

# 第1章 指 南

## 1.1 总论

本手册给出了连续和非连续金属基复合材料(MMC)的工程方法，用以开发基于统计学的标准化材料性能数据，还提供了满足 MIL-HDBK-17 出版要求的大量相关复合材料体系的数据汇编。另外，对于和复合材料相关的支持工程和制造技术及其常见应用也进行了概述。

### 1.1.1 引言

通常，对于一个高效的工程开发过程，基于统计学的标准化材料性能数据是必需的；这些数据不仅材料的供应商需要，对于工程用户和系统终端用户也是需要的。由于材料的固有性能不依赖于某一特定的应用项目，数据开发方法和材料性能数据可以适用于一系列不同的产业部门；它们也是采购或认证机构<sup>\*</sup>所接受的建立在统计学基础上的设计值的主要技术基础。这种复合材料固有性能的评定，如图 1.1.1 所示，是本手册所要解决的主要问题。

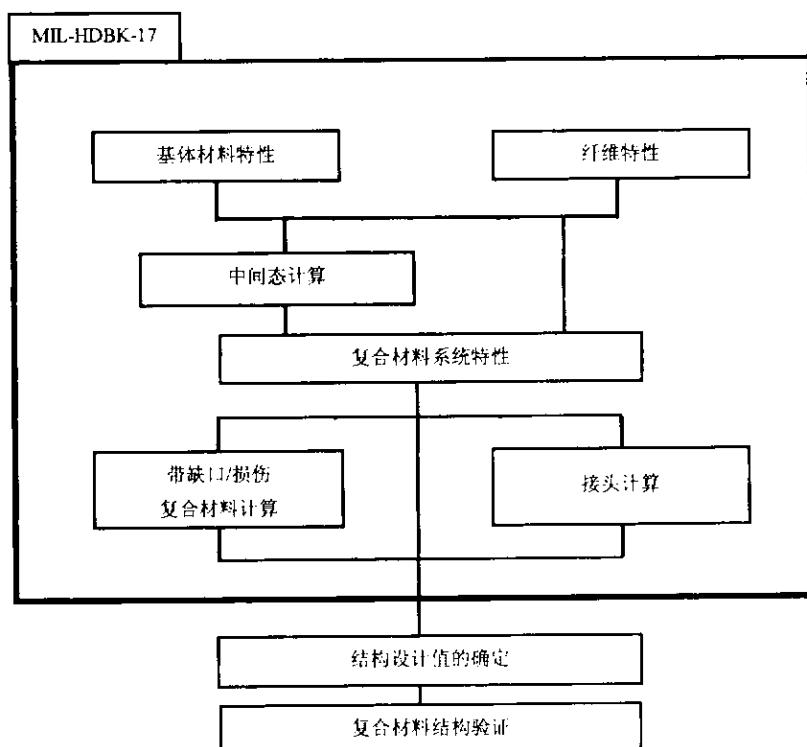


图 1.1.1 阴影区表示了手册第四卷关注的焦点

<sup>\*</sup>采购机构，例如美国国防部(DoD)的下属部门。认证机构，例如联邦航空管理局的某个部门。

## 1.1.2 目的

本手册第四卷的首要目的是对与金属基复合材料性能的表征试验、数据处理和数据报告相关的工程数据开发方法进行标准化。为了支持这个目标，手册第四卷发布了复合材料体系的性能，它们已有满足特定要求的数据。另外，手册对与复合材料相关的其他技术主题，包括典型金属基复合材料的材料选择、材料规范、材料加工、设计、分析、质量控制和修理，提供了精选的指南。因此，手册分成三个主要章节出版，为以下方面提供原始数据资料：

**第 1 章 指南：**记录了与一系列不同的需要相适应的材料表征数据开发方法指南，以及数据在本手册发布所需满足的具体要求。多数采购和认证机构倾向于，甚至有些要求，在重要应用中使用的复合材料体系或者按第一章的指南来表征，或者从第三章发布的材料体系来选择。

**第 2 章 数据的利用：**这部分给出了金属基复合材料数据统计分析的指南。另外，还给出了对设计、建模、连接、结构可靠性和修理的方法和建议。

**第 3 章 材料性能数据：**提供了潜在的设计数据知识库。以文档形式给出的材料体系的性能汇总，提供了满足两类 MIL-HDBK-17 的数据文档中任何一类要求的数据，这两类是筛选和完全批准。

## 1.1.3 范围

MIL-HDBK-17 的第四卷可作为金属基复合材料技术信息的一般参考源，包括：

### 1.1.3.1 第 1 章：指南

本卷包括确定复合材料体系性能、它们的组分和一般结构元件的指南，包括试验计划、试验矩阵、取样、环境调节、试验方法选择、数据报告、数据处理、统计分析及其他相关问题。重点是对数据的统计处理和分析。第 1 章包含一般获得材料表征数据的指南，以及金属基复合材料数据在 MIL-HDBK-17 发布的具体要求。

本手册强调了材料基准值（材料许用值）和设计许用值之间的区别。材料基准值是每一种复合材料体系的固有性能，它是本手册关注的焦点，而设计许用值虽然常常植根于材料基准值，但与应用有关，并考虑和包括可能进一步影响结构强度和刚度的附加内容。而且，建立应用设计许用值时还可能有附加的认证或采购机构的要求，这些已超出了本手册的范围。

### 1.1.3.2 第 2 章：数据的利用

#### （材料的使用、设计和分析指南）

第 2 章提供了用于复合材料结构设计、制造、分析以及支持能力，以及如何与第 1 章提供的指南相一致地利用第 3 章提供的材料数据的方法和经验教训。第 2 章讨论的内容包括材料和工艺、质量控制、设计和分析、连接、可靠性和支持能力。

### 1.1.3.3 第 3 章：材料性能数据

第 3 章包含了以统计学为基础的数据，它们满足具体的 MIL-HDBK-17 母体取样和数据文件要求，并覆盖了常用的组分和材料体系。这些数据经过了数据审核工作组的审核并得到了全面协调组的批准（MIL-HDBK-17 协调组和工作组，见 1.1.5 节）。在获得数据并

经批准后，新的材料体系数据以及现有体系的补充数据也将包含在内。

第3章的材料性能定义覆盖各种可能的使用条件，可能时特别关注材料环境的上限和下限，因此，具体的应用环境不会限制这些数据的使用。如果有的话，中间环境条件的数据将提供对材料响应和环境的关系的附加定义。

虽然可从手册第3章提供的数据开始建立具体应用的结构设计值，但大多数应用都需收集补充数据，尤其是如果对从层压板或更复杂级别结构的数据有要求时（结构复杂级别的讨论见2.1.2.1节）。而且，必须对采购和认证机构证实制造的材料能与手册第3章数据所用材料的等同，它通常用有限的试验和数据比较来验证。有关这一评价的细节留待采购和认证机构判断。

## 1.1.4 文档的使用和限制

### 1.1.4.1 信息来源

MIL-HDBK-17第四卷包含的信息来源于材料的生产商、加工商、制造商、政府赞助的研究报告、公开文献、与研究者的直接交流以及MIL-HDBK-17协调活动的参与者。本文档公布的所有信息都得到了来自工业界、美国陆军、美国海军、美国空军、美国国家航空航天局(NASA)、以及美国航空管理局(FAA)代表的协调和审核。手册尽力反映最新的复合材料使用信息，特别是复合材料在结构上的应用。为了使手册保持先进性，并保证完整性和准确性，需要对手册进行不断的审核和修订。

### 1.1.4.2 数据的使用和应用指南

这里所有的数据都基于特定环境下的小尺寸试件，大部分限制在单轴加载状态<sup>\*</sup>。用户自行决定手册的数据是否适用于给定的应用，如果选用的话，可以按下列使用需求对数据进行转换，或者依比例进行处理：

- 对多向层压板；
- 对不同特征尺寸和几何形状的结构；
- 多向应力状态；
- 当暴露于不同环境，和/或
- 处于非静态加载。

第2章对这些问题及其他问题进行了进一步讨论。手册数据的具体使用超出了MIL-HDBK-17的所规定的范围和职责，所以手册具体条款的适用性和阐述可能需要合适的采购或认证机构批准。

### 1.1.4.3 强度性能和许用值术语

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。如果还存在中间环境条件下的数据，则可用

<sup>\*</sup>如无说明，试验一律按照指明的具体试验方法实施，重点是用美国材料试验协会标准试验方法(ASTM)获得的先进复合材料的数据，但是如果认为美国材料试验协会的标准试验方法不恰当或者还没有，或者用非标准而又用普遍采用的试验方法得到的数据，那么非标准试验方法得到的数据也可以接受并发布。数据文件中要指明所用的具体试验方法，关于试验方法接受准则的论述也见1.3.2.1。

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。

若具有进行单层水平上的安全裕度计算的应力和强度分析能力时，已有的统计基础上的强度数据可用作建立结构设计许用值的起始点，这时，MIL-HDBK-17 的强度基准值也可称为材料设计许用值。取决于具体应用，有些结构设计许用值可能必须从 MIL-HDBK-17 未提供的层压板、元件或更高级别结构试验的补充试验数据按实际经验确定。

#### 1.1.4.4 文献的使用

虽然每章的结尾都提供了很多的文献，但要注意，引用文献中的信息，与本手册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各个方面都一致。这些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。

#### 1.1.4.5 商标和产品名称的使用

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。

#### 1.1.4.6 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。

#### 1.1.4.7 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。

### 1.1.5 批准步骤

手册的内容是经 MIL-HDBK-17 金属基复合材料协调组编制和批准的，小组每八个月举行一次会议，对手册的内容进行更改和补充。小组成员包括协调组共同主席、协调员、秘书、工作组主席、以及工作组积极的参加者，包括来自各个不同的联邦采购和认证机构，以及产业部门、学术和研究所的代表。MIL-HDBK-17 金属基复合材料协调组的会议公布在 MIL-HDBK-17 主页上 (<http://www.mil17.org>)。

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，它是根据需要建立的。协调组和工作组的组成和组织以及文件更改的批准过程同样在 MIL-HDBK-17 的主页上概述。

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。

## 1.1.6 符号、缩写、以及单位体系

本章定义了在 MIL-HDBK-17 中使用的符号和缩写，并描述了采用的单位制。尽可能保持其普通用法。这部分信息主要来源于文献 1.1.6(a)-(c)。

### 1.1.6.1 符号和缩写

这部分定义了除统计符号外本文件中所使用的符号和缩写。统计符号的定义见 1.11 节。用于单层/层压板所有性能的坐标系和力学性能符号的归纳可见图 1.1.6.1。

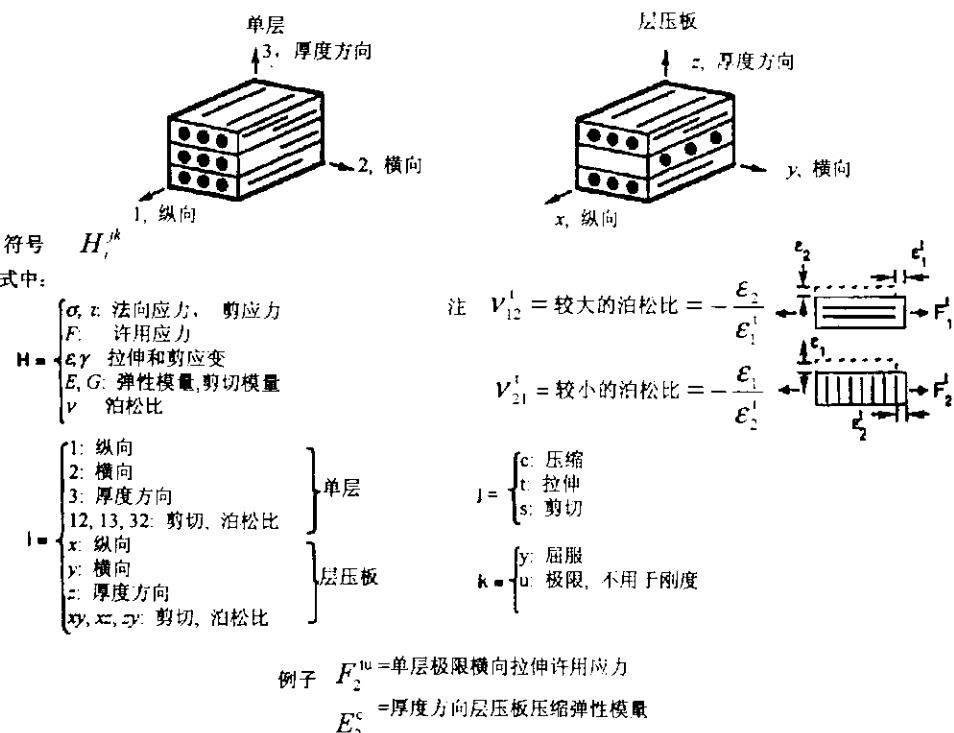


图 1.1.6.1 力学性能的符号

- 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  $\sigma_y$  —— 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。
- 铺层顺序的标示符（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（即基本符号加标示符），以下列的特定形式表示。

下面的普通符号和缩写是 MIL-HDBK-17 中的标准用法。有例外情况时，会在正文和表格中注释。

A	(1) 面积 ( $m^2, \text{in}^2$ ) (2) 交变应力与平均应力之比 (3) 力学性能的 A-基准
Ann	退火的
a	(1) 长度 ( $\text{mm}, \text{in}$ ) (2) 加速度 ( $\text{m/sec}^2, \text{ft/sec}^2$ ) (3) 振幅 (4) 裂纹或缺陷的尺寸 ( $\text{mm}, \text{in}$ )
$a_c$	临界半裂纹尺寸
$a_0$	初始半裂纹尺寸
B	(1) 力学性能的 B-基准值 (2) 双轴比率
Btu	英制热单位
BUS	个体或典型极限挤压强度
BYS	个体或典型挤压屈服强度
b	(1) 宽度 ( $\text{mm}, \text{in}$ )，例如与垂直载荷的挤压面或受压板宽度，或梁截面宽度 (2) 型材宽度：下标 bending
br	下标 bearing
C	(1) 比热 ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}, \text{Btu/lb}^\circ\text{F}$ ) (2) 摄氏的
CC	中间断裂
CEM	可消耗熔融电极
CF	地心引力 ( $\text{N}, \text{lbf}$ )
CPF	正交铺层系数
CPT	固化的单层厚度 ( $\text{mm}, \text{in.}$ )
CG	(1) 质心；“重心” (2) 面积或体积质心
$\xi$	中心线
CT	紧湊拉伸
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)
$E_c$	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)
ELI	超低空隙 (钛合金等级)
ER	当量圆断面
ESR	重熔电镀渣
$e$	(1)端距, 从孔中心到板边的最小距离 (mm, in) (2)伸长率, 材料拉伸试验时, 延性的一种表示方法 (3)单位变形或应变 (4)下标, “疲劳或耐久性”
$e/D$	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)
$F^{ctr}$	压损应力或折损应力 (破坏时柱应力的上限) (MPa, ksi)
$F^{pl}$	比例极限 (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)
$F^{tu}$	拉伸极限应力 (MPa, ksi)
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)

<i>h</i>	高度 (mm, in), 如梁截面高度。
<i>h</i>	小时
<i>I</i>	面积惯性矩 ( $\text{mm}^4$ , $\text{in}^4$ )
<i>i</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) ( $\text{m}^4$ , $\text{in}^4$ ) (2)焦耳
K	(1)绝对温标, 开氏温标 (2)应力强度因子 ( $\text{MPam}$ , $\text{ksiin}$ ) (3)导热性系数 ( $\text{W/m}^\circ\text{C}$ , $\text{Btu}/\text{ft}^2/\text{h/in}^\circ\text{F}$ ) (4)修正系数 (5)介电常数, 电容率
$K_{\text{app}}$	表观平面应变断裂韧性或剩余强度 ( $\text{MPam}$ , $\text{ksiin}$ )
$K_c$	平面应变断裂韧性, 对裂纹扩展失稳点断裂韧性的度量 ( $\text{MPam}$ , $\text{ksiin}$ )
$K_{lc}$	平面应变断裂韧性 ( $\text{MPam}$ , $\text{ksiin}$ )
$K_N$	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 ( $\text{KV/mm}$ , $\text{V/mil}$ )
$K_x$ , $K_y$	板或圆筒的压缩屈曲系数
<i>k</i>	单位应力的应变
ksi	千磅每平方英寸 ( $1\,000 \text{ lb/in}^2$ )
<i>L</i>	圆筒、梁、或柱的长度 (mm, in)
<i>L'</i>	柱的有效长度 (mm, in)
LT	长的横向 (晶粒方向)
lb	磅
<i>l<sub>0</sub></i>	标距
<i>M</i>	外力矩或力偶 ( $\text{N}\cdot\text{m}$ , $\text{in-lbf}$ )
Mg	百万克 (兆克)
MIG	金属-惰性-气体 (焊接)
MPa	兆帕斯卡
MS	军用标准
M.S.	安全裕度
MW	分子量
MWD	分子量分布
<i>m</i>	(1)质量 ( $\text{kg}$ , $\text{lb}$ ) (2)半波数 (3)米

	(4)斜率
mm	毫米
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 (4)下标“名义” (5)破坏时的疲劳循环数 (6)标准应力应变曲线的形状参数 (Ramberg-Osgood 参数)
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 ( $\Omega$ )
$P^u$	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 ( $\text{mm}^3$ , $\text{in}^3$ )
Q&T	淬火和回火
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
SCC	应力腐蚀断裂
ST	短的横向 (晶粒方向)
STA	溶液处理及老化
$S-N$	应力-疲劳寿命关系
$s$	(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)
TIG	钨-惰性-气体 (焊接)
$T_F$	曝露的温度 (°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 <sup>3</sup> , in <sup>3</sup> ) (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 <sup>3</sup> , in <sup>3</sup> )
$z$	沿着一个坐标轴的距离
$\alpha$	热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\gamma$	剪应变 (m/m, in/in)
$\Delta$	差分 (用于数量符号之前)
$\Phi$	偏转角
$\delta$	伸长量或挠度 (mm, in)
$\epsilon$	应变 (m/m, in/in)
$\epsilon_e$	弹性应变 (m/m, in/in)
$\epsilon_p$	塑性应变 (m/m, in/in)

$\mu$	渗透性
$\eta$	塑性折减因子
$\nu$	泊松比
$\rho$	(1)密度 (kg/m <sup>3</sup> , lb/in <sup>3</sup> ) (2)回转半径 (mm, in) (3)回转半径, Neuber 常数 (区间长度)
$\rho_c$	蜂窝夹芯密度 (kg/m <sup>3</sup> , lb/in <sup>3</sup> )
$\Sigma$	总计、总和
$\sigma$	标准差
$\sigma_{ij}, \tau_{ij}$	外法线为 $i$ 的平面上沿 $j$ 方向的应力 ( $i, j = 1, 2, 3$ 或 $x, y, z$ ) (MPa, ksi)
$T$	作用剪应力 (MPa, ksi)
$\omega$	角速度 (弧度/s)
$\infty$	无限大

#### 1.1.6.1.1 组分的性能

下列符号专用于典型复合材料组分的性能:

$E^f$	纤维材料杨氏模量 (MPa, ksi)
$E^m$	基体材料杨氏模量 (MPa, ksi)
$E^R$	增强体杨氏模量 (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)
$G^R$	增强体剪切模量 (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)
$\alpha^f$	纤维材料热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\alpha^m$	基体材料热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\nu^f$	纤维材料泊松比
$\nu^m$	基体材料泊松比
$\sigma$	作用于某点的轴向应力, 用于细观力学分析 (MPa, ksi)
$\tau$	作用于某点的剪切应力, 用于细观力学分析 (MPa, ksi)

#### 1.1.6.1.2 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。

$A_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	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杨氏模量 (MPa, Msi)

$E_2$	垂直于纤维或经向的单层杨氏模量 (MPa, ksi)
$E_x$	沿参考轴 $X$ 的层压板杨氏模量 (MPa, ksi)
$E_y$	沿参考轴 $Y$ 的层压板杨氏模量 (MPa, ksi)
$G_{12}$	在 12 平面内的单层剪切模量 (MPa, ksi)
$G_{xy}$	在参考平面 $xy$ 内的层压板剪切模量 (MPa, ksi)
$h_i$	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)
$V_m$	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)
$W_m$	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 <sup>2</sup> , lbf/in <sup>2</sup> )
$\alpha_1$	沿 1 轴的单层热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\alpha_2$	沿 2 轴的单层热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\alpha_x$	层压板沿广义参考轴 $x$ 的热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\alpha_y$	层压板沿广义参考轴 $y$ 的热膨胀系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\alpha_{xy}$	层压板的热膨胀剪切畸变系数 (m/m/°C, in/in/°F)
$\theta$	单层在层压板中的方位角, 即 1 轴与 $x$ 轴间的夹角 (°)
$\lambda_{xy}$	等于 $\nu_{xy}$ 与 $\nu_{yx}$ 之积
$\nu_{12}$	由 1 方向伸长引起 2 方向收缩的泊松比*
$\nu_{21}$	由 2 方向伸长引起 1 方向收缩的泊松比*
$\nu_{xy}$	由 $x$ 方向伸长引起 $y$ 方向收缩的泊松比*
$\nu_{yx}$	由 $y$ 方向伸长引起 $x$ 方向收缩的泊松比*
$\rho_c$	(1) 单层的密度 (kg/m <sup>3</sup> , lbf/in <sup>3</sup> ) (2) 层压板的密度 (kg/m <sup>3</sup> , lbf/in <sup>3</sup> )
$\phi$	(1) 广义角坐标 (°) (2) 偏轴加载中, $x$ 轴与载荷方向之间的夹角 (°)

### 1.1.6.1.3 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)

\*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。

<b>A</b>	轴
<b>a</b>	(1)胶粘的 (2)交变的
<b>app</b>	表观的
<b>byp</b>	旁路的
<b>c</b>	(1)复合材料体系, 特定的纤维/基体组合。 (2)临界的 (3)压缩
<b>cf</b>	离心力
<b>e</b>	疲劳或耐久性
<b>eff</b>	有效的
<b>eq</b>	等效的
<b>f</b>	纤维
<b>g</b>	玻璃稀纱布
<b>H</b>	圈
<i>i</i>	顺序中的第 <i>i</i> 位置
<b>L</b>	横向
<b>m</b>	(1)基体 (2)平均
<b>max</b>	最大
<b>min</b>	最小
<b>n</b>	(1)序列中的第 <i>n</i> 个 (最后) 位置 (2)标准的、法向的
<b>p</b>	极的、极性的
<b>s</b>	对称
<b>st</b>	加筋条
<b>T</b>	横向
<i>t</i>	在 <i>t</i> 时刻的参量值
<i>x, y, z</i>	广义坐标系
<b><math>\Sigma</math></b>	总和或求和
<b>o</b>	初始点数据或参考数据
<b>( )</b>	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。

#### 1.1.6.1.4 上标

在 MIL-HDBK-17 中, 认为下列上标记号是标准的。

<b>b</b>	弯曲 (当与最小设计性能符号 F 连用时, 指断裂弯曲模量)
<b>br</b>	挤压
<b>c</b>	(1)压缩 (2)蠕变

cc	压缩折曲
cr	压缩屈曲
e	弹性
f	纤维
(i)	第 <i>i</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。

#### 1.1.6.1.5 缩写

在 MIL-HDBK-17 第四卷中, 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)
AISI	American Iron & Steel institute (美国钢铁学会)
AMPTIAC	Advanced Materials & Processes Technical Information and Analysis Center (先进材料与加工技术信息分析中心)
AMS	Aerospace Materials Specification (空间材料规范)
ANOVA	Analysis of variance (变异分析)
ARL	US Army Research Laboratory (美国陆军研究所)
ASM	ASM International (美国国际金属学会)
CAD	Computer Aided Design (计算机辅助设计)
CAI	Compression after impact (冲击后压缩)
CAT	Computer Aided Tomography (计算机辅助层析 X-射线照相法)
CIP	Cold Isostatic Pressing (冷等静压成形)
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)
CVI	Chemical Vapor Infiltration (化学气相渗透)
DCB	Double cantilever beam (双悬臂梁)
DLL	Design limit load (设计限制载荷)
DOD	Department of Defense (国防部)
DOE	Department of Energy (能源部)
DRA	Discontinuously Reinforced Aluminum (非连续增强铝合金)
DSC	Differential scanning calorimetry (差示扫描量热法)
DTA	Differential thermal analysis (示差热分析)
EAC	Environmentally Assisted Cracking (环境造成的破裂)
EDM	Electric Discharge Machining (放电机制)
ENF	End notched flexure (端部缺口弯曲)
ESCA	Electron spectroscopy for chemical analysis (化学分析的电子能谱术)
FAA	Federal Aviation Administration (联邦航空管理局)
FEA	Finite Element Analysis (有限元分析)
FEM	Finite Element Method (有限元方法)
FOD	Foreign object damage (外来物损伤)
GC	Gas chromatography (气相色谱分析)
GTAW	Gas Tungsten Arc Welding (气体钨电弧焊接)
HAC	Hydrogen Assisted Cracking (氢蚀开裂)
HIP	Hot Isostatic Pressing (热等静压成形)
ICP	Inductively Coupled Plasma (等离子体耦合引导)
IGA	Intergranular Attack (晶粒化学侵蚀)
LMI	Liquid metal Infiltration (液体金属渗透)
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)
MMC	Metal Matrix Composite (金属基复合材料)
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 (失效间的平均时间)
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)
NDC	Nondestructive Characterization (无损特性)
NDE	Nondestructive Evaluation (无损评估)
NDI	Nondestructive inspection (无损检测)
NDT	Nondestructive Testing (无损试验)
PEL	Precision Elastic Limit (精确弹性极限)

RT	Room temperature (室温)
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)
SAMPE	Society for the Advancement of Materials & Process Engineering (先进复合材料及加工技术协会)
SBS	Short Beam Shear Strength (短梁剪切强度)
SCC	Stress Corrosion Cracking (应力腐蚀断裂)
SEM	Scanning electron microscopy (扫描电子显微镜)
SI	International System of Units (Le Système International d'Unités) (国际单位制)
TEM	Transmission electron microscopy (发射电子显微镜)
TMA	Thermal mechanical analysis (热力学分析)
TMS	The Metals, Minerals & Materials Society (金属, 矿物与材料学会)
TMP	Thermomechanical Processing (热处理)
VNB	V-notched beam (V缺口梁)
WOF	Work Of Fracture (断裂功)
XRF	X-Ray Fluorescence (X-射线荧光)
XRD	X-Ray Diffraction (X-射线衍射)

### 1.1.6.2 材料体系编码

手册中所用的材料系统编码由纤维体系编码和基体材料编码通过斜杠 (/) 分开, 例如, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al 表示氧化铝增强铝。纤维和基体材料编码见表 1.1.6.2(a) 和 1.1.6.2(b)。

表1.1.6.2(a) 纤维体系编码

Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	氧化铝
B	硼
B,C	碳化硼
C	碳
Gr	石墨
SiC	碳化硅
—	钢
W	钨

表1.1.6.2(a) 基体材料编码

Al	铝
Cu	铜
Fe	铁
Mg	镁
Ni	镍
Ti	钛

### 1.1.6.3 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》则对准备作为世界标准度量单位的 SI 制 (文献 1.6.2(a)), 提供了应用的指南。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.
- (5) IEEE SI 10, "International System of Units (SI): The Modern Metric System", Institute of Electrical and Electronic Engineers (IEEE), November 1997.

表 1.1.6.3 列出了与 MIL-HDBK-17 数据有关的、由英制向 SI 制换算的因子。

表 1.1.6.3 英制与 SI 制换算因子

由	换算为	乘以*
Btu (热力学) /in <sup>2</sup> ·s	瓦/平方米 (W/m <sup>2</sup> )	1.634246E+06
Btu-in/ (s·ft <sup>2</sup> ·F)	W/(mK)	5.192204E+02
Btu/lb·F	J/g·K	4.1868**
Btu/[(h)(ft) <sup>2</sup> (F)/ft]	W/m·K	1.7307
华氏度 (F)	摄氏度 (C)	Tc=(Tf-32)/1.8
华氏度	开氏度(K)	Tk=(Tf+459.67)/1.8
英尺	米(m)	3.048000E-01
平方英尺 (ft <sup>2</sup> )	m <sup>2</sup>	9.290304E-02
英尺/秒	米/秒 (m/s)	3.048000E-01
ft/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	3.048000E-01
英寸	米(m)	2.540000E-02
平方英寸 (in <sup>2</sup> )	平方米 (m <sup>2</sup> )	6.451600E-04
立方英寸 (in <sup>3</sup> )	m <sup>3</sup>	1.638706E-05
In/in/F	m/m/K	1.8
公斤力 (kgf)	牛顿(N)	9.806650E+00
kgf/m <sup>2</sup>	帕斯卡 (Pa)	9.806650E+00
kip (1000 lbf)	牛顿(N)	4.448222E+03
ksi (kip/in <sup>2</sup> )	MPa	6.894757E+00
ksi-in <sup>0.5</sup>	MPa·m <sup>0.5</sup> ***	1.0989
lbf-in	N·m	1.129848E-01
lbf-ft	N·m	1.355818E+00
lbf/in <sup>2</sup> (psi)	帕斯卡 (Pa)	6.894757E+03
lb/in <sup>2</sup>	g/m <sup>2</sup>	7.030696E+05
lb/in <sup>3</sup>	kg/m <sup>3</sup>	2.767990E+04
Msi (10 <sup>6</sup> psi)	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 (毫)	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 帕斯卡 (Pa) = 1N/m<sup>2</sup>。

\*\*\* 转换因数是准确的。

## 1.1.7 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。

**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。

**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。

**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。

**角铺层 (Angleply)** ——任何由正、负  $\theta$  铺层构成的均衡层压板，其中  $\theta$  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）取向的变化，材料的力学及/或物理性能不同。

**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。

**B 基准值 (B-basis) 或 B 基准值 (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（文献第一卷，8.1.4 节）。

**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）。

**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)** ——指当材料对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；通常是由持续加力的办法。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。

**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。

**脆性 (Brittleness)** ——在没有或只有少量塑性变形和吸收少量能量的情况下就有断裂的倾向。

**(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。

**铸造 (Casting)** ——将液态材料注入模具使其凝固而得的所需形状的成形过程。

**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。

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

**CMC-陶瓷基复合材料 (CMC-Ceramic Matrix Composite)** ——一种包含两种或两种以上组分的材料，通常陶瓷基体是主要成分，而添加的组分被用来增加强度、增韧和/或增强热物理性质。

**涂层 (Coating)** ——一种应用于另一种材料表面的材料，如大家知道的基底层，用来改变基底性质；涂覆涂层的工艺。

**线性热膨胀系数 (Coefficient of Linear Thermal Expansion)** ——由于温度升高一度，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。

**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说相互不合并。通常，各组分能够从物理上区别，并且相互间存在界面。

**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)  $p\{a < \theta\} \leq 1 - \alpha$
- (2)  $p\{\theta < b\} \leq 1 - \alpha$
- (3)  $p\{a < \theta < b\} \leq 1 - \alpha$

式中  $1 - \alpha$  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)， $\alpha$  为下置信限；对于式(2)， $b$  为上置信限。置信区间内包含参数  $\theta$  的概率，至少为  $1 - \alpha$ 。

**压固 (Consolidation)** ——通过把基体和增强体组分结合成单一固态材料形式，制造复合材料或结构的工艺。

**组分 (Constituent)** ——通常指大组合的一个元素。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。

**腐蚀 (Corrosion)** ——在含有液体的环境中由于化学反应而导致劣化的过程。

**蠕变 (Creep)** ——在外加应力所引起应变中与时间有关的那部分应变。

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

**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）。

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

**化学气相沉积（Chemical Vapor Deposition）** ——由于表面的化学反应，将固体材料沉积到该表面的过程，该过程包含气相反应物。

**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”只是指各铺层间彼此成直角的层压板，而“角铺层”则用指除此之外的所有其他铺层方式。

**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。（文献脱粘 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）** ——指层压板中在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中，都可能由于各种各样的原因而出现分层。

**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。

**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。

**扩散胶接（Diffusion Bonding）** ——把两种固态材料表面紧密接触，使其发生化学扩散以帮助进行界面胶接的制造过程。

**非连续增强体（Discontinuous Reinforcement）** ——增强体尺寸纵横比小于 50:1，即颗粒、晶须、也可指明是那些不超过材料任一方向尺寸长度的纤维。

**分布（Distribution）** ——给出某个数值落入指定范围内概率的公式。（文献正态分布，Weibull 分布和对数正态分布。）

**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。

**弹性极限（Elastic Limit）** ——对应于材料最大弹性变形时的表观应力值，弹性极限的值取决于应变测量的精度。

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

**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。

**引伸计（Extensometer）** ——用于测量线性应变的一种装置。

**疲劳（Fatigue）** ——在循环加载情况下涉及材料损伤累积的现象。

**疲劳裂纹扩展率（Fatigue Crack Propagation Rate）** ——疲劳裂纹在每一应变循环内

的增长率，通常用  $da/dn$  来表示。

**疲劳损伤 (Fatigue Damage)** ——由循环应力导致宏观或微观缺陷形式出现的累积劣化。

**疲劳极限 (Fatigue Limit)** ——循环应力幅值，低于它时不会发生疲劳破坏。

**F-分布 (F-Distribution)** ——见第一卷，8.1.4 节。

**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。

**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。

**固定影响 (或系统偏差) (Fixed Effect)** ——由于处理或条件有一特定的改变，使测定量出现的某个系统移位（文献第一卷，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。

**箔-纤维-箔 (Foil-Fiber-Foil)** ——一种将纤维粘贴在两层金属箔之间，并通过扩散制备夹层类结构的，连续增强金属基复合材料的制造方法。

**(塑性) 成形 (Forming)** ——一种二次制造工艺，通过采用温度和机械压力导致永久性塑性变形和形状改变。

**断裂延性 (Fracture Ductility)** ——断裂时的真实塑性应变。

**断裂韧性 (Fracture Toughness)** ——反映材料裂纹扩展阻抗的材料性能，通常指平面应变断裂韧性  $K_{IC}$ 。

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

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

**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) 试验以及维克期 (Vickers) 试验。

**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。

**热压 (Hot Pressing)** ——用温度和单轴压力来使复合材料压实的制造工艺。

**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。或者，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）。

**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，一般由固态、夹带的外来材料构成。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构件的结构，作为一个单一的、复杂的、连续的整体进行铺贴和固化，最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部件；而不是去分别制造这些结构构件后，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)** ——指复合材料中其物理上可区别的不同组分之间的边界。

**层间的 (Interlaminar)** ——指在层压板的单层之间的。

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)** ——趋于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）。

**等静压 (Isostatic Pressing)** ——在固体材料致密化过程中采用静水压；通常在 RT(CIP) 下利用液体介质加压或在高温 (HIP) 下用气体介质加压来实现。

**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，性能的测量与试验轴的方向无关。

**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。

**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。

**铺贴 (Lay-up)** (动词) ——按照规定的顺序和取向，将材料的单层加以逐层叠合。

**液态金属渗透 (Liquid Metal Infiltration)** ——将液态金属注入增强体组分空隙中来形成复合材料的制造工艺。

**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）（文献第一卷，8.1.4 节）。

**批 (Lot)** ——在同一制造过程中制备的增强体、基体或复合材料。按定义，复合材料批是由同一批增强体和基体构成的复合材料。

**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部件的过程中，用作基准的一种成形装置或阳模。

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

**材料取证 (Material Qualification)** ——公司或机构在验收材料用于生产时所用的程序。

**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，而产生的一种变异源。（文献第一卷，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。

**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，或者涉及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 (Meso)** ——就复合材料而论，是指介于微观和宏观间中间尺度的结构。

**微观 (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。

**微观硬度 (Microhardness)** ——在微观尺度上材料硬度的度量；通常涉及对单一相或晶粒的检查。

**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。

**微结构 (Microstructure)** ——在微观级别上的材料结构；前缀 micro 指的是一百万分之一。

**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：

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

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：

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

式中： $T$ =最大扭矩，

$r$ =初始外径，

$J$ =初始截面的极惯性矩。

**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。

**单带 (Monotape)** ——连续增强复合材料的最简单形式，通过将一层增强体埋入金属基体中制成带状材料。

**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。

**纯基体 (Neat Matrix)** ——与复合材料相似的未增强的基体。

**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 ( $\mu$ ,  $\sigma$ ) 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:

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

(文献第一卷, 8.1.4 节)。

**归一化 (Normalization)** ——将纤维控制性能的原始试验值, 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。可以用试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 (fiber areal weight) 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。

**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)。

**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。

**微粒子 (Particulate)** ——就复合材料而言, 表示分得非常细的基本或增强体, 用接近于 1 的低形状比来表征。

**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。

**相变 (Phase Transformation)** ——物理状态的改变 (如液态转化成固态), 或固态至固态转变 (如热处理时的析晶)。

**物理性能 (Physical Properties)** ——除力学特性之外的材料性能, 例如热膨胀系数、磁化率、热容、密度等。

**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。

**等离子喷涂 (Plasma Spray)** ——完全或部分熔化的材料在等离子弧的作用下喷射到一表面上, 并在那里固化的加工过程。

**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。

**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的横向应变与其相应轴向应变的比值 (绝对值)。

**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的全体。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（文献第一卷，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（文献第一卷，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。

**粉粒 (Powder)** —— 见微粒子 (Particulate)；粉粒这一术语常用在粉末冶金中，来表示金属的微粒子状态。

**精度 (Precision)** —— 所得的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。

**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。

**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。

**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/±60)s 及(0/±45/90)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（文献第一卷，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（文献第一卷，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。

**增强体 (Reinforcement)** —— 对于金属基复合材料来说，增强体是加入的组分，以获得有益的复合材料性能，例刚度、强度、硬度等。

**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。

**截止 (Run-out)** —— 被终止的疲劳试验，此时施加的循环数达到或超过了表示证实疲劳极限应力或低于疲劳极限应力水平时预定的循环数。

**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（文献第一卷，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（文献第一卷，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（文献第一卷，8.1.4 节）。

**样本标准差 (Sample Standard Deviation)** —— 即样本方差的平方根（文献第一卷，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  $n-1$ （文献第一卷，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平板中间，胶接一块较厚的轻型芯子。

**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。

**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任意位数。

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

**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)** —— 由脱粘纤维组合而成的连续纱束，其截面近似均匀、未经过加捻。

**熔体渗透法 (Slurry Infiltration)** —— 一种将部分固化的金属基体材料注入增强体空隙中的制造工艺。

**凝固 (Solidification)** —— 由液态到固态的相变，对于纯物质来说，发生在一个固定不变的温度下。对于多组分合金来说，通常发生在一温度区域内。

**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 39°F (4°C) 情况下与水进行比较。

**试件 (Specimen)** —— 从待试验的试件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。

**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。

**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，但经常用按英寸/英寸，米/米，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（磅力/平方英寸，兆帕斯卡等等）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）。

**结构数据 (Structured Data)** —— (文献第一卷，8.1.4节)。

**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。

**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。

**截止试验 (Terminated Test)** —— 在破坏前中止的试验。

**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。

**热疲劳 (Thermal Fatigue)** —— 在热循环条件下的疲劳过程。

**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 基准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 (Data))** —— 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。

**变换 (相) (Transformation (Phase))** —— 见相变。

**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。

**捻度 (Twist)** —— 纱或其他纺织原丝单位长度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。

**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%。

**极限强度 (Ultimate Strength)** ——材料不发生断裂能承受的最大应力（拉伸，压缩或剪切）；由试验的最大载荷除以试件初始横截面得到。

**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。

**非结构数据 (Unstructured Data)** ——（文献第一卷，8.1.4 节）。

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

**黏度 (Viscosity)** ——材料体内抵抗流动的一种性能。

**空隙 (Void)** ——出现在材料或零件内部的物理和力学上的不连续性，它可能是二维的（如脱粘或分层）或三维的（如真空、空气或气体的袋）。孔隙率是微空隙的集合。空隙基本上不能传递结构应力或非辐射性能量场。（见夹杂 (Inclusion)）

**(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： $\alpha$  称为尺度参数， $\beta$  称为形状参数。（文献第一卷，8.1.4 节）。

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

**晶须 (Whisker)** ——一种短的单晶纤维或细丝。晶须的直径范围是  $1\text{-}25 \mu\text{m}$ ，其长径比在 100-15 000 之间。

**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)** ——由两股或多股的有捻纱合成的纱束。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  $0^\circ$  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。

## 1.2 MMC 材料的引言

### 1.2.1 引言

1.2 节材料与工艺 (M&P)，试图提供有关各种 MMC 材料（包括它的基体和增强体组分），以及在其压固和后续制造时所用典型工艺的，指导设计者的浓缩的引言和概述。

1.2 节的重点在于阐明 MMC 材料、聚合物复合材料 (PMC) 和陶瓷基复合材料 (CMC) 之间材料和工艺方面的差别。正如单一的未增强金属和单一的聚合物和陶瓷，它们之间就

有显著的差别，类似的差别也存在于 MMC，PMC 和 CMC 中。主要有：(1)组分的性质与类型，(2)压实和加工的方法，以及(3)对因它们而产生的工程物理和力学性能的贡献和责任。

尽管 MMC 是（先进设计的）现代工程材料体系较新的成员，人们仍旧可以预期在对它们的设计和性能表征方面的认识和预计能力有持续的进展。它们的成本和生产能力方面的改善将会导致未来重要的设计应用。

1.2 节中包含的 MMC 材料的范围包括：所有当前商业提供的或处于高级研制阶段的，可满足当前或可预料的将来设计感兴趣的 MMC 材料。没有包含在本章中的是那些作为基础性研究的原型 MMC 材料，它们尚未处于商业化和技术完善到可转让状态。

## 1.2.2 MMC 体系

### 1.2.2.1 体系定义

一个金属基复合材料体系通常可简单地由作为基体的金属合金名称，和陶瓷增强体的材料类型、体积含量及形态来命名，例如：6061 Al/30v/o SiC<sub>p</sub> 指的是有 30% 体积含量 SiC 颗粒作为增强体的非连续增强的 6061 铝合金。连续增强的 MMC 可能由 SiC<sub>f</sub> 来表示。

这些名称并没有充分地描述出复合材料体系，因为它们没有提供例如基本的压实工艺（锭坯或粉末冶金压实）、后继的热处理或特定的纤维取向方面的信息。

### 1.2.2.2 与其他材料/复合材料的区别

MMC 与其他复合材料有几个方面的差别，其中一些主要差别如下：

- MMC 的基体相是纯金属或合金，与聚合物或陶瓷相反。
- 尽管与各自未增强的金属基体合金相比，MMC 的延展性和韧性较低，但相对于 CMC 或陶瓷，它们却显示有较高的延展性和韧性。
- 与 PMCs 一样，MMC 内增强体的主要作用是为了提高强度和模量，而 CMCs 中增强体的主要作用一般是改善损伤容限。
- MMC 的热容通常高于聚合物和 PMC，但低于陶瓷和 CMC。
- 低或适度增强的 MMC 通常可采用未增强金属同样的加工成形方法。

## 1.2.3 基体材料

金属是最常用的工程材料。通过适当的选择合金成分和热力学加工方法，金属可以展现出大范围的容易控制的性能。金属合金在工程中广泛应用不仅因为它们的强度和韧性，同时也具有多种低廉与简单的零部件加工方法。金属基复合材料的发展已反映了对单独由单一金属无法获得的性能的需求，把增强物添加到金属中所剪裁得到的复合材料可同时提高比刚度、疲劳和耐磨蚀性，也可能还同时增加比强度和热特性（如降低热膨胀系数和导热性）。但因改进其性能所带来的高成本是金属基复合材料潜在应用面临的一大挑战。

同 PMC 或 CMC 相比，MMC 具有明显不同的性能组合和工艺方法，这很大程度上是由于作为基体的金属、聚合物和陶瓷材料之间固有的差别，而较少由于所采用的增强体的性质。纯金属是不透明的有光泽的化学元素并且通常是热和电的优良导体，抛光后，它们能很好地反射光线。同时，大多数金属都有延展性但密度比较高。这些特性反映了金属中的相互结合在一起的原子的本质，这些原子有失去电子的趋向；产生的自由电子“气”将使金属正离子固定在位。相反，陶瓷和聚合物材料是元素的化学化合物，陶瓷中的结合和

聚合物中的分子间结合由原子间公用电子数或原子间电子迁移表征。陶瓷和聚合物中缺乏自由电子（由于分子间的范得华力结合，聚合物中没有自由电子）导致它们有不良的热、电传导性，并且与金属材料相比较低的可塑性和韧性。

### 1.2.3.1 基体材料的作用

MMC 材料中基体合金的选择由几个因素决定。特别重要的是复合材料是否为连续的或非连续的增强。采用连续纤维作为增强体会使绝大部分载荷加到增强纤维上，因此，复合材料的强度将主要受纤维强度控制。那么基体合金的主要任务就是将载荷有效地传递给纤维并在纤维发生断裂时钝化裂纹，这样连续增强 MMC 的基体材料应该选择有更好的韧性而不是强度。在这一基础上，低强度、高延展性、高韧性的基体合金将用于连续增强的 MMC 材料。对于非连续增强的 MMC 材料，可能由基体决定复合材料的强度。那么，基体的选择将受到所需复合材料强度要求的影响，可能需要高强度的基体合金。

选择基体时要考虑的另外的因素包括：在制备或服役期间内潜在的增强体与基体的相互作用，可能会导致复合材料性能的退化；增强体与基体之间由于热膨胀失配而产生的热应力；基体疲劳行为对复合材料循环响应的影响。实际上，在循环加载情况下 MMC 的行为是需要特别关注的问题。打算应用在高温情况下的 MMC，需考虑基体和增强体熔点不同造成的影响，当两者熔点相差较大时，基体已产生蠕变而增强体仍保持弹性；熔点相差不大时，需同时考虑基体和增强体的蠕变。

### 1.2.3.2 基体材料的形式

金属材料可制成多种多样的产品形式为后续的加工操作做好准备，这些形式包括：为了铸造的重熔化块，锻造材料，包括，丝、箔、薄板、棒料、平板和许多种类的挤压成形件以及粉末。许多这些不同的形式在生产 MMC 时都有采用。像液态金属渗透这样的熔化加工方法需要有可再熔的组分。箔/纤维/箔方法要求基体箔有一个合适的厚度（通常是 0.1 mm 或 0.004 in）；总的来说，箔指的是厚度不超过 0.012 in (0.3 mm) 轧制的扁平产品。这样的厚度对于大多数韧性基体合金来说都可以通过轧制而得到，但可加工性差的合金可能需要特殊的轧制方法。大多数金属都可以通过多种方法制成粉末。

### 1.2.3.3 基体材料的类型

许多 MMC 材料的应用需考虑多个方面而不单单是强度（例如电接触），因此，对多种基体材料就有相应的要求。纯金属大多软且弱并有高的热和电传导率，这是因为导致易塑性变形和低强度及高延展性的因素同时也使电子的运动变得容易，从而有高的热和电的传导率。因此，同时需要高的热和电的传导率及高强耐磨的材料，例如触点材料，可采用带有陶瓷增强体的纯金属基体。

近年来，越来越多的人关注接近某些内金属化合物的合金混合物，例如铝化钛。这样的内金属化合物和基于它们的合金经常呈现出具有吸引力的综合性能：低密度、高熔点、高温下的高强度。另一方面，这些化合物的延展性通常很差，因为它们的结合特征已与金属不同，通常是共价或离子结合。

基体合金也会以熔点来分类。超高熔点的，例如用 Mo, Nb 和 W 铸造的材料，被称为难熔物质。金属例如 Fe, Ni 和 Cu 被认为显示出一般的熔化行为，而 Al 和 Mg 是较低熔点的材料。

许多不同的金属都被用于制备 MMC，基体材料的选择提供了为这些材料进一步分类的基础。合金体系包括铝、铜、铁（钢）、镁、镍和钛都已经被用作基体，将在以下的章节中分别讨论。

### 1.2.3.3.1 铝

不同形式的铝合金已大范围地应用到 MMC 中。大多数铝合金的密度都接近纯铝，大约为  $0.1 \text{ lb/in}^3$  ( $2.698 \text{ kg/m}^3$ )。纯铝的熔点为  $1220^\circ\text{F}$  ( $660^\circ\text{C}$ )，这一相对于其他有潜力的金属基体较低的熔点使得铝基 MMC 可以方便地通过固态方法，例如粉末冶金，或通过铸造的方法加工。铝合金被大致分为锻造材料或铸造材料；而且，许多锻造组合物也可用粉末成形。术语“锻材”主要指的是由机械加工形式可得到的材料例如：辊轧薄板、金属板或金属箔、多种挤压型材，管材、锻件、金属丝、棒或条。在 20 世纪 70 年代，铝合金箔的易加工性和相对较低的加工温度使得箔/纤维/箔方法得到成功地发展与应用，连续的硼纤维或带 SiC 涂层的硼纤维增强的铝合金就已经应用到了航宇方面。箔形式的 6061 Al-Mg-Si 合金已有很多应用实例，而且这种合金还可以铸造形式用作铝/石墨连续增强复合材料的基体。许多可锻的铝合金非常适用于挤压成形和大多数非连续增强的铝基复合材料 (DRA)，无论其最初的固化是通过粉末冶金或铸造的方法，都是通过这样的方式成形的。用于铸造生产的铝合金通常是以不同尺寸的铝锭或是其他适合重熔化的形式提供。这些铸造材料的应用包括了用 DRA 方法的铸造件产品，它们在铸造或凝固前，要通过搅拌使小颗粒悬浮在液态金属中。

锻造和铸造合金的牌号都基于主要的合金添加物。锻造合金用 4 个数字表示，而铸造成分用 3 个数字（表 1.2.3.3.1）。这些成分更多的详情可从许多资料中得到。锻造和铸造成分都应当依照所获得力学性能的方法（可热处理或不可热处理）进一步分类。可热处理指的是可以用热处理的方法增强的合金。牌号为 2XXX, 6XXX 和 7XXX 系列的锻造合金大多是可热处理的，那些含有锂做主要添加物（例如某些 8XXX 合金）的合金也可以被热处理。典型的热处理方法包括固熔热处理，在液态介质中的淬火和后续的时效。一个淬（回）火指示符被添加到合金名称后来记述经过热处理后的状态。这样-T4 指的是材料经过固熔热处理和淬火后可以在室温下自然时效，而-T6 指的是人工时效到强度峰值。附加的数字可以指示更详细的处理，例如校直操作。热处理的更多的细节以及对材料性能的影响可在大量的文献中查到。增强体的添加（特别是颗粒和晶须）已被发现对 DRA MMC 基体材料的老化响应有显著的影响。老化响应可能被加速也可能被延缓，同时，这样的影响对材料和加工过程都是特有的。由于这一原因，可热处理合金做基体的 MMC 的时效处理与没有增强的基体有着显著的不同。大多数锻造合金内含少量合金添加物，例如：在热加工过程中 Zr（锆）被加入到不同的合金中来控制再结晶。然而，在 MMC 中增强颗粒的存在也有助于颗粒细化，这样可以减少对在锻造合金中常见的次要添加物的需求。

不可热处理的合金是那些不是通过热处理使其明显强化的材料。材料的强度是由固熔体中存在的合金元素和冷加工的程度决定，1XXX, 3XXX, 4XXX 和 5XXX 系列的锻造合金一般情况下是不可热处理的。加在这些合金后淬（回）火指示符通常是-O，指的是充分退火和软化状态，或-H（伴随附加数字）。H 指的是采用了塑性变形（通常用冷轧）来强化材料，附加的数字表述的是应变硬化的程度，和为了控制强度、延展性和对应力腐蚀敏感性的相关退火处理。可热处理的铸造合金（2XX, 3XX, 7XX 和 8XX 系列）使用与可热

处理锻造合金相似的淬（回）火指示符。因为铸造在生产时不需要经历明显的机械变形，不可热处理的 1XX、4XX、和 5XX 系列铸造铝合金既可以表为-F（作为铸造）也可以表为-O（铸造并退火以释放应力）。Al-Si 合金（3XX 和 4XX 系列）在铸造铝合金中居主导地位，因为它们熔化后通常展现出较高的流动性，因而，非常适合复杂形状和薄壁铸件。流动性在铸造 MMC 基体组分选取的时候是一个非常重要的考虑因素，例如它必须完全充满模具空间。Si 在 Al 中的存在非常显著地减少了 Al 起化学反应、还原 SiC 并形成 Al<sub>4</sub>C 的趋势。后面一种化合物即使在很少量存在时也会严重地增加 SiC 增强 Al 基 MMC 的脆性。由于这一原因，SiC 颗粒增强的铸造 Al MMC 采用诸如 AA 359 合金作为基体材料。作为选择，SiC 可通过粉末冶金的方法加入到铝合金中；固态时较低的加工温度可以减少生成 Al<sub>4</sub>C 的趋势，并且这样可以提供一个宽广的范围来选择基体组分。许多在 MMC 中采用的 AA3XX 压（模）铸合金也包含有 Fe 的添加物（大约有 1% 的重量百分比）以减少熔化 Al 同钢模表面的反应。

表1.2.3.3.1 铝合金的牌号（铝协会-AA和美国国家标准研究所-ANSI）

牌 号		
		主要合金元素
锻 造	铸 造	
1XXX	1XX	无
2XXX	2XX	Cu
3XXX	—	Mn
	3XX	Si + Mg; Si + Cu; Si + Mg + Cu
4XXX	4XX	Si
5XXX	5XX	Mg
6XXX	—	Mg + Si
7XXX	7XX	Zn
8XXX	—	与以上各类不同
	8XX	Sn

### 1.2.3.3.2 铜

此节留待以后补充。

### 1.2.3.3.3 铁

此节留待以后补充。

### 1.2.3.3.4 镁

此节留待以后补充。

### 1.2.3.3.5 镍

此节留待以后补充。

### 1.2.3.3.6 钛

钛基复合材料已成功地由各种  $\beta$ 、 $\alpha\text{-}\beta$  和  $\alpha$  相钛合金中制造出来。因为钛合金的密度大约为  $0.18 \text{ lb/in}^3$  ( $4317 \text{ kg/m}^3$ )，在强度与退火钢相当时，它比铝合金的密度通常高 60%，比低合金钢的密度低 40%。在温度高达  $315^\circ\text{C}$  ( $600^\circ\text{F}$ ) 时，钛合金通常仍能保持优良的结

构性能和抗氧化性。相对于以前的连续纤维增强铝基复合材料，这些合金可以为复合材料体系提供较高的基体性能，所以人们对特殊合金的选择有较大的兴趣。

尽管钛合金主要以锻造产品形式提供，但它  $1750^{\circ}\text{C}$  ( $3200^{\circ}\text{F}$ ) 的高熔点和加工硬化特性使其比其他合金难以加工。一般说机械加工时， $\beta$  相钛合金比  $\alpha$ - $\beta$  相合金有较高的压缩比，然而， $\alpha$ - $\beta$  相合金在高温下有更高的强度保持率。另外，钛是高活性元素，因此，在高温下较难以处理和加工。钛的熔/铸和快速凝固操作都必须在真空环境中进行。

尽管一些特殊的合金已注册了商业名称（例如：Timetal-21, Ti-1100），钛合金的识别是由它们主要的合金成分来区分（例如：Ti-6Al-4V, Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn）。在钛复合材料中最常用的是 Ti-6-4, Ti-15-3-3-3, Ti-6-2-4-2 和 Timetal-21。一直对各种铝化钛合金有很大的兴趣，包括  $\alpha$ -2、超级  $\alpha$ -2、 $\gamma$  和大部分斜方晶系合金，这些合金提供较高的高温强度、蠕变强度和微结构稳定性并且很适合在一些燃气涡轮发动机上应用，然而，低延展性和隙间杂质容限低使得加工变得更加困难。

## 1.2.4 增强材料

MMC 的增强材料可以是非连续的纤维或对于金属基体的第二相添加物，它们会导致一些性能的净提高，通常是强度和/或硬度的提高。MMC 最常用的增强体材料是陶瓷（氧化物、碳化物、氮化物等），它们的特性是室温和高温环境中的高强度和高刚度。常用的 MMC 增强体如 SiC, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, TiB<sub>2</sub>, B<sub>4</sub>C 和石墨，不常用金属增强体。

### 1.2.4.1 增强体的种类

增强体可分为两大类：(1) 颗粒或晶须；(2) 纤维。纤维增强体又可细分为连续和非连续纤维。纤维增强了铺设方向上的强度，但在垂直铺设方向上强度低是连续纤维增强 MMC 的特征。另一方面，非连续（纤维）增强的 MMC 表现出更多的各向同性。

### 1.2.4.2 增强体的作用

增强体的作用由它们在结构 MMC 材料中的类型决定。在颗粒或晶须增强的 MMC 中，基体是主要的承载组分。增强体的作用是通过机械约束作用阻止基体变形而增强增硬复合材料。约束功能通常是粒间距与颗粒直径比值的函数。在连续纤维增强的 MMC 中，增强体是主要的承载组分。金属基体的作用是将增强纤维结合到一起并且传递和分配载荷。非连续纤维增强的 MMC 显示出介于连续纤维增强和颗粒增强复合材料之间的特征。通常增强体的添加提高了强度、硬度和热容但降低了所得 MMC 的热膨胀系数。当与高密度金属基体组合时，增强体还可以起到降低密度的作用，因而可以提高某些性能，例如比强度。

## 1.2.5 增强体涂层

### 1.2.5.1 涂层的作用

在许多 MMC 中，增强体在添加到金属基体中以前，都有必要加上一层薄的涂层。

一般讲，纤维的涂层可以提供以下几个益处：

- 作为一个扩散阻挡层，保护纤维不与基体反应和扩散。
- 阻止纤维-纤维直接接触。
- 改善纤维与基体的润湿与结合。
- 减缓纤维与基体之间的热应力或应变集中。

- 在纤维的操作过程中保护纤维不受伤害。

在有些实例中，颗粒被加上涂层，通过加强润湿和减少界面反应来提高复合处理过程。

### 1.2.5.2 涂层类型

给出了涂层的主要作用后，有几种技术可以用于在长纤维上沉积薄涂层，但很少用于短纤维和颗粒增强体。一个此类的工艺是化学气相沉积（CVD）。在这一工艺中，热纤维穿过一个反应区域，在该区域中某物质通过热分解或与其他气体反应的方法而气化，进而使纤维表面形成沉积层。有时沉积过程通过产生等离子放电而加强（等离子辅助 CVD）。物理气相沉积（PVD）、电镀和喷涂是一些用来生成纤维涂层的其他技术。当目的是要增强润湿性，涂层的结构和完整性就没有被用作保护层时那样给予关注。除了热力学稳定性外，用来保护纤维不受金属基体化学侵害的阻挡涂层必须削弱反应物通过它的传递。已经发现由活性盐涂层的熔解作用，如  $K_2ZrF_6$  导致的助熔反应可增强特别是铝中碳和碳化硅纤维的润湿性。在基于陶瓷纤维的丝束上涂胶可提高加工特性。

## 1.2.6 制造过程

### 1.2.6.1 概述和总的说明

制造任何 MMC 所选用的制造工艺由许多因素来决定，其中最重要的是：

- 增强体强度的保持
- 使增强体损伤最小
- 促进基体和增强体之间的润湿与结合
- 允许增强体在基体中适当衬垫、分布和取向的适应性

这些主要的工业制造工艺可以分成液相和固态工艺。液相工艺的特点是密切的界面接触和由此产生的强的结合，但是容易形成脆的界面层。固态工艺包括压固后的粉末混合、扩散连接和气相沉积。液相工艺包括压力铸造和压力渗透，喷射/溅射沉积，淤浆铸造（混合铸造）和反应工艺（原位复合材料）。

### 1.2.6.2 组合和压固

#### 1.2.6.2.1 粉末混合和压固

粉末混合和压固是制备非连续增强 MMC 的常用方法。在这一工艺中，金属基体和增强体的粉末首先混合并放入所需形状的模具中。混合过程可在干态或液体悬浮液中进行。然后加压使粉末更密实（冷压）。压块然后被加热到低于金属熔点，但足以产生明显固态扩散（烧结）的温度。搅和后的混合物也可以直接通过热压或热等静压压固来得到较高的密度。压固后的复合材料就可用于第二道工序。在搅和时得到均匀的混合物是一个关键因素，因为非连续增强体总是倾向于维持大块形式，其隙间空间小到使基体颗粒难以渗透。

#### 1.2.6.2.2 凝固扩散连接

这一方法一般被用来利用基体材料的薄片、箔、粉末、粉带或丝，或涂覆基体的纤维生产纤维增强 MMC。增强纤维和金属基体的组合方法依赖于纤维类型和纤维编排预成形方法。在单体纤维的情况下，例如碳化硅和硼，纤维间距可控的平行排列由鼓轮缠绕且和金属带一起机织而制成，或把一根或多根单丝加入到一个连续的过程中。丝束基的纤维，例如氧化铝或石墨（碳），通常用鼓轮或筒子架连续缠绕。基体材料可以以单独的组分（例

