的试件具有相同的形式。利用一个专用的加载装置，通过改变如图 6.8.6.6.2 所示的该装置的杠杆臂，可以得到覆盖很大范围的 I 型和 II 型分量比值。已建议采用如下的公式

$$G_{\mathrm{I}} = \frac{3P^2}{4b^2h^3L^2E_{11}} A_1 B_1 \qquad 6.8.6.6.2(a)$$

$$G_{\mathrm{II}} = \frac{9P^2}{16b^2h^3L^2E_{11}} A_2 B_2$$

当采用修正的线性梁理论进行分析时，A_1，B_1，A_2 和 B_2 由下列公式来表示

$$A_1 = a^2 + \frac{2a}{\lambda} + \frac{1}{\lambda^2} + \frac{h^2 E_{11}}{10G_{13}}$$

$$A_2 = a^2 + \frac{h^2 E_{11}}{5G_{13}}$$

$$B_1 = (3C - L)^2 \qquad 6.8.6.6.2(b)$$

$$B_2 = (C + L)^2$$

正在策划采用 MMB 试件的 ASTM “round robin”试验方案。ASTM 委员会 D 3.06 分会规划起草基于这个试验方案结果所建议的标准试验方法。

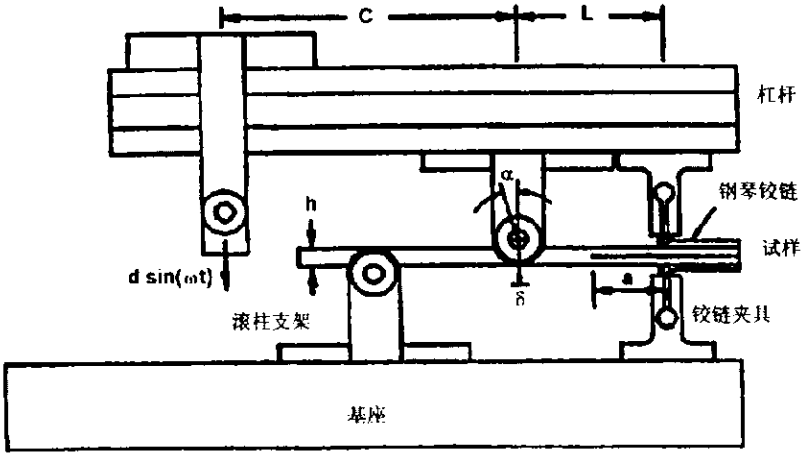


图 6.8.6.6.2　混合型挤压试验装置

6.8.6.6.3　边缘分层试验

这个试验的试件采用$[\pm\theta_2/90_2]_S$拉伸试件，这里，自由边的影响引起了从边界的分层扩展（文献 6.8.6.6.3(a)）。然而，由于分层扩展不能保持在中面，故它既不是均匀的又不是对称的，而是在 90/-θ 界面间垂直地振荡。已提出了具有启动器分层试件的改型方案（文献 6.8.6.6.3(b)）。在文献 6.8.6.6.3(a)和(b)中讨论了数据处理方法。关于韧性性能的确定，该试验还没有得到广泛的认可。

6.8.6.7　提交MIL-HDBK-17数据适用的断裂韧性试验

由下列试验方法得到的数据（表 6.8.6.7）目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受。

表 6.6.8.7　提交 MIL-HDBK-17 数据适用的断裂韧性试验方法

性　能	符　号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
I 型韧性	G_{IC}	ASTM D 5528	--
II 型韧性	G_{IIC}	ENF	--
III 型韧性	G_{IIIC}	--	--
混合型 I，II 断裂	$f_C(G_I, G_{II})$	--	MMB

6.9　单轴疲劳试验

对于材料表征、材料的对比以及通过采用层压板理论预估实用层压板性能，单向复合材料试件的静力试验是有用的。然而，在疲劳领域，还没有找到通用的方法由单向试件数据来预估层压板特性。因此，对于每一种应用铺贴情况，建立疲劳设计值变为一个独特的问题。业已进行了很多研究工作，有关在循环载荷谱下特定层压板的寿命预估已有许多记载。即便如此，但由于从累积损伤模型、断裂力学分析和其他理论方法所得出的结果的不充分，使得经验方法受到青睐（文献 6.9(a)和(b)）。

ASTM D 3479，“定向纤维、树脂基复合材料拉-拉疲劳”是一个一般性试件的试验方法（文献 6.9(c)）。然而，由于复合材料疲劳与应用情况是如此密切相关，重要的是，层压板应代表其应用，而且层压板试验要计及使用载荷谱和环境条件。目前在复合材料硬件大纲中，这是通过包括试样、元件和部件试件、代表所有全尺寸结构细节典型结构的“积木式”试验方法来实现的。

值得注意的是，对于大多数通用的飞机复合材料结构，如果已经彻底地和成功地解决了所有静强度的问题，抗疲劳能力不会变成一个制约因素。这种情况的例外则是诸如在直升飞机动力系统中存在的那些高周部件。

6.10 多轴力学性能试验

可以进行包括双轴和三轴加载的多轴试验，以便用实验方法来评估复合应力状态对复合材料响应的影响。尚不存在标准的试验方法用以指导多轴试验，并且仅有少许数据。有关多轴试验的讨论可以从第三卷第 10.2.3.2 节中得知。

6.11 粘弹性性能试验

6.11.1 引言

有机基体复合材料性能的时间相依性主要来自于这些材料所包含的聚合物基体树脂的粘弹性特性。尽管这些性能是随基体而定，但它们不能简单地根据未增强基体的粘弹性特性来进行预估。蠕变柔度、松弛模量以及连测量的玻璃化转变温度都可能作为增强纤维的含量和方位的函数在很宽的范围上发生变化。

6.11.2 蠕变和应力松弛

蠕变是在常应力作用下材料所呈现的随时间而变的应变。通过由时间相依应变除以常应力水平所确定的蠕变柔度的测量，将蠕变表征为时间的函数。类似地，应力松弛是在常应变作用下材料所呈现的随时间而变的应力。松弛模量是由时间相依应力除以作用的常应变而确定。蠕变和应力松弛是相同的分子活动性潜在机理的不同表现形式。在低作用应力和应变水平下，当除去施加的作用时，这些时间相依的效应可以完全恢复，但是在较高的水平受载时可能出现不可恢复的变形。不能复原的应变，有时称为永久变形，可能伴随时间相依的损伤发生，诸如横向基体裂纹的形成和扩展。

如果最终的使用涉及在基体起支配作用方向的高应力、高温度或曝露于严酷的化学环境，应该考虑粘弹性的影响。如果工作载荷包含显著的剪切载荷，应就可能与时间有关的效应，对复合材料结构设计进行评估。由于在结构的不连续处附近可能产生高的剪切载荷，因此这些部位是值得关注的区域。应该注意到，粘弹性影响对于这些情况中的一些可能是有益的，因为高应力区域的应力松弛可能有助于防止灾难性的破坏。当使用热塑性基体时，时间相依特性可能是个值得关注的问题，特别是在工作温度达到或接近玻璃化转变温度（T_g）的情况。由于交联作用，在热固性复合材料中，蠕变程度应比较小。

在纤维增强塑料（复合材料）中，可以设想，当复合材料以基体控制的方式承载时，比起以纤维控制的方式，蠕变问题更为重要。例如，可以预期，纤维方向承受拉伸载荷的

单向试件的蠕变是小的，因而只是次要的。然而，试件以基体控制的方式承载时就不是如同所预期的那样简单。对单向试件进行横向拉伸试验，人们可能认定载荷基本上由基体承受，而其实并非如此。这里有几种解释。一种解释是，由于纤维阻止基体横向收缩（即泊松效应），施加载荷于横向试件是赋予基体以双向应力状态（拉伸），从而限制蠕变响应量。对于在横向试件中低的蠕变响应的另一种论点认为，试件弱且应变小，故应变的改变量也小。另外一个施加载荷于基体的方法是以剪切方式，而蠕变响应则会是大些。以剪切方式对基体施加载荷最便利的方法是对[±45]试件施加拉伸载荷。尽管存在认为此试验不能产生纯层内剪切的争论，但它至少产生某些剪切并可视为与单向层压板承受剪切载荷相比拟。

经验已证明，所导致的蠕变效果是显著的。有关蠕变响应试验有意义的其他加载方式包括单向试件在纤维方向的压缩和单向试件的三点弯曲加载（在这两种方法中剪切均起着作用）。

常见的试验方法是对[±45]试件施加 35，70 或 105 MPa（5，10 或 15 ksi）的静拉伸载荷并监控作为时间函数的应变。在第一次施加全载荷时的应变读数被指定为零时间的应变。随后的测量是从那个零时间读数开始定时记录，在 1，2，3，10，20，30，60，100 和 200 分钟时刻获取读数，而后成为合适的指令。应变作为时间的函数被描绘在半对数坐标上，并且试验连续进行至少 30 000 分钟（或 3 个星期）。试验应在受控（不变）的湿度和温度条件下完成（文献 6.11.2(a)和(b)）。一般来说，试件为 25 mm 宽、150 mm 长和约 1-1.5 mm 厚（1.0 in 宽、6 in 长和约 0.04-0.06 in 厚）。对于这些尺寸还存在争议；某些迹象表明，较宽的试件比较窄的试件蠕变较少。

6.12 特殊材料形式的力学性能试验

6.12.1 专门用于长丝缠绕的试验

6.12.1.1 概述

长丝缠绕结构的力学特性一般不同于平直层压结构的特性。某些显著的差别是源于固化类型、树脂空隙含量、微裂纹和自由边界构型。然而，对于设计和分析，长丝缠绕结构要求采用与一般层压结构相同的力学性能数据。多数长丝缠绕结构用于火箭发动机壳体组合部件，因而，多数测试试件是采用圆筒状或瓶状形式，以便更为接近地模拟所要设计和分析的结构的几何特征。

6.12.1.2 历史状况

在 1983 年 11 月，经国防部特批，由陆军、海军、国家航空和宇宙航行局和空军联合（JANNAF）组成的跨部门推进器委员会建立了复合材料发动机壳体分会（Composite Motorcase Subcommittee，即 CMCS）（文献 6.12.1.2(a)）。CMCS 关注在战略和战术导弹的火箭发动机、航天推进器系统和枪炮动力装置的管壳中复合材料的应用。CMCS 由四个专门工作小组构成，其中两个为试验和检验（Test and Inspection，即 T&I）专门小组和设计和分析（Design and Analysis，即 D&A）专门小组。

针对试验方法，T&I 专门小组在工业界进行了调研并已得出了 17 个不同的拉伸试验、

17个不同的压缩试验和16个不同的剪切试验，这些试验方法已被用于获得力学性能数据。经由JANNAF专题讨论，T&I和D&A专门小组联合评估这些试验方法（文献6.12.1.2(b)）。在纤维缠绕复合材料领域，选定了由专家组成的专门小组，其任务是进行试验方法的推荐工作。T&I和D&A于1986年4月联合举行的专题讨论会讨论了专家小组的推荐意见，做出了用于测定单轴材料性能的JANNAF暂定试验标准的行业选择。

CMCS对3个暂定的试验推出了设计Round Robin（DRR）和试验Round Robin（TRR）：(1)横向拉伸，(2)横向压缩和(3)90°长丝缠绕圆筒试件的面内剪切。DRR和TRR参与者的酬劳和选拔是通过竞标而获得的。90°长丝缠绕圆筒和应变计也是通过竞标来确定。对任何异常情况，每个测试试件要进行超声C扫描。TRR依照ASTM E 691来实施（文献6.12.1.2(c)）。DRR和TRR是成功的，并于1992年秋季得出了3个军用标准。将这3个军用规范放进了ASTM格式，并通过无记名投票于1993年秋季批准成为ASTM试验方法。JANNAF的成果与MIL-HDBK-17、ASTM D-30委员会，SACMA以及国防部关于复合材料技术的标准化计划相协调。

6.12.1.3　单轴材料性能拉伸试验

6.12.1.3.1　0°拉伸

关于0°拉伸试验所选定的试验方法为ASTM D 3039，该方法名为“纤维-树脂复合材料拉伸性能的标准试验方法”（文献6.8.2.2.1(a)）。所推荐的测试试件是由长丝缠绕的层压板来获得。JANNAF CMCS最初对受压的诺尔环（NOL ring）或受压的90°长丝缠绕管进行了表决。业已进行了若干努力来试图由每一种技术来得出有效的数据，但是仅取得少许可复验的好结果。

6.12.1.3.2　横向拉伸

测定适合于横向拉伸的单轴材料性能所选择的试验方法是ASTM D 5450，该方法名为“环向缠绕聚合物基复合材料圆筒横向拉伸性能的试验方法”（文献6.12.1.3.2）。1992年秋季，此试验方法被批准成为MIL-STD-373，标题为“单向纤维/树脂复合材料圆筒的横向拉伸性能”，1993年秋季该方法被批准为ASTM试验方法。

6.12.1.4　关于单轴材料性能的压缩试验

6.12.1.4.1　0°压缩

测定0°单轴材料性能所选择的试验方法是ASTM D 3410，该方法名为“单向或正交铺层纤维-树脂复合材料压缩性能的试验方法”（文献6.8.3.1(a)）。推荐使用方法B，也称为IITRI方法。进一步还推荐，由长丝缠绕层压板来获得测试试件。

6.12.1.4.2　横向压缩

关于测定横向压缩的单轴材料性能所选择的试验方法是ASTM D 5449，该方法名为“环向缠绕聚合物基复合材料圆筒横向压缩性能的试验方法”（文献6.12.1.4.2）。1992年秋季，此试验方法被批准成为MIL-STD-374，名为“单向纤维/树脂复合材料圆筒的横向压缩性能”，1993年秋季该方法被批准为ASTM试验方法。

6.12.1.5 关于单轴材料性能的剪切试验

6.12.1.5.1 面内剪切

测定面内剪切性能所选择的试验方法为在 ASTM D 5448 中所描述的 90°、4 in 直径长丝缠绕扭转管，该方法名为“环向缠绕聚合物基复合材料圆筒面内剪切性能的试验方法”（文献 6.12.1.5.1）。1992 年秋季，此试验方法被批准成为 MIL-STD-375，名为“单向纤维/树脂复合材料圆筒的面内剪切性能”，1993 年秋季该方法被批准为 ASTM 试验方法。

6.12.1.5.2 横向剪切

测定横向剪切材料性能所选择的试验方法是在 ASTM D 5379，该方法名为“利用 V 形梁法测定复合材料剪切性能的试验方法”（文献 6.8.4.2.2(a)）。

6.12.1.6 提交MIL-HDBK-17数据适用的试验方法

由下列试验方法得到的数据（表 6.12.1.6）目前正在被 MIL-HDBK-17 考虑作为包含在第二卷中的内容而予以接受（为清楚起见，定方位的单元如图所示）。

表 6.12.1.6 适用于 MIL-HDBK-17 数据提交的长丝缠绕试验方法

性 能	符 号	正式批准、临时和筛选数据	仅筛选数据
0°拉伸*	$F_1^{tu}, E_1^t, \nu_{12}^t, \varepsilon_1^{tu}$	ASTM D 3039	---
90°拉伸*	$F_2^{tu}, E_2^t, \nu_{21}^t, \varepsilon_2^{tu}$	ASTM D 5450	---
0°压缩*	$F_1^{cu}, E_1^c, \nu_{12}^c, \varepsilon_1^{cu}$	ASTM D 3410B	---
90 压缩*	$F_2^{cu}, E_2^c, \nu_{21}^c, \varepsilon_2^{cu}$	ASTM D 5449	---
面内剪切**	$F_{12}^{su}, G_{12}, \gamma_{12}$	ASTM D 5448	---
横向剪切**	$F_{23}^{su}, G_{23}, \gamma_{23}$ $F_{31}^{su}, G_{31}, \gamma_{31}$	ASTM D 5379	---

*强度、模量、泊松比和应变

**强度、模量和应变

6.12.2 专门用于纺织复合材料的试验

6.12.2.1 概述

普通纺织复合材料的物理和力学性能在许多方面类似于单向材料的性能。许多相同的试验方法在纺织复合材料性能测定中是适用的，但仅适用于在一个小的重复性的长度和宽度上具有均匀性质的织物。设计师必须分析用于特定情况下的非常大的粗的织物，这里对一个单基的重复达几个英寸的量级。

在二维织物中，一般试验所关心的是与定义代表性结构的试件尺寸有关。在许多市场上可得到的织物中，重复是在一个小的正方形上。非常粗的或零散的织物图案使得采用单向层压板试验所允许的简化变得复杂。在大的或不规则的图案中，进行试件尺寸的选择则要考虑重复顺序。在适当试验方法限定的范围内，要协调这些关系有时是困难的。

在纺织复合材料试验中，要考虑的主要因数为 z 轴方向的增强。二维纺织复合材料的交叉缝合或在三维织物中所有轴向的互相连络实现了这样的增强。交叉缝合和机织的应用导致了 z 轴方向的增强，从而在面外方向给出较好的性能。在这些纺织产品中，试验必须

处理第三个方向的表征。尽管许多的研究项目正在进行有关 z 轴方向的表征，但还没有面内方法所具有的取得统一意见的标准。

对于纺织工艺，最可能的制造缺陷是与由树脂流动不充分所造成的孔隙率和“干”区相关联。大面积的弱胶接是不太可能的。常规的超声技术可以探测大面积孔隙率。由于三维织物不均匀结构而掩盖的小面积是可能的。干态区域往往在表面且是目视可检的。

即使韧性体系，在接近丝束交叉点附近的富脂区也可能存在微裂纹。材料的三维特性不允许如二维情况那样沿 z 方向的收缩，于是迫使在富脂区处出现一个显著的三维应力状态，因此存在裂纹形成的可能性。

6.12.2.2 背景

纺织复合材料的试验不是一个新课题。事实上，最初大多数复合材料是用机织材料来加强的。现有许多关于单向材料试验方法的评述，但是，一般来说，机织材料与单向材料一样常常是设计的一部分。正如前面所讨论的，纺织复合材料的试验方法必须考虑代表机织结构特征的机纺织品有关的图案。

在一般机织材料中，重复的图案小于十分之一英寸。在这些情况下，由每个标准单向方法测试所得出的值代表织物整体性能。在许多场合下，由于重复的图案是小的，标准的测试试件是要与机织相适应的。当采用为单向层压板所制订的标准试验方法时，要把重复尺寸与按标准试验方法给出的最大的和典型的试件尺寸相比较。如果重复图案小于试件测试长度的 10 倍，则不应出现问题。

对于机织织物，图案为机织类型标号的一部分。在玻璃纤维织物中，机织编号也指定了纱的性能，对于玻璃纤维织物类型号码的定义可查阅文献 6.12.2.2(a)。

在二维和三轴编织中，这也是确实的，但是机织来源于短袜的形式。短袜的增强性能是由所采用的丝束、芯模给进速度以及芯模的直径和形状所造成的。由编织操作所得到的试件要仔细确保的是，在测试试样制作的铺贴和预浸阶段机织图案不得改变。

评估用于干纺织预成形件和 RTM 工艺制备复合材料的测试试件的试验在文献 6.12.2.2(a)和(b)中给出。6.12.2.4 节提供了有关复杂编织特性的讨论。

6.12.2.3 织物和二维机织

6.12.2.3.1 物理性能试验

为了测量干态复合材料的密度和纤维体积含量，试样应比单胞尺寸大一个量级以便获得平均密度。对平均纤维体积含量为 0.50-0.55 的纺织复合材料，在纱内的纤维体积含量能高达 0.7。于是，在离散地模拟纱和树脂的分析中采用实际的纤维体积含量，而不是纺织复合材料的平均纤维体积含量。

以在 RTM 工艺中采用的干态二维纺织预成形件所制作的复合材料在性质上是准层状的。于是，可以计算固化后单层厚度，并且能按厚度对强度进行归一化处理。对于模压零件，模具体积控制着厚度。对于干态预成形件，体积系数（不受限定的厚度与受限定的厚度之比）应该要稍稍大于 1:1，以便获得所希望的纤维体积含量。对于明显高于 1 的体积系数，可能要求利用热压罐或压机压力来合拢模具，导致预成形件出现不可接受的扭曲。对体积系数小于 1，纤维体积含量会明显低于最佳值。

6.12.2.3.2 力学试验

对于由二维机织预浸料制成的纺织复合材料，利用在静态单轴力学试验一节(6.8)中所述的标准试验方法给出了良好的结果。然而，任何试验必须考虑与所用纺织增强体有关的尺度效应。如果测试试件尺寸小得足以使之失去均衡，结果将不能代表所要表征的零件。

当重复图案的复杂性增加时，确实需要较大的测试试件，对此没有可用的专门的经验方法，研究人员应将此作为确定力学性能值纲要的一部分来进行鉴定。作为特定机织物的表征部分，现有许多鼓励读者进行查阅的研究工作。

6.12.2.3.3 冲击考虑

现有测量冲击损伤容限的试验方法刚好适用于由干态纺织预成形件和 RTM 工艺所制备的复合材料试件，这与由预浸料层压板所制造的复合材料相同。人们必须了解冲击响应以便使用数据。在文献 6.12.2.3.3 中给出了有关冲击响应的讨论。

6.12.2.4 复杂编织的考虑

试验编织试件的目的是为了得出能以有代表性的方式模拟编织结构那部分特性的力学性能数据。由于不能按照局部的外形或细节精确地来制备测试试件，通常这是难于实现的。所以，在试验开始之前，有必要就试件对于最后构件的适用性做出某些假设。

多数试件采取了制备试件时所用的原本制造技术，而且这是代表最后的零件特性。初始的试件可不可以模拟最后的产品取决于在零件设计中的细心程度和再现性。用于拉伸、压缩、剪切、销钉挤压、层间剪切和层间拉伸的测试试件将在此手册的其他章节进行描述。在某些情况中，该部位的实际形状可以比较精确地描绘试件的几何特征，即具有锥度试件（最好是对称的）包含实际的锥形编织物的基本几何特征。

一般来说，所感兴趣的具体的力学性能是扭转刚度和强度、剪切刚度和强度、拉伸、压缩和弯曲模量和强度、螺栓装配件的挤压强度以及在所需部位的胶接强度。倘若编织结构可能受到损伤或曝露于环境而造成退化，必须引入提供对编织材料损伤容限度量和环境影响的一系列试验。损伤准则必须包含由无损检测无法检出的制造缺陷。

NASA CR 1092（文献 6.12.2.4）列出了这些试验类型的几种可供选择的构型，并应考虑作为基于预期使用和环境条件的设计许用值纲要的一部分。

当零部件为动态的构件时，编织复合材料的疲劳和蠕变试验是重要的考虑内容。编织纱穿过基体材料所导致的高度复杂的线路会引起难于预测强度和刚度的纤维载荷路径。基体承受超出层压板设计所预期水平的载荷的概率很高，因而，由于对编织零件特性了解问题上的置信度很低，则要求进行严格的疲劳和蠕变试验计划，以便表征在零件中编织纱线复杂的交织情况。用于测定疲劳和蠕变影响所设计的试验为专门的部分，并且应该以与成品相同的编织试件来进行试验。只要可能，在测试试件的设计中应避免比例效应和相似性的采用，否则，该结果不能模拟在预估值之前引起零件破坏的关键缺陷。

对于二维和三维编织复合材料，缺陷在零件设计和相应的许用值应用中是一个最为重要的因素，通常认为，这是一个正确的说法。其原因是由于编织预成形件的固有特性以及纱线覆盖轮廓急剧变化区域能力的物理局限性。好的消息是，无余量编织零件提供了能制备这些零件而无需高强度手工操作的方法。这就使得编织适应于生产环境并有充分能力完成预期的工作。当设计者和分析者做出了的用于测定编织物许用值的试件类型的正确选择时，这是理想的。

6.12.2.4.1 三维机织和编织物

三维纺织复合材料一般是非常复杂应用驱动的机织。与它们有关的试验是要确定由二维机织的专门织造或交叉缝合所致力解决的特定性能。对于代表性织物段进行的一些常规试验测定和表征这些工艺性能。目前许多研究工作正在进行之中，以便对 z 向试验进行标准化，但尚无已确立的工业标准。

6.12.2.4.2 厚度方向性能的试验方法

已经制订了许多方法来表征厚度方向的性能。为了优化纺织复合材料中厚度方向增强的类型与数量，层间试验方法是令人满意的；表 6.12.2.4.2 给出了通常使用的方法。在推荐将这些试验方法进行标准化之前，它们还必须完成另外的一些工作。尚没有一种面内剪切试验方法是完全可接受的。有关这些研究工作的评述见文献 6.12.2.3.3。

表 6.12.2.4.2 对于 3-D 增强复合材料建议的面内剪切试验方法

试验方法类型	试验方法规范	试验方法名称	注 释
剪 切	ASTM E 143 ASTM D 4255 无	室温下剪切模量的标准试验方法 测试复合材料层压板面内剪切性能的标准指南 紧凑剪切(Compact Shear)	文献 6.12.2.4.2
层间拉伸	ASTM D 6415	测试纤维增强聚合物基复合材料曲梁强度的标准试验方法	
层间断裂韧性	ASTM D 5528	单向纤维增强聚合物基复合材料 I 型层间断裂韧性的标准试验方法	适宜于二维编织和缝合经编织物
层间断裂韧性	见 6.8.6.4.1	端部缺口弯曲（II 型）	适宜于二维编织
层间拉伸	ASTM C 297	夹层结构平面拉伸强度的标准试验方法	适宜于弹性常数
层间压缩	ASTM D 3410 Procedure B	承受剪切载荷具有无支持工作段的聚合物基复合材料压缩性能的标准试验方法	适宜于弹性常数和强度
层间剪切	无 ASTM D 3846	紧凑 对于增强塑料面内剪切强度的标准试验方法	文献 6.12.2.4.2 厚复合材料 薄复合材料
层间剪切一横向	ASTM D 2344	聚合物基复合材料及其层压板短梁强度的标准试验方法	适宜于二维编织和三维织物

6.12.2.5 提交MIL-HDBK-17数据适用的试验方法

一般而言，应利用前面各节中描述的有关单向材料的方法来表征纺织复合材料。这些方法仅适用于在小的重复长度和宽度上性能均匀的织物。至于特定情况下得到的非常大的粗机织重复单元则超出了本节和本手册的范围。应就各自的基本情况分析用于测试的这些织物。

有关在各自试验条件下适用的试验方法见以下各节：

- 拉伸试验方法：6.8.2.4 节
- 压缩试验方法：6.8.3.4 节
- 剪切试验方法：6.8.4.4 节
- 断裂韧性试验：6.8.6.7 节

6.12.3 专门用于厚截面复合材料的试验

还没有标准试验方法来指导厚截面试验，仅有少量的数据。可以进行包括单轴、双轴和三轴加载的力学试验来从实验上评估组合应力状态对复合材料响应的影响。有关厚截面

试验的讨论可以从第三卷第 10.2.3 节中得知。

6.13 空间环境对材料性能的影响

此节留待以后补充。

6.13.1 引言

此节留待以后补充。

6.13.2 原子氧

此节留待以后补充。

6.13.3 微流星体碎片

此节留待以后补充。

6.13.4 紫外线辐射

此节留待以后补充。

6.13.5 带电粒子

此节留待以后补充。

参考文献

6.3.1 ASTM Test Method D 5229/D 5229M, "Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.3.2(a) ASTM Practice D 618, "Conditioning of Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.3.2(b) ASTM Test Method D 570, "Water Absorption of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.3.2(c) SACMA Recommended Method (SRM) 11-88, "Recommended Procedure for Conditioning of Composite Test Laminates," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.3.3(a) Ryder, J. T., "Effect of Load History on Fatigue Life," AFWAL-TR-80-4044, July, 1980. 6.3.3(b) SACMA Recommended Method (SRM) 11R-94, "Recommended Method for Environmental Conditioning of Composite Test Laminates," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.3.3.2 Weisman, S., "Relative Humidity Measurement Errors in Environmental Test Chambers," Test Engineering & Management, October/November 1990, pg. 16-17.

6.4.1 ASTM Practice E 83-94, "Practice for Verification and Classification of Extensometers," Annual Book of ASTM Standards, Volume 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA .

6.4.2.8 ISO 10012-1:1992 "Quality Assurance Requirements for Measuring Equipment – Part 1: Metrological Confirmation System for Measuring Equipment."

6 4.3.1(a) ASTM E-4, "Standard Practices for Force Verification of Testing Machines," Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, ISBN 0-8031-1915-1.

6.4.3.1(b) ASTM E-74, "Standard Practice of Calibration of Force-Measuring Instruments for Verifying the Force Indication of Testing Machines," Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, ISBN 0-8031-1915-1.

6.4.3.1(c) ASTM E-467, "Standard Practice for Verification of Constant Amplitude Dynamic Loads on Displacements in an Axial Load Fatigue Testing System," Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, ISBN 0-8031-1915-1.

6.4.3.1(d) ISO 5893, "Rubber and Plastics Test Equipment – Tensile, Flexural and Compressive Types (Constant Rate of Traverse) – Description," International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

6.4.3.3 Window and Hollister, "Strain Gage Technology," Applied Science Publishers, Essex, England, ISBN 0-85334-118-4, p. 267.

6.4.4.4 G. Sines, Elasticity and Strength, Allyn & Bacon Inc. 470 Atlantic Ave, Boston MA LCCN: 69-14637.

6.4.4.4.1(a) "Temperature Induced Apparent Strain and Gage Factor Variation in Strain Gages," Tech Note TN-504-1. Available free of charge from: Measurements Group Inc. P.O. Box 27777 Raleigh, NC 27611. Measurements Group makes available an extensive collection of tech notes and tips relating to strain measurement, all are available at no charge.

6.4.4.4.1(b) "Strain Gage Selection Criteria, Procedures, Recommendations," Tech Note TN-505-2. Available free of charge from: Measurements Group Inc. P.O. Box 27777 Raleigh, NC 27611

6.4.4 4.2 "Surface Preparation for Strain Gage Bonding," M-LINE ACCESSORIES Instruction Bulletin B-129-6, Micro-Measurements Division, Measurements Group Inc. P.O. Box 27777, Raleigh, NC 27611, USA

6.4.4.4.4 "Optimizing Strain Gage Excitation Levels," Tech Note TN-502. Available free of charge from: Measurements Group Inc. P.O. Box 27777 Raleigh, NC 27611.

6.4.4.4.5.1 "Shunt Calibration of Strain Gage Instrumentation," Tech Note TN-514. Available free of charge from: Measurements Group Inc. P.O. Box 27777 Raleigh, NC 27611.

6.4.4.6(a) Mechanics of Textile Composites Conference. NASA CP 3311, Parts 1 & 2, Oct. 1995.

6.4.4.6(b) Masters, John E., and Portanova, Marc A., "Standard Test Methods for Textile Composites," NASA CR-4751, Sept. 1996 (URL http://techreports.larc.nasa.gov/ltrs).

6.4.5.9(a) "The Temperature Handbook", Volume 29, Omega Engineering, Inc. 1995.

6.4.5.9(b) "Guidelines for Realizing the International Temperature Scale of 1990 (ITS-90), B.W. Magnum and G.T. Furukawa, National Institute of Standards and Technology.

6.4.5.9(c) ASTM E220-86 (reapproved 1996) Calibration of Thermocouples by Comparison Techniques.

6.4.5.9(d) ASTM E77-92 Standard Test Method for Inspection and Verification of Thermometers.

6.4.5.9(e) ASTM E1502- ASTM E1502 Use of Freezing Point Cells for Reference Temperatures.

6.6.3.1 Young, R.J., Introduction to Polymers, Section 4.4.2, Chapman and Hall, 1981, pp. 199-202.

6.6.3.2.1 ASTM Test Method E 1356-91, "Glass Transition Temperatures by Differential Scanning Calorimetry or Differential Thermal Analysis," Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.3.2.3(a) ASTM Practice D 4065-85, "Standard Practice for Determining and Reporting Dynamic Mechanical Properties of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.3.2.3(b) SACMA Recommended Method (SRM) 18R-94, "Recommended Method for Glass Transition Temperature (Tg) Determination by DMA of Oriented Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.6.4.1(a) ASTM D 792, "Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA

6.6.4.1(b) ASTM D 1505, "Standard Test Method for Density of Plastics by the Density-Gradient Technique," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.1(c) ASTM D 4892, "Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Helium Pycnometer Method), Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.1(d) ASTM D2734, "Standard Test Method for Void Content of Reinforced Plastics," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.1(e) Ghiorse, S.R., data presented to MIL-HDBK-17 PMC Testing Working Group, Santa Fe, NM, March 1996.

6.6.4.1(f) Ghiorse, S.R. and Tiffany, J. "Evaluation of Gas Pycnometry as a Density Measurement Method," Proceedings of the 34th MIL-HDBK-17 PMC Coordination Group, Schaumberg, IL, September 1996.

6.6.4.2(a) In-progress revision of ASTM D 3171, currently titled, "Standard Test Method for Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion," D-30 Committee, Spring 1997 D30.03 subcommittee ballot.

6.6.4.2(b) ASTM D 5229/D 5229M, "Standard Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composites," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.3 Ghiorse, S.R., "A Comparison of Void Measurement Methods for Carbon/Epoxy Composites," U.S. Army Materials Technology Laboratory, TR 91-13, April 1991.

6.6.4.4 ASTM D 4892, "Standard Test Method for Density of Solid Pitch (Helium Pycnometer Method), Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.4.1(a) ASTM D 618, "Standard Practice for Conditioning Plastics and Electrical Insulating Materials for Testing," Annual Book of ASTM Standards, ASTM, West Conshohocken, PA.

6.6.4.4.1(b) Standard Reference Materials Program, National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899-0001.

6.6.5.3(a) ASTM E 797-90 "Standard Practice for Measuring Thickness by Manual Ultrasonic Pulse- Echo Contact Method," 1993 Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.03, Philadelphia, PA, 1993.

6.6.5.3(b) SACMA Recommended Method (SRM) 24R-94, "Recommended Method for Determination of Resin Content, Fiber

Areal Weight and Flow of Thermoset Prepreg by Combined Mechanical and Ultrasonic Methods," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.6.5.4 SACMA Recommended Method (SRM) 10R-94, "Recommended Method for Fiber Volume, Percent Resin Volume and Calculated Average Cured Ply Thickness of Plied Laminates," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.6.6.2(a) ASTM Test Method D 3171-76, "Fiber Content of Resin-Matrix Composites by Matrix Digestion," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA

6.6.6.4(a) SACMA Recommended Method (SRM) 10R-94, "Recommended Method for Fiber Volume, Percent Resin Volume and Calculated Average Cured Ply Thickness of Plied Laminates," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.6.6.4(b) Kelly, K.M. and Ciriscioli, P.R., "A Non-Destructive Test Method for the Determination of Percent Resin Content, Fiber Areal Weight and Percent Fiber Volume of Composite Materials," Proceedings of the 43rd SAMPE Symposium and Exhibition, Anaheim, CA, June, 1998.

6.6.7.2 ASTM Test Method D 2734-70 "Void Content of Reinforced Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.8.1(a) ASTM D 5229/D 5229M-92, Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials.

6.6.8.1(b) SACMA SRM 11R-94, Environmental Conditioning of Composite Test Laminates.

6.6.8.1(c) Environmental Effects on Composite Materials, George S. Springer, Ed., Technomic Publishing Co., 1981.

6.6.9.1.2(a) ASTM Test Method D 696-98, "Test Method for Coefficient of Linear Thermal Expansion of Plastics Between –300C and 30C," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.1.2(b) ASTM Test Method E 228-95, "Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials With a Vitreous Silica Dilatometer," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.1.2(c) ASTM Test Method E 831-93, "Test Method for Linear Thermal Expansion of Solid Materials by Thermomechanical Analysis," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 4.11, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.1.2(d)) ASTM Test Method E 289-99, "Test Method for Linear Thermal Expansion of Rigid Solids with Interferometry," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 14.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.1.2(e) Yaniv, G., Peimanidis, G., and Daniel, I.M., "Method for Hygromechanical Characterization of Graphite/Epoxy Composite," Journal of Composites Technology & Research, Vol. 9, 1987, pp. 21-25.

6.6.9.2.1(a) Fukuda, M., Ochi, M., Miyagawa, M., and Kawai, H., "Moisture Sorption Mechanism of Aromatic Polyamide Fibers: Stoichiometry of the Water Sorbed in Poly(para-phenylene Terephthalamide) Fibers,", Textile Research Journal, Vol. 61, No. 11, 1991, pp. 668-680.

6.6.9.2.1(b) Piggott, M.R., "Water Absorption in Carbon and Glass Fibre Composites," Paper No. 4.180, Proceedings of ICCM/VI and ECCM/II, Elsevier Applied Science, Publishers, London, 1987.

6.6.9.2.1(c) Tsai, C-L, and Chiang, C-H., "Characterization of the Hygric Behavior of Single Fibers," Composites Science and Technology, Vol. 60, 2000, pp. 2725-2729.

6.6.9.2.1(d) Cairns, D.S., and Adams, D.F., "Moisture and Thermal Expansion of Composite Materials," Report UWME-DR-101-104-1,Department of Mechanical Engineering, University of Wyoming, Laramie,WY,November 1981.

6.6.9.2.1(e) Cairns, D.S., and Adams, D.F., "Moisture and Thermal Expansion Properties of Unidirectional Composite Materials and the Epoxy Matrix," Journal of Reinforced Plastics and Composites, Vol. 2, No. 4, October 1983, pp. 239-255.

6.6.9.2.1(f) Norris, M.A., and Wolff, E.G., "Moisture Expansion Measurement and Data Analysis Techniques for Composite

Structures," Materials Challenge, Diversification and the Future, D. Hamston, R. Carson, G.D. Bailey, and F.J. Riel, Editors, 40th International SAMPE Symposium, Anaheim, CA, May 8-11, 1995, pp. 1867-1878.

6.6.9.2.1(g) Wolff, E.G., Chen, H., and Oakes, D.W., "Hygrothermal Deformation of Composite Sandwich Panels," Advanced Composite Letters, Vol. 9, No. 1, 2000, pp. 35-43.

6.6.9.2.1(h) Wolff, E.G., Chen, H., and Oakes, D.W., "Hygrothermal Deformation of Composite Sandwich Panels," Proceedings of the 12th International Conference on Composite Materials (ICCM/XII), 1999; also, Society of Manufacturing Engineers Technical Paper No. EM00- 246, Dearborn, MI, 2000.

6.6.9.2.1(i) ASTM Test Method 481-99, "Test Method for Laboratory Aging of Sandwich Constructions," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.2.1(j) ASTM D 5229/D 5229M-92 (1998), "Test Method for Moisture Absorption Properties and Equilibrium Conditioning of Polymer Matrix Composite Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.2.1(k) ASTM E 104-85 (1996), "Practice for Maintaining Constant Relative Humidity by Means of Aqueous Solutions," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 11.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.9.2.1(l) Wolff, E.G., "Prediction of Non-Mechanical Transient Strains in Polymer Matrix Composites," Paper No. 32-S, Composites, Design, Manufacture and Applications, Proceedings of the 8th International Conference on Composite Materials (ICCM/VIII), S.W. Tsai and G.S. Springer, Editiors, 1991.

6.6.10.2.1(a) ASTM C177-97 "Steady-State Heat Flux Measurements and Thermal Transmission Properties by Means of the Guarded-Hot-Plate Apparatus," 1997 Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.10.2.1(b) ASTM C1044-97, "Practice for Using the Guarded-Hot-Plate Apparatus in the One-Sided Mode to Measure Steady-State Heat Flux and Thermal Transmission Properties," Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.10.2.2 ASTM E1225-99 "Thermal Conductivity of Solids by Means of the Guarded-Comparative-Longitudinal Heat Flow Technique," Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.10.2.3(a) ASTM C518-98 "Steady-State Thermal Transmission Properties by Means of the Heat Flow Meter Apparatus," Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.10.2.3(b) ASTM C1046-98 "Practice for In-Situ Measurement of Heat Flux and Temperature of Building Envelope Components," Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.10.2.3(c) ASTM E1530-93 "Standard Test Method for Evaluating the Resistance to Thermal Transmission of Thin Specimens of Materials by the Guarded Heat Flow Meter Technique," Annual Book of ASTM Standards, Vol 04.06, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.11.2 ASTM E1269-95, "Determining Specific Heat Capacity by Differential Scanning Calorimetry," 1995 Annual Book of ASTM Standards, 14.02, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.11.2.1 Differential Scanning Calorimetry, J. L. McNaughton and C. T. Mortimer, Perkin Elmer Order Number L-604, reprinted from "IRS; Physical Chemistry Series 2, 1975, Volume 10," which was taken with permission of the publisher Butterworths, London, p. 12.

6.6.12.2(a) ASTM E 1461-92 "Thermal Diffusivity of Solids by the Flash Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02, ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.12.2(b) ASTM C714-85 "Thermal Diffusivity of Carbon and Graphite By a Thermal Pulse Method," Annual Book of ASTM Standards, 15.01 ASTM, Philadelphia, PA.

6.6.13(a) NASA CR-4740, "Contamination Control Engineering Design Guidelines for the Aerospace Community", AC Tribble et al, eds., NASA CASI, Linthicum Heights, MD, 1996

6.6.13(b) NASA RP-1124, Revision 3, "Outgassing Data for Selecting Spacecraft Materials", WA Campbell, JJ Scialdone, eds., NASA CASI, Linthicum Heights, MD, 1993, maintained online by the Goddard Space Flight Center at

http://epims.gsfc.nasa.gov/og

6.6.13(c) MAPTIS, online database maintained by the Marshall Space Flight Center at http://map1.msfc.nasa.gov

6.7.1(a) ASTM Test Method D 149-93a, "Dielectric Breakdown Voltage and Dielectric Strength of Solid Electrical Insulating Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.7.1(b) ASTM Test Method D 150-93, "A-C Loss Characteristics and Permittivity (Dielectric Constant) of Solid Electrical Insulating Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.7.1(c) ASTM Test Method D 495-89, "High-Voltage, Low-Current, Dry Arc Resistance of Solid Electrical Insulation," Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.7.1(d) ASTM Test Method D 2303-90, "Liquid Contaminant, Inclined-Plane Tracking, and Erosion of Insulating Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 10.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.1(a) Sorathia, U., Lyon, Richard, Ohlemiller, Thomas, and Grenier, Lt. Andrew, " A Review of Fire Test Methods and Criteria for Composites", SAMPE Journal, Vol 33, No.4, July/August 1997.

6.6.18.1(b) Ohlemiller T., and Cleary, T., "Upward Flame Spread on Composite Materials", Chapter 28 in Fire and Polymers II-Materials And Tests for Hazard Prevention, (G. L. Nelson, ed.) American Chemical Society, Washington, DC, 1995, pp. 422-434.

6.6.18.1(c) Ohlemiller, T., Cleary, T. and Shields, J., "Effect of Ignition Conditions on Upward Flame Spread on a Composite Material in a Corner Configuration", Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina, CA, 1996, p. 734.

6.6.18.2(a) Grand, A, "Fire Evaluation of Coatings for Glass-Reinforced Polymeric Composites", Proceedings of Fire and Materials, 2nd International Conference, Interscience Communications Ltd., London, 1993, p. 144. 6.6.18.2(b) Sorathia U., and Beck, C., "Fire Protection of Glass/vinyl Ester Composites for Structural Applications", Proceedings of the 41st International SAMPE Symposium, Society for the Advancement of Material and Process Engineering, Covina,CA,1996.

6.6.18.2(c) Ohlemiller, T and Shields, J., "The Effect of Surface Coatings on Fire Growth over Composite material", National Institute of Standards and Technology NISTIR 5940, December 1996.

6.6.18.2(d) DOT/FAA/AR-00/12, Aircraft Material Fire Test Handbook, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration Technical Center, Atlantic City, NJ 08405.

6.6.18.2.1 ASTM E 84-00a, "Standard Test Method for Surface Burning Characteristics of Building Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.2.2 ASTM E 162-98, "Standard Test Method for Surface Flammability of Materials Using a Radiant Heat Energy Source," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.2.3 ISO 9705, Fire tests-Full-scale room test for surface products, International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland.

6.6.18.2.4 ASTM E 1321-97a, "Standard Test Method for Determining Material Ignition and Flame Spread Properties," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.3(a) Babrauskas, V., Levin, B., Gann, R., Paabo, M., Harris, R., Peacock, R., and Yusa, S., "Toxic Potency Measurement for Fire Hazard Analysis", National Institute of Standards and Technology Special Publication 827, December 1991.

6.6.18.3(b) Sorathia, U., Lyon, R., Gann, R.G., Gritzo, L., " Materials and Fire Threat", Fire Technology, Vol 33, Number 3, Sept/Oct 1997.

6.6.18.3.1 ASTM E 662-97, "Standard Test Method for Specific Optical Density of Smoke Generated by Solid Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.3.2 NFPA 269, Standard Test Method for Developing Toxic Potency Data for Use in Fire Hazard Modeling, National Fire Protection Association, 1 Batterymarch Park, Quincy, MA 02269-9101.

6.6.18.4(a) IMO Resolution MSC.40(64), "Standard for Qualifying Marine Materials for High Speed Craft as Fire-Restricting Materials", International Maritime Organization, London, December, 1994.

6.6.18.4(b) MIL-STD-2031(SH), "Fire and Toxicity Test Methods And Qualification Procedure For Composite Material Systems Used in Hull, Machinery, and Structural Applications Inside Naval Submarines", February 1991.

6.6.18.4.1 ASTM E 1354-99, "Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products Using an Oxygen Consumption Calorimeter," ," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.4.2 ASTM E 906-99, "Standard Test Method for Heat and Visible Smoke Release Rates for Materials and Products," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.5(a) Sarkos, C.P., and Hill, R.G., "Heat Exposure and Burning Behavior of Cabin Materials During an Aircraft Post-Crash Fuel Fire", National Materials Advisory Board, National Research Council, NMAB Report 477-2, National Academy Press, 25, 1995.

6.6.18.5(b) Petrie, George L., Sorathia, Usman, Warren, L. Will, "Testing and Analysis of Marine Composite Structures in Elevated Temperature Conditions", Proceedings of the 44th International SAMPE Symposium, Vol 44, May 23-27, 1999.

6.6.18.5.1 ASTM E-119-00a, "Standard Test Method for Fire Tests of Building Construction and Materials," ," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.5.2(a) ASTM E-1529-00, "Standard Test Method for Determining Effects of Large Hydrocarbon Pool Fires on Structural Members and Assemblies," ," Annual Book of ASTM Standards, Vol 4.07, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.6.18.5.2(b) UL 1709, Rapid Rise Fire Tests of Protection Materials for Structural Steel, Underwriters Laboratories Inc., 333 Pfingsten Road, Northbrook, IL 60062-2096.

6.8.2.2.1(a) ASTM Test Method D 3039/D 3039M, "Tensile Properties of Polymer Matrix Composites," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.2.1(b) ISO 527, "Plastics --- Determination of Tensile Properties," American National Standards Institute, available from ANSI, 11 W. 42nd Street, New York, NY, 10036.

6.8.2.2.1(c) SACMA Recommended Method (SRM) 4, "Tensile Properties of Oriented Resin-Matrix Composites," Suppliers of Advanced Composites Materials Association, Arlington, VA.

6.8.2.2.1(d) SACMA Recommended Method (SRM) 9, "Tensile Properties of Oriented Resin-Matrix Crossply Laminates," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.8.2.2.1(e) ASTM Test Method D 5083, "Tensile Properties of Reinforced Thermosetting Plastics Using Straight-Sided Specimens," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.2.3(a) ASTM Test Method D 638, "Tensile Properties of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.2.3(b) SAE AMS 3844A, "Cloth, Type 'E' Glass, Style 7781 Fabric, Hot-Melt, Addition-Type, Polyimide Resin Impregnated," Society of Automotive Engineers, Warrendale, PA.

6.8.2.2.4 ASTM Test Method D 2290, "Apparent Tensile Strength of Ring or Tubular Plastics and Reinforced Plastics by Split Disk Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.04, 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.2.5 ASTM Test Method C 393, "Flexural Properties of Flat Sandwich Constructions," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.3.2(a) ASTM Test Method C 297, "Tensile Strength of Flat Sandwich Constructions in the Flatwise Plane," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.3.2(b) ASTM Test Method C 633, "Adhesive or Cohesive Strength of Flame Sprayed Coatings," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.3.2(c) ASTM Test Method D 2095, "Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod Specimens," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.2.3.3 Jackson, W. C. and Martin, R. H, "An Interlaminar Tensile Strength Specimen," ASTM STP 1206, American Society for Testing and Materials, 1993.

6.8.3.1(a) ASTM Test Method D 3410-95, "Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Materials with Unsupported Gage Section by Shear Loading," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6 8.3.1(b) ASTM Test Method D 5467-97, "Compressive Properties of Unidirectional Polymer Matrix Composites Using a Sandwich Beam," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.3.1(c) ASTM Test Method D 695-96, "Compressive Properties of Rigid Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.3.1(d) SACMA Recommended Method (SRM) 1R-94, "Compressive Properties of Oriented Fiber-Resin Composites, " Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.8.3.1(e) SACMA Recommended Method (SRM) 6-94, "Compressive Properties of Oriented Cross-Plied Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA.

6.8.3.1(f) ASTM Test Method D 6484, "Compressive Properties of Polymer Matrix Composite Laminates Using a Combined Loading Compression (CLC) Test Fixture," American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.3.1(g) Berg, J.S. and Adams, D.F., "An Evaluation of Composite Material Compression Test Methods," Journal of Composites Technology and Research, Vol. 11, No. 2, Summer 1989, pp. 41-46.

6.8.3.1(h) Schoeppner, G.A. and Sierakowski, R.L., "A Review of Compression Test Methods for Organic Matrix Composites", Journal of Composites Technology and Research, Vol 12 (1), 1990, pp. 3-12.

6.8.3.1(i) Camponeschi, E.T., Jr., "Compression of Composite Materials: A Review," Fatigue and Fracture of Composite Materials (Third Conference), ASTM STP 1110, ed., T.K O'Brien, ASTM, 1991, pp. 550-580.

6.8.3.1(j) Chatterjee, S.N., Adams, D.F., and Oplinger, D.W., "Test Methods for Composites, a Status Report, Vol. II. Compression Test Methods," Report No. DOT/FAA/CT-93/17, II, Federal Aviation Administration Technical Center, Atlantic City, NJ, June 1993.

6.8.3.1(k) Adams, D.F., "Current Status of Compression Testing of Composite Materials," Proceedings of the 49th International SAMPE Symposium, May 1995, pp. 1831-1843.

6.8.3.1(l) Welsh, J.S., and Adams, D.F., "Current Status of Compression Test Methods for Composite Materials," SAMPE Journal, Vol. 33, No. 1, January 1997, pp. 35-43.

6.8.3.2(a) Hofer, K.E. and Rao, P.N., "A New Static Compression Fixture for Advanced Composite Materials," Journal of Testing and Evaluation, Vol 5(4)1977.

6.8.3.2(b) Adsit, N.R., "Compression Testing of Graphite/Epoxy," Compression Testing of Homogeneous Materials and Composites, ASTM STP 808, ed., Chait and Papirno, American Society for Testing and Materials, 1983, pp. 175-186.

6.8.3.2.2(a) Wegner, P.M., and Adams, D.F., "Verification of the Combined Load Compression (CLC) Test Method," Report No. DOT/FAA/AR-00/26, Federal Aviation Administration Technical Center, Atlantic City, NJ, August 2000.

6.8.3.2 2(b) Tan, S.C., "Stress Analysis and the Testing of Celanese and IITRI Compression Specimens," Composites Science and Technology, Vol. 44, 1992, pp. 57-70.

6.8.3.2.2(c) Tan, S.C., and Knight, M., "An Extrapolation Method for the Evaluation of Compression Strength of Laminated Composites," Compression Response of Composite Structures, ASTM STP 1185, S.E. Groves and A.L. Highsmith, Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1994, pp. 323-337.

6.8.3.2.2(d) Adams, D.F., "Tabbed Versus Untabbed Compression Specimens," Composite Materials: Testing, Design, and Acceptance Criteria, ASTM STP 1416, A.T. Nettles and A. Zureick, Eds., American Society for Testing and Materials,

West Conshohocken, PA, 2002.

6.8.3.2.4 ASTM Test Method C 393-94, "Flexural Properties of Sandwich Constructions," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.3.2.8(a) Knight, M., "Three-Dimensional Elastic Moduli of Graphite/Epoxy Composites," Journal of Composite Materials, Vol 16, 1982, pp. 153-159.

6.8.3.2.8(b) Peros, V., "Thick-Walled Composite Material Pressure Hulls: Three Dimensional Laminate Analysis Considerations," Masters Thesis, University of Delaware, Newark, DE, December 1987.

6.8.4.1 Kellas, S., Morton, J., and Jackson, K., "Damage and Failure Mechanisms in Scaled Angle-Ply Laminates," Presented at the ASTM Symposium on Fatigue and Fracture, Indianapolis, May 1991.

6.8.4.2.1(a) ASTM D 3518/D 3518M-94, "Test Method for In-Plane Shear Response of Polymer Matrix Composites by Tensile Test of a ±45° Laminate". 6.8.4.2.1(b) SRM 7R-94, "In-plane Shear Stress-Strain Properties of Oriented Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Associate.

6.8.4.2.1(c) Terry, G., "A Comparative Investigation of Some Methods of Unidirectional, In-Plane Shear Characterization of Composite Materials," Composites, Vol 10, October 1979, p. 233.

6.8.4.2.1(d) Petit, P.H., "A Simplified Method of Determining the In-plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Composites," Composite Materials: Testing and Design, ASTM STP 460, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1969, p. 83.

6.8.4.2.1(e) Sims, D.F., "In-Plane Shear Stress-Strain Response of Unidirectional Composite Materials," Journal of Composite Materials, Vol 7, January 1973, p. 124.

6.8.4.2.1(f) Yeow, Y.T., and Brinson, H.F., "A Comparison of Simple Shear Characterization Methods for Composite Laminates," Composites, Vol 9, January 1978, p. 161.

6.8.4.2.2(a) ASTM Test Method D 5379/D 5379M-93, "Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.4.2.2(b) Arcan, M., and Goldenberg, N., "On a Basic Criterion for Selecting a Shear Testing Standard for Plastic Materials," (in French), ISO/TC 61-WG 2 S.P. 171, Burgenstock, Switzerland, 1957.

6.8.4.2.2(c) Goldenberg, N., Arcan, M., and Nicolau, E., "On the Most Suitable Specimen Shape for Testing Shear Strength of Plastics," Proceedings of the International Symposium on Plastics Testing and Standardization, ASTM STP 247, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1959, pp. 115-121.

6.8.4.2.2(d) Arcan, M., Hashin, Z., and Voloshin, A., "A Method to Produce Uniform Plane-stress States with Applications to Fiber-reinforced Materials," Experimental Mechanics, Vol 18, No. 4, April 1978, pp. 141-146.

6.8.4.2.2(e) Iosipescu, N., "Photoelastic Investigations on an Accurate Procedure for the Pure Shear Testing of Materials," (in Romanian), Studii si Cercetari de Mecanica Aplicata, Vol 13, No. 3, 1962.

6.8.4.2.2(f) Iosipescu, N., "Photoelastic Investigations on an Accurate Procedure for the Pure Shear Testing of Materials," Revue de Mecanique Appliquée, Vol 8, No. 1, 1963.

6.8.4.2.2(g) Iosipescu, N., "New Accurate Procedure for Single Shear Testing of Metals," Journal of Materials, Vol 2, No. 3, September 1967, pp. 537-566.

6.8.4.2.2(h) Walrath, D.E., and Adams, D.F., "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials," Experimental Mechanics, Vol 23, No. 1, March 1983, pp. 105-110.

6.8.4.2.2(i) Walrath, D.E., and Adams, D.F., "Analysis of the Stress State in an Iosipescu Test Specimen," University of Wyoming Department Report UWME-DR-301-102-1, June 1983.

6.8.4.2.2(j) Walrath, D.E., and Adams, D.F., "Verification and Application of the Iosipescu Shear Test Method," University of Wyoming Department Report UWME-DR-401-103-1, June 1984.

6.8.4.2.2(k) Adams, D.F., and Walrath, D.E., "Further Development of the Iosipescu Test Method,' Experimental Mechanics, Vol 27, No. 2, June 1987, pp. 113-119.

6.8.4.2.2(l) Bergner, H.W., Davis, J.G., and Herakovich, C.T., "Analysis of Shear Test Methods for Composite Laminates," VPI-E-77-14, Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, VA, April 1977; also NASA CR-152704.

6.8.4.2.2(m) Sleptez, J.M., Zagaeksi, T.F., and Novello, R.F., "In-Plane Shear Test for Composite Materials," AMMRC TR 78-30, Army Materials and Mechanics Research Center Watertown MA, July 1978.

6.8.4.2.2(n) Herakovich, C.T., Bergner, H.W., and Bowles, D.E., "A Comparative Study of Composite Shear Specimens Using the Finite-Element Method," Test Methods and Design Allowables for Fibrous Composites, ASTM STP 734, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1981, pp. 129-151.

6.8.4.2.2(o) Sullivan, J.L. , Kao, B.G., and Van Oene, H., "Shear Properties and a Stress Analysis Obtained from Vinyl-ester Iosipescu Specimens," Experimental Mechanics, Vol 24, No. 3, 1984, pp. 223-232.

6.8.4.2.2(p) Wilson, D.W., "Evaluation of the V Notched Beam Shear Test Through an Interlaboratory Study," Journal of Composite Technology and Research, Vol 12, No. 3, Fall 1990, pp. 131-138.

6.8.4.2.2(q) Ho, H., Tsai, M.Y., Morton, J., and Farley, G.L., "An Experimental Investigation of Iosipescu Specimen for Composite Materials," Experimental Mechanics, Vol 31, No. 4, December 1991, pp. 328-336.

6.8.4.2.2(r) Morton, J., Ho, H., Tsai, M.Y., and Farley, G.L., "An Evaluation of the Iosipescu Specimen for Composite Materials Shear Property Measurement," Journal of Composite Materials, Vol 26. No. 5, 1992, p. 708.

6.8.4.2.2(s) Arcan, M., "The Iosipescu Shear Test as Applied to Composite Materials -- Discussion," Experimental Mechanics, Vol 24, No. 1, March 1984, pp. 66-67.

6.8.4.2.3(a) ASTM Guide D 4255-83, "Guide for Testing In-plane Shear Properties of Composite Laminates," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.4.2.3(b) Garcia, R., Weisshaar, T.A., and McWithey, R.R., "An Experimental and Analytical Investigation of the Rail Shear-Test Method as Applied to Composite Materials," Experimental Mechanics, August 1980.

6.8.4.2.3(c) Tarnopol'skii, Y.M., and Kincis, T., Static Test Methods for Composites, Van Nostrand Reinhold Company, New York, 1985.

6.8.4.2.4 Chamis, C.C. and Sinclair, J.H., "Ten-deg Off-Axis Test for Shear Properties in Fiber Composites," Experimental Mechanics, September 1977.

6.8.4.2.5(a) ASTM Test Method E 143-87, "Test Method for Shear Modulus at Room Temperature," Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.4.2.5(b) MIL-STD-375, Test Method for In-Plane Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders.

6.8.4.2.5(c) ASTM Test Method D 5448/D 5448M-93, "Test Method for In-Plane Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.4.2.5(d) Guess, T.R. and Haizlip, C.B. Jr., "End-Grip Configurations for Axial Loading of Composite Tubes," Experimental Mechanics, January 1980.

6.8.4.3.1(a) ASTM Test Method D 2344-84, "Test Method for Apparent Interlaminar Shear Strength of Parallel Fiber Composites by Short-Beam Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.4.3.1(b) Berg, C.A., Tirosh, J. and Israeli, M., "Analysis of Short Beam Bending of Fiber Reinforced Composites," Composite Materials: Testing and Design, Second Conference ASTM STP 497, American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1972, p. 206.

6.8.4.3.1(c) SRM 8R-94, "Short Beam Shear Strength of Oriented Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Association.

6.8.4.3.3 ASTM Test Method D 3846-79, "Test Method for In-Plane Shear Strength of Reinforced Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.5 ASTM Test Method D 790-86, "Flexural Properties of Unreinforced and Reinforced Plastics and Electrical Insulating

Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.6.1(a) Inglis, C.E., "Stresses in a Plate due to the Presence of Cracks and Sharp Corners," Trans. Royal Inst. Naval Architects, Vol 55, 1913, pp. 219-230. 6.8.6.1(b) Griffith, A.A., "The Theory of Rupture," in Proc. 1st Int. Cong. Applied Mechanics, J. Waltman, Sr., Delft, 1924, pp. 55-63.

6.8.6.1(c) Irwin, G.R., "Fracture," in Handbuck der Physik, Vol 6, Springer, Berlin, 1958, pp. 551-590. 6.8.6.1(d) Sih, G.C., and Liebowitz, H., "Mathematical Theories of Brittle Fracture," in Fracture–An Advanced Treatise, Volume II, Edited by Liebowitz, H., Academic, New York, 1968, pp. 67-190.

6.8.6.1(e) Fracture Toughness Testing, ASTM STP 410, edited by Brown, W.F., Jr., and Srawley, J.E., ASTM, Philadelphia, 1966.

6.8.6.1(f) Review of Developments In-plane Strain Fracture Toughness Testing, ASTM STP 463, ASTM, edited by Brown, W.F., Jr., Philadelphia, 1970.

6.8.6.1(g) 1991 Annual Book of ASTM Standards, Section 3, Metals Test Methods and Analytical Procedures.

6.8.6.1(h) Pellini, W.S., "Principles of Structural Integrity Technology," ONR, Arlington, VA, 1976.

6.8.6.1(i) Fatigue Crack Growth Measurement and Data Analysis, ASTM STP 738, Edited by Hudak, S.J., Jr., and Bucci, R.J., ASTM, Philadelphia, 1981.

6.8.6.1(j) Fracture Mechanics of Composites, ASTM STP 593, Edited by Sendeckyj, G.P., ASTM, Philadelphia, 1975.

6.8.6.1(k) Awerbuch, J., and Madhukar, M., "Notched Strength of Composite Laminates: Predictions and Experiments: A Review," J. Reinf. Plast, Comp., Vol 4, 1985, pp. 3-159.

6.8.6.1(l) Harris, C.E., Morris, D.H., and Nottorf, E.W., "Analytical and Experimental Investigation of the Notched Strength of Thick Laminates with Surface Notches," Composite Materials, Testing and Design (Eighth Conference), ASTM STP 972, edited by Whitcomb, J.D., ASTM, Philadelphia, 1988, pp. 298-321.

6.8.6.1(m) Poe, C.C., Jr., Illg, W., and Garber, D.P., "A Program to Determine the Effect of Low Velocity Impact on Strength of Filament Wound Motor Cases," NASA TM 87771, July 1986.

6.8.6.1(n) Chatterjee, S.N., "Surface Cracks in Thick Laminated Fiber Composite Plates," in Surface-Crack Growth: Models, Experiments and Structures, ASTM STP 1060, edited by Reuter, W.G., Underwood, J.H., and Newman, J.C., Jr., ASTM, Philadelphia, 1990, pp. 177-193.

6.8.6.1(o) Agarwal, B.D., Patro, B.S., and Kumar, P., "Prediction of Instability Point During Fracture of Composite Materials," Comp. Tech. Rev., Vol 6, p. 173, 1984.

6.8.6.2(a) O'Brien, T.K., "Generic Aspects of Delamination Fatigue of Composite Materials," J. American Helicopter Society, Vol 32, 1987, pp. 13-18.

6.8.6.2(b) Reeder, J.R., "A Bilinear Failure Criterion for Mixed Mode Delamination," in Composite Materials: Testing and Design, Eleventh Volume, ASTM STP 1206, ASTM, Philadelphia, 1993, pp. 303-322.

6.8.6.3.1(a) ASTM Test Method D 5528-94a "Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Unidirectional Continuous Fiber Reinforced Composite Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.8.6.3.1(b) O'Brien, T.K. and Martin, R.H., "Round Robin Testing for Mode I Interlaminar Fracture Toughness of Composite Materials," ASTM Journal of Composite Technology and Research, Vol 15, Winter 1994, pp. 269-281.

6.8.6.3.1(c) Chatterjee, S.N., and Ramnath, V., "Modeling Laminated Composite Structures as an Assemblage of Sublaminates," Int. J. Solids and Struct., Vol 24, 1988, pp. 439-458.

6.8.6.3.1(d) Hashemi, S., Kinloch, A.J., and Williams, J.G., "Corrections Needed in Double Cantilever Beam Tests for Assessing the Interlaminar Failure of Fiber Composites," J. Mat. Sci. Letters, Vol 8, 1989, pp. 125-129.

6.8.6.4.1(a) Russell, A.J., "On the Measurement of Mode II Interlaminar Fracture Energies," Defense Research Establishment Pacific (Canada) Materials Report II 82-0, British Columbia, December 1982.

6.8.6.4.1(b) Kageyama, K., Kikuchi, M., and Yanagisawa, N., "Stabilized End Notched Flexure Test: Characterization of Mode II

Interlaminar Crack Growth," Composite Materials: Fatigue and Fracture, Third Volume, ASTM STP 1110, 1991, pp. 210-225.

6.8.6.4.1(c) Chatterjee, S.N., "Analysis of Test Specimens for Interlaminar Mode II Fracture Toughness, Parts 1 and 2," J. Comp. Mater., Vol 25, 1991, pp. 470-493 and pp. 494-511. 6.8.6.4.2 Chatterjee, S.N., Ramnath, V., Dick, W.A., and Chen, Y.Z., "Growth of Elliptic Delaminations in Laminates under Cyclic Transverse Shear Stresses," Composite Materials: Testing and Design (Eighth Conference), ASTM STP 972, edited by Whitcomb, J.D., ASTM, Philadelphia, 1988, pp. 281-297.

6.8.6.5(a) Donaldson, S.L., "Mode III Interlaminar Fracture Characterization of Composite Materials," Comp. Sci. Tech., Vol 32, 1988, pp. 225-249.

6.8.6.5(b) Martin, R.H., "Evaluation of Split Cantilever Beam for Mode III Delamination Testing," in Composite Materials: Fatigue and Fracture, Third Volume, ASTM STP 1110, 1991, pp. 243-266.

6.8.6.5(c) Anderson, G.P., Bennet, S.J., and Devries, K.L., Analysis and Testing of Adhesive Bonds, Academic, New York, 1977.

6.8.6.6.1 Wilkins, D.J., Eisenmann, J.R., Camin, R.A., Margolis, W.S., and Benson, R.A., "Characterizing Delamination Growth in Graphite-Epoxy," Damage in Composite Materials, ASTM STP 775, edited by Reifsnider, K.L., ASTM, Philadelphia, 1982, pp. 168-183.

6.8.6.6.2(a) Reeder, J.R., and Crews, J.C., Jr., "Mixed Mode Bending Method for Delamination Testing," AIAA J., Vol 28, 1990, pp. 1270-1276.

6.8.6.6.2(b) Reeder, J.R., and Crews, J.C., Jr., "Redesign of the Mixed Mode Bending Test for Delamination Toughness," Proc. ICCM 8, edited by Tsai, S.W., and Springer, G.S., SAMPE, July 1991, pp. 36-B-01 - 36-B-10.

6.8.6.6.3(a) O'Brien, T.K., "Characterization of Delamination Onset and Growth in Composite Laminates," Damage in Composite Materials: Basic Mechanisms, Accumulation, Tolerance, and Characterization, ASTM STP 775, edited by Reifsnider, K.L., ASTM, Philadelphia, 1982, pp. 140-167.

6.8.6.6.3(b) Whitney, J.M., and Knight, M., "A Modified Free-Edge Delamination Specimen," ASTM STP 876, p. 298, ASTM, Philadelphia, 1985.

6.9(a) Saff, C.R., "Compression Fatigue Life Prediction Methodology for Composite Structures –Literature Survey," Report No. NADC-78203-60, prepared by McDonnell Aircraft Company, June 1980.

6.9(b) Garbo, S.P. and Ogonowski, M., "Effects of Variances and Manufacturing Tolerances on the Design Strength and Life of Mechanically Fastened Composite Joints," Technical Report AFFDL-TR-78-179, prepared by McDonnell Aircraft Company, December 1978.

6.9(c) ASTM Test Method D 3479-76, "Tension - Tension Fatigue of Oriented Fiber, Resin Matrix Composites," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.11.2(a) ASTM Test Method D 2990-77, "Tensile, Compressive, and Flexural Creep and Creep-Rupture of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.11.2(b) ASTM Practice E 139-83, "Conducting Creep, Creep-Rupture, and Stress-Rupture Tests of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.12.1.2(a) "JANNAF (Joint Army, Navy, NASA, Air Force) Interagency Propulsion Committee Annual Report: January-December 1984," CPIA Publication 419, Chemical Propulsion Information Agency, Johns Hopkins University, Laurel, MD.

6.12.1.2(b) "Test Methods for The Mechanical Characterization of Filament Wound Composites," CPIA Publication 488, Chemical Propulsion Information Agency, Johns Hopkins University, Laurel, MD, February 1986.

6.12.1.2(c) ASTM Practice E 691, "Practice for Conducting an Interlaboratory Study to Determine the Precision and Bias of a Test Method," Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.02, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.12.1.3.2 ASTM Test Method D 5450/D 5450M, "Transverse Tensile Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.12.1.4.2 ASTM Test Method D 5449/D 5449M, "Transverse Compressive Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.12.1.5.1 ASTM Test Method D5448/D 5448M, "In-Plan Shear Properties of Hoop Wound Polymer Matrix Composite Cylinders," Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

6.12.2.2(a) MIL-G-9084, Cloth, Glass, Finished, for Resin Laminates

6.12.2.2(b) Minguet, Pierre J., Fedro, Mark J., and Gunther, Christian K., "Test Methods for Textile Composites", NASA CR-4609, July 1994, p. 228.

6.12.2.2(c) Jackson, Wade C., and Portanova, Marc A., Mechanics of Textile Composites Conference, NASA CP 3311, Part 2, October 1995, pp. 315-348.

6.12.2.3.3 Poe, C. C., Jr., "Mechanics Methodology for Textile Preform Composite Materials," Proceedings of the 28th International SAMPE Technical Conference, Nov. 1996, pp. 324-338.

6.12.2.4 NASA RP-1092, "Standard Test for Toughened Resin Composites", 1982.

6.12.2.4.2 Morton, John and Ho, Henjen, NASA-CR-193808, "A Comparative Evaluation of In-Plane Shear Test Methods for Laminated Graphite-Epoxy Composites", 1992.

第 7 章　结构元件表征

7.1　序言

本章集中讨论第三卷第 4 章所述复合材料结构积木式方法中层压板/元件级试验表征的试验方法和试验矩阵。这里所述的试验元件提供了有关缺口层压板、螺栓连接和胶接连接、损伤容限行为的数据，这些都是复合材料结构分析所必需的。关于螺栓连接和胶接连接的分析和设计，其一般讨论见第三卷第 6 章，损伤容限则见第三卷第 7 章。

复合材料结构中的任何一处连接都是个潜在的破坏源，如果设计不正确，连接就可能成为损伤起始点，从而可能导致结构强度的损失和最终的构件破坏。通常采用两种形式的连接，即(1)机械紧固连接和(2)胶接连接。本指南规定了进行合理结构连接设计所需的试验类型、层压板、环境条件和重复试验件数。

对于机械螺栓连接，介绍了表征连接各种失效模式的试验：缺口拉伸/压缩、挤压、挤压/旁路、剪脱和紧固件拉脱等。只要 ASTM 的标准可利用就加以采用，否则就推荐常用的试验方法。此外，提供了推荐的试验矩阵，用以对各种影响连接的变量进行连接性能的表征。应当把推荐的矩阵认为是为了得到设计性能所需的最小试验量，该试验矩阵取自 2.3.5 节的一般层压板/结构元件试验矩阵，为了完整起见也包括在这里。本章不包括在钉孔周围应力分布的细节分析，但在第三卷的 6.3 节可以找到。

介绍了两种类型的胶接连接试验。一种试验确定设计所需要的胶粘剂的性能；这些试验提供第三卷 6.2 节分析和设计方法所需的胶粘剂刚度和强度性能。另一种类试验是用于验证具体的设计。本章给出了这些试验的例子。

损伤容限这节中有两种类型的试验。一类试验表征给定层压板的损伤阻抗，另一类试验则表征层压板的损伤容限。冲击后压缩（CAI）试验是后一种类型的代表，被广泛用于航空航天工业中，以便计量复合材料中潜在的损伤容限。

7.2　试件制备

7.2.1　引言

本卷 6.2 节和 ASTM D 5687 已经充分描述了一般标准平板试件的试件制备事项，本节则对代表机械紧固连接和胶接连接的元件提供具体的指导。另外，对于已有 ASTM 标准的试验，标准中包含了具体的试件制备指南。对于平板的损伤容限试件，不需要除 6.2 节所述以外的特殊试件制备工艺。

7.2.2　机械紧固连接试验

对机械紧固连接试件主要关心的是钻孔和紧固件装配。应当欠尺寸钻孔，然后铰孔到最终尺寸。钻孔时应加垫板，以防止出口面发生分层。应核对孔径是否与试样图纸相符。应当记录试件孔的制备方法。

正确的紧固件安装方法对于机械连接性能的测定是很重要的。对于所试验的各种类型

螺栓都有特殊的技术要求，或者由螺栓制造商或者由零件制造商提供。除非规定的扭矩是采用手指拧紧螺栓外，试验件所含的紧固件必须按公司的技术要求安装，以得到对给定应用情况有意义的数据。还必须根据所连接零件的厚度正确选择夹持尺寸。必须检查所有的螺栓安装有正确的密封和配合。

7.2.3 胶接连接试验

必须按照胶接表面准备和固化工艺标准来制造胶接连接表征所用的试验件。本章（7.6节）引述了ASTM标准中关于胶接连接试验的要求。为了使胶接连接数据有实用价值，对试件制造必须同实际零件的制造一样进行严格的工艺控制。

7.3 湿热调节和环境曝露

7.3.1 引言

对试件进行试验环境调节的目的，是对在可控制的（或者至少是规定的）条件下，由于在湿度、液态水或其他流体（汽油或液体）中曝露所产生的性能变化进行定量评价。一般来说，本卷6.3节介绍的考虑和方法适用于结构元件以及较简单的层压板试件，然而，结构元件的环境曝露还有一些相关的附加问题。下面各节将讨论这些特殊的考虑，包括一般的试件制备（应变测量、缺口层压板和机械紧固连接）、胶接连接、损伤表征和夹层结构等方面。对于这些讨论，术语“吸湿”是指任何所吸收的介质（水蒸汽、液态水或其他流体）。

7.3.2 一般试件制备

7.3.2.1 应变测量

结构元件试验可能要比小试件使用更多的应变片。通常是在浸润介质中曝露后进行应变片粘贴，以防止应变片在浸润过程中受到影响，或者预防应变片胶粘剂的环境退化导致应变片过早破坏。当粘贴许多应变片时，在应变片粘贴期间，试验件多半会在大气环境下放置相当长的时间，这就增加了吸湿量明显降低的危险。为了把这种危险降到最低，应尽快粘贴应变片，并应在应变片粘贴完毕后尽快把试件放回到浸润环境或者适当的储存容器中。如果不能在一个短作业时间内粘贴完所有的应变片，应在各粘贴作业之间将试件放回浸润环境中或加以储存。也可以把全部或部分试件连同湿毛巾一起装入袋中，这样，可以只曝露一小部分区域在局部粘贴应变片，而把整个试件的吸湿量损失降到最小。

在应变片胶粘剂需要高温固化的情况下，也许可以把试件放回到高温浸润环境完成固化，而不是在干燥的空气中冒吸湿量降低的危险进行固化，然而，必须确定浸润环境是否对固化作用有不利的影响。

在某些情况下，必须在浸润之前粘贴应变片（例如，如果像油一样的浸润流体使试件表面不适于进行胶接）。必须进行判断，以确定是在应变片粘贴之前或在之后进行环境浸润。应变片和/或应变片胶粘剂制造商通常可以对这种决策提供有价值的建议。

7.3.2.2 带缺口的层压板和机械紧固连接试样

含有钻孔的试件，例如用于开孔、填充孔和机械紧固连接试验的试件，都应该在钻孔

以后浸润，以避免由于钻孔过程中的加热而使孔周围局部变干。

7.3.3 胶接连接

当考虑环境浸润时，胶接连接形式分为三类：薄复合材料被胶接件、厚复合材料被胶接件和金属被胶接件（不吸湿）。薄被胶接件限定为在合理的时间周期内能达到吸湿平衡条件者。一般来说，因为胶粘剂比纤维-树脂复合材料有更快的吸湿速率，当复合材料被胶接件达到平衡时，胶粘剂通常已处于平衡状态，在这种情况下无需对 6.3 节的指南做任何修改。

使用厚复合材料被胶接件的胶接连接，定义为其在试验计划的时间周期内达不到吸湿平衡条件的连接几何状态。事实上，某些几何状态可需要几年或数十年才能在全体范围内达到平衡，在这种情况下，试件必须把试验件按照金属被胶接件的方式同样处理（不吸湿）。

对于金属被胶接件的连接（和对于实际目的，厚复合材料被胶接件），只能通过边缘区域出现湿度扩散。在许多情况下，由于胶接连接的长度和宽度尺寸限制，可能在一个合理的时间周期内无法达到胶粘剂的吸湿平衡。如果以前从纯胶粘剂试件已经确定了胶粘剂的扩散率（见 6.6.8 节的湿度扩散），就可以估算所需的扩散时间。即使估计在试验计划的时间框架内可以达到吸湿平衡，追踪湿度的吸收历程则又是另外一个问题。因为不能吸湿的金属被胶接件，其质量可能比胶粘剂的质量大几个数量级，所以用周期称重的办法来确定平衡，其精度充其量也是不高的。为了试图降低被胶接件相对于胶粘剂的质量，同时仍然将吸湿局限于边缘处，已经采用了将铝箔粘在一起所构成的伴随件，其胶粘剂与试验件所用者相同，且与试验件有一样的胶层厚度、长度和宽度。理论上，当把这些伴随件和试验件一起放入浸润的环境，就能够以更高的精度确定何时达到吸湿平衡。然而，这必须精确地知道箔和胶粘剂的质量，此外箔的腐蚀带来另一个潜在的干扰，因此实际上未被广泛采用。虽然还未见资料证明，采用不锈钢或者耐腐蚀的箔有可能避免腐蚀问题。

因为要浸润到平衡常常不是不现实就是不精确，在许多情况下，按固定的时间进行浸润就成了唯一的现实办法。虽然，一般来说整个胶层达不到某个相同的吸湿量，但是靠近胶层边缘的区域将达到或接近于平衡的吸湿水平。这里正是受载情况下胶接连接剪应力和剥离应力最大的典型区域，试件的破坏常常起始于该区域。因此可以说明，虽然整个胶层没有处在所希望的吸湿水平，但胶接连接破坏起始的区域已经达到所需的水平。对于比较短的搭接情况，某些试验室已经采用 85%-95%相对湿度和高温（对 177°C（350°F）固化的环氧树脂达到 85°C（180°F））下曝露 1 000 小时的办法，进行加速的固定时间浸润。然而，不能把这种方法和基本原理作为缩短曝露时间的一般理由。因为胶接连接的结构试验是把连接作为一个系统，而不仅是孤立的胶粘剂来评价的，其他的浸润影响，比如金属被胶接件表面制备的退化，也可能对胶接的破坏起作用。在选择固定时间环境浸润时应当考虑这种影响。

7.3.4 损伤特性试件

对于损伤后的试验（例如冲击后压缩），依据浸润是在损伤前或者损伤后进行，可以得到不同的结果。这可能是由于以下几种因素的影响：

- 与未浸润的同样板相比较，吸湿浸润过的板具有不同的柔度和/或基体硬度。对于同样的试验参数和能量，这种柔度和/或基体硬度的差别可以导致不同类型和程度

的损伤。例如，由于柔度增加，浸润后的板其分层区域可能较小，而由于基体变软，前表面凹坑的深度可能较大。

- 损伤事件后浸润的板可能以非 Fick 方式吸湿。这就是说，除了在分子水平上的 Fick 吸湿外，液态水（或其他流体）可能在裂纹和分层部位开始累积。这种现象可影响对重量增益的测量，因为这种测量可能并不精确代表聚酯基体的吸湿情况，因此，这将影响吸湿平衡的精确度和吸湿量的测定。在这种情况下推荐使用无损的伴随件。

虽然在设计研制或者验证计划中对于是在冲击前或在冲击后进行浸润有其正确的理由，但重要的是牢记这种影响，并在文件中规定进行冲击、浸润和试验的顺序。

7.3.5 夹层结构

对夹层结构的浸润需要考虑几种情况，取决于所试验结构的材料和破坏的模式。表 7.3.5 列出了常用的 12 种材料和失效模式的组合情况。

表 7.3.5 夹层材料和失效模式

失效模式	无孔金属面板		复合材料面板	
	金属芯	有机芯	金属芯	有机芯
面板破坏（拉伸 / 压缩）	1	2	3	4
芯破坏（拉 / 压 / 剪）	5	6	7	8
胶接破坏（拉伸 / 剪切）	9	10	11	12

注：表内数字指以下注解的编号。

如果芯子是金属的（例如铝蜂窝）（如表 7.3.5 中的情况 1，3，5，7，9，11），则只有面板和胶粘剂进行环境浸润。如果芯子包括有机基组分（例如聚酯/酚醛、玻璃/酚醛或泡沫芯，例如在 2，4，6，8，10，12 组合中），则可能会关心芯子材料的浸润，除非芯破坏不是预期的模式。下面针对表 7.3.5 中的所有 12 种情况，逐一建议环境浸润的具体考虑和方法。

1. 此时面板和芯都是金属的（胶粘剂除外），并预期面板破坏。因为面板强度通常不受吸湿浸润的影响（腐蚀影响除外，它不在 MIL-HDBK-17 的考虑范围内），这种情况不需要进行浸润。即使是胶粘剂发生未预期的破坏，由于胶粘剂被蒙皮遮挡而与浸润介质隔开（边缘除外），浸润对于结果的影响很小。
2. 像情况 1 一样，金属面板将胶粘剂和芯子与浸润介质隔开。因此，即使芯子是有机物的，也没有必要对这种情况浸润，假设边缘吸收可以忽略不计。
3. 这种情况的面板是复合材料的，并预计面板破坏。因此关心蒙皮的吸湿状态，并希望浸润到吸湿平衡。对于这种结构，由于浸润期间在金属芯内可能积累液体（假设芯子是蜂窝状的材料），跟踪试件本身是困难的。在这种情况下（假定有一侧面板曝露），用（与面板同样材料和铺层顺序但厚度加倍的）实体层压板作伴随件就很方便。把这些伴随件与试件一起放在浸润环境中。厚度加倍的的伴随件双面浸润相当于试件蒙皮的单面浸润。当伴随件达到平衡时，试件的面板也达到平衡。
4. 当预期面板破坏且芯子和面板都是有机物时，并不特别关心芯子的吸湿量。因此，可采用 2 倍面板厚度的实层压板伴随件技术（如上面 3 所述）。还有一附加的优

点，即防止芯子格中水的积累。因为在有机芯格中液体的积累似乎少于金属芯格，通常可采用试验件的吸湿量跟踪或夹层的吸湿量跟踪作为替换的方法。

5. 这种情况预期芯子破坏。因为芯子是金属的，就不需要试验经过浸润的试件。
6. 见情况 2。
7. 这种情况面板是复合材料（允许湿气达到夹层内部），但是（预期破坏的）芯子是金属。假设吸湿对金属芯子的性能影响不大，这种情况不需要浸润。
8. 这种情况面板和芯子都是可吸湿的，而更关心芯子（预期破坏）的吸湿量。这种结构形式对评价其与湿度浸润的关系是困难的。蒙皮的质量通常大于芯子的质量；然而，某些芯材的平衡吸湿量可能大于复合材料蒙皮。此外，通过小夹层伴随件边缘的吸湿量可能代表了总吸湿量的大部分（对于表面与边缘比值较大的试件情况可能不一样）。不管采用试件或者模拟试验件几何特性的伴随件进行跟踪，如果面板吸湿占主要地位，将影响对芯子平衡的精确测定。以下是一种可能的方法：
   - 只对所关心的环境采用 6.4.8 节讨论的方法（按需要修改）确定芯材的平衡吸湿量。
   - 准备许多模拟试验件几何特性的夹层伴随件。
   - 如果试验件表面积与侧面积之比要比伴随件大许多，用箔带或其他合适的隔离材料掩盖住伴随件的侧面。
   - 把试验件和伴随件放入浸润环境中。
   - 周期性地取出一个伴随件，将其破坏，快速、干净、且不产生热量地取下面板和胶粘剂。对芯子部分称重，然后去湿确定芯子的吸湿量。
   - 将伴随件芯子的吸湿量水平与以前确定的平衡水平相比较。
   - 当伴随件芯子在所确定的容差内达到平衡水平，则试验件也就处在平衡状态。
9. 与情况 1 和 5 一样，金属面板阻止胶粘剂与浸润介质接触，因此，即使预期胶粘剂破坏，也没有必要对这种试件浸润（假设边缘吸湿进入胶层的量不大）。
10. 与情况 2 和 6 一样，金属面板阻止胶粘剂和芯子接触浸润介质。因此，即使预期胶粘剂破坏，也没有必要对这种试件浸润（假设边缘吸湿进入胶层和有机芯的量不大）。
11. 这种情况的面板是复合材料，允许吸湿到胶粘剂（期待破坏）。由于胶层相对较薄且与面板接触，可以合理地假设，当复合材料蒙皮达到平衡时胶粘剂也接近平衡状态。因此，可利用两倍面板厚度实层压板伴随件的方法（如上面情况 3 所述）。
12. 见情况 11。

7.4 缺口层压板试验

7.4.1 概述和一般考虑

虽然螺栓连接效率较低，但装配复合材料结构的最普通方式还是采用机械紧固件。孔的应力集中将显著降低复合材料层压板的缺口拉伸和压缩强度，降低的幅度随多个因素变化。直到破坏都呈线弹性应力-应变关系的所有复合材料都对缺口很敏感，与金属材料不同，缺口对强度的影响将随其尺寸变化，而与缺口的几何特性关系不大。在单轴载荷下，大孔

的应力集中系数接近于下式的宽板理论应力集中系数：

$$K_t = 1 + \left\{ 2\left[\left(\frac{E_x}{E_y} \right)^{\frac{1}{2}} - \nu_{xy} \right] + \frac{E_x}{G_{xy}} \right\}^{\frac{1}{2}} \qquad 7.4.1(a)$$

对于准各向同性层压板，圆孔情况时就简化为众所周知的 K_t=3.0。这个关系式还说明，在高模量层压板中，孔对强度的影响比低模量层压板要大得多。上式表达的应力集中系数与参数 E/G（即层压板轴向模量除以剪切模量）成相当好的正比例关系。

有关孔对复合材料层压板强度的影响有大量的文献。文献 7.4.1 对这类文献给出了非常好的提要，引用了 300 多篇论文。虽然关于复合材料中孔的影响已经有许多研究和报道，但还有另外的一些影响需要考虑，其中两个涉及紧固件“填充”层压板中的孔所产生的影响。紧固件，特别是紧配合或干涉配合孔内的紧固件，由于阻碍了受载孔的椭圆化而产生双轴应力场，这种因素使以 0°层为主层压板的缺口拉伸强度趋于降低，而使 45°占优层压板的强度增大。第二种影响是，当紧固件拧紧后可防止在孔周围形成纵向狭缝和分层形式的损伤。这些分层是“自由边”应力的结果，对于铺层顺序很敏感。当紧固件阻止了损伤，就没有应力集中的缓解，从而增加了缺口敏感度。

填充孔的压缩强度明显高于开孔强度，并在某些情况接近于无缺口时的强度。对于可以通过紧固件直接挤压传递载荷的紧配合孔尤其是这样。由于织物材料的均衡性，织物层压板的应力集中系数往往较小，不太容易发生自由边分层。在第三卷 5.6.3 和 5.6.5 节讨论了自由边应力和铺层顺序对分层的影响。

当孔排列在一起，例如在螺栓连接情况时，孔的应力集中相互影响并降低了复合材料层压板的缺口强度。采用一个有限宽修正系数来考虑这种相互作用的影响。对于各向同性材料，这个“有限宽修正”系数（FWC）由下式给出：

$$\mathrm{FWC} = \frac{2 + \left(1 + D/W\right)^3}{3\left(1 - D/W\right)} \qquad 7.4.1(b)$$

式中：D=紧固件直径；

W=紧固件间距。

正交异性材料的修正系数不能用封闭形式来表示。在大多数情况下，发现采用各向同性材料的修正系数具有相当好的精度。

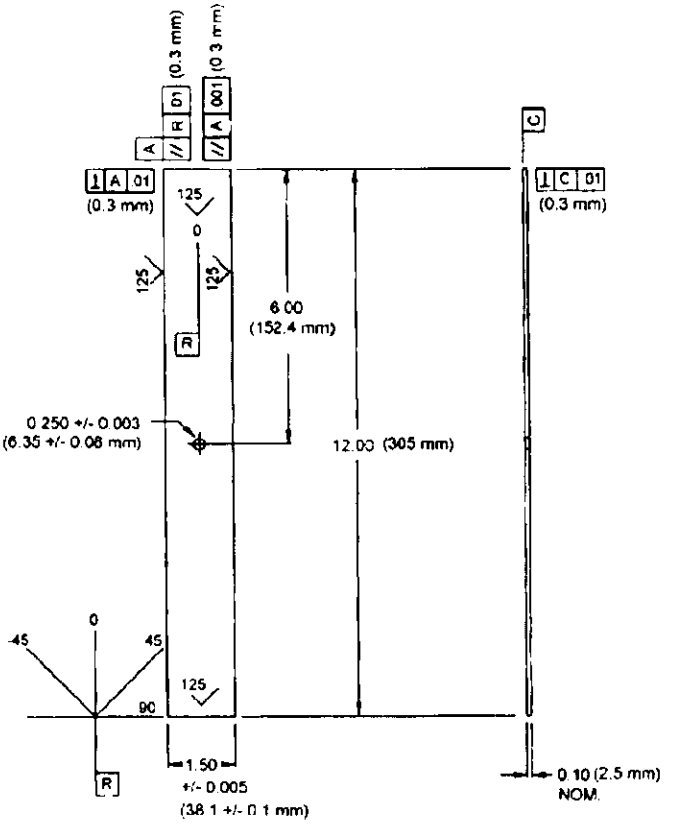
当孔径明显大于层压板厚度时，这种应力集中实质上是二维的。关于层压板中孔的研究大多数属于这种情况。当层压板的厚度明显大于孔径时，复合材料缺口强度的预计要困难得多。这时，孔的应力集中实质上是三维的，铺层顺序的影响成了控制因素。

为了描述复合材料层压板缺口强度，已经提出了许多失效模型。所有的模型都需要某种形式的经验“校准”系数，例如“特征尺寸”。已经把“特征尺寸”用作缺口敏感度的尺度，一旦进行了校准，所有模型在描述复合材料缺口强度时都具有合理的精度。这些模型的缺点是，需要重新校准失效模型的许多参数，诸如层压板的组成、温度、甚至孔尺寸。在一个很宽的层压板应用范围内，在具有类似特性的各种材料体系之间，有一些校准系数还是相当一致的。低强度或低刚度纤维，或者高非线性韧性树脂，是可能产生很不相同“校准”系数的那些材料组分的例子。逐渐损伤的失效模型显示了某种希望，可以不过分依赖

经验系数，有关这方面更多的讨论，见第三卷第 7 章（螺栓连接）。

7.4.2 缺口层压板拉伸

对含有中心圆孔直径为 6.35 mm（0.250 in）的对称均衡层压板进行单轴拉伸试验，以确定缺口层压板的拉伸强度。试验中包括对 3.8 cm（1.5 in）宽 30 cm（12 in）长的直边无端部加强片试件，在拉伸载荷作用下直到发生破坏分成两部分。记录试验期间加载头的位移量和试件的载荷，通过试件两端的机械剪切界面，通常用楔形或液压夹块，将拉伸载荷施加到试件上。试验机的夹持楔块必须至少与试件一样宽，每端至少夹持试件 5 cm(2.0 in)。推荐的试件几何形状如图 7.4.2 所示。对开孔试件和紧固件填充孔试件进行试验。除非所用的锯齿形夹块齿距很大或者压力过大，没有必要用加强片或作特殊的夹持处理。通常，孔的较大应力集中将消除夹持部位破坏的问题。



注：1 除非另有说明，全部容差是±0.100，端面粗糙度符合 ANSI B46.1；

2 不可有分层或其他损伤；

3 所有尺寸以 in 计（括号内是 mm）；

4 示出的结构形式相对于 0.25in 的孔直径，对于所有其他的孔尺寸要改变宽度，以保持 W/D=6。

图 7.4.2 缺口拉伸/压缩强度试件（基于文献 7.4.1）

试验一般不用仪器设备，只记录最大载荷、试件尺寸以及失效模式与位置。试验方法也适用于具有不同紧固件类型、宽度/直径比和孔尺寸的试件。开孔和和填充孔的拉伸强度按毛面积给出，不做任何有限宽修正。采用下列公式计算缺口拉伸强度：

$$F^{oht}=\frac{P_{max}}{Wt} \quad 和 \quad F^{fht}=\frac{P_{max}}{Wt}$$

式中：P_{max}=最大拉伸载荷；

W=中间位置测得的宽度；

t=计算的名义层压板厚度。

计算的名义厚度把层压板中各层的名义单层厚度相加得到的。

7.4.2.1 开孔拉伸试验方法

ASTM D 5766“聚合物基复合材料层压板开孔拉伸强度标准试验方法”。该标准用来测定高模量纤维增强聚合物基复合材料层压板的开孔拉伸强度。限定的复合材料形式为连续或不连续纤维增强的复合材料，其中，层压板相对于试验方向是均衡和对称的。标准的试验层压板是$[45/90/-45/0]_{ns}$铺层顺序族，调整子铺层的重复下标使层压板厚度在2.03-4.06mm（0.080-0.160 in）之间。标准的试件宽度是3.8 cm（1.5 in）而长度为20-30 cm（8.0-12.0 in）；直径6.35 mm（0.25 in）的圆孔位于板的正中。只要把层压板的构型和结果一起报告，可以试验其他的层压板，但是，对于只包括一个铺层方向的单向带层压板，这个试验方法是不满意的。

7.4.2.2 填充孔拉伸试验方法

填充孔拉伸试验一般采用开孔拉伸试验方法。标准试件的宽度是3.8 cm（1.5 in）而长度为20-30 cm（8.0-12.0 in），直径6.35 mm（0.25 in）的圆孔位于板的正中。这种试验的标准试件构型应有一个在试验前装入孔中的六角形凸头紧固件。填充孔拉伸强度与紧固件的拧紧程度有关，一般夹持力较大，其填充孔拉伸强度也较低。紧固件夹持与紧固件类型、螺母或套环类型及拧紧力矩有关。一般来说，采用这种紧固件所得到的强度，应当比复合材料结构中大多数紧固件安装情况的结果更保守。这个试验方法也适用于具有不同紧固件类型、宽度/直径比和紧固件/孔尺寸的试件。

7.4.3 缺口层压板压缩

对含有中心圆孔直径为6.35 mm（0.250 in）的对称均衡层压板进行单轴压缩试验，以确定缺口层压板的压缩强度。试验中对3.8 cm（1.5 in）宽30 cm（12 in）长的直边无端部加强试件施加压缩载荷，直到发生破坏分成两部分。记录下试验期间的加载头位移量和试件载荷。推荐的试件如图7.4.2所示，推荐的厚度大于2.0 mm（0.08 in），但是小于6.35 mm（0.25 in）。使用图7.4.3所示的多件螺接的压缩支持夹具，以稳定试件避免纵向的柱屈曲破坏。把试件/夹具组件夹持在液压夹头中，以剪切方式将载荷引入试件。夹头必须能施加足够的侧向压力以防止滑移又不将试件局部压损。波音公司近来改进了压缩支持夹具的结构形式，工业界中已普遍应用了一段时间。这次改进纠正了波音公司原先支持夹具图纸中发现的一些错误和疏忽。更新的细节包含在所建议的ASTM开孔压缩试验方法中，已经提供给一些公司（MTS和W yoming）和试验室（Intec和Delson），以便其在夹具中考虑。开孔和和填充孔拉伸强度按毛面积提供，不做任何有限宽修正。用下式计算缺口压缩强度：

$$F^{obc}=\frac{P_{max}}{Wt} \quad 和 \quad F^{fbc}=\frac{P_{max}}{Wt}$$

式中：P_{max}=最大拉伸载荷；

W=中间位置测得的宽度；

t=计算的名义层压板厚度。

计算的名义厚度是把层压板中各层的名义单层厚度相加得到的。

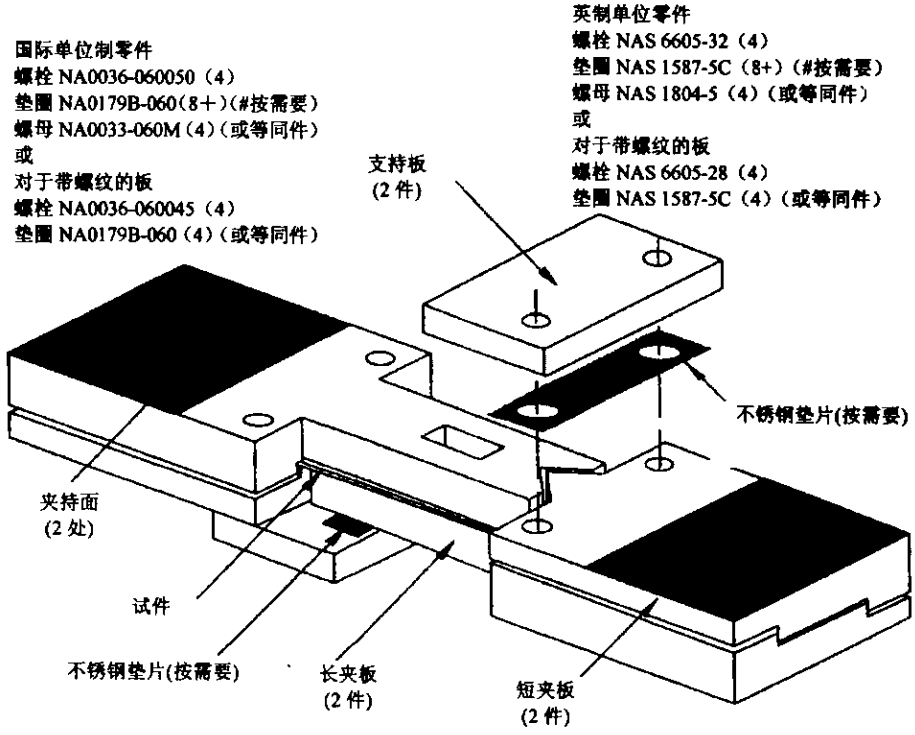


图 7.4.3　缺口压缩强度支持夹具

7.4.3.1　开孔压缩试验方法

SACMA SRM 3“定向纤维-树脂复合材料开孔压缩性能”。该方法包含的层压板压缩性能测定程序，适用于由连续、高模量纤维（>20 GPa（>3 Msi））增强的含圆孔定向纤维-树脂复合材料。单向带复合材料试验的标准层压板铺层顺序是$[45/90/-45/0]_{2s}$。标准试件宽为 3.8cm（1.5 in）而长为 30 cm（12 in），直径 6.35 mm（0.25 in）的圆孔位于板的正中央。采用通常的压缩支持夹具来稳定试件避免一般的纵向柱屈曲破坏。优先采用的试验方法是用液压夹持试件/夹具组件；但这种试验方法允许选择对试件端头进行加载。这种选择是需要的，因为许多试验室并不具备很大的液压夹头，来应对这 76.2 cm（3 in）宽的支持夹具。新的侧向载荷液压夹头能够轻易地对付这种支持夹具。端部加载试件方案要求试件两端容差要要严格得多，也需要修改夹具。

ASTM D 6484“聚合物基复合材料层压板开孔压缩强度标准试验方法”。该方法测定由高模量纤维增强的多向聚合物基复合材料层压板的开孔压缩强度。所用的复合材料形式限为连续或不连续纤维（单向带和/或织物）增强的复合材料，其层压板相对于试验方向是均衡和对称的。标准的试验层压板是$[45/90/-45/0]_{ns}$的铺层顺序族，调整子铺层的重复下标使其厚度在 3.17-5.08 mm（0.125-0.200 in）之间。标准的试件宽度是 3.8 cm（1.5 in）而长度为 30 cm（12.0 in），直径 6.35 mm（0.25 in）的圆孔位于板的正中。采用图 7.4.3 所示的压缩支持夹具，以稳定试件避免纵向的柱屈曲破坏。这种试验方法采用液压楔形夹头对试

件/夹具组件加载。只要和结果一起报告层压板的构型，可以试验其他的层压板；然而，对于只包括一个铺层方向的单向层压板，这个试验方法是不满意的。

7.4.3.2 填充孔压缩试验方法

一般采用开孔压缩试验方法进行填充孔压缩试验。标准试件的宽度是 3.8 cm（1.5 in），长度为 30 cm（12.0 in），直径 6.35 mm（0.25 in）的圆孔位于板的正中。对于这种试验，标准试件构型应有一个在试验前装入孔中的六角形凸头紧固件。填充孔的压缩强度与紧固件孔的间隙量有关，较紧的孔导致较高的填充孔压缩强度。紧固件夹持与紧固件类型、螺母和套环及拧紧力矩有关。这个试验方法也适用于具有不同紧固件类型、宽度/直径比和紧固件/孔尺寸的试件。

7.4.4 推荐的缺口层压板试验矩阵

为了对某个范围内的层压板进行各种理论模型“校准”的初步经验评估并确定缺口强度数据，表 7.4.4 推荐了最低限度的试验矩阵，这个矩阵只是整个研制试验计划的一部分。这个矩阵要求在结构部件设计所相应的各种环境下，进行有选择的拉伸和压缩载荷试验。该试验矩阵是用于开孔情况的，但是螺栓连接设计准则中还需要能得到填充孔试验数据，建议采用表 7.4.4 的一部分进行填充孔强度试验，特别是拉伸试验。对开孔强度乘一个换算系数得到填充孔强度，而不重新校准预测的模型。这个矩阵代表了螺栓连接设计中通常使用的层压板范围。这就保证了可以对层压板刚度、失效模式和连接参数之间重要的相互作用进行评估。如果所关心层压板的行为明显超出所试验层压板的范围，试验矩阵中应当添加该层压板的开孔试验。

表 7.4.4 缺口拉伸/压缩强度试验矩阵

铺 层	直 径 mm(in)	宽 度 mm(in)	W/D	CTD 拉伸	RTD 拉伸	RTD 压缩	ETW 压缩	试验数量
10/80/10	6.35 (0.250)	38 (1.5)	6.0	5	5	5	5	20
25/50/25	3.18 (0.125)	25 (1.0)	6.0		5	5		10
		38 (1.5)	8.0		5	5		10
25/50/25	6.35 (0.250)	38 (1.5)	6.0	5	5	5	5	20
25/50/25	12.7 (0.500)	51 (2.0)	4.0		5	5		10
		64 (2.5)	6.0		5	5		10
$(50/40/10)_n$ 或 $(40/20/40)_{n,m}$	6.35 (0.250)	38 (1.5)	6.0	5	5	5	5	20
总计				15	35	35	15	100

铺层比例	铺层顺序	状 态	
(10/80/10)	$[45/-45/90/45/-45/45/-45/0/45/-45]_{ns}$	CTD	冷温干燥
(25/50/25)	$[45/0-45/90]_{ns}$	RTD	室温干燥
(50/40/10)	$[45/0/45/90/0/0/45/0/-45/0]_{ns}$	ETW	高温吸湿
(40/20/40)	$[0_f/90_f/0_f/90_f/45_f/-45_f/90_f/0_f/90_f/0_f]_{ns}$	见2.2.7节	

n 的选择要使厚度在2.5-5.0 mm (0.1-0.2 in)之间

通常用于校准单钉孔层压板强度的方法，比如“特征尺寸”法，由评估孔尺寸对各向同性层压板（25/50/25）强度数据的影响开始，采用了宽度/直径比 W/D=6 的基准试件。选

择覆盖紧固件常用范围的三种紧固件直径进行试验，确定孔尺寸对拉伸和压缩强度数据的影响趋势。选取所得趋势线与试验数据拟合最佳的特征尺寸。采用已选定的特征尺寸，来预计所有其他的试验情况。

然后，在模型和数据之间做进一步相关比较，以评价这个唯一特征尺寸的通用性。用附加的试验提供数据，建立与所预测的层压板组分变化、温度变化、和有限宽度变化影响之间的相关性。最初用来选择特征尺寸的孔尺寸效应数据，“成为”对有限宽度 W/D=6 的修正。如果以后的理论/试验的对比不一致或误差太大，可能需要进一步地拟合“特征尺寸”。如果对于变量的应用范围仍然不可接受，这试验数据将是其他分析或纯经验方法的基础；但可能需要较多的试验，来弥补（在表 7.4.4 定义的有限试验条件间提供分析的桥梁）预测方法之不足。

7.4.5 用于向 MIL-HDBK-17 提交数据的缺口层压板试验方法

按照下列试验方法（表 7.4.5）提供的数据，现已被 MIL-HDBK-17 接受，考虑包括在第二卷中。

表 7.4.5 用于 MIL-HDBK-17 数据提交的缺口层压板试验方法

性 能	符 号	所有的数据级别	只用于筛选数据
开孔拉伸强度	F_x^{oht}	D 5766	
填充孔拉伸强度	F_x^{fht}	7.4.2.2 节修改的D 5766	
开孔压缩强度	F_x^{ohc}	D 6484	
填充孔压缩强度	F_x^{fhc}	7.4.3.2节修改的D 6484	

7.5 机械紧固连接试验

7.5.1 概述

7.5.1.1 定义

下列定义与本节有关。

- 挤压面积——孔直径乘以试件厚度。
- 挤压载荷——界面上的压缩载荷。
- 挤压应变——在作用力方向的挤压孔变形与钉直径之比。
- 挤压强度——试件总体破坏时相应的挤压应力。
- 挤压应力——作用载荷除以挤压面积。
- 旁路强度——绕过钉孔传递的载荷除以层压板毛面积。
- 端距比——载荷作用方向上从挤压孔中心到试件端头的距离除以孔直径。
- 初始挤压强度——挤压载荷变形曲线与预选偏移点所引切线模量相交点的挤压应力。偏移量可取为名义孔直径的 1%，2%或 4%。
- 比例极限挤压强度——挤压应力与孔伸长曲线上偏离线性点所相应的挤压应力。
- 极限挤压强度——能够承受的最大挤压应力。

7.5.1.2　失效模式

连接设计和分析的一个重要考虑，是应当注意特定复合材料体系中具体连接设计多半会出现的失效模式，并由此选择试验方法的类型。本节简要说明了各种失效模式；某种具体失效模式的出现主要取决于连接的几何特性和层压板的铺层。图 7.5.1.2 示出了复合材料螺栓连接的各种可能失效模式。具体失效模式的出现可能受螺栓直径（D）、层压板宽度（W）、端距（e）和厚度（t）的影响，所用紧固件的类型也会影响具体失效模式的出现。在 7.5.2.6 节中给出了失效模式的详细分类。

当螺栓直径与板条宽度相比足够大时，发生净截面拉伸/压缩破坏。对石墨/环氧树脂体系中接近各向同性的铺层，这个比值大约是 1/4 或更大些（$W/D \leq 4$），以主要载荷方向的铺层破坏为其特征。由于孔靠近试件的端头会发生劈裂破坏，可能由于净截面拉伸破坏引发劈裂破坏。这种类型的破坏通常起始于试件的末端而不在紧固件的接触面。在某些情况下，在螺栓弯曲和变形后螺栓头可能会穿过层压板而发生拉脱破坏。这种模式经常发生在沉头紧固件中，与所选用的具体紧固件密切相关。最后，重要的是，对于任何给定的几何形状，失效模式都可能随铺层和铺层顺序而变化。

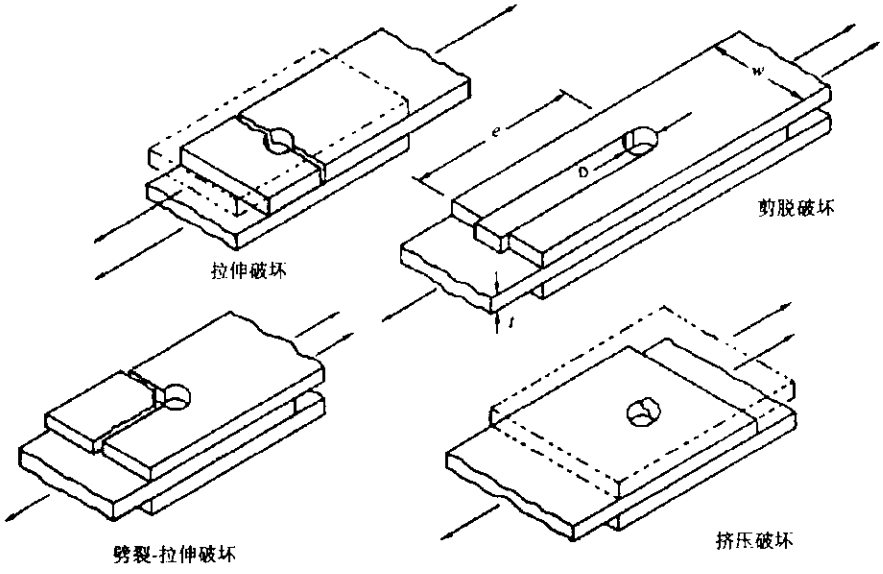


图 7.5.1.2　先进复合材料螺栓连接的典型失效模式

7.5.1.3　设计要求

为了设计防止不同的失效模式和它们之间的相互干扰，必须由试验确定复合材料的以下承载能力：

- 缺口/净拉伸/压缩
- 挤压
- 挤压/旁路
- 剪脱

在 7.4.2，7.4.3 和 7.5.2-7.5.4 节中讨论了这些问题。试验的总量因制造商和取证机构而异，取决于对每个公司分析能力的信心如何。MIL-HDBK-17 的基本原则是，提供关于试验总量的指导的典型值，但未必是最小值或最大值。图 7.5.1.3 最好地说明了挤压、净拉伸/

压缩、和挤压/旁路失效模式的临界状态，机体设计师通常使用该图，图中涵盖了 5 种失效可能性，与螺栓载荷和连接元件应变有关。该图通常由 7.5.3-7.5.4 节所述的试验来确定。在零挤压（没有螺栓载荷）时，破坏形式是净拉伸或压缩（点 A 和 E）。用 7.4.2 和 7.4.3 节说明的开孔和填充孔试件来确定这种性能。在 A 和 C 之间的线段代表由于挤压载荷而使得净拉伸强度的降低。类似地，从 E 到 C^1 之间的线段代表了螺栓载荷对净压缩强度的影响。点 C 和 C^1 是单钉连接强度，全部载荷由螺栓传递。7.5.3 节介绍了为对不同连接变量建立设计点所需要的试验。实际上，C 和 C^1 的连接情况没有大的差别，所以通常只进行拉伸挤压试验就足够了。对于每个不同的层压板、紧固件类型和环境条件，图 7.5.1.3 所示的图形可能是不同的，但是可以用一个图涵盖许多应用范围。曲线的形状也可能随层压板中 0°，90°或 45°方向铺层的百分比而变化。本章以下各节的意图，是对如何通过试验建立图 7.5.1.3 的临界点提供指南。所试验的层压板数量取决于对分析能力和外推的信心。在连接设计中通常应避免出现剪脱破坏，这可以通过提供足够大的孔间边距或端距、以及均衡的层压板结构来达到。然而，在某些翻修的情况下，剪脱临界的连接是不可免的。在这些情况下，必须制定一个试验计划来建立许用值。

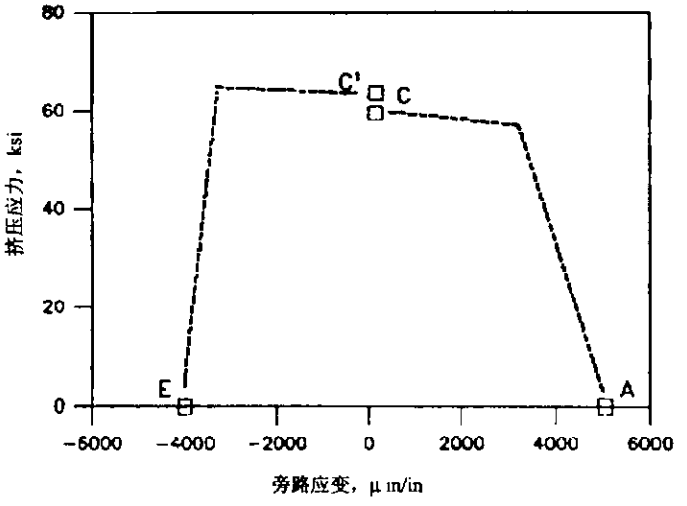


图 7.5.1.3　挤压/旁路相互影响例子

7.5.2　挤压试验

7.5.2.1　概述

由挤压试验确定复合材料的挤压响应。从试验的载荷-位移曲线，按下式计算在最大载荷和在某些中间值（定义为屈服或偏移值）的挤压强度：

$$F^{br} = P / tD \qquad 7.5.2.1$$

式中：F^{br}=挤压强度，Pa（psi）

P=挤压载荷，N（lb_f）

D=挤压孔直径，m（in）

t=试件厚度，m（in）

上标 bry 和 bru 通常用于区分屈服挤压强度和极限挤压强度，也可以定义一个偏移挤压强度代表屈服值，在这种情况下应采用下标 bro。

或者以双剪的形式或者以单剪的形式来进行挤压试验，包括一个到两个螺栓的单剪加载方式，后者更接近于实际的连接情况。7.5.2.4 节介绍了一个推荐的试验矩阵，可用以建立挤压设计值。如果应用中使用双剪连接，则试验矩阵中采用 ASTM D 5961 方法 A 进行挤压试验；或者，如果是单剪连接情况，则采用 ASTM D 5961 方法 B 中两个螺栓的试件。

7.5.2.2 双剪挤压试验

本节介绍在双剪构型中引入挤压载荷的两种方法。在实际应用中，以单剪形式传递载荷是较普遍的情况，导致了在厚度方向较大的应力集中，降低了可以达到的挤压强度，在 7.5.2.3 节介绍这些单剪试验。换句话说，用双剪试验确定的挤压强度值不能用于单剪连接。

下面介绍的两种试验标准其主要差别是怎样施加挤压载荷，ASTM D 953 是通过一个销钉，而 ASTM D 5961 方法 A 则采用施加了扭矩的螺栓。因为这夹持力是增加挤压强度的一个重要因素，ASTM D 953 对于双剪连接形式提供了挤压强度的下限。此外，由于销钉不能代表螺栓连接，这个试验的结果通常并不用于设计，而是用于比较不同材料的性能。

7.5.2.2.1 ASTM D 953塑料挤压强度

这个试验方法（文献 7.5.2.2.1）是最早用于测量复合材料挤压响应的方法，它是唯一可用于测量材料纯挤压强度而没有螺栓影响（比如夹持和垫圈）的方法，正因如此，可用以比较不同材料的挤压性能。这个试验可以得到拉伸和压缩载荷下的挤压强度，本试验的限定是：

- 销加载——挤压载荷通过销钉引进，这并不代表大多数实际结构连接。
- 夹具——试验夹具过分复杂，ASTM D 5961 的装置要简单得多。
- 试件几何形状——对于两种规定的试件厚度，试件的几何形状在 *e/D* 和 *W/D* 比方面不协调。由于这两种比值对挤压强度有显著影响，用户可能发现两种厚度的挤压强度有差别，而在材料中不存在这种差别。
- 试件构型——没有规定试件的铺层，可能导致使用者去试验单向材料，带来灾难性的结果。
- 数据处理——这个标准规定的数据处理专门针对抛物线形状，这并不反映实际的载荷-位移曲线。在计算机时代再采用模板方式太过时了。ASTM D 5961 的数据整理方法更为普遍和有用。

总之，这个试验方法对区别材料之间的挤压强度是有用的，但是其挤压性能、极限强度、屈服强度和载荷-位移响应并不代表实际的双剪连接。认为由本节的试验方法所测量的挤压强度是在比较评估和设计中使用的材料性能。此外，D 5961 允许采用销钉，因而可用以代替 D 953，从而利用其夹具较简单的优点。在现实的结构连接中，像几何形状、紧固件类型和载荷偏心等因素，对建议的试验中所测到的挤压强度可实现部分都将有显著影响。对连接设计更合适的挤压强度试验方法，在 7.5.2.2 和 7.5.2.3 节介绍。

7.5.2.2.2 ASTM D 5961方法A

这个最近建立的标准已经对 ASTM D 953 存在的所有缺点进行了处理，但仍然允许采用紧密配合的销钉引入载荷进行试验。ASTM 是对 MIL-HDBK-17 以前工作的一个标准化的改写，并大部分取自其中。ASTM D 5961 所具有的灵活性允许对标准的形式进行试验，或者对其加以改变以反映具体使用者的应用情况。其加载夹具制造简单，并清楚说明了试

验方法和数据要求。对挤压破坏评价只建议了一种加载情况；在压缩情况下，除非可能发生剪脱破坏（例如，层压板所含 0°层的比例较大），其较大的端距（$e>>3D$）应当只对挤压破坏应力略有影响。可以接受用这个标准得到的数据使其包括在 MIL-HDBK-17 中。挤压和连接强度值被列入 MIL-HDBK-17 中作为典型值或平均值。因此，应当分析每个具体情况所可能的挤压和连接强度值，以便得出第 8 章所述的典型值。试验数据必须包括表 2.5.6 所需的数据文件，并将按照第二卷 1.4.2 节的性能表公布。按照特定纤维体积所建立的挤压数据可能不适用于纤维体积差别很大的情况，因为失效模式有变化。

图 7.5.2.2.2(a)和(b)中转载了 ASTM D 5961 的标准试件和夹具组合。对于这标准试验，用稍微拧紧的螺栓来施加挤压载荷。在试验中，要求测量跨受载孔的平均位移作为载荷的函数。图 7.5.2.2.2(c)示出了挤压应力/应变曲线的一个例子，挤压应变是按照螺栓直径归一化得出的。于是，2%的偏移值（本标准的缺省值）实际上就是螺栓直径的 2%。关于偏移值应该取多大还没有一致的意见，航空工业中采用的值从 1%D（刚硬双剪连接）到 4%D（单剪连接），后者是 HDBK-5 对于金属挤压试验的标准值。对于航宇和非航宇应用，使用者在选择偏移值以前应当判定其可能的用法。如果目的是用于表示挤压屈服强度，偏移值应当接近 $0.67F^{bru}$，与飞机工业的安全系数 1.5 相适应。偏移值的另外一种尺度可能是对给定设计所限定的变形总量。

应当指出，在实验室的实践中，剪切响应通常按照螺栓载荷与平均位移进行记录，而不是如图 7.5.2.2.2(c)所示那样。

ASTM D 5961/D 5961M

图注：

1 按照 ANSI Y14.5M-1982 解释图；并符合以下：

2 全部尺寸以 in 计，具有如下十进位的容差：

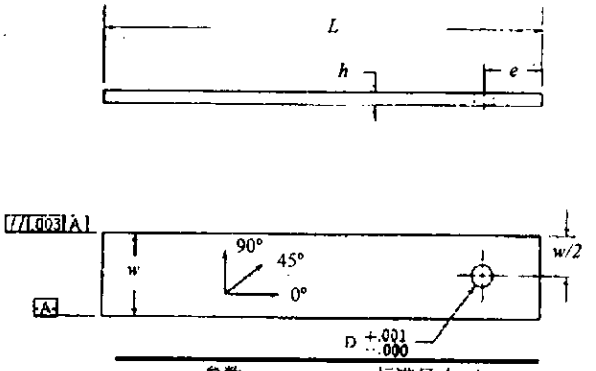
.x	.xx	.xxx
±.1	±.03	±.01

3 全部角度容差±0.5°；

4 铺层取向相对于 -A- 推荐在±0.5°内（见 6.1 节）；

5 机加侧面的光洁度不超过 64 √（符号符合 ASA B46.1,粗糙度的高度以μin 计）；

6 下面提供的值，针对视图区的任何范围：材料铺层，铺层取向整个长度上相对于 -A-，孔径和试样厚度



参数	标准尺寸，in
紧固件或销钉直径，d	0.250+0.000/-0.001
孔直径，D	0.250+0.001/-0.000
厚度范围，h	0.125-0.208
长度，L	5.5
宽度，W	1.5±0.03
端距，e	0.75±0.03
沉头	无

图 7.5.2.2.2(a) 双剪试件图（in-lb）

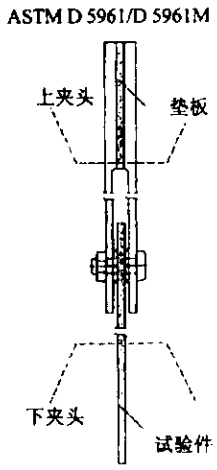


图 7.5.2.2.2(b)　方法 A 夹具组合

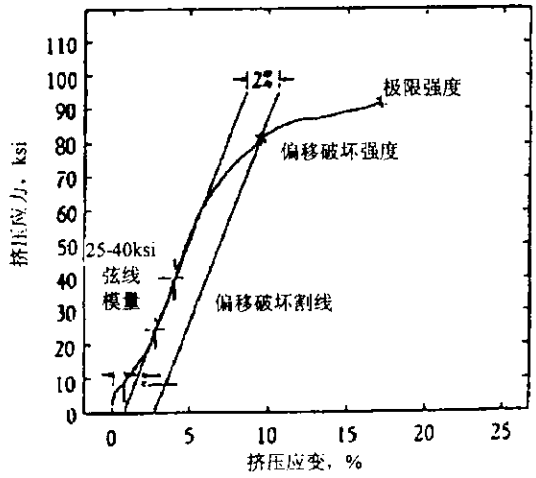


图 7.5.2.2.2(c)　挤压应力/挤压应变曲线例子

7.5.2.3　单剪挤压试验

7.5.2.3.1　概述

单剪挤压试验构型要比 7.5.2.2 节所介绍的双剪试验更能代表大多数飞机螺栓连接的实际应用情况。单搭接连接既对紧固件引入弯曲又产生剪切载荷，而双搭接连接主要产生剪切载荷。采用的单剪试件有两种形式，一种只有一个螺栓，而另一种有两个螺栓，后者更接近多钉连接。两种试件都需要在试件两端加垫板，以保证两个连接板的贴合面通过载荷的轴线。因此这种试件比双剪形式更复杂些，另一方面，可以不必制造夹具。

7.5.2.3.2　ASTM D 5961，方法B

通过建立 ASTM D 5961 的方法 B，ASTM 认识到了对挤压试验的需求，它代表了实际结构中出现的单搭接连接；标准中允许单螺栓和双螺栓连接的形式。

图 7.5.2.2.2(a)示出了推荐的单钉连接形式。这与 MIL-STD-1312-X（文献 7.5.2.3.2）标准中规定的试件形式一样。应当认识到，由于通过螺栓偏心地传递载荷，这种连接形式承受大的弯曲。可以通过增大两个垫板的刚度，或者增加其厚度和/或材料的刚度，来减少这种弯曲。还应该注意到，单钉连接时因接合点有过大的旋转和变形，所以一般并不代表多钉连接的应用情况。所以多半用于紧固件的筛选。

图 7.5.2.3.2(b)示出的双螺栓搭接形式，既可用于得到设计数据，也可用于进行紧固件的筛选。当进行试验时，图 7.5.2.3.2(b)所示的试件几何形状趋于发生复合材料的挤压破坏（相对于拉伸和劈裂破坏）。应该指出这种试件形式不是纯挤压，而且还有旁路载荷，于是在两个搭接板中有拉伸应变。对于标准中规定的构型，拉伸旁路应变水平将是小量；然而，应当检验形式的任何变化，确保旁路应变不大于 0.2%，以防两个搭接板的拉伸破坏。虽然没有认可把紧固件拉脱和紧固件破坏作为衡量复合材料挤压强度的尺度，但这确实对特定紧固件类型连接强度提供了度量的标准。

图 7.5.2.2.2(a)的单钉和图 7.5.2.3.2(b)的双钉试件，二者都可用于金属与复合材料的连接试验。可以为单搭接情况机械加工出一个单片的金属舌形件，或者可以把加强板按照尺寸粘贴到一个金属片条上，以便使载荷路径对准两个加强板之间的界面。

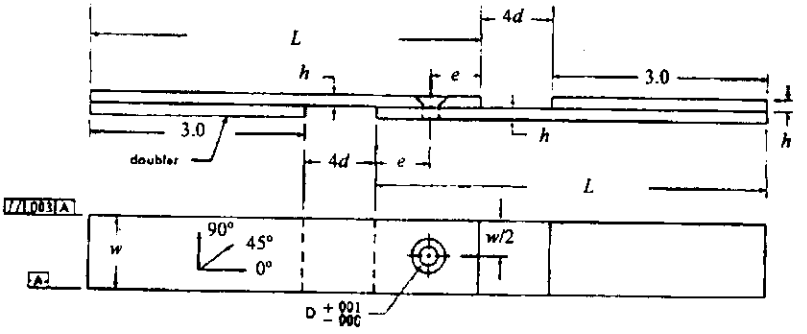
试验的限定：

- 填隙垫片许用值——本标准并没有讨论在复合材料搭接板之间采用填隙垫片来模拟实际连接中的配合间隙。正如 7.5.2.5 节所讨论的那样，填隙垫片厚度对挤压强度影响很大。通常的航空和宇航应用实践是，在搭接板之间安放一个未胶接的铝垫片，其厚度等于飞机结构中允许的液体垫片 0.76 mm（0.03 in）。

ASTM D 5961/D 5961M
图注：
1　按照 ANSI Y14.5M-1982 解释图；并符合以下：
2　全部尺寸以 in 计，具有如下十进位的容差：

.x	.xx	.xxx
±.1	±.03	±.01

3　全部角度容差±0.5°；
4　铺层取向相对于-A-推荐在±0.5°内（见 6.1 节）；
5　机加侧面的光洁度不超过 6.4 √（符号符合 ASA B46.1,粗糙度的高度以μin 计）；
6　下面提供的值，针对视图区的任何范围：材料铺层，铺层取向整个长度上相对于-A-，孔径、沉头细节、试样厚度、加强片材料、加强片的胶。



参数	标准尺寸，in
紧固件或销钉直径，d	0.250+0.000/-0.001
孔直径，D	0.250+0.001/-0.000
厚度范围，h	0.125-0.208
长度，L	5.5
宽度，W	1.5±0.03
端距，e	0.75±0.03
沉头	无（可选）