如薄片，粉末毡或带，线）加入到复合材料组合或直接加到纤维排布中（例如气相沉积或等离子喷涂）。通过把纤维排布和基体层铺设（或缠绕成圆柱形或环形）得到有预设方向和厚度的复合材料单元（板层）。通过施加垂直于板层表面的高压和足以使基体合金原子发生扩散的温度来实现复合材料压固。这一过程在真空环境中进行。

#### 1.2.6.2.3 气相沉积

在制造 MMC 时比较突出的气相沉积技术是电子束/物理气相沉积（EB/PVD）。这一工艺中，纤维连续通过金属的局部高蒸汽压力区以发生沉积，在该区域金属蒸汽发生凝聚因而在纤维上产生比较厚的涂层。蒸汽的产生是通过引导一束高能电子束（~10 kW）到固态送料棒的一端。这一技术的一个优点是可以用于多种合金混合物。另一个值得注意的优点在于界面区域很少或没有机械扰动，在当纤维有扩散阻挡层或被剪裁的界面化学时，这些扰动将变得非常显著。将含涂层的纤维组配成束或列，并用热压或 HIP 操作使其热固，通常就完成了复合材料的制备。

#### 1.2.6.2.4 挤压铸造和压力渗透

熔化的金属在加压情况下渗透进多孔的增强材料预成形件中来制备金属基复合材料。增强体材料包括碳、石墨和陶瓷，例如氧化物、碳化物或氮化物。增强体形式包括连续纤维、非连续纤维和颗粒。金属可采用铝、镁、铜和银。在金属基复合材料中增强体的体积含量可从 10%-70%，这决定于材料的特殊应用情况。

一般来说，形状制备得与模具外形相配的预成形件，并不被熔化的金属润湿而必须借助加压渗透。在压力铸造中，采用一个液压柱塞将可控的低压力施加到液态金属使其渗入预成形件中，而不伤害预成形件。渗透可以是真空辅助的，也可以不是。一旦渗透完成，就采用加高压来消除因液态金属固化收缩而导致的收缩孔隙率。这一完全的压固过程，或不存在孔隙率，使挤压铸造的金属基复合材料具有优异的力学性能。

#### 1.2.6.2.5 喷射沉积

喷射沉积范畴内的许多工艺都得到了发展，它是使一束金属小液滴撞击到基底上，以此制备复合材料。如果增强体是颗粒，它可以被用到喷射中，只有基体的喷射只可用于纤维的排布。所采用的技术分为两个截然不同的类型，分类依据的是液滴流是由熔池产生（例如 Osprey 工艺）或是不断将冷金属加入到快速加热的喷射器中（例如热喷涂工艺）。总的来说喷射沉积的特点是快速凝固，低氧化物含量和显著的多孔水平，通常这类沉积会被后续压固工艺充分致密化。

#### 1.2.6.2.6 淤浆铸造（混成砂铸造）

增强体颗粒加入到熔体中并进行搅拌以形成淤浆，连续搅拌直至熔体冷却到金属本身形成半固态，且增强体颗粒呈均匀散布。进一步冷却和固化时不需再搅拌。淤浆可在其彻底固化前直接加入到成形的模具中，也可以凝固成坯锭或棒材，以便再加热至淤浆形式供将来技术处理，例如压（模）铸。

#### 1.2.6.2.7 反应工艺（原位复合材料）

这一类包含有几种不同的工艺。共晶的定向凝固就是这种工艺方法之一，在这一过程中，有一相以纤维形式凝固。增强体在特性和体积含量方面固有的局限性，和与热梯度相关的形态不稳定性导致人们对这类复合材料失去兴趣。放热反应，例如定向的金属氧化，

是生产原位复合材料的一种工艺。这一类复合材料的主要的优点在于原位反应产品是热力学稳定的。

#### 1.2.6.3 热机械工艺

此节留待以后补充。

#### 1.2.6.4 近无余量制造工艺

此节留待以后补充。

### 1.2.7 产品形式

#### 1.2.7.1 中间体

此节留待以后补充。

#### 1.2.7.2 标准

此节留待以后补充。

#### 1.2.7.3 精选增强组分

此节留待以后补充。

### 1.2.8 二次制造工艺

#### 1.2.8.1 概述和总的说明

此节留待以后补充。

#### 1.2.8.2 成形

此节留待以后补充。

#### 1.2.8.3 机加

此节留待以后补充。

#### 1.2.8.4 连接

为了用 MMC 制造结构，必须发展有效的连接方法把 MMC 与相同的或不同的材料连接起来。本节评述了用于单一金属件连接的标准连接实践在 MMC 中应用的潜在适用性。因为 MMC 加入了多种非金属增强体，如碳化硅、石墨、氧化铝、碳化硼等，由此产生相应的限制，并且需要对于单一金属的标准连接方法作一些改进。本节简单概述了可供选用的连接方法，并定性评估了它们的连接性能。

##### 1.2.8.4.1 MMC 连接方法的定性评估

###### 1.2.8.4.1.1 定性的性能评估

作为总的规则，传统连接技术对 MMC 的适用性将依赖于以下因素：(1)增强体类型和体积含量，(2)金属基体熔点和(3)热能量消耗控制。这三个因素的简述如下：

**因素 1：**因为 MMC 采用多种非金属增强体，增强体体积含量越高，标准的金属连接方法适用于 MMC 的可能性越小。非连续增强的 MMC 比连续增强的 MMC 更容易连接。

**因素 2：**熔化金属和增强体的持久接触会导致不希望的化学反应，随熔化金属温度增高该化学反应会加速。因而，金属基体-增强体的化学相容性是依赖于材料和温度的因素。

由于这一原因，金属基体熔点越高，采用熔焊的可能性越小。

**因素 3：**虽然许多传统连接工艺需要高的热能，但不希望引入过度的热能。因此，任何一种自动连接工艺，或能在最短加工过程中提供受控热能输入的特殊方法都可能改善对 MMC 的连接方法适用性。

#### 1.2.8.4.1.2 连接方法的适用性、应用和选择

表 1.2.8.4.1.2 中给出了 17 种金属件连接方法对 MMC 适用性的定性评价。在下面章节中更详细地介绍了有关这些连接方法的加工和分类。重要的是要意识到 MMC 的连接还是一个成熟的技术，许多重要的连接技术细节还不了解，因此，对专用连接方法适用性的正确知识均是与具体材料和工艺有关的因素，它们必须由实验来确定，但一般认为，采用固态和其他低温工艺，常常比高温熔化工艺更适用于 MMC 的连接。

从设计者观点，用一组连接应用准则，并连同对 MMC 连接的适用性，一起来定性地实现连接方法的选择，表 1.2.8.4.1.2 给出了对连接应用提出的准则，它共分为 8 类，如连接的刚度、强度、热和电传导性等。每一个连接准则均定性地分为高、中或低三类。设计者可由此表选择适用于 MMC 的候选连接方法，并对每个特殊连接应用有最高的评分。

表1.2.8.4.1.2 对连接方法的适用性、应用和选择的定性评价

连接方法	连接应用								对 MMC 适用性
	要求强度	要求刚度	耐温	热传导性	导电性	尺寸稳定性	复杂形状	材料不相似	
惯性摩擦焊	○	○	○	○	○	●	●	○	○
摩擦搅动焊	○	○	○	○	○	○	●	○	○
超声波焊	○	○	○	○	○	○	●	○	○
扩散连接	●	○	○	○	○	○	○	○	●
过渡液相	●	○	○	○	○	○	○	○	●
快速红外连接	●	○	○	○	○	○	●	●	●
激光束焊	○	○	○	○	○	●	●	●	●
电子束焊	○	○	○	○	○	●	●	●	●
气体保护金属极电弧焊	○	○	○	○	○	●	○	●	●
钨电极惰性气体保护焊	○	○	○	○	○	●	○	●	●
电阻点焊	○	○	○	○	○	●	●	●	●
电容放电焊	○	○	○	○	○	●	●	●	●
钎焊	●	○	●	○	○	●	●	●	●
软钎焊	●	○	●	●	○	○	●	○	●
胶接	●	●	●	●	●	●	○	○	○
机械连接	○	●	○	●	●	●	●	○	○
铸造镶嵌件连接	○	●	○	●	○	●	●	○	○

连接性能等级：

○ 高

◎ 中

● 低

#### 1.2.8.4.2 MMC 连接中潜在问题

一般来讲，在 MMC 中非金属增强体，通常的体积含量从 5% 到 60%，因此，对 MMC 的连接存在许多潜在的问题。

##### 1.2.8.4.2.1 固化影响

对非连续增强 MMC，大多数非金属增强体的密度与金属基体不同，当基体处于溶化状态时，就会引起明显的颗粒偏析现象，一般来讲，复合材料焊池有较高的粘性，不会像未增强的金属基体流动的那么通畅，由焊池中的对流机理，高粘性经常引起在熔化中低的热传递，这将影响 MMC 中得到的微结构和应力分布。必须采用这样的技术，它们可避免因增强体迁移到焊接区而产生的增强体熔化和非均匀的填实密度。

##### 1.2.8.4.2.2 化学反应

一般来讲，必须仔细地控制连接工艺的温度和时间，使得连接过程中增强体与熔化金属基体接触不会引起增强体材料熔解、相互弥散以及形成不希望有的冶金相。对专门的连接方法，金属基体与增强体之间化学稳定性特别依赖于材料与工艺特性，因此，对具体的工艺，最终的工艺参数必须由试验确定。

##### 1.2.8.4.2.3 连接准备

因为大多数 MMC 存在非金属增强体，所以有很高的耐磨性。在连接准备中，使用标准钢切割工具和锯带容易引起脆断，切割和钻孔操作必须小心地控制以避免复合材料板边撕裂和对连续纤维增强体过度损伤。

##### 1.2.8.4.2.4 连接后热处理

应该考虑连接后热处理以达到连接（制造）后的最好特性，并减少或消除残余应力。

#### 1.2.8.4.3 被选连接方法的分类和讨论

金属基复合材料的连接方法可以被分成三组：固态法，熔融法和其他工艺。在固态连接中，在低于基体金属熔点的温度下，通过机械变形或扩散机理实现连接。固态连接法经常导致原先连接界面的消失。熔融连接法是使大量类似成分的基体金属熔化，并使熔融金属混合物凝固后形成连接。熔融焊接基本上可以看作具有不同边界条件的微型铸造。其他连接法，是用中间填充材料并在低于基体金属熔点温度时发生连接。其他连接法例如钎焊和软钎焊，特种合金或填充材料被放在将被连接的基体材料之间。可用各种方法来加热组件，当填充材料变成液态，它们覆盖在基体金属上形成冶金学的结合。金属基复合材料也可以使用胶粘剂，机械镶嵌件和紧固件。

金属基复合材料的连接目前还不是成熟的工艺，许多重要的细节还需发展。因此，具体金属基复合材料连接方法的适用性取决于被连接金属基复合材料的类型。本节提供被选连接方法的定性评论，连接方法主要是关于铝基金属基复合材料的，它们在公开文献中描述，如图 1.2.8.4.3 所示。

##### 1.2.8.4.3.1 惯性摩擦焊接

惯性摩擦焊接是通过构件间的摩擦生热产生连接。有两种传统的连接方法：直接驱动焊接和惯性摩擦焊接。一般来讲，传统的焊接方法只能应用于某些具有合适的连接横截面尺寸和形状的构件。对于非连续增强金属基复合材料摩擦焊接被证明是很有效的（文献 1.2.8.4.3.1(a) 和 (b)）。在惯性摩擦焊接中，一个零件与快速旋转的飞轮相连，另一零件固定，

使二者强制接触，由于摩擦生热在界面形成一层软材料。连接层在两构件之间，并被允许在接触压力下冷却。惯性摩擦焊是一种固态焊接工艺，加工温度要低于基体材料熔点。由于这些原因，该焊接技术不会产生不希望有的化学反应，甚至会使摩擦界面的粒子分布均匀，连接伴随界面挤压和推出形成。对于金属基复合材料的连接，由于增强粒子显著增加了金属基复合材料流动应力，所以所加力要高于传统合金。

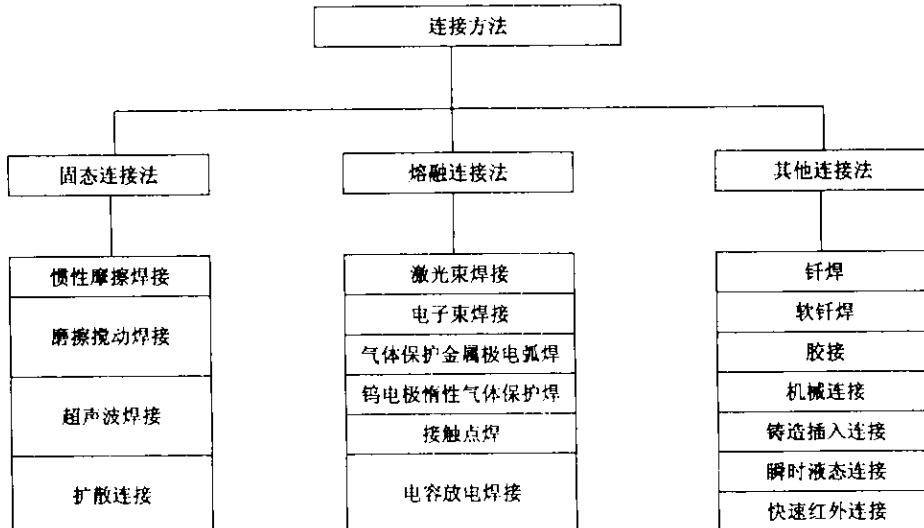


图 1.2.8.4.3 MMC 连接方法的分类

#### 1.2.8.4.3.2 摩擦搅动焊接 (FS)

摩擦搅动焊接是一种特殊的传统摩擦焊接，由英国焊接研究所于 1991 发明（文献 1.2.8.4.3.2(a))。即使对于单一材料的焊接，它们也是一种比较新的技术，虽然这一技术仍处在发展阶段，但对不同材料间连接和金属基复合材料的连接具有相当潜力（文献 1.2.8.4.3.2(b) 和(c))。

在摩擦搅动焊接中，为了防止连接面被强迫分离，要连接的零件被夹持在支承板上，一个特殊的圆柱形剖面的工具旋转并慢慢进入连接线通过摩擦生热在工具周围产生一个材料塑性区。当工具沿焊接方向连续旋转并朝焊接方向慢慢移动时，工具周围的塑性材料被迫从正面移到背面，因而形成一条坚固的焊缝。摩擦搅动焊接是能够保持存在于基体的增强材料化学性质和均匀分布的固态焊接法。该焊接法在低于基体材料熔点的温度进行，所以减小了基体和增强体发生化学反应的可能。适当的固定是需要的，对于金属基复合材料，由于增强粒子显著增加了金属基复合材料流动应力，所以所加力要高于传统合金。摩擦搅动焊接的工具要由高强、高耐磨性和高韧性材料制造。

#### 1.2.8.4.3.3 超声波焊接 (US)

超声波焊接是焊接件在很高的夹持力作用下表面的基体没有明显熔化时用高频振动形成焊接点的连接。与摩擦焊接相比，超声波焊接在连接局部处有很高的局部塑性变形，超声波焊接是一种机械熔接，也许不能给一些金属基复合材料提供足够的局部塑性变形。然而超声波焊接时产生较低的热能，不会导致不需要的增强体与基体间的化学反应。对于一些连续纤维增强的金属基复合材料，夹持压力能导致纤维损伤和表面分层。另一方面，如果为了减小复合材料的损伤而减小夹持力，那么焊接将不起作用。高频振动的剪切作用会

引起纤维束损伤(文献 1.2.8.4.3.3(a)和(b))。通常传统的超声波焊接是低温工艺,对于 MMC 连接只有有限的应用。

#### 1.2.8.4.3.4 扩散连接 (DFB)

扩散连接是一种固态工艺,它通常指商业名称如激活扩散连接 (ADB) 和激活扩散愈合 (ADH)。每一情形的结果实际上是扩散连接。DFB 的关键是必须发生金属填充物的广泛扩散渗入基体金属,它只有在正确的准备和洁净时才能达到。由于这个原因, DFB 工艺通常会去除原始连接界面。在 ADB 中,选择 MMC 和金属填充物时必须考虑其化学相容性以防止液态金属脆化 (LME) 现象。如果没有遇到液态金属脆化 (LME) 现象, ADB 可以为高温应用产生高的连接强度。时间和温度必须控制在最小,以控制形成不需要的化学反应产物。连接性能取决于材料, DFB 连接可以提供高的导电和导热率。DFB 一般应用于热转换器,如热管、翼片、散热器、热交换器。但是高温 DFB 可能会降低一些 MMC 的力学性能并可能产生一些结构热变形 (文献 1.2.8.4.3.4(a)-(b))。

#### 1.2.8.4.3.5 激光束焊接 (LB)

激光束焊接是一种快速热连接过程,它会使增强体的重新分布减到最小并得到非常细小的金属基体晶粒。LB 焊接把热能聚汇成一束窄的光束导致了窄的焊缝和热影响区。高热熔化区的微结构分析表明一些增强体如碳化硅和石墨已经完全反应并形成金属碳化物相。另一些增强体类型如  $B_4C$  和  $Al_2O_3$  不会出现类似的问题。试验数据表明相对于金属基体激光能优先被 MMCs 中的非金属增强体吸收。因此对于含有 SiC、碳、石墨的大多数 MMC 材料使用激光焊接很难获得好的机械连接 (文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.4(a))。

#### 1.2.8.4.3.6 电子束焊接 (EB)

该技术通常需要电子束设备和聚焦设备以及置于真空室的工件。对 MMCs 材料, EB 的焊接质量与 LB 焊接获得的质量有点相似。EB 和 LB 焊接工艺都是能提供很快的热循环和局部加热的熔融工艺。与可以在空气中操作的 LB 相比, EB 焊接由于需要真空所以设备比较复杂。电子束移动更快和聚焦更小会倾向于产生较少的碳化铝相。通常在相同的焊接速度下, EB 焊接比 LB 焊接产生较少的不需要的相。用碳化硅增强的铝基和钛基 MMC 使用 EB 焊接已得到有限的成功 (文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.6)。然而,通过使用高速可控温度的自动焊机可以改善连接质量。

#### 1.2.8.4.3.7 钨电极惰性气体 (GTA) 保护焊

GTA 是弧焊接工艺,这时在一个钨电极和工件间产生电弧。如果使用填充金属则预置于焊缝或在焊接时从外部填入弧中。弧焊接涉及到母体材料显著的熔化。因此,通常会观察到 MMC 的性能和微结构的降级。一般来讲, GTA 很难应用于连续纤维增强 MMC。然而对于非连续增强 MMC, GTA 焊接提供了商业可行的连接方法。在这些体系中使用 GTA 可以很容易产生对接接头而不是搭接接头 (文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.7)。

#### 1.2.8.4.3.8 气体保护金属极电弧焊 (GMA)

除了使用可消耗填充金属电极 (单一合金或者 MMC) 而不是钨电极外, GMA 是类似于 GTA 的弧焊接工艺。可消耗金属电极通过焊枪填入并在焊缝处填充金属。GMA 焊接工艺是高速度自动焊接,并被证明比 GTW 焊接更适合于 MMC 的焊接。对非连续增强体, GMA 焊接已被证明对氧化铝颗粒增强的 MMC 与铝的连接是相当成功的 (文献 1.2.8.4.3.4(b) 和 1.2.8.4.3.8)。对于多层焊接,需要去除表面污物和对 MMC 除气以便减少热影响区的孔

隙率和缺陷。GMA 焊接工艺为 MMC 提供了商业可行的连接方法。

#### 1.2.8.4.3.9 电阻点焊 (RS)

这是施加短时低电压高电流在连接界面产生热的焊接过程。在通电过程中施加载荷以确保连续的电接触并使加热零件锻在一起形成连接。对于 MMC，RS 焊接电流较小，这是由于非金属增强体的存在使体电阻大于纯金属基体。因为热输入是局部的，RS 产生最少的不需要的反应。对于一些连续增强的 MMC，夹持压力可能导致增强纤维迁移到焊接体，由于纤维束和板表面间的剥离强度的提高使焊接体内的增强物起到有益的作用。然而，纤维迁移通常不可预测并可能导致复杂的应力分布。控制焊接体开裂的重要的 RS 焊接参数是电流密度、夹持力、构件间的接触时间和后锻循环（文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.6）。

#### 1.2.8.4.3.10 电容放电焊接 (CD)

CD 在通过直接电流接触把热能引入工件的方式上类似于电阻焊接。在 CD 焊接中，热能是通过在加载时电容快速放电来引入。这能确保连续的电流并把加热零件锻在一起形成连接。因为电容放电速率快（在 5-25  $\mu$ s 的数量级），该工艺会比界面电阻点焊 (RSW) 产生较少的反应和提供较好的性能。在 CD 焊接过程中，从界面排出熔融金属是普遍的并必须在选择该方法时考虑该问题。CD 焊接的试验工作已经表明对几种类型的碳化硅铝 MMC，可以消除碳化铝化合物的形成（文献 1.2.8.4.3.10）。

#### 1.2.8.4.3.11 钎焊 (BZ)

两种最普遍的钎焊方法是真空炉钎焊和浸渍钎焊。真空炉钎焊只限于在钎焊循环中可以在表面施加大压力的平板间的焊接。浸渍钎焊使用焊剂，最适合自组装焊接。所有的钎焊过程都发生在高温，高温会引入结构热变形。在高温时过长时间的接触会由于形成了有害相而导致连接性能的降级。在钎焊铝 MMC 时要先除掉表面氧化物。必须考虑 MMC 和钎焊合金的化学相容性以防止出现液态金属脆化 (LME)。钎焊由于使用了薄的金属填充材料可以提供较好的电导率和热导率。钎焊方法一般应用于热器件，如热管、散热器和热交换器的连接（文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.11）。

#### 1.2.8.4.3.12 软钎焊 (SD)

与钎焊、DFB、熔焊相比，软钎焊是一种相对低温的连接方法，但是会导致很低的连接强度。然而，低的加工温度会有益于尺寸稳定构件的加工。低温软钎焊不会降低已经热处理的铝 MMC 的性能。在金属基体上形成的强韧氧化层必须除去以保证焊剂和基体金属的冶金连接。通常使用具有高度腐蚀性的焊剂来提高表面润湿性。在去除这些化学焊剂时必须小心，因为如果把它们留在连接中，能够引起电化学腐蚀和液态金属脆化。应使用带有焊剂去除技术的软钎焊或者无焊剂软钎焊工艺（文献 1.2.8.4.3.4(a) 和 1.2.8.4.3.12）。

#### 1.2.8.4.3.13 胶接 (AB)

该技术在连接时提供了最低的对 MMC 的潜在破坏。当使用 AB 工艺连接时，不会遇到与连接 MMC 有关的 LME 和金属腐蚀效应。大多数胶粘剂的固化温度在 350°F (180°C) 以下，胶接可以应用于已经过热处理的铝 MMC。通常，采用标准的胶接工艺和适当的 MMC 表面处理可以获得强连接。对于所有的胶接应用，需要考虑胶粘剂的除气。如果光学镜面和光敏感设备安放在 MMC 胶接结构上，由于真空排气可能会受到污染。胶接技术不适合用于要求高的电流和热通过的连接界面。MMC 结构上的高导电接头更可能通过使用带有薄金属填充物的软钎焊、钎焊、扩散连接来达到（文献 1.2.8.4.3.3(b) 和 1.2.8.4.3.4(a)）。

#### 1.2.8.4.3.14 机械连接 (MF)

该连接方法使用非熔化方法如金属嵌入物、螺栓、螺帽和紧固件。虽然机械连接容易实施，但也存在一些缺点。例如，由于 MMC 和紧固件间的热膨胀差异导致 MMC 在高温应用时对热应力很敏感。紧固件孔相对于复合材料板边缘和角的尺寸和位置必须仔细选择，以防止在加工紧固件孔时板的边缘撕裂问题。在打孔穿过复合材料时，尽量减少临近的纤维损伤是很重要的。对于非连续纤维增强 MMC，MF 不会遇到板的分层和边缘撕裂问题。然而，为了防止由于紧固件过紧而导致的分层和变形应该选择合适的紧固件尺寸和拧紧力距。机械连接不推荐用于小变形、高尺寸稳定的结构和高刚度 MMC 构件间的装配（文献 1.2.8.4.3.14(a) 和(b)）。DRMMC 具有很高的销钉挤压强度，适合于机械连接。

#### 1.2.8.4.3.15 铸造镶嵌件连接 (CI)

铸造镶嵌件连接是用 MMC 构件内植入金属镶嵌件为传统技术提供连接的近无余量成形方法。此外，镶嵌件可以设计成传递外加载荷到纤维增强体，使铸造 MMC 结构更坚固。金属镶嵌件的热膨胀必须和 MMC 铸造件相匹配以减小铸造热应力（文献 1.2.8.4.3.15）。

#### 1.2.8.4.3.16 过渡液相连接 (TLP)

过渡液相连接是利用填充材料在连接的界面产生临时液层的连接方法。由于接头的连接是扩散的结果，必须从连接区域去除表面氧化物以促进润湿。这种连接方式通常需要加压来改善中间层和基底的接触。加工时间和温度必须最小化以减少对微结构的损伤。通常接头的质量与材料有关。过渡液相连接接头可以提供高的电导率和热导率。然而，高温 TLP 连接可能降低某些 MMC 的力学性能并导致结构热变形。碳化硅和氧化铝颗粒增强的铝基 MMC 的 TLP 连接已经被证实（文献 1.2.8.4.3.16(a) 和(b)）。

#### 1.2.8.4.3.17 快速红外连接 (RIJ)

这是一种相对较新的连接工艺，它的加热和冷却速率在  $212^{\circ}\text{F/s}$  ( $100^{\circ}\text{C/s}$ ) 的数量级。如此快速的热输入速率可以减少由于连接时过长时间加热产生的不利影响。该技术被发展用于使过渡液相连接高温钛 MMC 的加工时间降到最低（文献 1.2.8.4.3.17）。快速红外加工需要将带有金属填充物的 MMC 零件置于有适当连接配置的特殊红外炉。在整个 RIJ 过程中，惰性气体如氩气从加热室净化以防止氧化。在连接之后，MMC 置于保护性大气中自然冷却。与大多数扩散连接相似，RI 可以提供高的电导率和热导率。

#### 1.2.8.5 热处理

此节留待以后补充。

#### 1.2.8.6 涂层和表面处理

此节留待以后补充。

### 1.2.9 质量保证

#### 1.2.9.1 组分

此节留待以后补充。

#### 1.2.9.2 预成形件

此节留待以后补充。

### 1.2.9.3 最终产品

此节留待以后补充。

### 1.2.9.4 统计过程控制

此节留待以后补充。

## 1.2.10 修理

### 1.2.10.1 在加工中

此节留待以后补充。

### 1.2.10.2 在服役中

此节留待以后补充。

## 1.3 材料表征试验计划

### 1.3.1 引言

#### 1.3.1.1 目标

本指南的目的是为 MMC 体系建立 A 基准、B 基准、S 基准力学性能时手册所需的最少数据量提出一些建议。这些建议包括复合材料的最终形式、组分和中间形式。

复合材料的优点之一是可剪裁它们的性能来满足具体应用的设计准则。由于这个原因，下面的建议为选择可用的试验矩阵和试件数量提供了灵活性。然而，仍需保持每个部件在预期的温度和应力范围内所有关键方位上的统计有效数据。

推荐了要给出的具体最终应用的数据，即使它仅包括本手册中定义计划的一小部分。通常，表列以外的试验也要完成，该数据提供了有用的信息应该通报。在使用不参照本手册内的试验方法时，试件和试验方法应该详细描述。

#### 1.3.1.2 数据分类

对于提交供可能发布的材料性能数据分为下面描述的两类 MIL-HDBK-17 数据，并要对 1.3.4.2 和 1.3.5.2 节讨论的性能、检查材料和工艺（1.2.6 节）、采样（1.3.2 节）、试验方法（1.4 节）和数据文档（1.3.2.5 节）要求是否得到满足。出现于本手册的 B 基准值仅是完全接受的数据。（如果有足够的数据，A 基准值也能给出）。MMC 的两类 MIL-HDBK-17 数据是：

- **正式批准的数据：**满足最严格的总体采样标准（1.3.4.2 和 1.3.5.2）、数据文档（1.3.2.5）和试验方法要求的以统计为基础的材料性能数据。
- **筛选数据：**任何提交不完全满足要求的数据被定义为筛选数据。最小的数据和文档要求由数据评估组逐项给予决定。

### 1.3.2 要求

#### 1.3.2.1 方法选择

当提交数据给 MIL-HDBK-17 考虑包括在本手册的第 3 章时，具体的试验方法准则的

使用基于下面的概念。理想的情况，一个试验方法应该经历由独立的自愿组成的标准组织（可以包括来自材料供应商、最终用户、学术界或政府的代表）来进行严格的适用性、精度和偏差评估。该评估和试验方法应该在可供参考的公开文献出版物查到，并包括不同实验室间的比较试验（round robin）。提交数据时经常得不到满足上述准则的试验方法，则必须选择不太严格满足标准的方法（下列 2）。

当提交数据给 MIL-HDBK-17 考虑包含在本手册的第 3 章时，MIL-HDBK-17 MMC 的协调组已经认同所使用的具体试验方法。

这些方法在 1.4-1.10 节说明并满足下列准则中的一个或多个。

1. 用于先进复合材料和共同使用的试验方法，要完成以下试验
  - 在公认的标准制定组织的资助下进行不同试验室间的比较试验（round robin）
  - 精度和偏差的严格评估
  - 在公认的标准制定组织的公开文献中出版
2. 对于具体的结构或工艺/产品形式尚没有满足以上准则的标准时，由意见一致的 MIL-HDBK-17 MMC 协调组来选择其他试验方法。该方法已经由 MIL-HDBK-17 工作组或其他组织开发出来并已开始标准化进程。

用来产生提交数据的试验方法必须满足手册的建议，然后才能进行试验。

### 1.3.2.2 试验条件选择

试验条件选择由许多因素决定。一般讲，最好在材料的实际使用条件下进行试验。然而在每一使用条件下进行试验成本高并且时间上不允许，因此必须要在材料的可用范围内折衷，使试验最少。这通常要在材料应用的极端条件下进行试验，并允许用户在这些材料应用的极端条件间进行内插，这就假设性能在极端条件之间有线性关系。但是实际不是总是如此，因为有时观测到的是局部极小值或者局部极大值（例如韧性最小值）。如果这样的反常发生，那么需要在这些条件下进行额外的试验。

除了使用条件还有其他目的可能影响试验条件的选择。如果进行的试验是为了表征一个模型，那么具体模型应该规定试验类型和进行试验的条件。试验有时在超越有用的材料性能范围进行，目的是理解材料在极端使用（即超载、过热等）条件下的材料行为。因此材料可能在使其承受过量的蠕变、塑性变形、氧化或其他形式损伤的条件下进行试验。过量的试验不应该在材料名义上是弹性的、没有施加热影响或有限累积损伤这样的范围内进行。

### 1.3.2.3 试件数和采样

**概要：**金属基复合材料体系设计许用值的产生通常意味着合并了取自不同批次、不同位置或甚至稍有不同的工艺的试验数据。为了计算的目的，母体的定义必须有足够的限制以确保计算的设计变量是真实和有用的。对于同类母体的数据合并不应该包括多于一种纤维和基体组分的复合材料体系、热处理状态、试验温度、纤维取向、纤维体积含量和试验方法。然后进行合并数据的统计分析来证明它们来自同一母体。最后与取证机构讨论后，或对 MIL-HDBK-17，由数据评估组作出结论。

#### 连续纤维增强金属基复合材料的采样

对于所有连续纤维增强的金属基复合材料，试件应该从每一板材中取出以确保整批或整组的性能均一性。试件应该从板材上随机选取以精确代表其余的材料。需要至少从每

$6 \times 6$  in ( $15 \times 15$  cm) 或更小板料中取出一个试件。对于大于  $6 \times 6$  in 的复合材料板至少取出两个试件。试验方法的选取应征得制造方和最终用户一致同意，对于这样的筛选试验经常采用拉伸或低周疲劳。这些筛选试验的试验要求概述于本手册的 1.3.3 和 1.3.4 节。

#### 1.3.2.4 试件制备

本部分描述复合材料试验件的机械加工。为了表征这些当代最先进的材料行为，这些试验件要经受循环和单调载荷，然后用材料的力学性能来表征模型和为设计提供数据，因此不得在加工过程中引进任何会对材料性能产生有害影响的损伤。

这些材料通常以大约一平方英尺大小平板形式提供。如果试件是以前由它们加工出来的，那么部分板可能会被交付。板的厚度从 0.04 in (0.1 cm) (4 层复合材料) 到 0.30 in (0.8 cm) (32 层复合材料)。这些材料十分昂贵 (大约 \$10 000/ft<sup>2</sup>)，并且从订货到交货需要很长的时间，因此要注意在没有失误和材料浪费最小的情况下，从板中获得高质量的试件。由于这些材料的不均匀性 (即硬的陶瓷纤维和软的基体) 和极度各向异性，所以它们很难加工。板在加工中由于很高的残余应力 (由于纤维和基体的热膨胀系数不匹配、不规则的铺层即纤维没对齐、基体层不均匀) 通常有点翘曲。由于这些原因，传统的机械加工方法不适用。非传统加工方法已经成功地应用于这些材料。

这些材料通常有三种机加方式：电火花线切割、磨蚀高压水切割、或金刚石切割/磨削整个试件。这些方法已经成功应用于较薄的材料 (8 层或更少)。对于较厚的材料，磨蚀高压水切割没有足够的力切透整个材料并保持精确的几何形状，因此必须使用其他机加方法。所选择的机加方法应贯穿在整个试验程序中，如果可能的话，要消除机械加工成为数据中的潜伏变量。

当制备  $0^\circ$  试件时，必须要小心以确保纤维平行于试件轴。同样当制备具有偏轴或正交纤维时，也应保持试件轴和预期取向一致。过大的偏离会导致力学性能的误差。通常偏离允许值是  $\pm 1^\circ$ ，取向上较大的偏差应该通报。

如果损伤出现在工作段 (是机加表面) 的边缘，或者因为它太粗糙而无法支持引伸计，太不规则而难以得到横截面积的精确测量值，或者因为机加损伤会影响试验结果，这时可在试件工作段和过渡段切割时留有大约 0.020 in (0.050 cm) 的余量，然后用金刚砂轮磨削到最终尺寸。最终的磨削路径应该取纵向 (即加载方向) 以避免引起初始划痕损伤 (裂纹)。

试件边缘 (机加表面) 可以被抛光以便通过光学或复型方法来观察裂纹。试件的表面是由在外面多个纤维层上面的一层基体材料构成，它通常不用以任何方式处理。这是因为基体表面层通常很薄，处理会使纤维暴露在表面，这可能损伤纤维或者至少为环境进入材料 (SCS-6 纤维的涂层是氧的扩散通道) 提供了方便。无论出现那一种情况都会损害力学性能。然而，在疲劳和疲劳裂纹扩展试验中需要抛光以便检测基体裂纹。如果需要对试件表面抛光，应该小心地去除最少的基体材料。轻抛光可以按下列步骤进行：320、400 然后是 600 粒度的磨削纸磨削，接着用 6  $\mu\text{m}$  和 3  $\mu\text{m}$  的金刚砂磨削膏磨削。

图 1.3.2.4(a) 中给出了典型的机械加工实例，试件的几何尺寸在图 1.3.2.4(b) 中给出。该试件是用来单向加载。它的形状来源于有限元分析，通过最小化和分离剪切与轴向应力集中 (发生在圆弧和工作段的过渡区) 来防止过渡区破坏 (文献 1.3.2.4(a))。该几何形状在 ASTM D 3552-77 的修订版 (最新修订版为 ASTM D 3552/D 3552M-96) “纤维增强金属基复合材料拉伸性能试验方法” 中给出，它与推荐的单向复合材料试件的设计一样。也可使

用其他的几何形状。图 1.3.2.4(c)展示了一个成功应用的狗骨状试件，其附加的优点是用材较少。试件设计恰当的关键是试件必须在工作段破坏，如果破坏频繁发生在过渡区、圆弧段或夹持区，那么从这些试件中获取的数据应标记为可疑的，并要寻找新的试件几何形状。

对于包含偏轴层的试件，还有额外的因素来决定试件工作段的长度/宽度。一项研究表明当偏轴纤维起始或结束在圆弧段和夹持部分，均对试件产生附加约束，至少影响在室温下的拉伸性能（文献 1.3.2.4(b)）。因此，虽然工作段宽度可以保持与单向试件宽度一样，但工作段的长度-宽度尺寸选取必须使得只有很少的纤维由工作段端起始而在圆弧或夹持端结束。换句话说，处于工作段的纤维应该开始和结束于直的工作段。根据纤维相对于试件轴的倾斜度，可能需要较长的工作段。

试件通常需要热处理，或是时效原位基体，或是模拟部件可能经历的热机械处理。热处理应在机加之后进行有几个原因，首先，热处理有助于释放机加残余应力；第二，一次只对少量试件进行热处理，如果热处理有问题，那么只有少量试件损毁而不是整个板；最后由于在复合材料中存在很高的残余应力，当把试件从板上割下来时试件可能翘曲。这可以通过试件随后的热处理中加重物使试件蠕变变平来解决。应该注意到由于在复合材料中存在很高的残余应力，最初的平试件从热处理炉出来后不再是平的。在某些情况下，已经观察到试件严重弯曲和翘曲以致报废。在热处理中对试件加重物可以解决该问题。

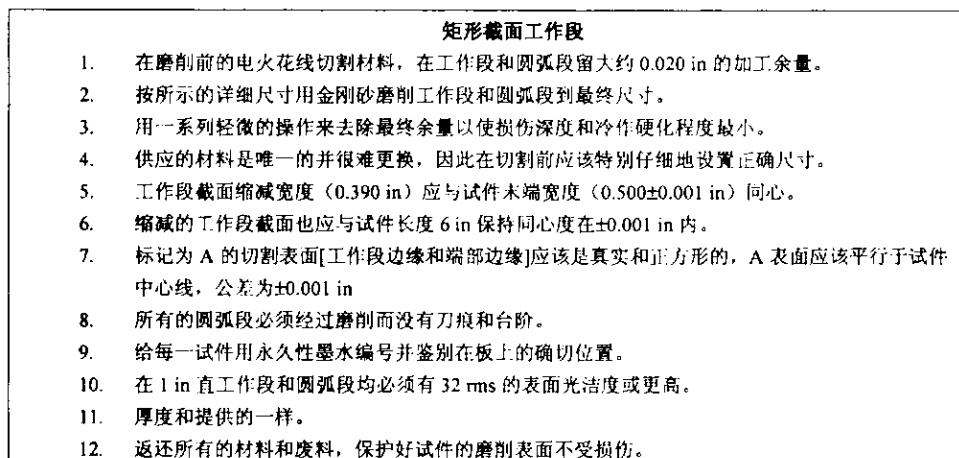
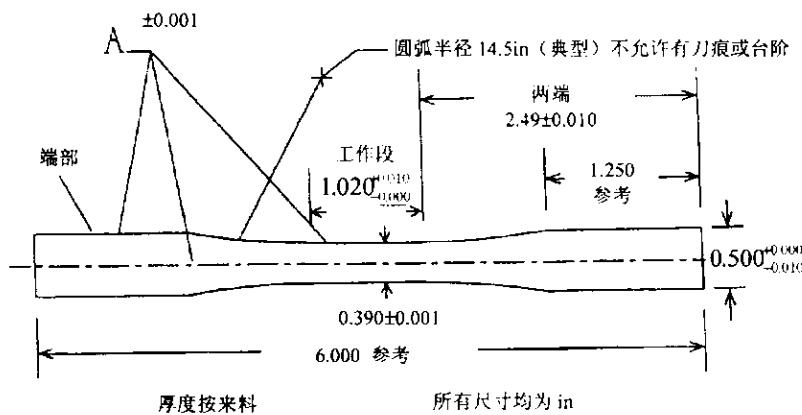


图 1.3.2.4(a) 机加细则



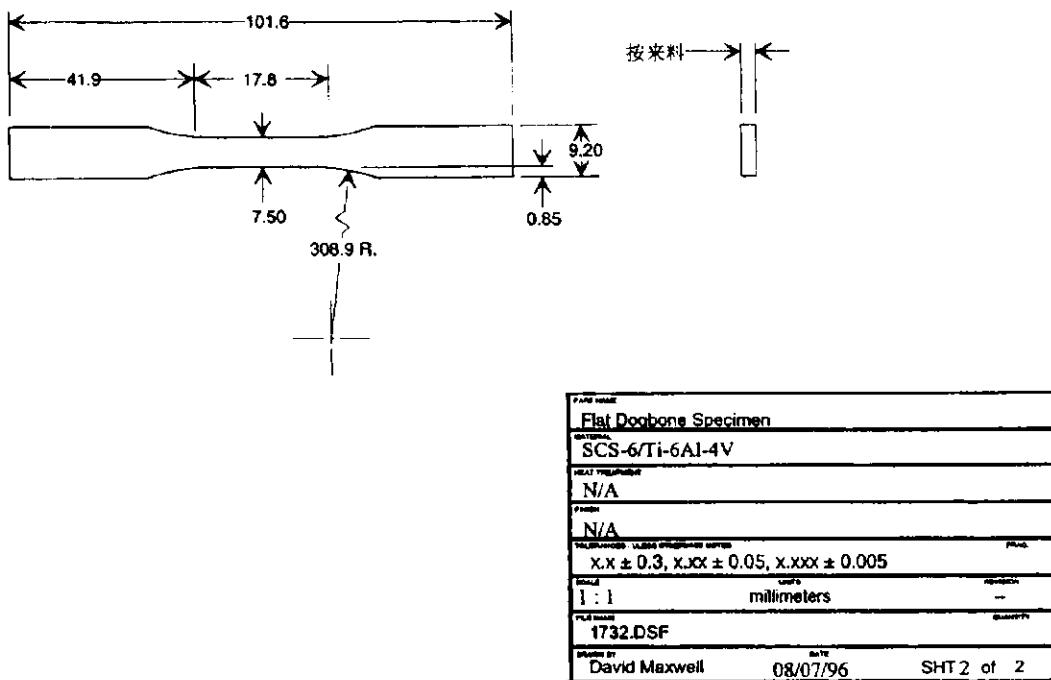


图 1.3.2.4(c) 平狗骨状试件

### 1.3.2.5 数据文档要求清单

#### MIL-HDBK-17 (MMC's)

##### 数据文档要求清单

材料名称: \_\_\_\_\_ :

数据提交者: \_\_\_\_\_ :

提交日期: \_\_\_\_\_

数据满足 MIL-HDBK-17 对正式批准数据的要求吗? 是 \_\_\_\_ 不是 \_\_\_\_

对于正式批准数据, 必须履行列于第四卷 1.3.4 节 (连续纤维增强金属基复合材料) 或 1.3.5 节 (非连续纤维增强金属基复合材料) 的要求。此外, 为了满足手册的完整文档要求, 下面标有箭头的项目必须以提交者的数据表或本清单为准, 否则, 没有提供那些带有箭头的数据, 就会被视为筛选数据。

名称 (POC): \_\_\_\_\_

组 织: \_\_\_\_\_

电 话: \_\_\_\_\_

##### 材料识别

→ 增强体 ID \_\_\_\_\_

→ 基体 ID \_\_\_\_\_

→ 连续或非连续 \_\_\_\_\_

##### 增强体信息

→ 形状 (纤维、晶须、颗粒等) \_\_\_\_\_

→ 商业名称 \_\_\_\_\_

→ 制造商 \_\_\_\_\_

→ 化学组成 \_\_\_\_\_

<input type="checkbox"/> → 芯材 (如果连续)	_____
<input type="checkbox"/> → 加工方法	_____
<input type="checkbox"/> → 直径	_____
<input type="checkbox"/> → 名义密度	_____
<input type="checkbox"/> → 批号	_____
<input type="checkbox"/> → 加工日期	_____
<input type="checkbox"/> → 名义单丝数 (如果可用)	_____
<input type="checkbox"/> → 纤维排列材料 (正交机织)	_____
<input type="checkbox"/> → 纤维, 丝束或纱数 (per inch)	_____
<input type="checkbox"/> → 形状比 (如果非连续)	_____
<input type="checkbox"/> 形状 (如果非连续)	_____
<input type="checkbox"/> → 尺寸分布 (如果非连续)	_____
<b>基体信息</b>	
<input type="checkbox"/> → 基体成分	_____
<input type="checkbox"/> → 基体供应商	_____
<input type="checkbox"/> → 基体 Heat No.	_____
<b>压固工艺信息</b>	
<input type="checkbox"/> → 制造商	_____
<input type="checkbox"/> 制造日期	_____
<input type="checkbox"/> → 加工顺序描述	_____
<input type="checkbox"/> → 加工温度/压力/时间	_____
<b>复合材料信息</b>	
<input type="checkbox"/> → 产品形式	_____
<input type="checkbox"/> → 材料批号/序列号/零件号	_____
<input type="checkbox"/> 产品形式维数	_____
<input type="checkbox"/> → 增强体体积含量	_____
<input type="checkbox"/> → 铺设&层数 (如果可用)	_____
<input type="checkbox"/> → 名义密度 (g/cc)	_____
<input type="checkbox"/> → 空隙含量 (如果铸造加工)	_____
<b>试件信息</b>	
<input type="checkbox"/> → 机加方法	_____
<input type="checkbox"/> → 试件几何形状	_____
<input type="checkbox"/> → 试件整个尺寸	_____
<input type="checkbox"/> → 表面状况	_____
<input type="checkbox"/> → 试件取向	_____
<input type="checkbox"/> → 试验前的曝露	_____
<input type="checkbox"/> → 加强片方法 (如果可用)	_____
<b>力学试验</b>	
<input type="checkbox"/> → 试验类型	_____

- 试验方法/过程  
 → 试件数  
 → 工作段长度  
 试验日期  
 → 试验温度  
 → 试验环境  
 → 失效模式和位置

注：→表示对所有文档要求。

#### 静力性能文档

对于静力性能，要为每一个试件以表格形式提供下列信息(电子表格)，数据表格模板由 MIL-HDBK-17 的秘书处提供。

- |   |   |
|---|---|
| <input type="checkbox"/> 试件号                              | <input type="checkbox"/> 极限强度 ( $F^u$ ) (ksi)     |
| <input type="checkbox"/> 纤维体积含量 %                         | <input type="checkbox"/> 延伸率 ( $\epsilon^f$ ) (%) |
| <input type="checkbox"/> 批 I.D. (板号.)                     | <input type="checkbox"/> 横截面面积缩减率 RA (%)          |
| <input type="checkbox"/> 试验温度 (°F)                        | <input type="checkbox"/> 工作段长度 (in)               |
| <input type="checkbox"/> 应变率 (1/s)                        | <input type="checkbox"/> 工作段直径 (in)               |
| <input type="checkbox"/> 模量 (E) (Msi)                     | <input type="checkbox"/> 工作段宽度 (in)               |
| <input type="checkbox"/> 比例极限 (ksi)                       | <input type="checkbox"/> 工作段厚度 (in)               |
| <input type="checkbox"/> 0.2%时的屈服强度 ( $F^{y0.02}$ ) (ksi) |   |

此外，数据提交者应该为每一个试件提供所有容易得到的信息，如果需要的话可以在标准表格的右侧添加额外的列。示例信息如下：

- |                                  |  |
|----------------------------------|--|
| <input type="checkbox"/> 试验日期    | <input type="checkbox"/> 试件尺寸 (in)               |
| <input type="checkbox"/> 失效位置    | <input type="checkbox"/> 横截面积 (in <sup>2</sup> ) |
| <input type="checkbox"/> 失效模式    | <input type="checkbox"/> 泊松比 (ν)                 |
| <input type="checkbox"/> 应力-应变曲线 |  |

#### 疲劳性能文档

对于疲劳性能，要为每一个试件以表格形式提供下列信息(电子表格)，数据表格模板由 MIL-HDBK-17 的秘书处提供。

- |  |   |
|--|---|
| <input type="checkbox"/> 试件号                                   | <input type="checkbox"/> 最大应力和最小应力: $\sigma_{max}$ 和 $\sigma_{min}$ (ksi)     |
| <input type="checkbox"/> 纤维体积%                                 | <input type="checkbox"/> 应力比, $R_\sigma$ ( $\sigma_{min}/\sigma_{max}$ )      |
| <input type="checkbox"/> 批 I.D. (板 No.)                        | <input type="checkbox"/> 最大应变和最小应变: $\epsilon_{max}$ 和 $\epsilon_{min}$       |
| <input type="checkbox"/> 试验温度 (°F)                             | <input type="checkbox"/> 应变比 $R_\epsilon$ ( $\epsilon_{min}/\epsilon_{max}$ ) |
| <input type="checkbox"/> 控制参数率 ( $\epsilon$ , $\sigma$ , $f$ ) | <input type="checkbox"/> 失效循环次数, $N_f$  |
| <input type="checkbox"/> 试验前模量, (E) (Msi)                      | <input type="checkbox"/> 工作段长度 (in)   |
| <input type="checkbox"/> 初始加载模量, ( $E_{Nf}<1$ ) (Msi)          | <input type="checkbox"/> 工作段直径 (in)   |
| <input type="checkbox"/> 半寿命模量 ( $E_{Nf}/2$ ) (Msi)            | <input type="checkbox"/> 工作段宽度 (in)   |
| <input type="checkbox"/> 波形                                    | <input type="checkbox"/> 工作段厚度 (in)   |

此外，数据提交者应该为每一个试件提供所有容易得到的信息，如果需要的话可以在标准表格的右侧添加额外的列。示例信息如下：

- |                               |   |
|-------------------------------|---|
| <input type="checkbox"/> 试验日期 | <input type="checkbox"/> 试件尺寸 (in)                |
| <input type="checkbox"/> 失效位置 | <input type="checkbox"/> 横截面面积 (in <sup>2</sup> ) |
| <input type="checkbox"/> 失效模式 |   |

### **1.3.3 材料谱系**

当提交数据到手册时需要完整的谱系信息。目的是建立起有效的制造商材料体系的物理、化学和力学性能数据库。这一要求对把数据包括到 MIL-HDBK-17 中提供理由是必要的。文档要求确保了数据库的建立过程完整的可追溯性和控制，这一过程包括从材料生产到采购、制造、机加、热处理、测量和试验。

提交的数据必须包括完整的数据文档清单（文献 1.3.2.5 节）。使用的试验方法必须满足提交时手册的推荐。清单中的所有项目都要得到。标有箭头的项目用于正式批准。所有信息对于秘书处来说应该可以追溯和得到。数据文档清单是基于复合材料级力学性能试验所必需的信息。对其他试验或材料级别所需信息与之类似。

#### **1.3.3.1 增强体**

此节留待以后补充。

#### **1.3.3.2 增强体尺寸**

此节留待以后补充。

#### **1.3.3.3 增强体涂层**

此节留待以后补充。

#### **1.3.3.4 基体**

此节留待以后补充。

#### **1.3.3.5 中间形态表征**

此节留待以后补充。

##### **1.3.3.5.1 喷涂金属的纤维**

此节留待以后补充。

##### **1.3.3.5.2 单带**

此节留待以后补充。

##### **1.3.3.5.3 不同于单带的薄层**

此节留待以后补充。

##### **1.3.3.5.4 特殊形式**

此节留待以后补充。

#### **1.3.3.6 复合材料**

此节留待以后补充。

### **1.3.4 连续纤维增强 MMC 的组分材料性能**

#### **1.3.4.1 筛选**

#### **1.3.4.2 复合材料的验收试验**

本节推荐用于提交给手册的正式批准数据的试验。该试验矩阵用于复合材料、纤维、

基体材料的数据生成，它们的设计允许进行统计分析和考虑这些材料的各向异性。然而，由于这些材料很昂贵，推荐试验的总数保持为最小。所有的试验都应该遵循手册中给出的试验标准。

#### 1.3.4.2.1 复合材料的静力性能试验

表1.3.4.2.1 复合材料的静力性能试验

试验	纤维方向	批数	每批试件个数	每条件下试验次数
拉伸	L	5	6	30
拉伸	T	5	6	30
压缩	L	5	6	30
压缩	T	5	6	30
面内剪切	L	5	6	30
面内剪切	T	5	6	30
销挤压拉伸	L	5	6	30
销挤压拉伸	T	5	6	30

L是纵向，T是横向

#### 1.3.4.2.2 复合材料疲劳性能试验

表1.3.4.2.2 复合材料疲劳性能试验

试验	纤维方向	批数	应力水平	重复数	每条件下试验次数
高周疲劳	L	3	5	2	30
高周疲劳	T	3	5	2	30
低周疲劳	L	3	5	2	30
低周疲劳	T	3	5	2	30
疲劳裂纹扩展速率	L	3	5	2	30
疲劳裂纹扩展速率	T	3	5	2	30
蠕变/应力断裂	L	3	5	2	30
蠕变/应力断裂	T	3	5	2	30

L是纵向，T是横向

#### 1.3.4.2.3 复合材料热力学性能试验

表1.3.4.2.3 复合材料热力学性能试验

试验	纤维方向	批数	应力水平	重 复	每条件下试验次数
TMF 相内 (IP)	L	2	3	2	12
TMF 相内 (IP)	T	2	3	2	12
TMF 相外 (OP)	L	2	3	2	12
TMF 相外 (OP)	T	2	3	2	12
热循环后拉伸	L	5		6	30
热循环后拉伸	T	5		6	30

L 是纵向，T 是横向

#### 1.3.4.2.4 复合材料物理性能试验

表1.3.4.2.4 复合材料物理性能试验

试验	批数	每批试件个数	每条件下试验次数
热膨胀系数(a)	5	1	每个方向 15min
比热(b)	5	1	5
热导率(a)	5	1	15
电导率(a)	5	1	15
密度(c)	5	1	5
体积含量(c)	5	1	15

(a) 取L(纵向), LT(长度横向)和WT(宽度横向)方向

(b) 只取平行于纤维方向的性能

(c) 性能与纤维方向无关

#### 1.3.4.3 中间形态表征

此节留待以后补充。

##### 1.3.4.3.1 喷涂金属的纤维

此节留待以后补充。

##### 1.3.4.3.2 单带

此节留待以后补充。

##### 1.3.4.3.3 薄层而不是单带

此节留待以后补充。

##### 1.3.4.3.4 特殊形式

此节留待以后补充。

#### 1.3.4.4 组分表征

此节留待以后补充。

##### 1.3.4.4.1 纤维性能试验

表1.3.4.4.1 纤维性能试验

试验	批数	每批试件个数	每条件下试验次数
拉伸	5	30	150
微结构(放大)	5	3	15
化学分析	5	3	15
轴向热膨胀	5	3	15
直径(范围)	5	10	50
密度	5	1	5
电导率	1	1	1
热导率	1	1	1

#### 1.3.4.4.2 基体

表1.3.4.4.2 基体性能试验

试 验	批 数	每批试件个数	每条件试验次数
拉 伸	5	3	15
疲 劳	5	3	15
蠕 变	5	3	15
裂纹扩展	5	3	15
硬 度	5	3	15
微结构(放大)	5	3	15
化学分析	5	3	15
热膨胀系数	5	3	15
密 度	5	1	5
电导率	1	1	1
热导率	1	1	1

### 1.3.5 非连续增强 MMC 和组分材料性能

#### 1.3.5.1 筛选

此节留待以后补充。

#### 1.3.5.2 复合材料的验收试验

此节留待以后补充。

##### 1.3.5.2.1 复合材料静力性能试验

此节留待以后补充。

##### 1.3.5.2.2 复合材料疲劳性能试验

此节留待以后补充。

##### 1.3.5.2.3 复合材料热力学性能试验

此节留待以后补充。

##### 1.3.5.2.4 复合材料物理性能试验

此节留待以后补充。

## 1.4 复合材料试验和分析方法

### 1.4.1 引言

1.4 节介绍了表征金属基复合材料的试验和分析方法。该节的目的就是为建立材料谱系和得到材料性能数据提供标准化的方法和常用的技术。该试验方法和技术代表了用于复合材料工业界的方法。如果有适用的标准就引用已有的；如果没有合适的标准，就建议新的试验方法：它们是现有的一些广泛应用于工业界、学术界、政府相关部门的试验方法。这些试验方法的绝大部分直接来自于单一金属试验所用的方法。然而，在进行金属基复合材

料试验时，由于它们的脆性增强相和其明显的各向异性特性，因此在采用这些方法时应该给予专门的考虑。在许多试验标准中加入了相应的注意事项以使这些标准可以应用于金属基复合材料。

## 1.4.2 连续纤维增强金属基复合材料力学性能试验方法

### 1.4.2.1 拉伸

**概述：**金属基复合材料层压板的拉伸强度试验应该按照 ASTM D 3552/D 3552M “纤维增强金属基复合材料的拉伸性能”（文献 1.4.2.1）进行，同时应采用以下附加要点：

- 破坏部位在离夹持端或者试件加强片一倍试件宽度范围内被认为是“夹持端”破坏，这些数据应被特别标出。
- [0]试件准备过程中应特别仔细以保证纤维排列平行于试件的轴向。同样，准备偏轴或正交铺层的试件时，也要保证纤维在试样轴向符合规定方向。大的偏差会导致强度值和模量值的错误结果。通常 $\pm 0.5^\circ$ 的排列偏差是合乎要求的，偏差更大时需要注明。

### 1.4.2.2 压缩

这个试验程序提供了确定金属基复合材料压缩力学性能的首选方法。现阶段还没有进行压缩性能试验的标准试验方法，但是，已经为金属和聚合物复合材料开发的试验技术已得到了成功的应用。多种试验夹具已被设计用来向试件传递压缩载荷，它们可最大程度地减小由于夹持和偏心所带来的应力集中。这些夹具包括改进的赛拉尼斯（Celanese）夹具、伊利诺斯技术研究学院（IITRI）夹具、Sendekyj-Rolfes 夹具。现在最常用的是 IITRI 试验夹具。

金属基复合材料的压缩试验应按 ASTM D 3410-87（最新版本为 ASTM D 3410/D 3410M-95）“单向或正交铺层纤维/树脂复合材料压缩性能标准试验方法”（文献 1.4.2.2）进行，同时应采用以下附加要点：

- IITRI 压缩性能试验夹具是试验连续纤维增强金属基复合材料的首选试验装置。但是对于直长条的试件应选择合适的尺寸，端部加强片不是绝对需要的。
- 应变计应采用制造商推荐的方法粘贴在试件上。用两个应变计（试件每面一个）来确定每一次试验过程中产生的弯曲变形量。用两个应变计可以提供多余信息，用来解决在试验过程中出现的小问题。由于试件和夹具之间的偏心会造成在试验开始就出现应变读数不同的情况。两个读数值差距的突然拉大，表明试件开始发生屈曲。一个或者两个数据有很明显的不连续说明有夹头/楔形块的滑移。
- 夹具的对中对于金属基复合材料的试验是极其关键的。按以下公式计算的最大许可弯曲应力百分比（PBS）不可以超过破坏应力的 5%。在试验中弯曲应力百分比在 3%-5% 之间时应标明。

$$PBS = ABS((G_1 - G_2)/(G_1 + G_2)) \times 100 \quad 1.4.2.2$$

式中： $G_1$  和  $G_2$  是 1# 和 2# 应变计读数值。

- 破坏部位在离夹持端或者试件加强片一倍试件宽度范围内被认为是“夹持端”破坏，这些数据应被特别标出。

### 1.4.2.3 剪切（面内）

该试验程序是确定金属基复合材料的面内剪切性能的最好办法。金属基复合材料的剪切强度试验应按 ASTM D 5379/D 5379M“用 V 形缺口梁确定复合材料剪切性能的标准试验方法”（文献 1.4.2.3）进行，同时应采用以下附加要点：

- 应变计应采用制造商推荐的方法粘贴在试件上。特别强调在试验过程中用两个应变计（试件每边一个）来确定试验过程中产生的扭曲大小。两个应变计可以提供多余信息，在需要时可以对信息进行平均处理，并能解决在试验过程中出现的小问题。在试验开始时出现两个应变计读数的偏差，说明由于试件和夹具之间不对中造成了试件的扭曲。

### 1.4.2.4 疲劳

#### 1.4.2.4.1 范围

这是金属基复合材料等温疲劳试验标准方法。试验可选用载荷控制或应变控制，并在任何恒定载荷（或者应变）比 ( $R_o$  或  $R_e$ ) 条件下完成。一般，试验应遵从 ASTM E 466（文献 1.4.2.4.1(a)）和 E 606（文献 1.4.2.4.1(b)），以下的注意点也适用：

#### 1.4.2.4.2 试件设计

按照 1.3.2.4 节所推荐的方法设计和准备试件。

#### 1.4.2.4.3 波形

在循环加载中可以用三角波（即线性斜波）或正弦波。可以引入任意不变的加载/卸载速率。加载速率慢容易造成蠕变和组分的应力松弛现象。加载速率大于 10 Hz 时由于纤维与基体界面之间的滑移产生摩擦热。除非材料使用要求这种速率，应避免这样的加载速率。