图 7.5.2.3.2(a)　单剪试件图样（in-lb）（双钉试件的细节见图 7.5.2.3.2(b)）

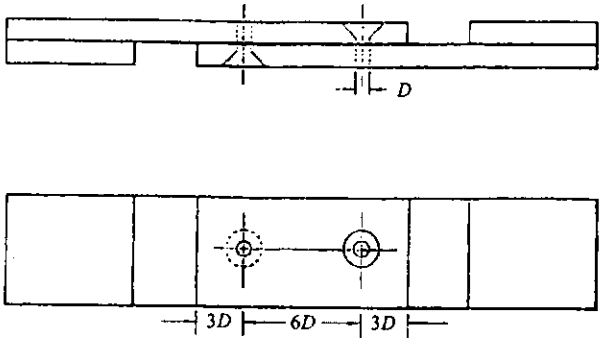


图 7.5.2.3.2(b)　单剪双钉试件略图

7.5.2.4　推荐的接头挤压试验矩阵

本节介绍了为得到单剪或双剪搭接连接的挤压强度设计值所需的试验矩阵。在试验矩阵中嵌入了较小的矩阵，其所得试验数据可用于紧固件的选择和筛选。如果实际连接形式是双剪，推荐的试验方法与试件见 ASTM D 5961 方法 A；而对于单剪连接情况，则推荐使用双钉试件和 ASTM D 5961 方法 B。

挤压强度与连接几何形状、连接元件刚度及紧固件刚度有关。应当指出，对于具有 20%-40% 0°层、40%-60% ±45°层的 0/±45/90 族层压板，其挤压强度基本上是常数。此外，紧固件的特性，诸如夹持力和钉头及钉尾的形状，都有明显的影响。然而，对于某个具体的层压板族、某种具体的紧固件和等厚度单层的连接元件，其影响最大的参数是 t/D。这一点已被飞机设计人员认识到，因而在 MIL-HDBK-5 中是用参数 t/D 给出金属的挤压数据的。图 7.5.2.4（文献 7.5.2.4）中，无量纲曲线的斜率就是挤压强度，它随 t/D 的增加而减小，直到层压板足够厚以致发生螺栓剪切破坏为止。采用所推荐的试件、方法和试验矩阵，将对复合材料连接得到等价的数据。

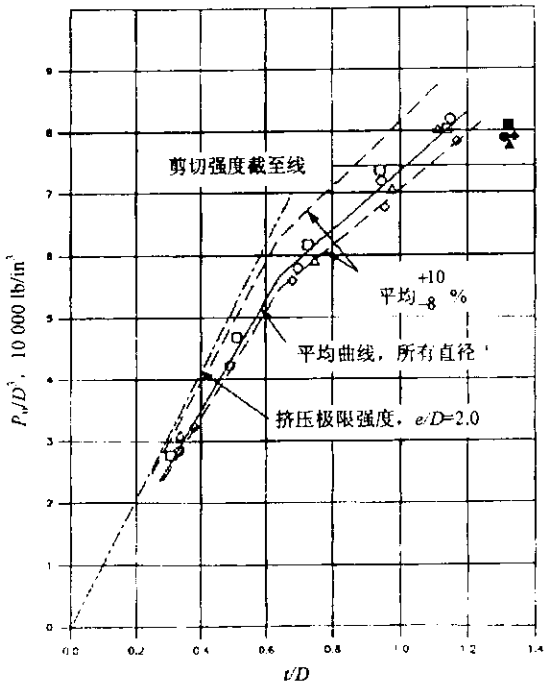


图 7.5.2.4　平均设计-载荷强度

在设计过程中会出现一些情况，其连接的形式可能与这里所推荐的试验件构型不同，即不等厚的连接元件、间隙、固体垫片、燃油密封措施。应当根据需要修改试件的几何形状，来评价这些参数对挤压强度的影响；仍然可以利用这里所介绍的试验方法。

对于复合材料-复合材料的螺栓连接，推荐的单剪挤压强度试验矩阵见表 7.5.2.4(a)，相关试件的几何形式见图 7.5.2.3.2(b)。

从表 7.5.2.4(a)的整个试验矩阵所得到的试验数据，对于在一种材料和一紧固件类型的复合材料-复合材料的机械连接设计中防止挤压破坏而言，是足够的。对于其他紧固件，加上注解(1)的那些试验后应足以提供可用于其他未试验情况的修正系数，这些试验被标记为

由紧固件供应商进行的试验或筛选试验。对于筛选试验，除了 t2 厚度的试件外还示出了第三种厚度（t3）的试件，以便能有足够的数据来构造图 7.5.2.4。对于复合材料，这种标准化的图只对某种具体层压板的挤压数据才有效。

表7.5.2.4(a) 复合材料-复合材料机械紧固连的接挤压强度试验矩阵

几何特性	蒙皮元件厚度 mm（in）	铺 层	螺栓直径 mm（in）	环 境（温度/%湿度）	试验数量
复合材料与复合材料	5 (0.2)	(25/50/25)	6.4(0.25)	RT/大气环境	10[1,2]
			D2	RT/大气环境	5[1]
	5 (0.2)	(50/40/10)	6.4(0.25)	RT/大气环境	5
			D2	RT/大气环境	5
	t2	(25/50/25)	6.4(0.25)	RT/大气环境	5[1]
			D2	RT/大气环境	5[1]
	t2	(50/40/10)	6.4(0.25)	RT/大气环境	5
			D2	RT/大气环境	5
	t3	(25/50/25)	6.4(0.25)	RT/大气环境	仅5[1]
			D2	RT/大气环境	仅5[1]
复合材料与复合材料	5 (0.2)	(25/50/25)	6.4(0.25)	湿/热	5
			D2	湿/热	5
	5 (0.2)	(50/40/10)	6.4(0.25)	湿/热	5
			D2	湿/热	5
	t2	(25/50/25)	6.4(0.25)	湿/热	5
			D2	湿/热	5
	t2	(50/40/10)	6.4(0.25)	湿/热	5
			D2	湿/热	5

注：[1] 供应商紧固件筛选试验；

[2] 包含 5 个附加试验，在元件之间有 0.76±0.08 mm（0.03±0.003 in）液体填隙垫片；

单剪结构形式按照图 7.5.2.3.2(b)，或双剪结构形式按照图 7.5.2.2.2(a)。

试验应当在室温常态情况和一种湿热条件下进行。应当在将试件预浸润达到平衡吸湿量后，再进行湿热试验（见 2.2.7.2 节）。对湿热试验所推荐的温度是 T_g–28°C（T_g–50°F），基于玻璃化转换温度。在试件预浸润后进行湿热试验。

在设计的试验矩阵中，对每种厚度都有两种不同的复合材料铺层，从准各向同性的铺层$(45/0\text{-}45/90)_{ns}$，到在受载方向含 50%0°层的$(45/0/\text{-}45/90/0_2/45/0/\text{-}45/0)_{ns}$铺层。对于织物材料，后一层压板的铺层百分比修正为(40/20/40)。另一厚度（t2）和螺栓直径（D2）则未作规定，应当根据应用情况加以选择。应当试验两种环境情况，按接受时的室温情况和湿热情况。湿热情况的温度和吸湿量选择，应当遵从 2.2.8 节的指导。

可以用 6.4 mm（0.25 in）直径螺栓 5mm（0.2 in）厚准各向同性铺层的基准情况，来评价两个元件间 0.8 mm（0.03 in）或更厚液体垫片间隙的影响（见注解(2)并见 7.2.5.1 节）。如果不把垫片粘接到复合材料上，可用金属垫片代替液体垫片。

对于复合材料-金属的螺栓连接，所推荐的单剪挤压强度试验矩阵见表 7.5.2.4(b)。在复合材料-复合材料连接情况下得出的一般结论也可用于复合材料-金属的螺栓连接，因为其试验矩阵是一样的。对于钉尾的设计而言，复合材料-复合材料连接要比复合材料-金属连接更关键；因此，对于紧固件供应商评价紧固件来说，复合材料-复合材料连接的试件更为有用。基于上述理由，已经规定表 7.5.2.4(b)的注解(1)为不同紧固件所需要的试验。

表 7.5.2.4(c)列出了所推荐的疲劳矩阵。建议按应力比 R = -0.2（压缩载荷是拉伸载荷的 20%）进行等幅疲劳试验。选择的加载频率应避免试件的连接区域过热，对于目前的材料体系，这解释为频率可以达到 5 Hz。应当对所考虑的每种紧固件重复这个试验矩阵。每次试验 15 个试件，取 5 个应力水平，每个应力水平分配 3 件。取静强度的一半将是个好的起点。所有试验都应当在室温/大气环境下进行。

已指定规定厚度和螺栓直径的试件（t=5 mm（0.2 in），D=6.4 mm（0.25 in））以发生挤压破坏。试件选择应当以保证挤压破坏并避免螺栓剪切破坏、或者复合材料或金属元件的净拉伸破坏为原则。

表7.5.2.4(b)　复合材料与金属机械紧固连接的挤压强度试验矩阵

几何特性	蒙皮元件厚度 in(mm)	铺　层	螺栓直径 mm(in)	环　境（温度/%湿度）	试验数量
复合材料与金属	5 (0.2)	（25/50/25）	6.4(0.25) D2	RT/大气环境 RT/大气环境	10[1,2] 5[1]
	5 (0.2)	（50/40/10）	6.4(0.25) D2	RT/大气环境 RT/大气环境	5 5
	t2	（25/50/25）	6.4(0.25) D2	RT/大气环境 RT/大气环境	5[1] 5[1]
	t2	（50/40/10）	6.4(0.25) D2	RT/大气环境 RT/大气环境	5 5
复合材料与金属	5 (0.2)	（25/50/25）	6.4(0.25) D2	湿/热 湿/热	5 5
	5 (0.2)	（50/40/10）	6.4(0.25) D2	湿/热 湿/热	5 5
	t2	（25/50/25）	6.4(0.25) D2	湿/热 湿/热	5 5
	t2	（50/40/10）	6.4(0.25) D2	湿/热 湿/热	5 5

注：[1] 备用的紧固件试验；

[2] 包含 5 个附加试验，在元件之间有 0.76±0.08mm（0.03±0.003in）液体填隙垫片；

单剪结构形式按照图 7.5.2.3.2(b)。

表7.5.2.4(c)　机械紧固连接挤压疲劳试验矩阵

几何特性	厚　度	铺　层	试验总数量
复合材料与复合材料	t1	（25/50/25）	15[1]
	t1	（50/40/10）	15
复合材料与复合材料	t1	（25/50/25）	15[1]
	t1	（50/40/10）	15

注：[1] 供应商紧固件筛选试验；

[2] 常幅疲劳（R = -0.2）试验到单孔孔伸长 4%为止。

试件几何形与静力试验一样。

7.5.2.5　厚度/间隙/加垫的影响

虽然在大多数复合材料应用中，采用胶接连接对重量似乎更有效，但是，由于螺栓连接具有较高的可靠性和可以重新装配的优点，仍然占主导地位。在复合材料结构的装配中，匹配面之间将会出现间隙，在拧紧紧固件之前需要处置这些间隙。在安装紧固件将未加垫的过大间隙合拢时，可能引起复合材料结构的分层，然而剩余的任何尺寸的间隙都会降低连接性能。

试验数据表明，复合材料螺栓连接的强度部分取决于螺栓直径、复合材料厚度、加垫的间隙厚度和所用加垫材料的类型。图 7.5.2.5(a)和(b)举例说明了在多钉连接的单剪复合材料中，直径厚度比和加垫的间隙对强度降低的影响。这些并不是通用的曲线，需要对具体使用者的应用情况，形成相似的数据。然后，用折减系数来降低名义的许用挤压应力。具体材料体系的名义许用挤压应力值，是采用使螺栓弯曲最小、可得到整个厚度方向均匀应力的的试件形式（大直径厚度比的连接板或者多钉试验），并考虑了所有适当的统计和环境降低影响而得到的。采用液体垫片填补间隙的连接，其连接强度减缩系数要大于采用金属或复合材料实心垫片的情况。

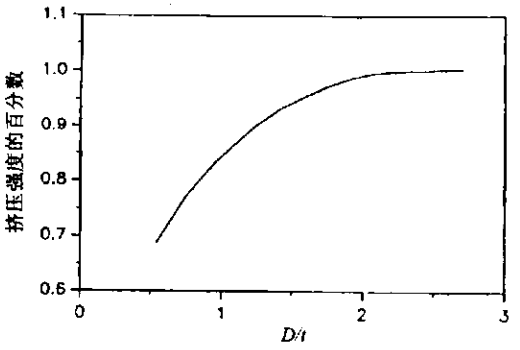


图 7.5.2.5(a)　挤压强度随 D/t 变化的曲线

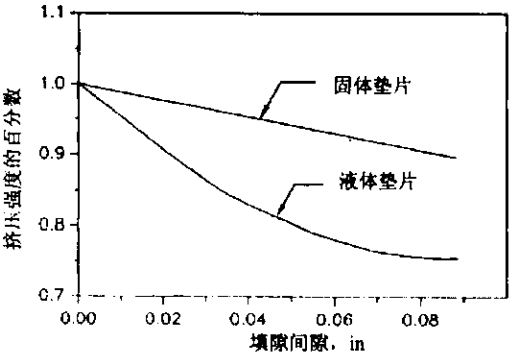


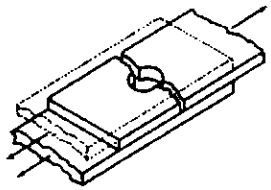
图 7.5.2.5(b)　挤压强度随间隙变化的曲线

7.5.2.6　失效模式

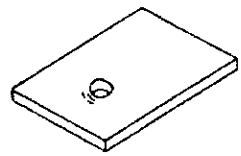
图 7.5.2.6(a)-(d)示出了各种失效模式的说明。

层压板破坏	L-NT	层压板净截面拉伸破坏
	L-NC	层压板净截面压缩破坏
	L-OC	层压板偏移压缩破坏
	L-BR	层压板挤压破坏
	L-SO	层压板剪脱破坏
	L-MM	组合破坏
	L-PT	（层压板允许的）紧固件拉脱破坏
钉头/套环破坏	F-HD	钉头凹陷
	F-FS	钉凸缘剪切破坏
	F-HS	钉头、盲头或成形头剪切破坏
	F-BH	钉盲头变形
	F-NF	钉套环断裂破坏
	F-NS	钉套环脱扣
钉杆破坏	F-STH	在钉杆/钉头或成形头结合处拉伸破坏
	F-STT	钉杆在螺纹处拉伸破坏
	F-ST	钉杆拉伸破坏
	F- SST	钉套或芯杆拉伸破坏
	F- SSH	在钉杆/钉头结合处的钉杆剪切破坏
	F- SS	钉杆剪切破坏

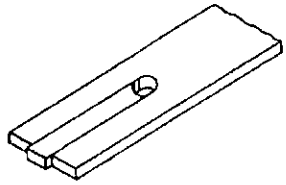
图 7.5.2.6(a)　机械紧固连接失效模式描述



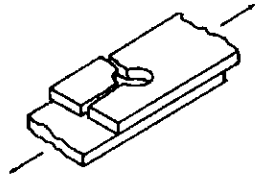
层压板净截面拉伸（压缩）破坏



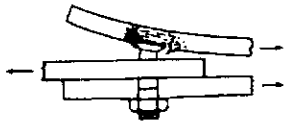
层压板挤压破坏



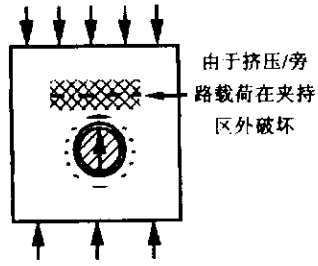
层压板剪脱破坏



组合型破坏（不适于获得数据）

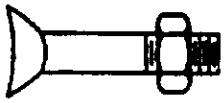


紧固件拉脱（或部分拉脱）破坏

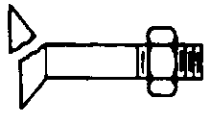


层压板钉孔外压缩破坏

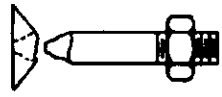
图 7.5.2.6(b)　机械紧固连接失效模式描述



F-HD：钉头凹陷

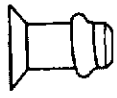


F-FS：钉头剪切破坏

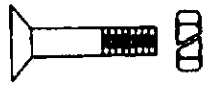


F-HS：钉凸缘剪切破坏

F-HS：盲头或成形头剪切破坏



F-BH：钉盲头变形



F-NF：钉锁环断裂破坏

F-NS：钉锁环脱扣

图 7.5.2.6(c)　机械紧固连接失效模式描述

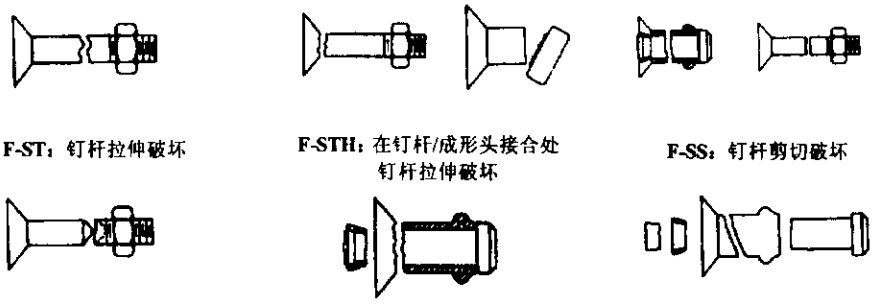


图 7.5.2.6(d) 机械紧固连接失效模式描述

7.5.3 挤压-旁路评估

7.5.3.1 概述和基本原理

对于含有螺栓连接的复合材料结构设计，如果连接的某个螺栓传递的载荷大于总载荷的 20%，可能需要进行试验验证。本节的目的是对怎样得到这些数据提供指南。特别地，本节说明了试件几何形状、试验方法和试验矩阵，足以对事先已知材料的变异和环境依赖性，按 B 基准值的显著度，实验地确定图 7.5.1.3 中的试验曲线 AC 和 EC′。

正在建立一些解析方法，例如文献 7.5.3.1，以便减少试验的要求。对于以净截面拉伸失效模式为特征的净拉伸/旁路象限（直线 AC），已经取得了进展。对于这种失效模式，利用挤压/旁路组合载荷的线性干涉作用，得到了良好的相关关系。

7.5.3.2 试件设计和试验

航空工业界已经利用各种试件和方法来得到挤压/旁路强度。所有这些可以分为三大类：(1)被动的；(2)独立的螺栓加载；和(3)耦合的螺栓载荷/旁路载荷。在被动方法中，载荷通过螺栓传递到一个附加板中，如图 7.5.3.2(a)所示。这样，所传递载荷的大小，从而该挤压/旁路比，就与金属板刚度和螺栓安装细节有关。如果没有大量的应变片测量，很难确定将传递多大的挤压载荷。没有对载荷传递参数试验验证时，不推荐使用这种方法/试件。因为几何上的限制，这种方法非常适用于通常不超过 40%的低载荷传递情况，此时不会发生显著的干涉作用效应。被动方法的主要优点是，它不需要特殊的夹具，试验本身相当于一个标准的拉伸或面内防失稳的压缩试验。

在耦合的螺栓载荷/旁路载荷方法中，通过连接到试验机上的连杆装置进行加载（图 7.5.3.2(b)）。通过在不同位置安装垂直连杆，试验不同的挤压/旁路比。在每个具体试验中这个比值都保持常数，直到破坏。由于这个限制和试验夹具的复杂性，也不推荐这种方法作为得到挤压/旁路强度的主要方法。

推荐的挤压/旁路试验方法应当以直接测量的螺栓载荷对螺栓独立加载，以便能直接计算挤压应力，而无须求助所连接元件上的应变片读数值进行反推。为实现这个要求，试验夹具需要有与试验机分开的单独载荷传感器，于是使试验设备复杂化。工业界已经发展了专用的试验夹具，在螺栓和试件之间实现同步加载。NASA 的兰利研究中心已建立了一个经认可的试验系统（文献 7.5.3.1）。图 7.5.3.2(c)取自该文献，可以看出该夹具的复杂性。图 7.5.3.2(d)示出了取自文献 7.5.3.1 的一个试件，改进的试件有一个附加孔，如果发生了剪脱破坏就会提醒试验者。这是工业界中所有独立加载试验系统的典型情况。应当指出，对于压缩载荷，要对稳定试件防止屈曲。

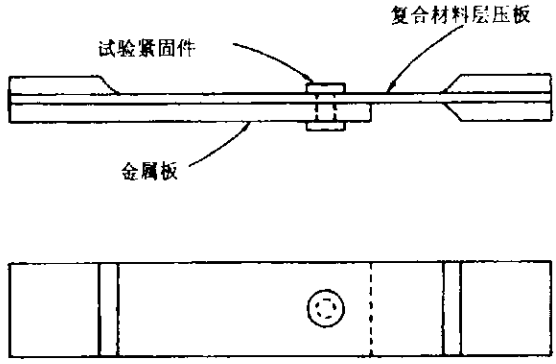


图 7.5.3.2(a)　被动挤压/旁路试件（单剪）

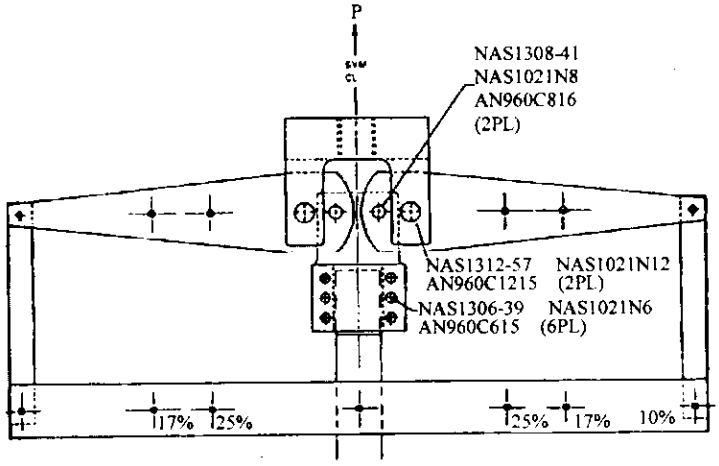


图 7.5.3.2(b)　螺栓挤压旁路试验夹具

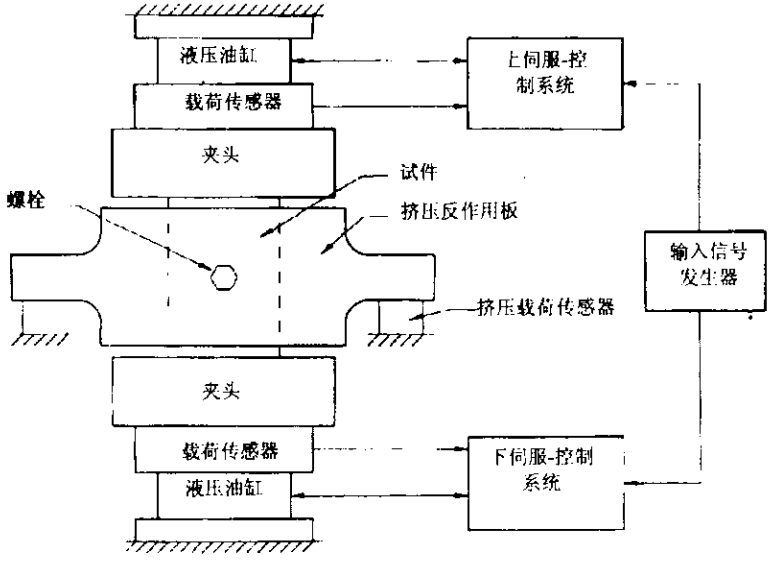
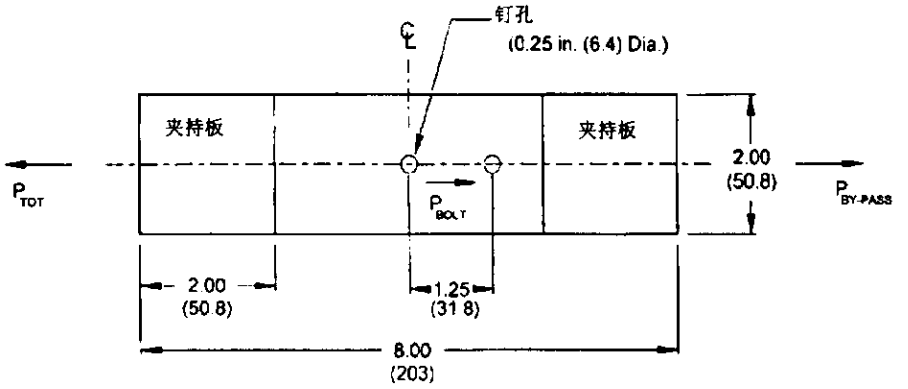


图 7.5.3.2(c)　挤压旁路复合试验系统方框图（文献 7.5.3.1）



所有的尺寸为 in（括号内为 mm）

图 7.5.3.2(d)　挤压旁路试件

7.5.3.3　推荐的挤压/旁路试验矩阵

对于某一种具体的聚合物基复合材料，为构造如图 7.5.1.3 所示挤压/旁路相关曲线所需要的最小试验要求见表 7.5.3.3。这个试验矩阵假定，端点（A 和 E）已经、或者将要由 7.4 节推荐的无钉载缺口拉伸/压缩试验得到。还假定，点 C 和 C′将由挤压强度试验得到，单剪按照 7.5.2 节给出的方法，双剪按照 7.2.4 节给出的方法。因为在表 7.5.3.3 中没有规定室温以外的环境试验，所以，要从相关曲线的端点推导出环境对挤压/旁路强度的影响，所用的层压板与 7.4.2 和 7.4.3 节一样。为完整起见，层压板铺层应当是：对于 10/80/10 铺层比例，采用$[+45/0/-45/(\pm45)_3/90]_{ns}$*，对于 25/50/25 比例，采用$[+45/0/-45/90]_{ns}$*，对于 50/40/10 铺层比例，采用$[+45/0/-45/90/0_2/+45/0]_{ns}$*。

为了满足表 7.5.3.3 的试验要求，试件和方法应当采用单螺栓加载的方式，即如文献 7.5.3.1 节所介绍并如图 7.5.3.2(c)和(d)所示的那样，或者与之相类似。这个试验矩阵可用于单剪连接或双剪连接的情况。在结构中存在这两类连接的情况下，试验矩阵应当重复。

表7.5.3.3　挤压/旁路试验矩阵

铺　层	环　境（温度/%湿度）	拉　伸		压　缩		试验总数
		挤压/旁路比		挤压/旁路比		
		0.75	0.50	0.75	0.50	
10/80/10	室温/大气环境	5	5	5	5	20
25/50/25	室温/大气环境	5	5	5	5	20
50/40/10	室温/大气环境	5	5	5	5	20
总　数		15	15	15	15	60

7.5.3.4　数据处理

缺口拉伸和挤压试验的数据处理方法可用于挤压/旁路试验情况。像挤压试验一样，应当得出钉载-位移曲线。此外，必须纪录总的旁路载荷，也必须说明破坏的模式。

7.5.4　剪脱强度

材料的剪脱强度是其能够抵抗图 7.5.1.2 所示剪脱破坏的能力。复合材料的连接设计通常都避免这种失效模式。然而，如果边距减小到小于典型的 3 倍钉径（3*D*），则 7.2.4 和

* 译者注：铺层似有误。

7.2.5 节的挤压试件可能会出现剪脱破坏。于是，就把这些试件和方法用于确定剪脱强度。剪脱强度是基于毛面积按照 $P/2et$ 计算的。关于 e，D 和 t 的定义见图 7.5.4(a)。可以选取足够大的端距，和采用适当数量±45°层和 90°层的交替铺层顺序，来避免复合材料连接的剪脱失效模式。事实上，如果不把过多的相同方向铺层集中在一起，在端距为 $3D$ 情况下就绝无可能出现设计中限制的剪切失效模式。另一方面，在某些情况下，特别在返修和修理中，小端距是不可能避免的。因此，即使层压板在名义边距下不发生剪脱破坏，也必须知道层压板抗剪脱破坏的能力。

由于把纯挤压试件用于确定剪切强度，在报告中出现了一些误解；声言是较小的 e/D 值降低了连接的挤压强度。虽然具有小 e/D 比的剪切搭接试件确实在比层压板挤压强度更低挤压应力下出现破坏，但这是因为剪切面处剪脱失效模式比挤压失效模式先发生的结果。

图 7.5.4(b)给出了失效模式如何随着 e/D 和层压板的铺层而变化的关系。在该图中以挤压应力为纵坐标，剪脱应力为横坐标，对在 1.5-2.5 之间的 e/D 值和不同层压板，给出了其破坏试验数据。所示的结果表明，无论挤压应力或比值 e/D 如何，有一个常值的剪脱破坏应力。对于一种层压板，甚至在 e/D=2.5 也达到足够高的连接载荷，连接由于挤压而发生破坏。图 7.5.4(b)的数据还表明，当在一起的同方向铺层从 4 层加倍变为 8 层时，剪脱强度出现下降。图 7.5.4(a)显示了典型的失效模式，一块材料沿纤维方向平行移动，而没有压损螺栓前面的任何纤维。由于这种剪脱失效模式是一种基体破坏，对由于环境出现的退化较为敏感。

还有另外的数据表明，对于沿挤压载荷方向集中铺有 50%或更多铺层的层压板，在同样的方向上出现了剪脱破坏，而无论端距（e）是 $2D$ 或 $8D$ 无关。所以，不能只依靠增加端距来改进高度正交异性板的抗剪脱能力。为了避免剪脱破坏，人们必须避免大量集中相同方向的铺层。结论是，与端距相比，剪脱强度更依赖层压板的铺层比例和铺层顺序。

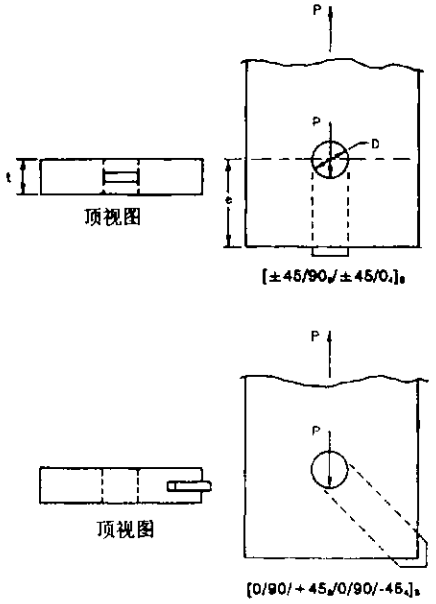
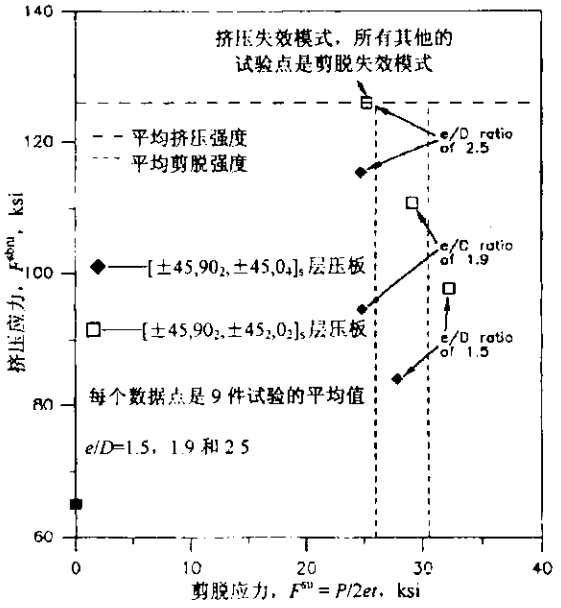


图 7.5.4(a)　剪脱失效模式图



7.5.4(b)　挤压/剪脱试验破坏数据与挤压和剪脱应力的关系——AS/3501-5A，RT，大气环境

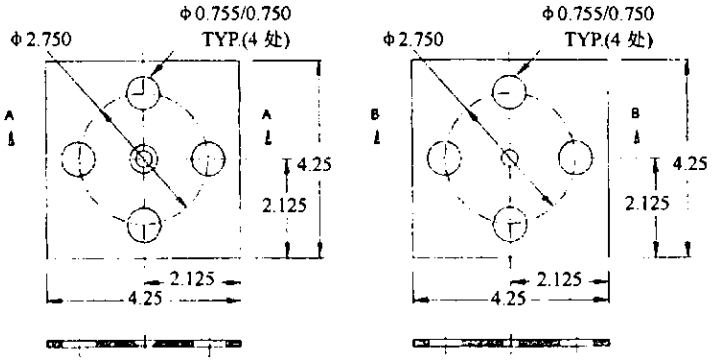
7.5.5 紧固件拉脱强度（MIL-STD-1312 试验方法）

7.5.5.1 范围

本节介绍确定复合材料机械紧固连接时薄板拉脱特性的试验方法。板拉脱强度定义为这样一个载荷水平，即被机械紧固件连接在一起的两块板不再能支持载荷的增加，而沿着与板平面垂直方向被拉脱分离时的载荷。推荐了两种试验方法：一种方法是对 MIL-STD-1312 Test 8 拉伸强度的修改（近来被 AIA 标准委员会采用，标准号为 NAS M 1312），这里详细介绍这种方法，在本手册中称为方法 A。这个方法适用于紧固件的筛选和研制。第二种方法即方法 B 适用于建立设计值，但是这种试验对结构形式的依赖性较大，只能提供一种可能的试验配置草图。这两种方法都能用于对侯选的紧固件/紧固件系统设计（相对于已经确定使用的基本紧固件）进行比较评估。应当了解，这里介绍的试件可能并不代表真实的连接情况，真实的连接可能包含一个或更多个靠近紧固件的自由边或者包含多个紧固件，这些改变了实际的边界条件。

7.5.5.2 试验方法综述

两种试验方法都采用常矩形截面的平板方形试件，在中央位置的圆孔安装一个紧固件，见图 7.5.5.2(a)和(b)。对于方法 A，在试件的周边附近需要 4 个孔与试验夹具配装，见图 7.5.5.2(c)。另外，由图 7.5.5.2(a)所见，方法 A 需要两个方板，这两块板由紧固件连接在一起，其中一块板相对另一块旋转 45°，见图 7.5.5.2(d)。这两块板被压缩载荷撬开，压缩载荷通过图 7.5.5.2(c)的夹具传递，形成紧固件上的拉伸载荷和复合材料板上的压缩载荷。方法 B 中只有一块板连接到耳叉上，见图 7.5.5.2(e)。通过耳叉对紧固件施加拉伸载荷，对连接形成一个拉脱力。



A-A 剖面（上部试件）　　B-B 剖面（下部试件）

100°拉伸头

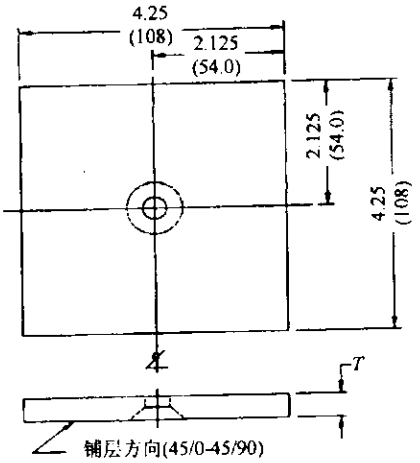
钉杆直径	T (1)
5/32	0.096
3/16	0.111
4/1	0.150
5/16	0.190
3/8	0.229

130°剪切头

钉杆直径	T (1)
5/32	0.055
3/16	0.061
4/1	0.080
5/16	0.106
3/8	0.127

注：(1) 对于 100°和 130°沉头紧固件拉伸试验，“T”是推荐的最小试件厚度。
厚度尺寸代表标准设计准则，允许沉头的最大深度等于板厚度的 70%。

图 7.5.5.2(a)　方法 A 的紧固件拉脱试验平板试件



名义钉杆直径	100°(1)拉伸头 T	130° (1)剪切头 T	间隙孔
5/32	0.096	0.055	1.312
3/16	0.111	0.061	1.500
4/1	0.150	0.080	2.000
5/16	0.190	0.106	2.500
3/8	0.229	0.127	3.000

注：(1)“T”是对于100°和130°沉头紧固件推荐的试件最小厚度。

厚度尺寸代表标准设计准则，允许沉头深度最大达到半厚度的70%。

全部尺寸以in（mm）计。

图 7.5.5.2(b)　方法 B 的紧固件拉脱试验板

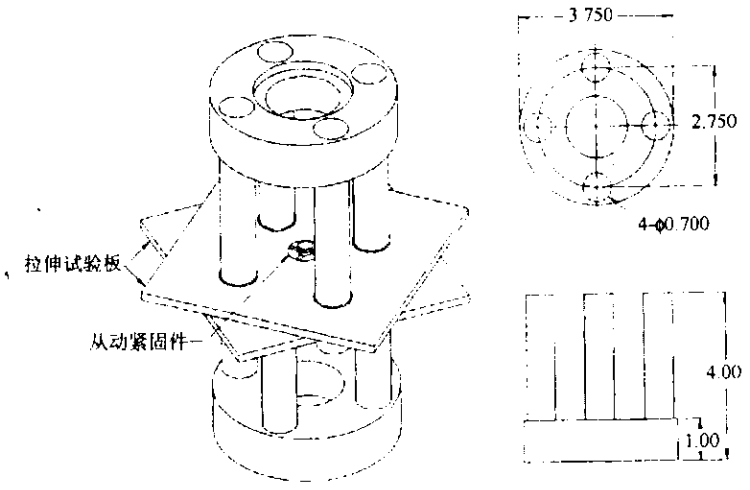


图 7.5.5.2(c)　方法 A 的紧固件拉脱试验夹具

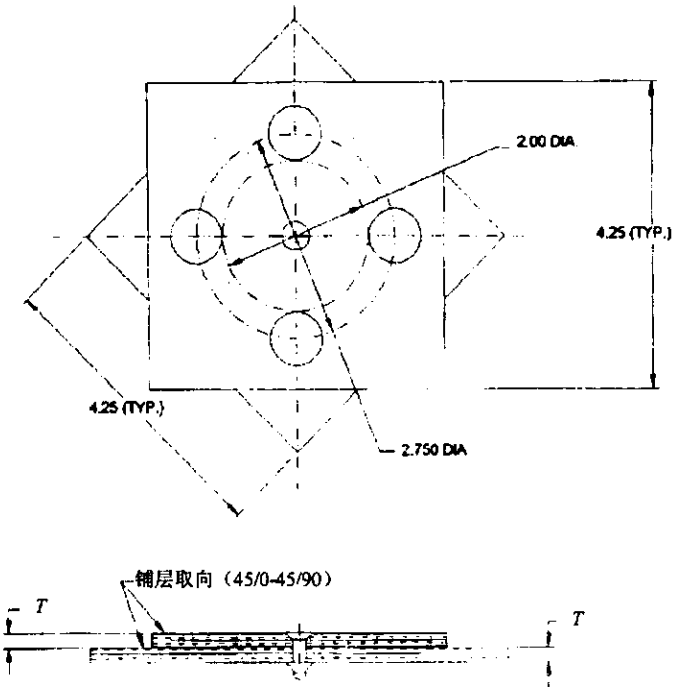


图 7.5.5.2(d)　方法 A 的试验件组合

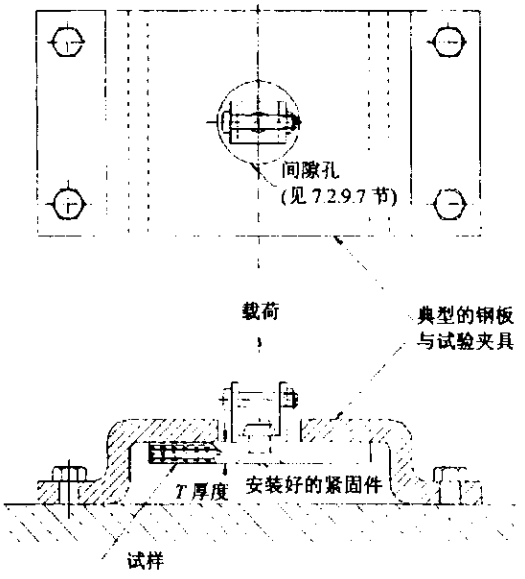


图 7.5.5.2(e)　方法 B 的紧固件拉脱试验夹具

两种方法中都对作用载荷和相应的位移进行监测。图 7.5.5.2(f)示出了典型的载荷-位移曲线。或者用相应的十字头相对位移或者用引伸计来测量位移。载荷-位移曲线上观察到的第一个峰值载荷就定义为结构的失效载荷。

由于大多数试验室拥有图 7.5.5.2(c)所示的夹具，故方法 A 的试验较容易进行。唯一要注意是正确安装试验的紧固件。此外，复合材料板必须足够刚硬，以便能传递夹具的压缩载荷，且不会有过分的板弯曲或挤压损伤。

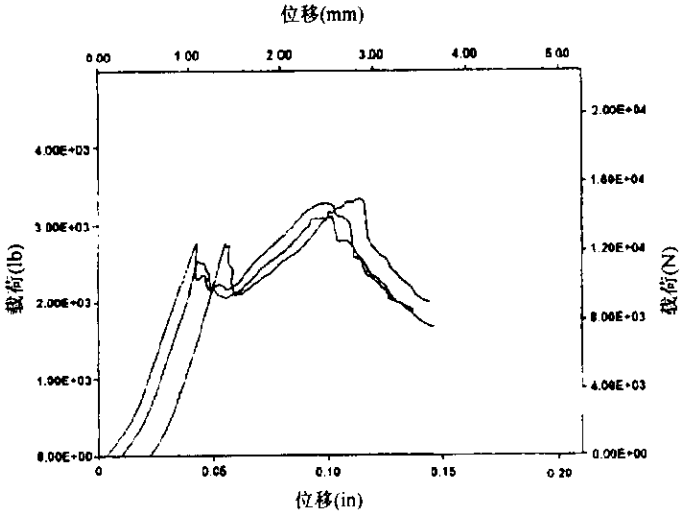


图 7.5.5.2(f) 典型的载荷-位移曲线

7.5.5.3 重要性

聚合物基复合材料在横向上是很弱的，因此，通过试验获得其拉脱性能要比金属机械连接更为紧要。早期的试验采用金属结构常用的紧固件，致使连接过早破坏，由此研制了复合材料专用的紧固件。这些紧固件具有较大的钉头和钉尾，以便减小对复合材料层压板的横向压缩应力。在复合材料结构设计和验证中，确定一个具体复合材料/紧固件连接设计的拉脱强度已成为常规的要求。

除了确定一个具体复合材料/紧固件组合的拉脱强度外，还能用这些方法来评价不同的紧固件零件，比如螺栓/螺母、销/套环或者垫圈，使之满足拉脱强度要求。

7.5.5.4 设备

- 试验机——应当采用能按照 ASTM E8（文献 7.5.5.4(a)）指南要求的可控加载速率、施加拉伸和压缩载荷的万能试验机。试验机的标定系统应当符合 ASTM E 4；每 12 个月按照 ASTM E 4（文献 7.5.5.4(b)）的方法进行其精度校准。紧固件/连接的最大破坏载荷应当在 ASTM E 4 定义的试验机载荷范围内。
- 位移测量——应当自动记录载荷-位移响应曲线图。应当安装可移动传感器以测量可动加载横梁和不动的横梁之间的相对位移。如果采用测量装置，应当是一种平均、差动传感引伸计或等同物。这个装置应当与自动图形记录仪一起使用，其精度能在预期连接强度的 70%载荷水平时达到所指示连接变形的 0.5%，并按照 ASTM E 83（文献 7.5.5.4(c)）进行标定。应当采用的载荷和变形范围是，其载荷-拉伸曲线的初始部分具有的斜率在 45°-60°之间。对于每个试验组（试验组定义为有同样的结构形式、紧固件类型和尺寸及其基准对应物），载荷和变形量程以及比例应当保持不变。
- 试验夹具——筛选试验的试验夹具应当如图 7.5.5.2(c)所示，能够把压缩载荷传递到试件上。夹具平行度应在 15′以内，并能够把试件加载到紧固件破坏且无局部的压缩变形。图 7.5.5.2(e)所示为一个较有结构代表性的试验简图，它需要一个能施加拉伸载荷的加载单元。

7.5.5.5 试件

对于方法 A，试件构型应当符合图 7.5.5.2(a)，或者对于方法 B，试件构型应当符合图 7.5.5.2(b)。对于方法 A，复合材料的铺层应当与图 7.5.5.2(d)相似。铺层的取向提供了（25%，50%，25%）分布的准各向同性均衡层压板。对方法 B 的铺层未作规定，应当尽量模拟实际应用的情况。

7.5.5.6 试件装配

- 紧固件装配——紧固件的安装应当按照制造商的建议，或按照适当的工艺规范。
- 夹持长度——选择的紧固件夹持长度，应当保证整个钉杆在试件的整个厚度上受到挤压。应当在最小和最大夹持条件下，试验钉尾受载的紧固件，钉尾在装配期间成形并靠压复合材料的试验表面，这是因为各个夹持情况的有效的挤压面积可能不同。

  对于（具有已制成钉头的）紧固件与（其形状不会改变而影响试验挤压面的）螺母或套环联合使用的情况，应当在标称的夹持条件下进行试验。
- 沉头——除非另有规定，沉头紧固件的安装距离复合材料表面应当不超过±0.1mm（±0.005 in）。

7.5.5.7 试验矩阵

表 7.5.5.7 列出了推荐用于紧固件筛选和研制的试验矩阵。与这个试验矩阵一起使用的是方法 A 的试验件（图 7.5.5.2(d)），这个矩阵代表了一种紧固件形式所需的试验。试验应当在室温、大气环境和湿热条件下进行。后者定义为复合材料的最高温度和吸湿量（见 2.2.8 节）。对于不同的紧固件、钉头或钉尾形式和安装孔间隙，要重复这个试验矩阵。在表 7.5.5.7 中，1 类专用于干涉配合；2 类针对飞机质量，通常是+0.08 mm（+0.003 in）；3 类针对间隙配合。

对于图 7.5.5.2(e)（方法 B）的试验，应当建立一个类似于表 7.5.5.7 的试验矩阵。然而，因为试验主要面向设计，需要试验的变量较少，应当有 5 个重复件。

表7.5.5.7 紧固件拉脱试验矩阵

几何特性	复合材料板厚 mm（in）	铺 层	标称钉杆直径 mm（in）	安装孔级别	环 境（温度/%湿度）	试 验 数量(1)
复合材料与复合材料	4.83（0.190）钉头一侧	25/50/25	6.35（0.250）	Class 2	RT/大气环境 湿/热	5 5
复合材料与复合材料	3.05（0.120）钉尾一侧	25/50/25	6.35（0.250）	Class 2	RT/大气环境 湿/热	5 5
复合材料与金属 (2)(金属在钉头一侧)	4.83（0.190）	25/50/25	6.35（0.250）	Class 3	RT/大气环境 湿/热	5 5
复合材料与金属 (2)(金属在钉尾或螺母一侧)	4.06（0.160）	25/50/25	6.35（0.250）	Class 2	RT/大气环境 湿/热	5 5

注：(1) 每种适用的夹持条件（见 7.2.9.4 节）

(2) 可以改变金属厚度以适应紧固件的夹持长度

7.5.5.8 报告

试验结果应当说明破坏载荷，载荷-变形曲线和所观察到的失效模式。

7.5.6 复合材料中的紧固件验证试验

7.5.6.1 概述

复合材料螺栓连接设计的第一步，是辨别适用于复合材料的那些紧固件。因为试验将对连接强度给出好的估计，用本节提出的试验得到的数据，将为这选择提供一个扎实的基础。复合材料需要有（比金属）底脚更大的紧固件，特别是对于抽钉，这里所介绍的试验将审查这种特征。在选择紧固件之后，需要7.5.2和7.5.6节所包含的附加试验数据，以便对其他的层压板和（与具体紧固件特性无关的）失效模式，进行螺栓连接设计。

已从 7.5.2 和 7.5.6 节中摘录了试验的要求和方法，可以从那些节中得到试验方法的细节。对复合材料中的紧固件取证仅用一种（准各向同性）层压板，但有多种厚度。另外，试验仅限于室温情况，因为环境对紧固件的影响不像对复合材料那样严重。这个试验计划假定所连接的两块板都是复合材料的。如果试图将某种特定的紧固件用于金属/复合材料组合情况，应当对该种结构形式进行试验。这个试验矩阵反映了受紧固件特性影响最大的两个性能：连接的挤压和拉脱强度。建议首先进行拉脱试验，以确定紧固件对复合材料的适用性。一旦这个性能被满足，就可进行较广泛的挤压试验。在飞机工业中，还有一个由飞机制造商和认证机构提出的要求，即需由紧固件制造商以外的某个机构，进行 25%的挤压和拉脱试验。为了把数据包括到 MIL-HDBK-5 中，该紧固件至少必须被一个飞机制造商使用。为了完整起见，虽然这些性能与连接元件无关，也将紧固件的剪切和拉伸强度试验要求包括在这里。

与碳纤维复合材料一起使用的紧固件应是钛合金、A286 CRES 或蒙乃尔合金，以减小潜在的电化学腐蚀的危险。在一些应用中，特别是宇航应用中，电化学腐蚀不是个问题。这种限制不适用于芳纶和玻璃纤维复合材料。

用这里提出的试验计划所得到的数据，本身并不足以证明其在飞机结构中使用的合格性。为满足完整的紧固件取证要求，还要满足疲劳试验、制造容差研究（夹持长度、底座角度、孔径）等其他标准。

7.5.6.2 紧固件剪切试验

按 MIL-STD-1312 采用钢板进行这些试验，对双剪试验为 Test 13，对单剪试验为 Test 20（文献 7.5.2.3.2）。这里，可以认可以前有效的取证试验数据。

7.5.6.3 紧固件拉伸试验

按MIL-STD-1312 Test 8 采用钢板进行这些试验，试验8件（文献7.5.2.3.2）。这里，可以认可以前有效的取证试验数据。

7.5.6.4 紧固件拉脱试验

应当按照图 7.5.5.2(a)，(b)和(c)来确定拉脱强度的试件形式。试验方法在 7.5.5 节中给出。试验矩阵表 7.5.6.4 需要试验具有应用代表性的 3 种不同直径的紧固件。其中一种直径应当是 6.35 mm（0.25 in）。这可能要求调整层压板的厚度，然而，层压板的铺层必须保持 $[45/0/-45/90]_{ns}$。对所考虑的每种紧固件，都需要重复这试验矩阵。

表7.5.6.4 紧固件拉脱验证试验矩阵[1]

几何特性	复合材料板厚度 mm(in)	铺 层	标称钉杆直径 mm(in)	试验数量[2]
复合材料与复合材料	4.83（0.190）[3] 钉头一侧	（25/50/25）	6.4 (0.25)	5
	3.05（0.120）[3] 钉尾一侧	（25/50/25）	6.4 (0.25)	5
	t2，钉头一侧	（25/50/25）	D2	5
	t2，钉尾一侧	（25/50/25）	D2	5
	t3，钉头一侧	（25/50/25）	D2	5
	t3，钉尾一侧	（25/50/25）	D2	5

注：[1] 所有试验在RT/大气环境下进行，安装孔为Class 2。

[2] 在适用时对每个夹持条件(见7.5.5.4节)。

[3] 对于其他直径可能不同。

7.5.6.5 挤压试验

推荐采用两个螺栓连接的复合材料-复合材料挤压试件，其几何形状见图7.5.2.3.2(b)。这个单剪形式更能代表在工业界出现的多钉连接。采用合适的紧固件，虽然第二个紧固件绕其纵轴可能有明显的旋转，应能达到复合材料挤压破坏。表7.5.6.5列出紧固件验证的试验矩阵。建议采用一种铺层$[45/0/-45/90]_{ns}$的3种不同厚度和3种紧固件直径。其中一种紧固件直径应当是6.35 mm（0.25 in），而另外两种紧固件直径应反映可能的紧固件尺寸范围。为保证数据的最大可用性，选择的其他复合材料元件厚度应当符合如下指南的范围：(1)$0.8<D/t<2$，和(2)沉头深度不应超过层压板总厚度的0.67。试验的目的是对于每种试验的紧固件直径，得到关于挤压应力与D/t比值的一族共三条曲线。对于每种钉径应进行15个数据试验。对所考虑的每种紧固件都需要重复这试验矩阵。

表7.5.6.5 紧固件挤压验证试验矩阵[1]

几何特性	厚 度 mm（in）	铺 层	螺栓直径 mm（in）	试验数量
复合材料与复合材料	5（0.2）	25/50/25	6.4（0.25）	5
	5（0.2）	25/50/25	D2	5
	5（0.2）	25/50/25	D3	5
复合材料与复合材料	t2	25/50/25	6.4（0.25）	5
	t2	25/50/25	D2	5
	t2	25/50/25	D3	5
复合材料与复合材料	t3	25/50/25	6.4（0.25）	5
	t3	25/50/25	D2	5
	t3	25/50/25	D3	5

注：[1] 全部试验在室温大气环境下进行。

7.5.6.6 数据提供

数据的提供形式应当遵照第二卷1.4.2节的指南。此外，对每种试验的紧固件直径，挤压数据应以挤压强度与D/t的关系曲线提供。

7.5.7 提交MIL-HDBK-17数据的挤压/机械连接试验方法

由ASTM D 5961得到的挤压强度试验数据公布在MIL-HDBK-17中，或者是方法A的

双剪值，或者是方法 B 的单剪值。对设计值而言，两个螺栓的试件更能代表实际连接。

没有推荐的挤压/旁路方法，然而，用直接测量旁路载荷的试验方法所得到的数据是 MIL-HDBK-17 可以接受的。

如果用 ASTM D 5961 挤压试验得到剪脱强度，则是 MIL-HDBK 可接受的。必须清楚地观察这些试验的失效模式是剪脱而非挤压破坏。

由 7.5.5 节的方法 A 所得到的拉脱强度数据是可以接受并纳入 MIL-HDBK-17 中的。采用方法 B 得到的数据，虽然可以接受来建立设计值，但可能非常局限于该结构形式而不可用于其他场合。

7.6 胶接连接试验

7.6.1 概述

原则上胶接连接在结构上比机械紧固连接更为有效。胶接连接消除了安装紧固件所需的钻孔，消除了结构中钻孔引起的应力集中。可以用 3 种不同的工艺制造复合材料结构的胶接连接：二次胶接，共胶接和共固化。二次胶接采用一层胶粘剂来粘接两个预固化的复合材料零件，因此，这种形式在结构行为和制造方法上都与金属胶接连接最为相似。共固化是两个零件件同时进行固化的工艺方法，两个零件之间的界面可以有胶层，也可以没有胶层。在共胶接工艺中，一个预固化的零件用胶粘剂与匹配的零件同时固化。对于任何胶接连接来讲，表面准备都是很重要的环节，在进行胶接之前必须予以明确规定，这一点对于二次胶接和共胶接工艺显得特别重要。第三卷的 2.9 节给出了胶接连接制造的更多细节。

本节讨论的胶接连接类型是二次胶接和共胶接。对于这两种连接，胶粘剂的力学性能，特别是刚度性能是设计中不可缺少的。在飞机结构中，设计良好的胶接连接其胶层并不处于临界状态，而被胶接件（不管是金属或复合材料的）却是临界的，但这依然需要知道胶粘剂的剪切和拉伸强度。在许多情况下，复合材料被胶接件是结构合理的层压板，沿主要载荷方向布置了足够数量的铺层，保证其失效模式是纤维控制的。由于无须对纤维提供支持（特别是在压缩载荷下），适当选择的胶粘剂配方使其比复合材料基体的树脂具有更大的韧性，这样，就把连接破坏引向被胶接件。纤维也约束基体，所以基体的行为也比树脂本身更具脆性。这可以把复合材料胶接连接破坏改变为到复合材料层压板厚度方向的横向拉伸破坏。

需要两种不同类型的试验来表征胶接连接行为，并得到所需的足够力学数据以进行结构分析。假设已知复合材料被胶接件的力学性能，为了简单和标准化起见，采用金属被胶接件进行确定胶粘剂性能的试验。这些试验结果可提供用于设计和分析、比较数据和表面制备效率的胶粘剂性能，但是决不能代表复合材料结构胶接连接的强度。这种强度是通过更能代表应用情况的复合材料和/或蜂窝被胶接件构型的试验件得到的。在下面各节将讨论这两种胶接的试验方法。

7.6.2 胶粘剂性能试验

如果要设计成功的胶接连接，就需要胶粘剂的强度和刚度性能。由于胶粘剂的行为是弹塑性的，用极限强度和初始切线模量还不足以表征胶粘剂的特性。所需的数据包括在使

用温度和吸湿环境下的剪切和拉伸应力-应变曲线。

为了得到这些数据，目前工业界所偏爱的试验方法包括：对剪切性能，用 Krieger 率先提出的（文献 7.6.2(a)和(b)）厚板被胶接件试验方法，最后形成 ASTM D 5656；以及对拉伸强度，采用 ASTM D 2095（文献 7.6.2(c)）的杆和棒试件试验。由于各种原因，还没有任何一种试验方法是完全满意的。然而，由于它们已经获得广泛的应用，在本章中援引它们相信还是有益的。

在进行湿态试验以前，使胶接试件的吸湿达到平衡（整个胶层吸湿量均匀）的湿浸润过程需要持续很长的时间——达到几年。这是因为通常胶粘剂的湿扩散率较低，而采用不渗透水的金属被胶接件为试件时，水分只能通过曝露的胶层边缘进入胶粘剂。幸好，胶粘剂的破坏通常起始于胶层边缘，或者由于峰值剪应力，或者由于剥离（拉伸）应力。于是，只要在胶粘剂边缘某个合理的深度内接近于所希望达到的吸湿平衡水平，试验结果就代表了整个胶层达到平衡时的结果。通常的实际做法是，在适当的高温（对于环氧树脂 71-82°C（160-180°F））下，把试验件在需要的相对湿度下曝露 1 000 小时（42 天）以达到这个目的。另外一个确定吸湿对胶粘剂影响的方法是，采用模塑的胶粘剂纯树脂试件进行拉伸和压缩试验。在这种情况下由于整个试件均被曝露在环境条件下，达到平衡的时间显著减少。

7.6.2.1 剪切试验

7.6.2.1.1 ASTM D 5656（厚板被胶接件试件）

本试验方法采用 KGR-1 引伸计，引伸计安装在如图 7.6.2.1.1(a)所示几何形状的试件上。图 7.6.2.1.1(b)显示了用这种试验在不同温度下对某种胶粘剂所得到的典型数据。因为 KGR-1 设计并采用铝合金被胶接件，故试验方法被限为最高 150°C（300°F）。对于温度更高的应用情况，可采用钛合金被胶接件以提高这方法的可用温度。

如何用胶粘剂的剪切模量来解释图 7.6.2.1.1(b)的剪应力-应变曲线，一直是众多论文的议题。Krieger 在文献 7.6.2(a)中提到，只要对被胶接件的变形进行小的修正，就可得到胶粘剂的性能，并且只要采用三个点来表征应力-应变曲线，就确定了用特定胶粘剂设计胶接连接时所需的全部信息。这三个点如图 7.6.2.1.1(c)所示。Kassapoglou 和 Adelmann 在文献 7.6.2.1.1(a)中，对试验方法和相关的测量装置进行了更深入的分析。他们发现，这种方法对于软的胶粘剂具有合理的精度，但建议对其他情况要作一些修正。然而，他们的结论仅限于弹性范围，同时认为这个方法较好适合于塑性区（大变形）的应力-应变响应测量。文献 7.6.2.1.1(b)采用莫尔云纹干涉技术证实了 Krieger 的测量，但是发现这个方法对于加载偏心敏感，引起提前破坏和模量测量出现较大分散性。如果所关心的数据是初始切线模量，文献 7.6.2.1.1(b)还建议在胶层几何中心处采用应变片代替 KGR 引伸计。

对于胶接连接应力分析，有时把图 7.6.2.1.1(b)示出的剪应力-应变曲线简化为完全弹-塑性材料响应，如文献 7.6.2.1.1(c)所介绍那样。于是，由厚板被胶接件试件得到的应力-应变数据虽然不是百分之百正确，但对于目前的设计和分析方法仍具有足够的精度。

7.6.2.1.2 ASTM E 229（管状试件）

另外一个获得剪切强度和刚度的方法是，采用承受扭矩载荷的圆管试件。试验的基础是一个沿周向施加均匀剪切载荷的窄胶粘剂环孔。因为圆管的厚度与它的直径相比很小，可认为整个厚度上的剪应力是常数。虽然试验提供了纯剪切分布，但是试验设备复杂，需

要专门的试验技能，所以这种方法不为人们采用。利用圆管试件的一种方法是 ASTM E 229 标准试验方法（文献 7.6.2.1.2），该方法采用了大直径的窄胶接圆管，并用 Amsler 镜式引伸计来测量扭转的角度，在该标准中描述了试验细节。

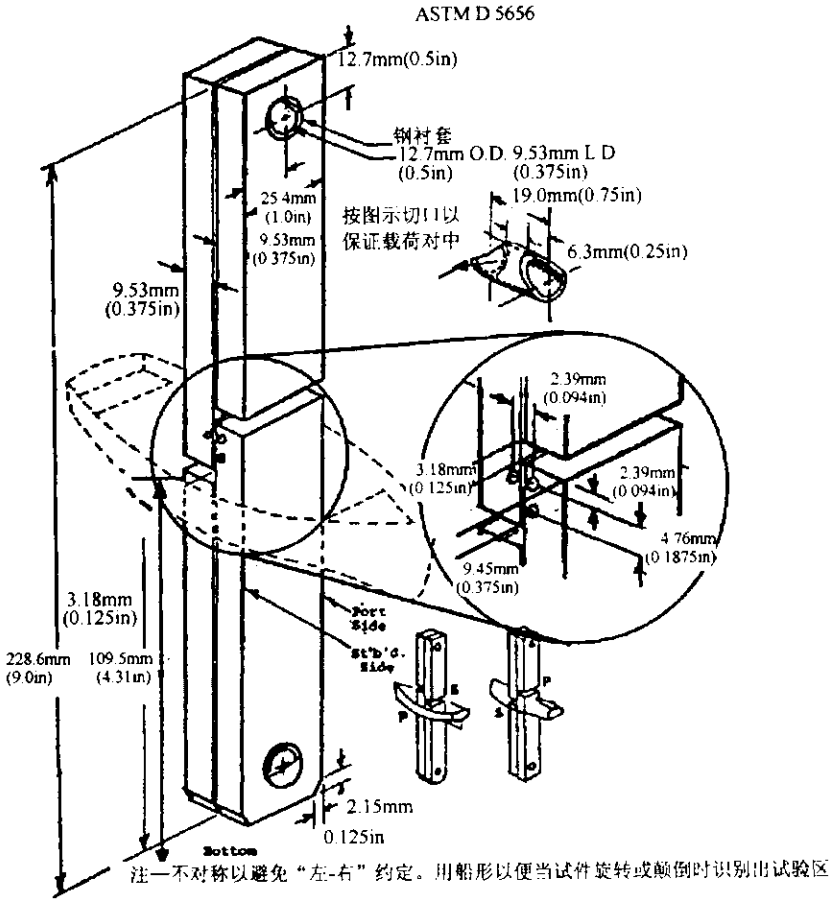


图 7.6.2.1.1(a) 厚板胶接试件（取自 D 5656 的图 2）

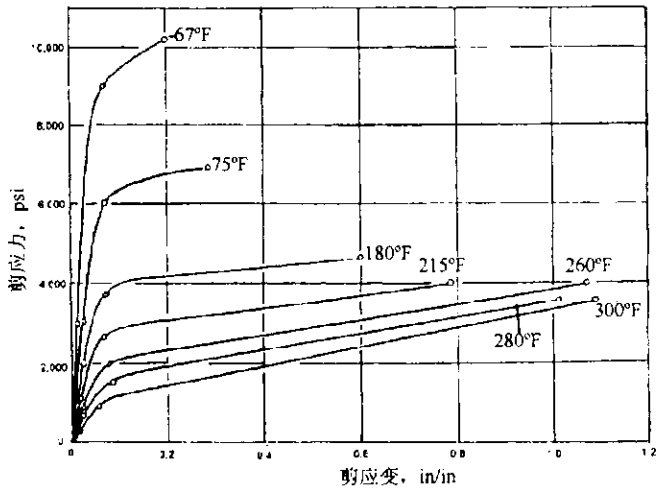


图 7.6.2.1.1(b) FM 300K 胶粘剂在不同温度（°F）下的剪应力-应变响应

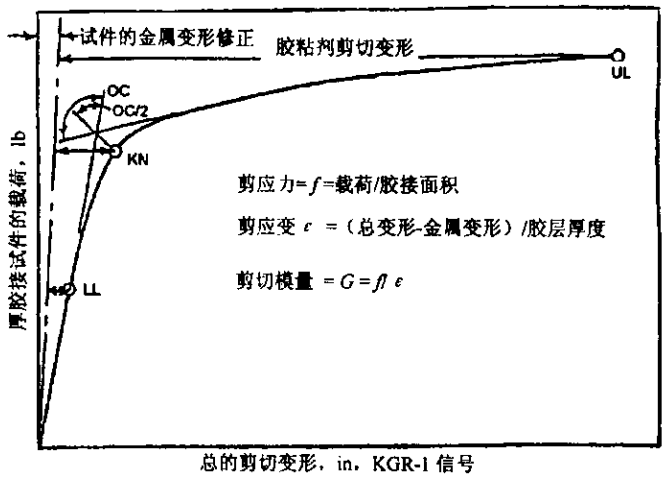


图 7.6.2.1.1(c) 具有确定弹-塑性响应临界点的载荷变形曲线

7.6.2.1.3 ASTM D 1002（薄单搭接试件——只用于质量保证（QA）检验）

ASTM D 1002 中介绍的单搭接剪切试验，被广泛用于胶粘剂的比较评价、取证和来料检查。由于该试验采用金属被胶接件，也用于表面制备的评价。这个试验方法的主要特点是容易制造和试验。