#### 1.4.2.4.4 控制模式

疲劳试验中可采用载荷或应变控制模式。用载荷控制时，通常试件应变在拉伸方向形成棘齿状，在高的正载荷比和不含 0°层的层压板中尤为明显。

应变控制试验时，在试验过程中通常会出现应力松弛情况，实际上能导致松弛到压缩场的，这会使薄板试件发生屈曲（文献 1.4.2.4.5 节）。如何定义在应变控制下的失效通常也是个问题（文献 1.4.2.4.6 节）。

#### 1.4.2.4.5 压缩加载

金属基复合材料薄板在压缩载荷条件下加载会导致试件的失稳屈曲。这种情形既可能是由于压缩载荷造成的，也有可能是由于在应变控制试验中松弛成压缩场造成的。为了避免屈曲有两个办法：第一就是采用可以承受压缩载荷的厚一点的试件。由于厚复合材料的成本高，不易加工，这或许并不是好的选择。第二种方法就是使用防屈曲导板。导板以最低限度地约束试件的侧面来防止屈曲。该方法已经成功地使用在对称循环载荷作用下的 TMC 薄板试件的试验（文献 1.4.2.4.5(a) 和 (b)）。此外，已经表明在同样的试验条件下，用带防屈曲导板的薄试件和没有防屈曲导板的厚试件有相同的寿命。

值得注意的是对于导向板的不正确的设计既可能造成因为它传递过大的轴向载荷使疲劳寿命增加，或者由于接触面的摩擦磨损而导致疲劳寿命降低。因此，试验者必须确认采用防屈曲导板不会影响试件的疲劳寿命（导板介绍见文献 1.4.2.4.5(c)）。

#### 1.4.2.4.6 失效

试验应该持续到失效发生，用于定义失效的准则必须是明确的。

注意 1：在载荷控制试验中，如果有拉伸载荷，试件的失效是断为两片。因此，通常用断为两片作为失效准则。但是，也可采用其他的失效定义，尤其是在应变控制试验中（文献 1.4.2.4.1(b)举例说明）。

#### 1.4.2.4.7 数据报告

- 在试验过程中要定时用数字和/或模拟记录仪记录应力-应变迟滞循环。
- 对每个试件，均应记录每一个周期最大和最小载荷（或应变，非可控参数）作为循环次数的函数。
- 失效部位和失效准则以及任何不规则裂纹形成的原因（例如热电偶接触点）均应记录。

#### 1.4.2.5 疲劳裂纹扩展速率

##### 概要

此标准可以用带中心裂纹拉伸试件 M(T)，或者单边裂纹拉伸试件 SE(T)来确定复合材料疲劳裂纹扩展速率。疲劳裂纹扩展速率的结果可以用所加应力强度因子循环范围、裂纹长度或者裂纹尖端有效应力强度因子的范围来表示，可以用纤维桥联模型之一，如剪滞模型（文献 1.4.2.5(a)-(c)）、弹簧模型（文献 1.4.2.5(d)），如果在疲劳裂纹扩展试验中已经形成桥联区域扩展，可以采用纤维压力模型（文献 1.4.2.5(e)和(f)）。

这个标准只适用于促进自相似裂纹扩展的复合材料，例如[0], [90], [0/90]纤维铺层。其他种类的纤维铺层，失效形式更加复杂，一般产生于机加缺口附近，形成巨大的微裂纹群、多裂纹、分层和裂纹非自相似扩展。

疲劳裂纹扩展试验应遵循 ASTM E 647 “测量疲劳裂纹扩展速率的标准试验方法”（文献 1.4.2.5(g)）。以下注意点也适用。

##### 试件构型

- 试件厚度由复合材料原料决定，因为可以使用的板状材料通常都不再加工成特定的厚度。别的尺寸由厚度决定，用 ASTM E 647 中给出的公式来计算出试件的尺寸。
- 因为可能在机加孔附近形成局部的挤压失效，建议对单向金属基复合材料试件不要采用直接销钉加载。因此，推荐使用与 ASTM E 647 所述相似的楔形加载夹具。用带中心裂纹拉伸试件 M(T)试验时楔形区域的长度要大于  $0.5W$  ( $W$  为试件宽度)，对于单边裂纹拉伸试件 SE(T)长度为  $W$ 。这一长度的规定主要是为了使楔形夹头夹持试件时有足够大的摩擦力以防止打滑。
- 带中心裂纹拉伸试件 M(T)——用 ASTM E6478 中的标准试件（图 1.4.2.5(a)）作为采用楔形加载夹具进行试验的试件，当夹头间的试件长度大于等于  $3W$  时，采用更宽，更长的夹持区域是合适的。
- 单边裂纹拉伸试件，SE(T)——SE(T)试件（图 1.4.2.5(b)）是在 M(T)的基础上，长度方向切割成一半而成的。两个夹头之间的距离 ( $H$ ) 应大于  $2W$ 。对这类试件，应力强度因子范围 ( $K_{\text{applied}}$ ) 大小对加载方式很敏感。在使用 SE(T)时要特别注意夹持和数据处理。

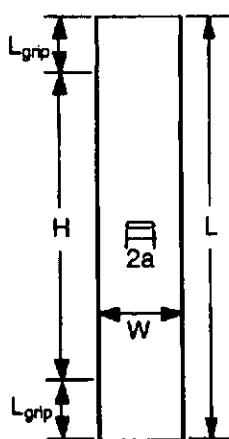
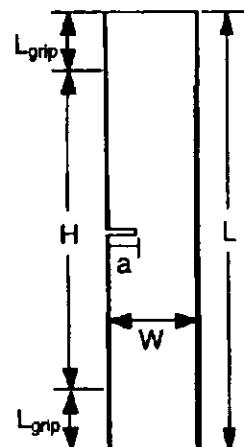


图 1.4.2.5(a) 带中心裂纹拉伸试件 M(T)



1.4.2.5(b) 单边裂纹拉伸试件 SE(T)

销钉载荷通过如图 1.4.2.5(c)所示的 U 形销孔来传递。夹具可以自由转动，形成均匀的应力边界条件。对于销钉加载的单边裂纹拉伸试件，实际的应力强度因子范围 ( $K_{\text{applied}}$ ) 可以通过下方方程式计算得到：

$$\Delta K_{\text{applied}} = \Delta \sigma \sqrt{\pi \alpha} \times F(\alpha) \quad 1.4.2.5(a)$$

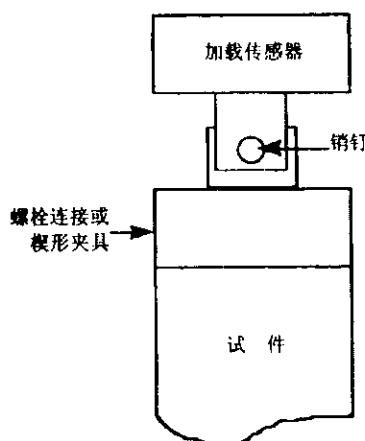
式中  $\Delta \sigma$  表示施加应力范围。

$$F(\alpha) = \sqrt{(2/\pi\alpha) \tan(\pi\alpha/2)} \frac{0.752 + 2.02\alpha + 0.37(1 - \sin(\pi\alpha/2))^3}{\cos(\pi\alpha/2)} \quad 1.4.2.5(b)$$

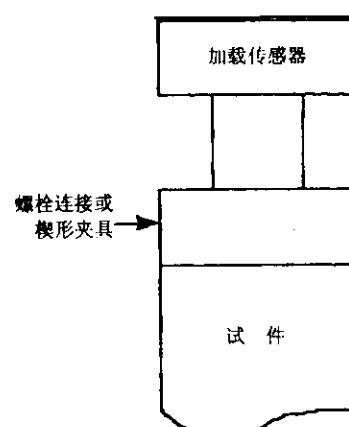
式中  $\alpha = a/W$ ，对于任意的  $\alpha$  表达式，变化在  $\pm 0.5\%$  以内（有效）（文献 1.4.2.5(h)）。

### 夹持传载的 SE(T)

夹持传载的 SE(T) 试件的边界条件不同于销钉承载试件。试件无法转动，由均匀的位移边界条件取代均匀应力边界条件。这种构型中，实际应力强度因子范围  $K_{\text{applied}}$ ，对试件的高度-宽度比 ( $H/W$ ) 很敏感，只有在  $H/W$  值很大时，才和销钉承载形式接近（文献 1.4.2.5(h)-(k)）。在  $H/W$  为 2-10 之间范围时，夹持传载的 SE(T) 中应力强度因子范围  $K_{\text{applied}}$  和裂纹张开位移的计算见文献 1.4.2.5(k)。



1.4.2.5(c) 销钉加载夹持模式



1.4.2.5(d) 刚性夹持模式

## 紧湊拉伸试件 C(T)

在试验单向复合材料时,如果增强体平行于载荷的方向,建议不要使用 C(T)试件形状。各向异性和存在大弯曲应力将导致裂纹的非自相似扩展(文献 1.4.2.5(l))。但是,C(T)试件的几何形状可以成功地用来试验相对较厚的横向的单向试件(即 90°方向)(文献 1.4.2.5(m))。但如上所述,应该考虑机加孔附近局部挤压失效的可能性。

### 缺口构型

- 机加缺口的细节对保证裂纹自相似扩展至关重要。推荐使用如 ASTM E647 描述的长度小于  $0.0625W$ 、在裂纹尖端锥度为 30° 的窄锯口或线切割加工的缺口。如果用圆形缺口(如孔),很有可能产生多裂纹,从而导致裂纹张开位移监控更加复杂。

### 裂纹长度测量

- 用柔度计作为测量裂纹长度的标准方法,对于存在纤维桥联的情况是不适用的,因为桥联的纤维会屏蔽裂纹尖端。另外由于受没有断裂的桥联纤维的影响,直流电位技术(DCEP)也不能精确测量裂纹长度。因此在裂纹扩展过程中,必须使用高分辨率的光学测量装置来精确确定裂纹尖端位置。为了试验自动化,可以根据 ASTM E 647 附件 3 使用直流电位技术(DCEP)来监控裂纹扩展。但是,在试件用 DCEP 技术试验的裂纹长度在试验后校正到光学测量结果时,要特别注意裂纹尾端的纤维断裂问题。
- 在没有发生桥联的情况下,用柔度法读数估计的裂纹长度出现误差可能是由于材料的各向异性造成的。因此,用各向同性柔度法计算裂纹长度时应该用有效模量。

### 桥联区的测量

尽管桥联区的长度(如果存在的话)对于计算有效的裂纹尖端驱动力是非常关键的参数,但是现在还没有一个很好的方法来测量其实际的位置。纤维断裂前,桥联区( $a_{bridged}$ )是实际基体裂纹尖端位置( $a$ )和缺口长度( $a_0$ )的差值。

$$a_{bridged} = a - a_0 \quad 1.4.2.5(c)$$

纤维开始破坏后,桥联区迅速变小引起裂纹的张开量迅速变化。可以用声发射来监测纤维断裂并且可以提供一个通过中断试验来估计新的桥联区的判据。无损检测技术(NDE)例如声扫描电子显微镜可以用来确定桥联区的长度。

桥联区的长度也可以通过试验过程中定期比较相对于全裂纹长度的裂纹张开量和预测的无桥联情况相应值的差别来确定。这些方法需要特殊的光学设备,因为在桥联区裂纹位移值很小。桥联和非桥联裂纹之间裂纹张开量提供了桥联程度的定性描述,并可结合合适的裂纹桥联模型来修正桥联长度(文献 1.4.2.5(n))。

### 有效裂纹尖端应力强度因子

当出现桥联时,总载荷无法全部施加到裂纹尖端,因为一些载荷还能通过桥联纤维传递。因此,有效裂纹尖端应力强度因子由以下公式给出:

$$K_{\text{effective}} = K_{\text{applied}} - K_{\text{bridging}} \quad 1.4.2.5(d)$$

$K_{\text{bridging}}$  对应于由桥联纤维引起的闭合应力强度因子,它的作用与基体裂纹尖端的闭合压缩应力相似。如果没有纤维桥联现象,那么  $K_{\text{bridging}}=0$ ,否则,  $K_{\text{bridging}}$  由以下公式得到:

$$K_{\text{bridging}} = \int_{a_0}^a C(x)g(x)dx \quad 1.4.2.5(e)$$

式中  $C(x)$  为桥联区域桥联纤维的闭合载荷,  $g(x)$  为在距离裂纹尖端为  $x$  施加单位点载荷时应力强度因子的权函数。该函数与几何形状有关, 对标准几何尺寸可在文献中得到 (例如, 文献 1.4.2.5(h) 和(k))。

假设的纤维压力公式把闭合载荷与裂纹张开位移建立联系 (就是说  $C(x) = f(u(x))$ ), 式中  $u(x)$  是裂纹张开位移), 为了求解未知闭合载荷和裂纹张开位移的关系, 要使用迭代法。文献 1.4.2.5(a)–(f) 和 1.4.2.5(o) 提供了详细的计算不同闭合公式的桥联应力强度因子。

#### 1.4.2.6 蠕变/应力断裂

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.7 销钉挤压拉伸

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.8 销钉挤压压缩

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.9 充填孔拉伸

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.10 开孔拉伸/缺口灵敏度

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.11 弯曲 (三点弯曲)

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.12 充填孔压缩

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.13 纤维挤出试验

##### 1.4.2.13.1 背景

自 Marshall (1.4.2.13.1(a)) 引入以后, 纤维压陷技术已发展了好几 种方法, 它们对确定摩擦和粘结对纤维/基体界面剪切强度的贡献非常有用。对于小直径的纤维 ( $<50 \mu\text{m}$ ) 一直沿用 Marshall 最初使用的厚试件构型 (文献 1.4.2.13.1(a))。在这种纤维压入构型中, 只有整个纤维长度的顶部末端出现脱粘和滑移, 合成的顶端纤维位移与沿着脱粘纤维方向的压应变有关。对大直径纤维 ( $>50 \mu\text{m}$ ), 薄试样纤维挤出 (或者挤出-穿过) 构型通常是优先考虑的, 它最初由 Laughner 等人 (文献 1.4.2.13.1(b) 和(c)) 论证用于陶瓷基复合材料, 后来用于金属基复合材料 (文献 1.4.2.13.1(d) 和(e))。对这种薄试件构型, 在临界载荷时整个纤维长度发生滑移。这里将介绍应用于大直径纤维挤出的试验方法。

对于纤维挤出试验的好几个改进提高了数据的质量也更便于操作了。最重要的进步是用带常位移速率机械装置的驱动压头来替代吊重加载, 这样可以获得连续的时间-载荷或者载荷-位移曲线。Bright 等人 (文献 1.4.2.13.1(f)) 率先用能控制压头运动的 Instron 试验机证实了这种方法。Eldridge 采用实时视频图像和声发射检测作为桌面式试验机的附加设备来监测纤维的脱粘和滑移 (文献 1.4.2.13.1(g)), 这种加载设备用一个小小的电机带动的垂直位移台架取代了 Instron 试验机作为常位移速率机械装置。同时, 为了更可靠地描述纤维全

部脱粘前的纤维挤出曲线段,用直接测量位移法比测量试验机横梁速度是更有用的方法(文献 1.4.2.13.1(h)和(i))。在某些情况下,已经采用了纤维末端位移的直接测量(文献 1.4.2.13.1(j)和(k)),可以不用对测量位移进行柔度修正。在大直径纤维的试验过程中另一个明显的改进就是用平底锥形压头(文献 1.4.2.13.1(f))或者圆柱形压头(文献 1.4.2.13.1(d))。相对于通常使用的尖锐的显微硬度压头(例如 Vickers),平底的压头可以向纤维施加更均匀的载荷,同时施加更高的载荷而纤维无损伤。圆柱形平底压头相对于圆锥形平底压头可以使纤维有更大的位移,然而,圆锥平底压头可以承受更大的载荷。

补充性能比如高温试验(文献 1.4.2.13.1(l)-(n))以及扫描电镜类设备(文献 1.4.2.13.1(o))也提供了重要的作用,但这些问题将不在这里讨论。

#### 1.4.2.13.2 概述

这种方法包括了利用纤维挤出试验方法来测定复合材料界面性能的基本要求和顺序。下面所述方法推荐用于纤维直径为  $50 \mu\text{m} < d_f < 200 \mu\text{m}$  的连续纤维增强复合材料。

尽管这种方法已经成功广泛应用于各种金属基复合材料(SiC/Ti, SiC/Al, Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/NiAl)和陶瓷基复合材料(SiC/SiC, SiC/SiN<sub>3</sub>),但是它不可能适用于所有的复合材料体系。最重要的限制因素是用这种方法时压头(冲头)的强度和界面强度之间的关系。纤维挤出试验可能不适用界面结合强度高的复合材料体系,由于界面结合强度高,所以冲头破坏可能先于界面脱粘。在这种情况下,并不推荐更薄的试件,因为这将产生一些不希望的失效模式比如基体裂纹、纤维断裂和基体变形等。

确定评估这种方法对不同复合材料体系适用性的准则和指南不属本手册范围。但是附录 A 中的表 A1(a)和 A1(b)提供了一些对 SCS-6/Ti-24-11 复合材料体系有用的信息,另外还提供了凹槽长度 2-3 倍于其直径的碳化钨压头的性能。

#### 1.4.2.13.3 方法描述

在纤维挤出试验中,为使纤维脱粘并使纤维相对于基体发生滑移,用压头(冲头)对纤维施加轴向压缩载荷。被挤出的纤维通常坐落在带孔或凹槽的支撑板上,图 1.4.2.13.3 为这种方法的示意图。可用整个纤维长度开始出现位移时的载荷来确定界面的剪切强度。

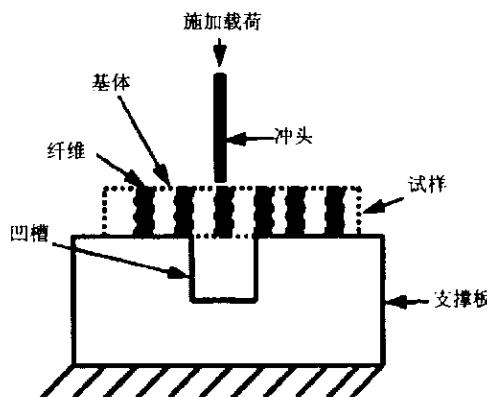


图 1.4.2.13.3 纤维挤出试验方法示意图

#### 1.4.2.13.4 意义和应用

通常,对试验复合材料的界面性能,有很多理由使这种方法很吸引人。试件的准备相对简单,并且试件很小可以直接从已经制造好的复合材料中得到。试样也可以取自过去已

做过其他试验或受过不同热处理或环境曝露的试件，这样可以保证纤维挤出试件的界面之间的残余应力状态和状态相似于复合材料或已试验过试件内存在的情况。

用这种方法获得界面剪切强度值，在直接比较不同复合材料的界面性能和失效模式时特别有用。它同样可以有效地确定特殊处理和机械加载对于界面性能的影响，然而，用这种方法得到值作为界面的绝对物理性能并不可取，因为，在纤维挤出试验中所呈现的应力状态并不清楚。此外，在不同的复合材料体系中应力状态也可能不一样。

#### 1.4.2.13.5 设备

完成纤维挤出试验所需设备示意图如图 1.4.2.13.5(a)所示。图 1.4.2.13.5(b)所示为一种用于纤维顶端挤出试验的独立的台式设备，它由 J.Eldridge 研制并在 NASA-GRC 使用。挤出试验设备的尺寸和构型很紧凑。因此，大多数已有的商业化的试验架能很容易地临时改装后用于纤维挤出试验。

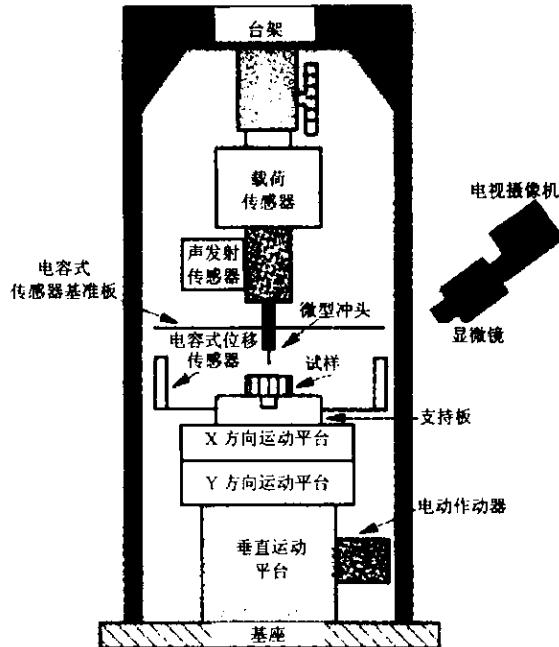


图 1.4.2.13.5(a) 挤出试验的典型示意图



图 1.4.2.13.5(b) 用于 NASA 格伦研究中心的台式纤维挤出试验系统

纤维挤出试验通常通过控制冲程（位移）来完成。位移速度通常为 60 mm/min 范围内。任何商业化的在 25-50 lbs 压载范围的测力传感器都适用。测力传感器应该根据 ASTM E 4 校准（“试验机的载荷验证操作”）。

x-y 坐标移动台用来移动和对准在压头下的试件。用精确的 x-y 移动平台（千分尺型）对于更好的对准压头和纤维间的位置是必须的。任意可购得的精密平台都适用。

#### 1.4.2.13.6 压头

图 1.4.2.13.6 所示为压头（冲头）的详细示意图。压头的底部为平面并且垂直于轴向以保证作用在纤维上的压缩载荷均匀，同时防止冲头提前破坏。冲头的直径依赖于被试验纤维的直径，约为纤维直径  $d_f$  的 0.75-0.80。

冲头带槽长度只有在脱粘发生后变得更重要，在这种情况下带槽长度越长越能使纤维挤出。但是，带槽长度越大越脆弱，所以在满足所需的纤维滑移距离的条件下应保证最短的带槽长度。

冲头通常是用 WC（碳化钨）或者 SiC（碳化硅）所做，但是，只要在试验过程中不发生塑性变形或者屈曲的材料都是合适的。平底圆锥金刚石压头相对于圆柱形压头可以提供更高的载荷，但是位移限制在几微米范围并且金刚石压头更易损伤纤维。

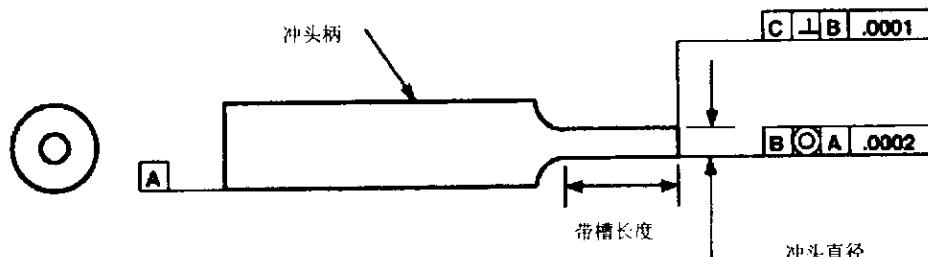


图 1.4.2.13.6 典型冲头

#### 1.4.2.13.7 支撑板

图 1.4.2.13.7 所示为典型的支撑板。支撑板可以有很多种构型以完成试验的要求。为了满足各种不同铺设方向试件的试验要求，支撑板上开有各种不同的槽和孔。槽的宽度取决于复合材料和试验件的几何形状。通常为了保证试验件的弯曲最小，槽的宽度在满足试验的情况下也应最小。通常槽的宽度大约为试件纤维直径的 2-3 倍或者约为试件厚度。槽的深度为任意值，但是，尽量保证大于所需的纤维的滑移距离甚至是使整个纤维挤出的深度。

#### 1.4.2.13.8 声发射传感器

声发射传感器可以装在冲头支持段、试件的支撑板或者其他合适的位置，只要便于记录与纤维脱粘相关的声发射信号。尽管不是强制非要使用这一传感器，但是，事实证明对于确定脱粘起始和终结时的载荷是十分有用的。

#### 1.4.2.13.9 位移传感器

在纤维挤出试验中，纤维/基体之间的相对位移是很难记录到的。结果，纤维挤出行为通常由载荷-时间关系式来记录。如果需要记录位移，可以通过市场上可购得的、合适的试验台架上进行试验记录载荷/行程关系。另外，可以应用外部安装的位移计量仪，比如高度计。可以考虑在压头的两边装上两个高度计（相距 180°）取平均值来消除由于在试验过程

中加载压头的轻微的倾斜造成数据的误差。这些误差在行程反向时，例如在循环加载试验中变得最明显。要着重注意的是，用这种方法测得的位移并不代表纤维/基体之间的真实相对位移，因为所测量的位移中间还包括载荷器柔性造成的变形，比如压头的压缩位移。

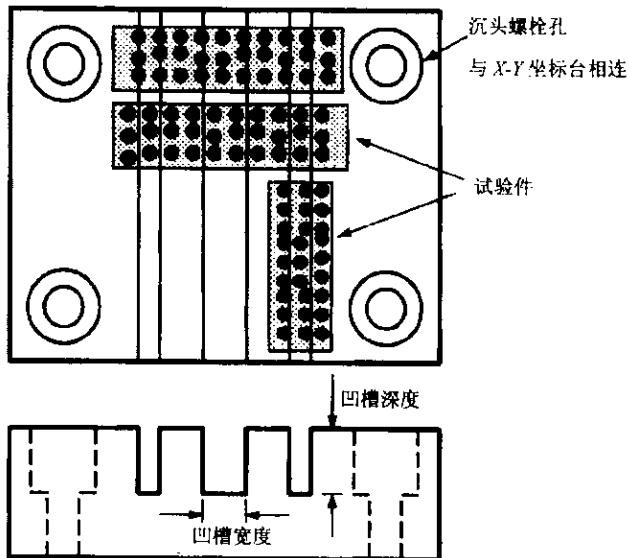


图 1.4.2.13.7 典型的支撑板

#### 1.4.2.13.10 用显微镜/照相机进行远距观察

由于纤维的直径太小，在压头（冲头）下用肉眼通常很难完成对纤维的精确对中。大部分情况下，使用放大倍数为 50 倍的显微镜。由于加载器的构型，显微镜在安装的时候都和压头有一定的角度，因此需要大于 1.5 in (3.8 cm) 的聚焦长度。安装有照相机的显微镜是首选，因为这样更易于操作，并且还可以通过照相机提高放大倍数。用照相机还可以得到试验中的视频图像。也可以用两个视场的构型，一个是用来观察正常倾角范围试件的显微镜视场，试验的纤维位于观察场的中央。第二个是观察纤维挤出地方的试验视场。两个视场的排列要保持得能保证显微镜观察到试件接触凹痕位置位于观察场中心。由于与显微镜物镜靠得更近且用正常的入射角度观察，两视场法能得到优良的试件表面图像，但是在试验过程中不会提供这种观察。这使得两视场成为小直径 (< 25  $\mu\text{m}$ ) 纤维试验所选的构型。

#### 1.4.2.13.11 试件准备

复合材料薄片应从整体复合材料或试件中感兴趣的部位取得。由于纤维挤出试验通常需要薄片，所以在整个的试件准备过程中要特别注意确保不要出现界面损伤。这主要依赖于复合材料体系和初始界面状态，对加工过程进行各种试验以获得适合的加工方法。

试验薄片厚度一开始应为 0.02-0.05 in (0.6-1.3 mm) (图 1.4.2.13.11(a))。试件应切成薄片，使得纤维轴向方位误差在  $\pm 1^\circ$  以内，偏差过大将给脱粘强度和摩擦强度测量带来误差。

薄片初始厚度跟所需要的最终厚度有关。在用锯条加工试件材料过程中调整位置时应该考虑锯切过程中锯条的厚度。通常，薄片的厚度应容许抛光和除去在试件加工过程中产生的损伤。精细的抛光在试验中可以给光学显微镜对中提供所需的对比度以及使有可能进行界面的失效后分析。

试验件要两面抛光（用以前批准过的方法）到金相学光洁度（通常 1 mm 或者更好）。通常情况下金属基复合材料的纤维比基体硬得多，采用金刚砂磨削膏和多毛的抛光布抛光，金刚砂研磨胶片（带金刚砂颗粒涂层的聚酯胶片）可以极大地减少表面起伏和倒角。两个平面应在感兴趣范围的 10 mm 距离内抛光整平和保持平行。

在抛光之后测量试件厚度（精度到  $1\text{-}2 \mu\text{m}$ <sup>\*</sup>）。一旦纤维挤出之后可能就很难得到精确的原始厚度尺寸。最终厚度在 0.01-0.02 in (0.30-0.50 mm) 之间。该厚度范围能够保证脱粘强度是常数（图 A1(a)）。厚度再小，不同的失效机理起作用，脱粘强度与厚度有关。当厚度大于 0.5 mm 时，脱粘强度再次与厚度有关。这个范围纤维挤出载荷高，增加了冲头破坏的可能性。

现在可把试验件安装在支撑板上面。使被测纤维正确放在槽或孔之上是非常重要的。纤维正确对中后，应把试件固定在支撑板上以免试件移动。可以用胶粘剂（比如氰基丙烯酸盐粘合剂）或者用夹持夹具来固定试件，如图 1.4.2.13.11(b)所示。如果用胶粘剂的话，注意不要让胶粘剂在试件和支撑板之间渗出，改变纤维的位置。

如果试验件中有一根以上纤维需要试验，应该对安装在支撑板上的试件拍摄低倍数照片，它可以作为试验过程中和试验后被测纤维位置的参考。

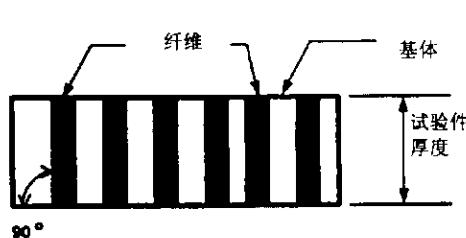


图 1.4.2.13.11(a) 试验件

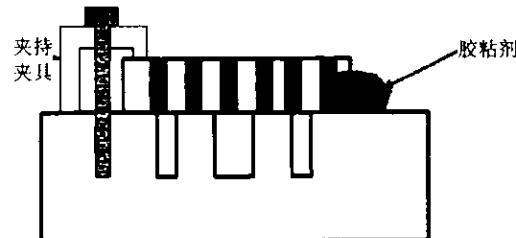


图 1.4.2.13.11(b) 装在支撑板上的典型试验件

#### 1.4.2.13.12 试验程序

该试验描述的程序不能普遍应用于所有的复合材料体系，但是，它可以作为一个对于正确的试验程序的基本指导。以下的试验程序也是基于可提供很多纤维和并需大纤维母体的试验件。

如果每个试样中要测定多个纤维的话，试验的顺序非常重要。避免试验相邻纤维，因为在许多情况下先前试验过的纤维就可能影响到相邻尚未试验纤维的结果，要试验的纤维应随机选取，离先前已试验的纤维保持安全距离。如果先前试验过的纤维对于相邻纤维的影响不清楚，并且需要在每个试样中有大的纤维母体，这时就应进行可揭示相邻纤维影响的试验顺序。试验顺序与试件及纤维排列有关，图 1.4.2.13.12 所示为试验顺序的一个简单实例。这个试验顺序可以帮助确定是否存在相邻纤维的影响。例如，如果试验 7, 8, 9 的平均值与 1, 2, 3, 4, 5 和 6 号试验的平均值统计上不同的话，先前已试验过的纤维有可能影响了相邻纤维的结果。同样，如果 1, 2, 3, 4 号试验的平均值与 5, 6, 10 和 11 号试验的平均值统计上不同的话，说明可能存在边界效应。显而易见，需要几个基准试验来得到对纤维挤出行为和影响结果因素的更好的理解。

\* 译者注：原文为 1-2 mm。

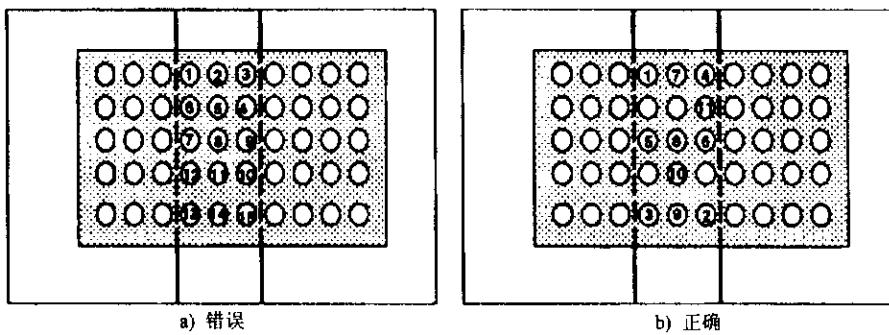


图 1.4.2.13.12 试样试验程序

#### 1.4.2.13.13 环境影响

大部分纤维挤出试验都是在室内（试验室）空气下进行，不考虑水气和其他空气成分对试验结果可能有的影响。最新研究（文献 1.4.2.13.1(n) 和 1.4.2.13.13）表明实验室环境中水气和氧会大大改变某些复合材料体系的纤维滑移行为。作为一个实例，图 1.4.2.5(e) 给出了对同样的 SCS-6/Ti-24-11 试件分别在试验室空气条件下做的一组七条挤出曲线和在干燥的氮气条件下的七条曲线。相对于在氮气中试验的曲线，在室温空气条件下试验的曲线显示摩擦滑移载荷始终较低，在出现脱粘之后载荷的降低要突然得多。这样大的不同似乎与富碳区的界面失效有关，预期该区域的纤维滑移显示与石墨表面滑移相似的环境灵敏度，后者需要吸湿来维持低摩擦。这些结果要求要可靠地比较试验结果，必须知道环境的影响，并且至少应该记录室内空气的湿度水平。

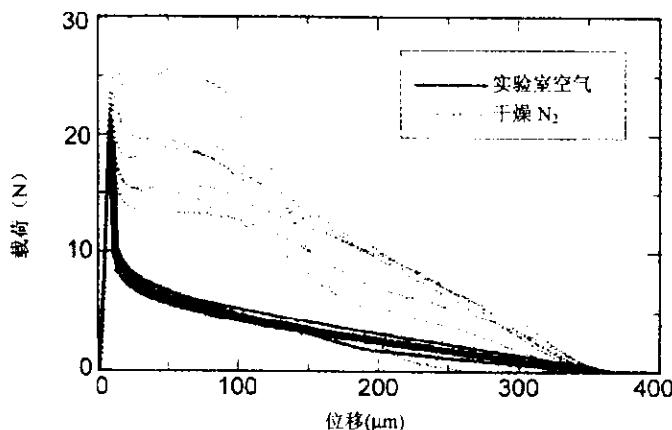


图 1.4.2.13.13 在室温条件下环境对于 SC-6/T-24-11 界面性能的影响

#### 1.4.2.13.14 结果分析

在附录 A 中图 A1(b) 给出了在试验过程中记录信息的一个基本数据表的实例。

如何区别可接受和不可接受的数据结果不属本手册范围，因为对纤维挤出试验即使是不可接受数据，也可以用于定性比较。以下的章节只是提出解释结果的指导性意见。

图 1.4.2.13.14 揭示了在不同的金属基复合材料和陶瓷基复合材料体系中典型的纤维挤出性能。图 1.4.2.13.14 所示的特性中，(a)-(d) 为可接受的，(e) 和 (f) 为难于解释的特性。

通常，在脱粘现象发生之前载荷呈线性增长，当纤维从试件底部挤出时出现相应的载荷下降。此时通常伴随着声发射事件。脱粘载荷  $P_{debond}$  定义为在载荷下降之前的最大载荷。

脱粘之后，纤维滑出基体，受纤维与基体之间的摩擦阻力约束。施加的载荷随着纤维位移增大而变小，这是由于纤维与基体的接触面积减小，从而摩擦阻力变小。通常取摩擦载荷  $P_{friction}$  为其第二峰值时的值，如图 1.4.2.13.14(a)和(b)所示，或者直接取下降时的值，如图 1.4.2.13.14(c)和(d)所示。

有时候在纤维脱粘之后载荷还会增大，如图 1.4.2.13.14(e)和(f)所示。这样的纤维挤出特性更难解释，因为脱粘之后纤维并不是自由滑移。这种情况由于极端的界面粗糙度或者界面的残片相互咬合，阻止了纤维的位移，结果载荷增加甚至可能超过最初的脱粘载荷。因此，在这些界面上不存在真正的摩擦行为，摩擦载荷依赖于咬合程度和/或存在的残片数量。这种情况下，载荷的第一个峰值仍然可以看成是脱粘载荷，但是应该考虑到咬合程度也可以影响脱粘事件。在得到基本数据组以后，这种结果的无用性就变得更明显了。

纤维完全脱粘的平均界面剪切强度  $\tau_{debond}$ ，可以从试验所得脱粘载荷用以下公式计算：

$$\tau_{debond} = \frac{P_{debond}}{2\pi R_f t} \quad 1.4.2.13.14$$

式中  $R_f$  为纤维半径， $t$  为试件厚度。

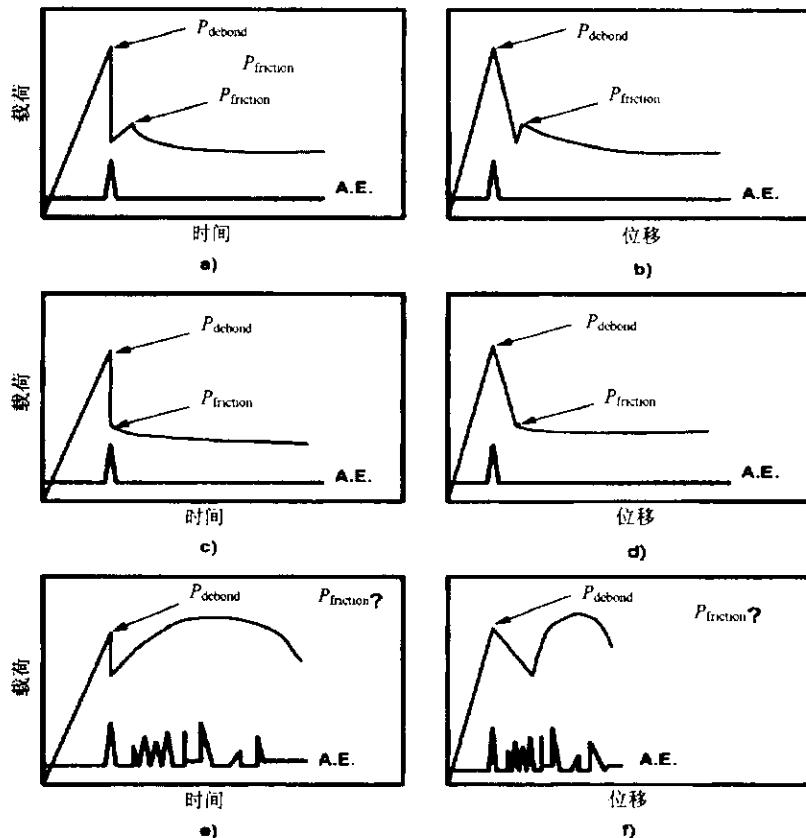


图 1.4.2.13.14 典型的挤出行为 (A.E.表示声发射)

这个应力是指整个纤维长度内的平均值，因而不反映真实的局部应力，它沿着整个长度变化很大（文献 1.4.2.13.14(a)和(b)）。虽然对相似厚度试件间的比较  $\tau_{debond}$  是有用的，但是它并不直接对应可以容易确认的界面性能，它既受界面脱粘强度（或断裂能）的影响，

也受纤维滑移摩擦阻力（因为纤维部分脱粘和滑移然后完全脱粘）的影响。可以用将残余应力和纤维粗糙度结合在一起的更加复杂的方法（文献 1.4.2.13.14(c) 和(d)），但因为金属基复合材料薄片纤维挤出，其界面失效经常在试件背面，压头的反面起始（文献 1.4.2.13.14(a) 和(d)），并也能出现基体塑性效应（文献 1.4.2.13.14(e)），因此界面失效顺序的建模必须十分小心。分析应该被修正以能解释/预示其失效顺序（文献 1.4.2.13.14(f) 和(g)）。

可用上面的公式，并用  $\tau_{\text{friction}}$  和  $P_{\text{friction}}$  代替  $P_{\text{debond}}$  和  $\tau_{\text{debond}}$ ，得到界面摩擦强度  $\tau_{\text{friction}}$ 。

相对于  $\tau_{\text{debond}}$  的计算， $\tau_{\text{friction}}$  的计算更加接近于真实的剪切强度，因为在整个纤维运动时，纤维移动的阻力是纯摩擦阻力，整个纤维长度范围内界面剪切应力几乎是均匀的。应该指出  $\tau_{\text{friction}}$  是纤维滑移距离的函数而不是单一的数值。在某些滑移试验中（图 1.4.2.13.14(a)-(d)），随着纤维连续滑移， $\tau_{\text{friction}}$  基本保持恒定，但是在另外一些情况的试验中（如图 1.4.2.13.14(e)-(f)），由于严重的界面磨蚀， $\tau_{\text{friction}}$  随纤维滑移距离变化很大。因此记录在几个滑移距离内的  $\tau_{\text{friction}}$  是有用的（文献 1.4.2.13.13 和 1.4.2.13.14(h)）。

#### 1.4.2.14 显微硬度

**概述：**该方法包括了金属基复合材料原位基体材料的显微硬度测定。对测定原位基体的状态可能渴望得到这些信息。显微硬度读数和其他的力学性能有关（例如，强度和模量），可以用于微观结构建模目的，因此，可以用硬度作为评估原位基体性能的方法。测试显微硬度的原因如下：

- 看硬度是否可以通过改变基体，和/或改进复合材料的制造和/或随后的热处理来改进。
- 研究反应区域或基体/纤维界面临近的基体的变化。纤维熔化（分散）或者金属间相形成可能影响这些区域。
- 测量由于与环境的相互作用引起的间隙脆裂。
- 测量单独相的硬度。

显微硬度试验应该按照 ASTM E 384 “材料显微硬度标准试验方法”（文献 1.4.2.14）进行，还要注意以下几点：

- 如果硬度压痕不受纤维和界面的影响，应该定位在适当的位置，同时尺寸合适。应在纤维和压痕之间，距离约为压痕对角线的两倍。
- 如果要想得到关于原位基体晶体的晶体内区域的显微硬度信息，压痕应该在晶体的中央。如果可能的话，压痕的尺寸应在压痕和晶体边界之间，距离为压痕对角线的两倍。这样保证晶体边界对显微硬度的读数影响降到最低。

#### 1.4.2.15 热机械疲劳 (TMF) (同相/异相)

##### 1.4.2.15.1 范围

该标准描述的是金属基复合材料试件进行 TMF 试验的方法。这些试验是在载荷控制条件下，和对于任何常相位的固定的载荷比条件下进行的。这种标准适用于带有任何纤维铺层的复合材料。

该试验通常应遵循 ASTM E 466（文献 1.4.2.4.1(a)）。也需满足如下例外条件和注意事项。

#### 1.4.2.15.2 试件设计

试件的设计和制备用 1.3.2.4 节推荐的方法。

#### 1.4.2.15.3 温度控制和测量

1. 试件的温度测量可以采用接触试件表面的热电偶，或者其他非接触技术，如已用带热电偶的试件标定过的光测高温计。
2. 应用足够多的热电偶安装在与用于试件的相同材料和几何尺寸做成的假试件上，以精确测量出沿试件均匀工作段的温度场。在对放置在真实试件上的热电偶数量和位置作出决定（在用于温度标定的试件之后进行）时要证明它的正确性，重要的内容包括试验结果对于试件试件表面异常的敏感性和热电偶是否易于接触。
3. 对于所有的试验，在任何给定的循环瞬间，整个试验部分的最大允许轴向温度梯度为 $\pm 0.015T_{\max}$ ，其中 $T_{\max}$ 为名义最大温度，单位是°C，在动态条件下测得。
  - 注意事项 1：整个工作段 $l_0$ 的轴向温度梯度在动态条件下被优化并在所给的温度循环内适当的点处（记为 $T_{opp}$ ）最小，这样有可能允许在 $T_{opp}$ 时循环中经历的工作段温度梯度不超过 $\pm 0.01T_{opp}$ 。
  - 注意事项 2：除非对试件屈曲问题有其他方面的约束，建议试件设计的平行段具有最小长度 $2l_0$ ，最小长度 $2l_0$ 允许沿试件的常截面上装所有的温度梯度标定热电偶，这便于在动态条件下对工作段轴向温度梯度进行优化和使其最小。当用直接感应进行加热时，这种条件特别优越。

在整个试验持续过程任一循环中的任何瞬间，对于由控制热电偶测出的温度变化不应超过初始值的 $\pm 3^{\circ}\text{C}$ 。

在整个试验持续过程任一循环中的任何瞬间，对于由非控制热电偶测出的温度，则不能超过热电偶标准误差限加上 $\pm 2^{\circ}\text{C}$ 。例如对 K 型铬(+)镍(-)热电偶，其标准误差限为：

温 度	标准误差限
0-326°C	$\pm 2^{\circ}\text{C}$
327-1 310°C	$\pm 0.75\% T (\text{°C})$

因此，例如在 $t = t_{15}$ （就是说循环内的 15 秒钟）时，如果非控温热电偶指示的温度为 $800^{\circ}\text{C}$ （标准误差限为 $\pm 6^{\circ}\text{C}$ ），在随后所有的循环中 $t = t_{15}$ 温度测量值不应超过 $792-808^{\circ}\text{C}$ 的范围。

#### 1.4.2.15.4 波形

- 对于温度和载荷来说，首选的控制波形都是三角波（即线性斜坡）。这样就在整个循环中为温度和载荷提供常加载速率。不建议使用正弦波，因为这时整个循环中温度和加载速率都连续变化，使得难以进行与速率相关的数据分析。
- 温度和载荷的指定波形应为同一形状（例如正弦波、三角波）。
- 温度响应波形应该在工作段的中心测量。这可能是也可能不是闭环温度控制位置。应把这种测量用于定量地确定温度范围的精确度（最大和最小限制值）和载荷-温度相位。

#### 1.4.2.15.5 相位

- 应进行异相 (OP) 试验使载荷和温度响应波形有 $180^{\circ}$ 相位差。
- 应进行同相 (IP) 试验使载荷和温度响应波形相位一致。

- 也可以用温度-载荷之间的其他固定相位差，只要它被清楚地描述，并在这种标准里有其他的指南。
- 相位差值误差：两个响应波形与预定要求的相位差值其误差应在 $2^\circ$ 以内。比如：对于预定的 $180^\circ$ 异相试验，响应的相位差为 $178^\circ\text{--}182^\circ$ 之间。相位精确度应由响应波形决定而不是要求的波形。

#### 1.4.2.15.6 试验前测量

1. 记录试件的模量  $E$ ，在实际试验中施加的整个温度范围内它是温度  $T$  的函数（对  $E$  的定义见 ASTM D 3039/D 3039M“聚合物基复合材料拉伸性能的标准试验方法”（文献 1.4.2.15.6(a)）。记录时温度间隔不能大于 $100^\circ\text{C}$ ，如果需要得到精确的  $E-T$  曲线，建议采用更小的温度间隔。以后可以用这些数据来从总的机械应变 ( $\varepsilon_{\text{mech}}$ ) 中计算非弹性应变 ( $\varepsilon_{\text{in}}$ )，公式为：

$$\varepsilon_{\text{in}} = \varepsilon_{\text{mech}} - \sigma / E(T) \quad 1.4.2.15.6(a)$$

式中  $\sigma$  为瞬时施加应力。

- **注意事项 1：**应在测量模量前，在每一个温度下温度和试验系统必须达到平衡。如果不平衡，模量值会有误差。
  - **注意事项 2：**对于 TMF 试验，在试验的热循环过程中要对标准高温引伸计主动冷却以保证引伸计的热平衡。
  - **注意事项 3：**同一工艺条件得到的同一批试件的模量差别很小。如果可以证明这一点，那么模量-温度曲线只需要一个试件就可以完成。对于其他试件的模量预先检验只需要在热循环最大和最小温度下进行就可以了。
2. 应该测量试件从室温到试验初始温度  $T_{\text{init}}$  之间的热膨胀应变，以得到  $T_{\text{init}}$  时的初始工作段长度  $l_0$ ，即：

$$l_0(T) = l_0(\text{R.T.}) + \Delta l_{\text{th}} \quad 1.4.2.15.6(b)$$

式中  $\Delta l_{\text{th}}$  为从室温到试验初始温度时由于热膨胀所引起的工作段长度的变化。

- **注意事项 1：**工作段长度的差值最多为 2%。如果实际的变化较小，并且认为不会影响结果的话，那么工作段的长度调整可以省略。
- **注意事项 2：**在进行了  $T_{\text{init}}$  条件下初始长度  $l_0$  计算后，在随后计算实时应变时不需要在整个温度循环中连续调整  $l_0$  随温度的变化，即假定  $l_0$  保持在温度  $T_{\text{init}}$  的水平就够了。

3. 应在真实试验中用到的温度范围内，进行零载荷条件下的热循环试验。应进行几个热循环试验来确保试验装置的热平衡和热应变  $\varepsilon_{\text{th}}$  随温度  $T$  变化的稳定性。建立了热平衡状态之后，应该测量循环的加热和冷却段热应变  $\varepsilon_{\text{th}}$  随温度变化，它可在试验后的数据分析时用以计算机械应变  $\varepsilon_{\text{mech}}$ ，式中：

$$\varepsilon_{\text{mech}} = \varepsilon_{\text{total}} - \varepsilon_{\text{th}} \quad 1.4.2.15.6(c)$$

式中  $\varepsilon_{\text{th}}$  为温度的函数。温度循环范围内的点不表征材料的性能 (CTE)，但是可以通过每个试件在整个温度范围内可靠的热应变来精确修正数据。

- **注意事项 1：**这个数据修正步骤是一个简化假设，它假设试验前测量的复合材料热膨胀行为在整个试验过程中保持不变（即复合材料的 CTE 在试验过程中不变化）。已证实这种假设存在误差，误差程度依赖于具体的加载条件、

层板板铺设方向和出现的损伤机理（文献 1.4.2.15.6(b)）。理想的情况是记录 CTE 随循环的变化，并且在数据分析中相应地考虑这一变化。

- **注意事项 2：**应尝试找出得到稳定  $\varepsilon_{th}$  值的最小热循环数。过多/过长的热循环可能促进内部损伤和/或不希望有的材料初始氧化状态（文献 1.4.2.15.6(c)）。

#### 1.4.2.15.7 开始试验

1. 热补偿测量之后，相续进入热循环，载荷波形在对应于零载荷的热循环点开始。
  - **注意事项 1：**对载荷不过零的试验（如拉-拉或者压-压载荷循环），建立热动态平衡之后，应及时地将载荷降到所要的最小载荷，以在满足所需相位差的误差范围内开始载荷-温度同步试验。
2. 试验一直进行到出现失效，应对所用的失效有明确定义。
  - **注意事项 1：**在载荷控制试验中，如果在循环中有拉伸载荷，试件的失效为断裂成两片，因此，通常用断裂成两片作为失效准则。也能用其他的失效定义，比如原先最大应变或者应变范围变化的百分数、在特定温度时的模量变化百分数、试件的屈曲等。

#### 1.4.2.15.8 数据报告

- 在试验过程中定时应用数字或模拟信号记录仪记录应力-应变迟滞回线。
- 应画出每个试件的最大机械应变-循环数和最小机械应变-循环数曲线。
- 应画出机械应变范围-循环数和总应变范围 ( $\Delta\varepsilon_{total} = \Delta\varepsilon_{mech} + \Delta\varepsilon_{th}$ ) -循环数曲线。
- 应记录失效位置和失效准则以及任何异常裂纹起始的原因（例如热电偶接触）。

#### 1.4.2.16 剩余强度和刚度

复合材料部件的寿命决定于其抵抗损伤的能力。复合材料复杂结构中可假设存在很多形式的损伤，如纤维裂纹、基体裂纹、界面脱粘、界面扩展和一种或者多种组分的氧化。设计者必须知道每一种损伤形式对于复合材料结构有怎样和多严重的影响。因为复合材料通常高度各向异性，损伤可能只是出现在特定的方向，所以这特别重要。为了试图定义先前的加载过程对于试件产生多大的损伤程度，通常要完成剩余强度和刚度试验。试验包括使复合材料试样经历某种加载顺序，如到寿命不同百分数的疲劳试验（即  $N/N_f < 1$ ），或热循环到出现纤维和基体间热膨胀系数不匹配引起的损伤。接着开始拉伸试验，测量刚度和极限强度。拉伸试验应该按照 1.4.2.1 节的规定进行，可以在任何相应于使用环境的温度和应变速率条件下完成试验。剩余强度和刚度可以定义为含损伤复合材料相对于初始无损复合材料的比值。为了完全表征损伤行为，应在多个相对于纤维铺层的不同方向进行拉伸试验以考虑在损伤状态的任何各向异性。

#### 1.4.2.17 挤压疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.18 开孔疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.19 充填孔疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.20 腐蚀疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.21 应力腐蚀开裂

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.22 磨损

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.23 冲击

此节留待以后补充。

#### 1.4.2.24 阻尼

此节留待以后补充。

### 1.4.3 非连续增强金属基复合材料的力学性能试验方法

#### 1.4.3.1 拉伸

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.2 压缩

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.3 剪切（面内）

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.4 断裂韧性

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.5 疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.6 疲劳裂纹扩展

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.7 蠹变/应力断裂

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.8 腐蚀疲劳

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.9 应力腐蚀开裂

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.10 磨损

此节留待以后补充。

#### 1.4.3.11 冲击

此节留待以后补充。

### 1.4.3.12 阻尼

此节留待以后补充。

## 1.4.4 物理性能试验方法

### 1.4.4.1 密度

复合材料的密度用 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”（文献 1.4.4.1）所描述的阿基米德方法测量。

### 1.4.4.2 纤维体积含量

纤维体积含量可以通过下面两种方法之一得到。第一就是通过金相学分析，将纤维的总面积被所考察试件的总面积去除（详见 1.4.5.1 节）。这种方法需要一个已被切割、抛光良好的金相试样，抛光面和纤维轴成直角。这种方法可以用商业化的图像分析设备来简化。

第二种方法就是熔解基体，称量留下的干净纤维。方法见 ASTM D 3553 “通过熔化金属基复合材料来测量纤维含量的标准试验方法”（文献 1.4.4.2）。

## 1.4.5 微结构分析技术

### 1.4.5.1 钛基复合材料

微结构细节提供了表征复合材料的重要信息，像晶粒尺寸、相分析和相分布、纤维分布和体积含量、纤维/基体界面状态这样的信息对于复合材料体系分类是必须的。本节提供对连续增强钛合金的微结构分析方法。一些常规的金相学操作知识见 1.4.5.1(a)-(c)。

复合材料的金相试件的准备比单一金属试件的准备难得多，这是因为实际上增强体通常是陶瓷，增强体和基体的抛光率不同，这样易导致在抛光过程中纤维/基体界面的圆角，使该区域的重要细节含糊不清。另外，部分纤维会断裂，擦伤周围软的基体材料。在金相试件的制备过程中也可能会产生损伤，如纤维和界面开裂。因此，在准备复合材料试件时要特别注意以得到光学上平整的，无损伤的表面。

SiC 增强钛合金最好用固定粒度的磨削膏来准备，接着用旋转的金刚石磨削膏来除去材料。旋转磨削剂和脊形的精磨圆盘相结合可产生在有限磨削变形下保持高材料磨损速度的旋转磨削作用。一般的操作方法如下：

- 金刚砂磨削时按顺序用 181, 68 和 20  $\mu\text{m}$  的金刚砂磨粒。
- 用旋转磨削技术中按顺序用 6 和 3  $\mu\text{m}$  的多晶金刚砂悬浮液。
- 在硬质合成丝绸抛光布上按顺序用 3 和 1  $\mu\text{m}$  的金刚砂多晶悬浮液抛光。
- 用上述的侵蚀抛光工艺来去除由于金刚砂抛光步骤引起的变形。
- 最后的抛光步骤为在震动抛光器上用 0.5  $\mu\text{m}$  的金刚砂和人造细绒抛光布抛光。

大部分的钛合金无论是无纤维体或复合材料通常都可通过沉浸在克罗尔试剂中而产生浸蚀，克罗尔试剂为：

- 1-3 ml 的氢氟酸
- 3-6 ml 硝酸
- 100 ml 水

$\gamma$ -TiAl 需要擦洗浸蚀剂，参考比例为 30-15-5

- 30 ml 乳酸

- 15 ml 硝酸
- 5 ml 水

有时希望了解纤维的微结构细节，这从复合材料的抛光剖面很容易得到。为了更好的揭示复合材料中的纤维微结构，有两种方法可以使用。第一为干涉分层技术。这种技术是用溅射涂膜技术给抛光的试件涂上一层  $\text{PtO}_2$  或者  $\text{PbO}_2$  薄层。氧化层改变试样的反射系数。由于每一个相的反射系数不同，从而产生不同的颜色，提高对比度。该方法的更详细介绍见文献 1.4.5.1(d) 和(e)。

第二为等离子刻蚀技术，该技术用反应气体为刻蚀剂。该技术比很多腐蚀性技术的优越性是处理过程中试件保持在冷却状态。该技术对刻蚀 SiC 特别有效（文献 1.4.5.1(f)）。该方法的详细情况见文献 1.4.5.1(g) 和(h)。

复合材料中纤维的分布对于监控制造工艺的质量很有意义。充斥过多的纤维和纤维相互接触对于复合材料的性能是有害的。纤维分布也影响复合材料的力学性能，如文献 1.4.5.1(i) 所述，因此，纤维的分布应该控制（如果可能的话）和记录。

纤维分布可以用标准的金相学技术来记录。对诸如中心-中心的距离、纤维和层片之间的距离、纤维束的排列（如正方形、矩形和六角形）之类的测量是某些常用的测量。一种自动图像分析系统（文献 1.4.5.1(j)）可以帮助确定这些值。

图像分析系统对确定材料的纤维体积含量也极有价值。可以通过测量垂直于纤维长轴方向的抛光剖面上纤维的面积含量来计算连续纤维增强复合材料的纤维体积含量  $V_f$ ，纤维体积含量可以通过如下公式得到：

$$V_f = (\text{纤维剖面面积}) \times (\text{纤维数}) / \text{复合材料剖面面积}$$

尽管计算看起来很简单，但是纤维体积含量计算值往往不同，这取决于复合材料的横截面积是否包含了最外层的基体（即表面层）。如果复合材料外部有基体材料包覆时显得尤为重要。复合材料结构通常在基体组分的内部埋入一个复合材料核心。这种情况下，是考虑整个零件的剖面，或只包括纤维的剖面就成为一个问题。用不同的剖面面积，得到的纤维体积含量就不相同。精确的应力和疲劳寿命分析依赖于对纤维体积含量的清楚理解，因此计算纤维体积含量的方法也应该清楚描述。

当复合材料试样切割边缘上存在部分纤维和/或不存在纤维时，出现了纤维体积含量测量的另一个误差。只要纤维体积含量的计算方法被充分描述，这些误差很小，通常可以忽略不计。

界面是纤维和基体之间的区域。该区域通常由压固后在纤维上留下的涂层或者胶料所组成，以及由基体和纤维或者涂层化学交联反应结果所形成的反应区。界面对于确定复合材料的性能很重要，如果施加在材料上的载荷为偏轴载荷时更加重要，因为界面是载荷中基体传递到纤维的关键。

界面通常很薄（例如，厚度小于  $10 \mu\text{m}$ ），复合材料力学性能通常随界面层厚度的增加而下降<sup>\*</sup>。在压固过程中，如果温度过高或压固时间过长，界面厚度会增加。另外，如果复合材料应用在高温情况，由于应力辅助扩散机制，界面会随时间而生长，导致复合材料性能下降。因此，监控界面层厚度非常重要。

---

<sup>\*</sup>若界面层是用来补偿纤维和基体之间热膨胀等性能上的不匹配，该准则不适用。可将补偿层或柔顺层设计成很厚，以便更好的缓解界面上产生的高应力，从而提高复合材料的综合性能。文献 1.4.5.1(l)-(n) 详细描述了补偿层的作用。

例如，用上文提到的金相学技术制备复合材料试样，界面厚度能通过光学显微图象测量。同样，对于抛光较好的试样，能检查界面检验其开裂、脱胶、氧化或晶粒形貌及尺寸的变化。由于界面尺寸较小，要利用高分辨率的扫描电镜（SEM）检查抛光试件。有时用电子探针或 SEM 的化学分析来获得界面详细的化学信息。然而，若需精确分析，必须用透射电镜（TEM）来明确地识别界面上的化学性质、相和相形貌。