这种试验的限定：

- 剪切强度——由这个试验方法得到的最大剪应力（最大载荷除以胶接面面积）与胶粘剂的剪切强度没有任何关系。胶粘剂的应力场中有较大的剥离应力分量，导致试件破坏。表观的剪切强度是被胶接件模量和其厚度的函数，因为表观强度随被胶接件的模量和厚度变化，为了进行比较，应当使试件的结构构型保持不变。试验结果的解释应当参照 ASTM D 4896。
- 剪切刚度——因为试件中有大的固有弯曲，这个试验不能测量胶粘剂的刚度。
- 连接真实性——因为被胶接件是金属的，这个试验不可能模拟复合材料-复合材料胶接连接的失效模式。其表面制备和粘合力根本不能代表复合材料-复合材料的胶接连接。况且，复合材料胶接连接的制造过程也完全不同于金属-金属搭接连接的制造过程，不可将这类试件用于工艺过程控制。

为了解决连接真实性问题，已经对 ASTM D 1002 进行修改，以允许采用复合材料被胶接件，ASTM D 3163 是所得到的标准。然而，这个标准同样存在 ASTM D 1002 的其他所有限制。因为表观剪切强度将随铺层变化，当采用这个标准时，除了厚度之外，复合材料的铺层也必须与连接中所用的层压板近似。对于复合材料的应用情况，如果对胶粘剂/被胶接件的界面特征感兴趣，则这个标准是最可取的。如果主要目的是胶粘剂特性，则应当采用 ASTM D 5656。

7.6.2.2 拉伸试验

7.6.2.2.1 ASTM D 2095

可用 ASTM D 2095 方法得到胶粘剂的拉伸强度，见图 7.6.2.2.1（文献 7.6.2(c)），这个试验方法可以采用杆或棒式的试件。ASTM D 2094（文献 7.6.2.2.1(a)）中介绍了试件的设计和制备。因为试件易于受到试件边缘处剥离诱发的破坏，使用这种试验方法得到的拉

伸强度时要谨慎。可以按照文献 7.6.2.2.1(b)的建议，把胶粘剂的破坏强度用于近似的剥离应力分析。由于良好的胶接连接设计能把剥离应力降低到最小，所以精确知道拉伸强度能力并不是重要的。

由于胶粘剂不遵从各向同性材料定律，因而不能从剪切模量的测量得到杨氏模量，即不能从公式 $G=S/2(1+\nu)$得到，所以需要独立地测量胶粘剂的杨氏模量。

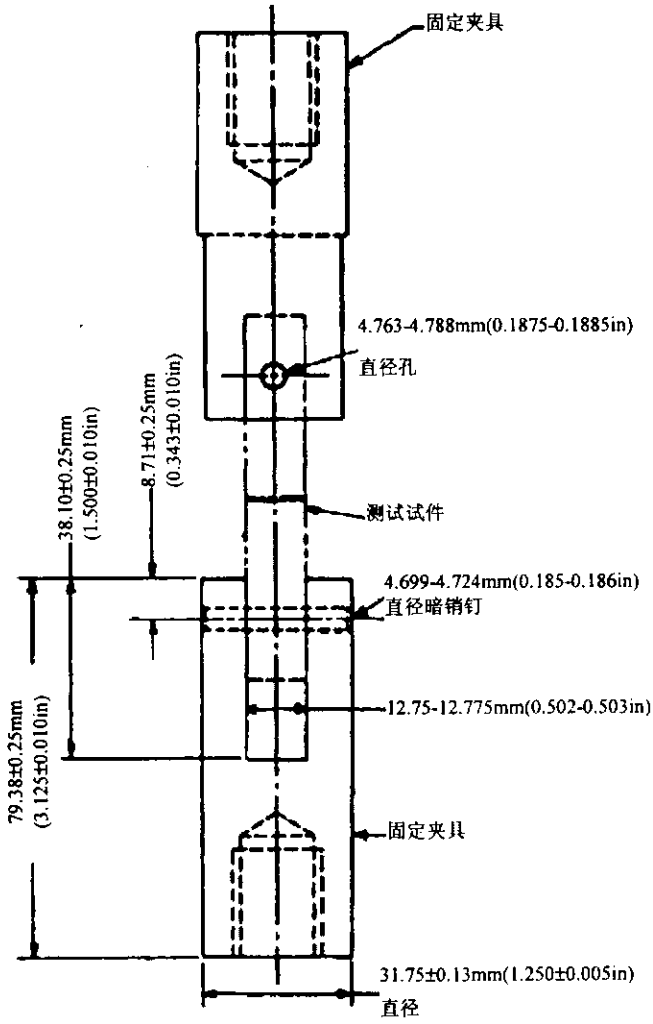


图 7.6.2.2.1　试件和固定夹具

7.6.2.3　断裂力学性能

确定胶接连接行为的另一种途径是采用断裂力学方法。这种分析和失效准则需要试验得到的 I 型和 II 型临界应变能释放率，需要进行的试验在 6.8.6 节中介绍。

7.6.2.4　推荐的胶粘剂性能表征试验矩阵

胶粘剂的性能试验应当按照 2.2.8 节的讨论，在室温、大气环境以及在最低及最高使用温度极值条件下进行，每种试验条件最少应当重复 5 次试验。

7.6.3 胶接连接性能表征试验

必须对代表实际连接形式的胶接连接进行试验，以验证连接的结构完整性。由于这些试件迅速成为针对具体问题的设计，很难予以标准化，因此，仅限于讨论一些最简单的试件，其中包含如下复合材料胶接连接最重要的参数：几何特性、复合材料层压板和/或金属被胶接件、胶粘剂、制造工艺和质量控制方法等。

7.6.3.1 蜂窝与面板的平面拉伸试验（ASTM C 297）

对于蜂窝结构，有必要测定夹层板的芯子和面板之间的胶接强度。ASTM C 297（文献7.6.3.1）是工业界最常采用的试验方法，试件和试验的组合情况见图 7.6.3.1。试件尺寸通常是 50 mm×50 mm（2 in×2 in），但也可以是圆的。为了得到有意义的结果，试件和真实构件的制造采用同样制造工艺是很重要的。这种试验不能测定胶粘剂的拉伸强度，但确实对于胶粘剂浸润蜂窝壁的程度给出了一种指示。应当记录失效模式，因为在某些结构形式下，胶接处要比蜂窝自身具有更高的拉伸强度。在大多数应用中，蜂窝与面板间胶接强度高于芯子的强度；但是对于这个试验，为了使胶层发生破坏，应当采用较高强度的芯子。这种试件遇到的主要困难是夹具与面板的粘接（特别是在高温、潮湿条件下），以及保持夹具和试件之间的平行度。

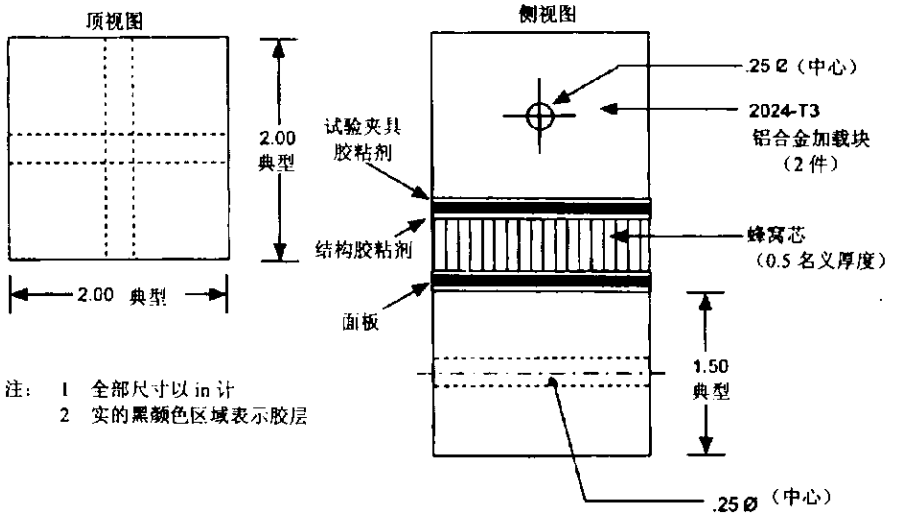


图 7.6.3.1 平面拉伸加载夹具和试件

7.6.3.2 蒙皮与加强筋的胶接试验

工业界正在采用十分简单的试验，以在有面外载荷（如燃油压力、后屈曲）的情况下，评价蒙皮与加强筋之间胶接连接的强度。虽然这些试验不能完全代表实际结构的行为，但它们在进行大部件验证性试验之前提供了设计数据，并对所选择材料和几何特征的适当性进行了早期的评价。当试件尽可能真实地代表了所模拟部件的的几何特征和制造过程时，这些试验会得到最大的益处，这里介绍两种这类试验的方案。示于图7.6.3.2(a)的“T”型拉脱试验，除了只需要一块加载板外，皆与ASTM C-297相似。因为刚性加载块抑制了蒙皮和加筋突缘的弯曲，脱胶破坏一般将发生在筋条的尾部，而不在突缘的端头，这是试件的严重不足，如果在构件试验情况，破坏是在突缘的端头。破坏位置主要取决于筋条/蒙皮的刚度比，刚度比越低，试验就越有用。

如果蒙皮更柔软的话，采用图 7.6.3.2(b)所示的滚轮代替刚性块是阻止拉脱的较好方法。问题是要在多远处布置滚轮才与蒙皮的位移匹配。可用图 7.6.3.2(b)的试件对胶接接头施加力矩，这可用图 7.6.3.2(b)中的作用力 P_1 和反作用力 R_1 来表示。剪切板的后屈曲会在界面产生显著的扭转力矩，必须作为结构分析的一部分确定连接对其的阻抗。

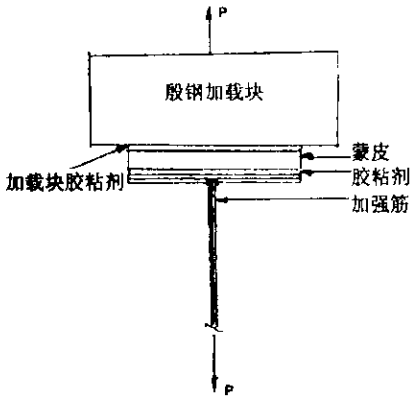


图 7.6.3.2(a)　“T”型拉脱试件

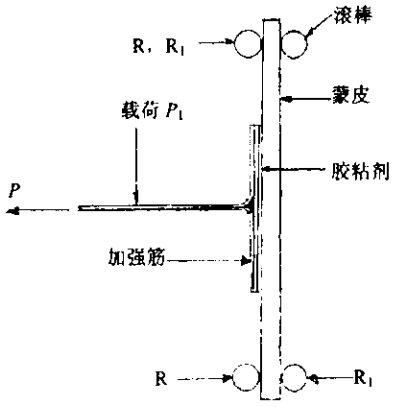


图 7.6.3.2(b)　“T”型扭脱试件

7.6.3.3　双搭接的连接试验

双搭接试件的范围包括单阶梯形式到多阶梯形式，通常承受拉伸载荷，其复杂性取决于想要得到的数据类型或者结构应用的类型。图 7.6.3.3(a)给出了从 ASTM D3528-92（文献 7.6.3.3）得到的一个试件例子。双剪连接的试件降低了剥离应力，所以这种试件对测定胶粘剂的剪切强度是有用的。在设计中一般不用这种构型，因为通过使外被胶接件斜削可以显著增加传载的能力。

为了传递更大的载荷，双搭接的连接将包括多个阶梯。为了验证这类连接，使用了图 7.6.3.3(b)所示类型的试件。这种类型试件的制造很昂贵，因此不能进行大量重复试验。由于这些试件用于代表某个具体的设计，必须注意使试件的制造工艺与实际连接一样。另外一个连接验证试件的例子见图 7.6.3.3(c)和(d)，它代表了复合材料蒙皮和钛合金梁之间的弦向连接，是一个两级的双搭接形式连接。

如果实际设计是这样，可以把多阶梯的连接更换为斜面嵌接连接。

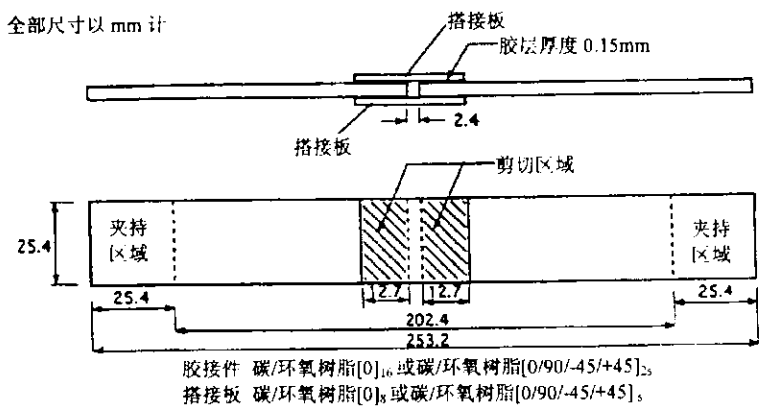
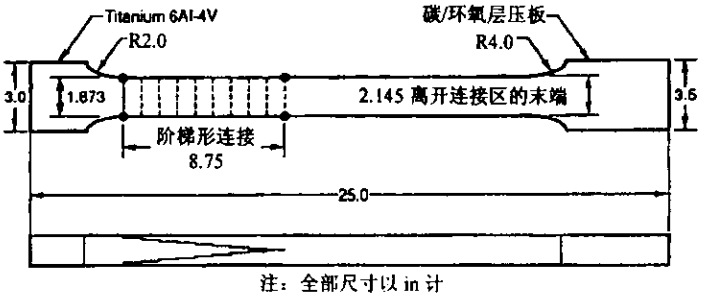


图 7.6.3.3(a)　双搭接形式连接试件的几何形状和材料



注：全部尺寸以 in 计

图 7.6.3.3(b) 阶梯形连接试件例子

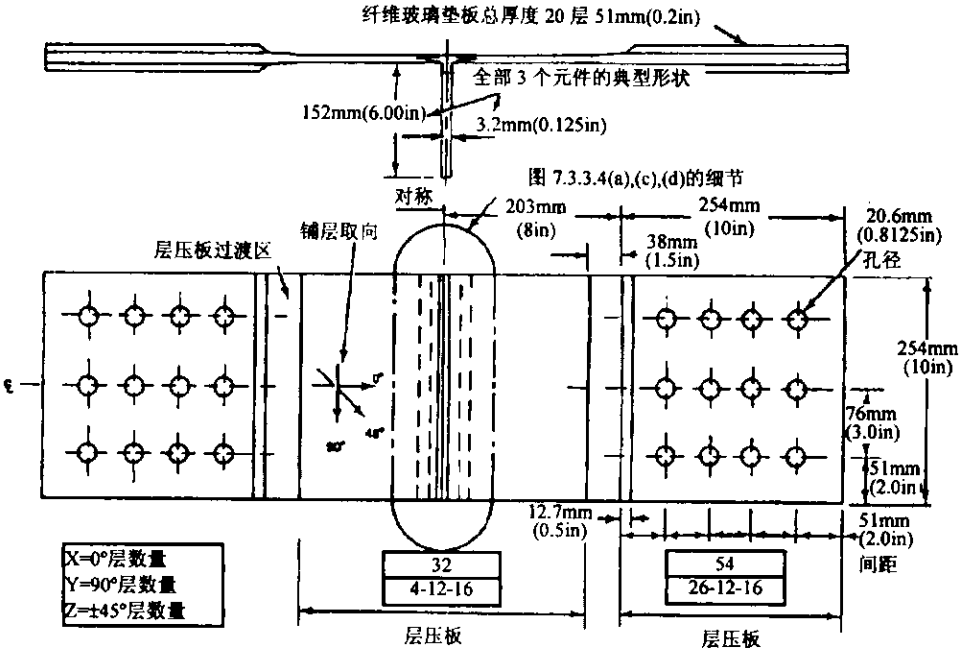


图 7.6.3.3(c) 试件构型

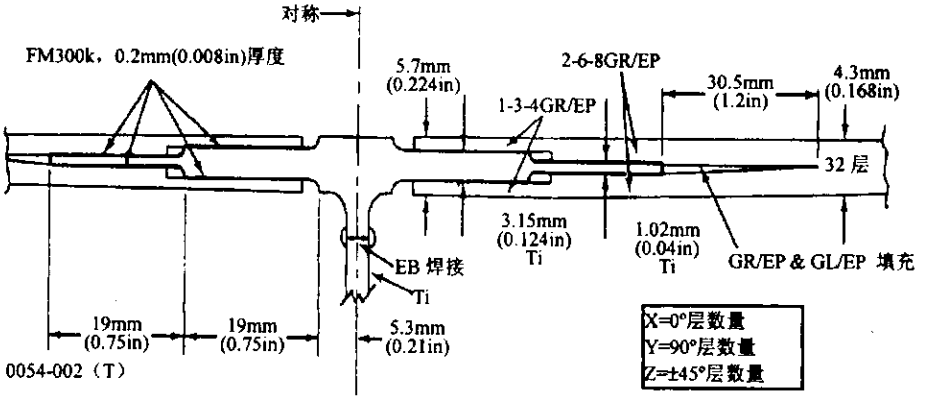


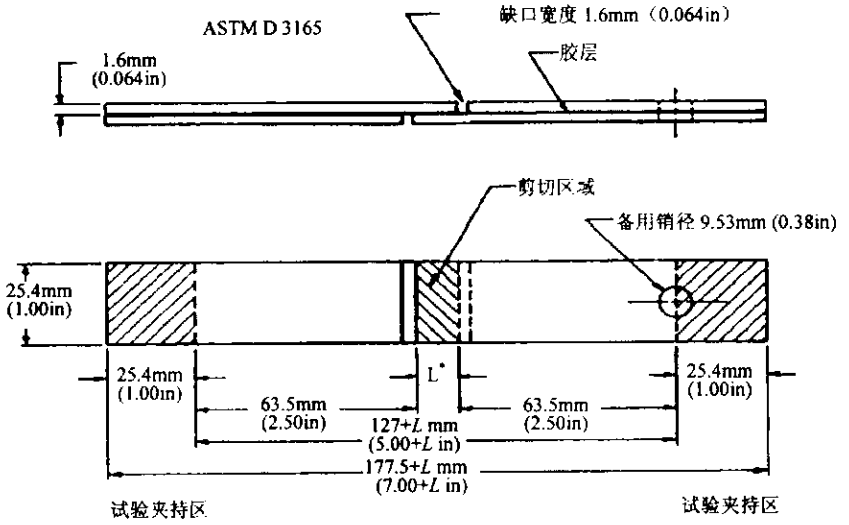
图 7.6.3.3(d) 两侧阶梯形连接方案 A 细节

7.6.3.4 单搭接的连接试验

单搭接的连接试件与上节介绍的试件类似，然而，由于单搭接的连接试件有弯曲产生的附加剥离应力，连接的长度必须足够长，以把其影响降低到最小。这就实际上排除了用单搭接试件测定连接强度性能的可用性。然而，单阶单搭接的连接可用于比较不同的胶粘剂和进行质量控制。本节介绍两种不同的方法，来降低单搭接的连接试件剥离应力。ASTM D 3165 采用与 ASTM D 5961 单剪挤压试验方法 B 相类似的方式，保持胶层中的载荷路线。第二种是欧洲飞机工业标准 prEN 6066 所举例说明的方法，该方法依靠斜面嵌接或者多个小台阶将载荷缓慢地传递到连接之中以降低剥离应力。

7.6.3.4.1 ASTM D 3165

当采用图 7.6.3.4.1 单搭接试件进行试验时，这个方法测量胶接连接的比较剪切强度。因为其在保持复合材料胶接连接中界面真实性的同时，降低了搭接中的剥离应力，这个试件被工业界广泛应用，以替代 ASTM D 1002 和 ASTM D 3163。7.6.2.1.3 节关于 ASTM D 1002 的所有限制都适用这方法。对于复合材料，在制造这类试件时还有另外一个困难，机械加工缺口可用在缺口区域放置一个垫片和铺设分离的层压板的办法来取代。这两种加工方法都需要训练有素的复合材料工程师和技术工人制定出获得有用试件的一种制造工艺。



注：L=试验区长度。试验区长度可以变化。推荐的搭接长度为 12.7±0.3mm（0.50±0.01in）

图 7.6.3.4.1 试件的形状和尺寸

7.6.3.4.2 欧洲飞机工业标准prEN6066

已经为胶接连接的特性表征建立一种 25mm（1in）宽的多台阶或斜面连接的试件。图 7.6.3.4.2(a)示出的试件参照了初始的欧洲飞机工业标准 EN6066（文献 7.6.3.4.2）。这个标准还确定了这种试件可能发生的破坏类型，见图 7.6.3.4.2(b)。这个标准已被采用，用于获取一种湿铺贴修理材料的验证性数据。

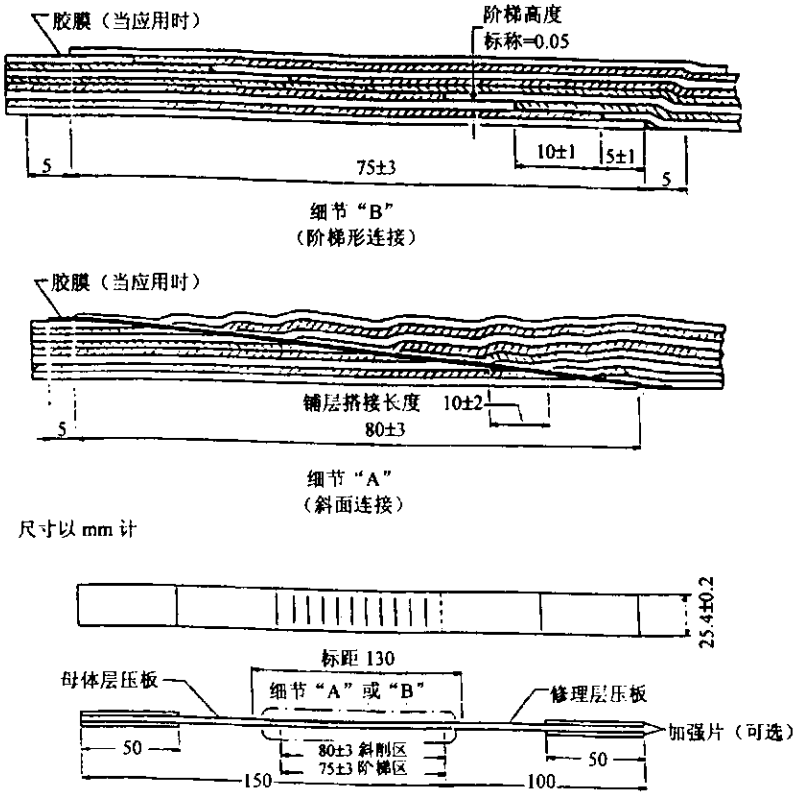


图 7.6.3.4.2(a) 斜面和阶梯形连接试件

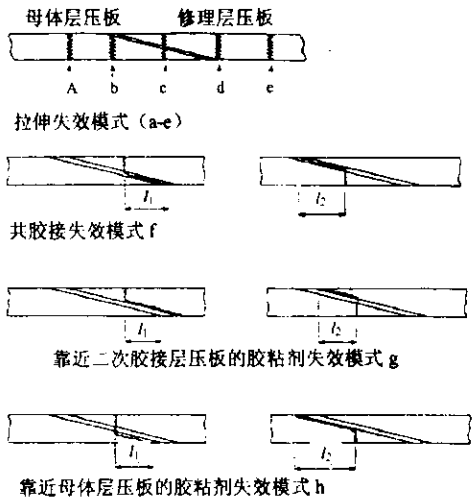


图 7.6.3.4.2(b) 连接试件的失效模式确定和尺寸（文献 7.6.3.4.2）

7.6.3.4.3 其他例子

对于图 7.6.3.3.3(b)所示的同一梁-蒙皮连接，图 7.6.3.4.3(a)和(b)示出其两台阶和斜面嵌接的验证试件。应当研发这种试件使之用于任何主要的连接设计有充分根据。

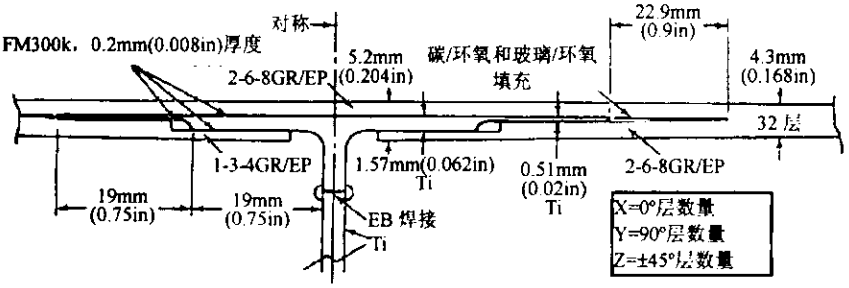


图 7.6.3.4.3(a) 方案 B 单侧阶梯形连接的细节

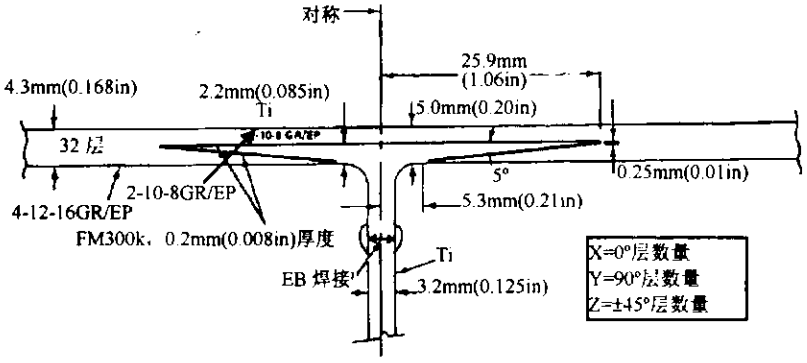


图 7.6.3.4.3(b) 方案 C 斜面嵌接连接的细节

7.7 损伤特性表征

7.7.1 概述

在复合材料的航宇应用中，损伤特性是一个重要参数。与传统的金属材料不同，复合材料的强度与其取向和铺层有关；它们还比较脆；与各向同性的金属相比，其层间拉伸和剪切强度特别低；诸如内部分层的损伤甚至是目视不明显的。由于这些特点的组合，使得关于损伤特性的考虑成为应用复合材料时的一个关键因素。在第三卷的 5.0 节中给出了在设计和验证中考虑损伤的各种途径。

损伤特性可分为两个方面，即材料对冲击损伤的阻抗（损伤阻抗），和材料或结构在损伤后的安全运行的能力（损伤容限）。损伤可能发生在加工过程中，也可能出现在使用和维护过程中。损伤可能是由于制造缺陷、外来物冲击（如石头、冰雹或工具坠落）的后果。本节将概述在评价备选材料的损伤阻抗和损伤容限时通常采用的冲击和压痕试验。关于裂纹扩展、微观裂纹和疲劳试验，则在本手册的其他地方进行讨论。

7.7.2 损伤阻抗

在航宇应用中，通常认为材料的损伤阻抗是材料对于冲击损伤的阻抗。冲击可能因工具坠落、外来物体（如跑道上的石头）、冰雹和冰块以及弹丸等引起的。冲击试验通常用于对材料的损伤阻抗和容限进行筛选，并作为验证时较大次元件和元件试验的的一部分。

可能需要以不同能量水平、速度、冲击物几何特征和支持条件进行试验，以模拟所有这些条件。

7.7.2.1 落锤冲击

研究冲击阻抗的另外一个通用方法是落锤试验。这类试验是 7.7.3 节所讨论的冲击后压缩（CAI）试验的一部分。通常，沿一个平板表面的法线方向对其进行冲击，一般采用直径 12.7-25.4 mm（0.5-1 in）的半圆形冲击头。常常用厚度在 5.08-10.16 mm（0.2-0.4 in）之间的准各向同性层压板，来筛选飞机结构用的材料。落锤的冲击能量由经典公式给出。

$$E = 1/2mv^2 = mgh$$

式中：E=能量

m=质量

v=速度

g=重力加速度常数，9.8 m/sec^2 或 32 ft/sec^2

h=坠落高度

因为 g 是常数，落锤试验的能量水平一般按 ft-lb 或每英寸厚度 ft-lb 给出。随着落锤速度的变化，即使能量相同也可能出现损伤的变化。这种现象与损伤类型、损伤在试件中的扩展速率以及试件在冲击过程中的变形有关。

CAI 试验采用的落锤一般以 4.5-9 kg（10-20 lb）的质量从几英尺高处落下，因而被认为是低速冲击。像落锤试验这种低速冲击不能恰当地模拟弹伤。有时候，研究者可用弹性绳加速下落以获得较高的速度。如果要研究很低速度的冲击，可采用长臂摆锤来冲击质量极大的试件。

冲击之后必须进行损伤评定。损伤评定的准则可包括目视明显可见损伤区域的测量，凹坑深度的测量，以及无损评估，如对内部损伤面积的 C 扫描。在评定之后，就可进行其他的力学试验，如 CAI 或疲劳试验。

试验误差来源有：

- 由于导向滑轨/管的摩擦，速度可能低于预计值。为了保证精度，应当测量在冲击前刹那的实际落锤速度。
- 应采取措施使落锤不回弹，冲击试件不多于一次。
- 损伤的量与试件的支持条件，如夹持的安排有关。必须很仔细地再现这些条件。设备地基的总体刚度，甚至冲击装置下面的地板都可以影响试验结果。

7.7.2.2 Izod和Charpy冲击

Izod 和 Charpy 冲击是塑料和金属材料常见的经典试验，在 ASTM D 256 中介绍了这些试验方法。ASTM 标准中给出了 5 种方法，标准的方法 A，C 和 D 讨论了 Izod 试验，采用带缺口的矩形棒 6.35 cm×1.27 cm×0.635 cm-1.27 cm 厚（2.5 in×0.5 in×0.25 in-0.5 in）。试件的一端夹在虎钳中形成一个垂直的悬臂梁，用一个已称重的摆锤，在缺口和虎钳上方的某个固定的距离处冲击带缺口的表面。测量在冲击期间的摆锤能量损失并计算 Izod 冲击强度。方法 C 中包括一个使破坏的试件部分摇摆所需能量的修正系数。对于 Izod 冲击强度小于 0.5 ft-lb/in 缺口的材料，这个系数是大的。

以前在方法 B 中讨论过摆锤试验，但于 1997 年被去掉，现在成为一个新标准 ASTM D 6110。这个试验也采用带缺口的矩形棒 6.35 cm×1.27 cm×0.635 cm-1.27 cm（2.5 in×0.5 in×0.25 in-0.5 in）厚。在这个试验中，试件作为水平简支梁进行支持，并在支持点中间正对缺口的背面处用摆锤进行冲击。

方法 D 是 Izod 方法的变种，但具有不同的缺口半径。这个试验可以给出材料的缺口敏感性指标。

方法 E 是反向缺口的 Izod 试验，它与方法 A 类似，只是在缺口的相反一面对试件冲击。这个方法给出了塑料无缺口冲击强度的指标。

ASTM D 256 中没有一种试验方法能普遍适用于连续增强的复合材料，同时由这些试验得到的数据将不为 MIL-HDBK-17 所接受。

7.7.2.3 准静态压痕

进行准静态压痕试验时将一个平板支持在框架上，并用一个与万能试验机连接的压头来压板的中心，ASTM D 6264 介绍了这个方法。最常用的试件是 15.24 cm×15.24 cm（6 in×6 in）的准各向同性层压板，厚度约 4.32 mm（0.7 in）。试验件可以简支在有 127 mm（5 in）直径开口的框架上，或者支持在实心平坦的刚性支座上。在试验期间测量其载荷-横梁位移并报告得出的曲线。用预先设定的损伤水平或横梁位移，来确定试验期间在何处读取数据，和在刚性支持情况下在何处停止试验。在简支情况下还要报告最大压痕力。在试件卸载后，要评价压痕的深度和损伤情况。

7.7.2.4 其他损伤阻抗容限试验

在积木式研究的较高层次上，常常进行其他冲击试验。这些试验可能包括弹丸冲击、冰/冰雹模拟、鸟撞模拟和计划规定的其他试验。通常采用空气枪将弹丸射向试件完成试验。这些试验的细节已经标准化，因此不在这里详细介绍。

还进行一些标准化的试验来评价具体应用中的材料性能和耐久性。这些试验中包括地板对滚轮车的阻抗试验和对尖鞋后跟的阻抗试验。

7.7.3 损伤容限试验

7.7.3.1 冲击后压缩试验

7.7.3.1.1 概述

冲击后压缩试验（CAI）是对面外冲击所引起层压板压缩强度退化的一种经验评定。研究者依据材料形式、应用和预期的损伤，采用许多不同的冲击与损伤容限试验。虽然 CAI 试验是由飞机工业为比较侯选复合材料的损伤容限而发展的，但一般也可用于其他工业。试验所针对模拟的可能损伤状况包括工具坠落、跑道碎石冲击等。因为冲击速度比较低，该试验通常不用于评价弹丸的损伤容限。

复合材料工业中通常采用几种方法来确定 CAI。虽然现在还没有其中任一种方法成为 ASTM 的标准，但所有的方法都要冲击一块平的层压板，用一个在冲击面的背面带有开孔的支持系统来约束这个板，冲击头一般是半圆形的落锤（下落的镖，棒，球）。最常用的方法是 SACMA SRM 2R-94（文献 7.7.3.1.1(a)）和 NASA 1092 和 1142（文献 7.7.3.1.1(b)和(c)）。

也常常对夹层板进行损伤容限评价。目前还没有工业界范围内的夹层板 CAI 标准。然而，为了检验取证或筛选试验，许多公司在有控制的条件下冲击平的夹层板，然后进行评价。评价中可能包括 NDI、水浸入、剩余压缩强度或剪切强度试验。在文献 7.7.3.1.1(d)中可以找到更详细的讨论。

选择的冲击水平一般是使其引起的层压板损伤为目视可见的，但要使损伤发生在板的中央。也已采用了另外一些损伤水平，如“目视勉强可见冲击损伤”（BVID）。如果损伤扩展到试件宽度的一半以上或者穿透了层压板，则这损伤水平就太大，以至不能用随后的压缩试验来进行有意义的评价。这些方法中规定了冲击的能量水平，但可以根据试验目的而变化。

在冲击后，可用表观的损伤面积（前面和后面）、凹痕深度和用超声 C 扫描或者类似技术，对损伤的程度进行表征。在压缩试验前，NASA 的方法需要进行附加的机加工，以减小试件的尺寸并保证两个端面的平坦与平行。然后，在一个可以使试件边缘附近稳定（但不限制泊松比效应所产生横向变形）的夹具中进行压缩试验。

CAI 试验（所有方法）的局限如下：

- 不应直接比较具有不同厚度或铺层的材料。
- 使用者应注意，不可将这些试件中的损伤机理按比例扩大到较大的零件中，对于韧性树脂体系的复合材料尤其如此。
- 冲击损伤的水平与试件在冲击期间的支持系统刚度有关。由于不同的支持系统，可能会出现各试验室之间的差异。一般来说，刚度较小的支持将导致较小的冲击损伤，从而有较高的 CAI 强度。
- 由于为得到给定能量水平所用的冲击质量不同，可能出现各试验机之间的变异。数据和理论模型还不足以说明在给定能量下其质量/速度变化的意义。
- 如果破坏不发生在冲击区域，就得不到可靠的结果。柔软的层压板可能由于在侧面支持的上部或下部出现屈曲而破坏，也可能出现端部散开，这两种失效模式都是不可接受的。
- 像大多数复合材料一样，正确的试件制备是很重要的，端面的平面度和平行度尤其重要。

7.7.3.1.2 SACMA SRM 2R-94“定向纤维-树脂复合材料的冲击后压缩性能”

SACMA SRM 2-88 方法来自波音公司的 BSS 7260。试件是一个 100 mm×150 mm（4 in×6 in）名义厚度 6 mm（0.25 in）的准各向同性层压板。如果准备在冲击后用 C 扫描，则应进行初始的 C 扫描以便作为比较的基准。试件被夹持到一个铝合金支持底座上，座上有 76.2mm×127 mm（3 in×5 in）的开孔。然后用一个直径 15.75 mm（0.625 in）的半球形锤头，按照该试件厚度要求的冲击能量目标，从所需要的高度冲击试件。不规定冲击头的质量，但在正常实践中为 4.5-5.5 kg（10-12 lb）之间。冲击能量按以下方法之一进行计算：

- 方法 1　能量=下落重量×下落高度/试件厚度
- 方法 2　能量=1/2 质量×(速度)^2/试件厚度

规定的冲击能量水平是 6.7 J/mm（1 500 in-lb/in），在即将冲击之前测量速度。按标志点和试件之间的任何行程来校正速度测量。因为方法 2 考虑摩擦损失，是首选的方法。

必须避免对试件的回弹冲击。如果在试验期间采用仪器设备，就可计算实际的冲击能量，并记录冲击力与时间的关系。采用超声扫描检测冲击过的试件，纪录分层的区域和一般形状。

试件试验——用压缩载荷夹具来保证在所希望的平面内轴向加载。虽然在工业实践中并不总采用应变片，该方法需采用 4 个轴向应变片测量应变。试验速度是 1 mm/min

（0.05in/min）。要分别画出各应变片的输出图形，以检查异常的加载情况。CAI 按下式计算：

$$F^{CAI} = P / tw \qquad 7.7.3.1.2$$

式中：P=载荷

t=厚度

W=宽度

优点：所需的材料比 NASA 方法少得多，消除了二次机械加工，节约了成本。

缺点：在冲击后没有机加工去除在夹持区或端部可能出现的损伤。

7.7.3.1.3 NASA 1142，B.11“冲击后压缩试验”

NASA CAI 方法在 NASA 1092，ST-1 和 NASA 1142，B.11 中介绍。

NASA 1142，B.11 方法是 NASA 1092 新近的版本。

在冲击之前，试件是 180 mm×300 mm（7 in×12 in）准各向同性层压板，在一般的实践中厚度是 6 mm（0.25 in），在冲击之前应进行超声 C 扫描作为基准。试件被夹持在带有 130 mm×130 mm（5 in×5 in）开孔的钢支持板上，开孔在冲击部位的背面。用一个直径 13 mm（0.5 in）的半球形冲击头冲击试件。冲击头的质量是 4.5-5.5 kg（10-12 lb）。需要的冲击能量是 27 J（20 ft-lb）。

冲击后用目视、超声检查试件，然后机械加工到最后的压缩试件尺寸 130 mm×250 mm（5 in×10 in）。最后的机械加工步骤，在冲击后消除了冲击中在夹持区对试件造成的任何损伤，并把末端加工成平面。

然后，对试件背对背地粘贴应变片，应变片用来监控试验期间不寻常的加载情况，在工业实践中并不总采用应变片。按照下式计算 CAI：

$$F^{CAI} = P / tw \qquad 7.7.3.1.3$$

式中：P=载荷

t=厚度

W=宽度

7.7.3.1.4 提交MIL-HDBK-17数据的试验方法

用下列试验方法（表 7.7.3.1.4）提供的数据，现在被 MIL-HDBK-17 所接受，考虑包括在第二卷中：

表7.7.3.1.4 用于提交MIL-HDBK-17数据的冲击后压缩试验方法

性 能	符 号	全部数据形式	筛 选
冲击后压缩强度	F^{CAI}		SACMA SRM 2R-94 NASA 1142，B.11

参考文献

7.4.1 SRM 3-88, "SACMA Recommended Test Method for Open-Hole Compression Properties of Oriented Fiber-Resin Composites," Suppliers of Advanced Composite Materials Association, Arlington, VA, 1988.

7.5.2.2.1 ASTM D 953, "Standard Method of Test for Bearing Strength of Plastics," Annual Book of ASTM Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.5.2.3.2 MIL-STD-1312/B, "Fasteners Test Methods".

7.5.2.4 Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Structures, MIL-HDBK-5E, 1 June 1987.

7.5.3.1 Crews, J.H. and Naik, R.A., "Combined Bearing and Bypass Loading on a Graphite/Epoxy Laminate," Composite Structures, Vol 6, 1986, pp. 21-40.

7.5.5.4(a) ASTM Test Method E 8, "Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.5.5.4(b) ASTM Practice E 4, "Force Verification of Testing Machines," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.5.5.4(c) ASTM Practice E 83, "Verification and Classification of Extensometers," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.2(a) Krieger, Raymond B. Jr., "Stress Analysis of Metal-to-Metal Bonds in Hostile Environments", Proceedings of the 22nd National SAMPE Symposium, San Diego, CA, April 26-28, 1977.

7.6.2(b) Krieger, Raymond B. Jr., "Stress Analysis Concepts for Adhesive Bonding of Aircraft Primary Structure," Adhesively Bonded Joints: Testing, Analysis and Design, ASTM STP 981, W.S. Johnson, Ed. American Society for Testing and Materials, Philadelphia 1988, pp. 264-275.

7.6.2(c) ASTM Test Method D 2095, "Test Method for Tensile Strength of Adhesives by Means of Bar and Rod Specimens," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.2.1.1(a) Kassapoglou, Christos and Adelmann, John C., "KGR-1 Thick Adherend Specimen Evaluation for the Determination of Adhesive Mechanical Properties", SAMPE Quarterly, October 1992.

7.6.2.1.1(b) Tsai, Ming-Yi, Morton, J., and Oplinger, D., "Determination of Thin-Layer Adhesive Shear Properties Using Strain Gages", Experimental Mechanics, (to be published).

7.6.2.1.1(c) Hart-Smith, L.J., "Adhesively Bonded Joints for Fibrous Composite Structures," Proceedings of International Symposium on Joining and Repair of Fibre- Reinforced Plastics, London, Great Britain, September, 1986.

7.6.2.1.2 ASTM Test Method E 229, "Shear Strength and Shear Modulus of Structural Adhesives," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.2.2.1(a) ASTM Practice D 2094, "Preparation of Bar and Rod Specimens for Adhesion Testing," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.2.2.1(b) Hart-Smith, L.J., "Adhesive Bonded Single Lap Joints", NASA CR-11236, January, 1973.

7.6.3.1 ASTM Test Method C 297, "Tensile Strength of Flat Sandwich Constructions in Flatwise Plane," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.3.3 ASTM Test Method D 3528-92, "Strength Properties of Double Lap Shear Adhesive Joints by Tension Loading," Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA.

7.6.3.4.2 European Aircraft Industry Standard EN 6066, "Determination of Tensile Strength of Tapered and Stepped Joints".

7.7.3.1.1(a) SACMA SRM 2R-94 "SACMA Recommended Test Method for Compression After Impact Properties of Oriented Fiber-Resin Composites" Suppliers of Advanced Composite Materials Association, 1600 Wilson Blvd. Suite 1008, Arlington, VA 22209.

7.7.3.1.1(b) NASA Reference Publication 1092-Revised. "Standard Tests for Toughened Resin Composites, Revised Edition," 1983.

7.7.3.1.1(c) NASA Reference Publication 1142. "NASA/Aircraft Industry Standard Specification for Graphite Fiber/Toughened Thermoset Resin Composite Material," compiled by ACEE Composites Project Office, Langley Research Center, Hampton, VA, 1985.

7.7.3.1.1(d) Caldwell, Borris, Fallabella, "Impact Damage Tolerance Testing of Bonded Sandwich Panels," SAMPE Technical Conference, November 1990.

第 8 章　统计方法

8.1　导言

复合材料性能数据的差异可能由一系列因素引起，诸如制造期间操作差异、原材料批间差异、检验差异及材料固有差异。重要的是进行复合材料设计时认识这一差异并把它引入复合材料性能的设计值中。本章提供了基于统计的材料性能的计算方法。采用适当设计的检验程序（参见第 2 章），这些统计方法可以解释一些，但不是全部的差异来源。一个基本的假设就是人们在测量期望的性能值。如果情况不是这样，那么没有一种统计方法足以解释其他的技术不足。

第 8.2 节提供了本章其余部分所使用的方法中用到的背景知识与指导。不熟悉本章中统计方法的读者在阅读本章其余部分前必须阅读第 8.2 节；有经验的读者会发现第 8.2 节是一个有用的参考。第 8.3 节提供了评估数据和计算基于统计的性能的方法。第 8.4 节还包含其他统计方法，包括确定离散系数的置信区间、应力/应变曲线，质量控制、替换材料等的评估方法。第 8.5 节给出了统计表与近似公式。

8.1.1　基于统计的性能的计算方法概述

第 8.3 节描述了从复合材料数据获得 A 基准值和 B 基准值的计算方法。依据数据是否能按自然方式分组（例如因为批次或环境条件不同）采用了不同的计算方法。不能分组的数据，或各组间差异可忽略的数据称为非结构型数据。否则，该数据称为结构型数据。第 8.3.2 节中的检查几组数据间的差异是否能忽略的统计方法，可用来确定这些数据可否作为结构型数据或非结构型数据。非结构型数据采用 Weibull 分布、正态分布或对数正态分布来模拟。如果用上述分布模拟均不合适，则确定非参数的基准值。结构型数据用 8.3.5 节中的方法采用线性统计模型来模拟，包括回归和方差分析(ANOVA)。

8.1.2　计算机软件

可以获得有用的分析材料性能数据的非专利的计算机软件。软件 STAT17（可从 MIL-HDBK-17 秘书处索取（见第 ii 页））可执行框图 8.3.1 中除线性回归外的各种运算。软件 RECIPE（REgression Confidence Intervals on Percentiles）可从国家标准和工艺研究所（NIST）索取，可以进行基于线性模型（包括回归和方差分析）的材料基准值的计算。可从匿名的 ftp 'ftp.nist.gov'，站点下的目录处获得 RECIPE。还可从 NIST 不具名的 ftp 'scf.nist.gov'，站点下的目录 'pubs/dataplot' *获得一个非专利的通用统计分析与图形软件包 DATAPLOT。

8.1.3　符号

下面列出第 8 章中用到的且在本手册其余部分不通用的符号，同时给出其各自的定义及其首次出现的章节。

---

* Contact Stefan Leigh, Statistical Engineering Division, NIST, Gaithersburg, MD, 20899-0001, email: stefan.leigh@nist.gov.

符号	定义	章节
A	A 基准值	-
a	分布下限	8.1.4
ADC	ADK 临界值	8.3.2.2
ADK	k 样本 Anderson-Darling 统计量	8.3.2.2
B	B 基准值	8.2.5.1
b	分布上限	8.1.4
C	临界值	8.3.3.1
CV	离散系数	8.2.5.2
e	误差，残差	8.3.5.1
F	F 统计量	8.3.5.2.2
$F(x)$	累积分布函数	8.1.4
$f(x)$	概率密度函数	8.1.4
F_0	标准正态分布函数	8.3.4.3.2
IQ	信息分位数函数	8.3.6.2
J	每批样本个数	8.2.5.3
k	批数	8.2.3
k_A	(1) 单侧容限系数，A 基准值	8.3.4.3.3
	(2) Hanson-Koopmans 系数，A 基准值	8.3.4.5.2
k_B	(1) 单侧容限系数，B 基准值	8.3.4.3.3
	(2) Hanson-Koopmans 系数，B 基准值	8.3.4.5.2
MNR	最大赋范残差检验统计量	8.3.3.1
MSB	批间均方值	8.3.5.2.5
MSE	批内均方值	8.3.5.2.5
n	一批数据的观测值个数	8.1.4
n'	有效样本大小	8.3.5.2.6
$\tilde{n}$	可比重复性必需的样本数	8.2.5.3
n^*	见式 8.3.5.2.6(b)	8.3.5.2.6
n_i	第 i 批中的观测值个数	8.3.2.1
OSL	观测的显著性水平	8.3.1
$p(s)$	确定性条件	8.3.5.1
Q	分位数函数	8.3.6.1
$\hat{Q}$	分位数函数估计量	8.3.6.1
r	观察值序号	8.3.4.5.1
RME	相对误差大小	8.5
s	样本标准差	8.1.4
s^2	样本方差	8.1.4
s_L	对数标准差	8.3.4.4
s_y	回归直线误差的标准差估计值	8.3.5.3

SSB	批间平方和	8.3.5.2.3
SSE	批内平方和	8.3.5.2.3
SST	总平方和	8.3.5.2.3
T	容限系数	8.3.5.2.7
t	t 分布分位数	8.3.3.1
T_i	第 i 个温度条件	8.3.5.1
$t_{\gamma,\ 0.95\ t(\delta)}$	偏心参数为 δ，自由度为 γ 时偏心 t 分布的 0.95 分位数	8.3.5.3
TIQ	截断的信息分位数函数	8.3.6.2
u	(1)批间与批内均方值之比	8.3.5.2.7
	(2)批次	8.3.5.1
V_A	Weibull 分布单侧容限系数，A 基准值	8.3.4.2.3
V_B	Weibull 分布单侧容限系数，B 基准值	8.3.4.2.3
w_{ij}	转换的数据	8.3.5.2.1
$\bar{x}$	样本平均值，总体平均值	8.1.4
x_i	样本中第 i 个观测值	8.1.4
$\tilde{x}_i$	x 值的中值	8.3.5.2.1
x_{ij}	第 i 批中第 j 个观测值	8.3.2.1
x_{ijk}	在第 i 个条件下第 j 批中第 k 个观测值	8.2.3
x_L	对数平均值	8.3.4.4
$x_{(r)}$	升序排列的第 r 个观测值；序号为 r 的观测值	8.3.4.5.1
$z_{0.10}$	潜在母体分布的 10 百分位点	8.2.2
$z_{(i)}$	排序后的独立值	8.3.2.1
$z_{p(s),\ u}$	回归常数	8.3.5.1
α	(1) 显著性水平	8.3.3.1
	(2) Weibull 分布的尺度参数	8.1.4
$\hat{\alpha}$	尺度参数 α 的估计值	8.3.4.2.1
β	Weibull 分布的形状参数	8.1.4
$\hat{\beta}$	形状参数 β 的估计值	8.3.4.2.1
β_i	回归参数	8.3.5.3
$\hat{\beta}_i$	β_i 的最小二乘估计值	8.3.5.3
γ	自由度数	8.3.5.3
δ	偏心参数	8.3.5.3
θ_i	回归参数	8.3.5.1
μ	母体平均值	8.1.4
μ_i	第 i 个条件下的平均值	8.2.3
ρ	同一批内两个测量值的相关系数	8.2.5.3
σ	母体标准差	8.1.4
σ^2	母体方差	8.1.4
σ_b^2	母体批间方差	8.2.3

σ_e^2	母体批内方差	8.2.3

8.1.4 统计术语

本节给出了本手册中最常用的统计术语的定义。

该明细表当然是不完整的；不熟悉统计方法的本文用户还应参考统计方法基础理论如文献 8.1.4。1.7 节给出了其他统计术语的定义。

母体——有待对其进行推断的一组测量值，或在给定试验条件下可获得的所有可能的测量值。例如，“在 95%的相对湿度和室温条件下复合材料 A 的所有可能的极限拉伸强度的测量值”。为了对一个母体进行推断，通常需要假设其分布形式。所假设的分布形式也可以视为母体。

样本——取自指定母体的测量值（有时称之为观测值）的集合。

样本大小——样本中测量值的个数。

A 基准值——基于统计的材料性能；即在 95%置信度下，90%的性能数据值群的值高于此值。

B 基准值——基于统计的材料性能；即在 95%置信度下，90%的性能数据值群的值高于此值。

相容——涉及可看成来自同一母体的不同组或子体的描述性术语。

结构型数据——可以自然分组的数据，或其重要响应能随已知参数系统地变化的数据。例如，几批测量值中的每批测量值能够按批料适当分组，以及在不同已知温度下的测量值可用线性回归（见 8.3.5.2 节）来模拟；因此这两组数据都可看成结构型数据。

非结构型数据——所有有关的信息全包含在响应测量值本身的数据。这可能是因为这些测量值是全部已知的，或者是因为人们能够忽略该数据中可能的构成。例如，分批的且批间差异被证明（采用 8.3.2 节子样本相容性判别法）可忽略的测量数据可以看成非结构型数据。

位置参数与统计值

母体平均值——给定母体的所有可能的测量值按其在母体中出现的相对频率加权后得出的平均值。也是当样本大小增加时样本平均值的极限。

样本平均值—— 一个样本中所有观测值的平均值，是母体平均值的一个估计值。如果用 x_1，x_2，…，x_n 表示一个样本中的 n 个观测值，那么样本平均值可定义为：

$$\bar{x} = \frac{x_1 + x_2 + \cdots + x_n}{n} \qquad 8.1.4(a)$$

或

$$\bar{x} = \frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n} x_i \qquad 8.1.4(b)$$

样本中位数——将一个样本中的观测值按递增顺序排列后，如果样本大小为奇数，则样本中位数为最中间的观测值；如果样本大小为偶数，则样本中位数为最中间的两个观测值的平均值。如果母体对称于其平均值，则样本中位数也是对母体平均值的一个令人满意的估计值。

离差统计量

样本方差——样本观测值与样本平均值之差的平方和除以 n-1，这里 n 表示样本大小。

样本方差定义为：

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2 \qquad 8.1.4(c)$$

或

$$s^2 = \frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}x_i^2 - \frac{n}{n-1}\bar{x}^2 \qquad 8.1.4(d)$$

样本标准差 ——样本方差的平方根。样本标准差用 s 表示。

概率分布术语：

概率分布——给出某个值落在指定区间内的概率的公式。在本章中用到*分布*一词时，均指概率分布。

正态分布—— 一类双参数（μ，σ）的概率分布，按此分布某个观测值落在 a 与 b 之间的概率由下列曲线下 a、b 之间的面积给出：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}}e^{-(x-\mu)^2/2\sigma^2} \qquad 8.1.4(e)$$

参数为（μ，σ）的正态分布的母体平均值为 μ，方差为 σ^2。

对数正态分布—— 一种概率分布，按此分布从某一母体中随机选取的一个观测值落在 a 与 b（$0 < a < b < \infty$）之间的概率，由正态分布曲线下 $\ln(a)$与 $\ln(b)$之间的面积给出。

双参数 Weibull 分布—— 一种概率分布，按此分布从某一母体中随机选取的一个观测值落在 a 与 b（$0 < a < b < \infty$）之间的概率，由下式给出：

$$e^{-(a/\alpha)^\beta} - e^{-(b/\alpha)^\beta} \qquad 8.1.4(f)$$

式中α称为尺度参数，β称为形状参数。

概率函数术语：

累积分布函数——通常用 $F(x)$表示的一个函数，它给出一个随机变量落在任意给定的两个数之间的概率。即

$$\Pr(a < x \le b) = F(b) - F(a) \qquad 8.1.4(g)$$

这种函数具有非降性并满足

$$\lim_{x\to+\infty} F(x) = 1 \qquad 8.1.4(h)$$

累积分布函数 F 与概率密度函数 f 通过下式相联系：

$$f(x) = \frac{d}{dx}F(x) \qquad 8.1.4(i)$$

假设式中 $F(x)$是可微的。

***F* 分布**——用于方差分析、回归分析及方差相等检验的一种概率分布。可以方便地获得这种分布表。

概率密度函数—— 一种函数，对于所有的 x，$f(x)\ge 0$ 且

$$\int_{-\infty}^{\infty} f(x)dx = 1 \qquad 8.1.4(j)$$

由概率密度函数按下式确定累积分布函数 $F(x)$

$$F(x) = \int_{-\infty}^{x} f(t)dt \qquad 8.1.4(k)$$

注意极限区间$(-\infty, \infty)$指的是一般情形；例如定义概率密度函数如下式的指数分布满足

上述定义

$$f(x)=\begin{cases}0 & x\le 0\\ e^{-x} & x>0\end{cases} \qquad 8.1.4(l)$$

概率密度函数用来计算下式所示的概率：

$$\Pr(a<x\le b)=\int_a^b f(x)\mathrm{d}x \qquad 8.1.4(m)$$

误差与变异性：

确定性影响——由处置或条件的特定状态的改变引起的测量值的系统漂移。处置或条件状态的改变通常由试验者控制。测量值可以是压缩强度或拉伸模量。处置或条件可以是试验温度、加工者等等。对确定性影响来说，测量值的漂移被看成在同样处置或条件下不仅对已有观测值而且对未测数据的一致变化。

随机影响——由外部的，通常是无法控制的因素的特定状态的改变引起的测量值的漂移。该因素的这种状态被看成是从一个无限母体中的一次随机抽取。试验者无法控制随机影响的这种特定状态，然而它可能在有限观测值的子体中是确定的。测量值可以是压缩强度或拉伸模量。外部因素可能为导致批间差异的分批生产。当有关的加工者人数可看成是所有现有和未来的加工者（母体）中的小样本时，可以认为加工者间的差异是一种随机影响。对随机影响来说，测量值的漂移被看成一个平均值为零且方差非零的随机变量。经受一定水平的外部因素的子体中，测量值是相互有关的（漂移簇集在母体平均值附近，其大小取决于该因素的状态）。因此，为了获得关于测量值母体最独立的信息，更多组的测量方法优于每组更多次的测量方法。

随机误差——由未知的或不可控的外部因素引起的，独立地、不可预见地影响每次测量的那一部分数据偏差。即对模型分析所产生的残差——除掉由确定性影响和随机影响引起的变化后的剩余变化。随机误差是随机影响的一种特殊情形。在两种情况下，随机影响或误差的水平是无法控制的但随机误差随每次测量独立变化（计几个测量值不会有共同的随机误差漂移）。随机误差的一个重要例子就是在处置、条件、批料和其他外部因素（确定与随机影响）的状态一致的条件下，子体内产生的试样间的变异。

材料变异性——变异来源于材料本身的空间的和密度的变化和材料加工（例如，内在结构、缺陷布局，交键密度等等）。材料变异性的组成可以是确定性影响、随机影响和随机误差的任意组合。

8.2 基础知识

本节提供了本章其余部分所使用的方法的预备知识与指导。不熟悉本章中统计方法的读者在阅读本章其余部分前应先阅读本节。对有经验的读者来说，本节是关于统计方法及术语的一个有用的参考资料。

8.2.1 基于统计的设计值

材料的设计值为预期用于结构制造的材料性能的最小值。该设计值可以是确定的或基于统计的。S-基准值是常用的一个确定值；这一基准值意味着只要被检验材料样本的任意一个性能值低于相应的 S-值，则拒收该批材料。基于统计的设计值承认材料性能的随机性，

并且通常会减少接受材料的检验量。在按确定性方式进行结构设计时，确定性设计值和基于统计设计值的使用方法相同。为了（确保）结构的完整性，结构中实际的（考虑包括适当的安全系数）的应力或应变不得超过材料的设计值。如果结构按概率方法设计（进行可靠性评估时），则只能采用基于统计的设计值。

为了理解“基于统计的”设计值，必须将所关心的材料性能当成随机变量，而不是常量。这一随机变量随试样的不同而依某种概率分布发生变化。一个合理的初步尝试就是定义材料性能的 B 基准值和 A 基准值为材料性能分布的十和一百分位点。人们期望材料性能值通常高于这两个值，因此这些定义是设计值的传统确定性定义的概率意义上的对应概念。当然，实践中存在的一个显而易见的问题就是人们不知道材料性能的概率分布。迄今为止，在这些定义中只用到了概率论的简单概念；在处理这些百分位点的不确定性时统计推断起着重要作用。

8.2.2 非结构型数据的基准值

在破坏 n 个试件前，想象每个试件（样）均具有一个可以描述成符合某个共同的概率分布的强度值。试件破坏后，人们得到 n 个值。如果 n 足够大，这些值的柱状图将接近该未知分布。这一概率分布称作母体，而这 n 个值则是该母体的一个随机样本。从概念上讲，人们可以作多次这种想象试验，获得多个不同组的 n 个值。基于统计的材料性能 B 基准值是由一个大小为 n 的随机样本算出的一个统计量。这样如果人们重复获得大小为 n 的随机样本且计算其基准值，95%的次数中的计算值将低于（未知的）十百分位点。同样地可定义 A 基准值，将十百分位点用一百分位点取代即可。按统计的说法，基准值是指定百分位点的 95%下置信限，有时叫做容许限。

注意基于统计的材料性能分两步确定。首先为了考虑材料性能的分散性，将用确定性方法处理的性能改用概率方法来处理。并根据该分布的百分位点初步确定基准值。如果人们能够获得足够的性能数据的话，这样做就能够计及上述的不确定因素（即分散性）。但是由于在计算时，人们用 n 个数据替代无限多的数据，因此，又引起了另外的不确定性。因而我们初步确定的百分位数用其保守的低估值来取代，以便考虑由于使用有限数据而引起的随机材料性能中的另外的不确定性。

举个例子有助于理解上述思想。假设材料的拉伸强度服从平均值为 1 000 MPa，标准差为 125 MPa 的正态分布。该分布的十个百分位为

$$z_{\alpha} \doteq 1000-(1.282)\times 125 \doteq 840\ \text{MPa}$$

如果数据为无限多，即已知总体，那么该值即为 B 基准值。假设只能得到 n=10 个性能数据，可以算出这 n 个数据的 B 基准值（见 8.3.4.3 节）。如果人们想要从同一母体得到多组大小为 10 的样本数据，对 95%的这些重复抽样来说，该基准值将低于 840 MPa。上述由少量数据样数确定 B 基准值的方法反映了实际存在的分散性，这一分散性主要起因于母体方差的不确定性（见 8.2.5 节）。

如果人们乐意作下述两个简化假设，那么目前的讨论就已经给出了材料基准值的清楚的完整的描述。首先材料性能的批间差异可以忽略；其次所有数据都是从相同条件下的试验中获得的。在 8.3.2 节中，这样的数据定义为非结构型数据。然而，复合材料的性能经常随批次的不同而变化较大，而且性能数据通常不是在单一确定的条件下而是在温度、湿度和铺层顺序等的一些组合条件下试验获得的。反映这些额外复杂性的数据被称为结构型数

据（见 8.3.2 节），且用回归和方差分析来分析处理这类数据。第 8.3.5 节将讨论一般的回归分析方法。

8.2.3 存在批间差异时的基准值

复合材料的很多性能在批与批之间出现较大的差异。由于这一差异，人们不应不加区别地将几批的数据汇集在一起并采用上面及 8.3.4 节讨论的非结构型数据分析方法。基准值必须体现材料批间的预期的差异，特别是当批次很少时或有特别的理由假设这一差异不可忽略时。合并不同批次的数据隐含了这类差异可以忽略的假设，而实际上情况并不是这样，由合并得出的值会过于乐观。在合并数据前必须进行 8.3.2 节的子样本相容性检验。下面用单侧 ANOVA 模型（8.3.5.2 节）的最简单的情形存在批间（或板间等）差异时的对材料基准值的解释。

在以下的讨论中，数据由在同一试验条件下同一材料的同一性能的 n 个测量值组成。在这一假定情形下这些数据的唯一明显的区别就是每个试件用 k 批原材料中的某一批制造。（同样，人们可以想象成试件用同批原材料制造，但需经几次热压罐加工，从而引起加工试件的板与板之间的不可忽略的性能差异）。每一个数据可看成三部分的和。第一部分为未知平均值，第二部分为由获得试件的批料引起的该平均值的漂移，第三部分为由同一批料不同试件测得的数据分散性引起的随机扰动。

该未知常量平均值与一系列确定性条件有关（例如，根据详细规定的试验方法在指定试验条件下试验的 8 层指定材料的单向拉伸强度）。如果人们想要不停地按批生产，根据这些确定性能条件从每批中加工试件并进行破坏试验，得到所需的性能测量值，则在无限多批的极限情况下所有这些测量值的平均值将逼近该未知常数。该未知平均值可表示成试件制备和试验条件的函数，这里，该函数形式是已知的，只是几个常数未知。这样处理涉及到回归模型的概念，在 8.3.5.1 节中将对回归模型进行具体论述。

可是设想人们只对取自单批的多个试件进行试验，在此情况下的平均强度也逼近某一常数，但这一常数与试件取自不同批的情形下的不同。上一段落中提到的平均值收敛于所有批次总的母体的平均值（总平均值），而在上述设想的情况下的平均值则收敛于某特定批的母体平均值，总的母体平均值（完全平均值）。总的母体平均值与某特定批的母体平均值之差是材料性能测量值的第二个分量。该差异为一随机量，它随批次发生无规律的变化。假定这一随机的“批料影响”服从具有零平均值和某种未知方差的正态分布，称该未知方差为方差的批间分量并记为 σ_b^2。

即使采用同批材料制造试件且在相同条件下试验，人们每次也得不到同样的值。除母体平均值和随机“批料影响”外，测量值还存在第三个分量。它也是随机的，但仅随批内试件不同而变化。该随机量称作批内差异，而且它被模拟成服从具有平均值为零，方差为 σ_w^2 的正态分布的随机变量。该方差称为方差的批内分量。

总而言之，取自特定批料的特定试件的数据的测量值由三部分的和来模拟：

$$x_{ijk} = \mu_i + b_j + e_{ijk} \tag{8.2.3}$$

式中 x_{ijk} 是第 i 个确定条件下取自第 j 批材料的第 k 个测量值。随机变量 b_j 和 e_{ijk} 服从具有平均值为零，方差分别为 σ_b^2 和 σ_w^2 的正态分布。在当前的讨论中只考虑一组确定条件，因此下标“i”可略去。对于 8.3.5.1 节和 8.3.5.2 节叙述的一般回归和方差分析模型，可能存

在多种确定因素的许多组合，那时方程(8.2.3)中的下标“i”必须保留。

如果可以获得超多数据，则 RECIPE（8.1.2 节）可用此数据确定基准值。对于特定的一组确定条件，这些值有 95%的把握低于从以后随机选取的批料中随机选取的观测值的相应的百分位点。这些值防止由批间差异导致以后的批料具有比现有批料低的平均性能值的可能性。

8.2.4 批料，板料及其混合

式(8.2.3)与 8.3.5 节叙述的模型基于最多两种差异来源的假设；即“批间差异”和“批内差异”。可是在复合材料的制造过程中，一般存在至少三种差异。对于预浸料制成的复合材料，另外的差异来源应归于实际上一般用一块“板料”同时制造几个试件。因此第三和来源可称作“板间”差异。

如果人们拥有来自几批但在单一确定条件下的材料的数据，仍不能分别评估批和板的差异。无论何时得到来自于新一批材料的数据，该数据仍然来自于不同的板。（在统计术语上，批间差异和板间差异不加区分的）。因此在此情况下我们所说的“批间差异”实际上是批间和板间差异之和。除非板间差异可以忽略，否则在上述情况下批间差异将被高估。这使材料基准值性能比本来的低。

其次考虑数据来自于几批但在多种确定条件下（见 8.3.7.8 节）的情形。如果人们假设数据来自于不同条件下同一批料不同的板，则原则上可分别评估批间和板间差异。然而本章的回归模型和 RECIPE 软件只包含其中一种差异。因此板间差异不是与上述批间差异混合，而是与批内差异混合。这样做的结果将导致材料基准值比本来的高一些。有几个原因认为这样处理产生的问题可能没有将板与批的差异混合引起的问题严重。或许其中最主要的原因是差异来源，因为批间差异是人们最为关心的，因而应对其进行恰当合理地处理。另一个原因是板内差异一般较大，如果板间差异相对于板内差异较小，则材料基准值不会比本来的高很多。

8.2.5 用于确定基准值的样本大小指南

材料基准值经常被称为材料性能，也就是说，这些值可理解为有助于表征材料与工艺的常数。即使材料、环境条件及试验状态保持不变，基准值也常常随数据组变化，因此将其作为材料常数通常是一种近似的作法。

可是，如果计算是基于足够多的数据，基准值必定能在工程精度内在类似的数据组中重复。本节旨在举例说明小样本的重复性问题并为确定在基准值计算中能够近似满足重复性要求的所必须的数据量提供指导。

多少数据是“足够的”取决于许多因素，包括

- 用于近似数据抽样母体的统计模型；
- 想得到的重复程度；
- 被测量性能的变异性，以及
- 由试验方法引起的性能测量值的差异。

因为这些，无法给出严格的建议。本节的讨论还有另一个目的。旨在为本手册的用户在确定样本大小时提供背景资料与指导性建议。我们强调本节仅涉及基准值相对于样本大小的稳定性问题。另一个值得单独考虑的与样本大小有关的重要问题是统计模型假设对基

准值的影响——因为依据小样本选取模型时具有相当大的不确定性。有关样本大小选择的影响的进一步的讨论参见 2.2.5 节。

8.2.5.1 例子

表 8.2.5.1 给出了室温干态条件下测得的单向复合材料的拉伸强度数据（单位为 ksi）。

表 8.2.5.1 室温干态单向复合材料的拉伸强度

226	227	226	232	252

这些数据的平均值和标准差为 $\bar{x}$=232.6 和 s=11.13。采用正态分布模型（8.3.4.3 节），这些数据的 B 基准值为

$$B=\bar{x}-k_B s=232.6-3.407\times(11.13)=195 \qquad 8.2.5.1$$

首先应强调的是在大多数应用中由少至 5 个试件确定的 B 基准值不太可能充分重复而当作材料常数看待。作个似是而非的假设，即上述 B 基准值数据取自平均值为 230 且标准差为 10 的正态分布的一个样本。

可以算出相应于假定强度测量值服从正态分布的 B 基准值的理论母体，如图 8.2.5.1 所示。注意观测到的基准值接近该基准值母体的平均值。这是预期的结果，因为假定的正态分布的参数基于确定基准值的同一组数据。但是，应该看到基准值附近±20 ksi 内的值也可能被观测到。基于这一分析，人们不能排除包含 5 个试件的下一个样本的 B 基准值低于 180ksi 和高于 220 ksi 的可能性。

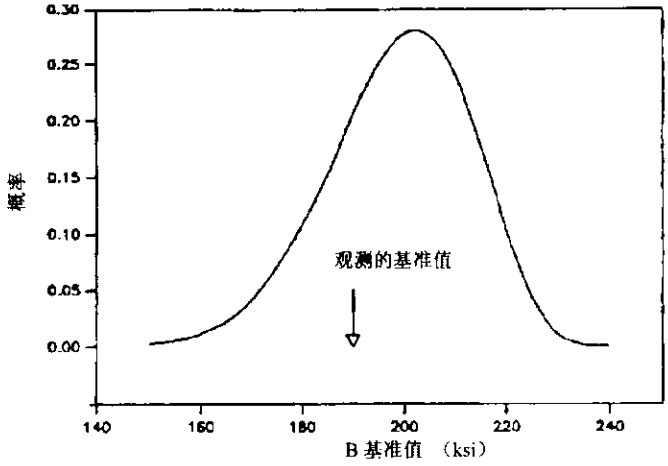


图 8.2.5.1 样本大小为 5 的 B 基准值母体

8.2.5.2 正态分布基准值的平均值和标准差

由小样本算得的基准值显示出高的变异性。量化这一变异性的一个途径就是当根据假定分布计算基准值的理论平均值、标准差与离散系数时，将这些量表示为试件数的函数。当然，这些计算取决于所选择的统计模型以及为该模型选择的参数。可是，这些计算的目的不是提供严格的标准，而是从定性上告知用户基准值的特定。

本小节的讨论将考虑一平均值为 100，标准差为 10 的正态分布。10%的离散系数对很多材料性能来说是典型的观测值，且 100 的平均值也与大多数单向复合材料的强度测量值(单位 ksi)在一个数量级内。选定正态分布是因为正态分布基准值方法具有广泛的吸引力且所需的计算都能以封闭形式完成。确定来自于 Weibull 母体的基准值的样本大小一般应大

于确定来自于正态母体的基准值的样本大小，以便获得同样的重复程度。此处仅考虑一个简单随机样本的基准值；下一小节将讨论 ANOVA 基准值。

来自平均值为 100，标准差为 10 的正态母体的 B 基准值的平均值和标准差的范围在图 8.2.5.2(a)中作为试件数的函数示出。注意，当样本大小为 10 或更小时变异非常大。

离散系数（CV）是标准差与平均值的比值。因此容易从图 8.2.5.2(a)的信息中得到作为样本大小的函数的 CV。图 8.2.5.2(b)示出了这些 CV 值，并在 10%处有一水平线以供参考。

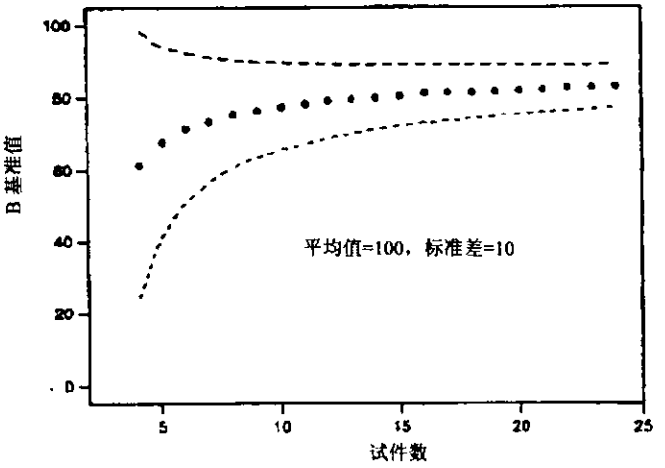


图 8.2.5.2(a)　正态分布 B 基准值及标准差范围

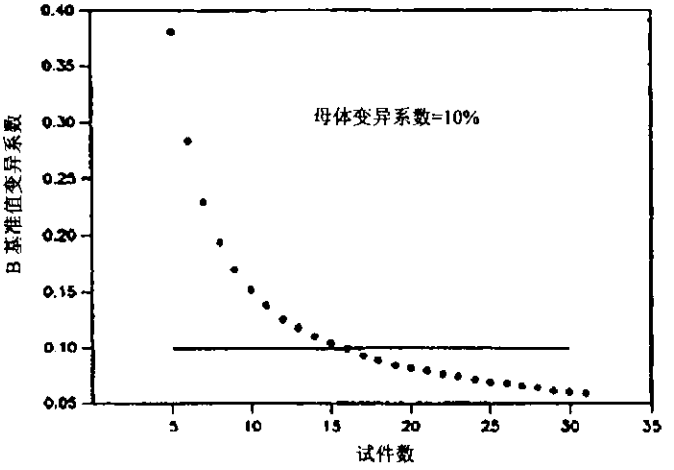


图 8.2.5.2(b)　B 基准值的离散系数（正态分布模型）

由于 A 基准值是关于母体一百分位的 95%下置信限，而 B 基准值是关于十百分位的 95%下置信限，显而易见，对给定的基准值重复性程度，A 基准值比 B 基准值需要明显多的数据。如果假设测量值为取自正态分布的一个样本，则有理由先决定确定 B 基准值需要的试件数 n，然后将之乘 3 可得确定 A 基准值所需的样本大小。这一方法是基于母体离散系数小于 15%的假设。

8.2.5.3 采用方差分析法ANOVA的基准值

当数据来自于几批且批间差异明显时，框图（图 8.3.1）表明应使用 8.3.5.2 节的 ANOVA 法。要确定当数据来自几批材料时所需的试件数时，首先将数据按来自于单批处理，基于前一节的讨论选择样本大小，用 n 表示。如果 J 是每批的试件数（假设各批的试件数相等）且ρ为同批试件测得的任意两测量值间的相关系数，则在多批情形下出现可比重复性所需的试件数近似为

$$\tilde{n} = [J\rho + 1 - \rho]n \qquad 8.2.5.3$$

如果ρ=0，不存在批间差异；因此$\tilde{n} = n$。在另一极端情形下，即如果ρ=1，每批内完全相关（即每批由 J 个相同的数据组成），则$\tilde{n} = Jn$，也就是说，要获得与 n 个不相关（ρ=0）试件同样的重复程度，人们需要 n 批试件。实际上，ρ是未知的。作为确定样本大小的指导性意见，对大多数情况，令ρ=1/2 就足够了。这表明要达到与大小为 n 的单个样本同样的重复程度，人们需要样本大小为 J 的$(n(J+1)/(2J))$批试件。通常更可取的方法是将确定数量的试件分配在尽可能多的批中。可是，测试一批新试件比在单批内测试更多试件要贵很多。有时情况是这样的，即同一批的两块分别加工与测试的板之间的差异与两块来自不同批的板之间的差异相差不大。在此情况下有理由用同一批的多块板替代多个批料。

假设想要得到一个与大小 n=5 的单个样本的 B 基准值具有相同重复程度的 A 基准 ANOVA 值。首先如 8.2.5.2 节所述对 A 基准值样本大小进行修正：n_A=3×5=15，其次，假定批间差异适中且批的大小（比如说）J=3，计算可得达到所需的重复程度需要 $n_A[(J+1)/(2J)]$=10 批共计 30 个试件。

8.3 基于统计的材料性能的计算

8.3 节包括从复合材料试验数据中获得 B 基准值和 A 基准值的计算方法。

8.3.1 计算程序指南

用于确定基准值的方法取决于数据的特点。程序框图 8.3.1 说明了选择合适的计算方法的逐次方法。特定计算方法的详细资料在稍后的几节中提供。分段基于数据是否为结构型数据选用两种方法。第 8.3.2 节 k 样本 Anderson-Darling 检验检查数据组间的差异，以确定差异是明显的或可忽略的，还可确定数据是否该视为结构型数据或非结构型数据。8.3.2 节讨论了结构型数据与非结构型数据的区别。简而言之，不能分组的数据，或组间差异可以忽略的数据称为非结构型数据。否则数据称为结构型数据。必须采用 8.3.3 节的检验对所有数据进行异常数据检查。就此而言，基于数据为结构型数据或非结构型数据选用不同的分析方法。

首先叙述非结构型数据的分析方法。如果非结构型数据已被分组且已发现组间差异可以忽略，则合并数据组。对于合并后的数据必须再次进行异常数据检查。依次进行 Weibull 分布，正态分布和对数正态分布的拟合优度检验（8.3.4.1 节）。如果关于 Weibull 分布的观测显著性水平（OSL）大于 0.05，表明数据能用 Weibull 分布适当拟合，然后推荐使用 Weibull 基准值（8.3.4.2 节）。如果关于 Weibull 分布的观测显著性水平小于 0.05，而关于正态分布的观测显著性水平（OSL）大于 0.05，则因使用正态分布基准值（8.3.4.3 节）。如果 Weibull 分布和正态分布的拟合优度检验的观测显著性水平都小于 0.05，而关于对数

正态分布的观测显著性水平（OSL）大于 0.05，则推荐使用对数正态分布基准值（8.3.4.4 节）。如果这三种分布的观测显著性水平没有一个大于 0.05，则推荐使用非参数基准值方法（8.3.4.5 节）。8.3.4 节提供分布选择顺序的基本原理。一种可选的方法是使用相应于最佳拟合模型的基准值。8.3.6 节中所述探索性数据分析（EDA）方法能够提供数据分布的图示技术，以支持拟合优度检验。

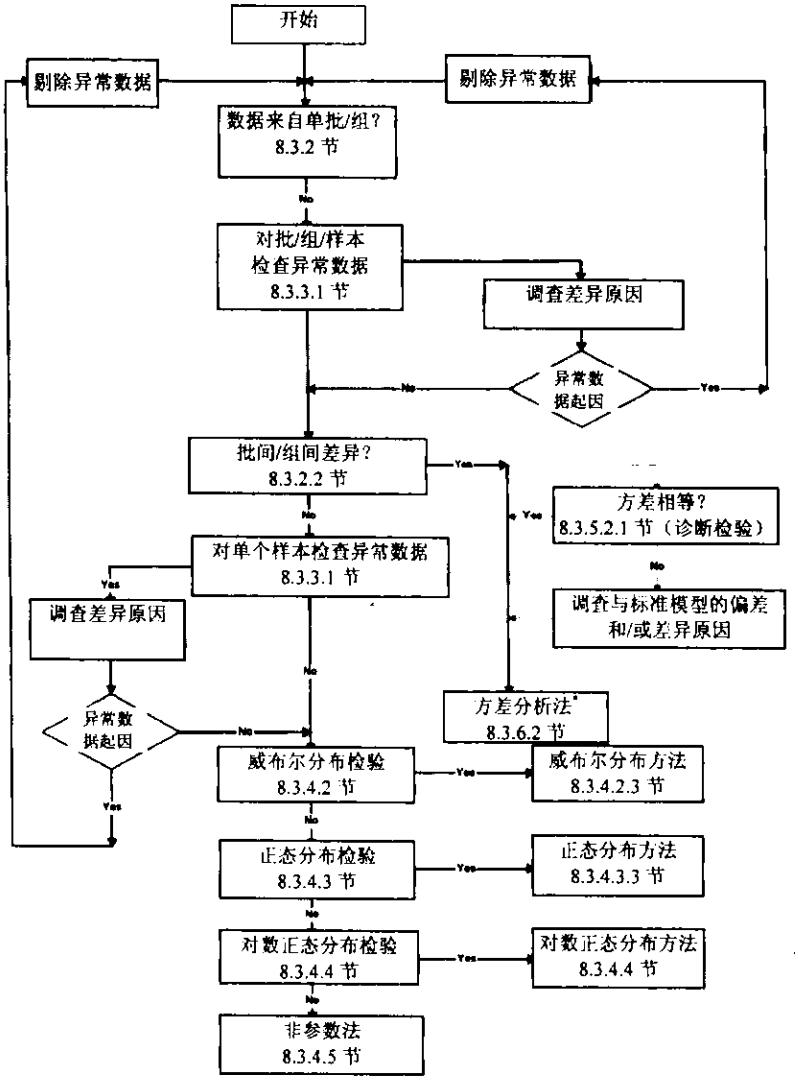


图 8.3.1　B 基准材料性能计算方法示例框图*

用于结构型数据的分析方法根据确定性影响与随机影响对数据进行分组。确定性影响指的是某一独立变量已被设定或测量的条件状态。确定性影响的一个例子就是在不同的经测量的试验温度下有意或无意地获得数据。随机影响为原因不明或不可测的可变性的结果。随机影响的一个例子就是数据从存在明显批间差异（见 8.1.4 节中的定义）的几批试件中获得。对带有随机影响、确定性影响及其联合影响的数据集的分析需要对用于回归和方差分

* 方差分析法用于简单多批情形。其他情况可用线性回归处理。正在考虑将经线性回归分析的数据接收纳入MIL-HDBK-17.

析的线性模型有基本的了解。虽然详细说明该主题超出本手册的范围，但是在 8.3.5.1 节中仍对此作了最基本的介绍。结构型数据的最简单情形就是只有一组数据受一种随机因素影响，例如批或板的影响。对于这种情形，必须用方差分析（ANOVA）方法（见 8.3.5.2 节）计算基准值。在计算基准值前必须进行方差相等诊断检验。注意，当数据仅由两组数据组成时，有一种确定基准值的特殊方法。

只有一种确定性影响且没有随机影响时，采用线性回归方法确定基准值（8.3.5.3 节）。对于没有随机影响或有一种随机影响以及任意数目的确定性影响的情形，可以采用计算程序 RECIPE 并根据回归模型计算基准值。8.3.5.4 节中叙述了合并来自于多种环境条件的小数据集的方法。

8.3.2 子体相容性——结构型数据或非结构型数据

在确定数据是否存在自然或逻辑分组时，应考虑到预期的和未预料到的情况。存在自然分组的数据或所关心的响应能随已知因素系统变化的数据为结构型数据。例如几批中各批的测量值可根据批次适当分组，及在不同已知温度下的测量值可用线性回归模型（8.3.5 节）模拟；因此两者都可看成结构型数据。在许多方面，分析非结构型数据更容易一些。因此常常期望能证明数据的自然分组无明显影响。当所有相关信息包含在响应测量值本身中时，数据被看成非结构型数据。这可能是因为所有测量值均已知，要不然是因为人们可以忽略数据中可能的结构。例如，按批分组且证明批间差异可以忽略的测量值数据可以视为非结构型数据。一个非结构型数据集是一个简单随机样本。

下一节介绍 k 样本 Anderson-Darling 检验，用以证明各子体是相容的，也就是说，自然分组无明显影响。相容的各组可以当成同一母体的一部分。这样，按自然确定分组的结构型数据，在用 k 样本 Anderson-Darling 检验显示出自然分组无明显影响时可变成为非结构型数据。

对于复合材料，推荐将名批次（如果可能，采用板也可以）视为自然分组并检验其相容性。其他形式的分组也许是由于预期的行为造成的。铺层数可能对±45 剪切试验有明显影响；因此，对于这种试验，铺层数不同的试件自然按铺层数分组。关于数据分组的决定也可能受试验目的影响。例如，考虑应变速率对材料性能的影响。可以设计试验程序来评估应变速率对某一特定性能的影响。该程序将得到在经选择与控制的应变速率下的数据。这将提供数据的自然分组。可用子体相容性检验方法确定是否存在明显影响；用结构型数据方法，例如线性回归方法。

8.3.2.1 分组数据的符号

对于结构型数据，每个数值都属于某一特定的组，而且每组内通常将有不止一个数据。因此将用双下标识别观测值。假定数据用 x_{ij} 表示，$i=1, \ldots, k$ 和 $j=1, \ldots, n_i$，其中 i 表示组号，j 表示该组内观测值号。k 组中的第 i 组有 n_i 个数值。那么总的观测值数为 $n=n_1+n_2+\ldots+n_k$。将经合并的数据集中的不同数值，按从最小到最大排序，记为 $z_{(1)}, z_{(2)}, \ldots, z_{(L)}$，其中 L 在存在相同值时将小于 n。

8.3.2.2 k样本Anderson-Darling检验

k样本Anderson-Darling检验是检验从中抽取两组或多组数据的母体是相同的假设的非参数统计方法。该检验要求各组为来自某一母体的独立随机样本。关于该方法的更多的知

识见文献 8.3.2.2。

k 样本 Anderson-Darling 统计量为

$$\mathrm{ADK}=\frac{n-1}{n^2(k-1)}\sum_{i=1}^{k}\left[\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{L}h_j\frac{(nF_{ij}-n_iH_j)^2}{H_j(n-H_j)-nh_j/4}\right] \qquad 8.3.2.2(a)$$

式中：h_j=合并样本中等于 $z_{(j)}$值的个数

H_j=合并样本中小于 $z_{(j)}$值的个数加上合并样本中等于 $z_{(j)}$值的个数的一半

F_{ij}=第 i 组中小于 $z_{(j)}$值的个数加上该组中等于 $z_{(j)}$值的个数的一半

在母体间无差异的假设下，ADK 的平均值近似为 1，方差近似为

$$\sigma_n^2=\mathrm{Var(ADK)}=\frac{an^3+bn^2+cn+d}{(n-1)(n-2)(n-3)(k-1)^2} \qquad 8.3.2.2(b)$$

其中

$$a=(4g\text{-}6)(k\text{-}1)+(10\text{-}6g)S \qquad 8.3.2.2(c)$$

$$b=(2g\text{-}4)k^2+8Tk+(2g\text{-}14T\text{-}4)S\text{-}8T+4g\text{-}6 \qquad 8.3.2.2(d)$$

$$c=(6T+2g\text{-}2)k^2+(4T\text{-}4g+6)k+(2T\text{-}6)S+4T \qquad 8.3.2.2(e)$$

$$d=(2T+6)k^2\text{-}4Tk \qquad 8.3.2.2(f)$$

式中

$$S=\sum_{i=1}^{k}\frac{1}{n_i} \qquad 8.3.2.2(g)$$

$$T=\sum_{i=1}^{n-1}\frac{1}{i} \qquad 8.3.2.2(h)$$

及

$$g=\sum_{i=1}^{n-2}\sum_{j=i+1}^{n-1}\frac{1}{(n\text{-}i)j} \qquad 8.3.2.2(i)$$

如果临界值

$$\mathrm{ADC}=1+\sigma_n\left[1.645+\frac{0.678}{\sqrt{k-1}}-\frac{0.362}{k-1}\right] \qquad 8.3.2.2(j)$$

小于式 8.3.2.2(a)中的检验统计量，则可以断定（5%的错判风险）各组是从不同母体中抽取。否则，接受各组来自同一母体的假设，且该数据可看成关于所讨论的（有关的）的随机或确定性影响的非结构型数据。表 8.5.6 中包含所有 n_i 都相等情形时的临界值（式 8.3.2.2(j)）。8.3.7.1 节中实例的第二步示范该方法。

8.3.3 检查异常数据

异常数据就是在数据集中比大多数观测值低很多或高很多的观测值。异常数据经常是错误的值，这些错误值或许是由于记录错误、试验中不正确的设置环境条件或采用了带缺陷的试件而引起。数据必须例行进行异常数据筛选，因为这些数据对统计分析有实质性的影响。除对异常数据进行定量的筛选外，还必须对数据进行目视检查，因为有关异常数据检查的统计方法并非是完全可靠的。

用最大赋范残差（MNR）方法来对异常数据进行定量的筛选。该检验筛选非结构型数据集中的异常数据。如果数据能够自然分成组（由于批次、厂商、温度等等），那么人们

应该组成尽可能最小的组并分别对其进行筛选。基于上一节，来自相容的组的数据必须合并，并对合并后的较大的组进行筛选检验。当然只有当合并数据有意义时才进行数据合并。例如，同一性能且环境条件一致的几批数据可以合并，但拉伸和压缩数据决不能合并。

必须研究被识别成异常数据的所有的值。如果可能，必须纠正原因可以确定的那些值，否则弃之。发现数据采集与记录中的错误时，必须检查所有数据以确定是否出现了类似的错误；这些值也必须更正或丢弃。如果找不到异常数据的起因，必须将之保留在数据集中。如果某异常数据是明显错误的，假若删除某值的主观决定已作为数据分析的一部分记录在案，经过仔细分析后可删除该值。如果任意观测值被更正或弃置，必须重复进行异常数据的统计检验和目视检查。

8.3.3.1 最大赋范残差

最大赋范残差（MNR）检验是识别非结构型数据集中异常数据的一种筛选方法。与样本标准差相对而言，如果某值与样本平均值的绝对偏差太大，而并非是由于偶然因素造成的话，依据该方法（MNR），该值被公布成异常数据。这一方法假设不是异常数据的观测值可看成来自某正态母体的一个随机样本。MNR 方法一次只能检测一个异常数据，因此其显著性水平适用于对数据个体进行判断。关于该方法的进一步的知识可在文献 8.3.3.1(a)与(b)中找到。

假定 x_1，x_2，…，x_n 表示大小为 n 的样本中的值，并假定 $\bar{x}$ 和 s 为 8.1.4 节中定义的样本平均值和样本标准差。MNR 统计量为关于样本平均值的绝对偏差被样本标准差除：

$$\mathrm{MNR}=\frac{\max|x_i-\bar{x}|}{s} \qquad i=1,2,\cdots,n \qquad 8.3.3.1(a)$$

检验时，将式 8.3.3.1(a)的值与表 8.5.7 中的样本大小为 n 的临界值进行比较。这些临界值由下式计算

$$C=\frac{n-1}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{t^2}{n-2+t^2}} \qquad 8.3.3.1(b)$$

式中 t 为自由度为 n-2 的 t 分布的[1-α/(2n)]分位数，α为显著性水平。推荐的显著性水平 α=0.05。

如果 MNR 小于临界值，则样本中未检查出异常数据；否则与最大的 $|x_i-\bar{x}|$ 值关联的数值公布为异常数据。

如果检查出异常数据，则从样本中剔除该值并再次使用 MNR 方法。重复该过程直至检查不出异常数据。注意对样本进行第 j 次异常数据检查时，采用样本大小 n-j-1 计算平均值、标准差和临界值。必须注意：对于小样本，例如包含 5 个或 6 个数据的一个批次，该方法可能将大多数数据识别为异常数据，特别是当其中两个或多个数据相等时更是如此。8.3.7.1 节中实例的第一步示范该方法。

8.3.4 非结构型数据的基准值

用于计算非结构型数据基准值的方法取决于假定的分布形式。8.3.4 节中包含对 Weibull 分布、正态分布和对数正态分布进行拟合优度检验的方法。

如图 8.3.1 所示，如果 Weibull 分布能恰当的拟合数据，则推荐使用该模型，即使是其他模型显得拟合得更好。优先选择 Weibull 分布基于下述两个因素：

- 理论指出 Weibull 分布适合于模拟脆性材料，例如复合材料纤维的强度分布（例如，见文献 8.3.4(a)）
- 二维和三维单向复合材料的“束链”强度模型表明 Weibull 模型适合于此类复合材料的强度分布。这一结果在文献 8.3.4(b)与(c)中陈述。

如果证明 Weibull 模型只能适当拟合数据，那么依次进行正态分布和对数正态分布检验。如果证明这三种母体模型都不能适当拟合数据，则应该采用非参数法来计算基准值。

应采用 8.3.6 节中所述探索性数据分析（EDA）方法用图形来显示数据，突出潜在的困难并提供拟合优度的图形证据以支持本节中各种检验的定量结论。

8.3.4.1 拟合优度检验

采用对尾端区域差异敏感的 Anderson-Darling 检验统计量检验每种分布。Anderson-Darling 检验将所考虑的分布累积分布函数与数据的累积分布函数进行比较。首先将数据转换成所考虑分布的常用的表示方式。例如，对于正态分布，数据被转化成平均值为 0 且方差为 1 的标准正态分布。基于 Anderson-Darling 检验统计量计算每个检验的观测显著性水平(OSL)。如果所考虑的分布实际上就是数据潜在的分布时，OSL 度量所观察的 Anderson-Darling 统计量至少与计算值非常一致的概率。OSL 是当数据确实来自被检验分布的假设正确时获得一个至少与计算值一样大的检验统计量的概率。如果 OSL 小于或等于 0.05，则拒绝该假设（至多 5%的错判风险）。然后认为就象数据不是来自被检验的分布，继续对数据进行其他分布形式的检验。

除非另外注明，下文中均用 n 表示样本大小，样本观测值用 x_1，x_2，…，x_n 表示且按递增顺序排列的样本观测值用 $x_{(1)}$，$x_{(2)}$，…，$x_{(n)}$表示。

8.3.4.2 双参数Weibull分布

为了计算双参数 Weibull 母体的基准值，首先必须获得该母体的形状与尺度参数的估计值。8.3.4.2.1 节包含计算这些参数的极大似然估计值的逐步方法。拟合优度检验的计算细节在 8.3.4.2.2 节中提供。8.3.4.2.3 节中略述了采用这些估计值计算基准值的计算方法。8.3.7.1 节中给出了示范这些方法的实例。关于这些方法的更多的资料见文献 8.3.4.2。

8.3.4.2.1 估计Weibull分布的形状与尺度参数

本节描述估计双参数 Weibull 分布的参数的极大似然方法。形状与尺度参数的极大似然估计值表示为 $\hat{\beta}$ 和 $\hat{\alpha}$。估计值为下述方程组的解：

$$\hat{\alpha}\hat{\beta}n-\frac{\hat{\beta}}{\hat{\alpha}^{\hat{\beta}-1}}\sum_{i=1}^{n}x_i^{\hat{\beta}}=0 \qquad 8.3.4.2.1(a)$$

和

$$\frac{n}{\hat{\beta}}-n\ln\hat{\alpha}+\sum_{i=1}^{n}\ln x_i-\sum_{i=1}^{n}\left[\frac{x_i}{\hat{\alpha}}\right]^{\hat{\beta}}(\ln x_i-\ln\hat{\alpha})=0 \qquad 8.3.4.2.1(b)$$

式 8.3.4.2.1(a)可写成为

$$\hat{\alpha}=\left[\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i^{\hat{\beta}}}{n}\right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}} \qquad 8.3.4.2.1(c)$$

将式 8.3.4.2.1(c)代入式 8.3.4.2.1(b)中可得下面的方程

$$\frac{n}{\hat{\beta}}+\sum_{i=1}^{n}\ln x_i-\frac{n}{\sum_{i=1}^{n}x_i^{\hat{\beta}}}\sum_{i=1}^{n}x_i^{\hat{\beta}}\ln x_i=0 \qquad 8.3.4.2.1(d)$$

式 8.3.4.2.1(d)可用数值法求解得到 $\hat{\beta}$，将之代入式 8.3.4.2.1(c)得到 $\hat{\alpha}$。

图 8.3.4.2.1 给出了根据上述方法计算 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 估计值的三个程序的 FORTRAN 源代码。WBLEST 为返回参数 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 估计值的子程序。FNALPH 是计算计算尺度参数估计值 $\hat{\alpha}$ 的函数子程序。GFUNCT 是计算式 8.3.4.2.1(d)的值的函数子程序。WBLEST 的自变量为：

X=长度为包含数据的 NOBS 向量（输入）。

NOBS=数值个数 n（输入）。

BETA=形状参数估计值（输出）。

ALPHA=尺度参数估计值（输出）。

下一段叙述该 FORTRAN 源程序计算估计值所用的算法。

式 8.3.4.2.1(d)是 $\hat{\beta}$ 的单调递增*连续函数。将式 8.3.4.2.1(d)左边除以 n 并记为 G($\hat{\beta}$)，再用下面的迭代方法获得 $\hat{\beta}$ 的一个解。令 S_y 表示 y_1，y_2，…，y_n 的标准差，这里 $y_i=\ln x_i$，$i=1$，…，n。计算 $I=1.28/S_y$，将其作为求解的初始估计值并计算 $G(I)$。如果 $G(I)>0$，那么找出使得 $G(I/2^k)<0$ 的最小正整数 k 并令 $L=I/2^k$ 及 $H=I/2^{k-1}$。如果 $G(I)<0$，那么找出使得 $G(2^kI)>0$ 的最小正整数 k 并令 $L=2^{k-1}I$ 及 $H=2^kI$。在每一种情况下，区间（L，H）都包含 $G(\hat{\beta})=0$ 的解。取 $M=(L+H)/2$，计算 $G(M)$。如果 $G(M)=0$，那么解为 $\hat{\beta}=M$。如果 $G(M)>0$，那么令 $H=M$。如果 $G(M)<0$，那么令 $L=M$。新区间（L，H）仍然包含 $G(\hat{\beta})=0$ 的解，但是它只是原区间的一半。计算新的 M 值并再次开始区间二分过程。这一过程一直重复直到 $H-L<2I/10^6$ 为止。此时取 $G(\hat{\beta})=0$ 的解为 $M=(L+H)/2$。解的误差不超过 $I/10^6$。

```
C-----------------------------------------------------------------------
      SUBROUTINE WBLEST(X,NOBS,ALPHA,BETA)
C
C     COMPUTE MLES FOR SHAPE PARAMETER (BETA) AND SCALE PARAMETER
C     (ALPHA) BY SOLVING THE EQUATION G(BETA) = 0, WHERE G IS
C     A MONOTONICALLY INCREASING FUNCTION OF BETA.
C THE INITIAL ESTIMATE IS: RI=(1.28)/(STD. DEV. OF LOG(X)'S)
C     AND THE TOLERANCE IS : 2*RI/(10**6).
C
      DIMENSION X(NOBS)
C
      RN = FLOAT(NOBS)
      SUMY = 0.0
      SUMYSQ = O.O
      DO 2 I = 1, NOBS
                Y = ALOG(X(I))
                SUMY = SUMY + Y
                SUMYSQ = SUMYSQ + (Y**2)
2   CONTINUE
      YSTD = SQRT((SUMYSQ - (SUMY**2)/RN)/(RN - 1.0))
      XGM = EXP(SUMY/RN)
      RI = 1.28/YSTD
      TOL = 2.0*.000001*RI
      BETAM = RI
      GFM = GFUNCT(X,NOBS,BETAM,XGM)
C
C     IF G(BETAM) .GE. 0, DIVIDE THE INITIAL ESTIMATE BY 2 UNTIL
C     THE ROOT IS BRACKETED BY BETAL ND BETAH.
C
      IF(GFM .GE. 0.0) THEN
```

* 原文为单调递减函数，因为与后边的算法介绍内容矛盾，译者作合理更改。

```
            DO 3 J = 1, 20
                    BETAH = BETAM
                    BETAM = BETAM/2.0
                    GFM = GFUNCT(X,NOBS,BETAM,XGM)
                    IF (GFM .LE. O.0) GO TO 4
3             CONTINUE
            STOP 'GFM NEVER LE 0'
4             CONTINUE
            BETAL - BETAM
        ENDIF
C
C       IF G(BETAM) .LT. 0, MULTIPLY THE INITIAL ESTIMATE BY 2
C       UNTIL THE ROOT IS BRACKETED BY BETAL AND BETAH
C
        IF(GFM .LT. 0.0) THEN
            DO 7 J = 1, 20
                    BETAL=BETAM
                    BETAM=BETAM*2.O
                    GFM=GFUNCT(X,NOBS,BETAM,XGM)
                    IF(GFM .GE. 0.0) GO TO 8
```

图 8.3.4.2.1　计算双参数 Weibull 分布形状与尺度参数估计值的 FORTRAN 程序(转下页)

```
8             CONTINUE
            BETAH = BETAM
        ENDIF
C
C       SOLVE THE EQUATION G(BETA) = O FOR BETA BY BISECTING THE
C       INTERVAL (BETAL,BETAH) UNTIL THE TOLERANCE IS MET
C
10 CONTINUE
        BETAM = (BETAL + BETAH) / 2.0
        GFM = GFUNCT(X,NOBS,BETAM,XGM)
        IF(GFM .GE. 0.0) THEN
                BETAH = BETAM
        ENDIF
        IF(GFM .LT. 0.0) THEN
                BETAL = BETAM
        ENDIF
        IF((BETAH - BETAL) .GT. TOL) GO TO 10

C
        BETA = (BETAL + BETAH) / 2.0
        ALPHA = FNALPH(X,NOBS,BETA,XGM)
        RETURN
        END

C-----------------------------------------------------------------------
        FUNCTION FNALPH(X,NOBS,BETA,XGM)
C
C       COMPUTE MLE FOR TWO-PARAMETER WEIBULL SCALE PARAMETER (ALPHA)
C       XGM IS THE GEOMETRIC MEAN OF THE X'S
C
        DIMENSION X(NOBS)
        RN = FLOAT(NOBS)
C
        SUMZ = 0.0
        DO 20 I = 1, NOBS
            SUMZ = SUMZ I (X(I)/XGM)**BETA
        20 CONTINUE
C
        FNALPH = XGM*(SUMZ/RN)**(1./BETA)
C
        RETURN
        END
C-----------------------------------------------------------------------

C-----------------------------------------------------------------------
        FUNCTION GFUNCT(X,NOBS,BETA,XGM)
C
C       COMPUTE G FUNCTION USED IN ESTIMATING THE TWO-PARAMETER WEIBULL
C       SHAPE PARAMETER (BETA).
C       XGC IS THE GEOMETRIC MEAN OF THE X'S USED IN ESTIMATING ALPHA.
C
```

```
      DIMENSION X(NOBS)
      RN = FLOAT(NOBS)
C
      ALPHA = FNALPH(X,NOBS,BETA,XGM)
      SUMYZ = 0.0
      DO 10 I = 1, NOBS
         SUMYZ = SUMYZ + ALOG(X(I))*((X(I)/ALPHA)**BETA - 1.)
10    CONTINUE
C
      GFUNCT = (SUMYZ/RN) - 1.0/BETA
C
      RETURN
      END
C-----------------------------------------------------------------
```

图 8.3.4.2.1　计算双参数 Weibull 分布形状与尺度参数估计值的 FORTRAN 程序(续上页)

8.3.4.2.2　双参数Weibull分布拟合优度检验

通过比较最佳拟合数据的累积 Weibull 分布函数(8.1.4 节)与数据的累积分布函数，来考察双参数 Weibull 分布。采用 8.3.4.2.1 节中的形状与尺度参数估计值，令

$$z_{(i)} = [x_{(i)}/\hat{\alpha}]^{\hat{\beta}}, \qquad i = 1, \cdots, n \qquad 8.3.4.2.2(a)$$

则 Anderson-Darling 统计量为

$$\mathrm{AD} = \sum_{i=1}^{n} \frac{1-2i}{n}\left[\ln[1-\exp(-z_{(i)})] - z_{(n+1-i)}\right] - n \qquad 8.3.4.2.2(b)$$

观测显著性水平为

$$\mathrm{OSL} = 1/\{1+\exp[-0.10 + 1.24\ln(\mathrm{AD}^*) + 4.48\mathrm{AD}^*]\} \qquad 8.3.4.2.2(c)$$

式中

$$\mathrm{AD}^* = \left(1 + \frac{0.2}{\sqrt{n}}\right)\mathrm{AD} \qquad 8.3.4.2.2(d)$$

假设数据样本实际上就是来自某个 Weibull 分布母体时，OSL 度量所观察的 Anderson-Darling 统计量至少与计算值非常一致的概率。如果 OSL≤0.05，可以断定（5%的错判风险）该母体不符合双参数 Weibull 分布。否则，则母体符合双参数 Weibull 分布的假设成立。关于该方法的更多的资料见文献 8.3.4.2。

8.3.4.2.3　双参数Weibull分布的基准值

如果非结构型数据集来自双参数 Weibull 分布，其 B 基准值为

$$\mathrm{B} = \hat{q}\exp\left\{\frac{-V}{\hat{\beta}\sqrt{n}}\right\} \qquad 8.3.4.2.3(a)$$

式中

$$\hat{q} = \hat{\alpha}(0.10536)^{1/\hat{\beta}} \qquad 8.3.4.2.3(b)$$

以及 V 是表 8.5.8 中对应于样本大小 n 的值。式 8.5.8(h)给出了 V 的数值近似值。

要计算 A 基准值，使用表 8.5.9 中适当的 V 值并用 8.3.4.2.3(c)替代 8.3.4.2.3(b)。

$$\hat{q} = \hat{\alpha}(0.01005)^{1/\hat{\beta}} \qquad 8.3.4.2.3(c)$$

8.3.4.3　正态分布

为了计算某正态分布母体的基准值，必须得到母体平均值和标准差的估计值。8.3.4.3.1 节给出计算这些参数的公式。8.3.4.3.2 节提供正态分布拟合优度检验方法。8.3.4.3.3 节给出

B 基准值的计算方法。8.3.7.1 节中实例示范这些方法。

8.3.4.3.1 估计正态分布的平均值和标准差

母体平均值和标准差用样本平均值$\bar{x}$和样本标准差 s 估计。

$$\bar{x}=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}x_i$$

$$s^2=\frac{1}{n-1}\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2$$

8.3.4.3.2 正态分布的拟合优度检验

通过比较最佳拟合数据的累积正态分布函数(8.1.4 节)与数据的累积分布函数来考察正态分布。令

$$z_{(i)}=\frac{x_{(i)}-\bar{x}}{s} \qquad i=1,\cdots,n \qquad \text{8.3.4.3.2(a)}$$

式中 $x_{(i)}$是样本中第 i 个最小观测值，$\bar{x}$ 是样本平均值，s 为样本标准差。

Anderson-Darling 统计量为

$$\mathrm{AD}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1-2i}{n}\left\{\ln[F_0(z_{(i)})]+\ln[1-F_0(z_{(n+1-i)})]\right\}-n \qquad \text{8.3.4.3.2(b)}$$

式中 F_0 为标准正态分布函数（式 8.1.4(e)）*。观测显著性水平为

$$\mathrm{OSL}=1/\{1+\exp[-0.48+0.78\ln(\mathrm{AD}^{**})+4.58\mathrm{AD}^{**}]\} \qquad \text{8.3.4.3.2(c)}$$

式中

$$\mathrm{AD}^{**}=\left(1+4/n-25/n^2\right)\mathrm{AD}^{**} \qquad \text{8.3.4.3.2(d)}$$

假如数据样本实际上就是来自某个正态分布母体时，那么 OSL 度量所观察的 AD 统计量至少与计算值非常一致的概率。如果 OSL≤0.05，可以断定（5%的错判风险）该母体不符合正态分布。否则，则该母体符合正态分布的假设成立。关于该方法的更多的资料见文献 8.3.4.2。

8.3.4.3.3 正态分布的基准值

如果非结构型数据集来自正态分布，其 B 基准值为

$$\mathrm{B}=\bar{x}-k_{\mathrm{B}}s \qquad \text{8.3.4.3.3(a)}$$

式中 k_{B} 为表 8.5.10 中的适当的单侧容限系数。式 8.5.10 给出了 k_{B} 的数值近似值。

要计算 A 基准值，用表 8.5.11 中适当的 k_{A} 值或式 8.5.11 的 k_{A} 的近似值替代 k_{B}。

8.3.4.4 对数正态分布

对数正态分布是一种正的歪斜分布，它与正态分布简单相关。如果某变量符合对数正态分布，那么该变量的对数就符合正态分布。在 MIL-HDBK-17 中采用以 e 为底的自然对数。对数正态分布的定义见 8.1.4 节。用 8.3.7.3 节中的实例示范说明 8.3.4.3 节中的对数正态分布方法的应用。

为了对数正态分布进行拟合优度检验，对数据取对数然后进行 8.3.4.3 节中的正态分布的 Anderson-Darling 检验。采用自然对数，令

---

* 译者注：原文有误，式 8.1.4(e)不是标准正态分布函数，而是通常的正态分布的概率密度函数。

** 原文误为 $\mathrm{AD}^{*}=\left(1+0.2/\sqrt{n}\right)\mathrm{AD}$

$$z_{(i)} = \frac{\ln(x_{(i)}) - \bar{x}_L}{s_L} \qquad i = 1, \cdots, n \qquad 8.3.4.4(a)$$

式中 $x_{(i)}$是样本中第 i 个最小观测值，$\bar{x}_L$ 和 s_L 为 $\ln(x_{(i)})$的平均值及标准差。

采用式 8.3.4.3(b)计算 Anderson-Darling 统计量并用式 8.3.4.3(c)计算观测显著性水平（OSL）。假如数据样本实际上就是来自某个正态分布母体时，那么 OSL 度量所观察的 AD 统计量至少与计算值非常一致的概率。如果 OSL≤0.05，可以断定（5%的错判风险）该母体不符合对数正态分布。否则，则接受该母体符合对数正态分布的假设。关于该方法的更多的资料见文献 8.3.4.2。

假定非结构型数据是来自对数正态分布母体的一个样本，那么其基准值应采用下列方法计算。用 8.3.4.3 节中给出的公式来计算该基准值。注意，这里采用数据的对数而不是采用原始观测值来进行计算。然后必须采用所用对数变换的逆变换将计算出的 B 基准值转换回原始的单位。

8.3.4.5 非参数的基准值

当人们通常由于 Weibull、正态和对数正态模型均不能适当拟合数据而不愿意假定某一特定母体分布模型时，必须采用这些方法来计算非结构型数据的基准值。根据样本大小情况，有两种方法可供选用。

8.3.4.5.1 大样本的非参数基准值

要计算 n>28 时的 B 基准值，先确定表 8.5.12 中相应于样本大小 n 的 r_B 值。当样本大小介于表列值之间时，选用小于实际 n 值的对应于表中最大样本大小的 r_B 值。B 基准值为数据中第 r_B 个最小的观测值。例如，在一个样本大小 n=30 的样本中，最小的(r_B=1)观测值即为 B 基准值。8.5.12 节中给出了表列值 r_B 关于 n 的函数的近似公式。8.3.7.4 节中的实例示范这一方法。关于该方法的更多的资料见文献 8.3.4.5.1。

当 n>298 时，可采用抽样法用从表 8.5.13 中选取的 r_A 值计算 A 基准值。

8.3.4.5.2 Hanson-Koopmans方法

下列方法（文献 8.3.4.5.2(a)与(b)）可作为获得样本大小不超过 28 时样本的 B 基准值的有用方法。该方法需要假设观测值为来自累积分布函数的对数为上凹的母体的一个随机样本。一大类概率分布满足该假设。有足够的经验证据表明复合材料的强度满足该假设，因此该方法常被推荐用于 n<29 的情形。然而，考虑到必需的假设，这不是一个无条件的推荐。

Hanson-Koopmans B 基准值为

$$B = x_{(r)} \left[\frac{x_{(1)}}{x_{(r)}} \right]^k \qquad 8.3.4.5.2(a)$$

其中 $x_{(1)}$是最小数值，$x_{(r)}$是第 r 个最小数值。r 和 k 的值依赖于 n 并已列在表 8.5.14 中。要是 $x_{(1)}$= $x_{(r)}$，不得使用该 B 基准值公式。8.3.7.5 节中的实例示范这种方法。

Hanson-Koopmans 方法可用来计算 n< 299 时的 A 基准值。从表 8.5.15 中查出对应于样本大小 n 的 k_A 值，假定 $x_{(n)}$和 $x_{(1)}$为最大和最小的数值。则 A 基准值为

$$B = x_{(n)}\left[\frac{x_{(1)}}{x_{(n)}}\right]^{k} \qquad 8.3.4.5.2(b)$$

8.3.5 结构型数据的基准值

如果可能的话，将结构型数据简化成 8.3.2 节中讨论的非结构型数据情形是有利的。采用正态概率模型之外的其他分布形式分析非结构型数据也是有可能的。正态概率模型被结构型数据方法采用。当数据为结构型数据且根据 8.3.2.2 节中的检验不能合并时，应采用本节中的方法。结构型数据的基准值计算方法采用正态概率模型。所有这些方法都是基于回归分析。8.3.5.1 节中描述了关于线性统计模型的回归分析方法。本节中包含对所需假设进行检查的讨论。方差分析（8.3.5.2 节）涉及到具有一种随机影响而无确定性影响的特殊情形。具有一种确定性影响，无随机影响的情形是简单线性回归（8.3.5.3 节）。

8.3.5.1 线性统计模型的回归分析

材料基本性能的回归分析旨在获得作为确定性因素（如温度、铺层和湿度）的函数的特定响应（例如拉伸强度）的基准值。将测得的响应值称为观测值，将描述对应于这些观测值的条件的值称为协变量。例如，如果假设拉伸强度与温度之间为线性关系，那么某温度 T_i 下的平均强度，在该温度下有无限多的观测值的极限情况下，等于 $\theta_0+\theta_1 T_i$。常数 θ_0 与 θ_1 通常未知且必须从数据中估算。与这些常数相乘的数即为协变量，此处为 1 和 T_i；它们一起描述测得第 i 个强度观测值的确定性条件。线性回归涉及作为未知参数（此处为 θ_0 与 θ_1）线性函数的关系的分析方法。这些关系对协变量而言不一定为线性关系。例如，在模型中引入温度的平方（T^2）作为附加协变量的二次模型也可以用线性回归方法进行分析。

假设被分析的数据由在 l 个确定性条件（或状态）下的 n 个观测值组成，并将这些条件编号为 1，2，…，l。在关于温度的线性回归例子中，有 l 级温度及相应的协变量集（1，T_1），（1，T_2），…，（1，T_l）。必需指出每个确定性条件与每个观测值的对应关系（回想到式 8.2.3 中的下标 i，那么令对应于第 s 个观测值的确定性条件为 $p(s)$）。每个观测值也得自于 m 批中的一批中的一个试件。将这些批料编号为 1, 2, ..., m 并且用 $q(s)$表示相应于第 s 个观测值的批次。观测值用 x_s 表示，$s = 1, 2, ..., n$，此处第 s 个值对应于确定性条件 $p(s)$ 和批次 $q(s)$。

假设用$\{x_s\}$表示来自于正态分布的一个样本，其平均值

$$\mu_{p(s)} = \theta_1 z_{p(s),1} + \theta_2 z_{p(s),2} + \ldots + \theta_r z_{p(s),r} \qquad 8.3.5.1(a)$$

式中$\{z_{p(s),u}\}$为已知常数，$1 \le p(s) \le l$ 及 u=1，...，r。$\{\theta_u\}$为待估参数。例如，如果假定强度平均值随温度线性变化并且条件 $p(s)$=1 相应于 75 度，那么

$$\mu_1 = \theta_1 + 75\theta_2 \qquad 8.3.5.1(b)$$

因此，r =2，z_{11}=1 及 z_{12}=75。回想到协变量 $z_{p(s),u}$ 不必是线性的。例如强度与温度之间的二次关系式具有协变量 1，T_i 和 T_i^2。

平均值$\mu_{p(s)}$永远不会被观测到但必须从有限数据中估算出来。每个数值由$\mu_{p(s)}$与随机量 $b_{q(s)}+e_s$ 的和组成，此处 $b_{q(s)}$对每批取不同的值而 e_s 对每个观测值取不同的值。假设随机变量$\{b_{q(s)}\}$和$\{e_s\}$为来自平均值为 0，方差分别为 σ_b^2 和 σ_e^2 的正态分布的随机样本。方差 σ_b^2 为批间方差而方差 σ_e^2 为批内方差（或误差）。（关于这些概念的更基本的讨论见 8.2.3 节）。

数据模型现在可以写成

$$x_s = \mu_{p(s)} + b_{q(s)} + e_s = \theta_1 z_{p(s),1} + \theta_2 z_{p(s),2} + \ldots + \theta_r z_{p(s),r} + b_{q(s)} + e_s \qquad 8.3.5.1(c)$$

式中$\{z_{p(s),u}\}$已知，$\{\theta_u\}$为未知的确定量，并且$\{b_{q(s)}\}$和$\{e_s\}$为方差未知的随机变量。将式8.3.5.1(c)称作回归模型。每个回归分析从选择回归模型开始。

式8.3.5.1(c)的特殊情形常常有用。如果条件相应于数据组，用协变量来指出与每个观测值关联的那个组，那么回归模型即为方差分析（ANOVA）（8.3.5.2节）。当批间差异明显时，最常使用这一情形来计算基准值。有一个连续协变量的情形称作简单线性回归模型（8.3.5.3节）。在下面的几节中，将对这些特殊情形进行详细分析。更一般情形的分析超出本手册的范围；然而RECIPE软件可用于进行这种分析。在8.3.7.6-8.3.7.9节给出了实例分析。

使用基准值回归模型的有效性是通过对进一步的假设的检验而得到的。定义残差为某一数据点与其拟合值之间的差异。利用残差，需要检查下述假设：

- 检查假设的性能与预计变量之间的曲线关系的有效性，例如直线，二次曲线或其他假设的关系
- 检查等方差假设在整个预计变量范围内方差为常数；
- 检查回归残差的正态性；以及
- 检查残差的独立性。

同样，如果没有恰当合理的理由，不应将回归关系外推到预计变量的范围之外。

关于回归模型有效性的详细讨论超出本手册的范围；但是在多数基本性的文章中对此进行了详细讨论，包括文献8.3.5.1(a)-(d)。尽管本手册不对回归模型有效性进行详细的讨论，但是做某种程度的阐述对理解回归模型是有帮助的。

如果某一模型符合得好，那么残差应该或正或负，因此它们每隔少数几个数值时就会变号。它们没有明显的结构，理想情况下如“白噪音”一样。如果某一模型符合得不好，那么经常是一长列残差同号，残差呈现明显的曲线变化模式。

如果一组残差的方差高，那么这些残差会显得更分散，反之,分散性就小。这一特性经常可在检查残差图时发现。例如，对作为温度函数的试件强度进行简单线性回归，如果当温度升高时强度更易变，那么残差对温度的曲线可能呈“喇叭”形状。

同样有检查残差正态性假设的作图法。这些可在大多数教材中找到。还可能对残差与回归曲线的标准差的比率（也就是e_i/s_y）应用正态性Anderson-Darling拟合优度检验（8.3.4.3节）。文献8.3.5.1(e)论述了该方法的合理性。

很难用作图法检查独立性。一种可能就是绘制奇数序号残差与偶数序号残差的关系图来看是否有明显的变化趋势。更进一步的讨论可在参考教材中找到。在8.3.7.9节中的实例给出了残差独立性不足的一种形式，即因批料影响而出现的残差“聚集”现象。

8.3.5.2 方差分析

本节讨论单因素方差分析（ANOVA）方法。尽管这些模型可以采用式8.3.5.1(c)的一般符号书写，但是对于目前的讨论，可简单地将单因素方差分析模型写成

$$x_{ij} = \mu + b_i + e_{ij}, \quad \begin{array}{l} i = 1, \cdots, k \\ j = 1, \cdots, n_i \end{array} \qquad 8.3.5.2$$

式中n_i是第i组的数值个数，x_{ij}表示k组中第i组的第j个观测值。母体的总的平均值为μ，

b_i为第 i 组的影响值，e_{ij}为随机误差项，表示无法预知的各种变异源。误差项 e_{ij}为成独立分布的平均值为零、方差为σ_e^2（组内方差）的正态随机变量。b_i可以看成确定的（未知）常数，否则将它们模拟成随机变量，通常认为该随机变量符合平均值为零、方差为σ_b^2（组间方差）的正态分布。

b_i确定的情形称作确定性影响的方差分析，它适合于各组的平均值$\mu+b_i$不被看成来自平均值母体的样本的情形。例如各组可能由铺层数不同的复合材料试件的强度测量值组成。如果各组的平均强度明显不同，可以考虑确定不同铺层数的基准值。但是，考虑铺层数不同的试件的假定随机母体并将数据中出现的 k 组当成来自这种母体的一个随机样本，显然是没有意义的。

如果各组平均值$\mu+b_i$被看成来自平均值母体的样本，那么该模型为随机影响方差分析。例如，数据可能来自 k 个批料。既然是这样，人们就会同样程度的去考虑将来生产的批料的情况。如果人们想要在制造中使用将来的批料，那么计算观测的 k 批料中每批的基准值就没有多大意义。人们可能宁可选择确定基于来自某一至今未获得的批料的随机观测值的母体的基准值。这样，在确定设计值时，能够避免批间变异的影响。文献 8.3.5.2(a)提供了更多关于方差分析方法的资料。样本大小对此类分析的影响必须在试验程序设计（2.2.5.2 节）时考虑。

下面的计算处理批间变异。换句话说，批次是分组的唯一原因而且相容性检验（8.3.2 节）显示不得使用非结构型数据法。该方法基于单因素方差分析（ANOVA）随机影响模型并且在文献 8.3.5.2(b)中得以证明。

假设如下：

- 来自各批的数据为正态分布；
- 各批的批内方差相同，及
- 批平均值为正态分布。

对于第一个假设没有可用的检验方法。尽管如此，模拟研究指出适度违背这一假设对 ANOVA 法的特性没有不利影响。第二个假设必须通过进行 8.3.5.2.1 节中所述的检验证实。目前，该检验被推荐为诊断检验，这是因为大量的模拟研究指出违背这一假设很可能使结果保守，尽管在某些情形下会出现非保守的结果。对于第三个假设没有有用的检验方法，除非能得到很多批（20 批或者更多）的数据。

在本分析中，所有的批都视为相同的（例如，来自不同厂家的批料间没有区别）。如果批料不是来自单个厂家，那么必须使用 8.3.7.9 节中所给出的方法。

本小节的安排如下。开始两小节论述方差相等检验。接着三小节介绍 ANOVA 法中所用的统计量的计算方法。其次介绍了用于三批或更多批的方法，该方法适用于具有实际价值的多数情形。单独讨论了两批的情形。

8.3.5.2.1 方差相等的Levene检验

ANOVA 法是在批内方差相等的假设下推倒出来的。本节叙述 Levene 提出的被广泛使用的检验（文献 8.3.5.2.1(a)-(c)）以确定 k 组的样本方差是否明显不同。该检验是非参数的；也就是说，它对关于潜在母体形式的假设要求不高。

要进行该检验，生成转换数据

$$w_{ij} = \left| x_{ij} - \tilde{x}_i \right| \qquad 8.3.5.2.1$$

式中 $\tilde{x}_i$ 为第 i 组 n_i 个值的中值。然后对转换过的数据进行 F 检验（8.3.5.2.2 节）。如果检验统计量大于或等于列出的 F 分布的分位数，那么可以断定方差明显不同。如果检验统计量小于表列值，那么接受方差相等的假设。

如果检验拒绝了方差相等的假设，推荐进行方差不等的原因调查。这可以暴露数据生成或材料制造中的问题。如果方差明显不同，采用 ANOVA 法计算的基准值很可能是保守的。

8.3.5.2.2　平均值相等的F检验

要检验从中抽取 k 个样本的母体具有相同的平均值，计算下面的 F 统计量：

$$F = \frac{\sum_{i=1}^{k} n_i (\bar{x}_i - \bar{x})^2 / (k-1)}{\sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} (x_{ij} - \bar{x}_i)^2 / (n-k)} \qquad 8.3.5.2.2$$

式中 $\bar{x}_i$ 为第 i 组 n_i 个值的平均值，$\bar{x}$ 为所有 n 个观测值的平均值。如果 8.3.5.2.2 式中的 F 大于分子自由度为 k-1、分母为自由度 n-k 的 F 分布的 1-α分位数，那么断定（冒 5%出错风险）这 k 个母体平均值不是全部相等。对于α=0.05，所需的 F 分布分位数列在表 8.5.1 中。

该检验基于数据服从正态分布的假设；然而众所周知，（即对母体形式的假设要求不高）它对偏离这一假设相对不敏感。

8.3.5.2.3　基于单个测量值的单因素ANOVA计算

当能获得样本中的所有观测值时，第一步是计算平均值。

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} / n \qquad 8.3.5.2.3(a)$$

和

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij} / n_i \qquad i = 1, \cdots, k \qquad 8.3.5.2.3(b)$$

式中

$$n = \sum_{i=1}^{k} n_i \qquad 8.3.5.2.3(c)$$

为总样本大小。现在可以计算所需的平方和。批间平方和由下式计算

$$\mathrm{SSB} = \sum_{i=1}^{k} n_i \bar{x}_i^2 - n\bar{x}^2 \qquad 8.3.5.2.3(d)$$