## 1.4.6 化学分析技术

### 1.4.6.1 C 和 S 的分析

ASTM E 1587 试验方法分析复合材料中的间隙 C、S 及其组分（文献 1.4.6.1）。进行该试验时，为去除表面污染，需将试验材料磨削少量。然后将材料切成小片（如果它还是非粉末试样），乙醚脱脂，放入刚玉坩埚。坩埚中加入促进剂，以确保和加速燃烧。最后仅剩下空刚玉坩埚，随后用 NIST 或 Leco 标准产生线性标定曲线。

在温度超过 2 700°F (1 500°C) 的感应炉中 O<sub>2</sub> 气流下燃烧试样。试件中的 C 和 S 被释放出来，分别转化成 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub>。气体经 O<sub>2</sub> 传输通过两个红外探测室，在其中吸收能量并产生光谱。能量穿过仅能通过 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 波长的滤波器。探测器对 O<sub>2</sub> 载气和测量气体间的能量变化作出响应，测量 CO<sub>2</sub> 和 SO<sub>2</sub> 的浓度。经过标定、试件容器和重量补偿的修正和调整，探测器输出由模拟信号转换成数字信号。然后显示出 S 和 C 的浓度，并以重量百分比的形式打印出来。

定性地说，可用该燃烧方法识别出 S 和 C 的存在，然而，不能区别不同形式的 C 和 S。因为仪器包含对这两个元素的双量程范围的探测室，对含有低浓度或高浓度 C (S) 的试样，它是很有用的。双量程室的多功能性使得能够精确测量出很低浓度的 C 和 S。

定性地说，1 g 试样中对 C 和 S 的仪器定量探测范围，分别是 0.6 ppm 到 5 wt% 和 0.3 ppm 到 0.35 wt%。通过减少试样的重量，增加每种元素能检测出的最大量。若想获得低浓度试件的精确读数，可用较大尺寸的试样。

该方法适用于所有的金属、合金、陶瓷及复合材料。也可用于分析砂子和石墨纤维。

### 1.4.6.2 惰性气体融合法分析 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>

该方法用来分析复合材料中的间隙 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub>。其也可用来分析纯基体或增强材料（文献 1.4.2.4.5(a))。进行该试验时，为去除表面污染，需将试验材料磨削少量。然后将材料切成小片（如果它还是非粉末试样），乙醚脱脂，放入 Ni 篮中。粉末试样先放入锡包套里，紧紧卷起排除空气，再放入 Ni 篮。用 NIST 或 Leco 标准产生线性标定曲线来标定仪器。试验过程中仅有 Ni 篮（或锡包套及 Ni 篮），以排除来自容器的元素。

通过在炉中两电极之间密封一石墨坩埚来进行试样分析，用空气对其吹洗。通一高电流对坩埚除气（排除包含在石墨中的气体）。用 He 作为载气。将试样放入坩埚中，通一低电流以排出试样中的气体。试样中释放的 O<sub>2</sub> 和石墨坩埚中的 C 结合产生 CO。CO 经过加热的氧化铜，转化成 CO<sub>2</sub>。然后气体经过一红外室，吸收能量，通过一仅能通过 CO<sub>2</sub> 波长的滤波器。探测器对 He 载气和测量气体间的能量变化产生响应，确定 CO<sub>2</sub> 的浓度。经过标定、试样容器和重量补偿的修正和调整，探测器输出由模拟信号转换成数字信号。然后以重量百分比的形式显示并打印出氧气值。

剩余气体继续通过导热室，其由一对惠斯登电桥组成，由于 N<sub>2</sub> 和 He 导热系数的差异，

电桥变得不平衡，进而检测 N<sub>2</sub>。输出经过转化、综合、调整，N<sub>2</sub> 以重量百分比的形式显示和打印出来。

定性地说，可用该熔融方法识别出 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub>。对某些试样形式，通过温升时的斜率，可分辨出不同形式 N<sub>2</sub> 和 O<sub>2</sub> 的差别。因为仪器包含对 N<sub>2</sub> 的双量程范围探测室，对含有低浓度或高浓度 N<sub>2</sub> 的试样都很有用。低 N<sub>2</sub> 量程室使得能够精确测量出极低浓度的 N<sub>2</sub>。

定性地说，1 g 试样 O<sub>2</sub> 和 N<sub>2</sub> 的仪器定量探测范围，分别是 0.1 ppm 到 0.1 wt% 的氧和 0.1 ppm 到 0.5 wt% 的氮。通过减少试样重量，增加每种元素能检测出的最大量。若想获得低浓度试件的精确读数，可用较大尺寸的试样。

该方法对不含有 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 纤维的所有金属、合金、陶瓷和复合材料均适用。它也可用来检测 O<sub>2</sub> 含量高（最大至 10 wt%）的试样，如 Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>。

### 1.4.7 无损评定试验方法

多种无损试验技术（NDT）可用来检测复合材料表面和内部缺陷。可用目视检测和液体渗透方法来识别表面缺陷，而需更高级的方法来检测内部缺陷（空隙、夹杂、脱粘、纤维的不均匀性），包括超声波、射线照相、热像法、声发射、X-射线和涡流试验。这些试验方法的基本原理和步骤包含在 MIL-HDBK-728 丛书中，更详细的理论信息和数据解释可在下列文献中得到：

- MIL-HDBK-731 热像法
- MIL-HDBK-732 声发射
- MIL-HDBK-733 射线照相
- MIL-HDBK-787 超声波

这些文献未讨论 NDT 技术的最新进展，它是目前研究和发展的活跃领域。

### 1.4.8 环境影响试验方法

此节留待以后补充。

### 1.4.9 中间相和界面的试验方法

此节留待以后补充。

## 1.5 中间产品的试验和分析方法

### 1.5.1 引言

此节留待以后补充。

### 1.5.2 力学性能试验方法

此节留待以后补充。

### 1.5.3 物理性能试验方法

此节留待以后补充。

## 1.5.4 微结构分析技术

此节留待以后补充。

## 1.5.5 化学分析技术

此节留待以后补充。

## 1.5.6 无损评定试验方法

此节留待以后补充。

# 1.6 纤维试验和分析方法

## 1.6.1 引言

复合材料要求具有足够高温性能的高强刚性纤维。在许多预定的使用温度下，基体材料被过度拉伸，并用在高于纯基体正常使用温度，这时，纤维必须能够承受附加载荷和提供在材料中的强度。因此，开发纤维是复合材料继续发展的关键部分。必须要有试验方法来测定纤维性能，不仅提供纤维开发用的相对性能，还要提供用于复合材料细观力学分析的数据。

对纤维进行试验是一项非常困难的任务，因为纤维非常细（直径小于  $150 \mu\text{m}$ ），一些纤维的直径甚至只有几微米。在试验中，通常很难操作和在试验夹具上夹紧。另外，纤维通常是陶瓷的，其断裂强度由表面和体积缺陷决定。因此，纤维强度依赖于被试验材料的大小（即工作段长度非常重要）。脆性行为导致纤维断裂的随机性质，必须对取自很多试验的数据进行统计分析。本节的试验方法描述了处理增强纤维的步骤。

## 1.6.2 力学性能试验方法

### 1.6.2.1 拉伸试验

对单丝纤维拉伸试验推荐的方法是 ASTM D 3379（文献 1.6.2.1）。

### 1.6.2.2 蠕变和蠕变断裂

增强纤维性能强烈影响复合材料的高温性能，它必须具有适当的高温强度。另外，长期应用要求纤维具有好的抗蠕变能力。为开展高温复合材料和采用细观力学分析预测长期性能，必须很好地记录纤维的蠕变性能。

在评价纤维的蠕变和蠕变断裂强度时，传统的方法是在恒定温度对纤维施加恒定拉伸载荷（文献 1.6.2.2(a) 和 (b)）。这通常在加吊重载荷试验设备上进行，如文献 1.6.2.2(c) 中所述。为避免应用热夹具时纤维、夹具和环境之间可能的相互作用，在冷夹具上垂直夹紧一定长度的纤维。用电阻加热炉来保持指定工作段长度内纤维（一般是 1 in 或 25 mm）的恒定温度。用任何一种非接触位移装置来测量延伸率和断裂应变。可在空气或保护性环境中用一环绕纤维和加热元件的合适容器进行蠕变试验。

蠕变断裂强度、时间和断裂应变显示出较大的分散性。这是由于脆性纤维的断裂是随机的，并且缺陷的尺寸和分布会随加载时间和温度增加而增加。基于上述原因，为很好的了解断裂性能，必须对许多纤维进行试验和统计分析。

### **1.6.2.3 弯曲应力松弛**

该步骤提供一个简单的方法来测量纤维蠕变，特别是应力松弛行为。弯曲应力松弛（BSR）方法是将纤维打成环，然后在一定温度的炉中放置一规定的时间。然后将纤维环冷却至室温测量环的直径。切断环上某一点以消除应变，热曝露引起的任何效应可通过测量残留环的半径来实现。文献 1.6.2.3(a) 和(b) 给出被测纤维的详细试验方法和数据。

BSR 方法和典型的拉伸蠕变试验（1.6.2.2 节）相比，有许多优点，其能同时研究相同状态下的（时间、温度、气氛）小直径和短长度的很多纤维。而且，BSR 方法也能测量蠕变形成机织结构或绷紧半径的能力。

## **1.6.3 物理性能试验方法**

### **1.6.3.1 密度**

在 ASTM D 3800 “高模量纤维密度的标准试验方法”（文献 1.6.3.1）中有三种试验方法，可选择其一进行纤维密度测量。

## **1.6.4 显微结构分析技术**

此节留待以后补充。

## **1.6.5 化学分析技术**

此节留待以后补充。

## **1.6.6 环境影响试验方法**

此节留待以后补充。

## **1.7 纤维浸润剂试验和分析方法**

### **1.7.1 引言**

此节留待以后补充。

## **1.7.2 物理性能试验方法**

此节留待以后补充。

## **1.7.3 化学分析技术**

此节留待以后补充。

## **1.8 纤维涂层、界面、中间相的试验和分析方法**

### **1.8.1 引言**

此节留待以后补充。

## 1.8.2 力学性能试验方法

此节留待以后补充。

## 1.8.3 物理性能试验方法

此节留待以后补充。

## 1.8.4 显微结构分析技术

此节留待以后补充。

## 1.8.5 化学分析技术

此节留待以后补充。

# 1.9 基体试验和分析方法

## 1.9.1 引言

基体是 MMC 的主要组分。其作用是约束就位和保护纤维不受机械及环境损伤。基体也起到将载荷转移到纤维上的作用。另外，基体将它自身性能传给复合材料，使其具有金属的特征，即延展性、导电和导热性。

作为主要组分，基体性能影响复合材料行为。因而，应对基体彻底了解和进行表征。下面章节给出基体性能的试验技术。这方面的知识可用于质量控制及其细观力学分析。

通常，基体试验技术和传统的单一材料试验技术相似。然而，在考虑和这些材料非传统制造形式有关的特性时，有几点需要补充。

## 1.9.2 力学试验方法

本节给出表征纯基体力学性能的试验方法。在分析复合材料行为时，这些性能可作为细观力学模型的输入。当没有复合材料数据时特别有用并对建立复合材料如何响应的概念是必需的。

本节分析的基体材料，其制造方法和复合材料的制造方法相似，包括压固和热处理。这可保证纯基体的性能能够真正代表复合材料中基体的性能。

### 1.9.2.1 拉伸

金属基体的拉伸试验应该按照室温试验用的 ASTM E 8 (文献 1.9.2.1(a)) 及高温试验用的 E 21 (文献 1.9.2.1(b)) 进行。

注意：由于采用非传统工艺加工这些基体材料，其可能是各向异性的。因而，如果想得到这些材料的详细特征，试件应取自所提供材料的不同方向。另外，应该在被挑选的拉伸试件上测量横向应变。

### 1.9.2.2 蠕变

基体材料的蠕变试验应按 ASTM E 139 (文献 1.9.2.2) 试验方法进行。

### 1.9.2.3 应力松弛

除最大载荷以外，应力松弛试验与蠕变试验相似，应变不变，允许应力松弛，最终到达饱和点，此时，终止试验。除此以外，其他试验条件应按 ASTM E 139（文献 1.9.2.3）试验方法。另外，应该给出应力松弛相对时间关系的数据。

### 1.9.2.4 疲劳

为了用一些细观力学方法预测复合材料的疲劳寿命，可以进行纯基体的疲劳试验。可进行载荷或应变控制的试验，这取决于试验的最终目的和所用模型。对载荷控制试验应按 ASTM E 466（文献 1.9.2.4(a)），对应变控制试验应按 E 606（文献 1.9.2.4(b)）。

## 1.9.3 物理试验方法

### 1.9.3.1 密度

基体的密度用 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”（文献 1.4.4.1）所描述的阿基米德方法测量。

## 1.9.4 显微结构分析技术

采用一直用于单一金属材料的标准方法进行基体材料金相学研究。文献 1.9.4(a)-(c) 给出一些典型步骤。下面是 Ti 合金金相制备的通常的操作步骤：

1. 采用半自动化抛光设备容易制备单一 Ti 试样，对每个试样用 150 rpm，压力 5 lb。相继用粒度为 320、400、600、800、1200 目的 SiC 砂纸磨削。
2. 在抛光最后阶段，最好采用侵蚀抛光完成试件制备。该过程通过化学和机械方法削减材料，产生无刻痕和无变形的显微结构。通常采用化学织物抛光布和如下的 50 nm 氧化硅胶体悬浮液，配比如下：
  - 150 ml 水
  - 150 ml-50 nm 氧化硅胶体
  - 30 ml 过氧化氢
  - 1 ml 硝酸
  - 1 ml 氢氟酸

### 1.9.4.1 Ti 显微结构分析技术

此节留待以后补充。

### 1.9.4.2 Al 显微结构分析技术

此节留待以后补充。

## 1.9.5 化学分析技术

此节留待以后补充。

## 1.9.6 环境影响试验方法

此节留待以后补充。

## 1.10 结构敏感性能表征

### 1.10.1 引言

此节留待以后补充。

### 1.10.2 机械紧固连接

此节留待以后补充。

### 1.10.3 胶接、钎焊和焊接连接

此节留待以后补充。

### 1.10.4 曲面形状

此节留待以后补充。

### 1.10.5 结构设计细节

此节留待以后补充。

### 1.10.6 过渡和其他特定区域

此节留待以后补充。

### 1.10.7 尺寸效应

此节留待以后补充。

### 1.10.8 其他主题

此节留待以后补充。

## 1.11 数据分析

### 1.11.1 概述

此节留待以后补充。

### 1.11.2 基于统计的材料性能计算步骤

此节留待以后补充。

### 1.11.3 计算步骤中的样本

此节留待以后补充。

### 1.11.4 统计表

此节留待以后补充。

## 参考文献

- 1.1.6(a) Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5F, 1 November 1990.
- 1.1.6(b) DoD/NASA Advanced Composites Design Guide, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Dayton, OH, prepared by Rockwell International Corporation, 1983 (distribution limited).
- 1.1.6(c) ASTM E 206, inDefinitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01. American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1984.
- 1.1.6.3(a) ASTM E 380, inStandard for Metric Practice, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1984.
- 1.1.6.3(b) Engineering Design Handbook: Metric Conversion Guide, DARCOM P 706-470, July 1976.
- 1.1.6.3(c) The International System of Units (SI). NBS Special Publication 330, National Bureau of Standards 1986 edition.
- 1.1.6.3(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.
- 1.1.6.3(e) The International System of Units Physical Constants and Conversion Factors, NASA Special Publication 7012, 1964.
- 1.2.8.4.3.1(a) Ahearn, J.S., and Cooke, D.C., Joining Discontinuous SiC Reinforced Al Composites, Martin Marietta Co., Report No: NSWC TR-86-36, September 1, 1985.
- 1.2.8.4.3.1(b) Cola, M.J., Martin, G., and Albright, C.E., Inertia Friction Welding of 6061-T6/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> MMCs, Research Report MR9108, Edison Welding Institute, June 1991.
- 1.2.8.4.3.2(a) Thomas et al., Friction Stir Welding, U. S. Patent 5, 460, 317.
- 1.2.8.4.3.2(b) Dawes, C.J., and Thomas, W.M., Friction Stir Process Welds Aluminum Alloys, Welding Journal, March 1996, pp. 41-45.
- 1.2.8.4.3.2(c) Rhodes, C. G., Mahoney, M. W. and et al., Effects of Friction Stir Welding on Microstructure of 7075 Al, Script Metall., Vol 36, 1997, pp. 69-75.
- 1.2.8.4.3.3(a) Harrigan, W. C., and Dolowy, J. F., Investigation of Joining Concepts for Graphite Fiber Reinforced Aluminum Composites, DWA Inc., NSWC TR- 284-9, March 1980.
- 1.2.8.4.3.3(b) Luhman, T.S., and Williams R. L., Development of Joint and Joining Techniques for Metal Matrix Composites, Boeing Co., Report: AMMRC TR-84-35, August 1984.
- 1.2.8.4.3.4(a) Nederveld, P.D., and Burns R. A., Metal Matrix Composites Joining and Assembly Technology, Boeing Defense & Space, Report No. WL-TR-93-4083, September 1993.
- 1.2.8.4.3.4(b) Lienert, T., Lane, C., and Gould, J., Selection and Weldability of Al/Metal Matrix Composites, ASM Handbook, Vol 6, Materials Park, OH, ASM, 1995, pp. 555-559.
- 1.2.8.4.3.6 Kissinger, R.D., Advanced Titanium Based Material Joining Technology, G.E. Aircraft Engines, Naval Air Warfare Center, Phase 1 Report No. 8, January 1994.
- 1.2.8.4.3.7 Goddard, D. M., and Pepper, R.T., A Preliminary Investigation of Joining Methods for Gr/Al Composites, Aerospace Corp., SAMSO-TR-71-149, August 1971.
- 1.2.8.4.3.8 Altshuller, B., Chisty, W., and Wiskel, B., GMA Welding of Al-Alumina MMCs, Weldability of Materials, Materials Park, OH, ASM, 1990, pp. 305-309.
- 1.2.8.4.3.10 Devletian, J.H., SiC/Al MMC Welding by a Capacitor Discharge Process, Welding Journal, pp. 33-39, 1987.
- 1.2.8.4.3.11 Rosenwasser, S.N., and Avil, A.J., Development of Low-Temp, Solid-State Bonding Approach for MMC Joints, Sparta Inc., NSWC-TR-89-302, Oct. 24, 1989.
- 1.2.8.4.3.12 Nowitzky, A.M., and Supan, E. C., Space Structures Concepts and Materials, SBIR Phase 2 Final Report, DWA Inc., NASA-MSFC, Contract No. NAS8-37257, June 1988.

- 1.2.8.4.3.14(a) Kiely, J. D., Performance of Graphite Fiber Reinforced Aluminum Under Fastening Compression Loads, Naval Surface Warfare Center, NA-WC-TR-91-408, July 1991.
- 1.2.8.4.3.14(b) Sawyer, J.W. and Rothgeb, T. M., Thermal-Mechanical Test of TMC Highly Loaded Joints, NASP TM-1176, April 1994.
- 1.2.8.4.3.15 Lee, J. A., and Kashalika, U., Casting of Weldable Gr/Mg MMC with Built-in Metallic Inserts, NASA Conf. 3249, Vol 1, p. 371, Dec. 7-9, 1993, Anaheim, CA.
- 1.2.8.4.3.16(a) Sudhakar, K., Joining of Aluminum Based Particulate-Reinforced MMCs, Dissertation, The Ohio State University, 1990.
- 1.2.8.4.3.16(b) Klehn, R., Joining of 6061 Aluminum Matrix Ceramic Particulate Reinforced Composites, M.S. thesis, Massachusetts Institute of Technology, Sept 1991.
- 1.2.8.4.3.17 Lin, R. Y., Warrier, S.G., and et. al., The Infrared Infiltration and Joining of Advanced Materials, JOM, Vol 46, March 1994, pp. 26-30.
- 1.3.2.4(a) Worthem, D.W., in Flat Tensile Specimen Design for Advanced Composites, in NASA CR-185261, 1990.
- 1.3.2.4(b) Lerch, B.A. and Saltsman, J.F., in Tensile Deformation Damage in SiC Reinforced Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn, NASA TM-103620, 1991.
- 1.4.2.1 ASTM Test Method D3552/D3552M, in Tensile Properties of Fiber-Reinforced Metal Matrix Composites, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 173-177.
- 1.4.2.2 ASTM Standard D3410-87, in Standard Test Method for Compressive Properties of Unidirectional or Crossply Fiber-Resin Composites, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, 1995, pp. 131-147.
- 1.4.2.3 ASTM Standard D5379/D5379M, in Standard Test Method for Shear Properties of Composite Materials by the V-Notched Beam Method, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, 1998, pp. 230-242.
- 1.4.2.4.1(a) ASTM Test Method E466, in Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998, pp. 471-475.
- 1.4.2.4.1(b) ASTM Test Method E606, in Strain-Controlled Fatigue Testing, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998, pp. 528-542.
- 1.4.2.4.5(a) Sanders, B.P., Mall, S., and Lerch, B.A., in Fatigue Response of the Unidirectional and Cross-Ply SCS-6/Ti-15-3 MMC, in Proceedings from the Tenth International Conference on Composite Materials, Whistler, B.C. Canada, eds. A. Poursartip and K. Street, Vol I: Fatigue and Fracture, August 1995, pp. 529-536.
- 1.4.2.4.5(b) Subramanian, S., Lerch, B.A., Castelli, M.G. and Allen, D., in Effect of Fiber Volume Fraction on Fully-Reversed Isothermal Fatigue Behavior of Unidirectional SCS6/Ti-15-3 Composites, in Composites and Functionally Graded Materials MD-Vol 80, eds., T.S. Srivatsan, A. Zavalaniangos, K.I. Jacob, N. Katsume, W. Jones, K. Ramani, S. Sitaraman and S. Yang, ASME, 1997, pp. 131-139.
- 1.4.2.4.5(c) ASTM Test Method E9, in Compression Testing of Metallic Materials at Room Temperature, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998, pp. 99-106.
- 1.4.2.5(a) Marshall, D.B., Cox, B.N., and Evans, A.G., in The Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-Matrix Fiber Composites, in Acta Metallurgica, Vol 33, 1985, pp. 2013-2021.
- 1.4.2.5(b) McCartney, L.N., in Mechanics of Matrix Cracking in Brittle-Matrix Fiber-Reinforced Composites, in Proceedings of the Royal Society of London, Series A, Vol 409, 1987, pp. 329-350.
- 1.4.2.5(c) McMeeking, R.M. and Evans, A.G., in Matrix Fatigue Cracking in Fiber Composites, in Mechanics of Materials, Vol 9, 1990, pp. 217-227.

- 1.4.2.5(d) Rose, L.R.F., in *Crack Reinforcement by Distributed Springs*, in *J. Mech. Phys. Solids*, Vol 35, No. 4, 1987, pp. 383-405.
- 1.4.2.5(e) Ghosh, L.J., Telesman, J., and Kantz, P., in *Closure Pressure Distributions and Their Effect on the Crack Driving Force of Bridged Cracks*, in *6th Annual HITEMP Review, Vol II: Compressor/Turbine Materials*, NASA CP 19117, Oct. 1993, pp. 45-1 to 45-12.
- 1.4.2.5(f) Ghosh, L.J., Kantz, P., and Telesman, P., in *Modeling of Crack Bridging in a Unidirectional Metal Matrix Composite*, in *International Journal of Fracture*, Vol 54, 1992, pp. 345-357.
- 1.4.2.5(g) ASTM Standard E647, in *Standard Test Method for Measurement of Fatigue Crack Growth Rates*, in *Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01*, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1994, pp. 569-596.
- 1.4.2.5(h) Tada, H., Paris, P.C., and Irwin, G.R., *The Stress Analysis of Cracks Handbook*, 2nd Edition, Paris Production, Inc., St. Louis, Mo., 1985.
- 1.4.2.5(i) Dao, T., and Metta, S., in *Analysis of an Edge-Cracked Specimen Subjected to Rotationally-Constrained End Displacements*, in *NASA Johnson Space Center, Report 32171 (LESC29683)*, August 1991.
- 1.4.2.5(j) Blatt, D., John, R., and Coker, D., in *Stress Intensity Factor and Compliance Solutions for a Single Edge Notched Specimen with Clamped Ends*, in *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 47, No. 4, 1994, pp. 521-532.
- 1.4.2.5(k) John, R., and Rigling, B., in *Effect of Height to Width Ratio on K and CMOD Solutions for a Single Edge Cracked Geometry With Clamped Ends*, in *Engineering Fracture Mechanics*, Vol 60, No. 2, 1998, pp. 147-156.
- 1.4.2.5(l) Kantz, P., and Telesman, J., in *Fatigue Crack Growth Study of SCS6/Ti-15-3 Composite*, in *International Journal of Fatigue*, Vol 12, No. 5, 1990, pp. 409-415.
- 1.4.2.5(m) John, R., Lackey, A.F., and Ashbaugh, N.E., in *Fatigue Crack Propagation Parallel to Fibers in Unidirectionally Reinforced SCS-6/Timetal®21S*, in *Scripta Materialia*, Vol 35, No. 6, 1996, pp. 711-716.
- 1.4.2.5(n) Ghosh, L.J., Kantz, P., and Telesman, J., in *Fatigue Crack Growth and Crack Bridging in SCS-6/Ti-24-11*, in *Cyclic Deformation, Fracture and Nondestructive Evaluation of Advanced Materials: Second Volume*, ASTM STP 1184, M.R. Mitchell and O. Buck, eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1994, pp. 64-86.
- 1.4.2.5(o) Life Prediction Methodology for Titanium Matrix Composites, ASTM STP 1253, Johnson, W.S. Larsen, J.M. and Cox, B.N., Eds., American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1996.
- 1.4.2.13.1(a) Marshall, D.B., in *An Indentation Method for Measuring Matrix-Fiber Frictional Stresses in Ceramic Composites*, in *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol 67, No. 12, 1984, pp. C258-C259.
- 1.4.2.13.1(b) Laughner, J.W., Shaw, N.J., Bhatt, R.T., and DiCarlo, J.A., in *Simple Indentation Method for Measurement of Interfacial Shear Strength in SiC/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites*, in *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol 7, No. 7-8, 1986, p. 932.
- 1.4.2.13.1(c) Laughner, J.A., and Bhatt, R.T., in *Measurement of Interfacial Shear Strength in SiCFiber/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composites*, in *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol 72, No. 10, 1989, pp. 2017-2019.
- 1.4.2.13.1(d) Eldridge, J.I., and Brindley, P.K., in *Investigation of Interfacial Shear Strength in a SiC Fibre/Ti-24Al-11Nb Composite by a Fibre Push-Out Technique*, in *J. Mater. Sci. Lett.*, Vol 8, No. 12, 1989, pp. 1451-1454.
- 1.4.2.13.1(e) Yang, C.J., Jeng, C.J., and Yang, J.M., in *Interfacial Properties Measurement for SiC Fiber-Reinforced Titanium Alloy Composites*, in *Scripta Metall. Mater.*, Vol 24, No. 3, 1990, pp. 469-474.
- 1.4.2.13.1(f) Bright, J.D., Shetty, D.K., Griffin, C.W., and Limaye, S.Y., *J. Am. Ceram. Soc.*, Vol 72, No. 10, 1989, pp. 1891-1898.
- 1.4.2.13.1(g) Eldridge, J.I., in *Desktop Fiber Push-Out Apparatus*, in *NASA TM 105341*, December 1991.
- 1.4.2.13.1(h) Wereszczak, A.A., Ferber, M.K., and Lowden, R.A., in *Development of an Interfacial Test System for the Determination of Interfacial Properties in Fiber Reinforced Ceramic Composites*, in *Ceram. Eng. Sci. Proc.*, Vol 14, No. 7-8, 1993, pp. 156-167.
- 1.4.2.13.1(i) Jero, P.D., Parhasarathy, T.A., and Kerans, R.J., in *Interfacial Roughness in Ceramic Matrix Composites*, in *Vol 13*, No. 7-8, 1992, pp. 64-69.

- 1.4.2.13.1(j) Warren, P.D., Mackin, T.J., and Evans, A.G., inDesign, Analysis and Application of an Improved Push-Though Test for the Measurement of Interface Properties in Composites, in *Acta Metall. Mater.*, Vol 40, No. 6, 1992, pp. 1243-1249.
- 1.4.2.13.1(k) Majumdar, B.S., and Miracle, D.B., inInterface Measurements and Applications in Fiber-Reinforced MMCs, in *Key Eng. Mater.*, Vols. 116-117, 1996 pp. 153-172.
- 1.4.2.13.1(l) Eldridge, J.I., inFiber Push-Out Testing of Intermetallic Matrix Composites at Elevated Temperatures, in in *Intermetallic Matrix Composites II*, D.B. Miracle, D.L. Anton, and J.A. Graves, Eds., Mater. Res. Soc. Proc., Vol 273, 1992, pp. 325-330.
- 1.4.2.13.1(m) Eldridge, J.I., and Ebihara, B.T., inFiber Push-Out Testing Apparatus for Elevated Temperatures, in *J. Mater. Res.*, Vol 9, No. 4, 1994, pp. 1035-1042.
- 1.4.2.13.1(n) Eldridge, J.I., inElevated Temperature Fiber Push-Out Testing, in in *Ceramic Matrix Composites B Advanced High-Temperature Structural Materials*, R.A. Lowden et al., Eds., Mater. Res. Soc. Proc., Vol 365, 1995, pp. 283-290.
- 1.4.2.13.1(o) Daniel, A.M., Smith, S.T., and Lewis, M.H., inA Scanning Electron Microscope Based Microindentation System, in *Rev. Sci. Instrum.*, Vol 65, No. 3, 1994 pp. 632-638.
- 1.4.2.13.13 Eldridge, J.I., inEnvironmental Effects on Fiber Debonding and Sliding in an SCS-6 SiC Fiber Reinforced Reaction-Bonded Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> Composite, in *Scripta Metall. Mater.*, Vol 32, No. 7, 1995, pp. 1085-1089.
- 1.4.2.13.14(a) Ghosh, L.J., Eldridge, J.I., and Kantzios, P., inAnalytical Modeling of the Interfacial Stress State During Pushout Testing of SCS-6/Ti-Based Composites, in *Acta Metall. Mater.*, Vol 42, No. 11, 1994, pp. 3895-3908.
- 1.4.2.13.14(b) Kallas, M.N., Koss, D.A., Hahn, H.T., and Hellmann, J.R., inInterfacial Stress State Present in a inThin Slice in Fibre Push-Out Test, in *J. Mater. Sci.*, Vol 27, 1992, pp. 3821-3826.
- 1.4.2.13.14(c) Parthasarathy, T.A., Marshall, D.B., and Kerans, R.J., inAnalysis of the Effect of Interfacial Roughness on Fiber Debonding and Sliding in Brittle Matrix Composites, in *Acta Metall. Mater.*, Vol 42, No. 11, pp. 3773-3784.
- 1.4.2.13.14(d) Lara-Curcio, E., and Ferber, M.K., inMethodology for the Determination of the Interfacial Properties of Brittle Matrix Composites, in *J. Mater. Sci.*, Vol 29, 1994, pp. 6152-6158.
- 1.4.2.13.14(e) Petrich, R.R., Koss, D.A., Hellmann, J.R., and Kallas, M.N., inOn inLarge-Scale in Stable Fiber Displacement During Interfacial Failure in Metal Matrix Composites, in *Scripta Metall. Mater.*, Vol 28, 1993, pp. 1583-1588.
- 1.4.2.13.14(f) Galbraith, J.M., Rhyne, E.P., Koss, D.A., and Hellmann, J.R., inThe Interfacial Failure Sequence during Fiber Pushout in Metal Matrix Composites, in *Scripta Mater.*, Vol 35, No. 4, pp. 543-549.
- 1.4.2.13.14(g) Chandra, N., and Ananth, C.R., inAnalysis of Interfacial Behavior in MMCs and IMCs by the Use of Thin-Slice Push-Out Tests, in *Composites Sci. Technol.*, Vol 54, 1995, pp. 87-100.
- 1.4.2.13.14(h) Eldridge, J.I., inExperimental Investigation of Interface Properties in SiC Fiber-Reinforced Reaction-Bonded Silicon Nitride Matrix Composites, in in *Ceramic Matrix Composites-Advanced High-Temperature Structural Materials*, R.A. Lowden et al., Eds., Mater. Res. Soc. Proc., Vol 365, 1995, pp. 353-364.
- 1.4.2.14 ASTM Standard E384, inStandard Test Method for Microhardness of Materials, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1995, pp. 390-408.
- 1.4.2.15.6(a) ASTM Standard D3039/D3039M, in Standard Test Method for Tensile Properties of Polymer Matrix Composite Materials, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1995, pp. 114-123.
- 1.4.2.15.6(b) Castelli, M.G., inAn Advanced Test Technique to Quantify Thermomechanical Fatigue Damage Accumulation in Composite Materials in, *J. of Composite Technology and Research*, Oct., 1994, pp. 323-328.
- 1.4.2.15.6(c) Revelos, W.C., Jones, J.W., and Dolley, E.J., inThermal Fatigue of a SiC/Ti-15Mo-2.7Nb-3Al-0.2Si Composite in, *Metallurgical and Materials Transactions A*, Vol 26A, May 1995, pp. 1167-1181.
- 1.4.4.1 ASTM D792, inStandard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement

- in. Annual Book of Standards, Vol 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 152-155.
- 1.4.4.2 ASTM D3553, in Standard Test Method for Fiber Content by Digestion of Reinforced Metal Matrix Composites in, Annual Book of Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 169-171.
- 1.4.5.1(a) Metallography and Microstructures - Volume 9, Metals Handbook, 9th edition, ASM, Materials Park, OH, 1985.
- 1.4.5.1(b) Samuels, L.E., Metallographic Polishing by Mechanical Methods, ASM, Materials Park, OH, 1982.
- 1.4.5.1(c) Bousfield, B., Surface Preparation and Microscopy of Materials, John Wiley and Sons, NY, 1992.
- 1.4.5.1(d) Buhler, H.-E., and Houghardy, H.P., Atlas of Interference Layer Metallography, Deutsche Gesellschaft fuer Metallkunde, Oberursel, Germany, 1980.
- 1.4.5.1(e) Lerch, B.A., Hull, D.R., and Leonhardt, T.A., in Microstructure of a SiC/Ti-15-3 Composite in, Composites, Vol 21(3), May 1990, pp. 216-224.
- 1.4.5.1(f) Singh, M., and Leonhardt, T.A., in Microstructural Characterization of Reaction-Formed Silicon Carbide Ceramics in, Materials Characterization, Vol 35, 1995, pp. 221-228.
- 1.4.5.1(g) Mitomo, M., Sato, Y., Yashima, I., and Tsutsumi, M., in Plasma Etching of Non-oxide Ceramics in, J. Mater. Sci. Lett., Vol 10, 1990, pp. 83-84.
- 1.4.5.1(h) Kirk, R.W., in Applications of Plasma Technology to the Fabrication of Semiconductor Devices in, Techniques and Applications of Plasma Chemistry, J.R. Hollahan and A.T. Bell, eds., Wiley, NY, 1974, p. 347.
- 1.4.5.1(i) Arnold, S.M., Pindera, M.-J., and Wilt, T.E., in Influence of Fiber Architecture on the Inelastic Response of Metal Matrix Composites in, Int. J. of Plasticity, 1996, Vol 12, No. 4, pp. 507-545.
- 1.4.5.1(j) Russ, J.C., Computer-Assisted Microscopy: The Measurement and Analysis of Images, Plenum Press, NY, 1990.
- 1.4.5.1(k) Russ, J.C., The Image Process Handbook, CRC Press, Inc., Boca Raton, FL, 1992. 1.4.5.1(l) Arnold, S.M., Wilt, T.E., in Influence of Engineered Interfaces on Residual Stresses and Mechanical Response in Metal Matrix Composites in, Composite Interfaces, Vol 1(5), 1993, pp. 381-402.
- 1.4.5.1(m) Salzar, R.S., and Barton, F.W., in Residual Stress Optimization in Metal Matrix Composites Using Discretely Graded Interfaces in, Composite Engineering, Vol 4(1), 1994, pp. 115-128.
- 1.4.5.1(n) Pindera, M.-J., Arnold, S.M., and Williams, T.O., in Thermoplastic Response of Metal Matrix Composites with Homogenized and Functionally Graded Interfaces in, Composites Engineering, Vol 4(1), 1994, pp. 129-145.
- 1.4.6.1 ASTM Test Method E1587, in Chemical Analysis of Refined Nickel in, Annual Book of Standards, Vol 3.06, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 512-539.
- 1.6.2.1 ASTM D3379, in Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1998, pp. 113-116.
- 1.6.2.2(a) DiCarlo, J.A., in Property Goals and Test Methods for High Temperature Ceramic Fibre Reinforcement in, Proceedings of the 8th CIMTEC, Advanced Structural Fiber Composites, eds., P. Vincenzini and G.C. Righini, Techna Publishing, Florence, Italy, 1994.
- 1.6.2.2(b) Yun, H.M. and DiCarlo, J.A., in Time/Temperature Dependent Tensile Strength of SiC and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-Based Fibers in, Ceramic Transactions, Vol 74, eds., N.P. Bansal and J.P. Singh, American Ceramic Society, 1996 , pp. 17-26.
- 1.6.2.2(c) Yun, H.M. & Goldsby, J.C., in Tensile Creep Behaviour of Polycrystalline Alumina Fibres in NASA TM 106269, 1993.
- 1.6.2.3(a) Morscher, G.N. and DiCarlo, J.A., in A Simple Test for Thermomechanical Evaluation of Ceramic Fibers in, Journal of the American Ceramic Society, Vol 75, No. 1, 1992, pp. 136-140.
- 1.6.2.3(b) Youngblood, G.E., Hamilton, M.L., and Jones, R.H., in Technique for Measuring Irradiation Creep in Polycrystalline SiC Fibers in, Fusion Materials Semiannual Progress Report for the Period ending June 30, 1996. DOE/ER-0313/20, p. 146.

- 1.6.3.1 ASTM D3800, in *Standard Test Method for Density of High-Modulus Fibers* in, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 15.03, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 172-176.
- 1.9.2.1(a) ASTM Test Method E8, in *Tension Testing of Metallic Materials*, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 56-76.
- 1.9.2.1(b) ASTM Test Methods E21, in *Elevated Temperature Tension Tests of Metallic Materials*, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 129-136.
- 1.9.2.2 ASTM Test Method E139, in *Conducting Creep, Creep-rupture, and Stress-rupture Tests of Metallic Materials*, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, 1997, pp. 253-265.
- 1.9.2.4(a) ASTM Test Method E466, in *Conducting Force Controlled Constant Amplitude Axial Fatigue Tests of Metallic Materials*, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 466-470.
- 1.9.2.4(b) ASTM Test Method E606, in *Strain-Controlled Fatigue Testing*, in Annual Book of ASTM Standards, Vol 03.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 523-537.
- 1.9.3.1 ASTM D792, in *Standard Test Method for Density and Specific Gravity (Relative Density) of Plastics by Displacement* in, Annual Book of ASTM Standards, Vol. 8.01, American Society for Testing and Materials, West Conshohocken, PA, 1997, pp. 152-155.
- 1.9.4(a) Metallography and Microstructures - Volume 9, Metals Handbook, 9th edition, ASM, Materials Park, OH, 1985.
- 1.9.4(b) Samuels, L.E., *Metallographic Polishing by Mechanical Methods*, ASM, Materials Park, OH, 1982.
- 1.9.4(c) Bousfield, B., *Surface Preparation and Microscopy of Materials*, John Wiley and Sons, NY, 1992.

## 第2章 金属基复合材料设计指南

### 2.1 一般信息

#### 2.1.1 引言

此节留待以后补充。

#### 2.1.2 第2章的目的、范围和组织结构

此节留待以后补充。

### 2.2 数据的使用

此节留待以后补充。

### 2.3 结构设计和分析

#### 2.3.1 引言

由于复合材料越来越受到欢迎，对材料进行设计来提供一系列想要的性能的概念也得到了促进。将材料设计包含在结构设计过程已经对结构设计过程产生显著的影响，特别是初步设计阶段。初步设计时，将考虑许多材料，包括一些没有实验性能数据的材料。因此，初步的材料选择必须基于分析预测的性能。分析方法是细观力学研究的结果，即复合材料有效性能和复合材料组分性能之间关系的研究。非均匀的复合材料用具有有效性能的匀质，常常是各向异性材料来描述。

本章的目的是在设计复合材料时，为分析技术提供概述。从一单层内的基体和增强体（纤维或颗粒）的细观力学开始，考虑包括用以得到层压板的简单几何构型的分析。

2.3节的对象主要是单向纤维复合材料和对称层压板，但也讨论了非连续纤维增强复合材料。从描述基本单层性能的细观力学开始，再引导到任一坐标系中的经典层压板分析理论。讨论了在设计和分析时，考虑不同损伤和失效机理的方法。它重点处理了将单层的结果转化对预测的层压板行为，而且涵盖了多轴载荷情况和结构响应，如损伤的起始和演化、蠕变、松弛、疲劳、屈曲、耐久性和振动等。也讨论了层压板结构对更复杂载荷的响应。

层压板在一系列规定载荷下的强度最好由试验来确定。然而，作为一初步设计研究，在考虑许多被选的层压板和不同载荷条件时，估计层压板强度的分析方法是很有用的。虽然层压板每一层中应力是在整个组分内分布的，十分复杂，没有准确的分析方法。但是，用来指导初步设计过程的合理方法确实是存在的。

##### 2.3.1.1 分析方法的分级

根据对应力分布要求的详细程度，可将分析方法分成几级。下面的分级具有实际意义：

- 层压板级。利用层压板坐标系中各应力分量的平均值。

- **层或单层级。**利用每一层内应力分量的平均值。
- **组分级。**利用每一层内每一相（增强体或基体）的应力分量平均值。
- **细观级。**利用每一相内每一点的局部应力。

对每一组分适用失效准则所用的细观级应力，确定了局部失效开始时的外部载荷。对金属基复合材料，需要用细观级应力的精确表述来真实地预测强度。然而，与假设的规则局部几何形状的偏离造成的不确定性和局部强度统计变异，有时使得这种处理是不实际的。

另一个极端情况是，将单一应力分量试验测得的强度转变成复合应力情况下的期望强度估计值时，层压板级的应力是有用的。然而，这种处理无助于评价另外那些不存在试验数据的层压板。

从细观级分析预测的单层级应力，提供了预测层压板强度的常用方法。单层中的平均应力被用来计算首层失效及随后其他层失效，最终导致层压板失效。2.3.3 节介绍了采用逐层模型分析层压板的方法。

组分级或相平均应力也能由细观级分析得到。某些情况下，对于单向复合材料或单层的强度，这是一种有用的方法。

精确分析金属基复合材料的最常用方法是局部-总体方法。采用该方法时，载荷逐渐增加，并分解到细观级。随后进行细观力学分析来确定是否和在何处发生损伤或塑性变形。通过均一化细观级应力、应变场和载荷的进一步增加，确定材料总体响应。细观力学研究复合材料组分性能和复合材料有效性能之间的关系。从基本的组分性能开始，2.3.2 节发展了纤维增强单层的细观力学分析。2.3.3 节则发展了相应的层压板逐层分析方法。

### 2.3.1.2 基本概念

具体应用中采用的方法由下面定义的几个基本概念来规定，它表征了复合材料的响应。

**材料均质性。**由定义可知，复合材料是非均质材料。力学分析是在假设材料均质性条件下进行的。通过考虑微观尺度和宏观尺度的均质性来解决这种明显的矛盾。微观上，复合材料当然是非均质的。然而，宏观尺度上，其体现均质性，试验时也是均质响应。复合材料分析采用基于局部应力和应变场的等效性能和均匀化的应力应变场。

**材料各向异性。**各向异性是指材料性能和方向有关。各向异性材料的不同方向有不同的性能，由 21 个互相独立的常数表征。幸好大多数材料有一个或多个对称面。下面是最常用的特殊情况：

- **单斜材料**（例如，具有偏轴纤维的单层）有一个材料对称面，由13个常数表征。
- **正交各向异性材料**（例如，纤维呈周期矩形排列的单层）有三个互相正交的材料对称面，由9个独立的常数表征。
- **横观各向同性材料**是正交各向异性材料的一个特例，它有一个与方向无关的面，例如，具有大量对齐，但多少随机分布的小直径纤维的单层。横观各向同性材料由5个独立的常数表征。
- **各向同性材料**的所有方向具有相同的性能，由两个独立常数表征。例如，可将球形颗粒随机分布增强的基体看作是各向同性的。

**材料组分响应。**应力和应变之间的关系描述了材料响应。绝大多数材料力学分析都假设材料是线弹性响应，即给定温度下，应变状态仅和当前应力有关，并线性相关。通常，金属材料的应变状态也与以前的载荷历程和时间有关。根据载荷历程和环境条件，金属基

体响应一般可分为：弹性，弹性-塑性，或弹性-粘塑性等。弹性-塑性响应是指材料开始时有一个（线性）弹性区，随后是和时间无关的塑性变形，载荷卸去以后是永久的残留应变。弹性-粘塑性响应是更一般的，其塑性变形与时间有关。金属塑性变形和微结构位错运动有关。有一点需要记住，所有的塑性变形的演化随时间而发展，但是在某些情况下，载荷的增加非常慢，使得塑性变形有足够的时间去演化，响应可看作是和速率无关的。金属在室温的响应通常属于这种情况。

**残余应力。**复合材料微观不均匀性的一个结果是基体和增强体的热膨胀不匹配。复合材料在高温下加工，制造完之后，这种不匹配会引起残余应变，因而引起残余应力。残余应力的大小和组分之间的热膨胀系数不匹配有很大关系。在某些材料体系中，残余应力很大，在冷却过程中足以引起永久变形。

**内在损伤。**许多内在损伤机制在金属基复合材料上可能发生，基体、增强体或基体-增强体界面可能开裂。另外，基体可产生空洞，而环境损伤，如在基体-增强体界面附近处的氧化，也可能发生。根据应用背景，设计时需考虑一个或多个这种损伤情况。

**物理性能。**单向纤维复合材料（UDC）由嵌入基体的排齐的连续纤维组成。其性能是原位纤维和基体的物理性能、纤维和基体体积含量、纤维分布等的函数。通常，纤维具有圆形横截面，直径变化很小。因为沿纤维方向性能与垂直纤维的横向性能有很大差异，UDC明显是各向异性的。非连续相增强复合材料（DRC）中，颗粒或排齐的短切纤维在基体中散布相当均匀。DRC可以是各向同性的，也可以是各向异性的，但其物理性能均是增强体和基体的物理性能、体积含量、很可能也是增强体分布统计变异性的函数。

评价应力和应变时所关心的性能有：工程弹性性能、热膨胀系数、屈服强度和硬化参数、增强体-基体粘接强度、材料阻尼和导热性等。

### 2.3.2 一般的设计指南

采用复合材料进行设计较匀质各向同性材料有显著优点，这是因为材料性能可通过剪裁达到某种设计目标。虽然为达到设计目标存在多种可能的选择，特别是借助于材料设计，但结构零件的成本、可制造性决定了恰当材料体系的选择。在初步设计阶段，要考虑已有的材料及其性能，校核其能否满足结构零件的设计要求。

初步设计时，材料选择的本身就是一个练习。任何存在的材料数据库都会被考虑到，对材料的成本和可用性也没有任何限制，另一个同步进行的过程可以开始，即核实可用的材料体系能否满足设计目标。这种练习能帮助设计者寻求那些单一材料不容易得到的新方法，即设计者可以构思一个混杂材料体系，它将单一材料与复合材料组合在一起，来满足由刚度、强度和断裂特性表示的设计目标。

用金属基复合材料进行设计时，可利用本节的细观力学估算方法来评价基于基体材料、增强体类型和纤维体积含量的复合材料的整体性能。对于目前复合材料体系的数据有限的情况，细观力学方法很有用。该方法也能用于将单轴、等温试验数据外推到承受机械载荷和热载荷的更复杂的使用状态。

获得精确、可靠的材料性能值是朝着实现功能设计最重要的步骤之一。然而，应用本节计算方法的预测性能，也可选择出恰当的材料体系，并能指出现有材料的弱点。

下述材料设计的考虑可能有助于初步设计：

- 把 MMC 用在载荷呈高度方向性的场合，要保证纤维方向与最重要应力方向一致。

- 保证压缩稳定性，它强烈地受剪切效应影响。
- 已认识到面内、面外失效经常发生在缺口和自由边处。
- 预期损伤从已存在的制造缺陷处扩展。
- 评价可使 MMC 性能下降和减少的环境效应，如氧化环境。
- 经历温度变化的部件，要考虑基体和增强体的 CTE 不匹配及其导致的热应变。

需考虑的重要的强度、刚度参数是：

- 纵向拉伸
- 纵向压缩
- 横向拉伸
- 横向压缩
- 剪切

连续纤维 MMC 表现出高压缩强度和适当的剪切强度，它提供了一个好的设计窗口。目前，现有 MMC 的一个缺点是横向破坏应变太低（在 0.2-0.4% 的应变范围内，纤维比较容易脱粘），这使得层压板中那些纤维铺向与加载方向成一定角度的单层承载能力大大降低。这种效应对载荷和主承载方向垂直的单层特别严重，即 90° 层。然而，90° 层或偏轴层在层压板和承受多轴及双向载荷的结构中是必要的。

不同于聚合物材料体系，对 MMC，分层不是主要的失效模式，因此除损伤在边缘、孔和切口等处起始的情况外，认为层间应力不是关键。由于进行 MMC 设计时，不需要考虑分层扩展，也缺乏这方面的性能和模式。另一方面，认为断裂性能很重要，在设计中要考虑疲劳裂纹扩展问题，包括在层压板面内和沿厚度方向的裂纹扩展。连续增强 MMC 的优点是纤维能起到桥联裂纹或使裂纹偏斜扩展的作用，这样可延迟或阻止裂纹扩展。

复合材料结构的各向异性性能是研制高效率结构的关键。设计者必须具备基本的力学知识、计算机建模技术，如 FEA 或像“经典层压板理论”、板分析、对不同几何结构屈曲分析及过屈曲响应建模等专业化程序等经验，以预测各向异性复合材料结构的性能。另外，设计者必须通晓制造技术及其局限性，以便对 MMC 进行设计时，能进行优化和使用低成本材料。

### 2.3.3 分析方法（连续纤维 MMC）

连续纤维复合材料失效经常是由于在细观级上发生事件而引起的。细观力学提供了单层级和细观级响应之间的联系。

#### 2.3.3.1 细观力学

细观力学分析的核心是恰当选择有代表性的体元（RVE），即完全代表复合材料整体的复合材料子域。从实际观点看，RVE 越简单，分析越容易处理。因为不可能对复合材料中的每一个单根纤维建模，RVE 是必要的。细观力学分析时将组分中局部应力和应变场均匀化，进而获得代表单层响应的总体场。按照上述做法，也可决定每一组分的平均响应。因为描述局域场和总体场的应力、应变张量是对称的，所以在下节将被简写成  $6 \times 1$  的单列向量。另外弹性刚度张量也是对称的，将被简写成  $6 \times 6$  的矩阵。由于基体的非弹性和各种形式的内部损伤，MMC 呈现非线性响应。在许多应用中，建模时考虑这些非线性以及在 MMC 制造过程中产生的残余热应力是十分重要的。2.3.3.1.1 节将为其提供一个大体框架。

### 2.3.3.1.1 一般关系

从具有如下形式的应力、应变向量开始

$$\boldsymbol{\varepsilon} = \begin{Bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{33} \\ 2\varepsilon_{12} = \gamma_{12} \\ 2\varepsilon_{23} = \gamma_{23} \\ 2\varepsilon_{31} = \gamma_{31} \end{Bmatrix}, \quad \boldsymbol{\sigma} = \begin{Bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{33} \\ \sigma_{12} \\ \sigma_{23} \\ \sigma_{31} \end{Bmatrix} \quad 2.3.3.1.1(a)$$

对给定的 RVE，细观力学的本质是分别决定弹性应变和应力的浓缩矩阵  $\mathbf{A}$  和  $\mathbf{B}$ （简写的张量）。定义如下：

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}}(x) &= A(x)\bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}} \\ \boldsymbol{\sigma}(x) &= B(x)\bar{\boldsymbol{\sigma}} \end{aligned} \quad 2.3.3.1.1(b)$$

式中局部量的空间相关性已经表示得很清楚，划在上面的横线表示均匀化的或层级的量。应变和应力浓缩张量有如下关系：

$$\begin{aligned} \mathbf{B}(x) &= C(x)\mathbf{A}(x)\mathbf{S}^* \\ \mathbf{A}(x) &= \mathbf{S}(x)\mathbf{B}(x)\mathbf{C}^* \end{aligned} \quad 2.3.3.1.1(c)$$

式中， $C(x)$  和  $S(x)$  分别是逐点刚度矩阵和柔度矩阵， $C^*$  和  $S^*$  分别是整个复合材料的刚度矩阵和柔度矩阵。总应变可分解成和弹性、热、塑性及与内损伤相关的部分：

$$\bar{\boldsymbol{\varepsilon}} = \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}} + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{th}} + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}} + \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{da}} \quad 2.3.3.1.1(d)$$

式中：

$$\begin{aligned} \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}} &= \frac{1}{V} \int B^T(x) \varepsilon^{\text{el}}(x) dV \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{th}} &= \frac{1}{V} \int B^T(x) \varepsilon^{\text{th}}(x) dV \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{pl}} &= \frac{1}{V} \int B^T(x) \varepsilon^{\text{pl}}(x) dV \\ \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{da}} &= -2 \int_S \left\{ \begin{array}{l} u_1(x)n_1(x) \\ u_2(x)n_2(x) \\ u_3(x)n_3(x) \\ u_1(x)n_2(x) + u_2(x)n_1(x) \\ u_2(x)n_3(x) + u_3(x)n_2(x) \\ u_3(x)n_1(x) + u_1(x)n_3(x) \end{array} \right\} dS \end{aligned}$$

表面积分  $S$  是对所有裂纹的长度区域内进行计算。总应力-应变法则是：

$$\bar{\boldsymbol{\sigma}} = C^* \bar{\boldsymbol{\varepsilon}}^{\text{el}} \quad 2.3.3.1.1(e)$$

式中，复合材料总的刚度可以写成：

$$C^* = \frac{1}{V} \int_V A^T(x) C(x) dV \quad 2.3.3.1.1(f)$$

最后，应用体积平均方程，

$$\bar{\varepsilon}^{\text{el}} + \bar{\varepsilon}^{\text{th}} + \bar{\varepsilon}^{\text{pl}} = \frac{1}{V} \int_V \varepsilon(x) dV$$

2.3.3.1.1(g)

$$\bar{\sigma} = \frac{1}{V} \int_V \sigma(x) dV$$

### 2.3.3.1.2 有效弹性性能

材料弹性性能是其刚度的度量。这个信息对确定外载产生变形的弹性部分是必要的。本节考虑横观各向同性单向复合材料(UDC)或单层。本着工程化应用的目的必须确定下列性能，如纤维方向杨氏模量、垂直纤维方向杨氏模量、沿纤维方向剪切模量、垂直纤维方向的面内剪切模量、以及各种泊松比。这些性能可用简单的表达式确定。总应力-应变关系可写作：

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{11} &= n^* \bar{\varepsilon}_{11}^{\text{el}} + l^* \bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} + l^* \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}} \\ \bar{\sigma}_{22} &= l^* \bar{\varepsilon}_{11}^{\text{el}} + (k^* + G_2^*) \bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} + (k^* - G_2^*) \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}} \\ \bar{\sigma}_{33} &= l^* \bar{\varepsilon}_{11}^{\text{el}} + (k^* - G_2^*) \bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} + (k^* + G_2^*) \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}}\end{aligned}\quad 2.3.3.1.2(a)$$

$$\begin{aligned}\bar{\sigma}_{12} &= 2G_1^* \bar{\varepsilon}_{12}^{\text{el}} \\ \bar{\sigma}_{23} &= 2G_2^* \bar{\varepsilon}_{23}^{\text{el}} \\ \bar{\sigma}_{31} &= 2G_1^* \bar{\varepsilon}_{31}^{\text{el}}\end{aligned}\quad 2.3.3.1.2(b)$$

式 2.3.3.1.2(a) 的逆方程是：

$$\begin{aligned}\bar{\varepsilon}_{11}^{\text{el}} &= \frac{1}{E_1^*} \bar{\sigma}_{11} - \frac{v_{12}^*}{E_1^*} \bar{\sigma}_{22} - \frac{v_{13}^*}{E_1^*} \bar{\sigma}_{33} \\ \bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} &= \frac{v_{12}^*}{-E_1^*} \bar{\sigma}_{11} + \frac{1}{E_2^*} \bar{\sigma}_{22} - \frac{v_{23}^*}{E_2^*} \bar{\sigma}_{33} \\ \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}} &= \frac{v_{13}^*}{-E_1^*} \bar{\sigma}_{11} - \frac{v_{23}^*}{E_2^*} \bar{\sigma}_{22} + \frac{1}{E_2^*} \bar{\sigma}_{33}\end{aligned}\quad 2.3.3.1.2(c)$$

式中， $*$  表示有效值，由  $C^*$  的对称性要求得出：

$$\frac{v_{12}^*}{E_1^*} = \frac{v_{21}^*}{E_2^*}$$

图 2.3.1.2(a) 举例说明和上述性能有关的加载方式。

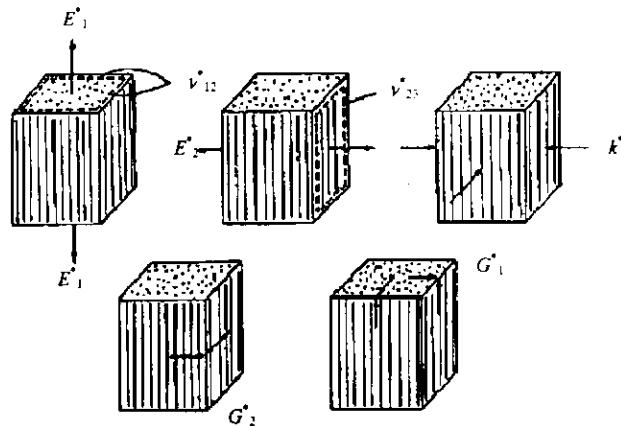


图 2.3.3.1.2(a) 定义有效弹性性能的基本加载方式

使试件承受平均状态的应变， $\bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} = \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}}$ ，所有其他的应变等于零，可获得有效模量  $k^*$ ，此时，由方程 2.3.3.1.2(a) 得出：

$$\bar{\sigma}_{22} + \bar{\sigma}_{33} = 2k^*(\bar{\varepsilon}_{22}^{\text{el}} + \bar{\varepsilon}_{33}^{\text{el}}) \quad 2.3.3.1.2(d)$$

不像上面列举的其他性能， $k^*$  没有太大的工程意义，但却有相当大的分析价值。

方程 2.3.3.1.2(a)-(c) 中仅有 5 个性能是独立的。性能中最有用的相互关系是：

$$n^* = E_1^* + 4k^* v_{12}^{*2} \quad 2.3.3.1.2(e)$$

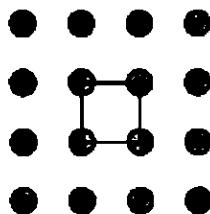
$$l^* = 2k^* v_{12}^* \quad 2.3.3.1.2(f)$$

$$\frac{4}{E_2^*} = \frac{1}{G_2^*} + \frac{4v_{12}^{*2}}{E_1^*} \quad 2.3.3.1.2(g)$$

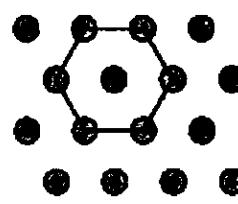
$$\frac{2}{1-v_{23}^*} = 1 + \frac{k^*}{\left(1 + 4k^* \frac{4v_{23}^{*2}}{E_1^*}\right) G_2^*} \quad 2.3.3.1.2(h)$$

$$G_2^* = \frac{E_2^*}{2(1+v_{23}^*)} \quad 2.3.3.1.2(i)$$

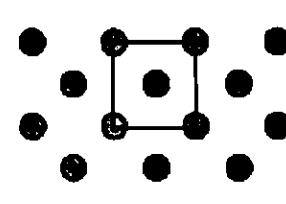
在弹性理论中计算有效弹性模量是一项非常困难的任务，仅有一些简单的模型能实现精确分析。模型之一假设纤维成周期排列分布。选择一单胞作为 RVE，并将其离散化进行通常基于有限元的典型计算分析。图 2.3.3.1.2(b) 显示了一些周期性的微观结构。需要注意的是，这种类型的 RVE 一般并不代表横观各向同性材料。然而，如果材料不是横观各向同性的，不需要强迫 RVE 去代表横观各向同性材料。