和总的平方和

$$\mathrm{SST} = \sum_{i=1}^{k} \sum_{j=1}^{n_i} x_{ij}^2 - n\bar{x}^2 \qquad 8.3.5.2.3(e)$$

以上两式相减可得批内或误差平方和

$$\mathrm{SSE} = \mathrm{SST} - \mathrm{SSB} \qquad 8.3.5.2.3(f)$$

8.3.5.2.4　基于合计统计量的单因素ANOVA计算

经常的情形是只有各组的合计统计量可用。如果这些合计统计量包含样本平均值 $\bar{x}_i$，各组数据的标准差（s_i）和各组大小（n_i），平方和可以计算如下。首先计算总平均值

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{k} n_i \bar{x}_i / n \qquad 8.3.5.2.4(a)$$

采用式 8.3.5.2.3(d)计算批间平方和，采用 s_i^2 的话，批内平方和可表示为

$$\mathrm{SSE} = \sum_{i=1}^{k} (n_i - 1) s_i^2 \qquad 8.3.5.2.4(b)$$

总平方和 SST 为 SSB 和 SSE 的和。

8.3.5.2.5 单因素模型ANOVA表

方差分析 ANOVA 表显示关于包含在平方和里面的变异来源的信息。用于确定性影响及随机影响模型的典型 ANOVA 表说明如下。第一列确定变异来源。自由度数及计算出的平方和列于第二和第三列。第四列包含被定义成平方和除以其自由度数的平均值平方。最后一列包含等于平均值平方之比的 F 统计量。该统计量用于检验样本之间存在明显变异的假设（8.3.5.2.2 节）。该统计量与分子自由度为 k-1 分母自由度为 n-k 的 F 分布上的 0.95 分位数比较。表 8.5.1 包含这些临界 F 值。如果计算出的统计量大于表列 F 值，则表明样本之间存在统计上的明显差异。如果计算出的统计量小于表列值，从统计上说，样本之间的差异在选定的显著性水平上不明显。

来 源	自由度数	平方和	平均值平方	F 检验
样 本	k-1	SSB	MSB=SSB/(k-1)	F=MSB/MSE
误 差	n-k	SSE	MSE=SSE/(n-k)	
总 计	n-1	SST		

8.3.5.2.6 单因素ANOVA基准值的合计统计量的计算

计算 ANOVA 基准值的第一步是计算合计统计量，包括批平均值、总的母体平均值的估计值以及批间方差与批内方差的估计值。由于各批不需要有相同数量的试件，因此定义“有效批的大小”如下

$$n' = \frac{n - n^*}{k - 1} \qquad 8.3.5.2.6(a)$$

式中

$$n^* = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i^2}{n} \qquad 8.3.5.2.6(b)$$

及

$$n = \sum_{i=1}^{k} n_i \qquad 8.3.5.2.6(c)$$

为总的样本大小。

其次，应该如 8.3.5.2.3 或 8.3.5.2.4 节那样计算批平均值（$\bar{x}_i$），总平均值（$\bar{x}$），批间和批内平方和。然后如 8.3.5.2.5 节将这些平方和除以适当的自由度数得到批间平均值平方（MSB）和批内平均值平方（MSE）。

利用这两个平均值平方，母体标准差的估计值为

$$S = \sqrt{\frac{\mathrm{MSB}}{n'} + \left(\frac{n'-1}{n'}\right)\mathrm{MSE}} \qquad 8.3.5.2.6(d)$$

8.3.5.2.7 三批或多批的计算

将样本大小为 n 的取自正态分布的一个简单随机样本的容限系数表示为 k_0，并将样本大小为 k 的取自正态分布的一个简单随机样本的容限系数表示为 k_1。这些容限系数可从表 8.5.10（对于 B 基准值）或表 8.5.11（对于 A 基准值）中查得。平均值平方记为

$$u=\frac{\mathrm{MSB}}{\mathrm{MSE}} \qquad 8.3.5.2.7(a)$$

如果 u 小于 1，则令 u 等于 1。容限系数为

$$T=\frac{k_0-k_1/\sqrt{n'}+(k_1-k_0)w}{1-\frac{1}{\sqrt{n'}}} \qquad 8.3.5.2.7(b)$$

式中

$$w=\sqrt{\frac{u}{u+n'-1}} \qquad 8.3.5.2.7(c)$$

基准值为

$$\mathrm{B}=\bar{x}-TS \qquad 8.3.5.2.7(d)$$

该值是 A 基准值或是 B 基准值取决于 k_0 和 k_1 是从表 8.5.10 还是从表 8.5.11 中查得。

8.3.5.2.8 两批的计算

如果只有两批可用，那么 ANOVA 法不再有用。人们有两种选择：

- 获得更多的批，或
- 合并这两批并采用非结构型数据法。

为了决定采用哪种方法，需对这两批的数据进行。如果这两批的平均值的差异比下列 $\bar{x}$ 的标准差大

$$s_{\bar{x}}=\sqrt{\frac{\mathrm{MSB}}{n}} \qquad 8.3.5.2.8$$

并且如果平均值的差异大到实际上不能忽略的程度，那么不应该考虑合并。然而，如果这两批能充分地重叠，或者平均值的差异太小而可以忽略，那么人们能够证明采用 8.3.4 节的方法合并数据是合理的。可是如果相容性检验（8.3.2 节）已经表明这两批不是来自同一母体，那么目视检查很有可能不会提供合并数据并采用 8.3.4 节方法的有力证据。既然这样，只要可能的话，在进一步计算之前应获取新批料的数据。如果不可能，那么根据 8.3.4 节的方法分别计算每批的基准值并选择其中较小的作为临时基准值，理想的情况是，在获得更多数据时再替换该值。

8.3.5.3 简单线性回归

简单线性回归是一般回归模型（式 8.3.5.1(c)）的特殊情形，其中协变量为 1 和 z，并且没有象批间差异这种随机影响：

$$x_s=\mu_{p(s)}+e_s=\theta_1+\theta_2 z_{p(s),2}+e_s \qquad 8.3.5.3(a)$$

用更常用的符号并假设 β_0 和 β_1 为确定性未知常数，将上式改写成

$$Y=\beta_0+\beta_1 X+\varepsilon \qquad 8.3.5.3(b)$$

假设实验者选择 n 个不必彼此不同的 x 值，x_1，x_2，…，x_n，并观测到相应的 y 值；那

么数据由 n 对数值组成

$$(x_1,y_1),(x_2,y_2),\cdots,(x_n,y_n)$$

为了使统计分析有效，必须有 $n\geq 3$ 并且至少有两个不同的 x 值。用 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 表示 β_0 和 β_1 的估计值。那么对于不必是试验值（x_1，x_2，…，x_n）之一的任意的 x 值，可得一预计值或拟合值 $\hat{y}$，即

$$\hat{y}=\hat{\beta}_0+\hat{\beta}_1 x \qquad 8.3.5.3(c)$$

通常采用最小二乘法估计 β_0 和 β_1，该法详细说明如下。设 β_0^* 和 β_1^* 为 β_0 和 β_1 的任意估计值。令

$$Q(\beta_0^*,\beta_1^*)=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{y}_i^*)^2 \qquad 8.3.5.3(d)$$

式中 $\hat{y}_i^*=\beta_0^*+\beta_1^* x_i$。

最小二乘估计值 $\hat{\beta}_0$ 和 $\hat{\beta}_1$ 就是使 $Q(\beta_0^*,\beta_1^*)$ 最小的 β_0^* 和 β_1^* 的值。它们由下式给出

$$\hat{\beta}_0=\bar{y}-\hat{\beta}_1\bar{x} \qquad 8.3.5.3(e)$$

$$\hat{\beta}_1=\frac{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})(y_i-\bar{y})}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \qquad 8.3.5.3(f)$$

式中

$$\bar{y}=\sum_{i=1}^{n}y_i/n \qquad 8.3.5.3(g)$$

$$\bar{x}=\sum_{i=1}^{n}x_i/n \qquad 8.3.5.3(h)$$

有时用下面的等价公式计算 $\hat{\beta}_1$ 更方便

$$\hat{\beta}_1=\frac{\sum_{i=1}^{n}x_i y_i-n\overline{xy}}{\sum_{i=1}^{n}x_i^2-n\bar{x}^2} \qquad 8.3.5.3(i)$$

该回归的统计显著性（在水平 α 下）意味着有证据表明 $\beta_1\neq 0$（当 $\beta_1=0$ 时有小于等于 α 的概率得出这一结论）。如果 $\beta_1\neq 0$，那么 x 与 y 之间存在线性关系。为了使通常的显著性检验有效，需要下面的附加假设，即 y 为具有共同方差 σ^2 和平均值 $\beta_0+\beta_1 x_i$（$i=1$，2，…，n）的独立正态分布的随机变量。

要检查在水平 α 下回归是否显著，令

$$s_y^2=\frac{\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{\beta}_0-\hat{\beta}_1 x_i)^2}{n-2} \qquad 8.3.5.3(j)$$

并定义

$$\mathrm{SSE}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\hat{\beta}_0-\hat{\beta}_1 x_i)^2 \qquad 8.3.5.3(k)$$

$$\mathrm{SST}=\sum_{i=1}^{n}(y_i-\bar{y})^2 \qquad 8.3.5.3(l)$$

$$\mathrm{SSR}=\mathrm{SST}-\mathrm{SSE} \qquad 8.3.5.3(m)$$

然后定义

$$F=\frac{\mathrm{SSR}}{s_y^2} \qquad 8.3.5.3(n)$$

它是具有自由度为(1，n-2)的 F 分布。如果式 8.3.5.3(n)的值超过自由度数γ_1=1 和γ_2=n-2 的 F 分布的 1-α分位数，则回归是有意义的。表提供了α=0.05 的 F 分布的 1-α分位数。

对于给定的 x_0，B 基准值满足 B(x_0)是平均值为 $f(x_0)=\beta_0+\beta_1 x_0$、方差为$\sigma^2$的正态分布的 B 基准值的条件。在简单线性回归情形下，B 基准值可以确定如下。对于 $x=x_0$，计算 B 值

$$\mathrm{B}=(\hat{\beta}_0+\hat{\beta}_1 x_0)-k_B s_y \qquad 8.3.5.3(o)$$

式中 s_y是式 8.3.5.3(j)中 s_y^2 的平方根，

$$k_{\mathrm{B}}=t_{\gamma,0.95}(\delta)\sqrt{\frac{1+\Delta}{n}} \qquad 8.3.5.3(p)$$

且 $t_{\gamma,0.95}(\delta)$是自由度为γ=n-2、偏心参数为δ的偏心 t 分布的 95 百分位数。

$$\delta=\frac{1.282}{\sqrt{\frac{1+\Delta}{n}}} \qquad 8.3.5.3(q)$$

和

$$\Delta=\frac{n(x_0-\bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i-\bar{x})^2} \qquad 8.3.5.3(r)$$

当 n 大于等于 10 且 $0\le\Delta\le 10$ 时可采用下面的近似公式计算 k_{B}:

$$k_{\mathrm{B}}=1.282+\exp\left[0.595-0.508\ln(n)+\frac{4.62}{n}+\left(0.488-\frac{0.988}{n}\right)\ln(1.82+\Delta)\right] \qquad 8.3.5.3(s)$$

要使式 8.3.5.3(o)能够计算 A 基准值，在式 8.3.5.3(q)中用 2.326 取代 1.282。对于 A 基准值，k_{A} 可近似成

$$k_{\mathrm{A}}=2.326+\exp\left[0.659-0.514\ln(n)+\frac{6.58}{n}+\left(0.481-\frac{1.42}{n}\right)\ln(3.71+\Delta)\right] \qquad 8.3.5.3(t)$$

8.3.7.7 节中实例示范简单线性回归法。在 8.3.7.8 节中将这种简单情形推广到带批次影响的线性回归。

8.3.5.4 采用合并结构型数据的基准值

对于小的数据组（每种环境条件小于 18），可以通过合并不同环境条件下的试验数据而增强图 8.3.1 所述方法的用途。当采用合并方法来扩展小数据组的用途以获得较高的基准值时，必须在数据分析（见文献 8.3.5.4(a)与(b)）中验证相关的假设与限制。如果这些文献中所述的统计检查与工程数据分析表明合并是无效的，则应使用本手册所述的其他标准的统计方法。不幸地是当对小的数据组应用标准方法时，存在某些固有不利因素。

在文献 8.3.5.4(a)中论述了当 Weibull 分布适合于拟合数据的一般方法，而在文献 8.3.5.4(b)则论述了当使用正态分布拟合数据时的一般方法。使用两种统计分布中的哪一种，取决于数据的最佳拟合，尽管通常采用 Weibull 分布会导致更保守的材料基准值。在这种数据处理方法中，将来自于多种环境、批料和板料的数据进行合并，以获得对于每种试验类型和破坏模式的母体变异因子，例如，拉伸、压缩和剪切。从本质上来讲，该方法采用较大的合并数据组来评估变异性，而仅用每种环境下的试验样本来估计该环境下的平均性

能值。当用大样本来计算概率和置信度时，所得基准值通常不如从那些未经合并的样本获得的基准值保守。

然而，合并数据处理法需要的样本以生成有效的材料基准值（见文献 8.3.5.4(a)与(b)）。为了合并数据组，被合并数据组的环境变异性必须在统计上是相当的，并且每种环境下的破坏模式不得有明显差异。

8.3.6 探索性数据分析

探索性数据分析(EDA)方法是简单、直观、定性的方法，常常能在分析初期指出数据的重要特征。如果可能，应采用基于 EDA 的结论来补充定量统计方法。下面叙述了两种 EDA 方法：分位数箱线图和信息分位数函数。关于这一主题的更完全的论述可在文献 8.3.6 中找到。

8.3.6.1 分位数箱线图

分位数箱线图以图形的方式提供了样本值的要点。该方法显示样本的对称性、尾端大小和中位数，也显示可能存在的异常数据和不同类的数据。

令 $F(x)$为潜在的分布函数。$F(x)$的第 u 个分位数 q_u 为方程 $F(q_u)=u$ 的解。分位数函数 $Q(u)$定义为（见文献 8.3.6.1(a)）

$$Q(u)=F^{-1}(u) \qquad 0<u<1 \qquad 8.3.6.1(a)$$

令 $x_{(1)}\le x_{(2)}\le\ldots\le x_{(n)}$表示大小为 n 的样本排序后的测量值，$Q(u)$由分段线性函数估计

$$\hat{Q}(u)=(nu-j+\frac{1}{2})x_{(j+1)}+(j+\frac{1}{2}-nu)x_{(j)} \qquad 8.3.6.1(b)$$

其中

$$\frac{2j-1}{2n}\le u\le\frac{2j+1}{2n} \qquad 8.3.6.1(c)$$

图 8.3.6.1(b)是分位数箱线图的一个例子。这些箱用来检查潜在分布的对称性和尾端大小。$Q(u)$中的平缓点表示众数值。u 在 0 和 1 附近时 $Q(u)$的急剧增加表示可能存在异常数据。箱线内 $Q(u)$的急剧增加表示数据中可能存在两个（或多个）母体或数据中存在大的间断。有关使用分位数箱线图的详细说明见文献 8.3.6.1。

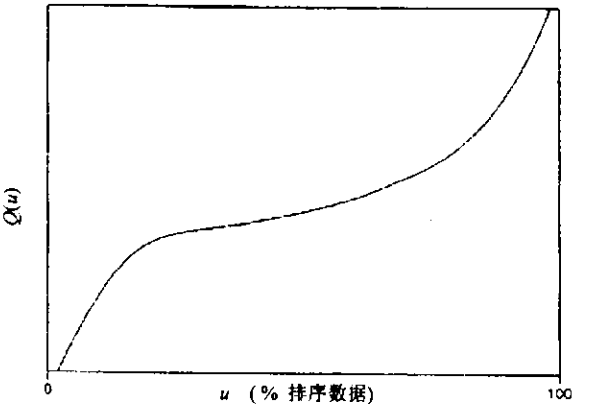


图 8.3.6.1(a) 分位数函数

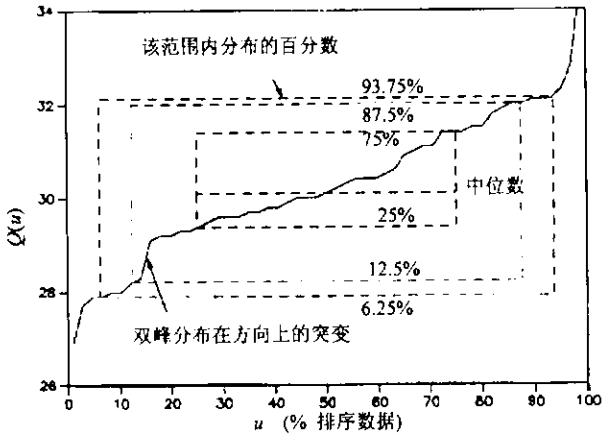


图 8.3.6.1(b) 分位数箱线图举例

8.3.6.2 信息分位数函数

获得单峰数据 B 基准值的方法可分为两个主要类型：特定参数系列的方法和非参数方法。信息分位数(IQ)函数可作为一种辅助工具以识别能够满意地拟合数据的参数模型。已经非常全面地讨论了有关正态、对数正态及双参数 Weibull 参数系列的参数方法，因此这里仅考虑这几种方法。本节以后提到的 Weibull 参数系列都应理解为双参数 Weibull 参数系列。

IQ 函数用于识别能够最佳描述一组排序数据的单变量的位置——尺度参数分布。单变量的位置——尺度参数分布是这样一种分布，其分布函数 $F(x)$可表示为

$$F(x)=F_0[(x-a)/b] \qquad 8.3.6.2(a)$$

这里 a 和 b 分别表示位置参数和尺度参数，并且 $F_0(x)$是当 a=0 及 b=1 时的“标准”分布。IQ 函数用于识别标准分布形式，因此不依赖位置参数和尺度参数的值。

Weibull 及对数正态参数系列不属于位置——尺度参数系列。然而，这些分布与两个位置——尺度参数系列简单相关：正态系列与极值系列。

估计的 IQ 函数定义为

$$\hat{\mathrm{I}}\mathrm{Q}(u)=\frac{\hat{Q}(u)-\hat{Q}(0.5)}{2[\hat{Q}(0.75)-\hat{Q}(0.25)]} \qquad 8.3.6.2(b)$$

这里 $\hat{Q}(u)$ 是在式 8.3.6.1(b)中定义的估计的分位数函数。相应的精确的 IQ 函数记为 IQ(u)并由 8.3.6.2(a)定义，其中用 $Q(u)$代替 $\hat{Q}(u)$。为了确定能否由正态或者极值分布来恰当地模拟数据的分布，由下式定义一条估计的截断 IQ 函数曲线，将其与这些分布的精确的 TIQ 曲线图（见图 8.3.6.2(a)与(b)）比较

$$\hat{\mathrm{T}}\mathrm{IQ}(u)=\begin{cases}-1 & \hat{\mathrm{I}}\mathrm{Q}(u)\le -1\\ \hat{\mathrm{I}}\mathrm{Q}(u) & -1<\hat{\mathrm{I}}\mathrm{Q}(u)\le 1\\ 1 & \hat{\mathrm{I}}\mathrm{Q}(u)>1\end{cases} \qquad 8.3.6.2(c)$$

虽然数据 TIQ 曲线将明显不如精确的 TIQ 曲线光滑，但可比较其总体形状和尾端形态。

为了确定对数正态分布或 Weibull 分布的适合程度，用数据的自然对数来定义分位数函数。因此，式 8.3.6.1(b)变为

$$\hat{Q}(u)=(nu-j+\frac{1}{2})\ln(x_{(j+1)})+(j+\frac{1}{2}-nu)\ln(x_{(j)}) \qquad 8.3.6.2(d)$$

其中

$$\frac{2j-1}{2n}\le u\le\frac{2j+1}{2n} \qquad 8.3.6.2(e)$$

式 8.3.6.2(b)和(c)中的 IQ 和 TIQ 函数也用该分位数函数定义。

因此，为了确定数据能否用正态分布恰当地模拟，将原始数据的 $\hat{T}$IQ 曲线与图 8.3.6.2(a)中正态分布的精确 TIQ 曲线比较。为了确定数据能否用对数正态分布恰当地模拟，将数据对数的 $\hat{T}$IQ 曲线与图 8.3.6.2(a)中正态分布的精确 TIQ 曲线比较。双参数 Weibull 分布的适合程度通过比较数据对数的 $\hat{T}$IQ 曲线与图 8.3.6.2(b)中极值分布的精确 TIQ 曲线来确定。关于分位数函数和信息分位数函数的进一步的资料，读者可参阅文献 8.3.6.2(a)与 8.3.6.2(b)。

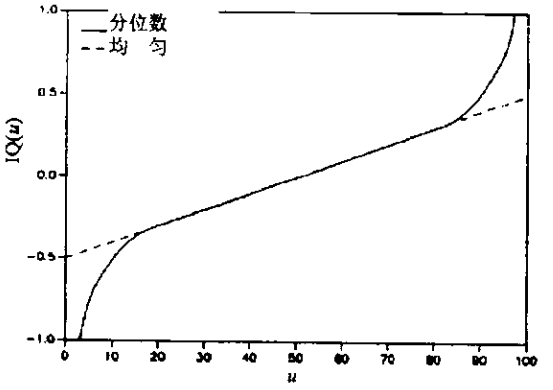


图 8.3.6.2(a) 正态分布参数系列的 TIQ 曲线

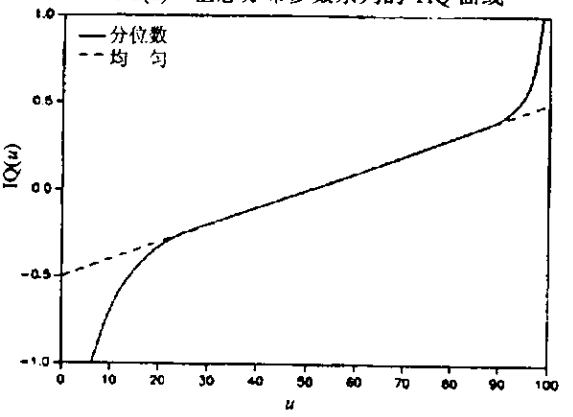


图 8.3.6.2(b) 极值分布参数系列的 TIQ 曲线

8.3.7 计算方法实例

本节用力学性能数据集举例说明计算方法。在进行这些算例分析时，遵循图 8.3.1 中的分析流程，并适当地注出了涉及的具体章节。每个例子注明每一步计算值是那个软件给出的，是 STAT17 或者 RECIPE，或者两者都用到（见 8.1.2 节）。表 8.3.7 中列出了所有例子的数据集。按每个例子（问题）标明了用于软件分析的数据文件*。

* 注：由 STAT17 识别的实例数据集与 V5.0 发布的数据集一致。

表 8.3.7　8.3.7 节例题数据集

例 1		例 3		例 4		例 4	
批次	数据	批次	数据	批次	数据	批次	数据
1	136.64	1	85.39	1	7300.000	3	6400.000
1	125.91	1	97.12	1	6100.000	3	8700.000
1	1444.5	1	92.66	1	7300.000	3	7400.000
2	107.79	1	96.43	1	7900.000	3	8600.000
2	114.58	1	90.72	1	6800.000	3	7900.000
2	110.70	1	95.84	1	6900.000	3	8500.000
3	125.50	2	97.30	1	1300.000	3	8400.000
3	118.79	2	109.47	1	7000.000	3	7200.000
3	131.24	2	101.35	1	8200.000	3	6500.000
4	125.91	2	98.01	1	7800.000	3	8100.000
4	127.86	2	86.18	1	7300.000	3	7900.000
4	125.91	2	100.91	1	6900.000	3	6200.000
5	134.41	3	96.05	1	8400.000	3	5900.000
5	124.60	3	92.20	1	8800.000	3	6400.000
5	127.54	3	90.86	2	7300.000	3	6800.000
6	139.35	3	101.27	2	8000.000	3	6700.000
6	119.03	3	101.23	2	8000.000	3	6400.000
6	125.81	3	93.15	2	8500.000	3	8100.000
7	120.00	4	114.32	2	6400.000	3	6700.000
7	121.94	4	100.14	2	7000.000	3	6900.000
7	132.58	4	91.24	2	6300.000	3	7500.000
8	119.28	4	86.11	2	6700.000	3	7600.000
8	118.30	4	93.42	2	8500.000	3	8200.000
8	126.12	4	92.65	2	6800.000	3	7000.000
9	109.50	5	97.58	2	9500.000		
9	121.23	5	97.75	2	7500.000		
9	130.03	5	97.95	2	7600.000		
10	118.71	5	112.49	2	9500.000		
10	126.56	5	95.75	2	6900.000		
10	124.60	5	110.53	2	6900.000		
				2	6400.000		
例 2		例 4		2	6100.000	例 5	
批次	数据	批次	数据	2	7300.000	批次	数据
1	106.5	1	5700.000	2	7700.000	1	118.58
1	94.0	1	6300.000	2	7300.000	1	121.77
1	116.1	1	6700.000	2	6200.000	1	137.54
1	98.8	1	6300.000	2	6900.000	1	140.39
1	114.2	1	6300.000	2	6200.000	1	134.03
2	113.8	1	8600.000	2	6400.000	2	133.44
2	98.1	1	8300.000	2	6300.000	2	114.56
2	102.0	1	8000.000	2	5500.000	2	123.28
2	106.0	1	7300.000	2	6400.000	2	130.33
2	98.1	1	7600.000	2	6300.000	2	138.00
3	105.2	1	6100.000	2	5500.000	3	122.69
3	103.3	1	9100.000	3	8500.000	3	137.10
3	103.3	1	7800.000	3	7500.000	3	137.49
3	101.3	1	7100.000	3	6900.000	3	122.87
3	100.4	1	7400.000	3	8200.000	3	135.82
4	94.8	1	7000.000	3	7500.000		
4	105.4	1	6700.000	3	8200.000		
4	101.5	1	6300.000	3	7400.000		
4	95.8	1	6800.000	3	8100.000		
4	102.5	1	7300.000	3	7400.000		

表 8.3.7　8.3.7 节例题数据集（续前页）

例 6	
批次	数据
1	328.1174
1	334.7674
1	347.7833
1	346.2661
1	338.7314
2	297.0387
2	293.4595
2	308.0419
2	326.4864
2	318.1297
2	309.0487
3	337.0930
3	317.7319
3	321.4292
3	317.2652
3	291.8881
4	297.6943
4	327.3973
4	303.8629
4	313.0984
4	323.2769
5	312.9743
5	324.5192
5	334.5965
5	314.9458
5	322.7194
6	291.1215
6	309.7852
6	304.8499
6	288.0184
6	294.1995

例 7	
温度	数据
75	328.1174
75	334.7674
75	347.7833
75	346.2661
75	338.7314
75	340.8146
-67	343.5855
-67	334.1746
-67	348.6610
-67	356.3232
-67	344.1524

例 8		
温度	批次	数据
75	1	328.1174
75	1	334.7674
75	1	347.7833
75	1	346.2661
75	1	338.7314
75	2	297.0387
75	2	293.4595
75	2	308.0419
75	2	326.4864
75	2	318.1297
75	2	309.0487
75	3	337.0930
75	3	317.7319
75	3	321.4292
75	3	317.2652
75	3	291.8881
75	4	297.6943
75	4	327.3973
75	4	303.8629
75	4	313.0984
75	4	323.2769
75	5	312.9743
75	5	324.5192
75	5	334.5965
75	5	314.9458
75	5	322.7194
75	6	291.1215
75	6	309.7852
75	6	304.8499
75	6	288.0184
75	6	294.1995
-67	1	340.8146
-67	1	343.5855
-67	1	334.1746
-67	1	348.6610
-67	1	356.3232
-67	1	344.1524
-67	2	308.6256
-67	2	315.1819
-67	2	317.6867
-67	2	313.9832
-67	2	309.3132
-67	2	275.1758
-67	3	321.4128
-67	3	316.4652
-67	3	331.3724
-67	3	304.8643
-67	3	309.6249
-67	3	347.8449
-67	4	331.5487
-67	4	316.5891
-67	4	303.7171
-67	4	320.3625

例 8		
温度	批次	数据
-67	4	315.2963
-67	4	322.8280
-67	5	340.0990
-67	5	348.9354
-67	5	331.2500
-67	5	330.0000
-67	5	340.9836
-67	5	329.4393
-67	7	330.9309
-67	7	328.4553
-67	7	344.1026
-67	7	343.3584
-67	7	344.4717
-67	7	351.2776
-67	8	331.0259
-67	8	322.4052
-67	8	327.6699
-67	8	296.8215
-67	8	338.1995

例 9		
来源	批次	数据
1	1	75.8
1	1	78.4
1	1	82.0
1	2	68.8
1	2	70.9
1	2	73.5
1	3	74.5
1	3	74.8
1	3	78.8
2	4	81.3
2	4	87.7
2	4	89.0
2	5	88.2
2	5	91.2
2	5	94.2

8.3.7.1 例1——异常数据检查、多样本检验和Weibull分布

本例数据集由十批材料的压缩强度测量值组成。本例题举例说明异常数据检查方法、k 样本 Anderson-Darling 检验、两参数 Weibull 拟合优度检验及采用 Weibull 分布计算 B 基准值的方法。所有各步计算可用 STAT17 执行并可用数据集 example.d01 示范。

例 1——第一步　利用 8.3.3.1 节中所述 MNR 方法筛选异常数据。对各批数据分别进行筛选。第一批的样本平均值为 568.8，样本标准差为 757.9，相应的计算结果见下表

x_i	$\lvert r_i \rvert = \left\lvert \frac{x_i - \bar{x}}{s} \right\rvert = \left\lvert \frac{x_i - 568.8}{757.9} \right\rvert$
125.9	0.584
136.6	0.570
1444	1.155

MNR 统计量就是绝对值最大的残差，或 1.155。由于它大于表 8.5.7 中样本自由度 n=3 时的临界值 1.154，故认定第三个观测值为异常数据。对试验记录的检查表明测量值为 144.4。修改小数点以后重复 MNR 检验。经重新计算，该批平均值为 135.7，批标准差为 9.31。没有查出异常数据。对剩余批次进行类似计算，在数据集中没有查出其他异常数据。对数据的目视检查也未发现任何异常数据。

例 1——第二步　下面将用 8.3.2.2 节中叙述的 k 样本 Anderson-Darling 检验来确定这十批的数据是否可以合并。首先对合并后的数据进行排序，在表 8.3.7.1 的 $z_{(j)}$列，列出了 27 级不同的值。其余几列给出了 h_j，H_j和计算第一批（i=1）统计项要用的 F_{1j}。第 f_{1j} 列显示第一批中出现 $z_{(j)}$的次数，它用于计算 F_{1j}。由这些数据可以得出

$$\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{L} h_j \frac{(nF_{ij} - n_i H_j)^2}{H_j(n - H_j) - \frac{nh_j}{4}} = \frac{1}{3}\sum_{j=1}^{27} h_j \frac{(30F_{1j} - 3H_j)^2}{H_j(30 - H_j) - \frac{30h_j}{4}} = 363.33$$

对其余 9 批进行类似计算后，可得 Anderson-Darling 统计量如下

$$\mathrm{ADK} = \frac{n-1}{n^2(k-1)}\sum_{i=1}^{k}\left\{\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{L} h_j \frac{(nF_{ij} - n_i H_j)^2}{H_j(n - H_j) - \frac{nh_j}{4}}\right\}$$

$$= \frac{30-1}{30^2(10-1)}\sum_{i=1}^{k}\left\{\frac{1}{n_i}\sum_{j=1}^{L} h_j \frac{(nF_{ij} - n_i H_j)^2}{H_j(n - H_j) - \frac{nh_j}{4}}\right\}$$

$$= 1.24$$

将该统计量的计算值与式 8.3.2.2(j)的临界值 1.37 比较，由于计算值 1.24 小于临界值 1.37，故接受这些组取自同一总体的假设。因此这些批的数据可以合并成一个样本。

例 1——第三步　对合并数据进行最大赋范残差(MNR)检验。在合并数据中未发现可疑异常数据（异常数据检查方法详见例 1 第一步）。

例 1——第四步　为了进行 8.3.4.2.2 节中所述双参数 Weibull 拟合优度检验，必须计算尺度和形状参数的估计值 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$。8.3.4.2.1 节中叙述了其计算方法。计算数据的几何平均值。

$$\bar{x}_G = \exp\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(x_i)\right] = \exp\left[\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30}\ln(x_i)\right] = 134.1335^{*}$$

表 8.3.7.1　第一批料 k 样本 Anderson-Darling 统计计算示例

j	$z_{(j)}$	h_j	H_j	f_{1j}	F_{1j}
1	107.8	1	0.5	0	0.0
2	109.5	1	1.5	0	0.0
3	110.7	1	2.5	0	0.0
4	114.6	1	3.5	0	0.0
5	118.3	1	4.5	0	0.0
6	118.7	1	5.5	0	0.0
7	118.8	1	6.5	0	0.0
8	119.0	1	7.5	0	0.0
9	119.3	1	8.5	0	0.0
10	120.0	1	9.5	0	0.0
11	121.2	1	10.5	0	0.0
12	121.9	1	11.5	0	0.0
13	124.6	2	13.0	0	0.0
14	125.5	1	14.5	0	0.0
15	125.8	1	15.5	0	0.0
16	125.9	3	17.5	1	0.5
17	126.1	1	19.5	0	1.0
18	126.6	1	20.5	0	1.0
19	127.5	1	21.5	0	1.0
20	127.9	1	22.5	0	1.0
21	130.0	1	23.5	0	1.0
22	131.2	1	24.5	0	1.0
23	132.6	1	25.5	0	1.0
24	134.4	1	26.5	0	1.0
25	136.6	1	27.5	1	1.5
26	139.4	1	28.5	0	2.0
27	144.4	1	29.5	1	2.5

对于给定的 $\hat{\beta}$，$\hat{\alpha}$ 为

$$\hat{\alpha} = \bar{x}_G\left[\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{x_i}{\bar{x}_G}\right)^{\hat{\beta}}\right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}}$$

$$\hat{\alpha} = 134.1335\left[\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30}\left(\frac{x_i}{134.1335}\right)^{\hat{\beta}}\right]^{\frac{1}{\hat{\beta}}}$$

为计算 $\hat{\beta}$，定义函数 $G(\hat{\beta})$ 为：

* 原文代入数据误为 n=53 和下式中的 31，$\bar{x}_G$=67.501。译者校正。

$$G(\hat{\beta})=\frac{1}{n}\sum_{i=1}^{n}\ln(x_i)\left(\left[\frac{x_i}{\hat{\alpha}}\right]^{\hat{\beta}}-1\right)-\frac{1}{\hat{\beta}}$$

$$=\frac{1}{30}\sum_{i=1}^{30}\ln(x_i)\left(\left[\frac{x_i}{\hat{\alpha}}\right]^{\hat{\beta}}-1\right)-\frac{1}{\hat{\beta}}$$

式中$\hat{\alpha}$按上述公式计算。$\hat{\beta}$的估计值为$G(\hat{\beta})=0$的解。在 8.3.4.2.1 节中给出了求解该方程的一种迭代法。置初值

$$\hat{\beta}=\frac{1.28}{S_y}=\frac{1.28}{0.0673}=19.02$$

解为$\hat{\beta}=15.35$，由此可得$\hat{\alpha}=128.39$。

下表列出了经排序后的最初 5 个观测值及其计算拟合优度检验统计量必需的换算值。

$x_{(i)}$	$z_{(j)}=\left(\frac{x_{(i)}}{\hat{\alpha}}\right)^{\hat{\beta}}=\left(\frac{x_{(i)}}{128.39}\right)^{15.35}$
107.8	0.0684
109.5	0.0869
110.7	0.1027
114.6	0.1748
118.3	0.2847

根据 8.3.4.2.2 节可得其 Anderson-Darling 拟合优度统计量与观测显著性水平如下

$$\mathrm{AD}=\sum_{i=1}^{n}\frac{1-2i}{n}\left[\ln[1-\exp(-z_{(i)})]-z_{(n+1-i)}\right]-n$$

$$=\sum_{i=1}^{30}\frac{1-2i}{30}\left[\ln[1-\exp(-z_{(i)})]-z_{(31-i)}\right]-30$$

$$=0.699$$

$$\mathrm{AD}^*=(1+0.2/\sqrt{n})\mathrm{AD}=(1+0.2/\sqrt{30})0.699=0.7245$$

$$\mathrm{OSL}=1/\{1+\exp[-0.10+1.24\ln(\mathrm{AD}^*)+4.48\mathrm{AD}^*]\}$$

$$=1/\{1+\exp[-0.10+1.24\ln(0.7245)+4.48(0.7245)]\}$$

$$=0.0576$$

由于 Weibull 拟合优度检验出的 OSL 值大于 0.05，没有充分证据否定该数据服从双参数 Weibull 分布的假设。因而应采用 8.3.4.2.3 节中的双参数 Weibull 法计算 B 基准值。

例 1——第五步　用前一步计算的$\hat{\alpha}$和$\hat{\beta}$估计值来计算 8.3.4.2.3 节中所述样本的 B 基准值。计算 B 基准值必需的参量为：

$$V_{\mathrm{B}}=5.057\text{（查表 8.5.8）}$$

$$\hat{\alpha}=128.39$$

$$\hat{\beta}=15.35$$

$$\hat{Q}=\hat{\alpha}(0.10536)^{1/\hat{\beta}}=(128.39)(0.10536)^{1/15.35}=110.88$$

B 基准值计算如下

$$B=\hat{Q}\exp\left\{\frac{-V_B}{\hat{\beta}\sqrt{n}}\right\}=110.88\exp\left\{\frac{-5.057}{15.35\sqrt{30}}\right\}=104.41$$

为向 MIL-HDBK-17 提供数据，该 B 基准值应化整成 104。

8.3.7.2 例2——正态分布

本例数据集由四批材料的压缩试验测量值组成。本例题举例说明正态性拟合优度检验及正态法的 B 基准值的计算。所有各步计算可用 STAT17 执行并用数据集 example.d02 示范。第六步的计算可用 RECIPE 执行并用数据集 pr2.dat 示范。同样也提供使用 RECIPE 来分析简单随机样本的例子。

例 2——第一步　本数据集中没有查出异常数据（异常数据检查计算详见例 1）。

例 2——第二步　k 样本 Anderson-Darling 检验统计量为 ADK=1.01（k 样本统计计算详见例 1）。由于它小于临界值 1.73，因此可将这些批的数据合并成单个样本。下一步检查其分布形式。

例 2——第三步　对合并数据进行最大赋范残差(MNR)检验，在合并数据中未发现可疑异常数据（异常数据检查方法详见例 1 第一步）。

例 2——第四步　Weibull 拟合优度检验给出的观测显著性水平为 0.008（Weibull 拟合优度检验计算详见例 1 第四步）。由于它小于 0.05，故进行 8.3.4.3.2 节中所述的正态性拟合优度检验。

例 2——第五步　样本的平均值和标准差分别为 103.1 和 6.175。下表列出了经排序后的最初 5 个观测值、z 值与计算正态分布 Anderson-Darling 统计量必需的标准正态分布值。

$x_{(i)}$	$z_{(i)}=\frac{x_{(i)}-\bar{x}}{s}=\frac{x_{(i)}-106.5}{6.436}$	$F_0(z_{(i)})$
98.0	-1.313	0.0951
99.0	-1.158	0.1235
100.0	-1.002	0.1582
100.0	-1.002	0.1582
100.0	-1.002	0.1582
…	…	…

$$\begin{aligned}AD&=\sum_{i=1}^{n}\frac{1-2i}{n}\left\{\ln[F_0(z_{(i)})]+\ln[1-F_0(z_{(n+1-i)})]\right\}-n\\&=\sum_{i=1}^{20}\frac{1-2i}{20}\left\{\ln[F_0(z_{(i)})]+\ln[1-F_0(z_{(21-i)})]\right\}-20\\&=0.570\end{aligned}$$

$$AD^*=(1+4/n-25/n^2)AD=\left[1+\frac{4}{20}+\frac{25}{20^2}\right](0.570)=0.648$$

$$\begin{aligned}OSL&=1/\{1+\exp[-0.48+0.78\ln(AD^*)+4.58AD^*]\}\\&=1/\{1+\exp[-0.48+0.78\ln(0.648)+4.58(0.648)]\}\\&=0.163\end{aligned}$$

由于正态拟合优度检验给出的 OSL 值（0.163）大于 0.05，没有充分证据否定该数据

服从正态分布的假设。因而应采用 8.3.4.3.3 节中的正态分布法计算 B 基准值。

例 2——第六步　由表 8.5.10 查得单侧容限系数 k_B 为 1.93。正态分布样本的 B 基准值为

$$B = \bar{x} - k_B s = 103.1 - (1.927)(6.175) = 91.2$$

为向 MIL-HDBK-17 提供数据，该 B 基准值应化整成 91，因为它对应于数据中明显的有效位数。

也可用 RECIPE 计算上述的基准值。由于已经证明这些批可能合并，因此本例子描述取自在一组确定性条件下的单批料的 n 个观测值的非结构型（亦即简单随机）样本。对于这一情形，条件 l=1，

批次 m=1，因此对各个 s 有 $p(s)=q(s)=1$。该模型可以写成

$$y_s = \theta_1 + e_s$$

注意该式中没有出现 $b_{q(s)}$，因为已经证实批间差异可以忽略（第三步）。

```
#
# RECIPE Problem #2: Random sample of 4 batches with no
# batch-to-batch variability
#
# -- For this example, we have 20 observations: all at the same
# fixed level and from one population. RECIPE is a very
# general program which is here used for a very simple
# example. This example might seem confusing because it
# is so special. If so, consider the more complicated
# examples, particularly Example #4. Ironically, the
# simpler examples may then be easier to understand.
#
# -- ntot, nlvl, nbch, npar, npts, prob, conf
#
20 1 1 1 1 .9d0 .95d0
#
# -- Fixed levels. Here nlvl=1 and npar=1; that is there is only
# one fixed level and one regression parameter (a constant mean),
# so this part of the input consists of one row and one column,
# containing just the number '1'.
#
1
#
# -- Fixed level, batch number, response value. Note that there
# is only one level (nlvl=1) and one batch (nbch=1).
#
1 1 99.
```

```
1 1 100.
1 1 106.
# (this just shows that comments can be put anywhere: even among
# the data values. This is useful, for example, if a data value
# is to be removed from the analysis. Simply put a '#' at the
# beginning of the appropriate line, and decrease 'ntot' by 1
# in the first noncomment line)
1 1 107.
1 1 110.
1 1 98.
1 1 103.
1 1 111.
1 1 119.
1 1 121.
1 1 100.
1 1 100.
1 1 104.
1 1 108.
1 1 116.
1 1 103.
1 1 104.
1 1 106.
1 1 106.
1 1 108.
#
# -- Points at which to evaluate tolerance limit. Here the only fixed
# effect is a constant mean, so this part of the input is trivial.
1
```

由“#”开始的行为注释行，它将被程序忽略。可在任意位置插入注释行以使 RECIPE 数据文件自成文档。该程序采用自由格式输入，故在那一列输入数据并不重要，只要它们顺序正确并用空格分开。唯一例外的是注释行第一列必须有一个“#”。

任何 RECIPE 文件的第一个非注释行有 7 个常数：

RECIPE 记号	符 号	定 义
ntot	n	观测值总数
nlevel	l	确定性状态数
nbch	m	批次数
npar	r	确定性参数个数
npts	-	待计算的基准值个数
prob	-	容度
conf	-	置信度

必须规定要计算基准值的点的个数。例如，如果某线性回归模型显示强度与温度的关系，那么可以计算在任意温度下的基准值，也就是说，用于确定基准值的温度值不必是已有强度值时相应的温度值。第 5 个数 npts 规定要计算的基准值的个数。第 6 和第 7 个数，即 prob 与 conf，给出要用的容度和置信度。对于基准值计算，人们只需记住 prob 在计算 A 基准值时为 0.99d0，在计算 B 基准值时为 0.90d0，以及 conf 为 0.95d0 即可。

在本例中，注意有 n=20 个观测值，l=1 个确定性状态下，m=1 个批料，r=1 个确定性参数，且只计算一个单个 B 基准值（由于这对应于一个简单随机样本，因此计算一个 B 基准值才有意义）。

接着 l=1 非注释行规定确定性状态数；本例只有一个确定性状态，并且完全一样，所以文件的这一部分只有包含一个“1”的一行。其次 n=20 非注释行的每行从左到右给出，从左到右为，确定性状态 $p(s)$（此处 $p(s)=1$），批次 $q(s)$（此处 $q(s)=1$）和观测值（强度 y_s，s=1，…，20）。接下来 npts=1 非注释行给出计算基准值的各点对应的 z 值。此外，由于本例为一个简单随机样本，因此文件的这一部分只有含一个“1”的一行。

RECIPE 执行如下：

```
recipe
Filename (without .dat extension) ?
ex2

RECIPE : One-Sided Random-Effect Regression Tolerance Limits
(Version 1.0, April 1995)

*** Simulated pivot critical value file ex2.crt not found.
Satterthwaite approximation will be used.
```

Probability	Confidence	Regression	Tolerance Limit
0.90	0.95	104.400000	88.312898

输出的开始两列指出已计算出 B 基准值，第 3 列给出最小二乘回归线上一点的值（此处正好是样本平均值），第 4 列给出相应的基准值（此处通常为 5 个试件的单个样本的正态 B 基准值）。这些结果给出的平均值为 104，B 基准值为 88（注意有效位数）。该方法也可用于来自单批的数据分析。提供了一个警告来提醒人们不能利用来自单批的数据估计批间差异，因此基准值基于无批间差异的假设计算。

RECIPE 能用两种方法来计算许用值。一种方法涉及使用 Satterthwaite 近似（文献 8.3.7.2(a)），另一种方法需要使用一个辅助程序 SIMPVT 以获得概率分布不能以解析形式确定的关键随机变量的分位数。通常，这两种方法将给出几乎完全相同的答案，至少是对材料基准值的计算是这样的。因此建议一般使用更简单的 Satterthwaite。这两个精确程序分别用模拟的方法仿真和评定 Satterthwaite 近似的程序。辅助程序 SIMPVT 和 SIMCOV 可随 RECIPE（8.1.2 节）一起获得。更多的信息见文献 8.3.7.2(a)和(b)。

8.3.7.3 例3——对数正态分布

本例数据集由五批材料的横向拉伸试验测量值组成。本例题举例说明对数正态拟合优

度检验及对数正态法的 B 基准值的计算。所有各步计算可用 STAT17 执行并可用数据集 example.d03 示范。

例 3——第一步　本数据集中没有查出异常数据（异常数据检查计算详见例 1）。

例 3——第二步　k 样本 Anderson-Darling 检验统计量为 ADK=1.27（k 样本统计量的计算详见例 1）。由于它小于临界值 1.64，因此可将这些批的数据合并成单个样本。

例 3——第三步　对合并数据进行最大赋范残差(MNR)检验，在合并数据中未发现可疑异常数据（异常数据检查方法详见例 1 第一步）。

例 3——第四步　双参数 Weibull 和正态拟合优度检验的观测显著性水平（OSL）给出如下：

分　布	OSL
双参数 Weibull	0.001
正　态	0.042

(这些检验的计算详见例 1 和例 2)。由于 OSL 都小于 0.05，因此两种分布都不能恰当的描述数据。因此进行对数正态拟合优度检验。

例 3——第五步　为进行 8.3.4.4 节中所述的对数正态拟合优度检验，采用了数据的自然对数。转换过的数据的平均值和标准差为

$$\bar{x}_L = 4.57 \qquad s_L = 1.6050$$

下表列出了经排序后的最初 5 个观测值与计算拟合优度统计量必需的转换值。拟合优度统计量和观测显著性水平计算如下：

$x_{(i)}$	$\ln(x_{(i)})$	$z_{(i)} = \dfrac{\ln(x_{(i)}) - \bar{x}_L}{s_L} = \dfrac{x_{(i)} - 4.57}{1.6050}$	$F_0(z_{(i)})$
85.39	4.447228998	-1.727771002	0.042014598
86.11	4.455625549	-1.719374451	0.042773061
86.18	4.456438132	-1.718561868	0.042847046
90.72	4.50777784	-1.66722216	0.047735087
90.86	4.50931986	-1.66568014	0.047888539
…	…	…	…

$$\begin{aligned}
\mathrm{AD} &= \sum_{i=1}^{n} \frac{1-2i}{n} \left\{ \ln[F_0(z_{(i)})] + \ln[1 - F_0(z_{(n+1-i)})] \right\} - n \\
&= \sum_{i=1}^{30} \frac{1-2i}{30} \left\{ \ln[F_0(z_{(i)})] + \ln[1 - F_0(z_{(21-i)})] \right\} - 30 \\
&= 0.597
\end{aligned}$$

$$\mathrm{AD}^* = \left(1 + 4/n - 25/n^2\right)\mathrm{AD} = \left[1 + \frac{4}{30} + \frac{25}{30^2}\right](0.597) = 0.177$$

$$\begin{aligned}
\mathrm{OSL} &= 1/\{1 + \exp[-0.48 + 0.78\ln(\mathrm{AD}^*) + 4.58\mathrm{AD}^*]\} \\
&= 1/\{1 + \exp[-0.48 + 0.78\ln(0.177) + 4.58(0.177)]\} \\
&= 0.098
\end{aligned}$$

由于对数正态拟合优度检验的 OSL 值大于 0.05，没有充分证据否定该数据服从对数正态分布的假设。因而采用 8.3.4.5.1 节中的对数正态分布法计算 B 基准值。

例 3——第六步　对数正态分布数据的 B 基准值为

$$B = \exp[\bar{x}_L - k_B s_L] = \exp[4.57 - 1.78(1.6050)] = 85.09$$

为向 MIL-HDBK-17 提供数据，该 B 基准值应化整成 85.1。

8.3.7.4　例4——非参数法

本例数据集由三批材料的横向拉伸破坏应变测量值组成。本例题举例说明非参数法的 B 基准值的计算。所有各步计算可用 STAT17 执行并可用数据集 example.d04 示范。

例 4——第一步　从本数据集中查出一个异常数据，1300。找不到产生原因因此将它保留在数据集中（异常数据检查计算详见例 1）。

例 4——第二步　k 样本 Anderson-Darling 检验统计量为 ADK=1.44（k 样本统计量的计算详见例 1）。由于它小于临界值 1.86，因此可将这些批的数据合并成单个样本。

例 4——第三步　对合并数据进行最大赋范残差(MNR)检验，第一步已查出的异常数据在合并数据中再次被确认为异常数据（异常数据检查方法详见例 1 第一步）。

例 4——第四步　三种分布的拟合优度检验的结果如下：

分　布	OSL
双参数 Weibull	0.003
正　态	0.011
对数正态	0.000

(这些检验的计算详见例 1、例 2 和例 3)。由于所有观测的显著性水平都小于 0.05，断定数据不服从这三种分布。因此必须使用 8.3.5.1 节中所述的非参数法来计算 B 基准值。

例 4——第五步　用非参数法计算 B 基准值的第一步是将数据从小到大排序。最小的 5 个值为 1300，5500，5500，5700 和 5900。下一步是从表 8.5.12 中查出相应于样本大小 n 的适当的 B 基准值序号。当 n 为 97 时，用于作为 B 基准值的观测值序号为 r =5。因此第 5 个观测值，即 5 900，即为该样本的 B 基准值。

8.3.7.5　Hanson-Koopmans法

本例数据集由三批材料的压缩强度测量值组成。本例题举例说明三种标准分布都步能恰当拟合数据并且没有足够数据实施非参数法的情形。所有各步计算可用 STAT17 执行并可用数据集 example.d05 示范。

例 5——第一步　本数据集中没有查出异常数据（异常数据检查计算详见例 1）。

例 5——第二步　k 样本 Anderson-Darling 检验统计量为 ADK=0.60（k 样本统计量的计算详见例 1）。由于它小于临界值 1.89，因此可将这些批的数据合并成单个样本。

例 5——第三步　对合并数据进行最大赋范残差(MNR)检验，在合并数据中没有查出异常数据（异常数据检查方法详见例 1 第一步）。

例 5——第四步　三种分布的拟合优度检验的结果如下：

分　布	OSL
双参数 Weibull	0.047
正　态	0.039
对数正态	0.035

(这些检验的计算详见例 1、例 2 和例 3)。

由于所有观测的显著性水平都小于 0.05，断定数据不服从这三种分布。又因为只有 15

个数据，因此应使用 Hanson-Koopmans 法来计算这些数据的 B 基准值。

例 5——第五步　按照 8.3.4.5.2 节中所述步骤，估算 B 基准值。当 n 为 15 时，查表 8.5.14 得到 r=8 和 k=1.54。将数据按升序排列后找出第 1 和第 8 个值。

$$x_{(1)}=114.6 \qquad x_{(8)}=133.4$$

其 B 基准值计算为

$$B=x_{(r)}\left[\frac{x_{(1)}}{x_{(r)}}\right]^{k}=133.4\left[\frac{114.6}{133.4}\right]^{1.54}=104.365$$

这些数据可以纳入 MIL-HDBK-17 中作为临时数据，但其 B 基准值将不列入该手册。

8.3.7.6　例6——方差分析（ANOVA）法

本例数据集由六批材料的拉伸强度测量值组成。本例题举例说明多批样本的正态性检验、方差相等检验和利用方差分析（ANOVA）法的基准值的计算。所有各步计算可用 STAT17 执行并用数据集 example.d06 示范。第四步的计算可用 RECIPE 执行并用数据集 ex2.dat 示范。

例 6——第一步　本数据集中没有查出异常数据（异常数据检查计算详见例 1）。

例 6——第二步　k 样本 Anderson-Darling 检验统计量为 ADK=2.45（k 样本统计量的计算详见例 1）。由于它大于临界值 1.56，抽取这些样本的母体是相同的假设被拒绝。

例 6——第三步　8.3.5.2.1 节中所述方差相等检验被用来确定批内方差是否明显不同。样本大小（n_i），组的中位数（$\tilde{x}_i$）和组的 $w_{ij}=\left|x_{ij}-\tilde{x}_i\right|$ 的平均数列于下表。

批　次	n_i	$\tilde{x}_i$	$\overline{w}_i$
1	5	338.7	6.233
2	6	308.5	9.187
3	5	317.7	9.874
4	5	313.1	9.823
5	5	322.7	6.239
6	5	294.2	7.099

已转换数据为 w11=|328.1-338.7|=10.6，w12=|334.8-338.7|=3.9，…，w65=|294.2-294.2|=0。

检验统计量为

$$F=\frac{\sum_{i=1}^{k}n_i(\overline{w}_i-\overline{w})^2/(k-1)}{\sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i}(w_{ij}-\overline{w}_i)^2/(n-k)}$$

$$=\frac{\sum_{i=1}^{6}n_i(\overline{w}_i-\overline{w})^2/(6-1)}{\sum_{i=1}^{6}\sum_{j=1}^{n_i}(w_{ij}-\overline{w}_i)^2/(31-6)}$$

$$=0.29$$

由表 8.5.1 查得自由度为 y_1=k-1=5 和 y_2=n-k=25 的 F 随机变量的第 95 百分位数为 2.60。由于 0.29 小于 2.60，接受组内方差相等的假设。

由于方差相等检验为诊断检验，即使当更高的组内方差相等的假设被拒绝，仍可计算 B 基准值。然而当方差不等时在一些场合会导致非保守的 B 基准值。方差不等显示不同批次在制造或加工中可能存在不一致性的问题。使用在这些情形下计算 B 基准值时必须谨慎。

例 6——第四步　该数据的合计统计量在下表中给出

批　次	n_i	$\bar{x}_i$	s_i
1	5	339.133	8.159
2	6	308.701	12.443
3	5	317.081	16.236
4	5	313.066	12.556
5	5	321.951	8.614
6	5	297.595	9.307

按照 8.3.5.2.6 节中的定义，初步的 ANOVA 计算为

$$n^* = \sum_{i=1}^{k} n_i^2/n = (5^2 + \cdots + 5^2)/31 = 5.19$$

$$n' = (n - n^*)/(k-1) = (31 - 5.19)/(6-1) = 5.16$$

$$\bar{x} = \sum_{i=1}^{k} n_i \bar{x}_i/n = [5(339.133) + \cdots + 5(297.595)]/31 = 316$$

$$\text{MSB} = \sum_{i=1}^{k} \frac{n_i(\bar{x}_i - \bar{x})^2}{k\text{-}1} = \frac{1}{6-1}\left[5(339-316)^2 + \cdots + 5(298-316)^2\right] = 983.0$$

$$\text{MSE} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n_i} \frac{(x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n\text{-}k} = \frac{1}{n-k}\sum_{i=1}^{k}(n_i - 1)s_i^2 = \frac{1}{31-6}\left[4(8.159)^2 + \cdots + 4(9.307)^2\right] = 134.8$$

由表 8.5.10 查得下列容限系数（用于 B 基准值）

$$k_0 = 1.768 \qquad k_1 = 3.007$$

注意表 8.5.10 的近似不用于小的自由度数。容限系数计算如下。表示平均值平方的比率为

$$S = \sqrt{\frac{\text{MSB}}{n'} + \left(\frac{n'-1}{n'}\right)\text{MSE}}$$

$$= \sqrt{\frac{983.0}{5.16} + \left(\frac{5.16-1}{5.16}\right)134.8}$$

$$= 17.297$$

$$u = \frac{\text{MSB}}{\text{MSE}} = \frac{983.0}{134.8} = 7.292$$

（如果 u 小于 1，置 u 等于 1）

$$w = \sqrt{\frac{u}{u + n' - 1}} = \sqrt{\frac{7.292}{7.292 + 5.16 - 1}} = 0.7980$$

容限系数为

$$T = \frac{k_0 - k_1/\sqrt{n'} + (k_1 - k_0)w}{1 - \dfrac{1}{\sqrt{n'}}}$$

$$= \frac{1.768 - 3.007/\sqrt{5.16} + (3.007 - 1.768)0.798}{1 - \dfrac{1}{\sqrt{5.16}}}$$

$$= 2.560$$

因此 B 基准值计算为

$$B = \bar{x} - TS = 316 - 2.560(17.297) = 271.72$$

为向 MIL-HDBK-17 提供数据，该 B 基准值应化整成 272。

当批间差异显著或想用 ANOVA 法时，可用 RECIPE 执行第四步的计算。在本例中，数据来自多批，每批都在同样的确定性条件下试验。由于只有一组确定性条件，因此本例模型具有常数平均值。但是现在存在批间方差和批内方差两个分量，因此 l=1，并且

$$y_s = \theta_1 + b_{q(s)} + e_s$$

这就是 8.3.5.2 节的通常的随机影响 ANOVA（或简单“ANOVA”）模型。

```
#
# RECIPE Example #2: Basis value from a one-way ANOVA model
# This corresponds to MIL-HDBK-17, Problem #6
#
# -- This example has 31 observations in 6 batches, for which
# an ANOVA B-basis value is to be determined
#
# -- ntot, nlvl, nbch, npar, npts, prob, conf
31 1 6 1 1 .9d0 .95d0
#
# -- Fixed levels. Here we are fitting a one-way ANOVA model, so there
# is only one fixed level, and only one fixed parameter (the mean)
# to estimate.
1
#
# -- Fixed level number, batch number, strength. Since we have
# only one fixed level, the first column is all ones. The
# second column gives the batch number, and the third column
# gives the strength values.
1 1 328.1174
1 1 334.7674
1 1 347.7833
1 1 346.2661
1 1 338.7314
1 2 297.0387
1 2 293.4595
1 2 308.0419
1 2 326.4864
1 2 318.1297
1 2 309.0487
1 3 337.0930
1 3 317.7319
```

1 3 321.4292
1 3 317.2652
1 3 291.8881
1 4 297.6943
1 4 327.3973
1 4 303.8629
1 4 313.0984
1 4 323.2769
1 5 312.9743
1 5 324.5192
1 5 334.5965
1 5 314.9458
1 5 322.7194
1 6 291.1215
1 6 309.7852
1 6 304.8499
1 6 288.0184
1 6 294.1995
#
-- Points at which to evaluate tolerance limit. For the one-way
ANOVA model used here, there is only one point at which the
evaluation can be done: it corresponds to the one fixed
level of the model.
1
The output is similar in form to the example in Problem 2, Step 6.
recipe
Filename (without .dat extension) ?
ex2
RECIPE : One-Sided Random-Effect Regression Tolerance Limits
(Version 1.0, April 1995)
*** Simulated pivot critical value file ex2.crt not found.
Satterthwaite approximation will be used.