矩形排列



六边形排列



正方形对角排列

图 2.3.3.1.2(b) 代表体元的重复单胞

复合材料圆柱聚集模型 (CCA) 适用于图 2.3.3.1.2(c) (文献 2.3.3.1.2(a)) 中显示的 RVE 四种有效弹性模量的精确分析确定。考虑到复合材料圆柱的集合，每一个圆柱都是由一根圆形纤维芯材和同心圆的基体圆柱组成。圆柱的大小可以变化，但是芯材半径与壳体半径的比率应该保持常数。所以，基体和纤维的体积含量在每一个复合材料圆柱中都是一样的。这种模型的一个强度是随纤维放置而随机分布，而一个不需要的特征就是纤维的尺寸变化很大。它可能说明后者不是需要特别关心的问题。

CCA 的 RVE 给出了  $k^*$ ， $E_1^*$ ， $v_{12}^*$ ， $G_1^*$  的封闭解

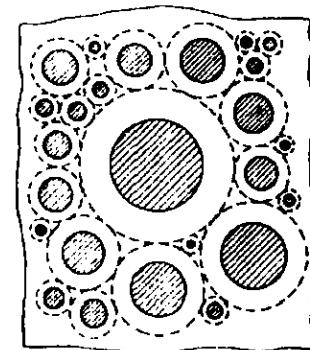


图 2.3.3.1.2(c) 复合材料圆柱聚集模型

所代表的体积元 (参考 2.3.3.1.2(e))

和  $E_2^*$ ,  $v_{23}^*$ ,  $G_2^*$  的边界值。现对各向同性纤维列出相应结果。对于横观各向同性纤维所需的修正可见文献 2.3.3.1.2(b) 和 2.3.3.1.2(c)。

$$\begin{aligned} k^* &= \frac{k_m(k_f + G_m)v_m + k_f(k_m + G_m)v_f}{(k_f + G_m)v_m + (k_m + G_m)v_f} \\ &= k_m + \frac{v_f}{\frac{1}{(k_f - k_m)} + \frac{v_m}{(k_m + G_m)}} \end{aligned} \quad 2.3.3.1.2(j)$$

$$E_1^* = E_m v_m + E_f v_f + \frac{4(v_f - v_m)^2 v_f v_m}{\frac{v_m}{k_f} + \frac{v_f}{k_m} + \frac{1}{G_m}} \approx E_m v_m + E_f v_f \quad 2.3.3.1.2(k)$$

因为方程 2.3.3.1.2(k) 右边的第三项较小, 所以混合律对于所有 UDC 均给出十分好的轴向杨氏模量近似值。

$$v_{12}^* = v_m v_m + v_f v_f + \frac{(v_f - v_m) \left( \frac{1}{k_m} - \frac{1}{k_f} \right) v_f v_m}{\frac{v_m}{k_f} + \frac{v_f}{k_m} + \frac{1}{G_m}} \quad 2.3.3.1.2(l)$$

$$G_1^* = G_m \frac{G_m v_m + G_f (1 + v_f)}{G_m (1 + v_f) + G_f v_m} = G_m + \frac{v_f}{\frac{1}{(G_f - G_m)} + \frac{v_m}{2G_m}} \quad 2.3.3.1.2(m)$$

正如早先的说明, CCA 对  $G_2^*$  的分析并不能得到精确的解, 只能得到很接近的上边界和下边界值。一个首选的方法就是使用广义自适应方案 (GSCS)。根据这一方法, 横向剪切模量可以通过把一个复合材料圆柱放入到具有复合材料总体性能的无限介质中得到。在复合材料圆柱中纤维和基体的体积分数与复合材料相同。这样的分析已由文献 2.3.3.1.2(d) 给出, 得到如下求解  $G_2^*$  的二次方程:

$$A \left( \frac{G_2^*}{G_m} \right)^2 + 2B \left( \frac{G_2^*}{G_m} \right) + C = 0 \quad 2.3.3.1.2(n)$$

式中:

$$\begin{aligned} A &= 3v_f v_m^2 \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left( \frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) \\ &\quad + \left[ \frac{G_f}{G_m} \eta_m + \eta_m \eta_f - \left( \frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) v_f^3 \right] \left[ v_f \eta_m \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) - \left( \frac{G_f}{G_m} \eta_m + 1 \right) \right] \end{aligned} \quad 2.3.3.1.2(o)$$

$$\begin{aligned} B &= -3v_f v_m^2 \left( \frac{v_f}{v_m} - 1 \right) \left( \frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right) \\ &\quad + \frac{1}{2} \left[ \frac{G_f}{G_m} \eta_m + \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) v_f + 1 \right] \left[ (\eta_m - 1) \left( \frac{\eta_f}{\eta_m} + \eta_f \right) - 2 \left( \frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) v_f^3 \right] \\ &\quad + \frac{v_f}{2} (\eta_m + 1) \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left[ \frac{G_f}{G_m} + \eta_f + \left( \frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) v_f^3 \right] \end{aligned} \quad 2.3.3.1.2(p)$$

$$C = 3\nu_f\nu_m^2 \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \left( \frac{G_f}{G_m} + \eta_f \right)$$

$$+ \left[ \frac{G_f}{G_m} \eta_m + \left( \frac{G_f}{G_m} - 1 \right) \nu_f + 1 \right] \left[ \frac{G_f}{G_m} + \eta_f + \left( \frac{G_f}{G_m} \eta_m - \eta_f \right) \nu_f^3 \right]$$

$$\eta_f = 3 - 4\nu_f \quad 2.3.3.1.2(q)$$

$$\eta_m = 3 - 4\nu_m \quad 2.3.3.1.2(r)$$

运用方程 2.3.3.1.2(g)-(h)计算相关的  $E_1^*$  和  $\nu_{12}^*$ 。要注意的是，当 GSCS 模型应用于那些已有 CCA 结果的性能时（上述方程 2.3.3.1.2(j)-(m)），可以得到 CCA 的结果。

对于横观各向同性的纤维，下列各项修正是必需的（文献 2.3.3.1.2(c) 和 2.3.3.1.2(d)）。

- 对  $k^*$        $k_f$  是纤维横向体积模量

- 对  $E_1^*, \nu_{12}^*$        $E_f = E_{1f}$

$$\nu_f = \nu_{12f}$$

$k_f$  是纤维横向体积模量

- 对  $G_1^*$        $G_f = G_{1f}$

- 对  $G_2^*$        $G_f = G_{2f}$

$$\eta_f = 1 + 2G_{2f}/k_f$$

对六边形排列模型的有效弹性性能数值分析表明其数值与上述 CCA/GSCS 模型方程所预测的非常相近。这一结果通常同试验数据十分吻合。

这里所给的简单分析结果所预测有效弹性性能有足够的工程精度，具有相当重要的实际应用价值，第一，它们可以对多种基体性能、纤维性能、体积含量以及环境条件均容易确定其有效性能。第二，它们为评价纤维性能提供了一个方法。

### 2.3.3.1.3 残余应力

此节留待以后补充。

### 2.3.3.1.4 纤维-基体粘接强度

此节留待以后补充。

### 2.3.3.1.5 总体非弹性应变

此节留待以后补充。

## 2.3.3.2 粘塑性本构关系

此节留待以后补充。

### 2.3.3.2.1 轴向拉伸响应

此节留待以后补充。

### 2.3.3.2.2 轴向压缩响应

此节留待以后补充。

### 2.3.3.2.3 横向拉伸响应

此节留待以后补充。

### **2.3.3.2.4 横向压缩响应**

此节留待以后补充。

### **2.3.3.3 宏观力学**

此节留待以后补充。

#### **2.3.3.3.1 有效弹性性能**

此节留待以后补充。

#### **2.3.3.3.2 有效强度**

此节留待以后补充。

#### **2.3.3.3.3 蠕变**

此节留待以后补充。

#### **2.3.3.3.4 多轴影响**

此节留待以后补充。

### **2.3.3.4 损伤容限**

此节留待以后补充。

### **2.3.3.5 耐久性**

此节留待以后补充。

### **2.3.3.6 寿命预测**

此节留待以后补充。

## **2.3.4 设计指南（非连续纤维增强金属基复合材料）**

### **2.3.4.1 细观力学**

此节留待以后补充。

#### **2.3.4.1.1 一般关系**

此节留待以后补充。

#### **2.3.4.1.2 有效弹性性能**

此节留待以后补充。

#### **2.3.4.1.3 纤维-基体粘接强度**

此节留待以后补充。

#### **2.3.4.1.4 非弹性的机制和损伤**

此节留待以后补充。

### **2.3.4.2 粘塑性本构关系**

此节留待以后补充。

#### **2.3.4.2.1 拉伸响应**

此节留待以后补充。

#### 2.3.4.2.2 压缩响应

此节留待以后补充。

#### 2.3.4.2.3 剪切响应

此节留待以后补充。

#### 2.3.4.3 裂纹增长形为

此节留待以后补充。

#### 2.3.4.4 耐久性

此节留待以后补充。

#### 2.3.4.5 寿命预测

此节留待以后补充。

### 2.4 应用及实例研究

#### 2.4.1 结构应用的部件

此节留待以后补充。

#### 2.4.2 摩擦学应用的部件

此节留待以后补充。

#### 2.4.3 热控制应用的部件

此节留待以后补充。

#### 2.4.4 热膨胀控制的部件

此节留待以后补充。

#### 2.4.5 其他复杂应用

此节留待以后补充。

### 参考文献

- 2.3.3.1.2(a) Hashin, Z. and Rosen, B.W., in *The Elastic Moduli of Fiber-Reinforced Materials*, in *J. Appl. Mech.*, Vol 31, 1964, p. 223.
- 2.3.3.1.2(b) Hashin, Z., in *Theory of Fiber Reinforced Materials*, in *NASA CR-1974*, 1972.
- 2.3.3.1.2(c) Hashin, Z., in *Analysis of Properties of Fiber Composites with Anisotropic Constituents*, in *J. Appl. Mech.*, Vol 46, 1979, p. 543.
- 2.3.3.1.2(d) Christensen, R.M., *Mechanics of Composite Materials*, Wiley-Interscience, 1979.
- 2.3.3.1.2(e) Hashin, Z., in *Analysis of Composite Materials – A Survey*, in *J. Appl. Mech.*, Vol. 50, 1983, p. 481.

## 第3章 材料性能数据

### 3.1 基本信息

#### 3.1.1 引言

此节留待以后补充。

#### 3.1.2 各节的目的、范围和组织

此节留待以后补充。

#### 3.1.3 数据描述

这一部分是描述在本卷中数据是怎么样被描述和组织的。

##### 3.1.3.1 性能和定义

性能和它们的定义可以在第四卷中相应的章节中找到。增强体的性能和获得性能的方法在 1.6 节中讨论。基体的性能在 1.9 节中描述。表征金属基复合材料性能的方法在 1.4 节中讨论。单层和层压板的性能和定义在 1.3 节中表述。用于确定这些性能的统计学方法在 1.11 节中讨论。材料系统的代码和单层板铺向的代码在 1.1.6.2 节中定义。

##### 3.1.3.1.1 符号规定

所有带上标标注 C 的压缩值表示为正数。所以正的压缩强度表明失效是由于在与正的拉伸失效相反方向上施加载荷引起的。

##### 3.1.3.2 制表格式

对描述力学性能数据的制表格式如表 3.1.3.2(a) 和 3.1.3.2(c)。表 3.1.3.2(a) 说明关于材料体系的信息以及对可用的数据的性能的一览表。下面的注释应用于该表格：

① 手册数据表的标题和编号。标题用下面的信息描述：

{纤维} {单丝数}/{基体} {工艺顺序描述}

工艺顺序描述包括箔/纤维/箔和任何其他的压固工艺顺序。如果有关于数据文件的警告信息的话，在标题后面加一个星号。

② 数据节的第一组信息是包含有材料、工艺等信息的一览表。在右上角的黑框方格认为是第一个一览表。

{纤维类别} / {基体类别} {工艺顺序描述}

{纤维} / {基体}

摘要

此方格包含了材料的纤维/基体类别，比如碳化硅/钛用 1.1.6.2 节的材料体系编码识别为 SiC/Ti。把纤维和基体的名字简写作为材料识别。

③ 材料信息是对复合材料、纤维和基体的描述。复合材料的识别如下：

{纤维} {单丝数}/{基体} {工艺顺序描述}

纤维的标识包括{制造商} {商品名称} {连续的/非连续的} {直径}。基体的标识是{商品名称}。压固工艺的生产商也同样列在这里。

- ④ 描述基本工艺的信息。这包括对一个或多个工艺步骤中工艺顺序的类型、温度、压力、持续时间和任何其他的关键参数。数据来源也在这里确认。
- ⑤ 任何对有限制的数据文件的警告在数据描述的每一页列出。在一个数据节的第一页上，警告放在材料标识区的下面。
- ⑥ 在材料标识区下面介绍与材料制造和试验相关的各种日期。数据提交日期确定了对数据集所用的数据文件要求，分析的日期确定了已进行过的统计分析。日期的范围呈现在适当的位置上，比如一个持续数月的试验项目。
- ⑦ 单层性能连同为每一个性能提供的数据种类一起给出。单层性能一览表的列定义环境条件和纤维的体积含量。第一列包含在空气环境下的室温数据。其余的列从最低温度到最高温度排列。对应每一个温度，列的纤维体积含量从最低到最高来排列。如果有足够的空间，空白的列把室温的列同其他列分开。

单层性能汇总表的横排确定试验类型和方向。对每一个试验类型和方向来说，提供包括强度、模量、泊松比、破坏应变、比例极限、0.02 屈服强度和 0.2 屈服强度的数据种类。例如，如果在 RT-air-35 和拉伸，1 轴下填入的是 FF-S---。这里得到的是空气环境中试验的室温数据，包括纵向拉伸强度、模量和破坏应变，但是没有泊松比、比例极限、0.02 屈服强度或 0.2 屈服强度。强度和模量数据是正式批准的，破坏应变是筛选的。数据批准的种类在 1.3.4.2 节定义。正式批准的数据需要按 1.3.4.2 和 1.3.5.2 节定义的最小试件数。筛选数据表示较少的试验数。

综述信息的第二页上可继续（表 3.1.3.2(a)）：

- ① 任何警告放在这一页的上部。
- ② 综述信息的第二页上部的方格内介绍这个数据集的基本物理参数。第一列包括名义值，通常是规范信息。
- ③ 第二数据列给出所提交数据集的数值范围。
- ④ 最后一列说明获得这些数据的试验方法。
- ⑤ 层压板性能数据同前页汇总的单层性能数据一样汇总在下部的方框内。层压板族具有的性能列在每个层压板族的下面。具体的铺设信息在随后详细的表格内提供。只有当数据可用并且以表格 3.1.3.2(b)为基础时，试验类型和方向页也包括在内。

表3.1.3.2(a) 一览表的格式

X.X.X {纤维}{单丝数}/{基体}{工艺顺序描述}①

材 料:	{纤维}{单丝数}/{基体}{工艺顺序描述} ③	②
纤 维:	{商品名称} {连续的/非连续的}	基 体: {材料名称}
生产者:	{压固工艺生产商}	
工 艺顺序:	{工艺} ④	
工 艺:	{工艺的类型}: {温度}, {持续时间}, {压力}	来 源: {数据来源}

⑤{警告}

纤维制造日期	月/年	试验日期	月/年
基体制造日期	月/年	数据提交日期	月/年
复合材料制造日期	月/年	分析日期⑥	月/年

## 单层板性能汇总⑦

温 度	RT	{最低温度到最高温度}					
环 境							
纤维体积含量		{最低含量到最高含量}					
1 轴拉伸							
2 轴拉伸							
3 轴拉伸							
1 轴压缩							
2 轴压缩							
3 轴压缩							
12 面剪切							
23 面剪切							
31 面剪切							
{其余试验类型/方向}							

数据的类别: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

## 警 告 ①

	名 义 值	按提交的③	试 验 方 法④
纤维密度 (g/cm <sup>3</sup> )	X.XX	{最小值}-{最大值}	{方法}
销状基体密度 (g/cm <sup>3</sup> )	X.XX	{最小值}-{最大值}	{方法}
复合材料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	X.XX	{最小值}-{最大值}	{方法}
单层厚度* (in)	0.0XXX	{最小值}-{最大值}	{方法}

\* 纤维中心至纤维中心

### 层压板性能汇总⑤

温度	RT	{最低温度到最高温度}				
环境						
纤维含量		{最低含量到最高含量}				
{层压板族}						
{试验类型/方向}		对每类试验/方向/环境条件/纤维 体积含量组合注明的批准类型				

数据的类别：F——正式批准，S——依次筛选：强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

**表 3.1.3.2(b) 层压板典型试验和方向**

试验类型		方 向	
拉伸	冲击后压缩	x 轴向	xy-平面
压缩	挤压	y 轴向	yz-平面
剪切	CTE	z 轴向	zx-平面
开孔拉伸			
开孔压缩			

除非另有注明，x 轴与层压板铺层的 0° 方向一致。这种材料所包含的数据要指出批准的类别并在脚注中识别。

包含被测材料性能信息的数据表格式在表 3.1.3.2(c) 中给出。

- ① 不满足数据文件要求的数据应在数据表每一页上警示。
- ② 在每一页的右上角有一个黑框方格，该方格包含识别数据集的信息，如所示结果的试验类型、试件铺层、试验条件和数据的类别。

{表格编号} {纤维类别}/{基体类别}{形式} {纤维名称}/{基体名称} {试验类型}, {方向} {铺层} {试验温度, 环境} {批准的数据种类}
---

- ③ 为复合材料提供的材料识别如：

{纤维} {单丝数}/{基体} {工艺顺序描述}

在这一特殊页上的数据给出物理参数的范围、机加方法、纤维体积含量、纤维间距、试件几何尺寸、工作段厚度、工作段宽度以及复合材料密度。

- ④ 试验方法的识别见第四卷的相应章节。

- ⑤ 对力学性能数据介绍计算模量的方法，这包括计算方法和计算时所用的测量位置或范围。
- ⑥ 试验前的环境曝露在此用{方法}{温度}{时间}{其他关键参数}识别。表面状态也同样在这里标明。
- ⑦ 对已归一化的数据给出归一化方法，并说明来源。
- ⑧ 在每一个数据列的上部列出了该列的试验条件、温度（°F）、环境（空气、氮气等）、纤维体积含量（%）和应变率（1/s）。
- ⑨ 在手册中介绍带有全套统计参数的强度和破坏应变数据。对于每一个性能/条件组合都指明数据数据种类。B 基准值只是正式批准的数据。A 基准值数据为批次和试件数均满足 A 基准值要求时的正式批准数据。分析的概率分布方法也在此说明。 $C_1$  和  $C_2$  为相应的概率分布常数。如下显示：

	$C_1$	$C_2$
Weibull 分布	尺寸参数	形状参数
正态分布	平均值	标准差
对数正态分布	数据自然对数平均值	数据自然对数标准差
非参数分布	秩	Hanson-Koopmans 系数
ANOVA 分布	容限系数	母体标准差

- ⑩ 这里的模量数据只有平均值、最小值、最大值、离散系数、总量大小和样本的大小。数值既有归一化的也有实际测量的数据。已有的泊松比数据同时给出批量的大小和样本的大小。
- 经常在脚注中出现的数据信息包括环境调节参数、不给出 B 基准值的理由和与标准试验方法的偏差。

给出的性能符号带有用下标表示的性能类型，和用上标表示的性能方向，如拉伸(t)。示例的表格给出了纤维方向上单层拉伸的符号。

表 3.1.3.2(c) 测量数据的表格格式

警告

材料: {纤维} {单丝数}/{基体} {带/机织类型} ⑨	纤维体积含量: XX-XX%	
加工: {机加方法}	纤维间距:	⑩
试件几何尺寸:		
工作段厚度: 0.0XXX-0.0XXX in	模量: ⑪	
工作段宽度: ⑫ 0.0XXX-0.0XXX in	计算: {方法} XXXX-XXXX $\mu\epsilon$	
试验方法: {节号}		
试验前曝露: {方法}{温度}{时间}{其他关键参数}⑬	表面状态:	
归一化: 至 XX % ⑭	来源: {数据来源}	
温度 (°F) 环境 纤维体积含量 (%) 应变率 (1/s)	⑮	
$F_t^u$ (ksi) B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	⑯	
$E_t^t$ (Msi) 试件数量 批 数 数据种类	⑰	
$V_{12}^t$ 试件数量 批 数 数据种类	⑱	
$\epsilon_t^u$ (%) B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	⑲	

表 3.1.3.2(d)中给出了含剪切材料性能信息的数据表格式。

- ① 不满足数据文件要求的数据应在数据表每一页上警示。
- ② 在每一页的右上角有一个黑框方格，该方格包含识别数据集的信息，如所示结果的试验类型、试件铺层、试验条件和数据的类别。

{表格编号}
{纤维类别}/{基体类别}{形式}
{纤维名称}/{基体名称}
{试验类型}, {方向}
{铺层}
{试验温度, 环境}
{批准的数据种类}

- ③ 为复合材料提供的材料识别如：

{纤维} {单丝数}/{基体} {工艺顺序描述}

在这一特殊页上的数据给出物理参数的范围、机加方法、纤维体积含量、纤维间距、试件几何尺寸、工作段厚度、工作段宽度以及复合材料密度。

- ④ 试验方法的识别见第四卷的相应章节。
- ⑤ 对力学性能数据介绍计算模量的方法，这包括计算方法和计算时所用的测量位置或范围。
- ⑥ 试验前的环境暴露在此用{方法}{温度}{时间}{其他关键参数}识别。表面状态也同样在这里标明。
- ⑦ 对已归一化的数据给出归一化方法，并说明来源。
- ⑧ 在每一个数据列的上部列出了该列的试验条件、温度(°F)、环境(空气、氮气等)、纤维体积含量(%)和应变率(1/s)。
- ⑨ 在手册中介绍带有全套统计参数的强度和破坏应变数据。对于每一个性能/条件组合都指明数据数据种类。B 基准值只是正式批准的数据。A 基准值数据为批次和试件数均满足 A 基准值要求时的正式批准数据。分析的概率分布方法也在此说明。 $C_1$  和  $C_2$  为相应的概率分布常数。如下显示：

	$C_1$	$C_2$
Weibull 分布	尺寸参数	形状参数
正态分布	平均值	标准差
对数正态分布	数据自然对数平均值	数据自然对数标准差
非参数分布	秩	Hanson-Koopmans 系数
ANOVA 分布	容限系数	母体标准差

- ⑩ 这里的模量数据只有平均值、最小值、最大值、离散系数、总量大小和样本的大小。数值既有归一化的也有实际测量的数据。已有的泊松比数据同时给出批量的大小和样本的大小。
- \* 经常在脚注中出现的数据信息包括环境调节参数、不给出 B 基准值的理由和与标准试验方法的偏差。

给出的性能符号带有用下标表示的性能类型，和用上标表示的性能方向，如拉伸(t)。示例的表格给出了纤维方向上单层拉伸的符号。

表 3.1.3.2(d) 剪切数据的表格格式

警告①

材 料:	{纤维} {单丝数}/{基体} {带/机织类型} ⑨		
加 工:	{机加方法}	纤维体积含量: XX-XX%	②
		纤维间距:	
试件几何尺寸:			
工作段厚度:	0.0XXX-0.0XXX in	模 量: ⑤	
工作段宽度:	④ 0.0XXX-0.0XXX in	计 算: {方法} XXXXX-XXXXX $\mu\text{e}$	
试验方法:	(节号)		
试验前曝露:	{方法}{温度}{时间}{其他关键参数}⑩	表面状态:	
归一化:	不作归一化	来 源: {数据来源}	
温度 (°F) 环 境 纤维体积含量 (%) 应变率 (1/s)	⑦		
$F_{12}^{\text{su}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V.% B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	⑧	
$G_{12}^{\text{s}}$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V.% 试件数量 批 数 数据种类	⑨	
$\gamma_{12}^{\text{su}}$ ( $\mu\text{e}$ )	平均值 最小值 最大值 C.V.% B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	⑩	

### 3.1.3.3 疲劳数据

MIL-HDBK-17 第四卷采用了 MIL-HDBK-5E (文献 3.1.3.3) 中所描述的疲劳曲线拟合方法。常幅疲劳的曲线假定有下面的形式。

$$\log N_f = A_1 + A_2 \log \Delta s$$

式中  $A_1$  和  $A_2$  是由最小二乘回归法得出的拟合值。 $\Delta s$  为应力或应变的循环范围。MIL-HDBK-17 曲线不包括等应力计算，或试图对任何不同应力比  $R$  的调整。MIL-HDBK-5 包含附加的拟合参数，其中包括可以拟合非线性的  $A_4$ 。这些参数都没有加入到 MIL-HDBK-17 的模型中。

那些偏离拟合的出局数据也可按文献 3.1.3.3 的方法处理。规则综述如下：

- 超过破坏发生的最小应力水平的出局数据包含在曲线拟合的计算中。
- 低于发生疲劳失效应力水平的出局数据都显示在图上，但是不包括在曲线拟合计算中。

曲线拟合方法包含文献 3.1.3.3 中考虑非均匀偏差的处理方法。这个方法在随着应力水平的降低时，其曲线拟合的残差趋于增加。运用一个统计的试验方法确定其偏差是否均匀。如果检验出为非均匀的偏差，那么就对与应力水平有关的偏差用线性拟合模型。这个模型用来调整修正  $S-N$  曲线估计值的加权因子。

均匀偏差的试验得到为每一个疲劳曲线相关信息表内的两个表达形式。如果这个偏差是均匀的，那么应变-寿命方程信息示例如下：

$$\text{Log}N_f = 3.97 - 4.39 \log(\Delta\varepsilon)$$

$\text{Log}N_f$  的标准差 = 0.12

$R^2 = 97\%$ , 样本数 = 17

式中  $\log(N_f)$  的标准差是常数， $R^2$  是拟合时的均方根误差。如果偏差是非均匀的，那么标准差就作为应力或应变的函数出现，如下：

$$\text{Log}N_f = 4.04 - 4.60 \log(\Delta\varepsilon)$$

$\text{Log}N_f$  的标准差 =  $0.217(1/\Delta\varepsilon)$

$R^2 = 83\%$ , 样本数 = 12

在此情况下， $R^2$  是被调整的误差度量，它包括非常数的加权因子。

## 3.2 增强体性能

### 3.2.1 引言

下列信息属于不同纤维增强体的力学性能。这些性能是基于不同成熟期的材料，并且应该认为本质上是实验的。列出“典型”值是为了近似混合法则的计算，但是不应该用做最终的设计目的。这些“典型”值是基于来料的性能，可以预计，性能值将随复合材料制造过程的结果而有变化。

## 3.2.2 氧化铝纤维

### 3.2.2.1 引言

商用氧化铝 ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) 纤维是用纺纱和热处理的溶胶/凝胶 (即化学衍生物) 前驱体、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  颗粒的浆料, 或者两者的混合物的生产。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维是多晶态的, 具有很小的晶粒尺寸 ( $< 0.5 \mu\text{m}$ ) 并且具有很高的强度。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维是用丝束或粗纱线纺织成的, 每一束纤维由直径为  $10\text{--}15 \mu\text{m}$  的 400-1 000 根单丝组成。纤维的粗纱可以机织成织物或者其他复杂的形状。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维具有高弹性模量, 高拉伸和压缩强度, 以及高电阻率, 并且在腐蚀环境和熔融金属如铝液中能保持稳定性。 $\text{Al}_2\text{O}_3$  纤维十分耐熔并且在  $1000^\circ\text{C}$  或以上的空气环境中都可以保持它的性能。

### 3.2.2.2 原始的 Nextel 610 纤维

材料: Nextel 610 氧化铝纤维		氧化铝 Nextel 610 纤维 汇总
化学成分:	>99% 氧化铝	
纤维:	直径 = $12 \mu\text{m}$	
制造商:	3M Co.	
工艺:	3000 小时, 780 根丝粗纱	

纤维制造日期	3/99	数据提交日期	2/01
试验日期	6/99	分析日期	2/01

### 纤维性能汇总

温度 $^\circ\text{C}$ ( $^\circ\text{F}$ )	22 (72)
拉伸	S ---

数据种类: F——正式批准, S——按强度/模量/泊松比/破坏应变次序筛选

表3.2.2.2(a) 氧化铝(Nextel 610 纤维) 1轴拉伸性能(筛选)

材 料: Nextel 610 纤维						
试验方法: 25.4mm 工作段长度		模量计算:				
0.02 应变率		橡皮表面夹紧夹头				
试验前曝露: 无		来 源: 3M Co.				
温度 F 环 境		72 空 气				
$F^{tu}$ (ksi)	平均值	490				
	最小值	270				
	最大值	609				
	C.V.%	10.8				
	B 基准值	(1)				
	分 布					
	$C_1$					
	$C_2$					
	试件数量	369				
	批 数	1				
数据种类		筛选				
$E^t$ (Msi)	平均值					
	最小值					
	最大值					
	C.V.%					
	试件数量					
	批 数					
数据种类						
$\nu^t$	平均值					
	试件数量					
	批 数					
	数据种类					
$\epsilon^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值					
	最小值					
	最大值					
	C.V.%					
	B 基准值					
	分 布					
	$C_1$					
	$C_2$					
	试件数量					
	批 数					
数据种类						

(1) 对单独一卷纤维的统计值如图 3.2.2.1 所示。统计数据用 SI 制给出。

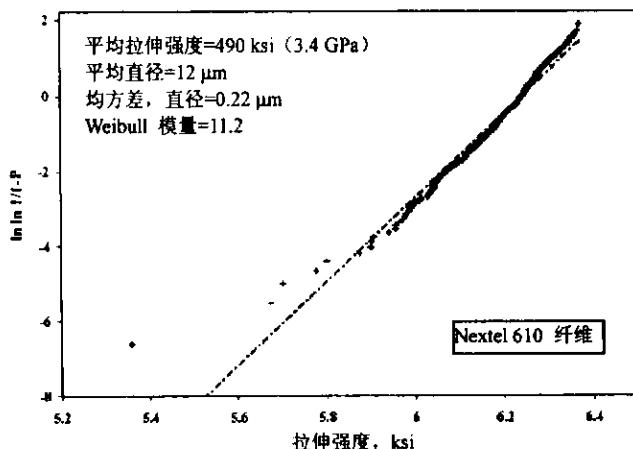


图3.2.2.1 强度的威布尔概率分布 ( $P$ 是固定的特殊纤维长度下承受给定应力时的存活概率)

### 3.2.3 硼纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.4 碳化硼纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.5 碳和石墨纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.6 碳化硅纤维

#### 3.2.6.1 原始 SCS-6 纤维\*

材 料: SCS-6 纤维	碳化硅 SCS-6 纤维 汇总
化学成分: $\beta$ -碳化硅/碳芯	
纤 维: 直径 = 140 $\mu\text{m}$	
制 造 商: Textron Systems Inc.	
工 艺:	

纤维制造日期	数据提交日期	4/98
试验日期	分析日期	10/98

#### 纤维性能汇总

温度°C (°F)	22 (72)						
拉伸	SS--						

数据的类别: F——正式批准, S——按强度/模量/泊松比/破坏应变次序筛选。

\*对这个材料所有现在的所要求的文件都未提供。

表3.2.6.1(a) 碳化硅(ScS-6纤维)1轴拉伸性能(筛选)

材 料: ScS-6 纤维						
试验方法:		模量计算:				
试验前曝露:		来 源: 空军				
温度 F 环 境	72 空 气					
$F^{tu}$ (ksi)	平均值 最 小 值 最 大 值 C.V.% B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	551 220 772 16.7 (1)				
$E^t$ (Msi)	试件数量 批 数 数据种类	203 3 筛选				
$v^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类					
$\epsilon^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值 最 小 值 最 大 值 C.V.% B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类					

对单独一卷纤维的统计值见表 3.2.6.1(b)。

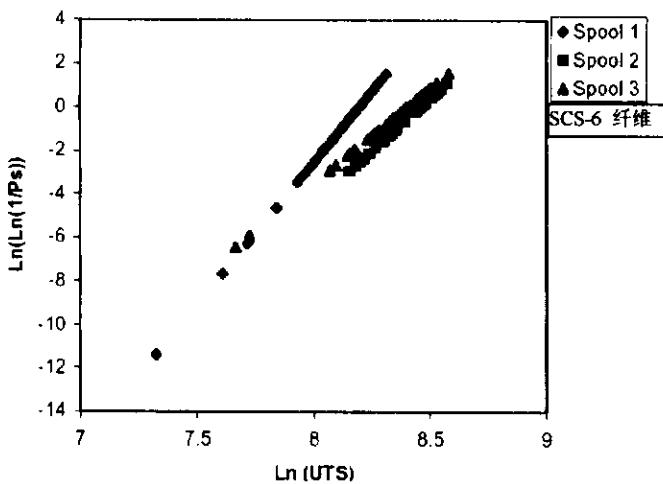


图 3.2.6.1 强度的 Weibull 概率分布图 ( $P_s$  是施加一定应力的特定长度纤维的存活概率)

表 3.2.6.1(b) 单独一卷的 Weibull 统计 (强度)

	第 1 卷	第 2 卷	第 3 卷
C.V	10.9	12.4	15.2
B 基准值	429	493	463
尺寸参数 ( $\alpha$ )	525	684	647
形状参数 ( $\beta$ )	13.1	9.69	8.70

### 3.2.7 钢纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.8 钨纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.9 其他纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.10 其他要求

此节留待以后补充。

## 3.3 基体材料的性能

### 3.3.1 引言

第 3.3 节中包含纯基体材料的性能数据。这些单一金属材料不是通过传统技术如标准锻、轧和铸造技术（它们的性能可在 MIL-HDBK-5 中找到），而是通过模仿生产复合材料的生产工艺制备的。通常生产纯基体材料的工艺技术为热等静压的箔和薄板。由于使用了这些工艺技术，纯基体的性能应当是与复合材料中原位基体材料的特征尽可能接近。但是，应注意，由于增强体和基体间的残余应力和/或作用，以及每个组分中元素相应的扩散和损

耗等原因，增强体可以影响基体的原位性能。

能够用取自纯基体材料（3.3 节）和增强体（3.2 节）的性能数据与细观力学分析一起使用，来帮助复合材料设计。这对预测正交铺层层压板复合材料性能特别有帮助，因为在本手册中通常只给了有限的信息。另外，有许多种复合材料性能只有有限或缺乏可用的数据。在此情况下，复合材料性能可以通过组分性能用解析关系进行估计。还要注意到，取自经传统工艺制备的合金的基体性能会不同于取自纯基体的性能，因此，任何对基于传统工艺制备的材料性能而不是纯基体性能来估计复合材料性能时都应谨慎。

### 3.3.2 铝

此节留待以后补充。

### 3.3.3 铜

此节留待以后补充。

### 3.3.4 镁

此节留待以后补充。

### 3.3.5 钛

#### 3.3.5.1 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn (NASA-GRC)

这种材料是由 Textron 将薄板或箔压固在一起生产的，得到大约 0.4 in 厚的板材。将板材切成试件，并在真空中 1 292°F (大约 700°C) 下热处理 24 h。拉伸试验按 1.9.2.1 节中叙述的方法进行。高温下的试验使用直接感应加热方法。试验通常在空气中进行。一些试验在 Marshall Space Flight Center 进行，以评定高压氢气对这一材料的影响（观察到这一影响非常小）。还进行了在 5 ksi 氮和 5 ksi 氢中的试验。

主要的 Ti-15-3 试验要表征各种粘塑性模型。因此，不要求试件失效，只要在达到一定的应变后卸载即可。所以，在附录 B 的原始数据表中的失效应变栏中，有记号“>”的表示超过了卸载前的应变。由于同样原因，许多 UTS 值是没有的。对于那些被中断的试验，只有那些已达到最大应力，随后发生软化直到卸载的试件给出了 UTS 值。

表 3.3.5.1(a) 和 (d) 给出了室温试验条件下平均拉伸性能表。由于对此种材料室温下应变率不起重要作用，在高压氢和氮的试验条件下也不起重要作用，所有这些试验数据都被组合一起给出了表中的室温信息。表中的“批”是指同一块板材。

图 3.3.5.1(a) 中给出了表示 UTS 值随温度和应变率的变化关系。在 75°F (24°C) 和 1 000°F (538°C) 之间的 UTS 值大约有两种降低的因素。1 000°F (538°C) 的 UTS 值与应变率密切相关。

图 3.3.5.1(b) 中绘出了弹性模量与温度和应变率间的变化关系。图中的数据点不是平均值而是由各次试验得到的数据。图形说明在室温和 1 000°F (538°C) 间，模量通常递减 13%。直到 800°F (427°C) 以前应变率对模量的影响很小。超过 800°F (427°C) 时，对在较慢的应变率下进行试验的试件，模量随着温度的升高而迅速减小。这一结论在图中并没有给出，但可以通过考察附录 B 的原始数据表来确认。

比例极限、0.02% 和 0.2% 的屈服强度曲线绘于图 3.3.5.1(c)-(e) 中，它们是温度和应变率

的函数。75°F (24°C) 和 1 000°F (538°C) 之间的屈服强度有两种降低的因素。在温度高于或等于 600°F (316°C) 时，屈服强度对应变率非常敏感。应变率越慢，屈服强度也越低；温度较低时，随着温度的升高屈服强度迅速下降。

绘出了三种不同温度 400°F (204°C) (图 3.3.5.1(f))、800°F (427°C) (图 3.3.5.1(g)) 和 1 000°F (538°C) (图 3.3.5.1(h)) 时，拉伸曲线与应变率的变化关系。在 400°F (204°C) 时对应变率的敏感度最低。但是在 800°F (427°C) 时，应变率对拉伸行为有很大影响，在这一温度下， $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的应变率已低到足够达到 UTS 值后诱发材料软化。在应变率仍较低的情况下，动态应变时效被激发，这导致了材料在试验过程中的硬化。

1 000°F (538°C) 时，温度已足够高，在达到 UTS 值后诱发材料软化。应变率为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  时，材料出现动态应变时效，但是未发现在 800°F (427°C) 时观察到的程度。动态应变时效产生了应力-应变曲线初始段观察到了硬化效应。

图 3.3.5.1(i)和(j)给出了两种不同应变率下： $1 \times 10^{-4}$  和  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$ ，温度对拉伸行为的影响。每一曲线的最大应力随着温度的升高而降低。另外，动态应变时效导致一些曲线的异常行为（例如，在 800°F (427°C) 和 1 000°F (538°C) 时，应变率为  $1 \times 10^{-6} \text{ s}^{-1}$  时的曲线）。

对于其他情况，请参考下列文献：

- B.A. Lerch, T.P. Gabb and R.A. MacKay: Heat Treatment Study of the SiC/Ti-15-3 Composite System. NASA TP 2970, Jan., 1990.
- T.P. Gabb, J. Gayda, B.A. Lerch and G.R. Halford: The Effect of Matrix Mechanical Properties on [0]s Unidirectional SiC/Ti Composite Fatigue Resistance. Scripta Met., Vol. 25, 1991, pp. 2879-2884.
- M.G. Castelli, B.A. Lerch and D.J. Keller: A Comparison of Deformation Behaviors of HIPed Foil and Sheet Titanium Alloys, HITEMP Review 1999, Advanced High Temperature Engine Materials Technology Project, NASA/CP 1999-208915/VOL2, Paper 27.

表3.3.5.1 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn热等静压板/箔\*

材 料:	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压片/箔	生产厂家:	Textron	Ti
基 体:	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn			Ti-15-3
工 艺序:	热等静压板或箔			汇 总
工 艺:		来 源:	NASA-GRC	

基体生产日期		提交数据日期	6/98
试验日期	5/96-7/97	分析日期	8/98

温 度	75°F		400°F	600°F	800°F	900°F	1000°F	
环 境	空气 <sup>(1)</sup>		空气	空气	空气	空气	空气	
拉 伸	SS-SSS		-S-SSS	-S-SSS	-S-SSS	SS-SSS	SS-SSS	

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 的屈服强度/0.2 的屈服强度。

<sup>(1)</sup>在 5 ksi 氮和 5 ksi 氢的一些试验结果合并在一起。

\*原始数据表在附录 B4.1 中给出。

表3.3.5.1(a) Ti热等静压板/箔Ti-15-3 1轴拉伸性能(筛选)

材 料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压片/箔						
试验方法: 1.9.2.1 节			模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析			
试验前曝露: 真空, 1292°F, 24h			来 源: NASA-GRC			
归一化: 无						
温 度 (F)	75	400	600			
试验环境	空气(1)	空气	空气			
应变率 (1/s)	(3)	(3)	1×10 <sup>-4</sup>			
平均值	124					
最小值	120					
最大值	127					
C.V. (%)	1.83					
$F_t^u$ (ksi)	B 基准值 分布	(2) ANOVA				
$C_1$	2.89					
$C_2$	12.9					
试件数量	7					
批 数	2					
数据种类	筛选					
$E_t^t$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	12.4 11.9 13.0 3.39	12.3 12.0 12.6	11.4		
	试件数量 批 数	8 3	3	1		
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	
$V_{12}^m$	平均值 试件数量 批 数 数据种类					
$\epsilon_t^u$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	19.3 16.8 22.1 10.7				
	B 基准值 分布	(2) 正态				
$C_1$	19.3					
$C_2$	2.06					
试件数量	7					
批 数	2					
数据种类	筛选					

(1) 在 5 ksi 氢和 5 ksi 氮的一些试验结果合并在一起。

(2) 只对已正式批准的数据出现 B 基准值。

(3) 汇集的应变率 (1/s): 1×10<sup>-6</sup>, 8.3×10<sup>-5</sup>, 1×10<sup>-4</sup>, 2×10<sup>-3</sup>。

表3.3.5.1(b) Ti热等静压片/箔Ti-15-3 1轴拉伸性能(筛选)

材 料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压片/箔		模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析 试验方法: 1.9.2.1 节 试验前曝露: 真空, 1292°F, 24h 归一化: 无				
		来 源: NASA-GRC				
温度 (°F)	800	800	800	800		
试验环境	空气	空气	空气	空气		
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-6</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>		
$F_t^u$ (ksi)	平均值					
	最小值					
	最大值					
	C.V. (%)					
	B 基准值					
	分布					
	$C_1$					
	$C_2$					
$E_t^t$ (Msi)	试件数量					
	批 数					
	数据种类					
	平均值	17	10.8	10.8	11.3	
$V_{12}^m$	最小值					
	最大值					
	C.V. (%)					
	试件数量	1	1	1	1	
$\epsilon_t^u$ (%)	批 数	1	1	1	1	
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	
	平均值					
	试件数量					
$\epsilon_t^t$ (%)	批 数					
	数据种类					
	最小值					
	最大值					
	C.V. (%)					
	B 基准值					
	分布					
	$C_1$					

表3.3.5.1(c) Ti热等静压板/箔Ti-15-3 1轴拉伸性能(筛选)

材料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压板/箔						
试验方法: 1.9.2.1 节			模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析			
试验前曝露: 真空, 1292°F, 24h			来 源: NASA-GRC			
归一化: 无						
温度 (F)	900	1000	1000	1000		
试验环境	空气	空气	空气	空气		
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-6}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$		
平均值	75	24	43	67		
最小值						
最大值						
C.V. (%)						
$F_t^u$	B 基准值					
(ksi)	分布					
	$C_1$					
	$C_2$					
试件数量	1	1	1	1		
批 数	1	1	1	1		
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选		
$E_t^t$	平均值	10.8	5.3	10.5	11	
(Msi)	最小值	10.7				
	最大值	10.9				
	C.V. (%)					
试件数量	2	1	1	1		
批 数	2	1	1	1		
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选		
$V_{12}^m$	平均值					
试件数量						
批 数						
数据种类						
$\epsilon_t^u$	平均值					
(%)	最小值					
	最大值					
	C.V. (%)					
B 基准值						
分布						
	$C_1$					
	$C_2$					
试件数量						
批 数						
数据种类						

表3.3.5.1(d) Ti热等静压片/箔Ti-15-3 1轴拉伸性能(筛选)

材 料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压片/箔						
试验方法: 19.2.1 节		模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析				
试验前曝露: 真空, 1 292°F, 24h		来 源: NASA-GRC				
归一化: 无						
温度 (F)	75	400	600			
试验环境	空气(1)	空气	空气			
应变率 (1/s)	(3)	(3)	1×10 <sup>-4</sup>			
平均值	103	75.3	69			
最小值	94	65				
最大值	111	81				
C.V. (%)						
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$					
试件数量	2	3	1			
批 数	2	2	1			
数据种类	筛选	筛选	筛选			
平均值	113	85.3	78			
最小值	108	84				
最大值	117	87				
C.V. (%)						
$F_1^{y0.02}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$					
试件数量	2	3	1			
批 数	2	2	1			
数据种类	筛选	筛选	筛选			
平均值	115	95.7	87			
最小值	110	95				
最大值	124	96				
C.V. (%)	3.64					
$F_1^{y0.2}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$	ANOVA				
试件数量	8	3	1			
批 数	3	2	1			
数据种类	筛选	筛选	筛选			

(1) 在 5 ksi 氢和 5 ksi 氮的一些试验结果合并在一起。

(2) 只对已正式批准的数据出现 B 基准值。

(3) 汇集的应变率 (1/s): : 1×10<sup>-6</sup>, 8.3×10<sup>-5</sup>, 1×10<sup>-4</sup>, 2×10<sup>-3</sup>.

表 3.3.5.1(e) Ti 热等静压片/箔 Ti-15-3 1 轴拉伸性能 (筛选)

材 料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压片/箔						
试验方法: 1.9.2.1 节		模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析				
试验前曝露: 真空, 1 292°F, 24h		来 源: NASA-GRC				
归一化: 无						
温度 (°F)	800	800	800	800		
试验环境	空气	空气	空气	空气		
应变速率 (1/s)	1×10 <sup>-8</sup>	1×10 <sup>-6</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>		
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	5.2	20	56	59	
试件数量	1	1	1	1		
批 数	1	1	1	1		
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选		
$F_1^{\text{y0.02}}$ (ksi)	平均值 B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	40	29	69	73	
试件数量	1	1	1	1		
批 数	1	1	1	1		
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选		
$F_1^{\text{y0.2}}$ (ksi)	平均值 B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		43	83	84	
试件数量		1	1	1		
批 数		1	1	1		
数据种类		筛选	筛选	筛选		

表3.3.5.1(f) Ti热等静压板/箔Ti-15-3 1轴拉伸性能(筛选)

材 料: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 热等静压板/箔						
试验方法: 1.9.2.1 节			模量计算: 在比例极限以前用最小二乘法分析			
试验前曝露: 真空, 1292°F, 24h			来 源: NASA-GRC			
归一化: 无						
温度 (F)	900	1000	1000	1000		
试验环境	空气	空气	空气	空气		
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>		
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值	54	6	23	50	
	最小值	50				
	最大值	57				
	C.V. (%)					
	B 基准值					
	分 布					
	$C_1$					
	$C_2$					
	试件数量	2	1	1	1	
$F_1^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	批 数	2	1	1	1	
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	
	平均值	65	6	33	60	
	最小值					
	最大值					
	C.V. (%)					
	B 基准值					
	分 布					
	$C_1$					
$F_1^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	$C_2$					
	试件数量	2	1	1	1	
	批 数	2	1	1	1	
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	
	平均值	74.5	8	42	67	
	最小值	74				
	最大值	75				
	C.V. (%)					
	B 基准值					
	分 布					
	$C_1$					
	$C_2$					
	试件数量	2	1	1	1	
	批 数	2	1	1	1	
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	

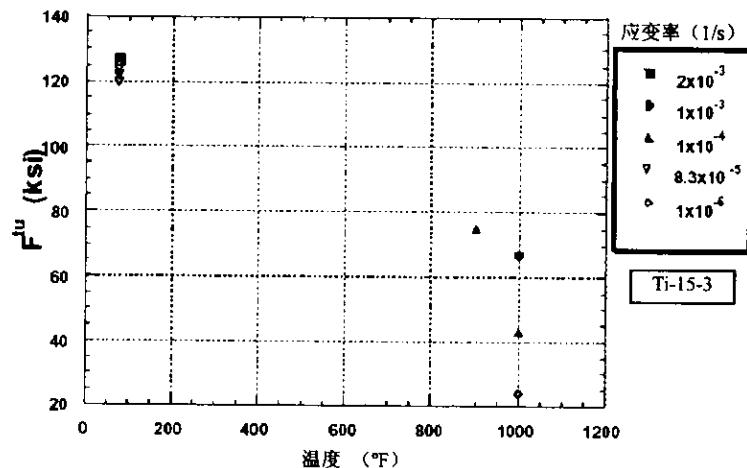


图 3.3.5.1(a) 极限拉伸强度随温度和应变率变化

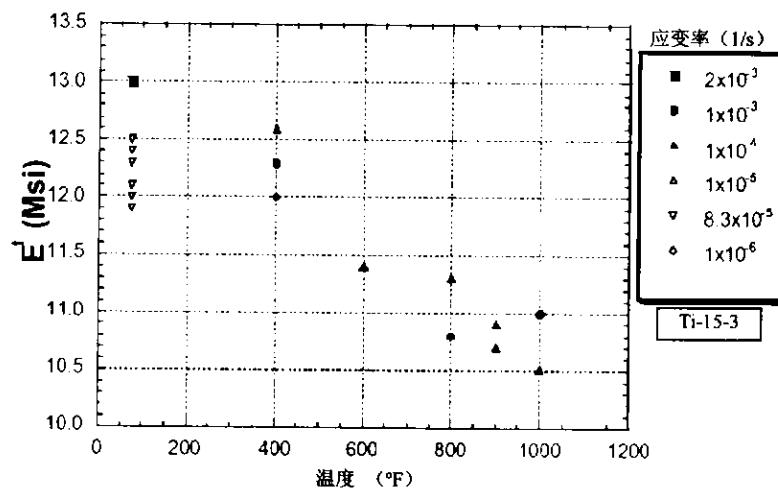


图 3.3.5.1(b) 拉伸模量随温度和应变率的变化

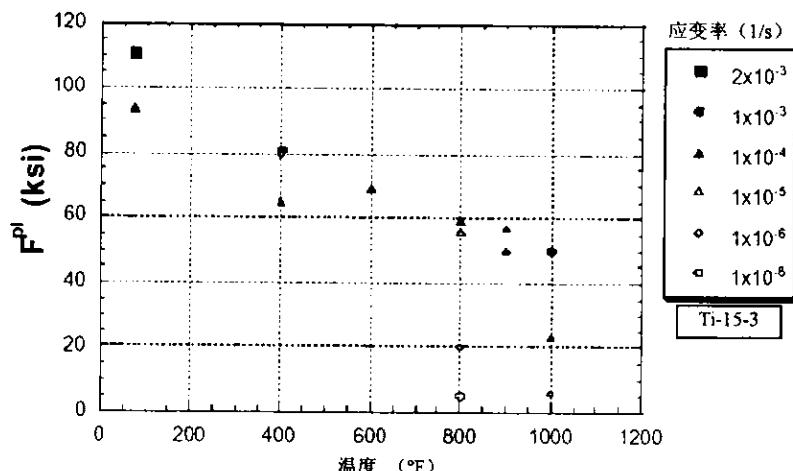


图 3.3.5.1(c) 比例极限随温度和应变率的变化

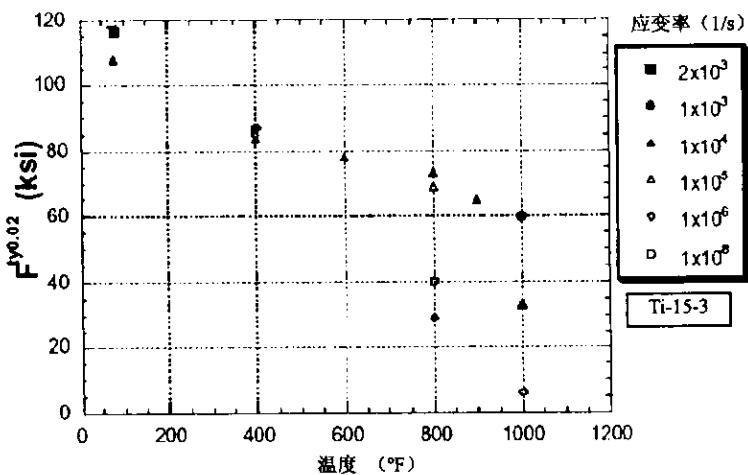


图 3.3.5.1(d) 0.02 偏移屈服强度随温度和应变率的变化

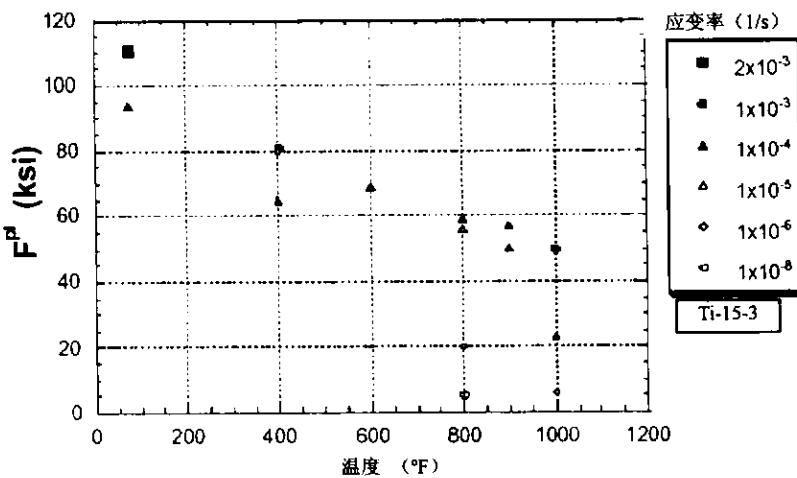


图 3.3.5.1(e) 温度和应变率对 0.2 偏移屈服强度的影响

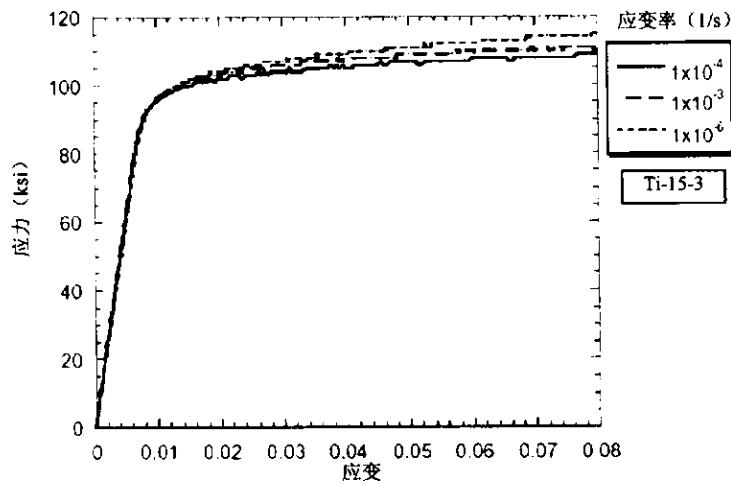


图 3.3.5.1(f) 204°C (400°F) 拉伸曲线随应变率的变化

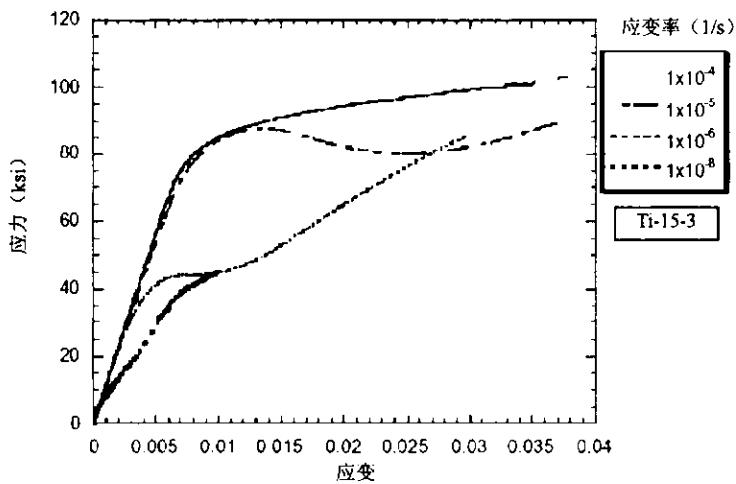


图 3.3.5.1(g) 427°C (800°F) 拉伸曲线随应变率的变化

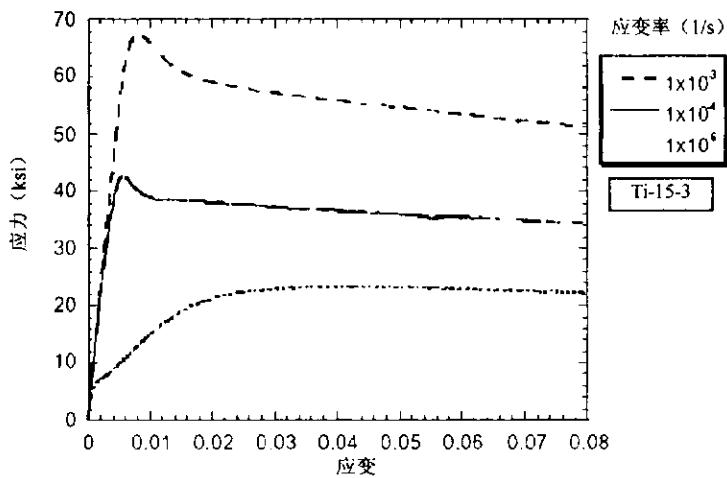


图 3.3.5.1(h) 538°C (1 000°F) 拉伸曲线随应变率的变化

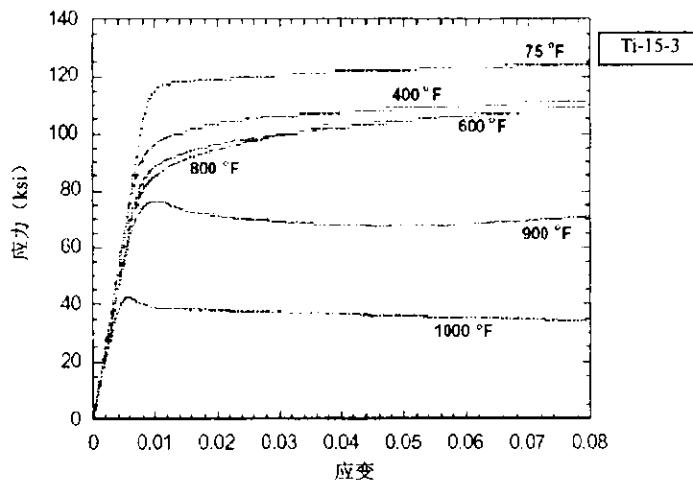


图 3.3.5.1(i) 应变率为  $10^{-4}\text{s}^{-1}$  的拉伸曲线随温度的变化

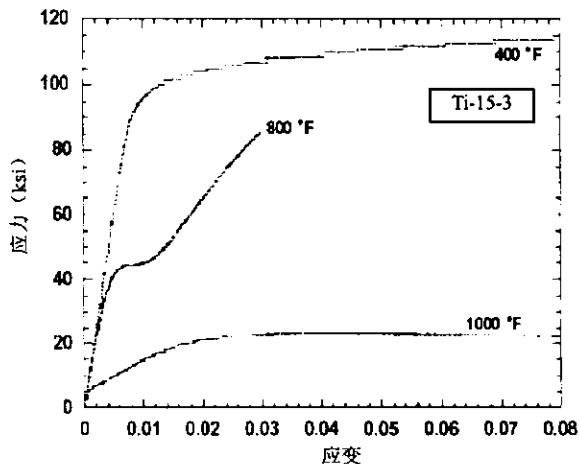


图 3.3.5.1(j) 应变率为  $10^{-6}\text{s}^{-1}$  的拉伸曲线随温度的变化

### 3.3.6 其他

此节留待以后补充。

## 3.4 纤维涂层特征

### 3.4.1 引言

此节留待以后补充。

### 3.4.2 碳

此节留待以后补充。

### 3.4.3 二硼化钛

此节留待以后补充。

### 3.4.4 氧化钇

此节留待以后补充。

### 3.4.5 其他

此节留待以后补充。

## 3.5 铝基复合材料的性能

### 3.5.1 引言

此节留待以后补充。

## 3.5.2 氧化铝/铝

### 3.5.2.1 Nextel 610/纯铝板\*

材 料:	Nextel 610/SP Al 板	基体材料:	Al	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> /SP Al
纤 维:	Nextel 610, 连续, 11.5μm			Nextel 610/SP Al
生 产 商:	3M			汇总
工 艺 顺 序:	压滤浇铸			
生产 工艺:	720℃熔融, 680℃预熔融并在 1300 psi 下浇铸	来 源:	3M 公司	

纤维生产日期	3/99	试验日期	1995-1997
基体生产日期		数据提交日期	4/99
复合材料生产日期	1995-1997	分析日期	2/01

单向板性能汇总

温 度	73°F
环 境	空 气
纤维 v/o	65
[0] 拉伸, 1 轴	FS-F—
[90] 拉伸, 2 轴	FS-S—

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

	名 义 值	提 供 值	试 验 方 法
纤维密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.97		
基体箔的密度 (g/cm <sup>3</sup> )			
复合材料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.40		
单层厚度 (in)			

层压板性能

温 度						
环 境						
纤维体积含量						

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

\* 原始数据表见附录 C1.1。

表3.5.2.1(a)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  板Nextel 610/SP Al [0]<sub>j</sub> 1轴拉伸性能 (筛选)

材 料:	Nextel 610/纯 Al	纤维体积含量:	65%
机 加:	金刚石砂轮片	纤维间距:	无
试件几何尺寸:	各边相互垂直	模量计算:	从 0.01%-0.02%应变用最小二乘法拟合
标 厚:	0.050in	来 源:	3M
标 宽:	0.375in		
试验方法:	(1)		
试验前曝露:	无		
归一化:	无		
温度 (F) 试验环境 纤维体积含量 应变速率 (1/s)	73 空气 0.65 $1-1.5 \times 10^{-2}$		
$F_t^{\text{u}}$ (ksi) 平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	266 240 285 4.11 244 ANOVA 11.1 1.99 42 8 正式批准		
$E_t^{\text{t}}$ (Msi) 平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	38 34.8 39.8 3.16 29 7 筛选		
$V_{12}^{\text{t}}$ 平均值 试件数量 批 数 数据种类			
$\varepsilon_t^{\text{u}}$ (%) 平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	0.729 0.630 0.790 5.72 0.638 ANOVA 0.032 2.39 36 8 正式批准		

(1) MMC TM401.. 要得到关于这一 3M 公司的试验标准的其他信息, 请与 3M 公司或秘书处联系。

表3.5.2.1(b)  $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Al}$  板Nextel 610/SP Al [90], 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Nextel 610/纯 Al					
机 加:	金刚石砂轮片		纤维体积含量:	65%		
试件几何尺寸:	各边相互垂直		纤维间距:	无		
标 厚:	0.050in					
标 宽:	0.375in		模量计算:	从 0.01%-0.02%应变用最小二乘法拟合		
试验方法:	(I)		来 源:	3M		
试验前曝露:	无					
归一化:	无					
温度 (F)	73					
试验环境	空气					
纤维体积含量	0.65					
应变率 (1/s)	1x10-2					
$F_{2}^{\text{u}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	25.9 22.4 29.7 6.96				
	B基准值 分布	21.8 ANOVA				
	$C_1$ $C_2$	1.88 2.23				
	试件数量	39				
	批 数	6				
	数据种类	正式批准				
$E_{2}^{\text{t}}$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	17.8 16.7 19.4 6.44				
	试件数量	8				
	批 数	3				
	数据种类	筛选				
$V_{23}^{\text{t}}$	平均值 试件数量 批 数 数据种类					
$\varepsilon_{2}^{\text{u}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	1.16 0.720 4.16 55.4				
	B基准值 分布	(2) ANOVA				
	$C_1$ $C_2$	0.762 3.97				
	试件数量	36				
	批 数	4				
	数据种类	筛选				

(1) MMC TM401。要得到关于这一 3M 公司的试验标准的其他信息, 请与 3M 公司或秘书处联系。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

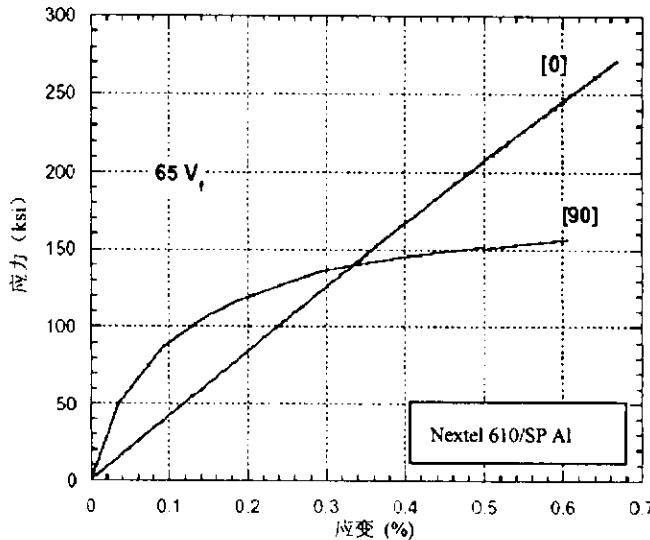


图 3.5.2.1(a) 22°C (73°F) 下应变率为  $1.5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$  时[0]和[90]试件的典型拉伸行为

### 3.5.3 硼/铝

此节留待以后补充。

### 3.5.4 碳化硼/铝

此节留待以后补充。

### 3.5.5 石墨/铝

此节留待以后补充。

### 3.5.6 碳化硅 (SiC) /铝

此节留待以后补充。

### 3.5.7 钢/铝

此节留待以后补充。

### 3.5.8 钨/铝

此节留待以后补充。

### 3.5.9 其他/铝

此节留待以后补充。

## 3.6 铜基复合材料性能

### 3.6.1 引言

此节留待以后补充。

## **3.6.2 石墨/铜**

此节留待以后补充。

## **3.6.3 其他/铜**

此节留待以后补充。

# **3.7 镁基复合材料性能**

## **3.7.1 引言**

此节留待以后补充。

## **3.7.2 石墨/镁**

此节留待以后补充。

## **3.7.3 铝/镁**

此节留待以后补充。

## **3.7.4 其他/镁**

此节留待以后补充。

# **3.8 钛基复合材料性能**

## **3.8.1 前言**

在编纂本手册时，本节中只介绍了 SiC 增强 Ti 合金的数据，它们都是由箔/纤维/箔压固制成的（文献 1.2.6.2.2 节）。在所有材料中使用的 SiC 纤维都是 SCS-6 单丝。这种纤维的名义 UTS 值为 500 ksi，其模量为 50-60 GPa。由于具有这么高的值，纤维性能在平行于复合材料的纤维轴方向占支配地位。

SCS-6 单丝包覆有双层富 C 层。这一包覆层有利于保护纤维表面免受操作损伤。另外，它也起到扩散障碍层的作用，以阻止在压固过程中 Ti 基体与 SiC 纤维反应。这一包覆层形成了弱的界面层，而引起纤维/基体脱粘，以及较低的横向性能。因此，列出在本节中的材料的性能具有极强的各向异性。

## **3.8.2 碳化硅/钛 (SiC/Ti)**

### **3.8.2.1 SiC/Ti-15-3**

#### **3.8.2.1.1 SiC/Ti-15-3 拉伸**

Textron 公司通过箔/纤维/箔生产复合材料板。基体箔是 Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn (Ti-15-3) 合金，增强体为 SCS-6 纤维。板有 8 或 32 层厚，其尺寸为 10×14 in。用于这些板的衬垫都是金属带机织成的。所使用带的类型 (Ti、Mo 或 Ti-Nb) 取决于生产时间。

拉伸试件从板中切割出，并按 1.3.2.4 节所述方法制备。所有试件都经 1 292°F (700°F) 真空热处理 24h。根据 1.4.2.1 节所述方法，拉伸试验在空气中进行。高温时的试验采用直接感应加热。

### 纤维体积含量的影响

表 3.8.2.1(a)-(d) 中对不同纤维体积含量的材料给出了 [0°] 方向平均拉伸性能表。在这些以及所有其后的表中，术语“批”指一块材料板。每一试件的拉伸性能和谱系信息在附录 C 中的原始数据表中给出。

表 3.8.2.1(e)-(f) 中对 3 种纤维体积含量的材料给出了 [90°] 方向平均拉伸性能表。表 3.8.2.1(g)-(n) 中给出了不同纤维铺设的正交铺层层压板的平均拉伸性能。这些试件的拉伸性能和谱系信息在附录 C 的原始数据表中给出。原始数据表中有三种试验，破坏应变值前有“>”符号，这些试验在表列的拉伸应变处被中止并卸载，因此，真实的破坏应变值大于表中给出的数值。

图 3.8.2.1(a) 中绘出了 [0°] 和 [90°] 层压板极限拉伸强度 (UTS) 随纤维体积含量和温度的变化关系。对于 [0°] 层压板，UTS 值随纤维体积含量的增加而增加。对于纤维体积含量大于 25% 的试件，24°C (75°F) 和 427°C (800°F) 之间的 UTS 值没有显著不同，但是纤维体积含量为 15% 的试件其 UTS 值与温度的关系很大，这说明基体性能的影响很大。与 [0°] 层压板相反，24°C (75°F) 时，[90°] 层压板的 UTS 值随纤维体积含量的增加而减小。

图 3.8.2.1(b) 中绘出了 [0°] 和 [90°] 层压板的弹性模量随温度和纤维体积含量的变化关系。[0°] 层压板材料的弹性模量随纤维体积含量的增加而增加。对于 [0°] 层压板 24°C (75°F) 和 427°C (800°F) 的模量没有显著不同。[90°] 层压板的弹性模量与纤维体积含量无关。

[0°] 和 [90°] 层压板的比例极限是温度和纤维体积含量的函数，绘于图 3.8.2.1(c) 中。对于现有的有限数据，比例极限都不随温度和体积含量的变化而改变，部分原因是由于这些值的分散性很大，以及确定这些值时的主观随意性。

对于 [0°] 和 [90°] 层压板，0.02% 屈服强度是温度和纤维体积含量的函数，如图 3.8.2.1(d)。[0°] 板屈服强度随纤维体积含量增加而略微增加，但是随温度变化没有明显不同。[90°] 层压板的屈服强度与这两个参数无关。

绘出了不同温度时被选择的拉伸曲线随纤维体积含量变化的关系：24°C (75°F)（图 3.8.2.1(e)）和 427°C (800°F)（图 3.8.2.1(f)）。随着纤维体积含量的增加，材料刚度和强度愈来愈高。从应力应变行为曲线的曲率可见，与含有更高的纤维体积含量的材料相比，纤维体积含量为 15% 时的材料有一个更明显的非弹性。还可注意到，断裂应变与纤维体积含量无关，尤其是在 427°C (800°F) 时。

图 3.8.2.1(g) 中给出了 427°C (800°F) 时的应力-横向宽度应变随纤维体积含量变化的曲线。该曲线再次表现出在纤维体积含量较高时，刚度和强度较高。

### 纤维体积含量为 35% 时纤维取向的影响

图 3.8.2.1(h) 中绘出了在 24°C (75°F) 和 427°C (800°F) 试验温度时，平均弹性模量随纤维铺层的变化。在此图中，弹性模量随着纤维铺层从左向右移动而减小，它表现出纤维的影响逐渐减弱，而基体的影响逐渐增加的趋势。对所给出的少量试验情况，可以观察到在 24°C (75°F) 和 427°C (800°F) 条件下，模量没有显著区别。

图 3.8.2.1(i) 中给出了在试验温度在 24°C (75°F) 和 427°C (800°F) 下平均极限拉伸强

度(UTS)与纤维取向的变化关系。UTS值的最大值大约为200 ksi, 对应于最强度的纤维取向(即[0]), 最小时为60 ksi, 对应于最弱的纤维取向(即[90])。具有正交铺层层压板的强度在两者之间, 它依赖于0°层的贡献。在两种温度之间的UTS值没有显著不同。

对于不同的铺层取向, 24°C(75°F)时的拉伸曲线见图3.8.2.1(j)。为了进行比较, 还给出了无纤维增强基体材料拉伸曲线的起始部分(箭头表示那些曲线延伸到较高应变)。但是, 只有三种复合材料([0], [90/0]和[±30]) ) 的强度高于无纤维增强的基体材料。还有, 所有方向的复合材料都比无纤维增强的基体材料的延展性小。

对于其他的情况, 请查阅以下参考文献:

- B.A. Lerch, T.P. Gabb and R.A. MacKay: Heat Treatment Study of the iC/Ti-15-3 Composite System. NASA TP 2970, Jan., 1990.
- B.A. Lerch, D.R. Hull and T.A. Leonhardt: Microstructure of a SiC/Ti-15-3 Composite. Composites, Vol. 21, No. 3, May, 1990, pp. 216-224.
- B.A. Lerch, M.E. Melis and M. Tong: Deformation Behavior of SiC/Ti-15-3 Laminates. In Advanced Metal Matrix Composites for Elevated Temperatures Conference Proceedings, Cincinnati, Ohio, October 20-24, 1991, ASM, Materials Park, Ohio, eds. M.N. Gungor, E.J. Lavernia and S.G. Fishman, pp. 109-114.
- T.P. Gabb, J. Gayda, B.A. Lerch and G.R. Halford: The Effect of Matrix Mechanical Properties on [0]8 Unidirectional SiC/Ti Composite Fatigue Resistance. Scripta Met., Vol. 25, 1991, pp. 2879-2884.
- B.A. Lerch and J.F. Saltsman: Tensile Deformation of SiC/Ti-15-3 Laminates. Composite Materials: Fatigue and Fracture, Fourth Volume, ASTM STP 1156, eds. W.W. Stinchcomb and N.E. Ashbaugh, ASTM Philadelphia, 1993, pp. 161-175.
- S. Subramanian, B.A. Lerch, M.G. Castelli and D. Allen: Effect of Fiber Volume Fraction on Fully-Reversed Isothermal Fatigue Behavior of Unidirectional SCS6-Ti-15-3 Composites. Composites and Functionally Graded Materials, MD-Vol. 80, eds. T.S. Srivatsan, A. Zavaliangos, K.I. Jacob, N. Katsume, W. Jones, K. Ramani, S. Sitaraman and S. Yang, ASME, 1997, pp. 131-139.

### 3.8.2.1.1 SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔\*

材 料: SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔	基 体: Ti-15V-3Cr-3Sn-3Al	SiC/Ti SCS-6/Ti-15-3 概述
纤 维: SCS-6, 连续, 145 μm		
制 造 商: Textron		
加工顺序: 热等静压箔/纤维/箔预成形		
处 理:	来 源: NASA-GRC	

纤维制造日期	试验日期	6/98-10/98
基体制造日期	数据提交日期	5/98
复合材料制造日期	分析日期	9/98

#### 单层性能汇总

温 度	75°F			800°F			
环 境	空 气			空 气			
纤维体积含量 (%)	15	35	41	15	25	35	41
[0] 拉伸, 1 轴	SS-SSSS	SSSSSS-	SS-SSS-	SSSS-S-	SSSS-S-	SS-SSS-	SSSS--
[90]拉伸, 2 轴	SS-SSSS	SSSSSS	SS-S--			SS-SSS	SSSS

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

	名 称	名 义 值	提 供 值	试 验 方 法
纤维密度	(g/cm <sup>3</sup> )	3.0	3.0	
箔基体密度	(g/cm <sup>3</sup> )	4.8		
复合材料密度	(g/cm <sup>3</sup> )			
板层厚度 <sup>*</sup>	(in)			

\*纤维中心到纤维中心

#### 层压板性能

温 度	75°F		800°F				
环 境	空 气		空 气				
纤维体积含量 (%)	35		35				
[±30] 拉伸, x 轴	SS-SSSS		SS-SSSS				
[±45] 拉伸, x 轴	SS-SSSS		SS-SSSS				
[±60] 拉伸, x 轴	SS-SSSS		SS-SSSS				
[0/90] 拉伸, x 轴	SSSSSS						

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度

\*原始数据表在附录 C4.1。

表3.8.2.1.1(a) [0], SiC/Ti 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔			
机 加:	EDM	纤维体积含量:	15%-41%	
试件厚度:	0.06-0.12 in.	纤维间距:	--	
试验方法:	1.4.2.1 节	模量计算:	比例极限以前用最小二乘法分析	
试验前曝露:	真空, 1 292 F, 24 h	来 源:	NASA-GRC	
归一化:	无			
温度 (°F) 环 境	75 空气	75 空气	75 空气	
纤维体积含量 (%)	15	35	41	
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	
$F_t^u$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	185 168 217 7.16	200 201 252 (1)	
$E_t^u$ (Msi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	正态	200 14.3	
试件数量	1	9	2	
批 数	1	2	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	
$V_{12}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类	20 1 1 筛选	26.6 25.0 29.0 5.66 8 2 筛选	31 31 31 2 1 筛选
$\epsilon_t^u$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	1.21	0.84 0.66 1 14	0.82 0.73 0.9 (1)
$\epsilon_t^u$ (%)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	正态	0.84 0.12	
试件数量	1	9	2	
批 数	1	8	2	
数据种类	筛选	筛选	筛选	

只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.1.1(b) [0]\_8<sup>(1)</sup>SiC/Ti 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/高压水/磨削			纤维体积含量:	15%-41%		
试件厚度:	0.06-0.12 in.			纤维间距:	--		
试验方法:	1.4.2.1 节			模量计算:	比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h			来 源:	NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F)	800	800	800	800	800	800	
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气	
纤维体积含量 (%)	15	25	35	35	35	41	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	
平均值	137	195	198	200	226	248	
最小值	136	192			201	245	
最大值	138	197			252	251	
C.V. (%)							
$F_t^u$ (ksi)	B 基准值 分 布	$C_1$	$C_2$				
试件数量	2	2	1	1	4	2	
批 数	1	2	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	
平均值	19	24	29	32	27	31	
最小值	19	24			26	30	
最大值	19	24			29	32	
$E_t^t$ (Msi)	C.V. (%)						
试件数量	2	2	1	1	4	2	
批 数	1	1	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	
平均值	0.38	0.32				0.3	
$V_{12}^t$	试件数量	2	2			2	
批 数	1	1				1	
数据种类	筛选	筛选				筛选	
平均值	0.81	0.90	0.82	0.77	0.95	0.84	
最小值	0.75	0.88			0.84	0.83	
最大值	0.86	0.91			1.06	0.84	
C.V. (%)							
$\epsilon_t^{tu}$ (%)	B 基准值 分 布	$C_1$	$C_2$				
试件数量	2	2	1	1	4	2	
批 数	1	1	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	

(1) 也包含 32 层材料的数据。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.1.1(c) [0] SiC/Ti 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 铝/纤维/箔		
机 加:	EDM	纤维体积含量:	15%-41%
试件厚度:	0.06-0.12 in.	纤维间距:	-
试验方法:	1.4.2.1 节	模量计算:	在比例极限以前用最小二乘法分析
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h	来 源:	NASA-GRC
归一化:	无		
温度 (°F) 环 境	75 空气	75 空气	75 空气
纤维体积含量 (%)	15	35	41
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$
$F_1^{pl}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	123 33 150 31.9 (1) ANOVA 36.6 2.45	116 33 140 128 151
试件数量	1	9	2
批 数	1	2	1
数据种类	筛选	筛选	筛选
$F_1^{by0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	141 82 186 25.8 (1) ANOVA 40.6 6.35	145 82 176 160 192
试件数量	1	9	2
批 数	1	2	1
数据种类	筛选	筛选	筛选
$F_1^{by0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	172	
试件数量	1		
批 数	1		
数据种类	筛选		

(1) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.1.1(d) [0]<sub>s</sub><sup>(1)</sup> SiC/Ti 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/高压水/磨削			纤维体积含量:	15%-41 %		
试件厚度:	0.06-0.12 in.			纤维间距:	-		
试验方法:	1.4.2.1 节			模量计算:	在比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1292°F, 24 h			来 源:	NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F)	800	800	800	800	800	800	
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气	
纤维体积含量 (%)	15	25	35	35	35	41	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	
$F_1^{pl}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		24	17	91 31 151		
	试件数量 批 数 数据种类		1	1	2 1		
$F_1^{t0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	116 115 116	158 151 164	90	42 175 145 187	200 187 212	
	试件数量 批 数 数据种类	2 1	2 1	1 1	1 4 1	2 1	
$F_1^{t0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
	试件数量 批 数 数据种类						

(1) 也包含 32 层材料的数据。

表3.8.2.1.1(e) [90], SiC/Ti 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 粉/纤维/箔					
机 加:	EDM			纤维体积含量:	15%-41%	
试件厚度:	0.06-0.12 in.			纤维间距:	—	
试验方法:	1.4.2.1 节			模量计算:	在比例极限以前用最小二乘法分析	
试验前曝露:	真空, 1292°F, 24 h			来 源:	NASA-GRC	
归一化:	无					
温度 (°F) 环 境	75 空 气	75 空 气	75 空 气	800 空 气	800 空 气	
纤维体积含量 (%)	15	35	41	35	35	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	
$F_2^u$ (ksi)	平均值 96	61	28	41	42	
	最小值 59	23				
	最大值 62	33				
	C.V. (%)					
$E_2^t$ (Msi)	B 基准值 分布 $C_1$					
	$C_2$					
试件数量	1	2	2	1	1	
批 数	1	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	
$V_{23}^t$	平均值 0.18					
	试件数量 2					
	批 数 1					
	数据种类 筛选					
$\epsilon_2^u$ (%)	平均值 1.91	1.41	0.16	0.99	0.71	
	最小值 1.38		0.12			
	最大值 1.43		0.19			
	C.V. (%)					
$E_2^t$	B 基准值 分布 $C_1$					
	$C_2$					
试件数量	1	2	2	1	1	
批 数	1	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	

表3.8.2.1.1(f) [90]\_s SiC/Ti 2轴拉伸性能 (筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM			纤维体积含量:		15%-41%	
试件厚度:	0.06-0.12 in.			纤维间距:		--	
试验方法:	1.4.2.1 节			模量计算:		在比例极限以前用最小二乘法分析	
试验前曝露:	真空, 1292°F, 24 h			来 源:		NASA-GRC	
归一化:	无						
温度 (°F)	75	75	75	800	800		
环 境	空气	空气	空气	空气	空气		
纤维体积含量 (%)	15	35	41	35	35		
应变率 (1/s)	1·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-4</sup>	1·10 <sup>-5</sup>	1·10 <sup>-4</sup>		
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	42	16	15	16		
	最小值	15					
	最大值	17					
	C.V. (%)						
$F_2^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	2 1 筛选	2 1 筛选	1 1 筛选	1 1 筛选		
	平均值 最小值 最大值	44	39 38 40	22	25		
	C.V. (%)						
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
	试件数量 批 数 数据种类	1 1 筛选	2 1 筛选	1 1 筛选	1 1 筛选		
$F_2^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值	75	49.5 49 50	30	34		
	C.V. (%)						
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
	试件数量 批 数 数据种类	1 1 筛选	2 1 筛选	1 1 筛选	1 1 筛选		

表3.8.2.1.1(g) [±30]<sub>2s</sub> SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削				纤维体积含量:	35%	
试件厚度:	0.08 in.				纤维间距:	—	
试验方法:	1.4.2.1 节				模量计算:	在比例极限以前用最小二乘法分析	
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h				来 源:	NASA-GRC	
归一化:	无						
温度 (°F)	75	800					
环 境	空气	空气					
纤维体积含量 (%)	35	35					
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>					
$F_x^u$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	148 133 179 8.16	134				
	B 基准值 分 布	(2) ANOVA					
$C_1$	24.6						
$C_2$	19.8						
试件数量	10	1					
批 数	2	1					
数据种类	筛选	筛选					
$E_x^t$ (Ms)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	22.2 20.0 24.0 5.64	20				
	试件数量 批 数	11 2	1 1				
	数据种类	筛选	筛选				
$V_x^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类						
$\epsilon_x^u$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	1.24 0.99 1.66 17.0	1.52				
	B 基准值 分 布	(2) ANOVA					
$C_1$	0.35						
$C_2$	17.6						
试件数量	9	1					
批 数	2	1					
数据种类	筛选	筛选					

(1) 也包含 32 层材料的数据。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.1.1(h)  $[\pm 30]_4$ <sup>(1)</sup> SiC/Ti<sub>x</sub>轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削				纤维体积含量:	35%	
试件厚度:	0.08 in.				纤维间距:	--	
试验方法:	1.4.2.1 节				模量计算:	在比例极限以前用最小二乘法分析	
试验前曝露:	真空, 1292°F, 24 h				来 源:	NASA-GRC	
归一化:	无						
温度 (°F) 环 境	75 空气	800 空气					
纤维体积含量 (%)	15	35					
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-3}$					
$F_x^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 B 基准值 分 布	55.3 (2) Weibull	40				
$C_1$	59.3						
$C_2$	7.3						
试件数量	11	1					
批 数	2	1					
数据种类	筛选	筛选					
$F_x^{\text{ty}0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	69.1 26 97 25.7					
$B$ 基准值 分 布	(2) Weibull						
$C_1$	75.1						
$C_2$	5.0						
试件数量	11						
批 数	2						
数据种类	筛选						
$F_x^{\text{ty}0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	112 91 146 12.8	86				
$B$ 基准值 分 布	(2) 正态						
$C_1$	112						
$C_2$	14.3						
试件数量	11	1					
批 数	2	1					
数据种类	筛选	筛选					

(1) 也包含 32 层材料的数据。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.1.1(i) [±45]<sub>2</sub> SiC/Ti<sub>x</sub>轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削		纤维体积含量:		35%		
试件厚度:	0.08 in.		纤维间距:		—		
试验方法:	1.4.2.1 节		模量计算:		比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h		来 源:		NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F) 环 境	75 空气	800 空气	800 空气				
纤维体积含量 (%)	35	35	35				
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>				
$F_x^u$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	77	64	68			
	B 基准值 分 布						
	$C_1$						
	$C_2$						
试件数量	1	1	1				
批 数	1	1	1				
数据种类	筛选	筛选	筛选				
$E_x^t$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	17	17	13			
	试件数量	1	1	1			
	批 数	1	1	1			
	数据种类	筛选	筛选	筛选			
$V_{xy}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类						
$\epsilon_x^u$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	>4	>4.6	7.29			
	B 基准值 分 布						
	$C_1$						
	$C_2$						
试件数量	1	1	1				
批 数	1	1	1				
数据种类	筛选	筛选	筛选				

表3.8.2.1.1(j) [±45]<sub>2s</sub> SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 粉/纤维/粉						
机 加:	EDM			纤维体积含量:	35%		
试件厚度:	0.08 in.			纤维间距:	—		
试验方法:	1.4.2.1 节			模量计算:	比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h			来 源:	NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F)	75	800	800				
环 境	空气	空气	空气				
纤维体积含量 (%)	35	35	35				
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>				
$F_x^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	30	28	21			
试件数量	1	1	1				
批 数	1	1	1				
数据种类	筛选	筛选	筛选				
$F_x^{\text{ly0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	40	30	35			
试件数量	1	1	1				
批 数	1	1	1				
数据种类	筛选	筛选	筛选				
$F_x^{\text{ly0.2}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	52	29	47			
试件数量	1	1	1				
批 数	1	1	1				
数据种类	筛选	筛选	筛选				

表3.8.2.1.1(k)  $[\pm 60]_2$  SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 涂/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削		纤维体积含量:		35%		
试件厚度:	0.08 in.		纤维间距:		--		
试验方法:	1.4.2.1 节		模量计算:		比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h		来 源:		NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F)	75	800					
环 境	空气	空气					
纤维体积含量 (%)	35	35					
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$					
平均值	57	48					
最小值							
最大值							
C.V. (%)							
$F_x^u$ (ksi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
试件数量	1	1					
批 数	1	1					
数据种类	筛选	筛选					
$E_x^t$ (Ms) <sup>t</sup>	平均值 最 小 值 最 大 值 C.V. (%)	17	14				
试件数量	1	1					
批 数	1	1					
数据种类	筛选	筛选					
$V_{xy}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类						
$\epsilon_x^u$ (%)	平均值 最 小 值 最 大 值 C.V. (%)	1.8	2.95				
B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$							
试件数量	1	1					
批 数	1	1					
数据种类	筛选	筛选					

表3.8.2.1.1(l)  $[\pm 60]_{2z}$  SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削		纤维体积含量:	35%			
试件厚度:	0.08 in.		纤维间距:	--			
试验方法:	1.4.2.1 节		模量计算:	比例极限以前用最小二乘法分析			
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h		来 源:	NASA-GRC			
归一化:	无						
温度 (°F)	75	800					
环 境	空气	空气					
纤维体积含量 (%)	35	35					
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$	$1 \times 10^{-4}$					
$F_x^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	36	26				
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
$F_x^{\text{t}0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	1 1 筛选	1 1 筛选				
$F_x^{\text{t}0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	41	28				
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
$F_x^{\text{t}0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	1 1 筛选	1 1 筛选				
$F_x^{\text{t}0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	50	35				
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$						
$F_x^{\text{t}0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	1 1 筛选	1 1 筛选				

表3.8.2.1.1(m) [0/90]<sup>(1)</sup>SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削	纤维体积含量:	35%				
试件厚度:	0.08 in.	纤维间距:	—				
试验方法:	1.4.2.1 节	模量计算:	比例极限以前用最小二乘法分析				
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h	来 源:	NASA-GRC				
归一化:	无						
温度 (°F) 环 境	75 空气						
纤维体积含量 (%)	35						
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$						
$F_x^t$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	148 143 154					
	B 基准值 分 布						
	$C_1$ $C_2$						
试件数量	4						
批 数	1						
数据种类	筛选						
$E_x^t$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	21 15 25					
	试件数量	4					
	批 数	1					
	数据种类	筛选					
$V_{xy}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类	0.18 2 1 筛选					
$\epsilon_x^t$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	1.09 1 1.21					
	B 基准值 分 布						
	$C_1$ $C_2$						
试件数量	4						
批 数	1						
数据种类	筛选						

(1) 由[0/90]<sub>2s</sub>和[90/0]<sub>2s</sub>的数据组成。

表3.8.2.1.1(n) [0/90]<sup>(1)</sup> SiC/Ti x轴拉伸性能(筛选)

材 料:	SCS-6/Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn 箔/纤维/箔						
机 加:	EDM/磨削		纤维体积含量:		35%		
试件厚度:	0.08 in.		纤维间距:		--		
试验方法:	1.4.2.1 节		模量计算:		比例极限以前用最小二乘法分析		
试验前曝露:	真空, 1 292°F, 24 h		来 源:		NASA-GRC		
归一化:	无						
温度 (°F)	75						
环 境	空气						
纤维体积含量 (%)	35						
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-4}$						
$F_x^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	33 23 47 --					
	B 基准值 分 布						
	$C_1$ $C_2$						
$F_x^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	4 1 筛选					
$F_x^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	58.8 37 80 --					
	B 基准值 分 布						
	$C_1$ $C_2$						
$F_x^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	4 1 筛选					
$F_x^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	126 115 136 --					
	B 基准值 分 布						
	$C_1$ $C_2$						
	试件数量 批 数 数据种类	4 1 筛选					

(1) 由[0/90]<sub>24</sub>和[90/0]<sub>23</sub>的数据组成。

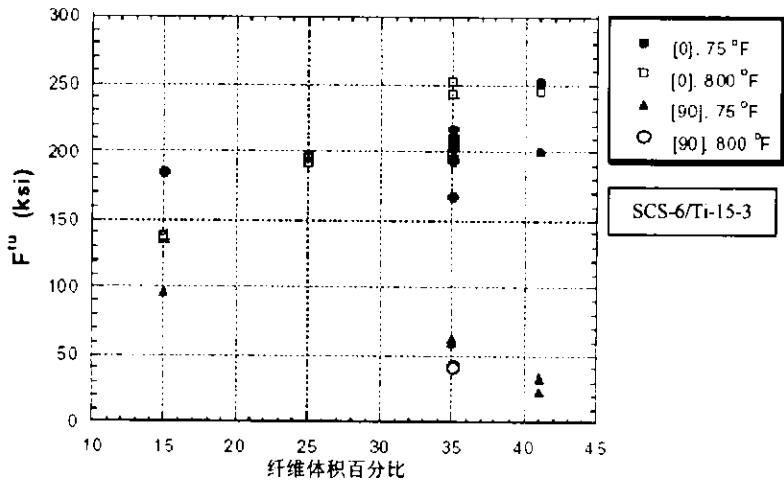


图 3.8.2.1.1(a) 纤维体积含量和温度对极限拉伸强度的影响

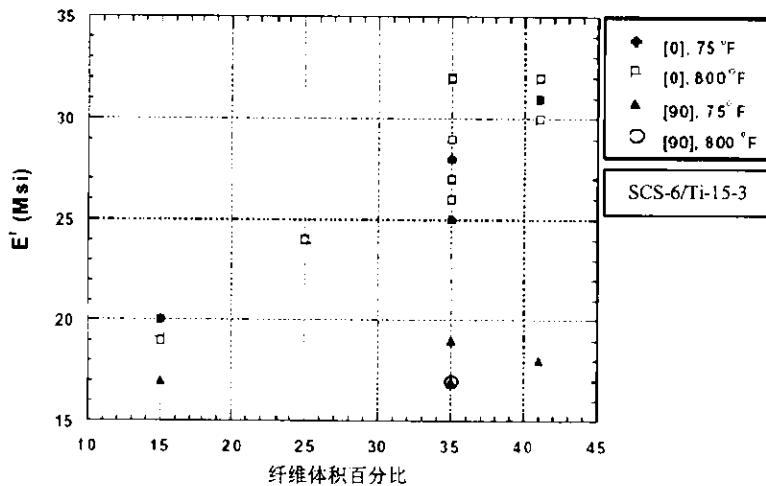


图 3.8.2.1.1(b) 纤维体积含量和温度对拉伸模量的影响

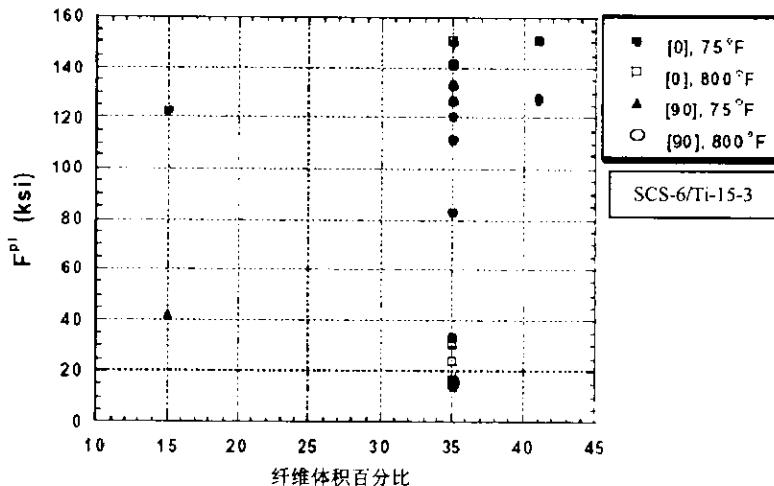


图 3.8.2.1.1(c) 纤维体积含量和温度对比例极限的影响

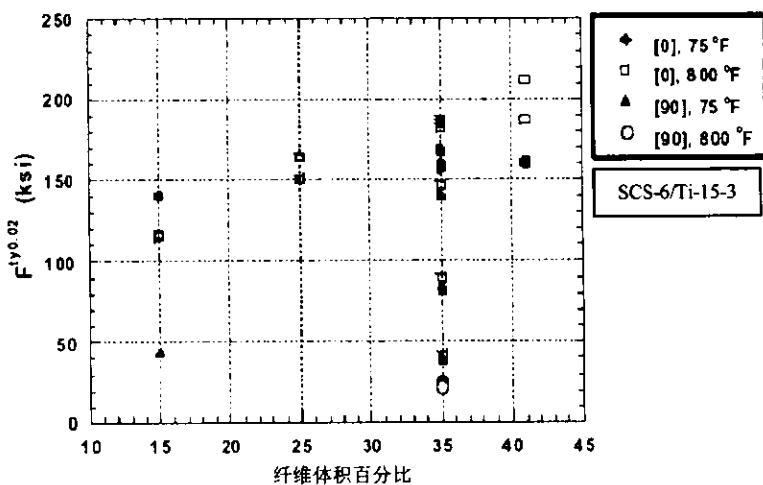


图 3.8.2.1.1(d) 纤维体积含量和温度对 0.02 屈服强度的影响

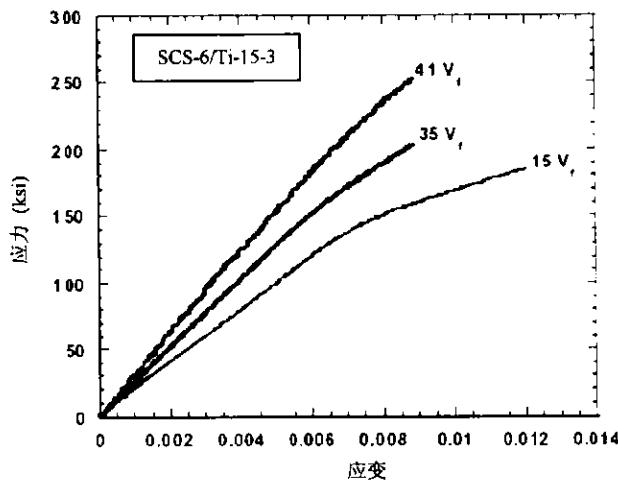


图 3.8.2.1.1(e) 24°C (75°F) 和应变率为  $1 \times 10^{-4}/\text{s}$  时，不同纤维体积含量  $[0]_g$  单向板的典型拉伸行为

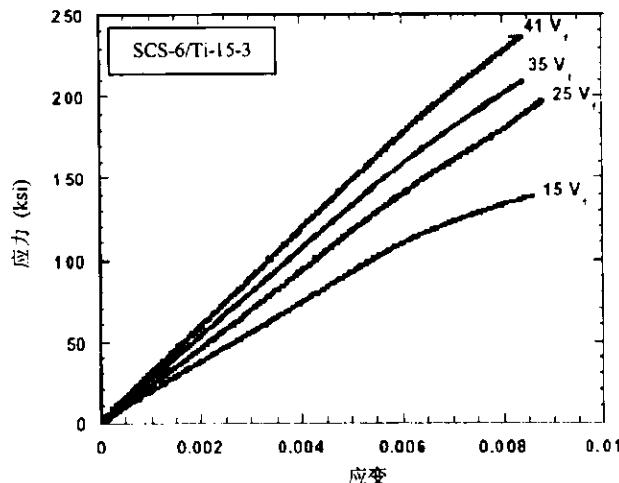


图 3.8.2.1.1(f) 427°C (800°F) 和应变率为  $1 \times 10^{-3}/\text{s}$  时，不同纤维体积含量  $[0]_g$  单向板的典型拉伸行为

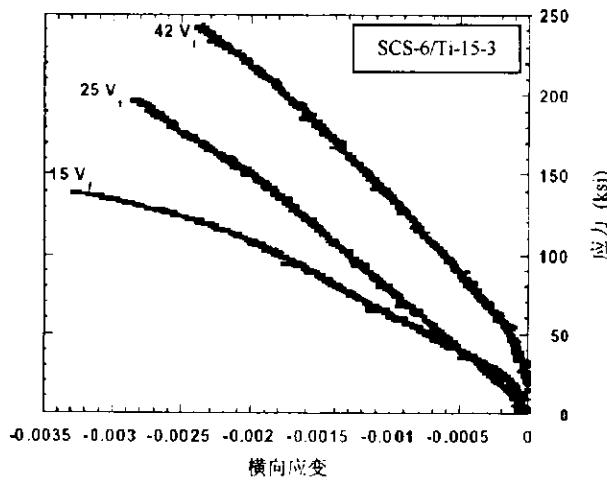


图 3.8.2.1.1(g) 427°C (800°F) 和应变速率为  $1 \times 10^{-3}/\text{s}$  时, 不同纤维体积含量[0]<sub>8</sub>单向板的典型拉伸行为

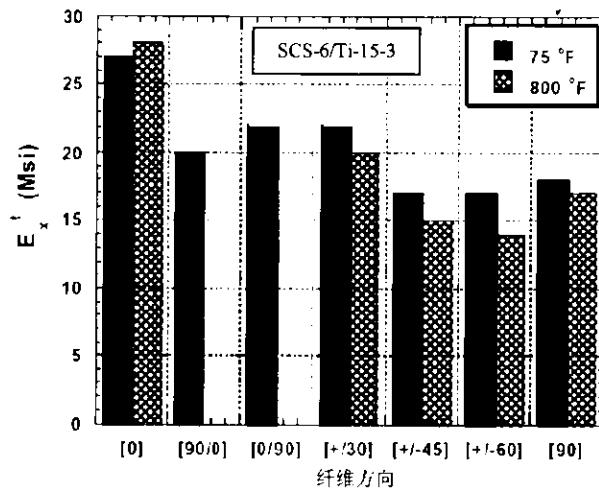


图 3.8.2.1.1(h) 应变速率为  $1 \times 10^{-3}/\text{s}$  和  $1 \times 10^{-4}/\text{s}$  时, 纤维取向和温度对平均拉伸模量的影响

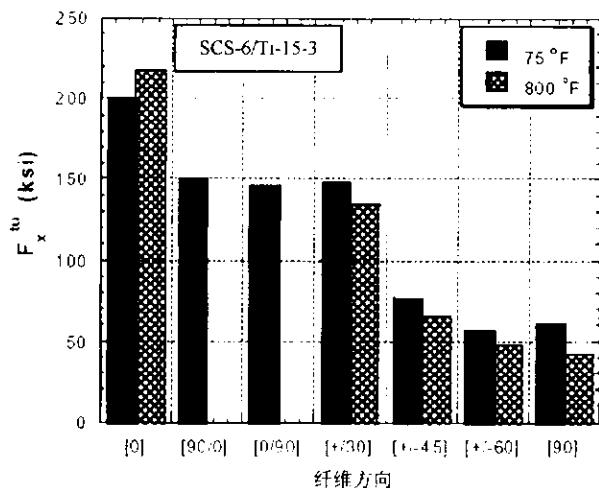


图 3.8.2.1.1(i) 应变速率为  $1 \times 10^{-3}/\text{s}$  和  $1 \times 10^{-4}/\text{s}$  时, 纤维取向和温度对平均拉伸强度的影响

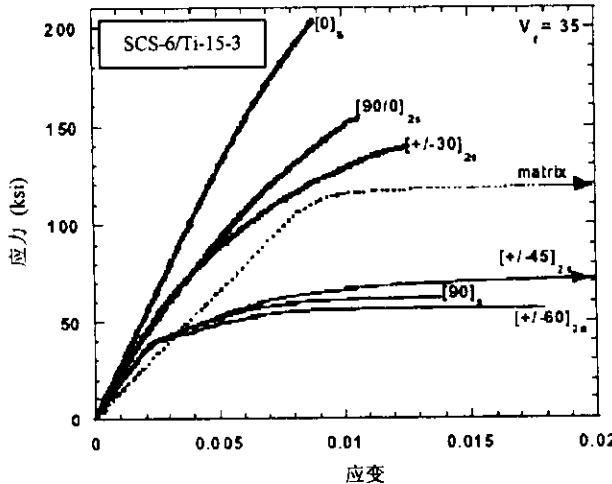


图 3.8.2.1.1(j) SiC/Ti-15-3 不同铺层压板典型拉伸行为 (24°C (75°F) 和应变速率为  $1 \times 10^{-4}/\text{s}$ )

### 3.8.2.1.2 SiC/Ti-15-3 疲劳

复合材料板由 Textron 公司用箔/纤维/箔压固方法制成。基体箔材料是：Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn (Ti-15-3) 合金，增强体是 SCS-6 纤维。板有 8 或 32 层厚，尺寸为 12 in×12 in 或 10 in×14 in。用于这些板的所有纤维垫都是由金属丝线织成的。使用的丝线类型 (Ti, Mo 或 Ti-Nb) 决定于制造年限。

低周疲劳 (LCF) 试件从板上取得，并按照 1.3.2.4 节进行准备。所有试件需在真空中以 700°C (1 292°F) 的温度热处理 24 小时。疲劳试验主要是按 1.4.2.4 节的试验方法在空气中进行。一些试验在真空中进行以考察环境的影响。高温试验时采用直接感应加热。

含有 Ti-15-3 的热等静压箔被压固到纯基体厚板中。圆柱形狗骨状试样从板材加工，并且与复合材料进行同样的热处理。这块材料用于与复合材料数据的对照。

#### 平均应力的影响

平均应力对  $[0]_s$  单向复合材料疲劳的影响如图 3.8.2.1.2(a) 所示。这些试验都是在载荷控制下进行的。采用了不同的平均应力，范围从  $R_o = -1$  (对称循环) 到  $R_o = 0.7$  (高拉伸平均应力)。对包括压缩载荷的试验，采用较厚的 32 层复合材料以防止试件的屈曲。

表 3.8.2.1.2(a) 表明应力比范围不变时，平均应力越高，寿命越短。事实上，这些数据最好用 Soderberg 平均应力方法建模。需要注意的是，在拉伸平均应力下，试件会锯齿形地增加拉伸应变，这相似于单一金属所展现的行为。拉伸的平均应力越高，锯齿形效应越厉害。

对应变控制试验的疲劳数据如表 3.8.2.1.2(b) 所示。某一固定的应变范围，对称循环情况下  $[0]_s$  板与纯基体有相似的寿命。注意：当施加循环平均应变时纯基体迅速松弛到对称循环应力状态。因而应变控制情形下，纯基体平均应变对寿命没有影响。然而，随着在高拉伸平均应变下寿命的减少，复合材料确定呈现出平均应变的影响。

表 3.8.2.1.2(b) 表明，对某一固定的应变范围，复合材料的 LCF 寿命从来不比纯基体的好。这就是说，加入增强纤维后，基体的疲劳强度只能减少。对纯基体显示疲劳极限的低应变范围情况更是这样，这时复合材料，至少下降到该图中所示的应变变化范围时，还没达到疲劳极限。然而增加纤维也是有好处的，比如增加强度，减小密度，韧化基体。

### 纤维织构的影响

图 3.8.2.1.2(c)给出了不同层压板在拉伸平均应力 ( $R_{\sigma}=0.05$ ) 下进行载荷控制试验得到的疲劳曲线。75°F 和 800°F (427°C) 的数据都有。应力范围不变时, [0]<sub>n</sub> 层压板最强, 即对给定的应力范围疲劳寿命最长。随 0°方向的纤维分量减少, 抗疲劳性能通常也降低, 所以, 横向[90]<sub>n</sub> 层压板的抗疲劳性能最低。

温度对疲劳寿命具有显著的影响, 尤其是对于不含 0°纤维的的层压板, 如[±30]<sub>n</sub>, 在较高温度下, 这种板的抗疲劳性能也较差。这可能是由于更大的基体非弹性导致更多的载荷落在纤维上, 并连续出现应变的锯齿形效应。高温下, 尤其是纤维/基体的界面的氧化, 也致使层压板中除 0°层以外各偏轴层的寿命降低, 这些层的纤维的末梢被暴露在环境中。

该图中的一个有意义的发现是[0/90]<sub>2s</sub>层压板的抗疲劳性能比[90/0]<sub>2s</sub>要好, 尽管事实上, 它们都是从同一块材料板中取出的, 并具有相同的拉伸性能。这种差异的原因是在两种层压板中, 90°板层的纤维/基体界面都在第一个加载循环中脱粘。在[90/0]<sub>2s</sub>板中, 这就把额外的载荷加到最外层的基体薄层上, 使它在寿命的早期就开裂, 裂纹可以很容易扩展一个大的距离, 直到被0°层迟滞。对于[0/90]<sub>2s</sub>薄板, 裂纹在寿命后期成核并在最初就被最外的0°层纤维迟滞。

图 3.8.2.1.2(d)给出了复合材料和纯基体材料的应变控制试验的疲劳曲线。与图 3.8.2.1.2(b)相似, 当曲线按应变范围绘制时, 基体数据代表了疲劳寿命的上限。[0]<sub>n</sub> 和[±30]<sub>8s</sub> 层压板的疲劳寿命稍低于纯基体。这也可以通过比较图 3.8.2.1.2(b)和(d)观察到, 如果数据按应变范围绘制, 并具有相同的应变比, 则所有复合材料层板 (包括在图 3.8.2.1.2(e)中不同体积含量的层压板) 的数据都将聚集到一条疲劳曲线上。

### 纤维体积含量的作用

对含有不同纤维体积含量的[0]<sub>n</sub> 板进行了应变控制对称循环疲劳试验, 这些试件的拉伸性能在图 3.8.2.1.1(b)和(d)中给出, 由于纤维总承载不同而存在大差异。然而, 在按应变范围绘制时, 对不同纤维体积含量的疲劳寿命并没有差别。

对于其他补充信息, 查阅下列参考文献:

- B.A. Lerch: Fatigue Behavior of SiC/Ti-15-3 Laminates. HiTemp Review 1990, NASA Conference Publication 10051, pp. 35-1 - 35-9.
- T.P. Gabb, J. Gayda, B.A. Lerch and G.R. Halford: The Effect of Matrix Mechanical Properties on [0]<sub>8</sub> Unidirectional SiC/Ti Composite Fatigue Resistance. Scripta Met., Vol. 25, 1991, pp. 2879-2884.
- B.A. Lerch and G.R. Halford: Fully-Reversed Fatigue of a Ti-MMC. Proceedings of the 17th Conference on Metal Matrix, Carbon, and Ceramic Matrix Composites, Part I; Cocoa Beach, FL, Jan. 1993, NASA CP 3235, May 1994, pp. 177-191.
- B. Lerch and G. Halford: Effects of Control Mode and R-ratio on the Fatigue Behaviour of a Metal Matrix Composite. Materials Science and Engineering, A200, 1995, pp. 47-54.
- B. Lerch and G. Halford: Fatigue Mean Stress Modeling in a [0]32 Titanium Matrix Composite. HiTemp Review 1995 Advanced High Temperature Engine Materials Technology Program, Volume II: Compressor/Turbine Materials - Metals and MMC's,

NASA Conf. Proc. 10178, 1995, paper 21.

- B.A. Lerch, M.J. Verrilli and G.R. Halford: Fully-Reversed Fatigue of a Ti-MMC. Proceedings of the American Society for Composites, Eighth Technical Conference, Technomic Publishing Company, Lancaster, Pa., 1993, pp. 388-396.
- S. Subramanian, B.A. Lerch, M.G. Castelli and D. Allen: Effect of Fiber Volume Fraction on Fully-Reversed Isothermal Fatigue Behavior of Unidirectional SCS6-Ti-15-3 Composites, Composites and Functionally Graded Materials, MD-Vol. 80, eds. T.S. Srivatsan, A. Zavaliangos, K.I. Jacob, N. Katsume, W. Jones, K. Ramani, S. Sitaraman and S. Yang, ASME, 1997, pp. 131-139.
- B.S. Majumdar and B.A. Lerch: Fatigue Mechanisms in a Ti-Based Fiber-Reinforced MMC and Approaches to Life Prediction, Proceedings of the Air Force Workshop on Titanium Matrix Composites, eds. P.R. Smith and W. Revelos, AF Technical Report No. WL-TR-93-4105, 1993, pp409-426.

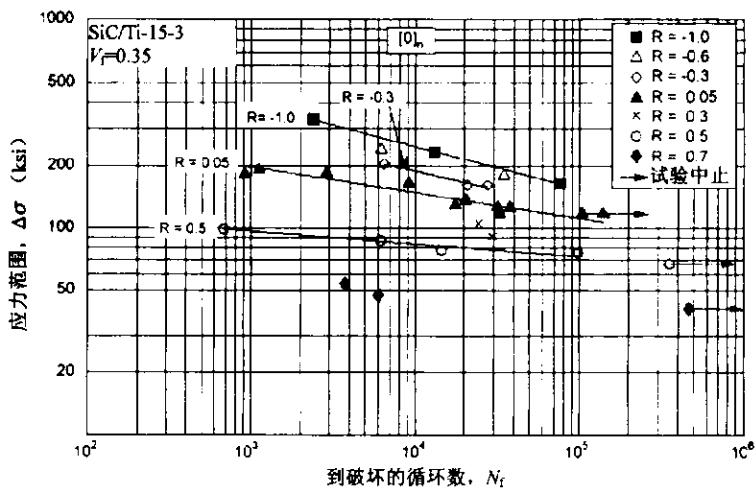


图 3.8.2.1.2(a) [0]\_n 在 427°C (800°F) 下载荷控制的疲劳数据

图3.8.2.1.2(a)的相关信息

数据来源		
疲 劳	表 C4.1(d)	
静 态 拉 伸	表 3.8.2.1(b) 和 (d)	
批 数	3	
层 数	8, 32	
试验参数		
频 率 (Hz)	0.04-0.17	
波 形	三角形	
温 度 (°F)	800	
气 氛	空气	
载荷比 ( $R_o$ )	-1, -0.6, -0.3, 0.05, 0.3, 0.5, 0.7	
应力寿命公式	$R_o=0.05$ (8 和 32 层) $\log N_f = 21.7 - 8.17 \log(\Delta\sigma)$ $\log N_f$ 的标准差 = 0.25 $R^2 = 88\%$ , 样本大小 = 11	$R_o=0.5$ (32 层) $\log N_f = 35.6 - 16.4 \log(\Delta\sigma)$ $\log N_f$ 的标准差 = 8.46(1/ $\Delta\sigma$ ) $R^2 = 91\%$ , 样本大小 = 4
	$R_o=-1$ (32 层) $\log N_f = 15.6 - 4.85 \log(\Delta\sigma)$ $\log N_f$ 的标准差 = 0.023 $R^2 = 100\%$ , 样本大小 = 3	$R_o=-0.3$ (32 层) $\log N_f = 16.8 - 5.63 \log(\Delta\sigma)$ $\log N_f$ 的标准差 = 0.084 $R^2 = 94\%$ , 样本大小 = 3

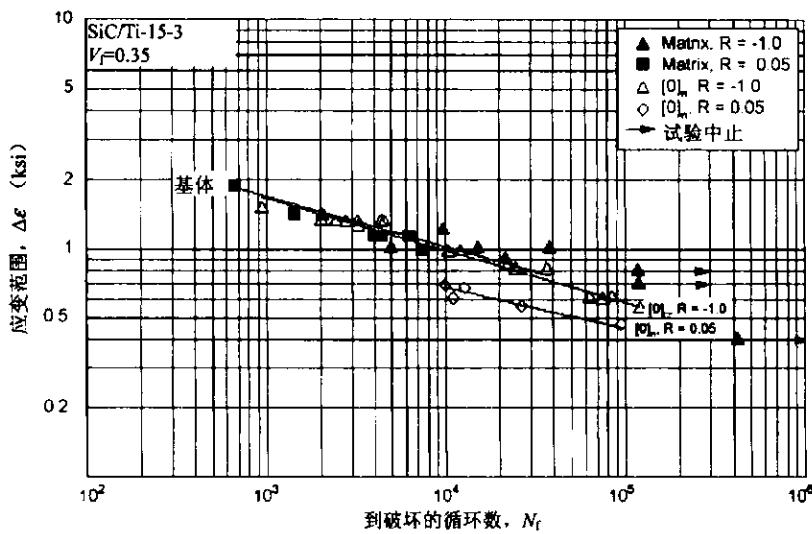


图 3.8.2.1.2(b)  $[0]_n$  在 427°C (800°F) 下应变控制的疲劳数据

图3.8.2.1.2(b)相关信息

	复合材料	基体
<b>数据来源</b>		
疲劳	表 C4.1(d)	表 B4.1(b)
静态拉伸	表 3.8.2.1(b) 和 (d)	表 3.3.5.1(a), (b), (d), (e)
批 数	3	1
层 数	8, 32	
<b>试验参数</b>		
应变率 ( $1/s$ )	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
波 形	三角形	三角形
温 度 (°F)	800	75, 400, 800
气 氛	空气	空气
应变比 ( $R_e$ )	-1.0, 0.05	-1.0, 0.05
<b>应变寿命公式</b>	$R_e = -1.0$ (8 和 32 层) $\text{Log}N_f = 3.97 - 4.39 \log(\Delta\epsilon)$ $\text{Log}N_f$ 的标准差 = 0.12 $R^2 = 97\%$ , 样本大小 = 17	$R_e = -1.0$ 和 $0.05^{(1)}$ $\text{Log}N_f = 4.04 - 4.60 \log(\Delta\epsilon)$ $\text{Log}N_f$ 的标准差 = 0.217( $1/\Delta\epsilon$ ) $R^2 = 83\%$ , 样本大小 = 12
	$R_e = 0.05$ (32 层) $\text{Log}N_f = 3.05 - 5.6 \log(\Delta\epsilon)$ $\text{Log}N_f$ 的标准差 = 0.15 $R^2 = 87\%$ , 样本大小 = 8	

(1) 汇集了 75°F, 400°F 和 800°F 数据。

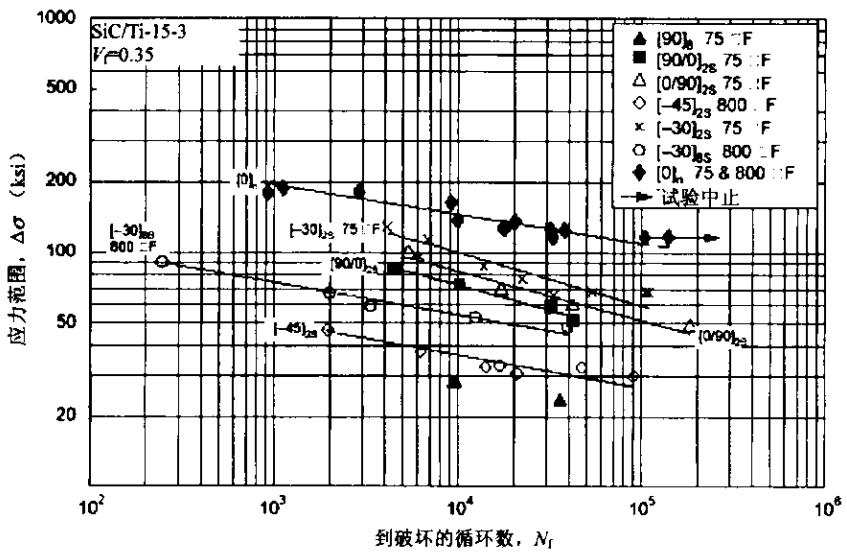


图 3.8.2.1.2(c) 层压板在  $R=0.05$  载荷控制下的疲劳数据

图3.8.2.1.2(c)相关信息

数据来源		
疲 劳	表 C4.1(d)	
静 态 拉伸	表 3.8.2.1(a)-(j), (m), (n)	
批 数	[0] <sub>n</sub> —3 [-30] <sub>S</sub> —1 [-30] <sub>S</sub> —2 [0/90] <sub>S</sub> 和 [90/0] <sub>S</sub> —1 [-45] <sub>S</sub> —1	
层 数	8, 32	
试验参数		
频 率	0.07-0.19	
波 形	三角形	
温 度 (°F)	75, 800	
气 氛	空气	
载荷比 ( $R_\sigma$ )	0.05	
应 力 寿 命 公 式	[90/0] <sub>S</sub> , 75°F	[90/0] <sub>S</sub> , 75°F
	$\text{Log}N_f = 12.8 - 4.71 \log(\Delta\sigma)$	$\text{Log}N_f = 13.2 - 4.79 \log(\Delta\sigma)$
	Log $N_f$ 的标准差 = 0.47(1/ $\Delta\sigma$ )	Log $N_f$ 的标准差 = 0.17
	$R^2 = 98\%$ , 样本大小 = 4	$R^2 = 91\%$ , 样本大小 = 4
	[-45] <sub>S</sub> , 800°F	[-30] <sub>S</sub> , 75°F
	$\text{Log}N_f = 15.2 - 7.16 \log(\Delta\sigma)$	$\text{Log}N_f = 12.8 - 4.43 \log(\Delta\sigma)$
	Log $N_f$ 的标准差 = 5.5(1/ $\Delta\sigma$ )	Log $N_f$ 的标准差 = 0.23
	$R^2 = 86\%$ , 样本大小 = 7	$R^2 = 81\%$ , 样本大小 = 9
	[-30] <sub>S</sub> , 800°F	[0] <sub>n</sub> , 75°F 和 800°F
	$\text{Log}N_f = 16.6 - 7.29 \log(\Delta\sigma)$	$\text{Log}N_f = 21.4 - 8.01 \log(\Delta\sigma)$
	Log $N_f$ 的标准差 = 2.2(1/ $\Delta\sigma$ )	Log $N_f$ 的标准差 = 0.25
	$R^2 = 97\%$ , 样本大小 = 5	$R^2 = 86\%$ , 样本大小 = 13

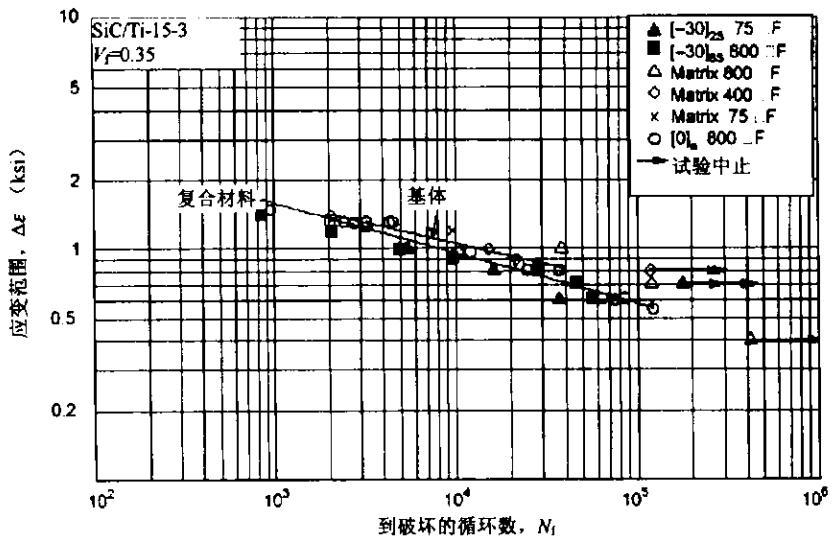


图 3.8.2.1.2(d) 层压板在  $R=1$  应变控制下的疲劳数据

图3.8.2.1.2(d)相关信息

	复合材料	基 体
数据来源		
疲劳	表 C4.1(d)	表 B4.1(b)
静态拉伸	表 3.8.2.1(b), (d), (g), (h)	表 3.3.5.1 (a), (b), (d), (e)
批 数	[0]_s——3 [±30]_{8s}——2	1
层 数	8, 32	
试验参数		
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-3}$	$1 \times 10^{-3}$
波 形	三角形	三角形
温度 (°F)	75, 800	75, 400, 800
气 氛	空气	空气
应变比 ( $R_e$ )	-1.0	-1.0
应变寿命公式	全部层压板 <sup>(1)</sup> $\text{Log}N_f = 3.91 - 4.57 \log(\Delta\epsilon)$ $\text{Log}N_f$ 的标准差 = 0.21 $R^2 = 90\%$ , 样本大小 = 28	基 体 <sup>(2)</sup> $\text{Log}N_f = 4.13 - 5.49 \log(\Delta\epsilon)$ $\text{Log}N_f$ 的标准差 = 0.36( $1/\Delta\epsilon$ ) $R^2 = 49\%$ , 样本大小 = 5

(1) 汇集了全部层压板数据, 温度和厚度

(2) 汇集了 75°F, 400°F 和 800°F 数据

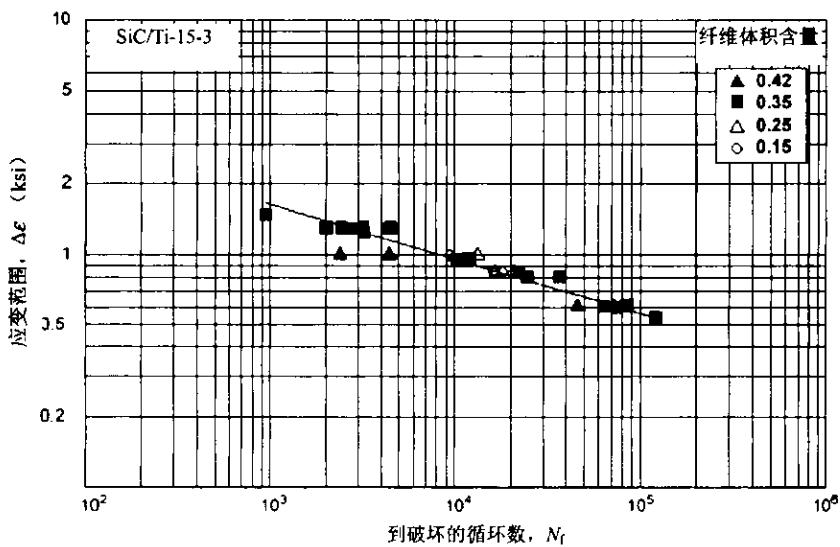


图 3.8.2.1.2(e) 应变控制时[0]<sub>n</sub>板的疲劳数据与纤维体积含量的关系

图3.8.2.1.2(e)的相关信息

数据来源	
疲劳	表 C4.1(d)
静态拉伸	表 3.8.2.1(b), (d)
批 数	6
层 数	8, 32
试验参数	
应变率 (1/s)	$1 \times 10^{-3}$
波 形	三角形
温度 (°F)	800
气 氛	大气
应变比 ( $R_e$ ) *	-1.0
应变寿命公式	
$V_f = 0.15, 0.25, 0.35, 0.42$ 汇集	
$\log N_f = 3.93 - 4.30 \log(\Delta\epsilon)^*$	
$\log N_f$ 的标准差 = 0.17	
$R^2 = 92\%$ , 样本大小 = 28	

\* 译者注：对照图 3.8.2.1.2(e)，原文（分别为载荷比 ( $R_\sigma$ )、应力寿命方程式和  $\log N_f = 3.93 - 4.30 \log (\Delta\sigma)$ ）可能有误，载荷、应力均应该是应变。

### 3.8.2.2 TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维缠绕板<sup>\*</sup>

#### 3.8.2.2.1 TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 拉伸

材料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 平板	SiC/Ti TRIMARC-1/Ti-6-2-4-2 汇 总
纤维:	Trimarc-1, 连续, 128μm	
生产商:	Atlantic Research Corp.	
加工顺序:	线/纤维缠绕工艺	
处理:	热等静压 1749°F, 103 MPa, 2 h	来源: AFRL/MLLM

纤维生产日期	试验日期	94-96
基体生产日期	数据二次提交日期	11/00
复合材料生产日期	分析日期	1/01

单向板性能汇总

温度	73°F			325°F			700°F		
环境	空气			空气			空气		
纤维体积含量 (%)	27	30	32	27 <sup>(1)</sup>	29 <sup>(1)</sup>	30	27 <sup>(1)</sup>	29 <sup>(1)</sup>	30
[0] <sub>10</sub> 1 轴拉伸	SS-S-S-	SS-S--	-SSS--	SS-S-S-	SS-S-S-		SS-S-S-	SS-S-S-	
[0] <sub>8</sub> 1 轴拉伸		SSSS-S-				SS-S-S-			SS-S-S-
[90] <sub>10</sub> 2 轴拉伸		SS-S-S-	SSSS-S-		SS-S-S-			SS-S-SS	
[90] <sub>8</sub> 2 轴拉伸		SSSS-S			SS-S-SS			SS-S-SS	

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度。

(1) 应变率为  $1 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$ .