Probability	Confidence	Regression	Tolerance Limit
0.90	0.95	316.010884	271.672860

计算结果给出平均值为 316，B 基准值为 272。然而，必须注意，例 2 输出中的警告信息没有出现。由于有 6 批料，可以估计批间差异。第四列给出单因素随机影响 ANOVA 的基准值。

8.3.7.7 例7——线性回归

本例数据集包括在两种确定温度下的拉伸试验测量值。本例举例说明 8.3.5.3 节介绍的回归分析方法。第一步的计算可由 STAT17 执行并由数据集 example.d07 示范。第二步至

第五步的计算可由 RECIPE 执行并由数据集 ex3.dat 示范。注意强度与温度之间的线性关系不适合于所有温度范围。

例 7——第一步　本例中，x 表示温度，y 表示由一组拉伸试验确定的拉伸强度。对每个温度或确定性条件进行异常数据检查是有用的。在本例数据集中的两种温度下均未查出异常数据。

例 7——第二步　用表 8.3.7 中数据，计算下述各量：

$n = 11$	$(\Sigma x)^2 = 13\ 225$
$\Sigma x = 115$	$(\Sigma y)^2 = 14\ 163\ 006$
$\Sigma y = 3\ 763$	$(\Sigma x)(\Sigma y) = 4\ 327\ 883$
$\Sigma x^2 = 56\ 195$	$\Sigma xy = 37\ 033.94$
$\Sigma y^2 = 1\ 288\ 172$	

$$S_{xx} = \sum x^2 - (\sum x)^2/n = 56195 - (13225)/11 = 54992^{*}$$

$$S_{xy} = \sum xy - (\sum x)(\sum y)/n = 37033.94 - (115)(3763)/11 = -2310.459$$

$$S_{yy} = \sum y^2 - (\sum y)^2/n = 1288172 - (14163006)/11 = 626.5063$$

回归直线斜率为：

$$b = \frac{S_{xy}}{S_{xx}} = \frac{-2310.459}{54992} = -0.0420$$

回归直线 y 截距为：

$$a = \frac{\sum y - b\sum x}{n} = \frac{3763}{11} - \frac{(-0.0420)(115)}{11} = 342.1 - (-0.438) = 342.5644$$

那么最终的最小二乘回归直线方程为：

$$y^{*} = a + b\bar{x} = 342.5644 - 0.0420\,\bar{x}$$

利用该方程，计算对应于数据集中 x 值的 y^{*} 值，列于下表。

x	y	y^{*}	$e = y - y^{*}$
75	328.1174	339.4134	-11.2959667
75	334.7674	339.4134	-4.6459667
75	347.7833	339.4134	8.3699333
75	346.2661	339.4134	6.8527333
75	338.7314	339.4134	-0.6819667
75	340.8146	339.4134	1.4012333
-67	343.5855	345.3793	-1.7938400
-67	334.1746	345.3793	-11.2047400
-67	348.6610	345.3793	3.2816600
-67	356.3232	345.3793	10.9438600
-67	344.1524	345.3793	-1.2269400

平均值平方的平方根误差计算如下：

$$s_y = \sqrt{\frac{\sum (y - y^{*})^2}{n-2}} = \sqrt{\frac{529.5}{9}} = 7.669818$$

R^2 计算如下：

* 原文误将 n 取 20

$$R^2=\frac{b^2S_{xx}}{S_{yy}}=\frac{(-0.0420)^2(54992)}{626.5603}=0.1549$$

从而 y 与 x 之间的线性关系解释了数据 y 相对于其平均值的 15%的差异。

例 7——第三步　线性回归分析中的假设之一即残差关于回归直线正态分布。该假设的有效性可以通过在 8.3.5.1 节中讨论的对残差的正态性拟合优度检验来检查。注意用于计算 Anderson-Darling 统计量的 $z_{(i)}$值定义为 $z_{(i)}=e_{(i)}/S_y$，此处 $e_{(i)}$为第 i 个排序后的残差，S_y 为回归分析的平均值平方的平方根误差。这 11 个排序后的残差以及初步的拟合优度计算见下表。

$e_{(i)}$	$z_{(i)}=\frac{e_{(i)}}{S_y}=\frac{e_{(i)}}{58.83}$
-11.2959667	-1.47278162
-4.6459667	-0.60574667
8.3699333	1.09128187
6.8527333	0.89346752
-0.6819667	-0.08891563
1.4012333	0.18269447
-1.7938400	-0.23388299
-11.2047400	-1.46088734
3.2816600	0.42786674
10.9438600	1.42687349
-1.2269400	-0.15996990

正态性拟合优度检验统计量为 0.222，其 OSL 为 0.59。（正态性拟合优度检验计算详见例 2。）由于 OSL 大于 0.05，因此没有充分证据否定残差服从正态分布的假设。

例 7——第四步　有几个 x 值存在多个 y 观测值。这样，就可能建立方差分析表来检验 8.3.5.3 节中讨论的回归分析的合适程度。方差分析表的主要三行的平方和计算如下：

$$\text{SSR}=b^2S_{xx}=(-0.0420)^2(54992)=97.7138$$

$$\text{SST}=S_{yy}=626.5063$$

$$\text{SSE}=\text{SST}-\text{SSR}=626.5063-97.7138=529.4349$$

平均值平方（及 F 检验统计量）计算如下：

$$\text{MSR}=\text{SSR}=97.07138$$

$$\text{MSE}=\text{SSE}/n-2=529.4349/9=58.82611$$

$$\text{F}=\text{MSR/MSE}=97.07138/58.82611=1.650141$$

方差分析表如下

差异源	自由度	平方和SS	平均值平方MS	$F_{0.95}$
回　归	1	97.07	97.07	F=1.65
误　差	9	529.4	58.83	
总　计	10	626.5		

具有自由度数 1 和 n-2=9 的 F 值小于表 8.5.1 中相应于自由度数为 1 和 9 的值 5.12，所以回归分析可以忽略。

例 7——第五步　由第一步得到的线性回归方程，可用 8.3.5.3 节的方法计算任意温度（x 值）下的下容许限。在 x=25 时的 B 基准值的详细计算如下。

该组数据的平均温度值为：

$$\bar{x} = \sum x/n = 115/11$$

计算容限系数所需的Δ系数为：

$$\Delta = \frac{(x_0 - \bar{x})^2}{\sum_{i=1}^{n}(x_i - \bar{x})^2/n} = \frac{(25-10.45)^2}{(54992)/11} = 0.0423^{*}$$

k'系数的近似值为：

$$k'_{\mathrm{B}} = 1.282 + \exp\left[0.595 - 0.508\ln(n) + \frac{4.62}{n} + \left(0.486 - \frac{0.986}{n}\right)\ln(1.82+\Delta)\right]$$

$$= 1.282 + \exp\left[0.595 - 0.508\ln(11) + \frac{4.62}{11} + \left(0.486 - \frac{0.986}{11}\right)\ln(1.82+0.0423)\right]$$

$$= 2.33$$

那么，当 x=25 时的 B 基准值计算为

$$\mathrm{B} = (a + bx_0) - k_B s_y = [342.5644 + (-0.0420)(25) - 2.33(7.669818)] = 323.64339$$

为向 MIL-HDBK-17 提供数据，该值应化整成 324。

RECIPE 提供该例线性回归计算。数据来自单批料，所以 m=1，但是包括了几种条件的的可能性（l>1）。为了巩固概念，假设现有来自某单批料的几组单向拉伸强度数据，且每一组在不同温度下试验，而其他条件保持不变。进一步假设该种材料的强度随温度线性变化，至少是在此数据的温度范围内。对于仅一批数据，不能估计批间差异。适合于这种情形的回归模型为

$$x_s = \theta_1 z_{p(s),1} + \theta_2 z_{p(s),2} + e_s$$

这就是 8.3.5.3 节的简单线性回归模型。

相应于本例的数据文件 ex3.dat 为

```
#
#    RECIPE Example #3: Regression model with data from a single batch
#    This corresponds to MIL-HDBK-17, Problem #7
#
#    -- This dataset has 11 observations at two fixed levels. The
#       data come from 1 batch, there are two fixed parameters to
#       estimate (the slope and intercept of a straight line), and
#       a B-basis value is to be calculated at 7 points on this line.
#
#    -- ntot, nlvl, nbch, npar, npts, prob, conf
  11 2 1 2 7 .9d0 .95d0
#
```

* 原文公式中误将分母中 x_i 写成 x_0。

```
#     -- We are fitting a model y=a+bT at two levels: T=75 degrees and
#        T=-67 degrees. The first column corresponds to 'a' in this
#        linear equation; the second column corresponds to 'b'. Note
#        that these values need not be given in any special order,
#        for example (1, -67) need not come before (1, 75). The
#        important thing is that the order of the rows given here
#        must correspond to the level indicator, p(s), given with each
#        response value.
  1 75
  1 -67
  #
  #     -- Now we have the 11 observations. The first column is the
#         level (=1 for 75 degrees, =2 for -67 degrees), the second
#         column is the batch (always 1), and in the third column are
#         the strength observations.
  #
    1     1     328.1174
    1     1     334.7674
    1     1     347.7833
    1     1     346.2661
    1     1     338.7314
    1     1     340.8146
    2     1     343.5855
    2     1     334.1746
    2     1     348.6610
    2     1     356.3232
    2     1     344.1524

#
#       -- Finally, we give the seven points at which basis
#         values are to be determined. These correspond
#         to seven different temperatures -67,...,50. Note
#         that the first column of ones is required because
#         of the intercept in the regression model
  1 -67
  1 -50
  1 -25
  1 0
  1 25
  1 50
  1 75
```

注意 ex3.dat 中第一个非注释行表明（按顺序，从左到右）：总共有 11 个观测值，数据在 2 个确定性状态下获得，所有数据来自单批料，模型的确定性部分包含 2 个未知参数（实际上，用直线拟合数据），将在 7 个点计算基准值，并且要计算的容许限为 B 基准值。

本例举例说明将问题简化成一个通用情形：要求材料基准值为温度的函数。已经有相应于温度-67°F 和 75°F 两种确定性状态下的数据，想要确定-67°F、-50°F、-25°F、0°F、25°F、50°F 和 75°F 温度下的基准值。线性函数的截距当然对所有温度都一样，所以给出确定性影响状态的 2 行以及给出要计算基准值的温度点的 7 行数据的第一列等于 1。对此数据执行 RECIPE 后的输出文件为

```
recipe
Filename (without .dat extension) ?
ex3

RECIPE : One-Sided Random-Effect Regression Tolerance Limits
(Version 1.0, April 1995)
*** Simulated pivot critical value file ex3.crt not found.
    Satterthwaite approximation will be used.

regini : Warning: between-batch variance cannot
         be estimated from these data. Results
         will be based on the assumption that the
         between-batch variability is negligible.
```

Probability	Confidence	Regression	Tolerance Limit
0.90	0.95	345.379340	325.887099
0.90	0.95	344.665104	325.747683
0.90	0.95	343.614756	325.338699
0.90	0.95	342.564409	324.619436
0.90	0.95	341.514062	323.538853
0.90	0.95	340.463714	322.102027
0.90	0.95	339.413367	320.366619

最后 7 行每行给出回归直线上的一点，以及 B 基准值曲线上相应于文件 ex3.dat 中 7 组协变量（温度）中各组的点。注意有个警告信息，因为人们无法利用单批数据估计批间差异。这些基准值在批间差异为零（或至少可以忽略）的假设下是有效的。

8.3.7.8 例8——带随机影响的简单线性回归

本例数据集包括几批料在两种温度下的压缩试验测量值。除了数据来自多批外，本例的情形与例 7 相同。第一步的计算可由 STAT17 执行并可由数据集 example.d08 示范。第二步的计算可由 RECIPE 执行并由数据集 ex4.dat 示范。注意强度与温度之间的线性关系不适合于所有温度范围。

例 8——第一步　在本例中，x 表示温度，y 表示由一组拉伸试验确定的拉伸强度。对每个温度或确定性条件进行异常数据检查是有用的。在本例数据集中的两种温度下均未查出异常数据。

例 8——第二步　现在可将随机批次影响 $b_{q(s)}$引入模型，有

$$x_s = \theta_1 z_{p(s),1} + \theta_2 z_{p(s),2} + b_{q(s)} + e_s$$

式中 $z_{p(s),1}$=1，$z_{p(s),2}=T_i$ 为第 i 个试验温度，$b_{q(s)}$为第 $q(s)$批的批平均值。对应于本例的文件 ex4.dat 为

```
    #
    #   RECIPE Example #4: Regression model with data from several
#       batches
    #   This corresponds to MIL-HDBK-17, Problem #8
    #
#    -- In this example, we have 72 strength observations on data
    #   from 8 batches. A straight-line regression is fit with
    #   two fixed levels (temperatures). B-basis values are calculated
    #   for 7 points along this curve.
    #
#    -- ntot, nlvl, nbch, npar, npts, prob, conf
  72 2 8 2 7 .9d0 .95d0
    #
#    -- There are two fixed levels, corresponding to
    #   75 and -67 degrees.
  1 75
  1 -67
    #
#    -- The following 72 rows give the fixed level in the
    #   first column, the batch in the second column, and the
    #   strength observation in the third column.
    1    1    328.1174
    1    1    334.7674
    1    1    347.7833
    1    1    346.2661
    1    1    338.7314
    1    2    297.0387
    1    2    293.4595
    1    2    308.0419
    1    2    326.4864
    1    2    318.1297
    1    2    309.0487
    1    3    337.0930
    1    3    317.7319
    1    3    321.4292
```

1	3	317.2652
1	3	291.8881
1	4	297.6943
1	4	327.3973
1	4	303.8629
1	4	313.0984
1	4	323.2769
1	5	312.9743
1	5	324.5192
1	5	334.5965
1	5	314.9458
1	5	322.7194
1	6	291.1215
1	6	309.7852
1	6	304.8499
1	6	288.0184
1	6	294.1995
2	1	340.8146
2	1	343.5855
2	1	334.1746
2	1	348.6610
2	1	356.3232
2	1	344.1524
2	2	308.6256
2	2	315.1819
2	2	317.6867
2	2	313.9832
2	2	309.3132
2	2	275.1758
2	3	321.4128
2	3	316.4652
2	3	331.3724
2	3	304.8643
2	3	309.6249
2	3	347.8449
2	4	331.5487
2	4	316.5891
2	4	303.7171
2	4	320.3625
2	4	315.2963

```
2    4    322.8280
2    5    340.0990
2    5    348.9354
2    5    331.2500
2    5    330.0000
2    5    340.9836
2    5    329.4393
2    7    330.9309
2    7    328.4553
2    7    344.1026
2    7    343.3584
2    7    344.4717
2    7    351.2776
2    8    331.0259
2    8    322.4052
2    8    327.6699
2    8    296.8215
2    8    338.1995

#
#    -- The following 7 rows give the points at which
#       the B-basis value is to be calculated: these
#       correspond to 7 temperatures -67,-50,...,75.
1 -67
1 -50
1 -25
1 0
1 25
1 50
1 75
```

执行 RECIPE 产生输出：

```
recipe
Filename (without .dat extension) ?
ex4

RECIPE : One-Sided Random-Effect Regression Tolerance Limits
(Version 1.0, April 1995)

*** Simulated pivot critical value file ex4.crt not found.
    Satterthwaite approximation will be used.
```

Probability	Confidence	Regression	Tolerance Limit
0.90	0.95	327.537310	286.895095
0.90	0.95	326.157386	285.580736
0.90	0.95	324.128085	283.557672
0.90	0.95	322.098785	281.470595
0.90	0.95	320.069485	279.335972
0.90	0.95	318.040184	277.119935
0.90	0.95	316.010884	274.783636

输入与输出文件格式与例 7 的相同。例 7 与例 8 之间的重要区别是例 8 中的基准值考虑了批间差异，而在例 7 中所计算的基准值严格地说仅对具体的批次有效。同时注意此处没有出现例 7 中的警告信息，因为数据来自几批料。

8.3.7.9 例9——方差分析单因素混合模型：有多个数据来源的基准值

本例数据集包含来自不止一个厂家的几批料的拉伸试验测量值。第一步和第二步的计算可由 STAT17 执行并可由数据集 example.d09 示范。第三步的计算可由 RECIPE 执行并可由数据集 ex3.dat 示范。分段假设人们有来自几个厂家各自的几批料的数据，且这些厂家希望合并他们的资源来确定基准值。如果人们确信所有这些数据的生产和试验条件是相同的，那么可以忽略数据来自多个厂家的事实。然而这些厂家在材料生产或试验或同时在这两方面通常会存在微小的差异。在这种情况下，如果人们不愿假设所有厂家的批间与批内差异接近到相同时，那么就无法来对每个厂家的数据分别应用通常的方差分析法(如 8.3.5.2 节)。然而，如果人们愿意假设每组数据具有相同的变异性（各个厂家的平均值可能不同），那么可用所有这些批次来确定适合于各个厂家的基准值。这些基准值通常要比如果对各个厂家单独计算得到的基准值明显高一些和彼此接近一些。

例 9——第一步　如例 6，应对各批进行异常数据检查。没有在这些批中发现异常数据。

例 9——第二步　针对这种情况，还值得做的是将数据按厂家分组并分别对各组进行异常数据检查。异常数据检查方法在例 1 中示范。

例 9——第三步　为建立本例的回归模型，令第 i 个厂家的平均值为μ_i。如果有 l 个厂家，我们有 $r=l$ 个未知的确定性参数，μ_1，μ_1，…，μ_l、以及方差分量 σ_b^2 和 σ_e^2。因此回归模型具有如下形式

$$\begin{aligned} y_s &= \theta_1 z_{p(s),1} + \theta_2 z_{p(s),2} + \theta_3 z_{p(s),3} + \cdots + \theta_l z_{p(s),l} + b_{q(s)} + e_s \\ &= \mu_{p(s)} + b_{q(s)} + e_s \end{aligned}$$

这些 z 被理解为 $z_{p(s),u} = \delta_{p(s),u}$，这里当 $p(s)=u$ 时 $\delta_{p(s),u}$（Kronecker 符号δ）等于 1，否则为零。这些确定性参数为$\theta_i=\mu_i$。

对应于该问题的示例数据集 ex5.dat 包含来自两个厂家的同种材料的几批料的数据。对于该例子，假设两个厂家的变异性是相同的。确定性状态数 $l=r=2$。

```
#
#     RECIPE Example #5: Basis values using data from multiple sources
#     This corresponds to MIL-HDBK-17, Problem #9
#
#     – In this example, we have five batches of data: three from
```

```
    #     one source, and two from a second source. We would like
    #     to use all five batches of data to get a tolerance limit
    #     for each source.
    #
#     -- ntot, nlvl, nbch, npar, npts, prob, conf
    #
  15 2 5 2 2 .9d0 .95d0
    #
#     -- The fixed part of this model is a different mean for
    #     each of the two sources
 1 0
 0 1
    #
#     -- Here are the 15 data values. Column 1 indicates the
    #     fixed level (data source), and column 2 indicates the
    #     number of the batch. The third column gives the strength
    #     values.
   1     1     75.8
   1     1     78.4
   1     1     82.0
   1     2     68.8
   1     2     70.9
   1     2     73.5
   1     3     74.5
   1     3     74.8
   1     3     78.8
   2     4     81.3
   2     4     87.7
   2     4     89.0
   2     5     88.2
   2     5     91.2
   2     5     94.2

    #
#     -- The tolerance limit are to be calculated at two
    #     points, which correspond to the two sources. So
    #     we just repeat the two lines for the fixed part
    #     of the model here.
 1 0
 0 1
```

从文件 ex5.dat 可知有 15 个数值，回归模型的参数个数 r=2。文件 ex5.dat 的包含数据的 15 行的第一表列示确定性状态，第二表列示批次，第三列给出强度值。模型的确定性部分有 2 个平均值，一个对应一个数据来源。所以，给出确定性状态的行以及给出要计算基准值的点的行包含分别位于不同列的两个数 1 和 0*。将这与例 2 和例 6 对比，在那里只有一个确定性状态，所以对应的行只有一列，数值为 1。本例的 RECIPE 输出为

```
    recipe
Filename (without .dat extension) ?
    ex5

RECIPE : One-Sided Random-Effect Regression Tolerance Limits
(Version 1.0, April 1995)

*** Simulated pivot critical value file ex5crt not found.
    Satterthwaite approximation will be used.
```

Probability	Confidence	Regression	Tolerance Limit
0.90	0.95	75.27778	59.401536
0.90	0.95	88.600000	71.902179

因此两个厂家的 B 基准值分别为 59.4 和 71.9。作为使用 RECIPE 的简单例子，可以证明（采用本例数据，根据例 6）如果每个厂家只用自己的数据，那么其 B 基准值分别为 52.8 和 34.6。注意混合模型给出更高且更接近的基准值。特别需要指出的是，很低的值 34.6 是由于第二个厂家只有两批料的数据。

8.4 统计方法

8.4.1 同一材料现有数据库与新的数据集的等价性检验

当遇到以下几种情形时，需要确定同一原材料的一个试验数据样本是否与其原始数据集等价：

- 对于材料批次的鉴定与验收，必须证明该批的性能“等价”于经鉴定的数据库，即该批数据满足材料规范验收需求。
- 材料供应商想要更改厚材料的生产工艺。
- 部分制造商想使用由另一机构建立的材料性能的公共数据库和基准值。不管他们采与用制造用于获得共享数据库的层压板完全相同的生产工艺，或者更改过的生产工艺，该制造商必须证明其获得相同材料性能的生产方法的等价性。
- 已经建立材料性能、规格值和基准值数据库的部分制造商想要更改生产工艺而不想重建性能数据库。

本节旨在提供在上述几种情况下确定数据“等价性”的统计方法。这些方法不是用来确定使用一替换（第二货源）材料的可接收性，这一情况参见 8.4.2 节。在下列方法中必须

* 原文错为“2”。

选择一个拒绝某种“好”材料的概率水平α。本卷其他章节中推荐了特殊情形下的适当的α值，例如，见2.3.7节中具体使用MIL-HDBK-17第二卷数据的要求。

材料试件的力学与化学性能具有随机变异性。因此必须承认在宣布一种“好的”材料性能统计检验不合格时出错可能性。对于样本中确定的试验件数，发生这种令人不快事件的概率（在其次的统计检验中定义为α）只有在必须标明不合格品时降低材料中检出不合格品的可能性的情况下才会降低。选择统计检验失败的出错概率值应在两类错误中折中。如果统计检验与检验程序一起使用，并且允许对“不合格”的性能进行重新检验了，则可用稍高的α值，在一次重检后用α^2代替α更有效。

基于所关心的性能来选择用于确定特定复合材料大型数据库与同一材料的检验样本数据的等价性判据。对于模量或物理性能，例如单层厚度，判据要求其平均值在可接受的范围内，既不高也不低。关于这些性能，其判据被制定成拒绝高的或低的平均值。下面给出适当的统计方法，即“平均值变化检验”。

另一方面，关于强度性能的判据必须拒绝低的平均值或低的最小个体值。适当的强度性能统计方法在下面给出，即“平均值和最小个体值减少检验”。该检验被制定成用对平均值的检验或对最小个体值的检验拒绝某一“好”的数据集的概率相同。两种检验条件间的平衡提供最大的“统计能力”，也是对工业界中建立材料验收规范的ad-hoc法的改进。

关于某些化学与物理性能如挥发物含量或孔隙率水平的判据必须拒绝高的平均值，因为想得到的性能值是零。关于这些性能的适当的统计方法在下面给出，即“高平均值检验”。

平均值和最小个体值减少检验——取自原始的材料鉴定数据库的单一试验条件（环境）下数据的平均值、标准差近似为$\bar{x}$和s。平均值性能的合格/不合格门槛值W_{mean}由8.4.1(a)确定。k_n^{Mean}值在表8.5.17中给出。试验平均值必须满足或超过

$$W_{\text{mean}} = \bar{x} - k_n^{\text{Mean}} s \qquad 8.4.1(a)$$

最小个体值合格/不合格门槛值$W_{\text{minimum individual}}$由8.4.1(b)确定。$k_n^{\text{Indv}}$值在表8.5.18中给出。试验的最小个体值必须满足或超过

$$W_{\text{Minimum Individual}} = \bar{x} - k_n^{\text{Indv}} s \qquad 8.4.1(b)$$

平均值变化检验——由于原始数据库样本大小n_1与新数据样本大小n_2不同,合并后的标准差S_p作为公共母体标准差的估计值。

$$S_p = \sqrt{\frac{(n_1-1)s_1^2 + (n_2-1)s_2^2}{n_1+n_2-1}} \qquad 8.4.1(c)$$

利用合并后的标准差以及原始的和新的数据集的平均值，由下式计算检验统计量t_0:

$$t_0 = \frac{\bar{x}_1 - \bar{x}_2}{S_p\sqrt{\frac{1}{n_1}+\frac{1}{n_2}}} \qquad 8.4.1(d)$$

由于这是一个双侧t检验，要求的t值为$t_{\alpha,n} = t_{\alpha/2,n_1-n_2-2}$。注意双侧检验的$\alpha=\alpha/2$。由表8.5.19可查出$t_{\alpha,n}$的值。

某种材料要通过该检验，统计量t_0必须满足:

$$-t_{\alpha/2,n_1-n_2-2} \le t_0 \le t_{\alpha/2,n_1-n_2-2} \qquad 8.4.1(e)$$

高平均值检验——此类检验的统计量t_0由8.4.1(d)算出。此类检验用于检查不合意的高

平均值，例如检查预浸料的挥发物含量的情况。如果式 8.4.1(f)得到满足，则说该“继任”性能的平均值低于或等于“原始”性能的平均值，这标志某种材料与/或工艺是可接受的。这是一种单侧 t 检验，因此 $t_{a,n}=t_{\alpha/2,n_1+n_2-2}$。注意单侧检验的 $a=\alpha$。由表 8.5.19 可查出 $t_{a,n}$ 的值。某种材料要通过该检验，统计量 t_0 必须满足：

$$t_0 \le t_{\alpha/2,n_1+n_2-2} \qquad 8.4.1(f)$$

α的推荐值

确定材料规范中的批料接收范围，对所有使用统计表的检验方法，推荐设定拒绝某种好性能的概率α为 0.01（1%）。对于材料批料验收，强度性能推荐最少用 5 个试件，模量性能推荐最少用 3 个试件。

为确定材料等价性（例如本节介绍所列第二到第四种情形），对所有使用统计表的检验方法，推荐设定拒绝某种好性能的概率α为 0.05（5%）。允许对每个性能复检一次，将其实际概率降至 0.0025（0.25%）。进行强度性能比较时，推荐至少采用 8 个试件（通常 4 个试件取自两种不同的板与工艺流程）。进行模量比较时，推荐至少采用 4 个试件（通常 2 个试件取自两种不同的板与工艺流程）。如果一个或多个性能不满足适当的判据，人们可只复检那些不满足判据的性能。

8.4.2 备用材料统计方法

可以获得用特定供应商提供原材料的特定材料体系室内加工的相当多的数据，包括许用值。有计划改变材料体系的某一方面，如换个新的厂商。在 2.3.4 节中规定了必需的附加检验。本节描述的统计方法将有助于确定何时原有材料与备用材料相差到如此大的程度，以至于这种差异似乎真的不是由偶然因素造成似的。如果本节的方法显示出统计上的明显差异，并且从工程观点上讲该差异的大小很有意义，则在未进行进一步检验前，该备用材料可能不应被认定是合格的。

本节假设可得到象 2.3.4 节必需的那些数据。由于材料间的差异通常被观测为性能平均值的差异，因此本节方法集中于平均值的比较。值得注意的是：尽管未提供正式的方差比较检验，但是，必须研究据经验比与类似材料一致的差异大许多的差异。

采用考虑随机批料影响的双样本 t 检验（8.4.2.1 节）比较了可从中获得数据的原有材料与备用材料的每个力学性能的平均值。该分析将得到一组观测的显著性水平和置信区间。必须研究任何在 5%显著性水平下的平均值差异。

为了得到度量材料间差异的单一数据，令 p_i 为如 8.4.2.1 节中确定的第 i 个性能的观测显著性水平 OSL，并且令 m 为被比较的性能个数。计算如下：

$$P=-2\sum_{i=1}^{m}\ln(p_i) \qquad 8.4.2$$

P 值越大，则存在证实材料间差异的证据越充分。将 P 与具有自由度数为 $2m$ 的χ^2分布（表 8.5.2）的 0.95 分位数比较以确定平均值的差异在 5%显著性水平下是否明显。

该组合检验严格地说只有当 m 组数据在统计意义上相互独立时才有效。然而，由于这些试验数据是针对同一材料且同一批料，这一独立性决不会严格保证。在很多情形下，这些是近似独立的，且这一组合的 P 值可有效度量两组试验数据不同的程度。如果通过检查数据，发现有些批料始终高而其他批料低，即不具有独立性，则应当注意该组合检验必须加以说明。

8.4.2.1 比较两组批料

本节考虑检验两组各自由几批料组成的测量值的平均值之间是否存在统计上的显著差异的问题。本节方法可能被用于诸如比较在某一地点由三批料制造的试件的室温拉伸强度平均值与在另一地点制造的五批料的同一力学性能的另一组测量值。

这两组数据用 x_{ij} 与 y_{ij} 表示。其中首个下标表示批料号，第二个下标表示批内数值的号。假设 x 和 y 组数据采样单因素均衡的随机影响模型（见 8.3.5.2 节）：

$$x_{ij} = \mu^{(1)} + b_i^{(1)} + e_{ij}^{(1)} \qquad 8.4.2.1(a)$$

式中 i=1，…，k_1 且 j=1，…，n_1 且

$$y_{ij} = \mu^{(2)} + b_i^{(2)} + e_{ij}^{(2)} \qquad 8.4.2.1(b)$$

式中 i=1，…，k_2 且 j=1，…，n_2。k_1 和 n_1，k_2 和 n_2 分别为 x 和 y 的批料数和批的大小。

ANOVA 模型将每个观测值表示成三个分量的和：$\mu^{(l)}$是总平均值，$\mu^{(l)}+b_i^{(l)}$是第 i 批的母体平均值，$e_{ij}^{(l)}$ 表示各批内差异。其中对 x 数据 l=1，对 y 数据 l=2。假设误差项 $e_{ij}^{(l)}$ 为独立分布的平均值为零、方差为 σ_e^2（批内方差）的正态随机变量。

假设批料平均值 $b_i^{(l)}$ 为服从平均值为零、方差为 σ_b^2（批间方差）的正态分布的独立随机变量。假设所有批料的批内方差相同。

将 x 组的批料平均数用 $\bar{x}_i$ 表示，i=1，…，k_1，并将 y 组的批料平均数用 $\bar{y}_i$ 表示，i=1，…，k_2。检验统计量利用下述四个量：

$$\bar{x} = \frac{1}{k_1}\sum_{i=1}^{k_1}\bar{x}_i \qquad 8.4.2.1(c)$$

$$\bar{y} = \frac{1}{k_2}\sum_{i=1}^{k_2}\bar{y}_i \qquad 8.4.2.1(d)$$

$$s_x^2 = \frac{n_1}{k_1-1}\sum_{i=1}^{k_1}(\bar{x}-\bar{x}_i)^2 \qquad 8.4.2.1(e)$$

$$s_y^2 = \frac{n_2}{k_2-1}\sum_{i=1}^{k_2}(\bar{y}-\bar{y}_i)^2 \qquad 8.4.2.1(f)$$

如果 k_1=1，则令 s_x^2=0；如果 k_2=1，令 s_y^2=0；如果 k_1= k_2=1 则不应使用本节的方法。根据式 8.4.2.1(c)-(f)中的统计量，本检验统计量为

$$T = \frac{|\bar{x}-\bar{y}|}{\sqrt{\dfrac{s_x^2}{k_1 n_1} + \dfrac{s_y^2}{k_2 n_2}}} \qquad 8.4.2.1(g)$$

要检验在显著性水平α下的$\mu^{(1)}$=$\mu^{(2)}$的假设，将 T 与具有自由度数 y=k_1+k_2-2 的中心 t 随机变量的 100(1-α2)分位数 $t_{1-\alpha/2,y}$（表 8.5.3）比较。如果 T 不超过该 t 分位数，则断定这些数据符合其母体平均值相等的假设，否则则断定其母体平均值（在显著性水平α下）存在统计上的显著差异。

一个 100(1-α)置信区间为

$$|\bar{x}-\bar{y}| \pm t_{1-\alpha/2,y}\left(\frac{s_x^2}{k_1 n_1} + \frac{s_y^2}{k_2 n_2}\right)^{0.5} \qquad 8.4.2.1(h)$$

观测的显著性水平，或 OSL，就是观测到的 T 值等于或大于当平均值相等的假设确实

为真时实际观测到的的 T 值的概率。小于显著性水平α的 OSL 表示在显著性水平α下可拒绝那个（等平均值）无效假设。OSL 为 T 和 $y=k_1+k_2-2$ 的函数。当γ大于 10 时，下面的近似方法通常可满足要求。计算

$$u=\frac{T\left(1-\frac{1}{4\gamma}\right)}{\left(1+\frac{T^2}{2\gamma}\right)} \qquad 8.4.2.1(i)$$

确定一个标准正态随机变量小于 u 的概率 P。该概率可由如表 8.5.5 的正态分布表确定。该 OSL 等于 2(1-P)。如果γ小于 10，则上述近似方法不太准确，须从表 8.5.4 中查得 OSL。

例如，考虑表 8.4.2.1 中的强度测量值。提供这些数据的试件取自一组 3 个连续批料和一组 5 个连续批料。第二组批料在第一组批料生产一年多后生产。由于这一时间差异，未经证明时人们不应将这些数据当成来自单个母体的 8 批随机批料。更为谨慎的做法是将这些试验数据当成一个取自某一母体的 3 批料的随机样本和一个取自可能不同的母体的 5 批料的随机样本。

表 8.4.2.1　两组连续批料的强度测量值

第一组			第二组		
平均值	方　差	n	平均值	方　差	n
402.2	138.7	5	408.4	40.8	5
387.8	1002.2	5	395.8	113.2	5
389.4	321.8	5	357.2	451.7	5
			376.2	119.7	5
			377.0	189.5	5

利用表 8.4.2.1 中的数据，式 8.4.2.1(c)-(g)给出下列值：

$$\bar{x}=393 \qquad 8.4.2.1(j)$$

$$\bar{y}=383 \qquad 8.4.2.1(k)$$

$$s_x^2=311 \qquad 8.4.2.1(l)$$

$$s_y^2=1946 \qquad 8.4.2.1(m)$$

$$T=\frac{|393-383|}{\sqrt{\frac{311}{3\times5}+\frac{1946}{5\times5}}}=1.007 \qquad 8.4.2.1(n)$$

从表 8.5.3 中查得，具有自由度 5+3-2=6 的 t 分布的 97.5 百分位为 $t_{0.975,6}$=2.45。由于 1.007 小于 2.45，因此人们推断在 5%显著性水平下两组数据的平均强度不存在统计上的显著差异。由于 $k_1+k_2-2=6$ 小于 10，利用表 8.5.4 得到 OSL=0.036。平均值差异的 95%置信区间给出如下

$$|393-383|\pm(2.45)\left(\frac{311}{3\times5}+\frac{1946}{5\times5}\right)^{0.5}=10\pm24.3 \qquad 8.4.2.1(o)$$

注意本例的置信区间必定包含零，因为在 95%水平下平均值差异不明显。

8.4.3　离散系数的置信区间

离散系数是母体标准差与母体平均值的比值。本节假设所考虑的分布形式为正态分布，

提供计算离散系数置信区间的方法。母体的离散系数由样本的离散系数估计如下

$$c=\frac{s}{\bar{x}} \qquad 8.4.3(a)$$

式中 s 是样本标准差，$\bar{x}$ 为样本平均值。

离散系数的 100γ%置信区间的近似值的下限为

$$c_l=c\left[\left(\frac{u_1+2}{n}-1\right)c^2+\frac{u_1}{n+1}\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad 8.4.3(b)$$

上限为

$$c_h=c\left[\left(\frac{u_2+2}{n}-1\right)c^2+\frac{u_2}{n+1}\right]^{-\frac{1}{2}} \qquad 8.4.3(c)$$

式中 u_1 和 u_2 为具有 n-1 个自由度的 χ^2 分布的 100(1+γ)/2 和 100(1-γ)/2 百分位。表 8.5.16 列出了 γ 等于 0.9，0.95 和 0.99 的 u_1 和 u_2 的值。

8.4.3.1 离散系数CV的置信区间计算实例

由 5 个试件构成的样本的样本平均值为 $\bar{x}$ =103.8，样本标准差为 s =4.161，则样本离散系数

$$c=\frac{4.161}{103.8}=0.0400 \qquad 8.4.3.1$$

从表查得常数 u_1 和 u_2 为 u_1=5×2.2287=11.1435，u_2=5×0.0968883=0.48444。将之代入式 8.4.3(a)和(b)中可得，在 95%置信水平下母体离散系数的置信区间具有下限 c_l=0.0240 和上限 c_h=0.115。

8.4.3.2 近似方法的说明

该近似方法适用于母体离散系数小于 35%的情形。这种方法通常都是非常精确的，而且它在大样本的极限情况下和小的母体离散系数的极限情况下是精确的。该近似方法的推导及其特点详见文献 8.4.3.2。对于离散系数明显大于 35%的母体的测量值，可用一种精确（但有点复杂的）方法。然而如果人们想要考虑母体离散系数比 35%大很多的可能情况，要想使正态模型有意义，必须接受负值的可能性。因此如果某个量必须为正，则一个非常大的离散系数意味着正态模型无物理意义。因此对于该近似方法失效的那些情形，人们不想总采用正态模型，这样人们几乎不采用复杂的精确方法。

8.4.4 工艺控制统计方法

8.4.4.1 包括批料影响的 $\bar{x}$ 图

假设数据为取自单因素的均衡随机影响的方差分析模型（见 8.3.5.2 节）的一个样本：

$$x_{ij}=\mu+b_i+e_{ij}, \quad i=1, \ldots, k, \ j=1, \ldots, n \qquad 8.4.4.1(a)$$

式中 k 为收到的批料数，n 为每批试件数，x_{ij} 表示第 i 批第 j 个试件的测量值。

这一 ANOVA 模型将每个观测值表示成三个分量的和：μ是母体总平均值，b_i 是第 i 批的母体平均值，e_{ij} 表示各批内差异的随机误差。误差项 e_{ij} 被假设为独立分布的平均值为零、方差为 σ_e^2（批内方差）的正态随机变量。批料平均值 b_i 被假设为服从平均值为零、方差为

σ_k^2（批内方差）正态分布的独立随机变量。

新批料的可接收性将利用已接收的 k 批料的数据来检验。新批料拟作为第 k+1 批料。将这 k 批料的总平均值表示为

$$\bar{x}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k}\sum_{j=1}^{n} x_{ij}/(kn) \qquad 8.4.4.1(b)$$

批料平均值由下式计算

$$\bar{x}_i = \sum_{j=1}^{n} x_{ij}/n \qquad i=1,\ldots,k \qquad 8.4.4.1(c)$$

在本节中，在圆括号中的上标表示计算某个统计量所用数据的批数。例如，$\bar{x}^{(k)}$ 为基于一直到且包括第 k 批的所有批的总平均值。从这些量中可计算出需要的平方和。批间平均值的平方和计算为

$$\mathrm{MSB}^{(k)} = \frac{1}{k-1}\sum_{i=1}^{k} n(\bar{x}_i - \bar{x}^{(k)})^2 \qquad 8.4.4.1(d)$$

假定第 k+1 批也用式 8.4.4.1(a)的模型描述。第 k+1 批平均值呈正态分布，其平均值为 μ，方差为

$$\frac{1}{n}\left(n\sigma_b^2 + \sigma_e^2\right)$$

那么总平均值与第 k+1 批平均值之差

$$\bar{x}^{(k)} - \bar{x}_{k+1}$$

呈正态分布，其平均值为零，方差为

$$\frac{k+1}{k}\frac{(n\sigma_b^2 + \sigma_e^2)}{n}$$

且

$$\frac{k+1}{kn}MSB^{(k)} \sim \frac{k+1}{k(k-1)}\frac{(n\sigma_b^2 + \sigma_e^2)}{n}\chi_{k-1}^2 \qquad 8.4.4.1(e)$$

式中“~”表示“符合某分布”，χ_{k-1}^2 表示自由度为 k-1 的 χ^2 分布。将总平均值与第 k+1 批平均值之差除以式 8.4.4.1(e)左边得

$$V^{(k+1)} = \frac{\bar{x}^{(k)} - \bar{x}_{k+1}}{\left[\frac{k+1}{k(k-1)}\sum_{i=1}^{k}(\bar{x}_i - \bar{x}^{(k)})^2\right]^{1/2}} \sim t_{k-1} \qquad 8.4.4.1(f)$$

式中 t_{k-1} 表示自由度为 k-1 的中心 t 分布。这一关系式为检查图表的基础。由新批平均值与以前已接收的几批的平均值算出的量 $V^{(k+1)}$将与 t 分布范围比较。具体的说，$V^{(k+1)}$将与表 8.5.3 中的自由度为 k-1 的中心 t 分布的 $t_{k-1,\alpha}$分位数比较。如果 $V^{(k+1)}$的绝对值超过 $t_{k-1,\alpha}$，则第 k+1 批不被接收。当批数增加时，这些范围逼近正态分布的范围。由于控制范围可变，在很少几批后应有可能开始使用该检查图表。在获得四或五批数据后使用检查图表是合理的。

如果第 k+1 批被接收，总平均值与平均值平方和更新如下：

$$\bar{x}^{(k+1)} = \frac{k\bar{x}^{(k)} - \bar{x}_{k+1}}{k+1} \qquad 8.4.4.1(g)$$

$$\mathrm{MSB}^{(k+1)} = \frac{k-1}{k}\mathrm{MSB}^{(k)} + \frac{n}{k+1}\left(\bar{x}^{(k)} - \bar{x}_{k+1}\right)^2 \qquad 8.4.4.1(h)$$

最后，注意如果平均值存在某种趋势时，这一方法会失效。这种趋势会抬高方差的估计值并导致范围过大。鉴于此上述方法与趋势的“趋向”检验一起使用。例图见图 8.4.4.1(a)和(b)。这些图显示了各连续批的范围 $t_{k-1,\alpha}$和$-t_{k-1,\alpha}$及 $V^{(k+1)}$。

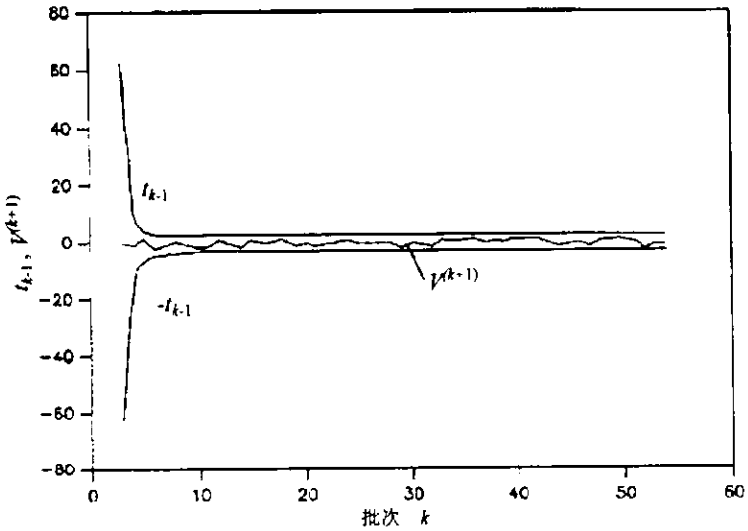


图 8.4.4.1(a) 从第三批开始的平均值检查图表实例（0.01 水平）

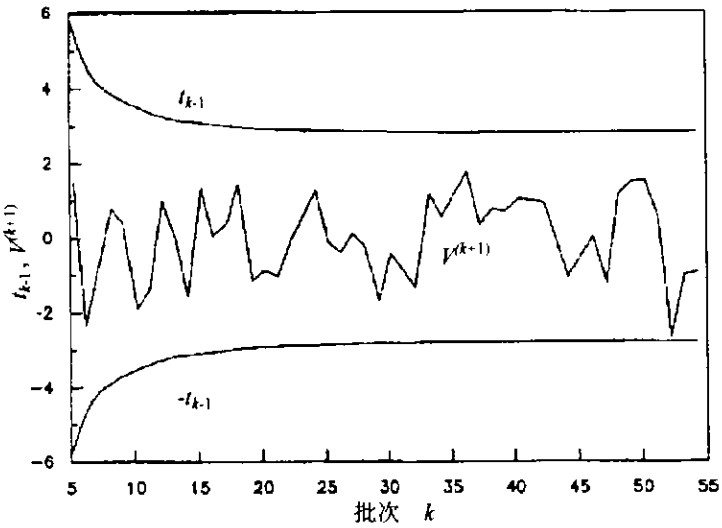


图 8.4.4.1(b) 从第五批开始的平均值检查图表实例（0.01 水平）

8.4.4.2 批内方差分量的s^2图

令 s^2 为第 j 批被接收的批料的样本方差，利用下面的统计量检验第 k+1 批的方差：

$$U_{k+1}=\frac{s_{k+1}^2}{\sum_{j=1}^{k}s_j^2/k}\sim F \qquad 8.4.4.2$$

式中 F 表示分子自由度为 n-1，分母自由度为 $k(n-1)$的标准 F 分布。将 U_{k+1}与分子自由度

为 n-1，分母自由度为 $k(n-1)$的 F 分布的分位数 F_α比较。表 8.5.1 中给出了 0.95 水平的这些分位数值。如果 U_{k+1}超过 F_α，则第 k+1 批不被接收。当 F 统计量的分母自由度变大时，这些控制范围逼近常数。正如平均值图一样，在获得一些批的数据后该方差图必定会有用。s^2 例图见图 8.4.4.2，该图显示了各连续批的范围 F_α和 U。

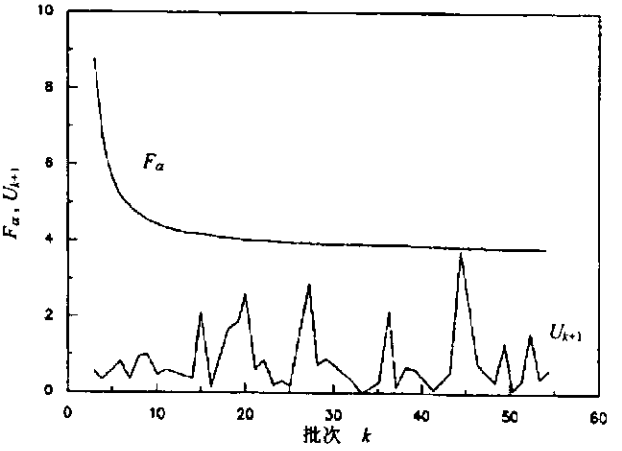


图 8.4.4.2 从第三批开始的方差检查图表实例（0.01 水平）

8.4.4.3 批料平均值趋势检验

如果收到的最初几批的批料平均值存在一种系统的趋势，或是上升，或是下降，8.4.4.1 节包括批料影响的 $\bar{x}$ 图可能会出现问题。这一趋势将使分母增大导致 $V^{(k+1)}$（式 8.4.4.1(f)）太小。这可能导致如果不存在某种趋势早该被拒收的批料正被接收。如果在控制范围趋于稳定之前（例如在第 25 批以前，见图 8.4.4.1(b)）检查出批料平均值的某种趋势，则在接收批料时必须谨慎，特别是当可以看出下降趋势时。本小节给出一种诊断检验，应采用该检验对已收到的前 25 批进行检验以确定是否存在统计上的明显趋势。在 25 批后应停止该诊断检验，这是因为控制范围将不再被可能出现的任何趋势明显地影响，这样 8.4.4.1 节中的检验的有效性不再受怀疑。在该检验之后的作法就是通过批平均值用最小二乘法拟合一直线，然后确定该直线是否有统计上显著的斜率。

假设第 i 个接收的批料的平均值用 $\bar{x}_i$ 表示，t_i 为与该批料到货有关的时间。例如，首批到货时间可表示为 t_1=0，随后的 t_i 可以是首批到货后再经过的天数。假设迄今已接收 k 批料，并且下列量已经算出，因而可利用：

$$\bar{x}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k} \bar{x}_i / k \qquad 8.4.4.3(a)$$

$$\bar{t}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k} \bar{t}_i / k \qquad 8.4.4.3(b)$$

$$S_{tt}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k} \left(\bar{t}_i - \bar{t}^{(k)}\right)^2 \qquad 8.4.4.3(c)$$

$$S_{xx}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k} \left(\bar{x}_i - \bar{x}^{(k)}\right)^2 \qquad 8.4.4.3(d)$$

$$S_{tx}^{(k)} = \sum_{i=1}^{k} \left(\bar{t}_i - \bar{t}^{(k)}\right)\left(\bar{x}_i - \bar{x}^{(k)}\right) \qquad 8.4.4.3(e)$$

$$b^{(k)} = \frac{S_{tx}^{(k)}}{S_{tt}^{(k)}} \qquad 8.4.4.3(f)$$

$$S_R^{(k)} = S_{xx}^{(k)} - 2b^{(k)}S_{tx}^{(k)} + [b^{(k)}]^2 S_{tt}^{(k)} \qquad 8.4.4.3(g)$$

基于 k 批料的最小二乘直线的斜率为 $b^{(k)}$，且关于该最小二乘直线的标准差为

$$SD^{(k)} = \left[S_R^{(k)}/(k-2)\right]^{1/2} \qquad 8.4.4.3(h)$$

当第(k+1)批在时间 t_{k+1} 收到时，必须执行下列各步。

第一步　更新 $S_{tt}^{(k)}$，$S_{xx}^{(k)}$ 和 $S_{tx}^{(k)}$。

$$S_{tt}^{(k+1)} = S_{tt}^{(k)} + \frac{k}{k+1}\left(\bar{t}^{(k)} - t_{k+1}\right)^2 \qquad 8.4.4.3(i)$$

$$S_{xx}^{(k+1)} = S_{xx}^{(k)} + \frac{k}{k+1}\left(\bar{x}^{(k)} - \bar{x}_{k+1}\right)^2 \qquad 8.4.4.3(j)$$

$$S_{tx}^{(k+1)} = S_{tx}^{(k)} + \frac{k}{k+1}\left(\bar{t}^{(k)} - t_{k+1}\right)\bar{x}_{k+1} \qquad 8.4.4.3(k)$$

第二步　计算 $b^{(k+1)}$ 和 $S_R^{(k+1)}$。

$$b^{(k+1)} = \frac{S_{tx}^{(k+1)}}{S_{tt}^{(k+1)}} \qquad 8.4.4.3(l)$$

$$S_R^{(k+1)} = S_{xx}^{(k+1)} - 2b^{(k+1)}S_{tx}^{(k+1)} + [b^{(k+1)}]^2 S_{tt}^{(k+1)} \qquad 8.4.4.3(m)$$

第三步　计算趋势统计量

$$U^{(k+1)} = b^{(k+1)}\sqrt{\frac{(k-1)S_{tt}^{(k+1)}}{S_R^{(k+1)}}} \qquad 8.4.4.3(n)$$

第四步　确定具有 k-1 个自由度的中心 t 分布（表 8.5.3）的 α 分位数 $t_{k-1,\ \alpha/2}$。如果 $|U^{(k+1)}|$ 大于 $t_{k-1,\ \alpha/2}$，则发现一统计上显著的趋势且必须加以研究。

检验水平 α 的选取有些任意性，或许应该选择低的水平（例如 0.001）以降低不存在趋势时误判有趋势的概率。

第五步　更新平均值。

$$\bar{x}^{(k+1)} = \frac{k\bar{x}^{(k)} + \bar{x}_{k+1}}{k+1} \qquad 8.4.4.3(o)$$

$$\bar{t}^{(k+1)} = \frac{k\bar{t}^{(k)} + t_{k+1}}{k+1} \qquad 8.4.4.3(p)$$

关于该检验必须注意以下几点：

一旦包括批料影响的 $\bar{x}$ 图（见 8.4.4.1 节）的控制范围趋于稳定不变，则不应进行该检验。只有在接收的批料数等于或少于 25 批时才能进行该检验。

所提出的这一趋势检验仅用于当 8.4.4.1 节中的检验的有效性受到怀疑时的情况。不适于作为一般用途的趋势检验。

更新式 8.4.4.3(i)-(k)与 8.4.4.3(o)-(p)使人不必对每批料使用式 8.4.4.3(a)-(e)。基于第 k 批的检验结果，计算检验第 k+1 批所需各量仅需一计算器。

同样也可为趋势检验准备与 8.4.4.1 图类似的控制图，它能提供有用的信息。

8.4.5 平均应力-应变曲线和载荷-变形曲线

人们最想得到平均的拉伸、压缩和面内剪切载荷的应力-应变曲线以及载荷-变形曲线。然而下面提出的描述平均曲线的公式是连续的，不能描述可能由损伤起始引起的不连续的情况。因此也想得到许多单个试验的典型的实际数据集的曲线图。平均曲线由每批的至少两组数据采用最佳拟合方法确定。将采用文献 8.4.5(a)与(b)所述方法并按照最佳的原则，将每组数据拟合成下列 7 种代数函数之一。

- 线性
- 抛物线
- 反抛物线
- Ramberg-Osgood 指数
- 双线性
- 抛物线-线性
- 抛物线-指数

8.4.5.1 节中给出了对于每种函数的公式。拟合的平均误差由平均值平方的平方根（RMS）应力（载荷）误差与平均值平方的平方根（RMS）百分比应力（载荷）误差之积确定。利用这两个值的积可得高应力（载荷）值和数据集的初始部分的误差敏感性。选用平均误差最小的函数拟合每组数据。

采用平均误差最小的最佳拟合函数和下述方法确定所有数据集的平均曲线，直到所有数据集的最小强度为止。在最小强度的百分之一增量上确定每个最佳拟合函数的平均应变（变形）。这些平均应变（变形）与应力（载荷）再用这 7 种代数函数来拟合以获得一个平均曲线。拟合平均误差最小的函数及其常数与平均曲线将在第二卷中给出。

所有的强度、破坏应变与破坏变形值，而不仅仅是用于确定平均曲线的那些值将被包括在平均曲线上方的分散图中。包括这些分散图的应力-应变曲线实例见图 8.4.5(a)与(b)。

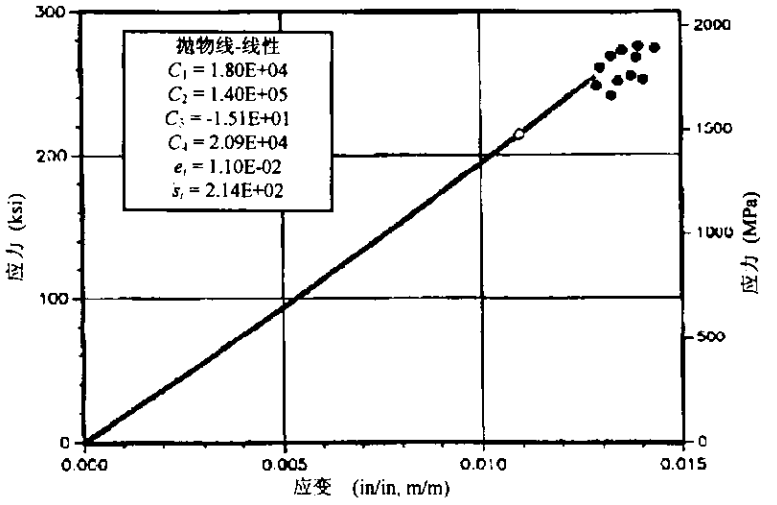


图 8.4.5(a) AS4/3501-6 碳/环氧材料的拉伸应力-应变曲线

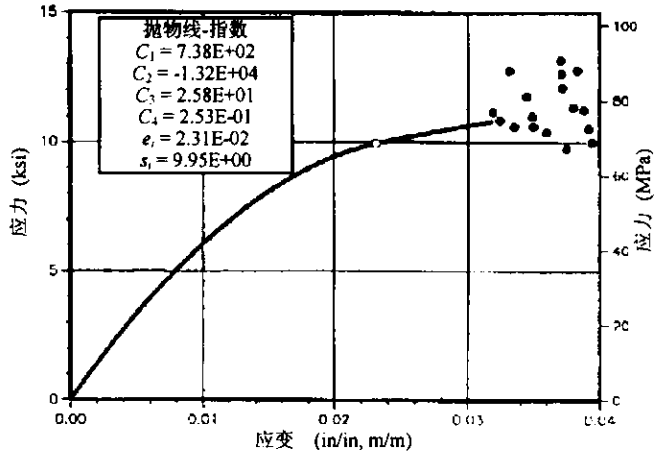


图 8.4.5(b) AS4/3501-6 碳/环氧材料的剪切应力-应变曲线

8.4.5.1 拟合公式

下面介绍基于文献 8.4.5(a)与(b)的应力-应变曲线的拟合公式。同时包括关于各种曲线的割线与切线模量曲线的公式。如 8.4.4 节所述，将在 MIL-HDBK-17 中提供这些曲线。每个函数都是基于应力（s）和应变（e）项。割线模量函数用当前应变值与零应变值间的割线模量来表示。

$$E_s = \frac{s(e) - s(0)}{e - 0} = \frac{s(e)}{e} \qquad 8.4.5.1(a)$$

在任意应变值时切线模量的公式为：

$$E_t = \frac{ds}{de} \qquad 8.4.5.1(b)$$

- 线性：

$$s = C_1 e \qquad 8.4.5.1(c)$$

$$E_t = E_s = C_1 \qquad 8.4.5.1(d)$$

- 抛物线：

$$s = C_1 e + C_2 e^2 \qquad 8.4.5.1(e)$$

$$E_t = C_1 + 2C_2 e \qquad 8.4.5.1(f)$$

$$E_t = C_1 + C_2 e \qquad 8.4.5.1(g)$$

- 反抛物线：

$$e = C_2 s + C_3 s^2 \qquad 8.4.5.1(h)$$

$$E_t = \pm\left(C_2^2 + 4C_3 e\right)^{1/2} \qquad 8.4.5.1(i)$$

$$E_s = \frac{C_2 \pm (C_2^2 + 4C_3 e)^{1/2}}{2C_3 e} \qquad 8.4.5.1(j)$$

该±符号与常数 C_3 的正负号相同。

- Ramberg-Osgood 指数：

$$e = \frac{s}{C_2} + 0.002\left[\frac{s}{C_1}\right]^n, \qquad n = C_3 \qquad 8.4.5.1(k)$$

Ramberg-Osgood 指数曲线的割线与切线值用数值方法求出。

余下的函数由两部分拟合曲线组成。这两部分拟合曲线的交点（e_i，s_i）由拟合方法得出。

- 双线性：

低于（e_i，s_i）

$$s = C_1 e \qquad 8.4.5.1(c)$$

$$E_t = E_s = C_1 \qquad 8.4.5.1(d)$$

高于（e_i，s_i）

$$s = C_2 + C_3 e \qquad 8.4.5.1(l)$$

$$E_t = C_3 \qquad 8.4.5.1(m)$$

$$E_s = \frac{C_2}{e} + C_3 \qquad 8.4.5.1(n)$$

- 抛物线-线性：

低于（e_i，s_i）

$$s = C_1 e + C_2 e^2 \qquad 8.4.5.1(e)$$

$$E_t = C_1 + 2C_2 e \qquad 8.4.5.1(f)$$

$$E_s = C_1 + C_2 e \qquad 8.4.5.1(g)$$

高于（e_i，s_i）

$$s = C_3 + C_4 e \qquad 8.4.5.1(o)$$

$$E_t = C_4 \qquad 8.4.5.1(p)$$

$$E_s = \frac{C_3}{e} + C_4 \qquad 8.4.5.1(q)$$

- 抛物线-指数：

低于（e_i，s_i）

$$s = C_1 e + C_2 e^2 \qquad 8.4.5.1(e)$$

$$E_t = C_1 + 2C_2 e \qquad 8.4.5.1(f)$$

$$E_s = C_1 + C_2 e \qquad 8.4.5.1(g)$$

高于（e_i，s_i）

$$s = C_3 e^n, \quad n = C_4 \qquad 8.4.5.1(r)$$

$$E_t = nC_3 e^{n-1} \qquad 8.4.5.1(s)$$

$$E_s = C_3 e^{n-1} \qquad 8.4.5.1(t)$$

在所有情形下，曲线类型及常数值将在典型的应力-应变曲线图中示出。当应力-应变曲线存在两个区域时，应力值与应变值及两个区域的交点也在图中示出。

8.5 统计表与近似法

本节包含 8.3 节中所述分析所需的一些统计表。表 8.5.1，8.5.4 到 8.5.6 及 8.5.14 专门为 MIL-HDBK-17 创建。其余的表由 MIL-HDBK-5 改编（见文献 8.3.4.5.1）。

下面提供了一些表列值的理论推导及数值近似法。在计算机应用中，当得到能够生成列表值的软件时，近似法很实用。近似值的精度用相对误差（RME）大小来度量。RME

被定义为

$$\mathrm{RME}=\frac{|\text{近似值}-\text{实际值}|}{\text{实际值}} \qquad 8.5$$

并度量近似值关于实际值的百分比误差。

8.5.1 *F* 分布的分位数

表 8.5.1 中 $F_{0.95}$ 值的近似值为

$$F_{0.95}=\exp\left(2\delta\left[1+\frac{z^2-1}{3}-\frac{4\sigma^2}{3}\right]+2\sigma z\sqrt{1+\frac{\sigma^2(z^2-3)}{6}}\right) \qquad 8.5.1(a)$$

式中

$$\delta=0.5\{1/(\gamma_2-1)-1/(\gamma_1-1)\} \qquad 8.5.1(b)$$

$$\sigma^2=0.5\{1/(\gamma_2-1)+1/(\gamma_1-1)\} \qquad 8.5.1(c)$$

$z=1.645$

γ_1=分子自由度数

γ_2=分母自由度数

当γ_1或γ_2为 1 时，式 8.5.1(a)-(c)无效。下列公式将用于这些特殊情形：

当γ_1=1 时

$$F_{0.95}=\left[1.95996400+\frac{2.37227200}{\gamma_2}+\frac{2.82250000}{\gamma_2^2}+\frac{2.555585200}{\gamma_2^3}+\frac{1.58953600}{\gamma_2^4}\right]^2 \qquad 8.5.1(e)$$

当γ_2=1 时

$$F_{0.95}=\left[0.06270671+\frac{0.01573832}{\gamma_1}+\frac{0.00200073}{\gamma_1^2}+\frac{0.00243852}{\gamma_1^3}+\frac{0.00064811}{\gamma_1^4}\right]^2 \qquad 8.5.1(f)$$

8.5.2 χ^2 分布的分位数

表 8.5.2 中χ^2分位数（$\chi^2_{0.95}$）的近似值为

$$\chi^2_{0.95}=\gamma\left[1-\frac{2}{9\gamma}+1.645\left(\frac{2}{9\gamma}\right)^{\frac{1}{2}}\right]^3+\frac{9}{100\gamma} \qquad 8.5.2$$

式中γ为自由度数。该近似公式精确到表列值的 0.2%误差以内（见文献 8.5.2）。

8.5.3 *t* 分布的上端分位数

表 8.5.3 专门为 MIL-HDBK-17 创建。

8.5.4 *t* 分布的双尾概率

表 8.5.4 专门为 MIL-HDBK-17 创建。

8.5.5 标准正态分布的上端概率

表 8.5.5 专门为 MIL-HDBK-17 创建。

8.5.6 在α=0.05 显著性水平下 k-样本 Anderson-Darling 检验的临界值

表 8.5.6 中的 k 样本 Anderson-Darling 检验的临界值由式 8.3.2.2(j)在样本大小为 n 的情况下算出。

8.5.7 最大赋范残差异常数据检查方法的临界值

表 8.5.7 中的临界值由下式计算：

$$V_c = \frac{n-1}{\sqrt{n}}\sqrt{\frac{t^2}{n-2+t^2}} \qquad 8.5.7$$

式中 t 为自由度为 n-2 的 t 分布的[1-γ/(2n)]分位数。γ为检验的显著性水平，n 为样本大小。表 8.5.7 中的数在γ=0.05 显著性水平下算出（见文献 8.3.3.1(b)）。

8.5.8 Weibull 分布单侧 B 基准值容限系数 V_B

表 8.5.8 中的 V 值利用下列统计结果算出。首先定义随机变量

$$A_i = \frac{\ln(x_i) - \ln(\hat{\alpha})}{1/\hat{\beta}} \qquad i = 1,\cdots,n \qquad 8.5.8(a)$$

式中 x_i 为形状参数β和尺度参数α未知的 Weibull 随机变量且 $\hat{\alpha}$ 和 $\hat{\beta}$ 为由式 8.3.4.2.1(a)与 8.3.4.2.1(c)给出的α和β的极大似然估计值（MLE）。对于特定的 n，V_B 为该随机变量的条件分布的 0.95 分位数。

$$V_B = \frac{\sqrt{n}[\ln(\hat{Q}) - \ln(Q)]}{1/\hat{\beta}} \qquad 8.5.8(b)$$

给出

$$A_i = \frac{\ln(x_i') - \ln(\hat{\alpha})}{1/\hat{\beta}} \qquad 8.5.8(c)$$

式中

$$x_i' = -\ln\left(1 - \frac{i-0.5}{n+0.25}\right) \qquad i = 1,\cdots,n \qquad 8.5.8(d)$$

$$\hat{Q} = \hat{\alpha}(0.10536)^{1/\hat{\beta}} \qquad 8.5.8(e)$$

$$Q = \alpha(0.10536)^{1/\beta} \qquad 8.5.8(f)$$

且 $\hat{\alpha}'$ 和 $\hat{\beta}'$ 为样本 $x_1',\cdots,x_n'$ 的双参数 Weibull 分布的尺度与形状参数的极大似然估计值。V_B 的条件分布由下面的关系式确定

$$V_B = \sqrt{n}[Z + \ln(0.10536)] \qquad 8.5.8(g)$$

式中 Z 的分布由文献 8.3.4.2 第 150 页的定理 4.1.3 给出。基于这些结果，采用数值积分确定表 8.5.8 中的 V 值。

表 8.5.8 中的 V 值的近似公式为：

$$V_B = 3.803 + \exp\left[1.79 - 0.516\ln(n) + \frac{5.1}{n}\right] \qquad 8.5.8(h)$$

对于 n 大于或等于 16 时该近似公式精确到表列值的 0.5%误差以内。

8.5.9 Weibull 分布单侧 A 基准值容限系数 V_A

表 8.5.9 中 V_A 值如 8.5.8 节（文献 8.5.9）中所述算出。V_A 值的近似公式为：

$$V_A = 6.649 + \exp\left[2.55 - 0.526\ln(n) + \frac{4.76}{n}\right] \qquad 8.5.9$$