	名义值	提交值	试验方法
纤维密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.16-3.24		
薄片基体密度 (g/cm <sup>3</sup> )			
复合材料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	4.15 <sup>(1)</sup>		
单层厚度 (in)			

(1) 计算基础为  $V_f$

层压板性能

温 度							
环 境							
纤维体积含量							

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度。

\*原始数据表见附录 C4.2

表3.8.2.2.1(a) SiC/Ti 平板[0]10 1轴拉伸性能<sup>(1)</sup> (筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板			
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.273-0.324	
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0800-0.0951 in			
工作段宽度:	0.3146-0.3890 in	模量计算:	最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.1 节			
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无			
温度 (°F) 环境 纤维体积含量 应变率 (1/s)	73 <sup>(2)</sup> 空气 27.3 $1 \times 10^{-4}$	73 <sup>(2)</sup> 空气 29.2-30.1 $1 \times 10^{-4}$	73 <sup>(2)</sup> 空气 32.4 $8 \times 10^{-4}$	
$F_u^t$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	233 217 251 5.14 (3) 正态 230 11.8		
	试件数量 批 数 数据种类	3 1 筛选	6 2 筛选	
$E_1^t$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	29.2 28.4 30.2 2.17 3 1 筛选	29.0 28.3 29.7 1 6 2 筛选	30.6
$V_{12}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类			0.276 1 1 筛选
$\epsilon_1^t$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	0.800 0.690 0.850 7.57 0.608 正态 0.787 0.060 1 1 筛选	0.787 6 1 筛选	

(1) 所有试件在工作段之外失效。

(2) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(3) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(b) SiC/Ti 平板[0]<sub>10</sub> 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板		
机械加工:	高压水/金刚石磨削	纤维体积含量:	0.273-0.324
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in
工作段厚度:	0.0800-0.0951 in		
工作段宽度:	0.3146-0.3890 in	模型计算:	最小二乘法拟合
试验方法:	1.4.2.1 节		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM
归一化:	无		
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.3	29.2-30.1	32.4
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)		
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		
$F_1^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	174	
	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)		
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		
$F_1^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	试件数量 批 数 数据种类	1	筛选
	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)		
	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		
	试件数量 批 数 数据种类		

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(c) SiC/Ti 平板[0]10 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚石磨削			纤维体积含量:	0.273-0.299	
试件形状:	直边			纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0800-0.0951 in			模量计算:	最小平方拟合	
工作段宽度:	0.3146-0.3890 in			试验方法:	1.4.2.1 节	
试验前曝露:	无			来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无					
温度 (°F)	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.3	29.6-29.7	27.5	29.4	27.2-27.7	29.4-29.9
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>
F <sub>1</sub> <sup>tu</sup> (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	198 166 218	192	212 187 207	203 187 217	215 203 227 3.58 (2) 正态
C <sub>1</sub> C <sub>2</sub>						215 7.68
试件数量	1	2	1	2	4	8
批 数	1	2	1	2	1	2
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选
E <sub>1</sub> <sup>t</sup> (Ms) <sup>t</sup>	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	27.1 27.5 28.0	27.7	28.2 27.6 28.9	28.3 27.3 29.9	29.9 27.6 35.1 8.29
试件数量	1	2	1	2	4	8
批 数	1	2	1	2	1	2
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选
V <sub>12</sub> <sup>t</sup>	平均值 试件数量 批 数 数据种类					
ε <sub>1</sub> <sup>tu</sup> (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	0.720 0.570 0.850	0.710 0.740	0.750	0.737 0.680 0.800	0.740 0.690 0.770 4.41 (2) 正态 0.0383 15.2
C <sub>1</sub> C <sub>2</sub>						
试件数量	1	2	1	1	3	7
批 数	1	2	1	1	1	2
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(d) SiC/Ti 平板[0]10 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚石磨削			纤维体积含量:	0.273-0.299	
试件形状:	直边			纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0800-0.0951 in					
工作段宽度:	0.3146-0.3890 in			模量计算:	最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.1 节					
试验前曝露:	无			来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无					
温度 (°F)	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.3	29.6-29.7	27.5	29.4	27.2-27.7	29.4-29.9
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>
$F_1^{pl}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类					
$F_1^{ly0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类		183	204	172	193
					174	145
					211	87.2
						224
$F_1^{ly0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类		1	1	1	2
			1	1	1	1
			筛选	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(e) SiC/Ti 平板[0]10 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:			0.274-0.293	
试件形状:	直边	纤维间距:			130 根/in	
工作段厚度:	0.0805-0.0905 in					
工作段宽度:	0.3140-0.3870 in	模量计算:			最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.1 节					
试验前曝露:	无	来 源:			AFRL/MLLM	
归一化:	无					
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环境	空气	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.4	29.0-29.3	27.4	28.9-29.2	27.4-27.6	29.0-29.3
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>
$F_1^u$ (ksi)	平均值 B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$	186	198	185	168	192
	最小值		189		142	179
	最大值		207		195	200
	C.V. (%)					5.27
$E_1^t$ (Msi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$					(2) 正态
	试件数量	1	2	1	2	5
	批 数	1	2	1	2	2
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选
$\nu_{12}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类	25.9	27.8	27.1	27.8	28.3
	最小值		27.7		27.5	24.9
	最大值		27.9		28.0	30.7
	C.V. (%)					8.40
$\epsilon_1^u$ (%)	试件数量 批 数 数据种类	1	2	1	2	5
	平均值 B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$					(2) 正态
	最小值					0.706
	最大值					0.620
	C.V. (%)					0.820
	$C_1$					11.7
	$C_2$					0.706
	试件数量	1	2	1	2	5
	批 数	1	2	1	2	2
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能, 因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(f) SiC/Ti 平板[0]10 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚砂磨削			纤维体积含量:	0.274-0.293	
试件形状:	直边			纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0805-0.0905 in			模量计算:	最小二乘法拟合	
工作段宽度:	0.3140-0.3870 in			试验方法:	14.2.1 节	
试验前曝露:	无			来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无					
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.4	29.0-29.3	27.4	28.9-29.2	27.4-27.6	29.0-29.3
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-3</sup>
$F_1^{pl}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类					
$F_1^{t0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	183 175 160 191	174	183 117 194	166 125 186 15.1 (2) 正态 170 25.7 5 2 筛选	170 125 186 15.1 (2) 正态 170 25.7 5 2 筛选
$F_1^{t0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类					

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能, 因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(g) SiC/Ti 平板[0]s 1轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板		
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.305-0.310
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in
工作段厚度:	0.0670-0.0680 in		
工作段宽度:	0.3630-0.3640 in	模量计算:	最小二乘法拟合
试验方法:	1.4.2.1 节		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM
归一化:	无		
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气
纤维体积含量	30.5-30.7	30.5-31.0	30.5-30.7
应变率 (1/s)	8×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
平均值	247	227	196
最小值	239	220	190
最大值	255	230	206
C.V. (%)			
$F_t^u$ (ksi)	B 基准值		
	分布		
	$C_1$		
	$C_2$		
试件数量	2	3	3
批 数	1	1	1
数据种类	筛选	筛选	筛选
平均值	29.7	26.1	25.0
最小值	28.7	25.8	23.3
$E_t^t$ (Msi)	最大值	26.5	26.6
	C.V. (%)		
	试件数量	2	2
	批 数	1	1
	数据种类	筛选	筛选
平均值	0.295		
$V_{12}^t$	试件数量	2	
	批 数	1	
	数据种类	筛选	
平均值	0.865	0.917	0.810
最小值	0.810	0.870	0.730
最大值	0.920	0.960	0.860
C.V. (%)			
$\epsilon_t^u$ (%)	B 基准值		
	分布		
	$C_1$		
	$C_2$		
试件数量	2	3	3
批 数	1	1	1
数据种类	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(b) SiC/Ti 平板[0]\_4轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板			
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.305-0.310	
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0670-0.0680 in			
工作段宽度:	0.3630-0.3640 in	模量计算:	最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.1 节			
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无			
温度 (°F) 环 境 纤维体积含量 应变率 (1/s)	73 <sup>(1)</sup> 空气 30.5-30.7 8×10 <sup>-4</sup>	325 <sup>(1)</sup> 空气 30.5-31.0 8×10 <sup>-4</sup>	700 <sup>(1)</sup> 空气 30.5-30.7 8×10 <sup>-4</sup>	
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类			
$F_1^{\text{ty0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	241 238 245	212 208 215	168
$F_1^{\text{ty0.2}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类		2 1 筛选	1 1 筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(i) SiC/Ti 平板[90]<sub>10</sub>2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板		
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.287-0.322
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in
工作段厚度:	0.0805-0.0905 in		
工作段宽度:	0.3140-0.3870 in	模量计算:	最小二乘法拟合
试验方法:	1.4.2.1 节		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM
归一化:	无		
温度 (°F) 环 境	73 <sup>(1)</sup> 空气	73 <sup>(1)</sup> 空气	
纤维体积含量	28.7-29.5	32.2	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	
$F_2^{\text{tu}}$ 分布 (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 ANOVA $C_1$ $C_2$	51.6 41.6 59.4 12.3 (2) 7.22 5.84	36.4 35.4 37.4
试件数量	9	2	
批 数	3	2	
数据种类	筛选	筛选	
$E_2^t$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	22.5 19.8 24.8 7.19 9 3 筛选	23.2
$V_{23}^t$	平均值 试件数量 批 数 数据种类		0.216 2 2 筛选
$\varepsilon_2^{\text{tu}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	0.540 0.380 0.680 19.6 (2) ANOVA 0.118 5.57 9 3 筛选	0.175 0.150 0.200

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(j) SiC/Ti 平板[90]10 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板		
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.287-0.322
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in
工作段厚度:	0.0805-0.0905 in		
工作段宽度:	0.3140-0.3870 in	模量计算:	最小二乘法拟合
试验方法:	1.4.2.1 节		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM
归一化:	无		
温度 (°F) 环 境	73 <sup>(1)</sup> 空气	73 <sup>(1)</sup> 空气	
纤维体积含量 应变率 (1/s)	28.7-29.5 $1 \times 10^{-4}$	32.2 $8 \times 10^{-4}$	
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		
试件数量 批 数 数据种类			
$F_2^{\text{by0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$	44.7 33.2 50.7 12.1 (2) 正态 44.74 5.394	33.9
试件数量 批 数 数据种类	8 3 筛选	1 1 筛选	
$F_2^{\text{by0.2}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$		
试件数量 批 数 数据种类			

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能, 因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(k) SiC/Ti 平板[90]10 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚砂磨削		纤维体积含量: 0.287-0.301			
试件形状:	直边		纤维间距: 130 根/in			
工作段厚度:	0.0864-0.0905 in					
工作段宽度:	0.3144-0.3171 in		模量计算: 最小二乘法拟合			
试验方法:	1.4.2.1 节					
试验前曝露:	无		来 源: AFRL/MLLM			
归一化:	无					
温度 (°F)	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	28.8-29.6	28.8-29.5	28.7-29.5	28.7-30.1	28.8-30.0	28.9-29.9
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>
F <sub>2</sub> <sup>tu</sup> (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	55.2 53.8 56.7 4.73	58.1 52.3 63.2 正态	60.0 56.5 63.2 60.0	51.6 47.6 57.7 2.84	53.9 47.1 57.5 53.5
E <sub>2</sub> <sup>t</sup> (Msi)	B 基准值 分 布 C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> 试件数量 批 数 数据种类		(2) 正态 60.0 2.84			
V <sub>23</sub> <sup>t</sup>	平均值 试件数量 批 数 数据种类	18.9 1 1 筛选	20.7 20.1 21.6 3	20.5 18.2 22.3 4	19.3 18.2 20.4 2	19.2 16.4 22.1 2
E <sub>2</sub> <sup>tu</sup> (%)	C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	9.20 1 1 筛选	17.6 23.1 3 筛选	19.8 23.1 3 筛选		
V <sub>23</sub> <sup>t</sup>	平均值 试件数量 批 数 数据种类					
E <sub>2</sub> <sup>tu</sup> (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 C <sub>1</sub> C <sub>2</sub> 试件数量 批 数 数据种类	0.880 0.74 1.26 1.26 0.940 0.92 1.00 1.00 1 3 3 筛选	0.97 0.92 1.00 1.00 1.38 1.12 1.64 1.64 2 2 2 筛选	1.38 1.12 1.64 1.64 1.45 1.04 1.86 1.86 2 2 2 筛选	1.45 1.04 1.86 1.86 1.22 1.06 1.48 1.48 3 3 3 筛选	

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能, 因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对正式批准的数据给出 B 基准值。

表3.8.2.2.1(l) SiC/Ti 平板[90]<sub>10</sub> 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板					
机械加工:	高压水/金刚砂磨削			纤维体积含量:	0.287-0.301	
试件形状:	直边			纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0864-0.0905 in			模量计算:	最小二乘法拟合	
工作段宽度:	0.3144-0.3171 in			来 源:	AFRL/MLLM	
试验方法:	1.4.2.1 节			归一化:	无	
温度 (°F) 环 境	325 <sup>(1)</sup> 空气	325 <sup>(1)</sup> 空气	325 <sup>(1)</sup> 空气	700 <sup>(1)</sup> 空气	700 <sup>(1)</sup> 空气	700 <sup>(1)</sup> 空气
纤维体积含量 应变率 (1/s)	28.8-29.6 1×10 <sup>-5</sup>	28.8-29.5 1×10 <sup>-4</sup>	28.7-29.5 1×10 <sup>-3</sup>	28.7-30.1 1×10 <sup>-5</sup>	28.8-30.0 1×10 <sup>-4</sup>	28.9-29.9 1×10 <sup>-3</sup>
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)					
$F_2^{\text{ty}0.02}$ (ksi)	B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类					
	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	35.4 34.5 36.5	35.5 36.7 38.5	37.8 26.2 27.0	26.6 25.0 25.3	25.2 24.6 28.3
	B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类			2.21 (2) 正态 37.8 0.837		
	1 1 筛选	3 3 筛选	4 3 筛选	2 2 筛选	2 2 筛选	3 3 筛选
$F_2^{\text{ty}0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)			59.5 57.8 61.1	48.0 47.3 48.8	46.5 45.6 47.4
	B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类			2 2 筛选	2 2 筛选	3 3 筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

(2) 只对 B 类数据给出基准值。

表3.8.2.2.1(m) SiC/Ti 平板[90]s 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板		
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.303-0.305
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in
工作段厚度:	0.06804-0.0685 in		
工作段宽度:	0.3700-0.3740 in	模量计算:	最小二乘法拟合
试验方法:	1.4.2.1 节		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM
归一化:	无		
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气
纤维体积含量	30.5	30.3-30.5	30.3-30.5
应变率 (1/s)	8×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
平均值	45.7	50.5	44.2
最小值		49.3	41.7
最大值		52.3	45.6
C.V. (%)			
$F_2^u$ (ksi)	B基准值 分布 $C_1$ $C_2$		
试件数量	1	3	3
批 数	1	1	1
数据种类	筛选	筛选	筛选
平均值	22.3	17.2	14.1
最小值		16.5	13.2
最大值		17.8	15.1
$E_2^t$ (Msi)	C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类		
试件数量	1	2	2
批 数	1	1	1
数据种类	筛选	筛选	筛选
平均值	0.223		
$V_{21}^t$	试件数量 批 数 数据种类	1	
试件数量	1		
批 数	1		
数据种类	筛选		
平均值	0.260	0.460	0.547
最小值		0.430	0.490
最大值		0.520	0.620
C.V. (%)			
$\epsilon_2^u$ (%)	B基准值 分布 $C_1$ $C_2$		
试件数量	1	3	3
批 数	1	1	1
数据种类	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(n) SiC/Ti 平板[90]s 2轴拉伸性能(筛选)

材 料:	Trimarc-1/Ti 6-2-4-2 平板			
机械加工:	高压水/金刚砂磨削	纤维体积含量:	0.303-0.305	
试件形状:	直边	纤维间距:	130 根/in	
工作段厚度:	0.0680-0.0685 in			
工作段宽度:	0.3700-0.3740 in	模量计算:	最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.1 节			
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无			
温度 (°F) 环 境 纤维体积含量 应变率 (1/s)	73 <sup>(1)</sup> 空气 30.5 $8 \times 10^{-4}$	325 <sup>(1)</sup> 空气 30.3-30.5 $8 \times 10^{-4}$	700 <sup>(1)</sup> 空气 30.3-30.5 $8 \times 10^{-4}$	
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类			
$F_2^{\text{t}y0.02}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	38.1   1 1 筛选	33.2 33.2 33.3 2 1 筛选	26.4 25.7 27.0 2 1 筛选
$F_2^{\text{t}y0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类		51.9   1 1 筛选	43.5 43.4 43.6 2 1 筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

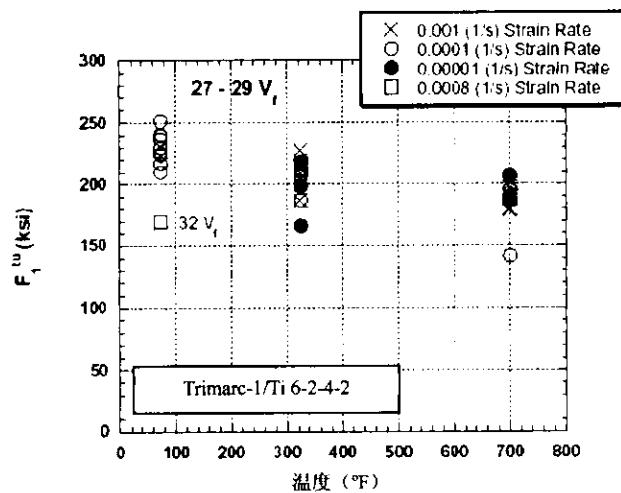


图 3.8.2.2.1(a)  $[0]_{10}$  层压板的极限拉伸强度与温度和应变率的关系

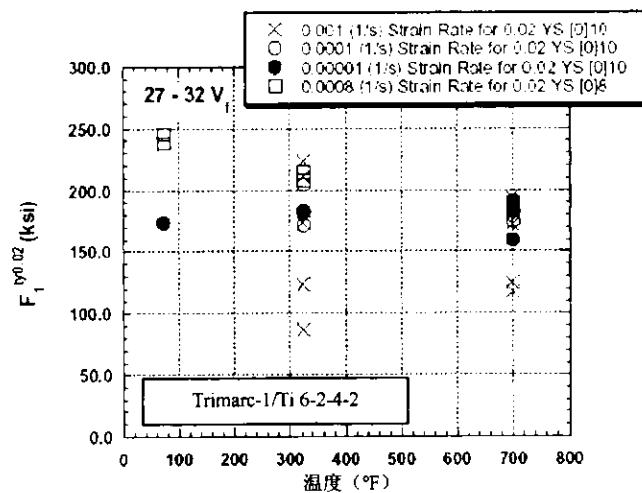


图 3.8.2.2.1(b)  $[0]_{10}$  和  $[0]_8$  层压板纵向拉伸 0.02 屈服强度与温度和应变率的关系

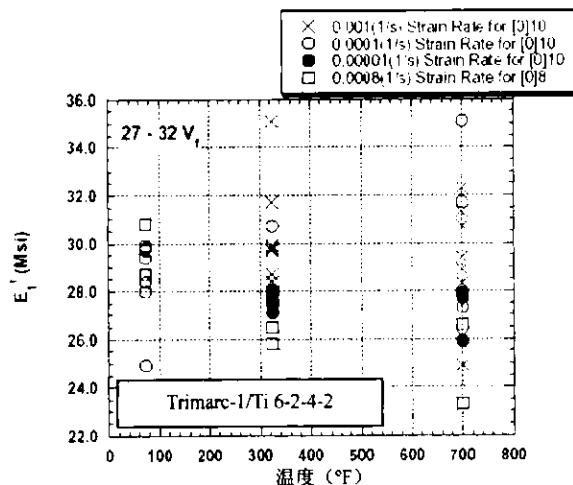


图 3.8.2.2.1(c)  $[0]_{10}$  和  $[0]_8$  层压板拉伸模量与温度和应变率的关系

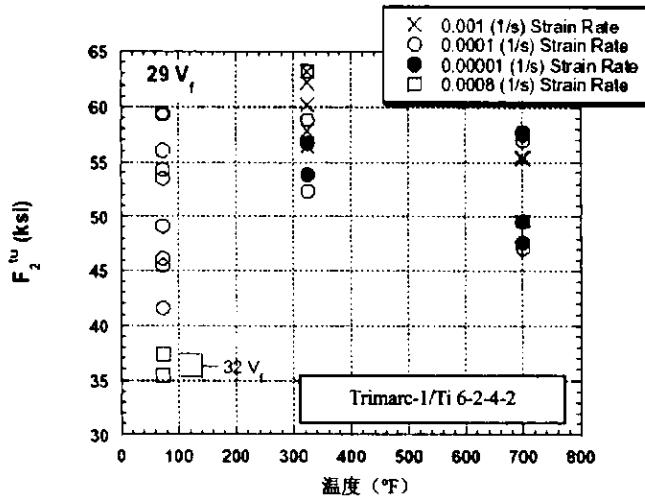


图 3.8.2.2.1(d) [90]<sub>10</sub> 层压板极限横向拉伸强度与温度和应变率的关系

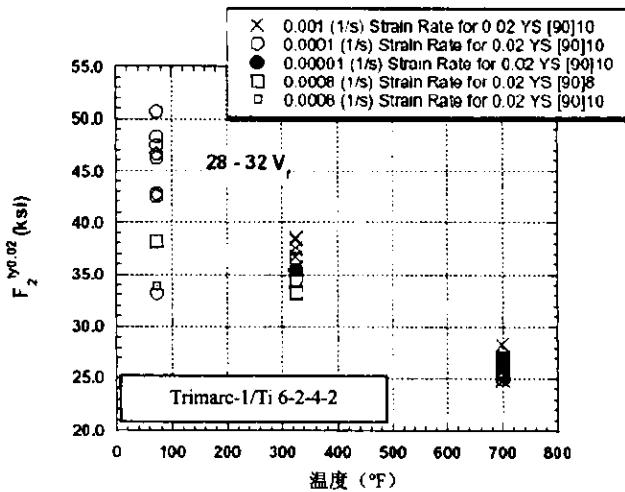


图 3.8.2.2.1(e) [90]<sub>10</sub> 和 [90]<sub>8</sub> 层压板横向拉伸 0.02 屈服强度与温度和应变率的关系

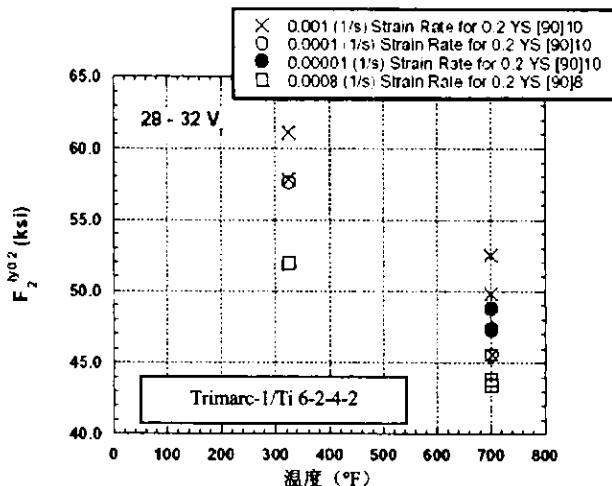


图 3.8.2.2.1(f) [90]<sub>10</sub> 和 [90]<sub>8</sub> 层压板横向拉伸 0.02 屈服强度与温度和应变率的关系

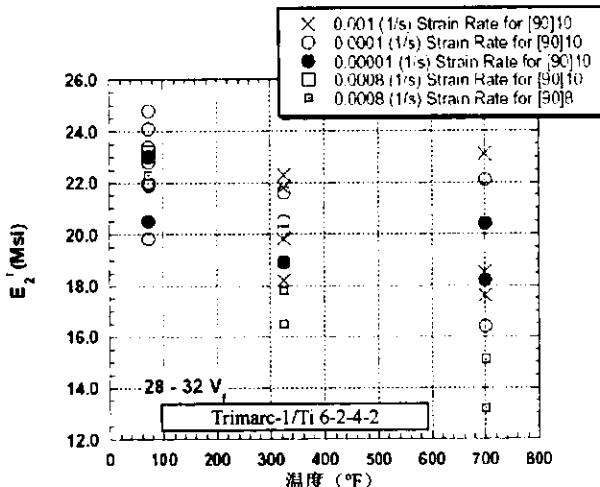


图 3.8.2.2.1(g) [90]<sub>10</sub> 层压板横向拉伸模量与温度和应变率的关系

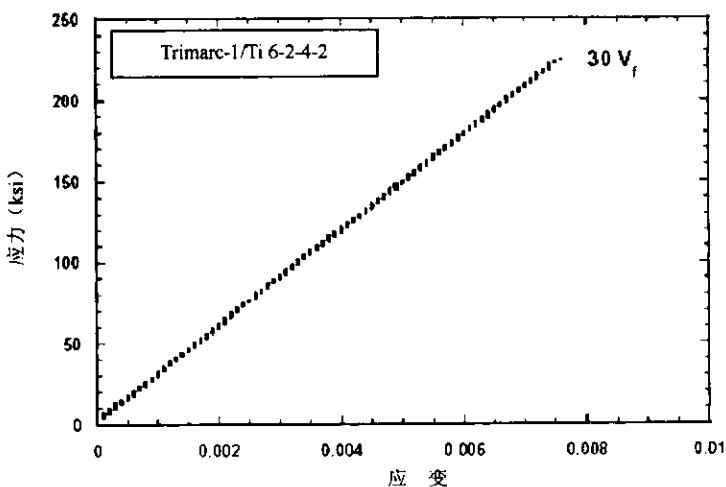


图 3.8.2.2.1(h) 在 73°F,  $1 \times 10^{-5} \text{ s}^{-1}$  的应变率下[0]<sub>10</sub> 层压板典型的拉伸行为

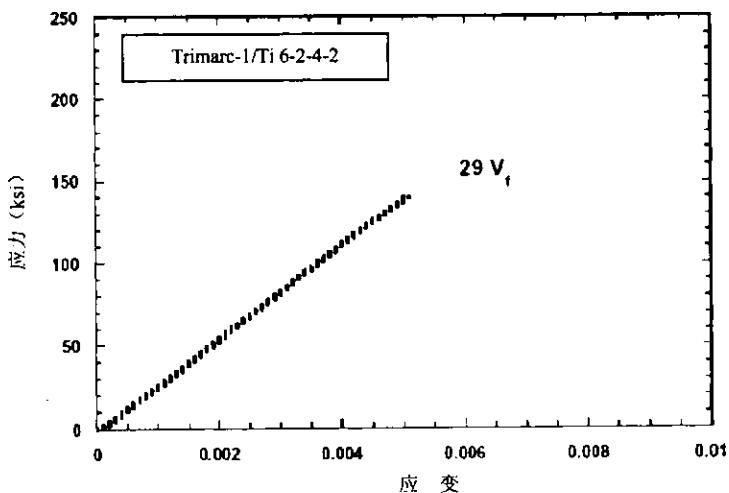


图 3.8.2.2.1(i) 在 700°F,  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的应变率下[0]<sub>10</sub> 层压板典型的拉伸行为

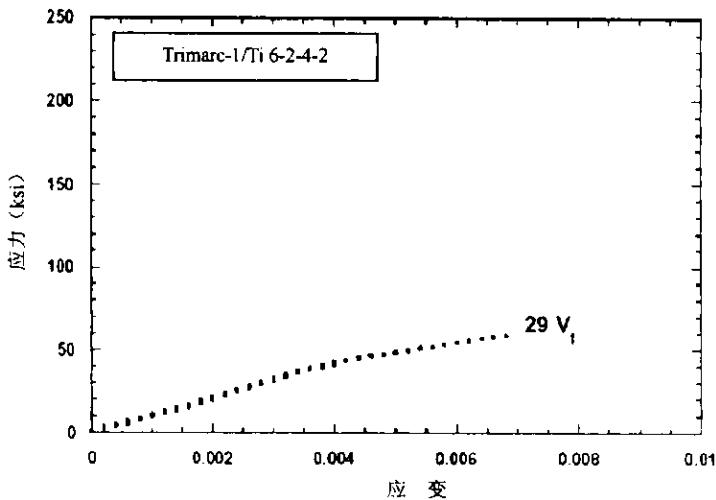


图 3.8.2.2.1(j) 在 75°F,  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的应变率下  $[90]_{10}$  层压板典型的拉伸行为

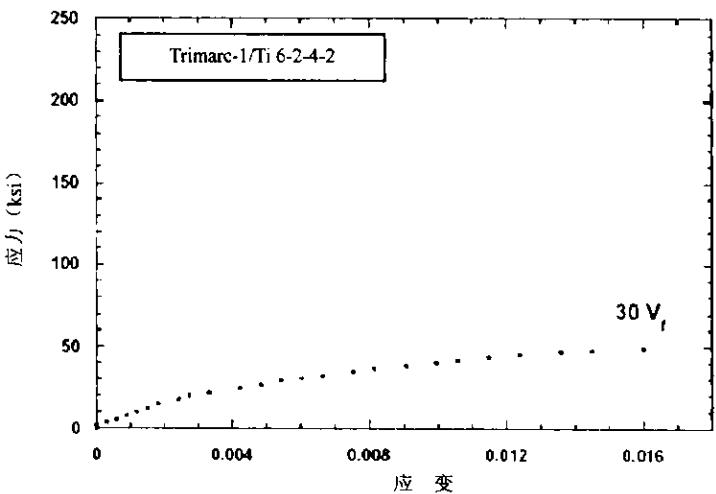


图 3.8.2.2.1(k) 在 325°F (163°C),  $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  的应变率下  $[90]_8$  层压板典型的拉伸行为

### 3.8.2.2.2 TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 压缩\*

材料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维缠绕板	SiC/Ti TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2 汇总
纤维:	Trimarc-1, 连续, 128 μm 基体: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	
制造商:	Atlantic Research Corp.	
工艺顺序:	线/纤维缠绕工艺	
处理:	热等静压 1749°F, 103 MPa, 2 h 来源: AFRL/MLLM	

纤维生产日期		试验日期	94-96
基体生产日期		重新提供数据日期	11/99
复合材料生产日期	94-96	分析日期	2/01

\*原始数据表见附录 C4.2。

### 性能汇总

温 度	73°F			325°F			700°F		
环 境	空气			空气			空气		
纤 维 $V_f$	0.27	0.30	0.32	0.27 <sup>(1)</sup>	0.29 <sup>(1)</sup>	0.30 <sup>(2)</sup>	0.27 <sup>(1)</sup>	0.29 <sup>(1)</sup>	0.30 <sup>(2)</sup>
[0] <sub>10</sub> 1 轴压缩		-S--SS	-S--SS		-S--SS	-S--SS	-S--SS	-S--SS	-S--SS
[90] <sub>10</sub> 2 轴压缩		-S--SS	-S--SS	-S--SS	-S--SS	-S--SS		-S--SS	-S--SS

数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度。

(1) 拉伸的应变速率为  $1 \times 10^{-5}$ ,  $1 \times 10^{-4}$ ,  $1 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$

(2) 压缩测试的纤维体积含量从 0.32-0.33  $V_f$

	名义值	提供值	试验方法
纤维密度 (g/cm <sup>3</sup> )	3.16-3.24		
基体密度 (g/cm <sup>3</sup> )			
复合材料密度 (g/cm <sup>3</sup> )	4.15 <sup>(1)</sup>		
单层厚度 (mm)			

(1) 基于  $V_f$  计算得到。

### 层压板性能汇总


数据种类: F——正式批准, S——依次筛选: 强度/模量/泊松比/破坏应变/比例极限/0.02 屈服强度/0.2 屈服强度。

表3.8.2.2.2(a) [0]10SiC/Ti板 1轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130根/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	
环 境	空气	空气	空气	空气	
纤维体积含量	27.9-29.2	32.4	27.8-29.3	32.8	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	
$F_1^{\text{cu}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				
$E_1^c$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	29.3 28.3 30.9 3.57 5 3 筛选	29.9 28.4 31.5 3.73 3 1 筛选	26.6 25.5 27.9 3.73 6 3 筛选	29.0 27.0 30.3 筛选 3 1 筛选
$V_{12}^c$	平均值 试件数量 批 数 数据种类				
$\varepsilon_1^{\text{cu}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(b) [0]10SiC/Ti板 1轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板			
机械加工:	高压水/金刚砂磨削			
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328	
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130纤维/in (0.008 in/纤维)	
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态	
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM	
归一化:	无			
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	27.9-29.2	32.4	27.8-29.3	32.8
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_t^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)			
$F_1^{\text{cy}0.02}$ (ksi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	196 155 238 5.37 225 正态 335 19.2 1 1 筛选	185 309 352 4 3 筛选 筛选	323 292 355 2 1 筛选
$F_1^{\text{cy}0.2}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	262 251 272 2 2 筛选	329 1 筛选	

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(c) [0]10SiC/Ti板 1轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130根/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	
环 境	空气	空气	空气	空气	
纤维体积含量	29.5	28.3-29.2	28.0	32.8	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	
$F_1^{\text{cu}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				
$E_1^c$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	28.6 28.4 30.2 12.2 1 1 筛选	24.9 20.5 27.5 4 1 1 筛选	26.0 26.8 26.8 1 1 1 筛选	
$V_{12}^c$	平均值 试件数量 批 数 数据种类				
$\varepsilon_1^{\text{cu}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(d) [0]10SiC/Ti板 1轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.324		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130纤维/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	
环 境	空气	空气	空气	空 气	
纤维体积含量	29.5	28.2-29.2	28.0	32.8	
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	
$F_1^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)				
$F_1^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$				
试件数量					
批 数					
数据种类					
$F_1^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	247	235	266	152
$F_1^{\text{cy0.2}}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$				
试件数量	1	4	1	1	
批 数	1	3	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	
$F_1^{\text{cy0.2}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	351	283		286
$F_1^{\text{cy0.2}}$ (ksi)	B 基准值 分布 $C_1$ $C_2$				
试件数量	1	1	1	1	
批 数	1	1	1	1	
数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选	

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(e) [90]<sub>10</sub>SiC/Ti板 2轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/fiber wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130纤维/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	28.4-29.8	32.4	27.3	28.9-30.0	32.4
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_2^{\text{cu}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				
$E_2^{\text{c}}$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	23.3 22.7 24.0 2.09 6 3 筛选	22.2 21.8 22.4 1.56 3 1 筛选	19.7 19.5 19.9 1.95 1 1 筛选	20.5 20.1 20.9 3.35 3 2 筛选
$V_{23}^{\text{c}}$	平均值 试件数量 批 数 数据种类				
$\varepsilon_2^{\text{cu}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类				

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能, 因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(f) [90]<sub>10</sub>SiC/Ti板 2轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130纤维/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MILLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	73 <sup>(1)</sup>	73 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>	325 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	28.4-29.8	32.4	27.3	28.9-30.0	32.4
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)				
	B 基准值 分 布				
	$C_1$				
	$C_2$				
	试件数量				
	批 数				
	数据种类				
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	142 133 154 5.31	313 120 137	107 107 108	111 108 115
	B 基准值 分 布	119 正态			
	$C_1$	141.8			
	$C_2$	7.527			
	试件数量	6	3	2	3
	批 数	3	1	1	2
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选
$F_2^{\text{cy0.2}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	196 194 198 .835	195 193 196	147 146 148	152 151 153
	B 基准值 分 布	191 正态			
	$C_1$	196			
	$C_2$	1.64			
	试件数量	6	3	2	3
	批 数	3	1	1	2
	数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.2(g) [90]<sub>10</sub>SiC/Ti板 2轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:	0.273-0.328		
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:	130纤维/in (0.008 in/纤维)		
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:	最小二乘法拟合		
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:	接收时状态		
试验前曝露:	无	来 源:	AFRL/MLLM		
归一化:	无				
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	28.1	28.1	28.9-30.0	29.8	32.4-32.8
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_2^{\text{cu}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$				
$E_2^c$ (Msi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) 试件数量 批 数 数据种类	21.5	21.3	20.9 18.8 22.9	21.3 19.8 19.2 20.4
$V_{23}^c$	平均值 试件数量 批 数 数据种类	1	1	3 1 3	1 2 1 筛选
$\varepsilon_2^{\text{cu}}$ (%)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%) B基准值 分 布 $C_1$ $C_2$				

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

表3.8.2.2.1(h) [90]<sub>10</sub>SiC/Ti板 2轴压缩性能(筛选)

材 料:	TRIMARC-1/Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo 线/纤维 wound 面板				
机械加工:	高压水/金刚砂磨削				
试件几何形状:	直边	纤维体积含量:		0.273-0.324	
工作段厚度:	0.0799-0.0913 in	纤维间距:		130纤维/in (0.008 in/纤维)	
工作段宽度:	0.6063-0.6259 in	模量计算:		最小二乘法拟合	
试验方法:	1.4.2.2节	表面状态:		接收时状态	
试验前曝露:	无	来 源:		AFRL/MLLM	
归一化:	无				
温度 (°F)	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>	700 <sup>(1)</sup>
环 境	空气	空气	空气	空气	空气
纤维体积含量	28.1	28.1	28.9-30.0	29.8	32.4-32.8
应变率 (1/s)	1×10 <sup>-5</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-4</sup>	1×10 <sup>-3</sup>	8×10 <sup>-4</sup>
$F_2^{\text{pl}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)				
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	87.8	86.7	90.1 85.7 96.5	92.2 89.6 87.8 91.3
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	1	1	3 3 3	1 2 1
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	筛选	筛选	筛选	筛选
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	平均值 最小值 最大值 C.V. (%)	111	114	116 115 118	123 117 117
$F_2^{\text{cy0.02}}$ (ksi)	B 基准值 分 布 $C_1$ $C_2$ 试件数量 批 数 数据种类	1	1	3 3 3	1 2 1
		筛选	筛选	筛选	筛选

(1) 所有的值不能用于计算未出现的性能，因为测试的应力-应变曲线到失效时是线性的。

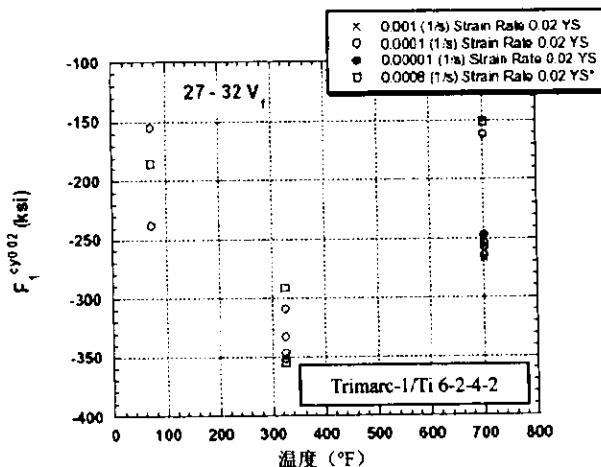


图 3.8.2.2(a)  $[0]_{10}$  层压板的纵向压缩 0.02 屈服强度与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

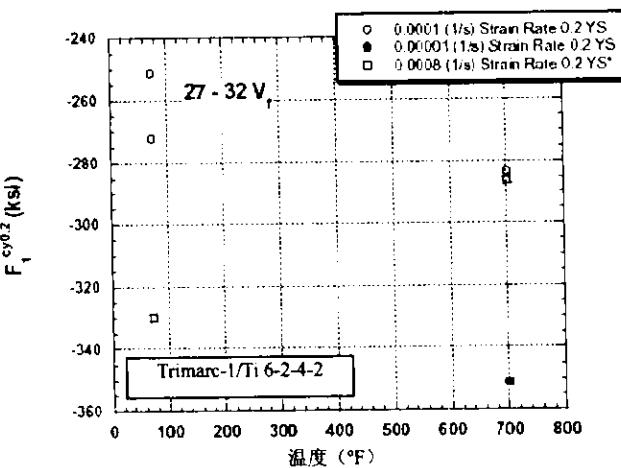


图 3.8.2.2(b)  $[0]_{10}$  层压板的纵向压缩 0.2 屈服强度与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

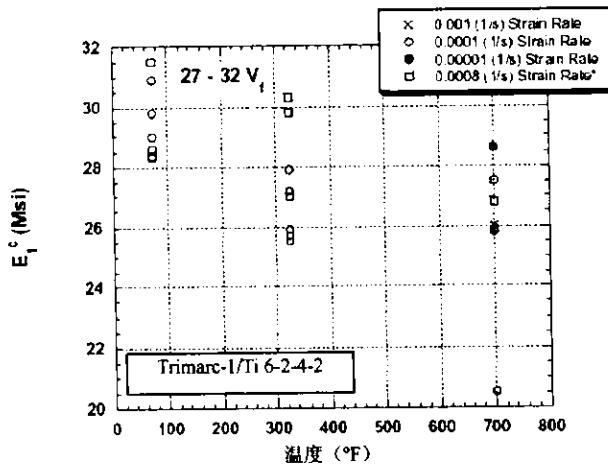


图 3.8.2.2(c)  $[0]_{10}$  层压板的压缩模量与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

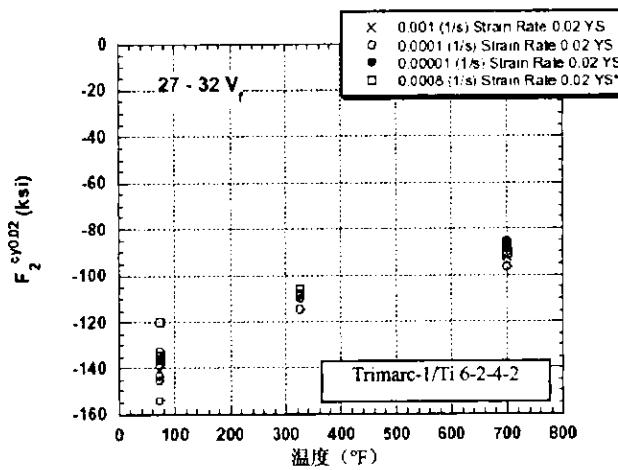


图 3.8.2.2(d)  $[0]_{10}$  层压板的横向压缩 0.02 屈服强度与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

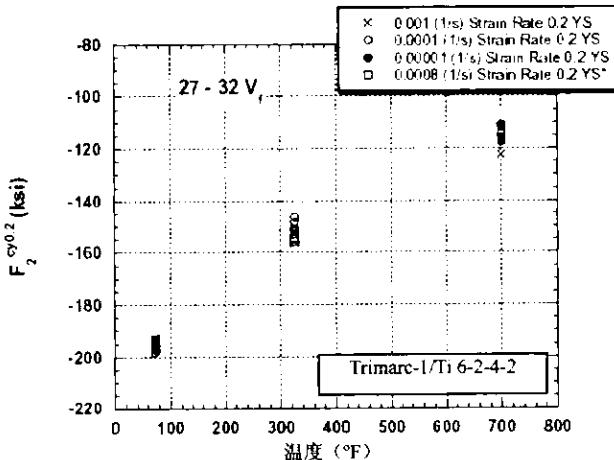


图 3.8.2.2(e)  $[90]_{10}$  层压板的横向压缩 0.2 屈服强度与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

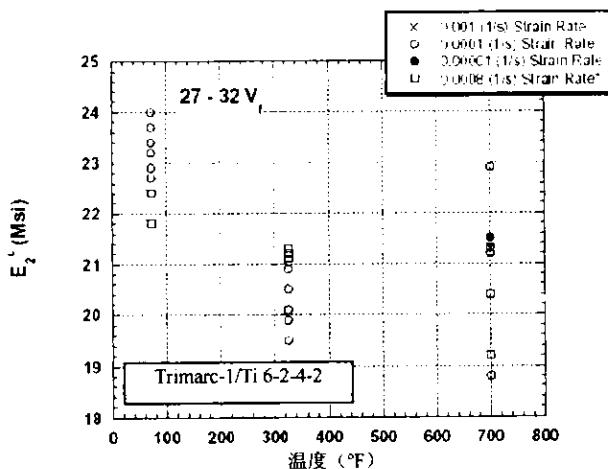


图 3.8.2.2(f)  $[90]_{10}$  层压板的压缩模量与温度和应变率的关系  
对应于应变率为  $0.0008\text{s}^{-1}$  的  $V_f=32-33$ 。

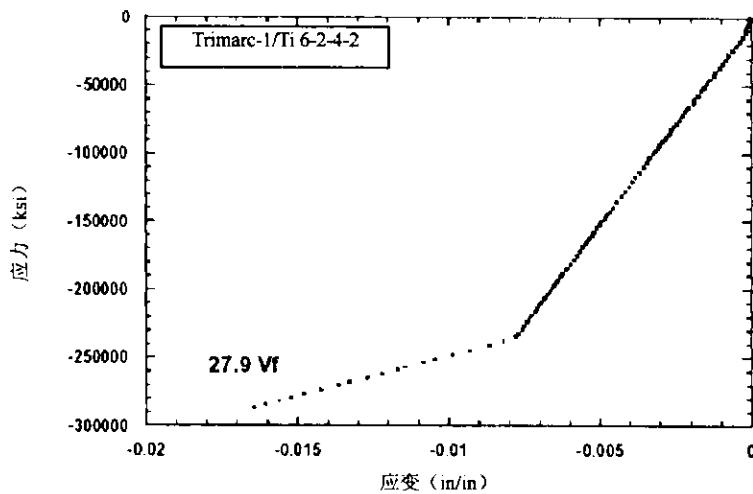


图 3.8.2.2(g) 在 73°F 应变率为  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时  $[0]_{10}$  层压板典型的压缩曲线

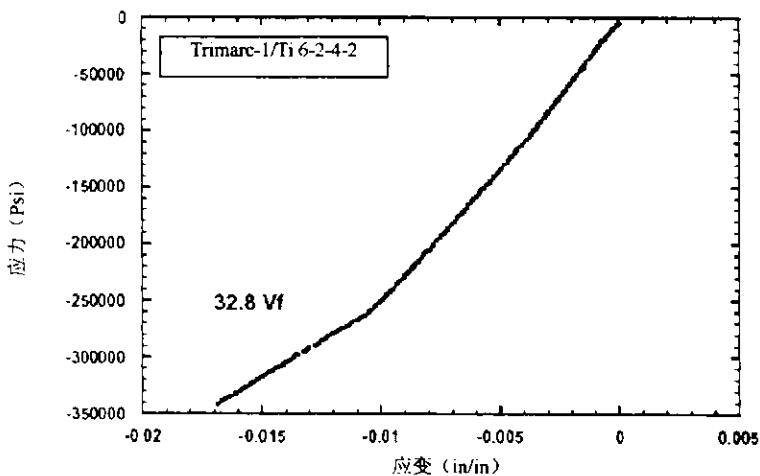


图 3.8.2.2(h) 在 700°F 应变率为  $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时  $[0]_{10}$  层压板典型的压缩曲线

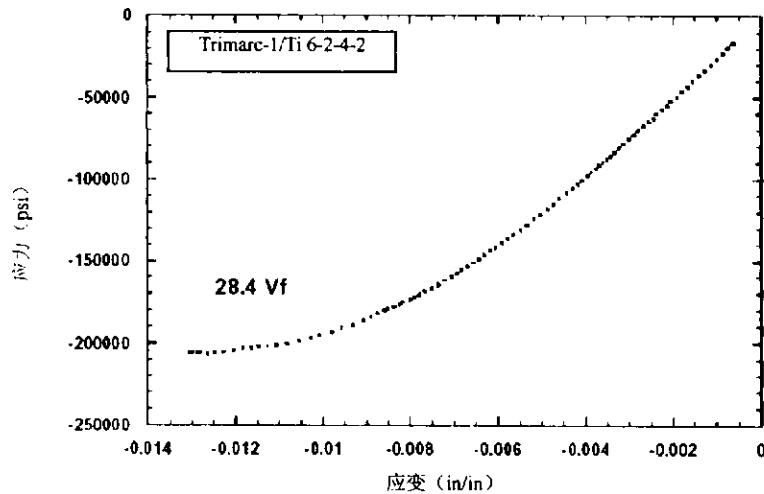


图 3.8.2.2(i) 在 73°F 应变率为  $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时  $[90]_{10}$  层压板典型的压缩曲线

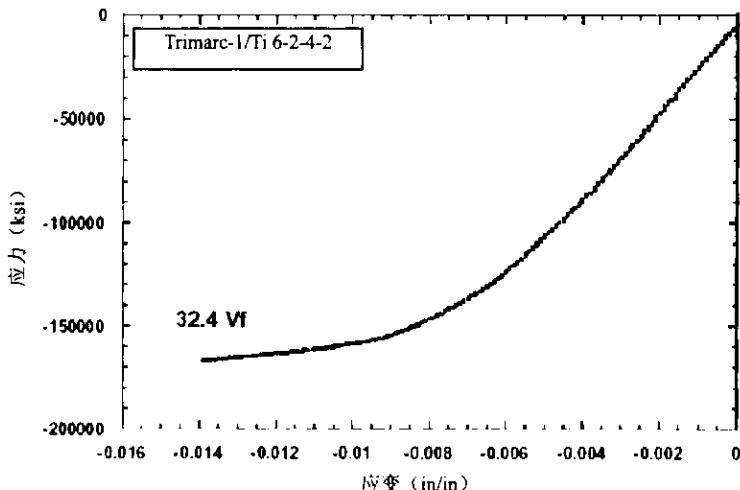


图 3.8.2.2(j) 在  $325^{\circ}\text{F}$  应变率为  $8 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$  时  $[90]_{10}$  层压板典型的压缩曲线

### 3.8.3 铝/钛

此节留待以后补充。

### 3.8.4 其他/钛

此节留待以后补充。

## 3.9 其他基体复合材料

此节留待以后补充。

### 参考文献

3.1.3.3 in Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures in, MIL-HDBK-5G, Change Notice I, 1995, pp. 9-98 ~9-107.

## 附录 A 典型挤出试验数据

### A1 纤维挤出

表A1(a) SCS-6/Ti-24-11脱粘载荷与试件厚度 (1.4.2.13.1节)

试件厚度 (mm)	脱粘载荷 (N)
0.149	4.56
0.211	6.06
0.312	15.6
0.322	14.3
0.343	15.8
0.382	19.6
0.414	18.8
0.452	21.8
0.483	26.8
0.534	31.8
0.569	45.3

表A1(b) 不同冲头直径对应的典型破坏载荷 (1.4.2.13.1节)

冲头直径 (mm)	失效载荷 (N)
25	2
50	5
75	20
100	40
115	50-55
127	60-70

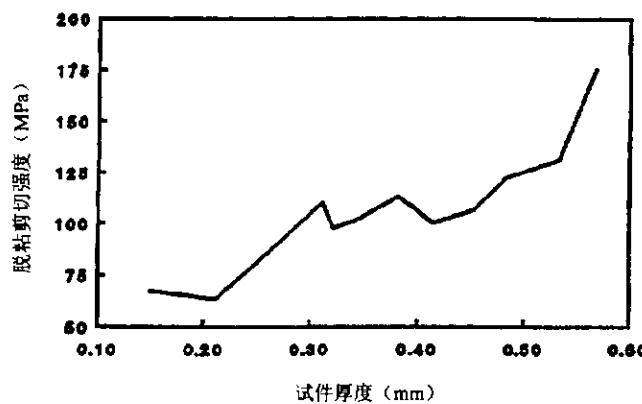
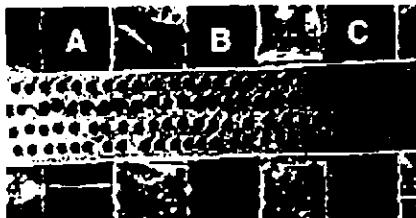
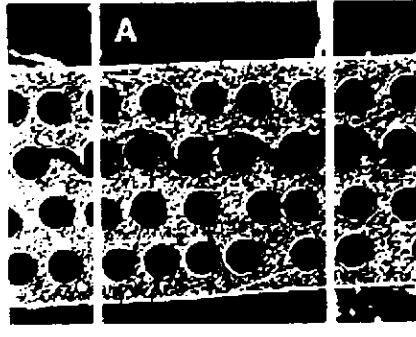
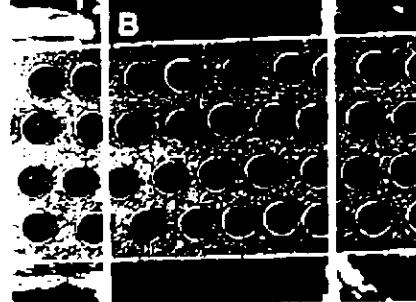


图 A1(a) SCS-6/Ti-24-11 试件厚度对脱粘强度的影响 (1.4.2.13.1 节)

挤出试验数据表			
试样号:			
材料:			
试件厚度:			
说明:			
纤维数量	脱粘载荷	摩擦载荷	A.E.