对于 n 大于或等于 16 时该近似公式精确到表列值的 0.5%误差以内。

8.5.10 正态分布单侧 B 基准值容限系数 k_B

表 8.5.10 中的 k_B 值由偏心参数为 $1.282\sqrt{n}$ 自由度为 n-1 的偏心 t 分布的 0.95 分位数的 $1/\sqrt{n}$ 倍来计算。表 8.5.10 中的 k_B 值的近似公式为：

$$k_B = 1.282 + \exp\{0.958 - 0.520\ln(n) + 3.19/n\} \qquad 8.5.10$$

对于 n 大于或等于 16 时该近似公式精确到表列值的 0.2%误差以内。

8.5.11 正态分布单侧 A 基准值容限系数 k_A

表 8.5.11 中的 k_A 值由偏心参数为 $2.326\sqrt{n}$ 自由度为 n-1 的偏心 t 分布的 0.95 分位数的 $1/\sqrt{n}$ 倍来计算。表 8.5.10 中的 k_A 值的近似公式为：

$$k_A = 2.326 + \exp\{1.34 - 0.522\ln(n) + 3.87/n\} \qquad 8.5.11$$

对于 n 大于或等于 16 时该近似公式精确到表列值的 0.2%误差以内。

8.5.12 确定非参数的 B 基准值的观测值序号 r_B

当 n>29 时，表 8.5.12 中 B 基准值的序号的近似公式为：

$$r_B \approx \frac{n}{10} - 1.645\sqrt{\frac{9n}{100}} + 0.23 \qquad 8.5.12$$

四舍五入成最接近的整数。该近似公式在表中范围（$29 \le n \le 10499$）内除 12 个 n 值外都是精确的。对于这些小百分比（0.1%）的 n 值，本近似公式在偏于保守一边错一个序号。

8.5.13 确定非参数的 A 基准值的观测值序号 r_A

当 $n \ge 299$ 时，表 8.5.13 中 A 基准值的序号的近似公式为：

$$r_A \approx \frac{n}{100} - 1.645\sqrt{\frac{99n}{10000}} + 0.29 + \frac{19.1}{n} \qquad 8.5.13$$

当 $n < 299$ 时，不能计算 A 许用值。该近似公式在表中范围（$299 \le n \le 11\ 691$）内除 23 个 n 值外都是精确的。对于这些小百分比（0.2%）的 n 值，本近似公式在偏于保守一边错一个序号（文献 8.3.4.5.1）。

8.5.14 小样本非参数 B 基准值

表 8.5.14 中的值基于文献 8.3.4.5.2(a)。

8.5.15 小样本非参数 A 基准值

表 8.5.15 中的值基于文献 8.3.4.5.2(b)。

8.5.16 离散系数的近似置信限的临界值

表 8.5.16 中列出了当 γ 等于 0.90，0.95 和 0.99 时，自由度为 n_1 的 χ^2 分布的 u_1 和 u_2，

100(1+γ)/2 和 100(1γ)/2 分位数的值。

8.5.17 正态分布平均值许可范围的单侧容限系数

表 8.5.17 中所列值用于确定两组数据间的等价和建立材料最小平均值的规范要求。这些常数用于检查平均值下降的等价检验。表中的值取自文献 8.3.5.4(b)与文献 8.5.17。

8.5.18 正态分布个体值的许可范围的单侧容限系数

表 8.5.18 中所列值用于确定两组数据间的等价和建立材料最小个体值的规范要求。这些常数用于检查个体值下降的等价检验。表中的值取自文献 8.3.5.4(b)与文献 8.5.17。

8.5.19 双边 t 分布的高端与低端分位数

表 8.5.18 中所列值用于确定两组数据间的等价和建立材料最小和/或最大平均值的规范要求。这些常数用于检查平均值上升，或检查平均值变化（或升或降）的等价检验。表中的值取自文献 8.3.5.4(b)与文献 8.5.17。

表8.5.1　*F*分布分位数

		ν_1分子自由度数								
		1	2	3	4	5	6	7	8	9
ν_2分母自由度数	1	161.45	199.50	215.71	224.58	230.16	233.99	236.77	238.88	240.54
	2	18.51	19.00	19.16	19.25	19.30	19.33	19.35	19.37	19.38
	3	10.13	9.55	9.28	9.12	9.01	8.94	8.89	8.85	8.81
	4	7.71	6.94	6.59	6.39	6.26	6.16	6.09	6.04	6.00
	5	6.61	5.79	5.41	5.19	5.05	4.95	4.88	4.82	4.77
	6	5.99	5.14	4.76	4.53	4.39	4.28	4.21	4.15	4.10
	7	5.59	4.74	4.35	4.12	3.97	3.87	3.79	3.73	3.68
	8	5.32	4.46	4.07	3.84	3.69	3.58	3.50	3.44	3.39
	9	5.12	4.26	3.86	3.63	3.48	3.37	3.29	3.23	3.18
	10	4.96	4.10	3.71	3.48	3.33	3.22	3.14	3.07	3.02
	11	4.84	3.98	3.59	3.36	3.20	3.09	3.01	2.95	2.90
	12	4.75	3.89	3.49	3.26	3.11	3.00	2.91	2.85	2.80
	13	4.67	3.81	3.41	3.18	3.03	2.92	2.83	2.77	2.71
	14	4.60	3.74	3.34	3.11	2.96	2.85	2.76	2.70	2.65
	15	4.54	3.68	3.29	3.06	2.90	2.79	2.71	2.64	2.59
	16	4.49	3.63	3.24	3.01	2.85	2.74	2.66	2.59	2.54
	17	4.45	3.59	3.20	2.96	2.81	2.70	2.61	2.55	2.49
	18	4.41	3.55	3.16	2.93	2.77	2.66	2.58	2.51	2.46
	19	4.38	3.52	3.13	2.90	2.74	2.63	2.54	2.48	2.42
	20	4.35	3.49	3.10	2.87	2.71	2.60	2.51	2.45	2.39
	21	4.32	3.47	3.07	2.84	2.68	2.57	2.49	2.42	2.37
	22	4.30	3.44	3.05	2.82	2.66	2.55	2.46	2.40	2.34
	23	4.28	3.42	3.03	2.80	2.64	2.53	2.44	2.37	2.32
	24	4.26	3.40	3.01	2.78	2.62	2.51	2.42	2.36	2.30
	25	4.24	3.39	2.99	2.76	2.60	2.49	2.40	2.34	2.28
	26	4.23	3.37	2.98	2.74	2.59	2.47	2.39	2.32	2.27
	27	4.21	3.35	2.96	2.73	2.57	2.46	2.37	2.31	2.25
	28	4.20	3.34	2.95	2.71	2.56	2.45	2.36	2.29	2.24
	29	4.18	3.33	2.93	2.70	2.55	2.43	2.35	2.28	2.22
	30	4.17	3.32	2.92	2.69	2.53	2.42	2.33	2.27	2.21
	40	4.08	3.23	2.84	2.61	2.45	2.34	2.25	2.18	2.12
	60	4.00	3.15	2.76	2.53	2.37	2.25	2.17	2.10	2.04
	120	3.92	3.07	2.68	2.45	2.29	2.18	2.09	2.02	1.96
	∞	3.84	3.00	2.61	2.37	2.21	2.10	2.01	1.94	1.88

表8.5.1 *F*分布分位数（完）

		γ_1分子自由度数									
		10	12	15	20	24	30	40	60	120	∞
γ_2分母自由度数	1	241.88	243.91	245.95	248.01	249.05	250.10	251.14	252.20	253.25	254.31
	2	19.40	19.41	19.43	19.45	19.45	19.46	19.47	19.48	19.49	19.51
	3	8.79	8.74	8.70	8.66	8.64	8.62	8.59	8.57	8.55	8.53
	4	5.96	5.91	5.86	5.80	5.77	5.75	5.72	5.69	5.66	5.63
	5	4.74	4.68	4.62	4.56	4.53	4.50	4.46	4.43	4.40	4.37
	6	4.06	4.00	3.94	3.87	3.84	3.81	3.77	3.74	3.70	3.67
	7	3.64	3.57	3.51	3.44	3.41	3.38	3.34	3.30	3.27	3.23
	8	3.35	3.28	3.22	3.15	3.12	3.08	3.04	3.01	2.97	2.93
	9	3.14	3.07	3.01	2.94	2.90	2.86	2.83	2.79	2.75	2.71
	10	2.98	2.91	2.85	2.77	2.74	2.70	2.66	2.62	2.58	2.54
	11	2.85	2.79	2.72	2.65	2.61	2.57	2.53	2.49	2.45	2.40
	12	2.75	2.69	2.62	2.54	2.51	2.47	2.43	2.38	2.34	2.30
	13	2.67	2.60	2.53	2.46	2.42	2.38	2.34	2.30	2.25	2.21
	14	2.60	2.53	2.46	2.39	2.35	2.31	2.27	2.22	2.18	2.13
	15	2.54	2.48	2.40	2.33	2.29	2.25	2.20	2.16	2.11	2.07
	16	2.49	2.42	2.35	2.28	2.24	2.19	2.15	2.11	2.06	2.01
	17	2.45	2.38	2.31	2.23	2.19	2.15	2.10	2.06	2.01	1.96
	18	2.41	2.34	2.27	2.19	2.15	2.11	2.06	2.02	1.97	1.92
	19	2.38	2.31	2.23	2.16	2.11	2.07	2.03	1.98	1.93	1.88
	20	2.35	2.28	2.20	2.12	2.08	2.04	1.99	1.95	1.90	1.84
	21	2.32	2.25	2.18	2.10	2.05	2.01	1.96	1.92	1.87	1.81
	22	2.30	2.23	2.15	2.07	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.78
	23	2.27	2.20	2.13	2.05	2.01	1.96	1.91	1.86	1.81	1.76
	24	2.25	2.18	2.11	2.03	1.98	1.94	1.89	1.84	1.79	1.73
	25	2.24	2.16	2.09	2.01	1.96	1.92	1.87	1.82	1.77	1.71
	26	2.22	2.15	2.07	1.99	1.95	1.90	1.85	1.80	1.75	1.69
	27	2.20	2.13	2.06	1.97	1.93	1.88	1.84	1.79	1.73	1.67
	28	2.19	2.12	2.04	1.96	1.91	1.87	1.82	1.77	1.71	1.65
	29	2.18	2.10	2.03	1.94	1.90	1.85	1.81	1.75	1.70	1.64
	30	2.16	2.09	2.01	1.93	1.89	1.84	1.79	1.74	1.68	1.62
	40	2.08	2.00	1.92	1.84	1.79	1.74	1.69	1.64	1.58	1.51
	60	1.99	1.92	1.84	1.75	1.70	1.65	1.59	1.53	1.47	1.39
	120	1.91	1.83	1.75	1.66	1.61	1.55	1.50	1.43	1.35	1.25
	∞	1.83	1.75	1.67	1.57	1.52	1.46	1.39	1.32	1.22	1.00

表8.5.2　χ^2分布分位数

γ	$\chi^2_{0.95}$
1	3.84
2	5.99
3	7.82
4	9.49
5	11.07
6	12.60
7	14.07
8	15.51
9	16.93
10	18.31
11	19.68
12	21.03
13	22.37
14	23.69
15	25.00
16	26.30
17	27.59
18	28.88
19	30.15
20	31.42
21	32.68
22	33.93
23	35.18
24	36.42
25	37.66
26	38.89
27	40.12
28	41.34
29	42.56
30	43.78

表8.5.3　t分布的上端分位数

γ	0.75	0.90	0.95	0.975	0.99	0.995
1	1.0000	3.0777	6.3137	12.7062	31.8205	63.6568
2	0.8165	1.8856	2.9200	4.3027	6.9646	9.9248
3	0.7649	1.6377	2.3534	3.1825	4.5407	5.8409
4	0.7407	1.5332	2.1318	2.7764	3.7470	4.6041
5	0.7267	1.4759	2.0150	2.5706	3.3649	4.0322
6	0.7176	1.4398	1.9432	2.4469	3.1427	3.7074
7	0.7111	1.4149	1.8946	2.3646	2.9980	3.4995
8	0.7064	1.3968	1.8595	2.3060	2.8965	3.3554
9	0.7027	1.3830	1.8331	2.2622	2.8214	3.2498
10	0.6998	1.3722	1.8125	2.2281	2.7638	3.1693
11	0.6974	1.3634	1.7959	2.2010	2.7181	3.1058
12	0.6955	1.3562	1.7823	2.1788	2.6810	3.0545
13	0.6938	1.3502	1.7709	2.1604	2.6503	3.0123
14	0.6924	1.3450	1.7613	2.1448	2.6245	2.9768
15	0.6912	1.3406	1.7530	2.1314	2.6025	2.9467
16	0.6901	1.3368	1.7459	2.1199	2.5835	2.9208
17	0.6892	1.3334	1.7396	2.1098	2.5669	2.8982
18	0.6884	1.3304	1.7341	2.1009	2.5524	2.8784
19	0.6876	1.3277	1.7291	2.0930	2.5395	2.8609
20	0.6870	1.3253	1.7247	2.0860	2.5280	2.8453
21	0.6864	1.3232	1.7207	2.0796	2.5176	2.8314
22	0.6858	1.3212	1.7171	2.0739	2.5083	2.8188
23	0.6853	1.3195	1.7139	2.0687	2.4999	2.8073
24	0.6848	1.3178	1.7109	2.0639	2.4922	2.7969
25	0.6844	1.3163	1.7081	2.0595	2.4851	2.7874
30	0.6828	1.3104	1.6973	2.0423	2.4573	2.7500
40	0.6807	1.3031	1.6839	2.0211	2.4233	2.7045
60	0.6786	1.2958	1.6706	2.0003	2.3901	2.6603
120	0.6765	1.2886	1.6577	1.9799	2.3578	2.6174
∞	0.6745	1.2816	1.6449	1.9600	2.3263	2.5758

表 8.5.4 t分布的双尾概率

T	自由度数 γ									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.00	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
0.25	0.8440	0.8259	0.8187	0.8149	0.8125	0.8109	0.8098	0.8089	0.8082	0.8076
0.50	0.7048	0.6667	0.6514	0.6433	0.6383	0.6349	0.6324	0.6305	0.6291	0.6279
0.75	0.5903	0.5315	0.5077	0.4950	0.4870	0.4816	0.4777	0.4747	0.4724	0.4705
1.00	0.5000	0.4226	0.3910	0.3739	0.3632	0.3559	0.3506	0.3466	0.3434	0.3409
1.25	0.4296	0.3377	0.2999	0.2794	0.2666	0.2578	0.2515	0.2466	0.2428	0.2398
1.50	0.3743	0.2724	0.2306	0.2080	0.1939	0.1843	0.1773	0.1720	0.1679	0.1645
1.75	0.3305	0.2222	0.1784	0.1550	0.1405	0.1307	0.1236	0.1182	0.1140	0.1107
2.00	0.2952	0.1835	0.1393	0.1161	0.1019	0.0924	0.0856	0.0805	0.0766	0.0734
2.25	0.2662	0.1534	0.1099	0.0876	0.0743	0.0654	0.0592	0.0546	0.0510	0.0482
2.50	0.2422	0.1296	0.0877	0.0668	0.0545	0.0465	0.0410	0.0369	0.0339	0.0314
2.75	0.2220	0.1107	0.0707	0.0514	0.0403	0.0333	0.0285	0.0251	0.0225	0.0205
3.00	0.2048	0.0955	0.0577	0.0399	0.0301	0.0240	0.0199	0.0171	0.0150	0.0133
3.25	0.1900	0.0831	0.0475	0.0314	0.0227	0.0175	0.0141	0.0117	0.0100	0.0087
3.50	0.1772	0.0728	0.0395	0.0249	0.0173	0.0128	0.0100	0.0081	0.0067	0.0057
3.75	0.1659	0.0643	0.0331	0.0199	0.0133	0.0095	0.0072	0.0056	0.0046	0.0038
4.00	0.1560	0.0572	0.0280	0.0161	0.0103	0.0071	0.0052	0.0039	0.0031	0.0025
4.25	0.1471	0.0512	0.0239	0.0132	0.0081	0.0054	0.0038	0.0028	0.0021	0.0017
4.50	0.1392	0.0460	0.0205	0.0108	0.0064	0.0041	0.0028	0.0020	0.0015	0.0011
4.75	0.1321	0.0416	0.0177	0.0090	0.0051	0.0032	0.0021	0.0014	0.0010	0.0008
5.00	0.1257	0.0377	0.0154	0.0075	0.0041	0.0025	0.0016	0.0011	0.0007	0.0005
5.25	0.1198	0.0344	0.0135	0.0063	0.0033	0.0019	0.0012	0.0008	0.0005	0.0004
5.50	0.1145	0.0315	0.0118	0.0053	0.0027	0.0015	0.0009	0.0006	0.0004	0.0003
5.75	0.1096	0.0289	0.0104	0.0045	0.0022	0.0012	0.0007	0.0004	0.0003	0.0002
6.00	0.1051	0.0267	0.0093	0.0039	0.0018	0.0010	0.0005	0.0003	0.0002	0.0001
6.25	0.1010	0.0247	0.0083	0.0033	0.0015	0.0008	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001
6.50	0.0972	0.0229	0.0074	0.0029	0.0013	0.0006	0.0003	0.0002	0.0001	0.0001
6.75	0.0936	0.0213	0.0066	0.0025	0.0011	0.0005	0.0003	0.0001	0.0001	0.0001
7.00	0.0903	0.0198	0.0060	0.0022	0.0009	0.0004	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000
7.25	0.0873	0.0185	0.0054	0.0019	0.0008	0.0003	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000
7.50	0.0844	0.0173	0.0049	0.0017	0.0007	0.0003	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
7.75	0.0817	0.0162	0.0045	0.0015	0.0006	0.0002	0.0001	0.0001	0.0000	0.0000
8.00	0.0792	0.0153	0.0041	0.0013	0.0005	0.0002	0.0001	0.0000	0.0000	0.0000

表8.5.5 标准正态分布的上端概率

x	0.00	0.25	0.50	0.75	1.00	1.25	1.50	1.75	2.00	2.25
0.00	0.50000	0.59871	0.69146	0.77337	0.84134	0.89435	0.93319	0.95994	0.97725	0.98778
0.01	0.50399	0.60257	0.69497	0.77637	0.84375	0.89617	0.93448	0.96080	0.97778	0.98809
0.02	0.50798	0.60642	0.69847	0.77935	0.84614	0.89796	0.93574	0.96164	0.97831	0.98840
0.03	0.51197	0.61026	0.70194	0.78230	0.84850	0.89973	0.93699	0.96246	0.97882	0.98870
0.04	0.51595	0.61409	0.70540	0.78524	0.85083	0.90147	0.93822	0.96327	0.97932	0.98899
0.05	0.51994	0.61791	0.70884	0.78814	0.85314	0.90320	0.93943	0.96407	0.97982	0.98928
0.06	0.52392	0.62172	0.71226	0.79103	0.85543	0.90490	0.94062	0.96485	0.98030	0.98956
0.07	0.52790	0.62552	0.71566	0.79389	0.85769	0.90658	0.94179	0.96562	0.98077	0.98983
0.08	0.53188	0.62930	0.71904	0.79673	0.85993	0.90824	0.94295	0.96637	0.98124	0.99010
0.09	0.53586	0.63307	0.72240	0.79955	0.86214	0.90988	0.94408	0.96712	0.98169	0.99036
0.10	0.53983	0.63683	0.72575	0.80234	0.86433	0.91149	0.94520	0.96784	0.98214	0.99061
0.11	0.54380	0.64058	0.72907	0.80511	0.86650	0.91309	0.94630	0.96856	0.98257	0.99086
0.12	0.54776	0.64431	0.73237	0.80785	0.86864	0.91466	0.94738	0.96926	0.98300	0.99111
0.13	0.55172	0.64803	0.73565	0.81057	0.87076	0.91621	0.94845	0.96995	0.98341	0.99134
0.14	0.55567	0.65173	0.73891	0.81327	0.87286	0.91774	0.94950	0.97062	0.98382	0.99158
0.15	0.55962	0.65542	0.74215	0.81594	0.87493	0.91924	0.95053	0.97128	0.98422	0.99180
0.16	0.56356	0.65910	0.74537	0.81859	0.87698	0.92073	0.95154	0.97193	0.98461	0.99202
0.17	0.56749	0.66276	0.74857	0.82121	0.87900	0.92220	0.95254	0.97257	0.98500	0.99224
0.18	0.57142	0.66640	0.75175	0.82381	0.88100	0.92364	0.95352	0.97320	0.98537	0.99245
0.19	0.57535	0.67003	0.75490	0.82639	0.88298	0.92507	0.95449	0.97381	0.98574	0.99266
0.20	0.57926	0.67364	0.75804	0.82894	0.88493	0.92647	0.95543	0.97441	0.98610	0.99286
0.21	0.58317	0.67724	0.76115	0.83147	0.88686	0.92785	0.95637	0.97500	0.98645	0.99305
0.22	0.58706	0.68082	0.76424	0.83398	0.88877	0.92922	0.95728	0.97558	0.98679	0.99324
0.23	0.59095	0.68439	0.76730	0.83646	0.89065	0.93056	0.95818	0.97615	0.98713	0.99343
0.24	0.59483	0.68793	0.77035	0.83891	0.89251	0.93189	0.95907	0.97670	0.98745	0.99361

注：为了查小于 x 的标准正态随机变量对应的概率，查行和列标题栏得和为 x 对应的项（如：当 $x = 0.73 = 0.5+0.23$ 时，由第 23 行第 2 列查得 $P = 0.76730$）。如果 x 小于零，由其绝对值查得 P'，令其概率为 $P = 1-P'$（如当 $x = -0.73$ 时，$P = 1-0.76730 = 0.23270$）

表8.5.6　在0.05显著性水平下k-样本Anderson-Darling检验的临界值

		k^*													
		2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
	3	2.11	1.80	1.65	1.56	1.50	1.46	1.42	1.39	1.37	1.35	1.33	1.32	1.31	1.29
	4	2.20	1.86	1.70	1.60	1.54	1.49	1.45	1.42	1.39	1.37	1.36	1.34	1.33	1.31
	5	2.25	1.89	1.73	1.63	1.56	1.51	1.47	1.43	1.41	1.39	1.37	1.35	1.34	1.32
	6	2.29	1.92	1.74	1.64	1.57	1.52	1.48	1.45	1.42	1.40	1.38	1.36	1.34	1.33
	7	2.32	1.94	1.76	1.65	1.58	1.53	1.49	1.45	1.43	1.40	1.38	1.36	1.35	1.34
	8	2.34	1.95	1.77	1.66	1.59	1.53	1.49	1.46	1.43	1.41	1.39	1.37	1.35	1.34
	9	2.35	1.96	1.78	1.67	1.59	1.54	1.50	1.46	1.43	1.41	1.39	1.37	1.36	1.34
	10	2.37	1.97	1.78	1.67	1.60	1.54	1.50	1.47	1.44	1.41	1.39	1.37	1.36	1.35
	11	2.38	1.97	1.79	1.68	1.60	1.55	1.50	1.47	1.44	1.42	1.39	1.38	1.36	1.35
n^*	12	2.39	1.98	1.79	1.68	1.60	1.55	1.51	1.47	1.44	1.42	1.40	1.38	1.36	1.35
	13	2.39	1.98	1.80	1.68	1.61	1.55	1.51	1.47	1.44	1.42	1.40	1.38	1.36	1.35
	14	2.40	1.99	1.80	1.69	1.61	1.55	1.51	1.47	1.44	1.42	1.40	1.38	1.37	1.35
	15	2.41	1.99	1.80	1.69	1.61	1.55	1.51	1.48	1.45	1.42	1.40	1.38	1.37	1.35
	16	2.41	2.00	1.80	1.69	1.61	1.56	1.51	1.48	1.45	1.42	1.40	1.38	1.37	1.35
	17	2.42	2.00	1.81	1.69	1.61	1.56	1.51	1.48	1.45	1.42	1.40	1.38	1.37	1.35
	18	2.42	2.00	1.81	1.69	1.62	1.56	1.51	1.48	1.45	1.42	1.40	1.39	1.37	1.35
	19	2.42	2.00	1.81	1.70	1.62	1.56	1.52	1.48	1.45	1.43	1.40	1.39	1.37	1.36
	20	2.43	2.01	1.81	1.70	1.62	1.56	1.52	1.48	1.45	1.43	1.40	1.39	1.37	1.36
		2.49	2.05	1.84	1.72	1.64	1.58	1.53	1.50	1.46	1.44	1.42	1.40	1.38	1.37

表8.5.7　最大贰范残差异常数据检查方法的临界值

n	CV	n	CV	n	CV	n	CV	n	CV
-	-	41	3.047	81	3.311	121	3.448	161	3.539
-	-	42	3.057	82	3.315	122	3.451	162	3.541
3	1.154	43	3.067	83	3.319	123	3.453	163	3.543
4	1.481	44	3.076	84	3.323	124	3.456	164	3.545
5	1.715	45	3.085	85	3.328	125	3.459	165	3.547
6	1.887	46	3.094	86	3.332	126	3.461	166	3.549
7	2.020	47	3.103	87	3.336	127	3.464	167	3.551
8	2.127	48	3.112	88	3.340	128	3.466	168	3.552
9	2.215	49	3.120	89	3.344	129	3.469	169	3.554
10	2.290	50	3.128	90	3.348	130	3.471	170	3.556
11	2.355	51	3.136	91	3.352	131	3.474	171	3.558
12	2.412	52	3.144	92	3.355	132	3.476	172	3.560
13	2.462	53	3.151	93	3.359	133	3.479	173	3.561
14	2.507	54	3.159	94	3.363	134	3.481	174	3.563
15	2.548	55	3.166	95	3.366	135	3.483	175	3.565
16	2.586	56	3.173	96	3.370	136	3.486	176	3.567
17	2.620	57	3.180	97	3.374	137	3.488	177	3.568
18	2.652	58	3.187	98	3.377	138	3.491	178	3.570
19	2.681	59	3.193	99	3.381	139	3.493	179	3.572
20	2.708	60	3.200	100	3.384	140	3.495	180	3.574
21	2.734	61	3.206	101	3.387	141	3.497	181	3.575
22	2.758	62	3.212	102	3.391	142	3.500	182	3.577
23	2.780	63	3.218	103	3.394	143	3.502	183	3.579
24	2.802	64	3.224	104	3.397	144	3.504	184	3.580
25	2.822	65	3.230	105	3.401	145	3.506	185	3.582
26	2.841	66	3.236	106	3.404	146	3.508	186	3.584
27	2.859	67	3.241	107	3.407	147	3.511	187	3.585
28	2.876	68	3.247	108	3.410	148	3.513	188	3.587
29	2.893	69	3.252	109	3.413	149	3.515	189	3.588
30	2.908	70	3.258	110	3.416	150	3.517	190	3.590
31	2.924	71	3.263	111	3.419	151	3.519	191	3.592
32	2.938	72	3.268	112	3.422	152	3.521	192	3.593
33	2.952	73	3.273	113	3.425	153	3.523	193	3.595
34	2.965	74	3.278	114	3.428	154	3.525	194	3.596
35	2.978	75	3.283	115	3.431	155	3.527	195	3.598
36	2.991	76	3.288	116	3.434	156	3.529	196	3.599
37	3.003	77	3.292	117	3.437	157	3.531	197	3.601
38	3.014	78	3.297	118	3.440	158	3.533	198	3.603
39	3.025	79	3.302	119	3.442	159	3.535	199	3.604
40	3.036	80	3.306	120	3.445	160	3.537	200	3.606

表8.5.8　Weibull分布单侧B基准值容限系数V_B

n=10-192							
n	V_B	n	V_B	n	V_B	n	V_B
10	6.711	45	4.764	80	4.477	130	4.309
11	6.477	46	4.751	81	4.471	132	4.305
12	6.286	47	4.738	82	4.466	134	4.301
13	6.127	48	4.725	83	4.462	136	4.296
14	5.992	49	4.713	84	4.457	138	4.292
15	5.875	50	4.702	85	4.452	140	4.288
16	5.774	51	4.691	86	4.448	142	4.284
17	5.684	52	4.680	87	4.443	144	4.280
18	5.605	53	4.670	88	4.439	146	4.277
19	5.533	54	4.659	89	4.435	148	4.273
20	5.469	55	4.650	90	4.431	150	4.269
21	5.412	56	4.640	91	4.427	152	4.266
22	5.359	57	4.631	92	4.423	154	4.262
23	5.310	58	4.622	93	4.419	156	4.259
24	5.265	59	4.631	94	4.415	158	4.256
25	5.224	60	4.605	95	4.411	160	4.253
26	5.186	61	4.597	96	4.407	162	4.249
27	5.150	62	4.589	97	4.404	164	4.246
28	5.117	63	4.582	98	4.400	166	4.243
29	5.086	64	4.574	99	4.396	168	4.240
30	5.057	65	4.567	100	4.393	170	4.237
31	5.030	66	4.560	102	4.386	172	4.234
32	5.003	67	4.553	104	4.380	174	4.232
33	4.979	68	4.546	106	4.373	176	4.229
34	4.956	69	4.539	108	4.367	178	4.226
35	4.934	70	4.533	110	4.361	180	4.224
36	4.913	71	4.527	112	4.355	182	4.221
37	4.893	72	4.521	114	4.349	184	4.218
38	4.875	73	4.515	116	4.344	186	4.216
39	4.857	74	4.509	118	4.339	188	4.213
40	4.840	75	4.503	120	4.334	190	4.211
41	4.823	76	4.498	122	4.328	192	4.208
42	4.807	77	4.492	124	4.323		
43	4.792	78	4.487	126	4.317		
44	4.778	79	4.482	128	4.314		

表8.5.8 Weibull分布单侧B基准值容限系数V_B（完）

n=194-∞					
n	V_B	n	V_B	n	V_B
194	4.206	300	4.119	850	3.992
196	4.204	310	4.113	875	3.989
198	4.201	320	4.108	900	3.986
200	4.199	330	4.103	925	3.983
204	4.195	340	4.098	950	3.981
208	4.191	350	4.093	975	3.979
212	4.186	360	4.089	1000	3.976
216	4.182	370	4.085	1100	3.968
220	4.179	380	4.081	1200	3.960
224	4.175	390	4.077	1300	3.954
228	4.171	400	4.073	1400	3.948
232	4.168	425	4.076	1500	3.943
236	4.164	450	4.067	1600	3.939
240	4.161	475	4.060	1700	3.934
244	4.157	500	4.053	1800	3.931
248	4.154	525	4.047	1900	3.927
252	4.151	550	4.041	2000	3.924
256	4.148	575	4.035	3000	3.901
260	4.145	600	4.030	4000	3.887
264	4.142	625	4.025	5000	3.878
268	4.140	650	4.020	6000	3.872
272	4.137	675	4.016	7000	3.866
276	4.134	700	4.012	8000	3.862
280	4.131	725	4.008	9000	3.859
284	4.129	750	4.005	10000	3.856
288	4.126	775	4.001	15000	3.846
292	4.124	800	3.998	20000	3.840
296	4.121	825	3.995	∞	3.803

表8.5.9 Weibull分布单侧A基准值容限系数V_A（文献8.5.11）

n	V_A	n	V_A	n	V_A	n	V_A
10	12.573	44	8.629	78	8.038	124	7.706
11	12.093	45	8.600	79	8.028	126	7.697
12	11.701	46	8.573	80	8.017	128	7.687
13	11.375	47	8.547	81	8.007	130	7.678
14	11.098	48	8.522	82	7.997	132	7.669
15	10.861	49	8.498	83	7.988	134	7.660
16	10.654	50	8.474	84	7.978	136	7.652
17	10.472	51	8.452	85	7.969	138	7.643
18	10.311	52	8.430	86	7.960	140	7.635
19	10.166	53	8.409	87	7.951	142	7.627
20	10.035	54	8.389	88	7.942	144	7.619
21	9.917	55	8.369	89	7.933	146	7.612
22	9.809	56	8.349	90	7.925	148	7.604
23	9.710	57	8.330	91	7.916	150	7.597
24	9.619	58	8.313	92	7.908	152	7.590
25	9.535	59	8.295	93	7.900	154	7.583
26	9.457	60	8.278	94	7.892	156	7.576
27	9.385	61	8.262	95	7.884	158	7.569
28	9.318	62	8.246	96	7.877	160	7.563
29	9.251	63	8.230	97	7.867	162	7.556
30	9.195	64	8.215	98	7.862	164	7.550
31	9.139	65	8.200	99	7.855	166	7.544
32	9.087	66	8.186	100	7.845	168	7.538
33	9.037	67	8.172	102	7.834	170	7.532
34	8.990	68	8.158	104	7.820	172	7.526
35	8.946	69	8.145	106	7.811	174	7.520
36	8.904	70	8.132	108	7.795	176	7.515
37	8.863	71	8.119	110	7.783	178	7.509
38	8.825	72	8.107	112	7.771	180	7.504
39	8.789	73	8.095	114	7.759	182	7.499
40	8.754	74	8.083	116	7.748	184	7.493
41	8.721	75	8.071	118	7.737	186	7.488
42	8.689	76	8.060	120	7.727	188	7.483
43	8.658	77	8.049	122	7.717	190	7.478

表8.5.9 Weibull分布单侧A基准值容限系V_A （文献8.5.11，完）

n	V_A	n	V_A	n	V_A	n	V_A
192	7.473	268	7.333	475	7.152	1000	6.989
194	7.469	272	7.328	500	7.138	1100	6.972
196	7.454	276	7.322	525	7.126	1200	6.958
198	7.459	280	7.317	550	7.114	1300	6.945
200	7.455	284	7.312	575	7.103	1400	6.934
204	7.446	288	7.307	600	7.093	1500	6.924
208	7.437	292	7.302	625	7.084	1600	6.915
212	7.429	296	7.297	650	7.075	1700	6.907
216	7.421	300	7.292	675	7.066	1800	6.899
220	7.413	310	7.280	700	7.058	1900	6.892
224	7.404	320	7.270	725	7.051	2000	6.886
228	7.397	330	7.259	750	7.044	3000	6.841
232	7.390	340	7.249	775	7.037		
236	7.383	350	7.240	800	7.031		
240	7.376	360	7.229	825	7.025		
244	7.370	370	7.222	850	7.019		
248	7.363	380	7.214	875	7.013		
252	7.357	390	7.206	900	7.008		
256	7.351	400	7.198	925	7.003		
260	7.345	425	7.183	950	6.998		
264	7.339	450	7.167	975	6.993		

表8.5.10　正态分布单侧B基准值容限系数k_B

n=2-137							
n	k_B	n	k_B	n	k_B	n	k_B
2	20.581	36	1.725	70	1.582	104	1.522
3	6.157	37	1.718	71	1.579	105	1.521
4	4.163	38	1.711	72	1.577	106	1.519
5	3.408	39	1.704	73	1.575	107	1.518
6	3.007	40	1.698	74	1.572	108	1.517
7	2.756	41	1.692	75	1.570	109	1.516
8	2.583	42	1.686	76	1.568	110	1.515
9	2.454	43	1.680	77	1.566	111	1.513
10	2.355	44	1.675	78	1.564	112	1.512
11	2.276	45	1.669	79	1.562	113	1.511
12	2.211	46	1.664	80	1.560	114	1.510
13	2.156	47	1.660	81	1.558	115	1.509
14	2.109	48	1.655	82	1.556	116	1.508
15	2.069	49	1.650	83	1.554	117	1.507
16	2.034	50	1.646	84	1.552	118	1.506
17	2.002	51	1.642	85	1.551	119	1.505
18	1.974	52	1.638	86	1.549	120	1.504
19	1.949	53	1.634	87	1.547	121	1.503
20	1.927	54	1.630	88	1.545	122	1.502
21	1.906	55	1.626	89	1.544	123	1.501
22	1.887	56	1.623	90	1.542	124	1.500
23	1.870	57	1.619	91	1.540	125	1.499
24	1.854	58	1.616	92	1.539	126	1.498
25	1.839	59	1.613	93	1.537	127	1.497
26	1.825	60	1.609	94	1.536	128	1.496
27	1.812	61	1.606	95	1.534	129	1.495
28	1.800	62	1.603	96	1.533	130	1.494
29	1.789	63	1.600	97	1.531	131	1.493
30	1.778	64	1.597	98	1.530	132	1.492
31	1.768	65	1.595	99	1.529	133	1.492
32	1.758	66	1.592	100	1.527	134	1.491
33	1.749	67	1.589	101	1.526	135	1.490
34	1.741	68	1.587	102	1.525	136	1.489
35	1.733	69	1.584	103	1.523	137	1.488

表8.5.10　正态分布单侧B基准值容限系数k_B（完）

n=138-∞							
n	k_B	n	k_B	n	k_B	n	k_B
138	1.487	172	1.464	230	1.438	400	1.398
139	1.487	173	1.464	235	1.436	425	1.395
140	1.486	174	1.463	240	1.434	450	1.391
141	1.485	175	1.463	345	1.433	475	1.388
142	1.484	176	1.462	250	1.431	500	1.386
143	1.483	177	1.461	255	1.430	525	1.383
144	1.483	178	1.461	260	1.428	550	1.381
145	1.482	179	1.460	265	1.427	575	1.378
146	1.481	180	1.460	270	1.425	600	1.376
147	1.480	181	1.459	275	1.424	625	1.374
148	1.480	182	1.459	280	1.422	650	1.372
149	1.479	183	1.458	285	1.421	675	1.371
150	1.478	184	1.458	290	1.420	700	1.369
151	1.478	185	1.457	295	1.419	725	1.367
152	1.477	186	1.457	300	1.417	750	1.366
153	1.476	187	1.456	305	1.416	775	1.364
154	1.475	188	1.456	310	1.415	800	1.363
155	1.475	189	1.455	315	1.414	825	1.362
156	1.474	190	1.455	320	1.413	850	1.361
157	1.473	191	1.454	325	1.412	875	1.359
158	1.473	192	1.454	330	1.411	900	1.358
159	1.472	193	1.453	335	1.410	925	1.357
160	1.472	194	1.453	340	1.409	950	1.356
161	1.471	195	1.452	345	1.408	975	1.355
162	1.470	196	1.452	350	1.407	1000	1.354
163	1.470	197	1.451	355	1.406	1500	1.340
164	1.469	198	1.451	360	1.405	2000	1.332
165	1.468	199	1.450	365	1.404	3000	1.323
166	1.468	200	1.450	370	1.403	5000	1.313
167	1.467	205	1.448	375	1.402	10000	1.304
168	1.467	210	1.446	380	1.402	∞	1.282
169	1.466	215	1.444	385	1.401		
170	1.465	220	1.442	390	1.400		
171	1.465	225	1.440	395	1.399		

表8.5.11　正态分布单侧A基准值容限系数k_A（文献8.5.11）

n	k_A	n	k_A	n	k_A	n	k_A
2	37.094	36	2.983	70	2.765	104	2.676
3	10.553	37	2.972	71	2.762	105	2.674
4	7.042	38	2.961	72	2.758	106	2.672
5	5.741	39	2.951	73	2.755	107	2.671
6	5.062	40	2.941	74	2.751	108	2.669
7	4.642	41	2.932	75	2.748	109	2.667
8	4.354	42	2.923	76	2.745	110	2.665
9	4.143	43	2.914	77	2.742	111	2.663
10	3.981	44	2.906	78	2.739	112	2.662
11	3.852	45	2.898	79	2.736	113	2.660
12	3.747	46	2.890	80	2.733	114	2.658
13	3.659	47	2.883	81	2.730	115	2.657
14	3.585	48	2.876	82	2.727	116	2.655
15	3.520	49	2.869	83	2.724	117	2.654
16	3.464	50	2.862	84	2.721	118	2.652
17	3.414	51	2.856	85	2.719	119	2.651
18	3.370	52	2.850	86	2.716	120	2.649
19	3.331	53	2.844	87	2.714	121	2.648
20	3.295	54	2.838	88	2.711	122	2.646
21	3.263	55	2.833	89	2.709	123	2.645
22	3.233	56	2.827	90	2.706	124	2.643
23	3.206	57	2.822	91	2.704	125	2.642
24	3.181	58	2.817	92	2.701	126	2.640
25	3.158	59	2.812	93	2.699	127	2.639
26	3.136	60	2.807	94	2.697	128	2.638
27	3.116	61	2.802	95	2.695	129	2.636
28	3.098	62	2.798	96	2.692	130	2.635
29	3.080	63	2.793	97	2.690	131	2.634
30	3.064	64	2.789	98	2.688	132	2.632
31	3.048	65	2.785	99	2.686	133	2.631
32	3.034	66	2.781	100	2.684	134	2.630
33	3.020	67	2.777	101	2.682	135	2.628
34	3.007	68	2.773	102	2.680	136	2.627
35	2.995	69	2.769	103	2.678	137	2.626

表8.5.11　正态分布单侧A基准值容限系数k_A（文献8.5.11，完）

n	k_A	n	k_A	n	k_A	n	k_A
138	2.625	172	2.591	230	2.552	400	2.494
139	2.624	173	2.590	235	2.549	425	2.489
140	2.622	174	2.589	240	2.547	450	2.484
141	2.621	175	2.588	245	2.544	475	2.480
142	2.620	176	2.587	250	2.542	500	2.475
143	2.619	177	2.587	255	2.540	525	2.472
144	2.618	178	2.586	260	2.537	550	2.468
145	2.617	179	2.585	265	2.535	575	2.465
146	2.616	180	2.584	270	2.533	600	2.462
147	2.615	181	2.583	275	2.531	625	2.459
148	2.613	182	2.583	280	2.529	650	2.456
149	2.612	183	2.582	285	2.527	675	2.454
150	2.611	184	2.581	290	2.525	700	2.451
151	2.610	185	2.580	295	2.524	725	2.449
152	2.609	186	2.580	300	2.522	750	2.447
153	2.608	187	2.579	305	2.520	775	2.445
154	2.607	188	2.578	310	2.518	800	2.443
155	2.606	189	2.577	315	2.517	825	2.441
156	2.605	190	2.577	320	2.515	850	2.439
157	2.604	191	2.576	325	2.514	875	2.438
158	2.603	192	2.575	330	2.512	900	2.436
159	2.602	193	2.575	335	2.511	925	2.434
160	2.601	194	2.574	340	2.509	950	2.433
161	2.600	195	2.573	345	2.508	975	2.432
162	2.600	196	2.572	350	2.506	1000	2.430
163	2.599	197	2.572	355	2.505	1500	2.411
164	2.598	198	2.571	360	2.504	2000	2.399
165	2.597	199	2.570	365	2.502	3000	2.385
166	2.596	200	2.570	370	2.501	5000	2.372
167	2.595	205	2.566	375	2.500	10000	2.358
168	2.594	210	2.563	380	2.499	∞	2.326
169	2.593	215	2.560	385	2.498		
170	2.592	220	2.557	390	2.496		
171	2.592	225	2.555	395	2.495		

表8.5.12　确定非参数的B基准值的观测值序号r_B

n	r_B	n	r_B	n	r_B
28	(1)	660	54	3901	360
29	1	682	56	4005	370
46	2	704	58	4109	380
61	3	726	60	4213	390
76	4	781	65	4317	400
89	5	836	70	4421	410
103	6	890	75	4525	420
116	7	945	80	4629	430
129	8	999	85	4733	440
142	9	1053	90	4836	450
154	10	1107	95	4940	460
167	11	1161	100	5044	470
179	12	1269	110	5147	480
191	13	1376	120	5251	490
203	14	1483	130	5354	500
215	15	1590	140	5613	525
227	16	1696	150	5871	550
239	17	1803	160	6130	575
251	18	1909	170	6388	600
263	19	2015	180	6645	625
275	20	2120	190	6903	650
298	22	2226	200	7161	675
321	24	2331	210	7418	700
345	26	2437	220	7727	730
368	28	2542	230	8036	760
391	30	2647	240	8344	790
413	32	2752	250	8652	820
436	34	2857	260	8960	850
459	36	2962	270	9268	880
481	38	3066	280	9576	910
504	40	3171	290	9884	940
526	42	3276	300	10191	970
549	44	3380	310	10499	1000(2)
571	46	3484	320		
593	48	3589	330		
615	50	3693	340		
638	52	3797	350		

(1) 当 $n<28$ 时，B 基准值不存在。

(2) 当 $n>10\,499$，使用式 8.5.12。

表8.5.13　确定非参数的A基准值的观测值序号r_A（文献8.6.8 (c)）

n	k_A	n	k_A	n	k_A	n	k_A
≤298	(1)	3603	27	6657	54	9627	81
299	1	3719	28	6769	55	9736	82
473	2	3834	29	6879	56	9854	83
628	3	3949	30	6990	57	9954	84
773	4	4064	31	7100	58	10063	85
913	5	4179	32	7211	59	10172	86
1049	6	4293	33	7322	60	10281	87
1182	7	4407	34	7432	61	10390	88
1312	8	4521	35	7543	62	10498	89
1441	9	4635	36	7653	63	10607	90
1568	10	4749	37	7763	64	10716	91
1693	11	4862	38	7874	65	10824	92
1818	12	4975	39	7984	66	10933	93
1941	13	5088	40	8094	67	11041	94
2064	14	5201	41	8204	68	11150	95
2185	15	5314	42	8314	69	11258	96
2306	16	5427	43	8423	70	11366	97
2426	17	5539	44	8533	71	11475	98
2546	18	5651	45	8643	72	11583	99
2665	19	5764	46	8753	73	11691	100(2)
2784	20	5876	47	8862	74		
2902	21	5988	48	8972	75		
3020	22	6099	49	9081	76		
3137	23	6211	50	9190	77		
3254	24	6323	51	9300	78		
3371	25	6434	52	9409	79		
3487	26	6545	53	9518	80		

(1) 当 $n<299$，A 基准值不存在。

(2) 当 $n>11691$ 时，使用式 8.5.13。

表8.5.14　小样本非参数B基准值参数（文献8.3.4.5.2(a)）

n	r_B	k_B
2	2	35.177
3	3	7.859
4	4	4.505
5	4	4.101
6	5	3.064
7	5	2.858
8	6	2.382
9	6	2.253
10	6	2.137
11	7	1.897
12	7	1.814
13	7	1.738
14	8	1.599
15	8	1.540
16	8	1.485
17	8	1.434
18	9	1.354
19	9	1.311
20	10	1.253
21	10	1.218
22	10	1.184
23	11	1.143
24	11	1.114
25	11	1.087
26	11	1.060
27	11	1.035
28	12	1.010

表8.5.15　小样本非参数A基准值参数（文献8.3.4.5.2(b)）

n	k_A	n	k_A	n	k_A
2	80.00380	38	1.79301	98	1.31553
3	16.91220	39	1.77546	100	1.30806
4	9.49579	40	1.75868	105	1.29036
5	6.89049	41	1.74260	110	1.27392
6	5.57681	42	1.72718	115	1.25859
7	4.78352	43	1.71239	120	1.24425
8	4.25011	44	1.69817	125	1.23080
9	3.86502	45	1.68449	130	1.21814
10	3.57267	46	1.67132	135	1.20620
11	3.34227	47	1.65862	140	1.19491
12	3.15540	48	1.64638	145	1.18421
13	3.00033	49	1.63456	150	1.17406
14	2.86924	50	1.62313	155	1.16440
15	2.75672	52	1.60139	160	1.15519
16	2.65889	54	1.58101	165	1.14640
17	2.57290	56	1.56184	170	1.13801
18	2.49660	58	1.54377	175	1.12997
19	2.42833	60	1.52670	180	1.12226
20	2.36683	62	1.51053	185	1.11486
21	2.31106	64	1.49520	190	1.10776
22	2.26020	66	1.48063	195	1.10092
23	2.21359	68	1.46675	200	1.09434
24	2.17067	70	1.45352	205	1.08799
25	2.13100	72	1.44089	210	1.08187
26	2.09419	74	1.42881	215	1.07595
27	2.05991	76	1.41724	220	1.07024
28	2.02790	78	1.40614	225	1.06471
29	1.99791	80	1.39549	230	1.05935
30	1.96975	82	1.38525	235	1.05417
31	1.94324	84	1.37541	240	1.04914
32	1.91822	86	1.36592	245	1.04426
33	1.89457	88	1.35678	250	1.03952
34	1.87215	90	1.34796	275	1.01773
35	1.85088	92	1.33944	299	1.00000
36	1.83065	94	1.33120		
37	1.81139	96	1.32324		

表8.5.16　离散系数的近似置信限的临界值

n	置信水平					
	下限C_l			上限C_u		
	0.99	0.95	0.90	0.90	0.95	0.99
2	0.3562	0.4461	0.5101	15.989	31.999	160.051
3	0.4344	0.5207	0.5778	4.415	6.285	14.124
4	0.4834	0.5665	0.6196	2.920	3.729	6.467
5	0.5188	0.5991	0.6493	2.372	2.874	4.396
6	0.5464	0.6242	0.6720	2.089	2.453	3.485
7	0.5688	0.6444	0.6903	1.915	2.202	2.980
8	0.5875	0.6612	0.7054	1.797	2.035	2.660
9	0.6036	0.6755	0.7183	1.711	1.916	2.439
10	0.6177	0.6878	0.7293	1.645	1.826	2.278
20	0.7018	0.7604	0.7939	1.370	1.461	1.666
30	0.7444	0.7964	0.8255	1.280	1.344	1.487
40	0.7718	0.8191	0.8453	1.232	1.284	1.397
50	0.7914	0.8353	0.8594	1.202	1.246	1.341
60	0.8065	0.8476	0.8701	1.181	1.220	1.303
70	0.8185	0.8574	0.8785	1.165	1.200	1.274
80	0.8284	0.8654	0.8855	1.152	1.185	1.252
90	0.8368	0.8722	0.8913	1.142	1.172	1.235
100	0.8440	0.8780	0.8963	1.134	1.162	1.220
125	0.8583	0.8895	0.9062	1.118	1.142	1.193
150	0.8692	0.8982	0.9137	1.106	1.128	1.173
200	0.8849	0.9106	0.9243	1.090	1.109	1.147
250	0.8959	0.9193	0.9317	1.080	1.096	1.129
500	0.9243	0.9416	0.9507	1.055	1.066	1.088

表8.5.17　正态分布平均值的接受极限的单因素容限系数

α	样本数目（n）								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5	0.1472	0.1591	0.1539	0.1473	0.1410	0.1354	0.1303	0.1258	0.1217
0.25	0.6266	0.5421	0.4818	0.4382	0.4048	0.3782	0.3563	0.3379	0.3221
0.1	1.0539	0.8836	0.7744	0.6978	0.6403	0.5951	0.5583	0.5276	0.5016
0.05	1.3076	1.0868	0.9486	0.8525	0.7808	0.7246	0.6790	0.6411	0.6089
0.025	1.5266	1.2626	1.0995	0.9866	0.9026	0.8369	0.7838	0.7396	0.7022
0.01	1.7804	1.4666	1.2747	1.1425	1.0443	0.9678	0.9059	0.8545	0.8110
0.005	1.9528	1.6054	1.3941	1.2488	1.1411	1.0571	0.9893	0.9330	0.8854
0.0025	2.1123	1.7341	1.5049	1.3475	1.2309	1.1401	1.0668	1.0061	0.9546
0.001	2.3076	1.8919	1.6408	1.4687	1.3413	1.2422	1.1622	1.0959	1.0397
0.0005	2.4457	2.0035	1.7371	1.5546	1.4196	1.3145	1.2298	1.1596	1.1002
0.00025	2.5768	2.1097	1.8287	1.6363	1.4941	1.3835	1.2943	1.2203	1.1578
0.0001	2.7411	2.2429	1.9436	1.7390	1.5877	1.4701	1.3752	1.2966	1.2301
0.00005	2.8595	2.3389	2.0266	1.813	1.6553	1.5326	1.4337	1.3517	1.2824
0.000025	2.9734	2.4313	2.1065	1.8844	1.7204	1.5928	1.4900	1.4048	1.3327
0.00001	3.1179	2.5487	2.2079	1.9751	1.8031	1.6694	1.5616	1.4723	1.3968

表8.5.18　正态分布个体值的接受极限的单因素容限系数

α	样本数目（n）								
	2	3	4	5	6	7	8	9	10
0.5	0.7166	1.0254	1.2142	1.3498	1.4548	1.5400	1.6113	1.6724	1.7258
0.25	1.2887	1.5407	1.6972	1.8106	1.8990	1.9711	2.0317	2.0838	2.1295
0.1	1.8167	2.0249	2.1561	2.2520	2.3272	2.3887	2.4407	2.4856	2.525
0.05	2.1385	2.3239	2.4420	2.5286	2.5967	2.6527	2.7000	2.7411	2.7772
0.025	2.4208	2.5888	2.6965	2.7758	2.8384	2.8900	2.9337	2.9717	3.0052
0.01	2.7526	2.9027	2.9997	3.0715	3.1283	3.1753	3.2153	3.25	3.2807
0.005	2.9805	3.1198	3.2103	3.2775	3.3309	3.3751	3.4127	3.4455	3.4745
0.0025	3.1930	3.3232	3.4082	3.4716	3.5220	3.5638	3.5995	3.6307	3.6582
0.001	3.4549	3.5751	3.6541	3.7132	3.7603	3.7995	3.8331	3.8623	3.8883
0.0005	3.6412	3.7550	3.8301	3.8864	3.9314	3.9690	4.0011	4.0292	4.0541
0.00025	3.8188	3.9270	3.9987	4.0526	4.0958	4.1319	4.1628	4.1898	4.2138
0.0001	4.0421	4.1439	4.2117	4.2629	4.304	4.3384	4.3678	4.3936	4.4166
0.00005	4.2035	4.3011	4.3664	4.4157	4.4554	4.4886	4.5172	4.5422	4.5644
0.000025	4.3592	4.4530	4.5160	4.5637	4.6022	4.6344	4.6620	4.6863	4.7079
0.00001	4.5573	4.6466	4.7069	4.7527	4.7897	4.8206	4.8473	4.8707	4.8915

表8.5.19 双边t分布的高端与低端分位数

n	α									
	0.4	**0.25**	**0.1**	**0.05**	**0.025**	**0.01**	**0.005**	**0.0025**	**0.001**	**0.0005**
1	0.325	1	3.078	6.314	12.706	31.821	63.657	127.32	318.31	636.62
2	0.289	0.816	1.886	2.920	4.303	6.965	9.925	14.089	23.326	31.598
3	0.277	0.765	1.638	2.353	3.182	4.541	5.841	7.453	10.213	12.924
4	0.271	0.741	1.533	2.132	2.776	3.747	4.604	5.598	7.173	8.610
5	0.267	0.727	1.476	2.015	2.571	3.365	4.032	4.773	5.893	6.869
6	0.265	0.718	1.440	1.943	2.447	3.143	3.707	4.317	5.208	5.959
7	0.263	0.711	1.415	1.895	2.365	2.998	3.499	4.029	4.785	5.408
8	0.262	0.706	1.397	1.860	2.306	2.896	3.355	3.833	4.501	5.041
9	0.261	0.703	1.383	1.833	2.262	2.821	3.250	3.690	4.297	4.781
10	0.260	0.700	1.372	1.812	2.228	2.764	3.169	3.581	4.144	4.587
11	0.260	0.697	1.363	1.796	2.201	2.718	3.106	3.497	4.025	4.437
12	0.259	0.695	1.356	1.782	2.179	2.681	3.055	3.428	3.930	4.318
13	0.259	0.694	1.350	1.771	2.160	2.650	3.012	3.372	3.852	4.221
14	0.258	0.692	1.345	1.761	2.145	2.624	2.977	3.326	3.787	4.140
15	0.258	0.691	1.341	1.753	2.131	2.602	2.947	3.286	3.733	4.073
16	0.258	0.690	1.337	1.746	2.120	2.583	2.921	3.252	3.686	4.015
17	0.257	0.689	1.333	1.740	2.110	2.567	2.898	3.222	3.646	3.965
18	0.257	0.688	1.330	1.734	2.101	2.552	2.878	3.197	3.610	3.922
19	0.257	0.688	1.328	1.729	2.093	2.539	2.861	3.174	3.579	3.883
20	0.257	0.687	1.325	1.725	2.086	2.528	2.845	3.153	3.552	3.850
21	0.257	0.686	1.323	1.721	2.080	2.518	2.831	3.135	3.527	3.819
22	0.256	0.686	1.321	1.717	2.074	2.508	2.819	3.119	3.505	3.792
23	0.256	0.685	1.319	1.714	2.069	2.500	2.807	3.104	3.485	3.767
24	0.256	0.685	1.318	1.711	2.064	2.492	2.797	3.091	3.467	3.745
25	0.256	0.684	1.316	1.708	2.060	2.485	2.787	3.078	3.450	3.725
26	0.256	0.684	1.315	1.706	2.056	2.479	2.779	3.067	3.435	3.707
27	0.256	0.684	1.314	1.703	2.052	2.473	2.771	3.057	3.421	3.690
28	0.256	0.683	1.313	1.701	2.048	2.467	2.763	3.047	3.408	3.674
29	0.256	0.683	1.311	1.699	2.045	2.462	2.756	3.038	3.396	3.659
∞	0.253	0.674	1.282	1.645	1.960	2.326	2.576	2.807	3.090	3.291

参考文献

8.1.4 Moore, D.S. and McCabe, G.P., *Introduction to the Practice of Statistics*, Second Edition, W.H. Freeman, New York, 1993.

8.3.2.2 Scholz, F.W. and Stephens, M.A., "K-Sample Anderson-Darling Tests of Fit," *Journal of the American Statistical Association*, Vol 82, 1987, pp. 918-924.

8.3.3.1(a) Snedecor, G.W. and Cochran, W.G., *统计方法*, 7th ed., The Iowa State University Press, 1980, pp. 252-253.

8.3.3.1(b) Stefansky, W., "Rejecting Outliers in Factorial Designs," *Technometrics*, Vol 14, 1972, pp.469-479.

8.3.4(a) Bury, K.V., *Statistical Models in Applied Science*, John Wiley and Sons, 1975, reprinted by Krieger, 1989, pp. 585-589.

8.3.4(b) Smith, R.L., et al., "Lower Tail Approximations for the Probability of Failure of Three-Dimensional Fibrous Composites with Hexagonal Geometry," *Proc. Royal Society London*, Vol A388, 1983, pp. 353-391.

8.3.4(c) Phoenix, S.L. and Smith, R.L. "A Comparison of Probabilistic Techniques for the Strength of Fibrous Materials under Local Load Sharing Among Fibers," *International Journal of Solids and Structures*, Vol 19, 1983, pp. 479-496.

8.3.4.2 Lawless, J.F., *Statistical Models and Methods for Lifetime Data*, John Wiley & Sons, 1982, pp. 150, 452-460.

8.3.4.5.1 *Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures*, MIL-HDBK-5E, Naval Publications and Forms Center, Philadelphia, Pennsylvania, 1 June 1987, pp. 9-166,9-167.

8.3.4.5.2(a) Hanson, D.L. and Koopmans, L.H., "Tolerance Limits for the Class of Distribution with Increasing Hazard Rates," *Annals of Math. Stat.*, Vol 35, 1964, pp. 1561-1570.

8.3.4.5.2(b) Vangel, M.G., "One-Sided Nonparametric Tolerance Limits," *Communications in Statistics: Simulation and Computation*, Vol. 23, 1994, p. 1137.

8.3.5.1(a) Draper, N.R. and Smith, H., *Applied Regression Analysis*, 2nd ed., John Wiley & Sons, 1981.

8.3.5.1(b) Hinkelmann, K and Kempthorne, O., *Design and Analysis of Experiments Volume 1: Introduction to Experimental Design*, New York, John Wiley & Sons, 1994.

8.3.5.1(c) Scheffé, H., *The Analysis of Variance*, John Wiley & Sons, 1959.

8.3.5.1(d) Box, G.E.P., Hunter, W.G., and Hunter, J.S., *Statistics for Experimenters*, John Wiley & Sons, 1981.

8.3.5.1(e) Pierce, D.A. and Kopecky, K.J., "Testing Goodness-of-Fit for the Distribution of Errors in Regression Models," *Biometrika*, Vol 66, 1979, pp. 1-5.

8.3.5.2(a) Searle, S.R., *Linear Models*, John Wiley & Sons, 1971, pp. 473-474.

8.3.5.2(b) Vangel, M.G., "New Methods for One-Sided Tolerance Limits for a One-Way Balanced Random Effects ANOVA Model," *Technometrics*, Vol 34, 1992, pp. 176-185.

8.3.5.2.1(a) Lehmann, E.L., *Testing Statistical Hypotheses*, John Wiley & Sons, 1959, pp. 274-275.

8.3.5.2.1(b) Levene, H., "Robust Tests for Equality of Variances," in *Contributions to Probability and Statistics*, ed. I. Olkin, Palo, Alto, CA: Stanford University Press, 1960.

8.3.5.2.1(c) Conover, W.J., Johnson, M.E., and Johnson, M.M., "A Comparative Study of Tests for Homogeneity of Variances, with Applications to the Outer Continental Shelf Bidding Data," *Technometrics*, Vol. 23, pp. 351-361, 1981

8.3.5.4(a) Shyprykevich, P., "The Role of Statistical Data Reduction in the Development of Design Allowables for Composites," *Test Methods for Design Allowables for Fibrous Composites: 2nd Volume*, ASTM STP 1003, C.C. Chamis, ed., American Society for Testing and Materials, Philadelphia, PA, 1989, pp. 111-135.

8.3.5.4(b) Tomblin, John S., Ng, Yeow C., and Raju, K. Suresh, "Material Qualification and Equivalency for Polymer Matrix Composite Material Systems," DOT/FAA/AR-00/47, March 2001.

8.3.6 Tukey, J.W., *Exploratory Data Analysis*, Addison-Wesley Publishing Company, 1977

8.3.6.1 Parzen, E., "A Density-Quantile Function Perspective on Robust Estimation," *Robustness in Statistics*, Academic Press, New York, 1979

8.3.6.2(a) Parzen, E., "Entropy Interpretation of Tests for Normality by Shapiro-Wilk Statistics," presented at the Twenty-Eighth

Conference on the Design of Experiments in Army Research, Development, and Testing, 20-22 October 1982, Monterey, California

8.3.6.2(b) Parzen, E., "Informative Quantile Function and Identification of Probability Distribution Types," Technical Report A-26, Department of Statistics, Texas A&M University (August 1983)

8.3.7.2(a) Vangel, M.G., "One-Sided ®-Content Tolerance Intervals for Mixed Models with Two Components of Variance," *Technometrics*, submitted

8.3.7.2(b) Vangel, M.G., "Design Allowables From Regression Models Using Data From Several Batches," in *12th Symposium on Composite Materials: Testing and Design*, American Society of Testing and Materials, to appear, 1996

8.4.3.2 Vangel, M.G., "Confidence Intervals for a Normal Coefficient of Variation," *The American Statistician*, Vol. 14, pp. 21-26, 1996

8.4.5(a) Papirno, R., "Average Stress-Strain Curves for Resin Matrix Composites," *Composite Technology Review*, 1986, pp. 107-116

8.4.5(b) Papirno, R., "Algebraic Approximations of Stress-Strain Curves for Kevlar-Reinforced Composites," *Journal of Testing and Evaluation*, Vol 13, 1985, pp. 115-122

8.5.2 Johnson, N.L. and Kotz, S., *Distributions in Statistics: Continuous Univariate Distributions - 1*, John Wiley & Sons, 1970, p. 176

8.5.9 Jones, R.A., Ossiander, M., Scholz, F.W., and Shorack, G.R., "Tolerance Bounds for Loggamma Regression Model," *Technometrics*, Vol 27, May 1985, pp. 109-118

8.5.11 Odeh, R.E. and Owen, D.B., *Tables of Normal Tolerance Limits, Sampling Plans and Screening*, Marcel Dekker, 1980.

8.5.17 Vangel, Mark, "Acceptance and Compliance Testing Using the Sample Mean and an Extrema", submitted to Technometrics, 2001.