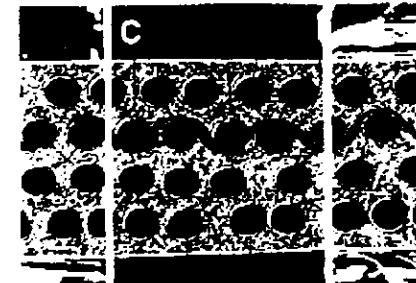




图 A1(b) 挤出试验数据表 (1.4.2.13.14 节)

## 附录 B 基体材料的原始数据表格

### 怎样读原始数据表

原始数据中任意一行都由试件数量来组织。每个列包括该试件的具体试验数据。由于每个试件的试验数据种类数目很多，20 或者更多，所给的一组试件所有的数据分列在两个表格中。每个表格相互对应试件编号，连续出现。但是如果试件数相对很少时，两个表格可以同时出现在一页中。否则，需要两页或者更多的页码来记录所给试件的原始数据。

每一个原始数据表格的右上角都有一个小表。该表用于简要描述每个条目。

(1) 表 B4.1(a) (共 2 页 第 1 页)

(2) Ti-15-3

(3) 拉伸

(4) [1]

(5) NASA

(6) 原始数据

① 该行包括三个项目。第一项表号，按表格目录中给出。第二项是字母标识符，表示表格中的子节，通常子节根据试验类型来组织。最后一项显示页码和子节的总页码。

② 材料名称

③ 试验种类，即拉伸、压缩、疲劳。

④ 如果有的话为试件铺层方向和层数。

⑤ 数据来源。

⑥ 数据类型，原始数据或者归一化的数据。

### B1 铝

此节留待以后补充。

### B2 铜

此节留待以后补充。

### B3 镁

此节留待以后补充。

### B4 钛

#### B4.1 Ti 15V 3Cr3Al-3Sn (3.3.5.1 节)

(1) 模型由比例极限前最小二乘法分析确定。

表B4.1(a) Ti 15V 3Cr 3Al-3Sn (3.3.5.1节) (原始数据)

试件编号 (板)	批次号	试验温度 (°F)	应变率 (1/S)	$E^{(1)}$ (GPa)	$F^{\text{pl}}$ (ksi)	$F^{\text{tens2}}$ (ksi)	$F^{\text{u}}$ (ksi)	$\varepsilon^{\text{u}}$ (%)	RA (%)	产品形式		试验环境 $\nu^{\text{m}}$
										Ti-15-3 拉伸	NASA-GRC 原始数据	
T36	B934021	800	$1 \times 10^{-4}$	10.8	20	29	43	-	>3	-	HIP板	空气
T42	B934021	800	$1 \times 10^{-4}$	11.3	59	73	84	-	>3.8	-	HIP板	空气
T33	B934021	800	$1 \times 10^{-4}$	17	5.2	40	-	-	>1	-	HIP板	空气
T27	B934021	900	$1 \times 10^{-4}$	10.9	50	65	75	-	>8	-	HIP板	空气
T45	B934021	600	$1 \times 10^{-4}$	11.4	69	78	87	-	>8	-	HIP板	空气
T40	B934021	400	$1 \times 10^{-4}$	12.6	65	84	96	-	>8	-	HIP板	空气
T37	B934021	75	$1 \times 10^{-4}$	13	94	108	117	-	>8	-	HIP板	空气
7_1	B934027	1000	$1 \times 10^{-4}$	10.5	23	33	42	43	>8	-	HIP板	空气
7_22	B934027	900	$1 \times 10^{-4}$	10.7	57	65	74	75	>8	-	HIP板	空气
7_15	B934027	1000	$1 \times 10^{-4}$	5.3	6	6	8	24	>8	-	HIP板	空气
7_ex	B934027	400	$1 \times 10^{-4}$	12	80	85	96	-	>8	-	HIP板	空气
7_6	B934027	400	$1 \times 10^{-3}$	12.3	81	87	95	-	>8	-	HIP板	空气
7_18	B934027	1000	$1 \times 10^{-3}$	11	50	60	67	67	>8	-	HIP板	空气
B8	B934027	800	$1 \times 10^{-3}$	10.8	56	69	83	-	>4	-	HIP板	空气
V700-1	87H?	75	$1 \times 10^{-3}$	13	111	117	124	127	20.2	-	HIP箔	空气
16211_B	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	12.4	-	-	114	124	20.7	37.8	HIP板	5ksi氮气
16210_A	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	11.9	-	-	110	120	20.3	40.3	HIP板	5ksi氮气
16215_F	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	12.1	-	-	112	122	22.1	39.5	HIP板	5ksi氮气
16212_C	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	12	-	-	116	125	16.8	22	HIP板	5ksi氮气
16213_D	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	12.5	-	-	114	125	17.2	27.1	HIP板	5ksi氮气
16214_E	B934027	75	$8.3 \times 10^{-3}$	12.3	-	-	114	124	17.5	27.6	HIP板	5ksi氮气

表B4.1(a) (共2页 第1页)

材料: Ti-15-3

纯基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn  
热处理: 1292° F/24h (真空)

试验方法: 1.9.2.1 节

表B4.1(a) (完)

试件编号	机加方法	试件形状	试件尺寸	表面状态	试验日期	失效部位		失效模式
						Ti-15-3	NASA-GRC 原始数据	
T36	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	5/2/96	中止	-	-
T42	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	5/3/96	中止	-	-
T33	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	5/6/96	-	-	-
T27	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	11/13/96	中止	-	-
T45	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	11/14/96	中止	-	-
T40	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	11/14/96	中止	-	-
T37	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	11/14/96	中止	-	-
7_1	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	2/6/97	中止	-	-
7_22	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	2/6/97	中止	-	-
7_15	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	3/22/97	中止	-	-
7_ex	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	3/23/97	中止	-	-
7_6	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	4/11/97	中止	-	-
7_18	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	4/11/97	中止	-	-
B8	切削和磨削	狗骨形	0.25 in 直径×5 in 工作段	磨削	7/31/97	中止	-	-
V700-1	切削和磨削	狗骨形	0.125 in 直径×0.815 in 工作段	磨削	3/5/88	工作段	韧性断裂	-
16211_B	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/2/97	工作段	韧性断裂	-
16210_A	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/2/97	工作段	韧性断裂	-
16215_F	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/3/97	工作段	韧性断裂	-
16212_C	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/3/97	工作段	韧性断裂	-
16213_D	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/3/97	工作段	韧性断裂	-
16214_E	切削和磨削	狗骨形	0.188 in 直径×0.75 in 工作段	磨削	7/3/97	工作段	韧性断裂	-

表B4.1(b)

表B4.1(b) (共2页 第1页)											
表B4.1(b) (共2页 第2页)											
材料:	Ti-15-3	试验方法: 1.9.2.4 节疲劳									
基体:	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	波形: 三角形									
产品形式:	压阻的滑片层板	试验前曝露: 1292°F 24 h									
产品尺寸:	10 in×14 in×0.44 in	试验环境: 空气									
铺层形式:	层	试件几何形状: 圆柱狗骨形									
层数:	机械加工: 切削和磨削	表面状态: 光滑									
试件尺寸:	5 in×0.406 in 直径	试件尺寸: 5 in×0.406 in 直径									
在 N/2 时											
试件 编号	纤维体 积含量 (板)	批次号	试验温度 (°F)	n=1 时 E (Ms)	E (Ms)	总应变率 (1/s)	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	频率 (Hz)		
T1	B934021	800	11.8	-	0.001	0.500	-0.500	68550	-64264	0.05	4956
T2	B934021	800	11.7	13.6	0.001	0.300	-0.300	43621	-37808	0.08	22237
T3	B934021	800	11.6	-	0.001	0.221	-0.219	37147	-22211	0.11	30191
T4	B934021	800	11.9	-	0.001	0.200	-0.200	-	-	0.13	>419714
T5	B934021	800	12.2	14.0	0.001	0.350	-0.350	52235	-45754	0.07	>119325
T7	B934021	800	11.9	13.6	0.001	0.500	-0.500	-	-	0.05	38026
T6	B934021	800	11.9	12.5	0.001	1.500	0.075	91351	-86628	0.04	1435
T8	B934021	800	11.5	12.7	0.001	1.200	0.060	71774	-73228	0.04	6260
T10	B934021	400	12.6	12.6	0.001	0.500	-0.500	60967	-65459	0.05	15100
T11	B934021	400	12.1	12.3	0.001	0.450	-0.450	53763	-57064	0.06	21500
T13	B934021	400	12.1	12.1	0.001	0.700	-0.700	81689	-85372	0.04	2050
T14	B934021	400	11.6	12.5	0.001	0.400	-0.400	48483	-50925	0.06	>118058
T15	B934021	400	12.0	12.0	0.001	2.000	0.100	96811	-93243	0.03	668
T16	B934021	400	12.1	12.0	0.001	1.200	0.060	88213	-47048	0.04	4011
T17	B934021	75	13.1	13.1	0.001	0.600	-0.600	76888	-79348	0.04	9643
T18	B934021	75	13.3	13.2	0.001	1.200	0.060	117951	-30213	0.04	4447
T19	B934021	75	13.2	13.2	0.001	1.050	0.053	118764	-10543	0.05	7772

表B4.1(b) (完)

试件编号	控制模式	R	工作段尺寸			试验日期	失效部位	备注	试件维数	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
T1	应变	-1	0.5	0.406	-	5/7/94	工作段	-	-	-
T2	应变	-1	0.5	0.406	-	5/25/94	在拉/压工作段	提前失效	-	-
T3	应变	-1	0.5	0.406	-	5/31/94	在拉/压工作段	提前失效	-	-
T4	应变	-1	0.5	0.406	-	6/8/94	无效	-	-	-
T5	应变	-1	0.5	0.406	-	7/1/94	无效	-	-	-
T7	应变	-1	0.5	0.406	-	8/30/94	圆弧短	-	-	-
T6	应变	0.05	0.5	0.406	-	8/16/94	工作段	-	-	-
T8	应变	0.05	0.5	0.406	-	9/9/94	半径	-	-	-
T10	应变	-1	0.5	0.406	-	5/10/95	工作段	-	-	-
T11	应变	-1	0.5	0.406	-	5/16/95	工作段	-	-	-
T13	应变	-1	0.5	0.406	-	5/23/95	工作段	-	-	-
T14	应变	-1	0.5	0.406	-	6/14/95	无效	-	-	-
T15	应变	0.05	0.5	0.406	-	5/25/95	工作段	-	-	-
T16	应变	0.05	0.5	0.406	-	5/30/95	工作段	-	-	-
T17	应变	-1	0.5	0.406	-	7/17/95	工作段	-	-	-
T18	应变	0.05	0.5	0.406	-	7/20/95	工作段	-	-	-
T19	应变	0.05	0.5	0.406	-	7/24/95	工作段	-	-	-

表 B4.1(b) (共 2 页 第 2 页)  
 Ti-15-3  
 波形： 三角形  
 试验前曝露： 1292°F 24 h.  
 试验环境： 空气  
 试件几何形状： 圆柱狗骨形  
 表面状态： 磨削  
 试件尺寸：  $5 \sin 0.406$  in 直径  
 NASA GRC  
 原始数据

## 附录 C 金属基复合材料的原始数据表格

### 怎样读原始数据表

原始数据中任意一行都由试件数量来组织。每个列包括该试件的具体试验数据。由于每个试件的试验数据种类数目很多，20 或者更多，所给的一组试件所有的数据分列在两个表格中。每个表格相互对应试件编号，连续出现。但是如果试件数相对很少时，两个表格可以同时出现在一页中。否则，需要两页或者更多的页码来记录所给试件的原始数据。

每一个原始数据表格的右上角都有一个小表。该表用于简要描述每个条目。

(1) 表 B4.1(a) (共 2 页 第 1 页)

(2) Ti-15-3

(3) 拉伸

(4) [0]<sub>1</sub>

(5) NASA

(6) 原始数据

(1) 该行包括三个项目。第一项表号，按表格目录中给出。第二项是字母标识符，表示表格中的子节，通常子节根据试验类型来组织。最后一项显示页码和子节的总页码。

(2) 材料名称

(3) 试验种类，即拉伸、压缩、疲劳。

(4) 如果有的话为试件铺层方向和层数。

(5) 数据来源。

(6) 数据类型，原始数据或者归一化的数据。

### C1 铝

#### C1.1 Nextel 610/SP Al (3.5.2.1 节)

### C2 铜

此节留待以后补充。

### C3 镁

此节留待以后补充。

### C4 钛

#### C4.1 SiC/Ti-15-3 (3.8.2.1.1 和 3.8.2.1.2 节)

#### C4.2 TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2 (3.8.2.2.1 和 3.8.2.2.2 节)

表C1.1(a)

表C1.1(a) (总6页第1页) NEXTEL 610/SP Al								表C1.1(a) (总6页第1页) NEXTEL 610/SP Al			
试件编号	纤维体积 含量 (板)	批次号	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	比例极限 $F_1^{y0.02}$ (ksi)	$F_1^u$ (ksi)	$\epsilon_1^t$ (%)	$V_{12}^t$	备注	
551/4-L1	65.0	551	73	0.0100	36.8			266.8	0.790		
551/4-L2	65	551	73	0.0100	37.9			272.5	0.780		
551/4-L3	65.0	551	73	0.0100	38.1			268.7	0.760		
551/4-L4	65.0	551	73	0.0100	37.1			272.8	0.790		
551/4-L5	65.0	551	73	0.0100	38.1			271.7	0.770		
551/4-L6	65.0	551	73	0.0100	37.2			270.9	0.780		
551/4-L7	65.0	551	73	0.0100	36.4			260.3	0.760		
599/3-L2	65.0	599	73	0.0100	39.8			283.8			
599/3-L3	65.0	599	73	0.0100	39.3			267.6	0.740		
599/3-L4	65.0	599	73	0.0100	39.2			281.7	0.780		
599/3-L5	65.0	599	73	0.0100	38.3			282.3	0.780		
599/3-L6	65.0	599	73	0.0100	39.5			277.1	0.720		
600/4-L1	65.0	600	73	0.0100	34.8			243.5	0.760		
600/4-L3	65.0	600	73	0.0100	39.2			270.8	0.730		
600/4-L4	65.0	600	73	0.0100	38.4			271.6			
600/4-L5	65.0	600	73	0.0100	37.9			268.1	0.760		

表C1.1(a) (续)

试件 编号	试验 日期	失效部位	失效 模式	面积	延伸 率	0.2%偏移 时的载荷	极限 载荷	宽度	厚度	初始工作 段长度	最终工作 段长度	最终 宽度	最终 厚度	最终 面积
<b>表 C1.1(a) (总 6 页第 2 页)</b>														
材 料: NEXTEL 610/SPA1														
纤 维: NEXTEL 610														
基 体: 99.99% Al														
产 品 形 式: 平 板														
铺层形式: 0°														
试验方法: MMC-TM-401														
试验环境: 试验室空气														
551/4-L1	4/13/95	T.工作段		0.0200			5337							
551/4-L2	4/13/95	加强片处		0.0201			5458							
551/4-L3	4/13/95	工作段		0.0202			5425							
551/4-L4	4/13/95	加强片处		0.0202			5519							
551/4-L5	4/13/95	加强片处		0.0203			5501							
551/4-L6	4/13/95	加强片处		0.0202			5481							
551/4-L7	4/13/95	工作段		0.0201			5238							
599/3-L2	6/1/95	加强片处		0.0191			5431							
599/3-L3	6/1/95	加强片处		0.0194			5184							
599/3-L4	6/1/95	工作段		0.0197			5546							
599/3-L5	6/1/95	工作段		0.0196			5546							
599/3-L6	6/1/95	工作段		0.0195			5398							
600/4-L1	6/1/95	工作段		0.0203			4948							
600/4-L3	6/1/95	工作段		0.0203			5321							
600/4-L4	6/1/95	工作段		0.0203			5508							
600/4-L5	6/1/95	工作段		0.0202			5404							

NEXTEL 610/SPA1

拉伸

0°

3M

原始数据

表C1.1(a) (续)

表 C1.1(a) (总 6 页第 3 页)						
NEXTEL 610/SP Al						
材 料:	NEXTEL 610	筛选数据:				
纤 维:	99.99%Al	试件几何形状: 直边				
基 体:	99.99%Al	表面状态: 接受状态				
产品形式:	平板	机械加工: 金刚砂切割轮				
铺层形式:	0°	试验前曝露: 无				
试验方法:	MMC-TM-401	试验环境: 试验室空气				
试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	比例极限 (ksi)
600/4-L6	65.0	600	73	0.0100	39.4	267.7
600/4-L7	65	600	73	0.0100	37.5	252.8
602/4-L1	65	602	73	0.0100	37.2	253.5
602/4-L2	65	602	73	0.0100	38.8	240.2
602/4-L3	65	602	73	0.0100	39.0	269.6
602/4-L4	65	602	73	0.0100	36.9	263.7
602/4-L5	65	602	73	0.0100	37.0	267.5
602/4-L6	65	602	73	0.0100	38.2	261.6
602/4-L7	65	602	73	0.0100	36.6	247.5
883A/3-L1	65	883A	73	0.0150		251.8
883A/3-L2	65	883A	73	0.0150		271.7
883A/3-L3	65	883A	73	0.0150		266.2
883A/3-L4	65	883A	73	0.0150		284.8
883A/3-L5	65	883A	73	0.0150		258.3

拉伸  
0°  
3M  
原始数据

表C1.1(a) (续)

筛选数据:														
试件几何形状: 直边 表面状态: 接受状态 机械加工: 金刚砂切割轮 试验前曝露: 无 试验环境: 试验室空气														
试件编号	试验日期	失效部位	失效模式	面积减少	延伸率	0.2%偏移时的载荷	极限载荷	宽度	厚度	初始工作段长度	最终工作段长度	最终宽度	最终厚度	最终面积
										段长度	段长度	段宽度	段厚度	段面积
600/4-L6	6/1/95	工作段			0.0204	5371				1.5000				
600/4-L7	6/1/95	工作段			0.0204	5454				1.5000				
602/4-L1	6/1/95	工作段			0.0204	5337				1.5000				
602/4-L2	6/1/95	工作段			0.0204	5040				1.5000				
602/4-L3	6/20/96	工作段				5571	0.3753	0.0590	1.5000					
602/4-L4	6/20/96	加强片处				6072	0.3772	0.0593	1.5000					
602/4-L5	6/20/96	工作段				5810	0.3752	0.0588	1.5000					
602/4-L6	6/20/96	工作段				6244	0.3758	0.0584	1.5000					
602/4-L7	6/20/96	工作段				5682	0.3751	0.0587	1.5000					
883A/3-L1	6/1/95	加强片处			0.0198	5310				1.5000				
883A/3-L2	6/1/95	工作段			0.0198	5002				1.5000				
883A/3-L3	6/1/95	加强片处			0.0203	5146				1.5000				
883A/3-L4	6/1/95	加强片处			0.0203	4885				1.5000				
883A/3-L5	6/1/95	工作段			0.0204	5501				1.5000				

表 C1.1(a) (总 6 页第 4 页)  
NEXTEL 610/SP Al  
拉伸  
0°  
3M  
原始数据

表C1.1(a) (续)

筛选数据:									
表 C1.1(a) (总 6 页第 5 页)									
材 料:	NEXTEL 610/SP Al								
纤 维:	NEXTEL 610								
基 体:	99.99% Al								
产 品 形 式:	平板								
铺层形式:	0°								
试验方法:	MMC-TM-401								
试件编 号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变速率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	比例极限 (ksi)	$F_{100.02}$ (ksi)	$F_1^u$ (ksi)	$\varepsilon_1^u$ (%)
883B/3-L2	65.0	883B	73	0.0150			255.3	0.660	
883B/3-L3	65	883B	73	0.0150			274.5	0.700	
883B/3-L4	65	883B	73	0.0150			279.6	0.710	
883B/3-L5	65	883B	73	0.0150			281.4	0.690	
883B/3-L6	65	883B	73	0.0150			270.2	0.690	
601/1-L3	65	601	73	0.0150	39.5		266.1	0.720	0.270 测量泊松比
601/2-L3	65	601	73	0.0150	38.7		252.5	0.690	0.270 测量泊松比
602/1-L3	65	602	73	0.0150	39.2		256.3	0.700	0.310 测量泊松比

表C1.1(a) (完)

筛选数据:								表C1.1(a) (总 6 页第 6 页)						
试件几何形状: 直边 表面状态: 接受状态 机械加工: 金刚砂切割轮 试验前曝露: 无 试验环境: 试验室空气								NEXTEL 610/SP Al 拉伸 0° 3M 原始数据						
试件编号	测试日期	失效部位	失效模式	面积减少	延伸率	面积	0.2%偏移时的载荷	极限载荷	厚度	初始工作段长度	最终工作段长度	最终宽度	厚度	最终面积
883B/1-L2	6/20/96	工作段					6021	0.3747	0.0593	1.5000				
883B/1-L3	6/20/96	加强筋处					5643	0.3769	0.0596	1.5000				
883B/1-L4	6/20/96	工作段					5837	0.3762	0.0585	1.5000				
883B/1-L5	6/20/96	工作段					5637	0.3753	0.0589	1.5000				
883B/1-L6	6/20/96	工作段					6063	0.3757	0.0588	1.5000				
601/1-L3	6/20/96	工作段					6218	0.3750	0.0593	1.5000				
601/2-L3	6/20/96	工作段					6177	0.3752	0.0585	1.5000				
602/1-L3	6/20/96	工作段					5969	0.3757	0.0588	1.5000				

表C1.1(b)

表 C1.1(b) (总 4 页第 1 页) NEXTEL 610/SP Al 拉伸 90° 3M 原始数据									
试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	比例极限 (ksi)	$F_1^{y0.2}$ (ksi)	$F_1^u$ (ksi)	$\epsilon_{\text{eff}}^t$ (%)
448/3-T1	65.0	448	73	0.010				25.8	3.01
448/3-T2		448	73	0.010	17.06			27.5	4.16
448/3-T3		448	73	0.010	16.72			28.2	
558/3-T4		558	73	0.010				23.7	
558/3-T5		558	73	0.010				24.2	
601/3-T1		601	73	0.010	17.56			26.3	0.78
601/3-T2		601	73	0.010	19.32			25.1	0.78
601/3-T3		601	73	0.010	19.42			25.2	0.73
601/3-T7		601	73	0.010	16.74			22.6	1.27
601/3-T8		601	73	0.010	16.85			22.8	1.25
601/3-T9		601	73	0.010	18.47			22.4	1.13
883A/2-T1		883	73	0.010				26.4	1.12
883A/2-T2		883	73	0.010				27.4	1.08
883A/2-T3		883	73	0.010				23.6	0.83
883A/2-T4		883	73	0.010				26.9	0.91

表C1.1(b) (续)

材料: NEXTEL 610/SP A1 纤维: NEXTEL 610 基体: 99.99% Al 产品形式: 平板 铺层形式: 90° 试验方法: MMC-TM-401		筛选数据: 试件几何形状: 直边 表面状态: 接受状态 机械加工: 金刚砂切割轮 试验前曝露: 无 试验环境: 试验室空气回路		表 C1.1(b) (总 4 页第 1 页) NEXTEL 610/SP A1 拉伸 90° 3M 原始数据	
试件编号	试验日期	失效模式	面积减少	延伸率	面积
448/3-T1	1/18/95	工作段		0.08%	0.086
448/3-T2	1/18/95	工作段		0.08%	0.089
448/3-T3	1/18/95	工作段		0.07%	0.097
558/3-T4	4/18/95	工作段		0.05%	0.11
558/3-T5	4/18/95	工作段		0.05%	0.12
601/3-T1	6/16/95	工作段		0.02%	0.03
601/3-T2	6/16/95	工作段		0.02%	0.022
601/3-T3	6/16/95	工作段		0.02%	0.01
601/3-T7	6/16/95	工作段		0.02%	0.06
601/3-T8	6/16/95	工作段		0.02%	0.07
601/3-T9	6/16/95	工作段		0.02%	0.09
883A/2-T1	6/20/96	工作段			527
883A/2-T2	6/20/96	工作段			497
883A/2-T3	6/20/96	工作段			532
883A/2-T4	6/20/96	工作段			554

表C1.1(b) (续)

筛选数据: 试件几何形状: 直边 表面状态: 接受状态 机械加工: 金刚砂切割轮 试验前曝露: 无 试验环境: 试验室空氣										表 C1.1(b) (总 4 页第 3 页) NEXTEL 610/SP AI 拉伸 90° 3M 原始数据			
试件编 号	纤维体积 含量	批次号	(板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E'_1$ (Ms)	比例极限 (ksi)	$F'_1$ $\sigma_{y0.2}$ (ksi)	$F'_1$ $\sigma_u$ (ksi)	$\epsilon'_1$ (%)	$V'_{12}$	备注	
883A/2-T5	65.0	883A	73	0.010						24.7	0.77		
883A/2-T6		883A	73	0.010						23.8	0.75		
883A/2-T7		883A	73	0.010						25.2	0.80		
883A/2-T8		883A	73	0.010						26.4	0.81		
883A/2-T9		883A	73	0.010						24.2	0.72		
883A/2-T10		883A	73	0.010						24.3	0.75		
883A/2-T11		883A	73	0.010						29.7	1.01		
883A/2-T12		883A	73	0.010						27.7	0.92		
883A/2-T13		883A	73	0.010						29.1	0.96		
883A/2-T14		883A	73	0.010						27.9	0.91		
883B/2-T1		883B	73	0.010						28.0	1.21		
883B/2-T2		883B	73	0.010						27.2	1.18		
883B/2-T3		883B	73	0.010						27.1	1.26		
883B/2-T4		883B	73	0.010						25.1	1.00		
883B/2-T5		883B	73	0.010						24.6	1.02		
883B/2-T6		883B	73	0.010						23.8	0.75		
883B/2-T7		883B	73	0.010						27.1	1.44		
883B/2-T8		883B	73	0.010						26.3	1.13		
883B/2-T9		883B	73	0.010						25.6	1.13		
883B/2-T10		883B	73	0.010						25.5	1.01		
883B/2-T11		883B	73	0.010						26.5	1.18		
883B/2-T12		883B	73	0.010						27.3	1.22		
883B/2-T13		883B	73	0.010						27.6	1.20		
883B/2-T14		883B	73	0.010						27.9	1.33		

表C1.1(b) (完)

试件编号	试验日期	失效部位	面积减少模式	延伸率	0.2%偏移时的载荷	极限载荷	宽度	厚度	初始工作段长度	最终工作段长度	最终宽度	最终厚度	原始数据	
													表 C1.1(b) (总 4 页第 4 页)	NEXTEL 610/SP Al
883A/2-T5	6/21/96	工作段				582	0.37570	0.05890	0.5000					
883A/2-T6	6/21/96	工作段				567			0.5000					
883A/2-T7	6/20/96	工作段				554	0.37550	0.05625	0.5000					
883A/2-T8	6/20/96	工作段				514			0.5000					
883A/2-T9	6/20/96	工作段				508			0.5000					
883A/2-T10	6/20/96	工作段				615			0.5000					
883A/2-T11	6/20/96	工作段				575			0.5000					
883A/2-T12	6/20/96	工作段				603			0.5000					
883A/2-T13	6/20/96	工作段				579			0.5000					
883A/2-T14	6/20/96	工作段				514			0.5000					
883B/2-T1	6/20/96	工作段				508			0.5000					
883B/2-T2	6/20/96	工作段				615			0.5000					
883B/2-T3	6/20/96	工作段				575			0.5000					
883B/2-T4	6/20/96	工作段				603			0.5000					
883B/2-T5	6/20/96	工作段				579			0.5000					
883B/2-T6	6/21/96	工作段				599	0.37570	0.05890	0.5000					
883B/2-T7	6/21/96	工作段				563			0.5000					
883B/2-T8	6/21/96	工作段				593			0.5000					
883B/2-T9	6/21/96	工作段				604			0.5000					
883B/2-T10	6/21/96	工作段				610			0.5000					
883B/2-T11	6/21/96	工作段				618			0.5000					
883B/2-T12	6/21/96	工作段				508			0.5000					
883B/2-T13														
883B/2-T14														

表C4.1(a)

试件编 号	纤维体 积 含量 (板)	批次号	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	$F_1^{pl}$ (ksi)	$F_1^{t90.02}$ (ksi)	$F_1^w$ (ksi)	$\varepsilon_1^t$ (%)	$V_{12}^t$	原始数据	
											SiC/Ti-15-3 拉伸 [0]s NASA-GRC	
L1_15	15	F914005	75	$1 \times 10^{-4}$	20	123	141	172	185	1.21	-	钼-织物
15_1	15	F914007	800	$1 \times 10^{-3}$	19	-	116	-	138	0.86	0.39	钼-织物
15-2	15	F914007	800	$1 \times 10^{-3}$	19	-	115	-	136	0.75	0.37	钼-织物
25-1	25	B934026	800	$1 \times 10^{-3}$	24	-	164	-	197	0.88	0.32	Ti-Nb 织物
25-2	25	B934026	800	$1 \times 10^{-3}$	24	-	151	-	192	0.91	0.31	Ti-Nb 织物
29	35	87H153	800	$1 \times 10^{-4}$	32	17	42	-	200	0.77	-	钼-织物
30	35	87H153	800	$1 \times 10^{-3}$	26	31	147	-	201	0.89	-	钼-织物
4	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	25	121	160	-	196	0.84	-	钼-织物 (1)
2	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	26	133	168	-	168	0.66	-	钼-织物 (1)
5	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	37	142	140	-	194	0.67	-	钼-织物
6	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	28	33	82	-	194	0.85	-	钼-织物
7	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	26	83	83	-	206	1	-	钼-织物
8	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	26	127	157	-	204	0.89	-	钼-织物
9	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	28	112	160	-	217	0.88	-	钼-织物
33	35	87H153	800	$1 \times 10^{-5}$	29	24	90	-	198	0.82	-	钼-织物
27	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	25	141	169	-	208	0.96	0.28	钼-织物
53	35	D890054	75	$1 \times 10^{-4}$	29	150	186	-	211	0.77	-	钼-织物
5_36	35	J890505	800	$1 \times 10^{-3}$	27	151	185	-	209	0.84	-	钼-织物 (2)
35-8	35	B934025	800	$1 \times 10^{-3}$	29	-	187	-	252	1	-	Ti-Nb 织物
35-10	35	B934025	800	$1 \times 10^{-3}$	26	-	182	-	243	1.06	-	Ti-Nb 织物
L1-45	41	D910518	75	$1 \times 10^{-4}$	31	151	160	-	201	0.73	-	钼-织物
L4	41	D910518	75	$1 \times 10^{-4}$	31	128	192	-	252	0.9	-	钼-织物
42-1	41	D910518	800	$1 \times 10^{-3}$	30	-	212	-	245	0.84	0.31	钼-织物
42-2	41	D910518	800	$1 \times 10^{-3}$	32	-	187	-	251	0.83	0.28	钼-织物

(1) 直边试件。 (2) 32 层材料。

表C4.1(a) (完)

试件编号	机械加工	试件几何形状	试件尺寸	表面状态	试验日期	失效部位	失效模式
L1_15	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.12 <sup>in</sup>	加工状态	9/25/92	圆弧段	-
15_1	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.12 <sup>in</sup>	加工状态	10/2/96	工作段外	-
15-2	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.10 <sup>in</sup>	加工状态	10/2/96	工作段中间	-
25_1	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.10 <sup>in</sup>	加工状态	10/2/96	工作段中间	-
25_2	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.10 <sup>in</sup>	加工状态	8/21/89	工作段	-
29	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	8/21/89	工作段	-
30	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	8/9/88	工作段中间	-
4	EDM	矩形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/29/88	工作段中间	-
2	EDM	矩形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/29/88	夹头处	-
5	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	11/16/88	圆弧段	-
6	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	7/8/88	圆弧段	-
7	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	8/22/88	圆弧段	-
8	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/30/88	工作段	-
9	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	7/7/88	工作段中间	-
33	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	8/21/89	工作段	-
27	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	10/17/89	工作段	-
53	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	9/10/90	圆弧段	-
5_36	EDM+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.3 <sup>in</sup>	加工状态	5/23/95	圆弧段	-
35-8	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	5/21/96	圆弧段	-
35-10	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	7/2/96	圆弧段	-
L1-45	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.06 <sup>in</sup>	加工状态	9/25/92	工作段外	-
L4	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.06 <sup>in</sup>	加工状态	10/14/92	工作段中间	-
42-1	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.06 <sup>in</sup>	加工状态	10/2/96	圆弧段	-
42-2	高压水+金刚砂磨削	狗骨形	0.5×6.0×0.06 <sup>in</sup>	加工状态	10/2/96	工作段	-

表 C4.1(a) (总 2 页第 2 页)

SiC/Ti-15-3

拉伸

[0],

NASA-GRC

原始数据

表C4.1(b)

表 C4.1(b) (总 2 页第 1 页)									
SiC/Ti-15-3									
SIC/Ti-15-3 拉伸 [90]s NASA-GRC 原始数据									
试件编号	纤维体积含量	批次号	试验温度(°F)	应变率(1/s)	$E_2^t$ (ksi)	$F_2^p$ (ksi)	$F_2^{p0.02}$ (ksi)	$F_2^u$ (ksi)	$\varepsilon_2^t$ (%)
T2_15	15	F914005	75	$1 \times 10^{-4}$	17	42	44	75	96
41	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	19	17	38	49	59
42	35	87H153	75	$1 \times 10^{-4}$	17	15	40	50	62
43	35	87H153	800	$1 \times 10^{-4}$	17	16	25	34	42
44	35	87H153	800	$1 \times 10^{-4}$	17	15	22	30	41
T1_45	41	D910518	75	$1 \times 10^{-4}$	18	-	-	23	0.12
T2_45	41	D910518	75	$1 \times 10^{-4}$	18	-	-	33	0.19

(1) 在弹性范围内断裂。

表C4.1(b) (完)

表 C4.1(b) (总 2 页第 2 页)					
材料:	SiC/Ti-15-3	机械加工	试件几何形状	试件尺寸	表面状态
纤维:	SCS-6	试验方法: 见 1.4.2.1 拉伸			
基体:	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	试验前暴露: 1292°F/24h (真空)			
产品形式:	箭纤维 织 纹 织 纹 织 纹	试验环境: 试验室空气			
铺层形式:	单向	几何尺寸: 10in×14in			
铺层数:	8 层				
试件编号	机械加工	试件几何形状	试件尺寸	表面状态	试验日期
T2_15	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.12 <sup>"</sup>	加工状态	9/25/92
41	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>"</sup>	加工状态	10/19/89
42	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>"</sup>	加工状态	10/27/89
43	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>"</sup>	加工状态	8/22/89
44	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.08 <sup>"</sup>	加工状态	8/22/89
T1_45	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.06 <sup>"</sup>	加工状态	9/25/92
T2_45	EDM	狗骨形	0.5×5.5×0.06 <sup>"</sup>	加工状态	9/25/92

SiC/Ti-15-3  
拉伸  
[90]<sub>s</sub>  
NASA-GRC  
原始数据

表C4.1(c)

材料: SIC/Ti-15-3 纤维: SCS-6 基体: Ti-5V-3Cr-3Al-3Sn 产品形式: 箔/纤维箔 铺层形式: 正交层压板 铺层数: 8 层		表 C4.1(c) (总 2 页第 1 页) SIC/Ti-15-3 拉伸 层压板 NASA-GRC 原始数据										
试件 编号	纤维体 积含量 (板)	批次号	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_x^t$ (GPa)	$F_x^{pl}$ (ksi)	$F_x^{0.02}$ (ksi)	$F_x^u$ (ksi)	$\epsilon_x^{tf}$ (%)	$V_x^t$	备注	
H3	+/-30	D890053	75	$1 \times 10^{-4}$	23	44	60	105	-	-	针织物 (1)	
H16	+/-30	D890053	75	$1 \times 10^{-4}$	23	48	60	108	179	1.66	-	
26	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	24	58	74	114	148	1.14	-	
25	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	21	62	73	114	145	1.11	-	
24	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	22	67	75	112	144	>1.5	-	
23	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	24	48	71	115	145	0.99	-	
22	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	20	65	97	146	147	1.04	-	
19	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	22	61	79	121	153	1.2	-	
18	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	21	33	26	95	133	1.44	-	
12	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	22	59	64	91	146	1.32	-	
11	+/-30	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	22	63	81	113	140	1.26	-	
9_23	+/-30	J890509	800	$1 \times 10^{-3}$	20	40	50	86	134	1.52	-	
A11	+/-45	87H148	75	$1 \times 10^{-4}$	17	30	40	52	77	>4.0	-	
A6	+/-45	87H148	800	$1 \times 10^{-4}$	13	21	35	47	68	7.29	-	
A13	+/-45	87H148	800	$1 \times 10^{-4}$	17	28	30	29	64	>4.6	-	
F1	+/-60	87H149	75	$1 \times 10^{-4}$	17	36	41	50	57	1.8	-	
F4	+/-60	87H149	800	$1 \times 10^{-4}$	14	26	28	35	48	2.95	-	
B2	0/90	87H150	75	$1 \times 10^{-4}$	21	23	37	115	143	1	-	
B4	0/90	87H150	75	$1 \times 10^{-4}$	23	47	72	136	149	1.08	-	
C5	90/0	87H150	75	$1 \times 10^{-4}$	15	40	80	135	145	1.21	0.15	
C4	90/0	87H150	75	$1 \times 10^{-4}$	25	23	46	118	154	1.07	0.21	

(1) 夹头处打滑 (2) 试验中途(3) 屈服点处应力不连续 (4) 32 层材料

表C4.1(c) (完)

试件编号	机械加工	试件几何形状	试件尺寸	表面状态	试验日期	失效模式		
						原始数据	NASA-GRC	层压板
H3	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	9/6/90	-	-	-
H16	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	9/7/90	工作段	-	-
26	EDM	矩形	0.75×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/13/89	工作段	-	-
25	EDM	矩形	0.75×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/13/89	工作段	-	-
24	EDM	矩形	1.0×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	6/13/89	工作段中间	-	-
23	EDM	矩形	1.0×6.0×0.07 <sup>in</sup>	加工状态	6/13/89	工作段	-	-
22	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	12/1/88	工作段	-	-
19	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	12/1/88	圆弧段	-	-
18	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	7/13/88	圆弧段	-	-
12	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	8/9/88	夹头处	-	-
11	EDM	狗骨形	0.5×4.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	11/15/88	工作段	-	-
9_23	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.3 <sup>in</sup>	加工状态	11/24/92	工作段中间	-	-
A11	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	1/24/90	-	-	-
A6	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	3/3/89	圆弧段	-	-
A13	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	2/1/90	-	-	-
F1	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	1/24/90	工作段	-	-
F4	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	2/1/90	圆弧段	-	-
B2	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	6/7/89	工作段	-	-
B4	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	4/4/89	工作段	-	-
C5	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	10/27/89	工作段	-	-
C4	EDM	狗骨形	0.5×6.0×0.08 <sup>in</sup>	加工状态	10/19/89	工作段	-	-

材料: SiC/Ti-15-3

纤维: SCS-6

试验方法: 见 1.4.2.1 拉伸

试验前曝露: 1292°F/24h (真空)

试验环境: 空气

产品形式: 筏/纤维/筋

铺层形式: 正交层压板

铺层数: 8 层

表 C4.1(c) (总 2 页第 2 页)

SiC/Ti-15-3

拉伸

层压板

NASA-GRC

原始数据

表C4.1(d)

表 C4.1(d) (总 8 页第 1 页) SIC/Ti-15-3										
试验方法: 1.4.2.4 节 疲劳 试验前螺露: 1 292°F, 24h, 真空 试验环境: 空气 波形: 三角形 试件几何形状: 拱骨形 表面状态: 磨削态										
试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验 温度 (F°)			N=1 时 E 值 (ksi)			N <sub>f</sub> /2 处 $\sigma_{min}$ (psi)	频率 (Hz)
			E		总应变率 (1/s)	$\epsilon_{max}$ (%)	$\epsilon_{min}$ (%)	$\sigma_{max}$ (psi)		
4-5	35	J890504	800	26.9	27.3	0.0009	0.640	0.185	130800	5500
4-12	35	J890504	800	27.5	27.6	0.0012	0.840	0.240	171000	6900
4-15	35	J890504	800	26.9	26.7	0.0014	0.897	0.213	190960	7890
4-18	35	J890504	800	25.4	25.3	0.0015	0.883	0.137	197000	8000
4-19	35	J890504	800	25.4	25.7	0.0010	0.757	0.270	131400	5300
5-7	35	J890505	800	27.0	26.6	0.0010	0.831	0.134	190600	9700
5-8	35	J890505	800	27.1	27.4	0.0010	0.705	0.202	145500	7200
4-13	35	J890504	800	26.3	26.6	0.0010	0.654	-0.654	163600	-181900
4-16	35	J890504	800	27.0	26.8	0.0010	0.744	-0.743	187800	-208100
4-14	35	J890504	800	27.5	-	0.0010	0.654	-0.655	163600	-195700
4-17	35	J890504	800	27.2	-	0.0010	0.484	-0.484	113900	-151100
4-2	35	J890504	800	26.2	-	0.0010	0.652	-0.656	167000	-171000
4-3	35	J890504	800	26.5	26.6	0.0010	0.481	-0.483	119000	-132000
4-20	35	J890504	800	26.2	28.1	0.0010	0.400	-0.410	93400	-126400
4-23	35	J890504	800	26.7	27.5	0.0010	0.304	-0.304	70500	-97200
4-25	35	J890504	800	25.3	24.3	0.0010	0.403	-0.403	96800	-101060
4-26	35	J890504	800	27.2	28.5	0.0010	0.300	-0.300	74700	-98100

表C4.1(d) (续)

试件编号	控制方式	R	工作段尺寸			试验日期	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
4-5	载荷	0.05	0.5	0.401	0.299	1/13/93	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-12	载荷	0.05	0.5	0.309	0.299	2/1/93	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-15	载荷	0.05	0.5	0.391	0.300	2/8/93	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-18	载荷	0.05	0.5	0.390	0.300	7/14/93	工作段	钼-织物	0.5x7x0.3 in	-
4-19	载荷	0.05	0.5	0.390	0.300	7/19/93	工作段	钼-织物	0.5x7x0.3 in	-
5-7	载荷	0.05	1.0	0.389	0.299	3/28/94	圆弧段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-8	载荷	0.05	1.0	0.389	0.299	3/29/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-13	应变	-1	0.5	0.391	0.299	2/22/93	圆弧段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-16	应变	-1	0.5	0.391	0.299	2/25/93	圆弧段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-14	应变	-1	0.5	0.390	0.300	2/30/93	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-17	应变	-1	0.5	0.390	0.299	3/11/93	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
4-2	应变	-1	0.5	0.294	-	3/24/99	7.工作段	钼-织物(1)	6x0.294 in	-
4-3	应变	-1	0.5	0.294	-	3/25/93	工作段	钼-织物(1)	6x0.294 in	-
4-20	应变	-1	0.5	0.388	0.298	7/26/93	工作段	钼-织物	0.5x7x0.3 in	-
4-23	应变	-1	0.5	0.389	0.300	9/3/93	圆弧段	钼-织物	0.5x7x0.3 in	-
4-25	应变	-1	0.5	0.289	-	9/29/93	工作段	钼-织物(1)	7x0.298 in	-
4-26	应变	-1	0.5	0.289	-	10/6/93	圆弧段	钼-织物(1)	7x0.298 in	-

表 C4.1(d) (总 8 页第 2 页)  
 SiC/Ti-15-3  
 疲劳  
 [0]3<sub>2</sub>  
 NASA-GRC 原始数据

表C4.1(d) (续)

表C4.1(d) (续)										表 C4.1(d) (总 8 页第 3 页)				
										SiC/Ti-15-3 疲劳 [0]32 NASA-GRC 原始数据	SiC/Ti-15-3 疲劳 [0]32 NASA-GRC 原始数据			
试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	E		应变率 (1/s)		$\dot{\epsilon}_{max}$ (%)		$\sigma_{max}$ (psi)		频率 (Hz)	$N_f$	
				N=1 时 (Ms)	E (Ms)	E (Ms)	应变率 (1/s)	$\dot{\epsilon}_{min}$ (%)	$\sigma_{min}$ (psi)					
4-27	35	J890504	800	26.1	25.4	0.0010	0.652	-0.653	162700	-167700	0.04	4340		
4-28	35	J890504	800	27.8	-	0.0010	0.273	-0.273	70600	-87500	0.09	121116		
5-1	35	J890505	800	26.0	27.7	0.0010	0.655	-0.656	169700	-188400	0.04	2019		
5-2	35	J890505	800	27.3	27.4	0.0010	0.305	-0.305	79200	-89100	0.08	84622		
5-3	35	J890505	800	27.2	27.7	0.0010	0.635	0.026	134900	-31700	0.08	11010		
5-4	35	J890505	800	27.3	28.2	0.0010	0.486	0.018	104400	-25900	0.10	94738		
5-5	35	J890505	800	27.1	27.4	0.0010	0.705	0.029	145000	-36500	0.07	12761		
5-6	35	J890505	800	26.9	27.4	0.0010	0.586	0.024	121700	-29500	0.09	26542		
5-14	35	J890505	800	27.2	27.5	0.0010	0.725	0.030	149500	-36100	0.07	9904		
5-9	35	J890505	800	26.7	27.6	0.0010	0.515	-0.323	116500	-116000	0.06	13015		
5-10	35	J890505	800	27.4	28.6	0.0010	0.325	-0.250	82100	-81600	0.09	76127		
5-13	35	J890505	800	25.5	25.6	0.0010	0.674	-0.625	167000	-167000	0.04	2401		
5-24	35	J890505	800	27.6	-	0.0010	0.710	0.030	163700	0	0.07	6437		
5-25	35	J890505	800	27.0	26.7	0.0010	0.595	0.120	127900	-948	0.09	23197		
5-26	35	J890505	800	26.8	26.7	0.0010	0.710	0.180	140200	-1100	0.08	14130		
5-21	35	J890505	800	26.9	28.3	0.0010	0.586	0.011	123800	-36900	0.09	20879		
5-22	35	J890505	800	27.5	28.9	0.0010	0.594	0.033	123700	-36700	0.09	27695		
5-28	35	J890505	800	26.8	26.5	0.0010	-	-	155900	-46900	0.07	6469		

表C4.1(d) (续)

试件编号	挂载模式	R	工作段尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
4-27	应力 应变	-1	0.5	0.298	-	10/19/93	工作段	钻孔(1)	7×0.298 in	-
4-28	应力 应变	-1	0.5	0.298	-	10/22/93	工作段	钻孔(1)	7×0.298 in	-
5-1	应力 应变	-1	1.0	0.390	0.300	2/14/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-2	应力 应变	-1	1.0	0.389	0.300	2/15/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-3	应力 应变	0.05	1.0	0.389	0.299	3/2/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-4	应力 应变	0.05	1.0	0.389	0.299	3/7/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-5	应力 应变	0.05	1.0	0.389	0.299	3/21/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-6	应力 应变	0.05	1.0	0.389	0.298	3/24/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-14	应力 载荷	0.05	1.0	0.388	0.301	5/18/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-9	载荷	-1	1.0	0.389	0.299	4/4/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-10	载荷	-1	1.0	0.388	0.299	4/7/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-13	载荷	-1	1.0	0.388	0.300	5/6/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-24	混合 $e^2$	0.05	1.0	0.388	0.300	10/4/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-25	混合 $e^2$	0.05	1.0	0.388	0.298	10/11/94	半径	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-26	混合 $e^2$	0.05	1.0	0.388	0.299	10/20/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-21	载荷	-0.3	1.0	0.387	0.300	8/1/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-22	载荷	-0.3	1.0	0.387	0.300	8/4/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-
5-28	载荷	-0.3	1.0	0.388	0.300	11/7/94	工作段	钻孔	0.5×6×0.3 in	-

(1) 圆柱形工作段部分 (2) 在最小拉伸应力条件下的应变控制试验

材料: SiC/Ti-15-3  
纤维: SCS-6  
基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn  
产品形式: 箔/纤维管  
产品尺寸: 10 in×14 in×0.3 in  
铺层形式: 单向  
层数: 32 层  
机械加工: EDM+金刚砂磨削

试验方法: 1.4.2.4 节 疲劳  
试验前曝露: 1292°F, 24h, 真空  
试验环境: 空气  
波形: 三角形  
试件几何形状: 狗骨形  
表面状态: 磨削态

表 C4.1(d) (总 8 页第 4 页)

SiC/Ti-15-3  
疲劳  
[0]z  
NASA-GRC  
原始数据

表C4.1(d) (续)

		表 C4.1(d) (总 8 页第 5 页)										
		SiC/Ti-15-3			SiC/Ti-15-3							
		疲劳 [0]32			疲劳 [0]32							
材料:		SiC/Ti-15-3			NASA-GRC							
纤维:		SCS-6			原始数据							
基体:		Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn										
产品形式:		短纤维/箔										
产品尺寸:		10 in×14 in×0.3 in										
铺层形式:		单向										
层 数:		32 层										
机械加工:		EDM+金刚砂磨削										
		N <sub>f</sub> /2 时										
		E		ε <sub>max</sub>		σ <sub>max</sub>						
试件编号		纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	N=1 时 (Msi)	E (Msi)	应变率 (1/s)					
						ε <sub>min</sub> (%)	σ <sub>min</sub> (psi)					
						ε <sub>min</sub> (%)	σ <sub>min</sub> (Hz)					
5-20	35	J890504	800	27.4	28.6	0.0010	0.475	-0.153	111700	-66700	0.08	34829
5-16	35	J890504	800	27.8	-	0.0010	0.593	-0.266	147000	-92000	0.06	6220
5-17	35	J890505	800	27.1	27.4	0.0010	0.789	0.397	148700	43200	0.13	24431
5-18	35	J890505	800	26.7	27.1	0.0010	0.655	0.316	130400	38560	0.15	29669
5-29	35	J890505	800	26.6	26.1	0.0010	0.752	0.571	153600	106000	0.30	5986
5-30	35	J890505	800	27.1	26.9	0.0010	0.855	0.658	177000	123000	0.25	3740
5-31	35	J890505	800	26.9	27.2	0.0010	0.758	0.608	136300	95400	0.30	46300
5-32	35	J890505	800	26.9	26.8	0.0010	0.887	0.564	173500	85400	0.15	6176
5-33	35	J890505	800	26.9	27.4	0.0010	0.726	0.480	133400	66000	0.20	353147
5-34	35	J890505	800	26.7	26.5	0.0010	0.868	0.583	150400	74300	0.18	97761
5-35	35	J890505	800	27.1	26.5	0.0010	0.822	0.477	195600	96500	0.13	681
5-19	35	J890505	800	27.3	27.1	0.0010	0.851	0.551	155200	76700	0.15	14477

表 C4.1(d) (续)

试件编号	控制模式	R	工作段尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
5-20	载荷	0.6	1.0	0.388	0.300	7/22/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-16	载荷	-0.6	1.0	0.388	0.301	11/10/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-17	载荷	0.3	1.0	0.387	0.300	11/21/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-18	载荷	0.3	1.0	0.390	0.306	12/6/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-29	载荷	0.7	1.0	0.388	0.302	3/14/95	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-30	载荷	0.7	1.0	0.388	0.299	3/21/95	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-31	载荷	0.7	1.0	0.390	0.300	3/24/95	工作段外	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-32	载荷	0.5	1.0	0.389	0.299	4/13/95	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-33	载荷	0.5	1.0	0.388	0.299	4/18/95	工作段外	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-34	载荷	0.5	1.0	0.388	0.299	5/9/95	圆弧段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-35	载荷	0.5	1.0	0.388	0.299	5/17/95	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-
5-19	载荷	0.5	1.0	0.390	0.308	11/30/94	工作段	钼-织物	0.5x6x0.3 in	-

表 C4.1(d) (总 8 页第 6 页)

SIC/Ti-15-3  
SCS-6  
基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn  
产品形式: 织/纤维箔  
产品尺寸: 10 in×14 in×0.3 in  
铺层形式: 单向  
层数: 32 层  
机械加工: EDM+金刚砂磨削

疲劳  
载荷  
[0]<sub>32</sub>  
NASA-GRC  
原始数据

表C4.1(d) (续)

试件编号	纤维体 积含量 (板)	批次号	试验温度 (°F)	E N=1 时 (Msi)	E (Msi)	应变率 (1/s)	$\varepsilon_{max}$ (%)	$\sigma_{max}$ (psi)	$\sigma_{min}$ (psi)	频率 (Hz)	N <sub>f</sub> /2 时	
											N <sub>f</sub>	N <sub>f</sub> /2 时
35-5	35	B934025	800	26	26.4	0.001	0.650	-0.650	167967	-188309	0.04	2769
35-7	35	B934025	800	29.4	28.5	0.001	0.425	-0.425	116086	-131500	0.06	22375
35-11	35	B934025	800	27.7	27.4	0.001	0.625	-0.625	176883	-185611	0.04	3240
42-3	42	D910519	800	33.5	32.3	0.001	0.500	-0.500	178055	-152000	0.05	2390
42-4	42	D910519	800	-	33.0	0.001	0.300	-0.300	106086	-91445	0.08	45860
42-5	42	D910519	800	30.3	29.3	0.001	0.500	-0.500	161490	-149344	0.05	4435
42-6	42	D910519	800	31.5	30.6	0.001	0.300	-0.300	94603	-95945	0.08	79800
25-3	25	B934026	800	24.3	24.4	0.001	0.300	-0.300	73490	-69808	0.08	72700
25-4	25	B934026	800	23.9	23.6	0.001	0.425	-0.425	93389	-110882	0.06	20889
25-5	25	B934026	800	23.4	24.2	0.001	0.425	-0.425	103631	-102545	0.06	16550
25-6	25	B934026	800	-	22.6	0.001	0.500	-0.500	114609	-110822	0.05	13370
15-3	15	F914007	800	17.9	18.6	0.001	0.425	-0.425	75020	-86000	0.06	18205
15-4	15	F914007	800	18.1	19.4	0.001	0.500	-0.500	95579	-94476	0.05	9443
15-6	15	F914007	800	17.3	-	0.001	0.425	-0.425	81000	-75580	0.06	16200

(1) 试验在带屈曲状态下进行。

材料: SiC/Ti-15-3  
 纤维: SCS-6  
 基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn  
 产品形式: 粘/纤维/粘  
 产品尺寸: 10 in×14 in×0.3 in  
 铺层形式: 单向  
 层数: 8 层  
 机械加工: 高压水+金刚砂磨削

试验方法: 1.4.2.4 行 疲劳<sup>(1)</sup>  
 试验前曝露: 1 292°F, 24 h, 真空  
 试验环境: 空气  
 波形: 三角形  
 试件几何形状: 拱背形  
 表面状态: 磨削态

SiC/Ti-15-3  
 疲劳  
 [0]<sub>8</sub>  
 NASA-GRC  
 原始数据

表 C4.1(d) (第 8 页第 7 页)

表C4.1(d) (完)

试件编号	控制模式	R	工作段尺寸		试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)					
35-5	应变	-1	0.5	0.358	0.071	7/31/96	工作段	钛-铌 织物	0.5×6×0.07 in
35-7	应变	-1	0.5	0.357	0.070	8/6/96	工作段	钛-铌 织物	0.5×6×0.07 in
35-11	应变	-1	0.5	0.357	0.071	8/12/96	圆弧段	钛-铌 织物	0.5×6×0.07 in
42-3	应变	-1	0.5	0.355	0.062	11/19/96	工作段	钼-织物	0.5×6×0.06 in
42-4	应变	-1	0.5	0.355	0.062	11/20/96	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.06 in
42-5	应变	-1	0.5	0.353	0.062	11/21/96	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.06 in
42-6	应变	-1	0.5	0.355	0.062	11/29/96	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.06 in
25-3	应变	-1	0.5	0.356	0.097	12/1/96	圆弧段	钛-铌 织物	0.5×6×0.09 in
25-4	应变	-1	0.5	0.355	0.098	12/27/96	工作段	钛-铌 织物	0.5×6×0.09 in
25-5	应变	-1	0.5	0.357	0.098	12/31/96	圆弧段	钛-铌 织物	0.5×6×0.09 in
25-6	应变	-1	0.5	0.357	0.098	1/6/97	圆弧段	钛-铌 织物	0.5×6×0.09 in
15-3	应变	-1	0.5	0.349	0.116	1/10/97	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.12 in
15-4	应变	-1	0.5	0.354	0.116	1/14/97	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.12 in
15-6	应变	-1	0.5	0.358	0.116	1/28/97	圆弧段	钼-织物	0.5×6×0.12 in

表 C4.1(d) (第 8 页第 8 页)  
SIC/TI-15-3  
疲劳  
[0]s  
NASA-GRC  
原始数据

表C4.1(e)

表 C4.1(e) (总 8 页第 1 页)							表 C4.1(e) (总 8 页第 1 页)					
试验方法: 1.4.2.4 节 疲劳 试验前螺栓: 1292°F, 24h, 真空 试验环境: 空气 波形: 三角形 试件几何形状: 狗骨形 表面状态: 机械加工							SiC/Ti-15-3 疲劳 层压板 NASA-GRC 原始数据					
试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	$E$ (Msi)	$N=1$ 时 (Ms)	应变率 (1/s)	$\sigma_{max}$	$\sigma_{min}$	频率 (Hz)	$N_f$		
							(%)	(%)				
[0]												
31	35	87H153	800	23.6	-	-	-	121600	4600	0.17		
32	35	87H153	75	25.5	-	-	-	142400	4600	0.17		
34	35	87H153	800	26.9	-	0.0010	0.633	0.021	121800	4600	0.17	
35	35	87H153	75	27.3	-	0.0008	0.498	0.018	132500	4100	0.17	
36	35	87H153	800	-	-	-	-	132700	4300	0.17		
37	35	87H153	800	26.5	-	0.0011	0.633	0.022	121500	4500	0.17	
										32804		
[90]												
38	35	87H153	75	17.7	-	0.0002	0.154	0.023	25300	2200	0.17	
45	35	87H153	75	18.2	-	0.0003	0.186	0.023	30400	2600	0.17	
										35867		
C10	35	87H150	75	27.0	-	0.0005	0.397	0.090	53400	2000	0.17	
C9	35	87H150	75	34.5	-	0.0008	0.516	0.068	88200	3100	0.17	
C8	35	87H150	75	30.5	-	-	-	76000	2900	0.17	10157	
C6	35	87H150	75	25.0	-	0.0007	0.451	0.061	60700	2200	0.17	31935

表C4.1(e) (续)

试件编号	控制模式	<i>R</i>	工作尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			<i>L</i> (in)	<i>w</i> (in)	<i>r</i> (in)					
31	载荷	0.05	0.5	0.336	0.085	1/3/90	无效	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
32	载荷	0.05	0.5	0.335	0.082	8/5/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
34	载荷	0.05	0.5	0.335	0.083	12/1/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
35	载荷	0.05	0.5	0.309	0.084	8/30/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
36	载荷	0.05	0.5	0.310	0.084	9/28/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
37	载荷	0.05	0.5	0.309	0.083	10/1/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
38	载荷	0.05	0.5	0.328	0.083	9/11/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
45	载荷	0.05	0.5	0.312	0.084	9/6/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
C10	载荷	0.05	0.5	0.329	0.07	3/7/90	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
C9	载荷	0.05	0.5	0.329	0.07	3/1/90	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
C8	载荷	0.05	0.5	0.329	0.07	10/26/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
C6	载荷	0.05	0.5	0.329	0.07	10/23/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-

表 C4.1(e) (第 8 页第 2 页)

SiC/Ti-15-3  
SCS-6  
Ti-1.5V-3Cr-3Al-3Sn  
NASA-GRC  
疲劳  
层压板  
原始数据

波形: 三角形

试件几何形状: 狗骨形

表面状态: 机械加工

材料: SiC/Ti-15-3  
纤维: SCS-6  
基体: Ti-1.5V-3Cr-3Al-3Sn  
产品形式: 滚纤维憎  
产品尺寸: 12 inx12 in

铺层形式: 层压板

层数: 8 层

机械加工: EDM

表C4.1(e) (续)

试件编号	纤维体积 含量 (%)	批次号 (板)	试验温度 (°F)	E (Msi)	N=1 时 (Ms)	E (Ms)	应变率 (1/s)	$\varepsilon_{max}$ (%)	$\varepsilon_{min}$ (%)	$\sigma_{max}$ (psi)	$\sigma_{min}$ (psi)	频率 (Hz)	N <sub>r</sub>	
													N <sub>r</sub> /2 时	N <sub>r</sub>
[0/90]														
B1	35	87H150	75	26.1	-	-	-	-	-	71200	2300	0.17	17056	
B3	35	87H150	75	27.3	-	0.0010	0.586	0.021	61000	2000	0.17	41914		
B5	35	87H150	75	22.2	-	0.0010	0.668	0.104	101900	2900	0.17	5368		
B6	35	87H150	75	21.7	-	0.0008	0.694	0.24	50800	2500	0.17	183718		
[+/-45]														
A7	35	87H148	800	11.7	-	0.0008	1.260	0.810	38800	1000	0.17	6276		
A8	35	87H148	800	13.4	-	0.0004	1.861	1.636	30600	800	0.17	90709		
A9	35	87H148	800	15.5	-	0.0011	1.112	0.488	47700	1000	0.17	1946		
A14	35	87H148	800	15.4	-	0.0007	2.120	1.719	33500	1100	0.17	47213		
A3 A4 A5														
A3	35	87H148	800	19.5	-	0.0006	1.490	1.158	33700	800	0.17	16857		
A4	35	87H148	800	16.9	-	0.0008	1.573	1.121	33400	800	0.17	14062		
A5	35	87H148	800	12.7	-	0.0005	1.612	1.324	31600	900	0.17	20866		

表C4.1(c) (续)

试件编号	控制模式	R	工作尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
B1	载荷	0.05	0.5	0.309	0.075	4/21/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
B3	载荷	0.05	0.5	0.309	0.075	4/30/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
B5	载荷	0.05	0.5	0.306	0.075	4/17/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
B6	载荷	0.05	0.5	0.306	0.075	4/4/89	-	钛-织物	0.5x6x0.09 in	-
A7	载荷	0.05	0.5	0.312	0.075	3/8/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
A8	载荷	0.05	0.5	0.316	0.076	3/9/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
A9	载荷	0.05	0.5	0.317	0.075	3/3/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
A14	载荷	0.05	0.5	0.310	0.076	2/21/90	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
								真空测试		
A3	载荷	0.05	0.5	0.318	0.076	3/18/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
A4	载荷	0.05	0.5	0.312	0.076	3/20/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-
A5	载荷	0.05	0.5	0.316	0.077	3/23/89	-	钛-织物	0.5x6x0.08 in	-

表 C4.1(e) (总 8 页第 4 页)

材料:	SiC/Ti-15-3	试验方法: 1.4.2.4. 节 疲劳	表 C4.1(e) (总 8 页第 4 页)
纤维:	SCS-6	试验前曝露: 1 292°F, 24h, 真空	SiC/Ti-15-3
基体:	Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn	试验环境: 空气	疲劳
产品形式:	箔/纤维/箔	波 形: 三角形	层压板
产品尺寸:	12 in×12 in	试件几何形状: 狗骨形	NASA-GRC
铺层形式:	层压板	表面状态: 机械加工	原始数据
层数:	8 层		
机械加工:	EDM		

表C4.1(e) (续)

试件编号	纤维体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	E (ksi)	N=1 时			N <sub>f</sub> /2 时			N <sub>f</sub>
					E (ksi)	应变率 (1/s)	ε <sub>max</sub> (%)	ε <sub>min</sub> (%)	σ <sub>max</sub> (psi)	频率 (Hz)	
[+/-30]											
H4	35	D890053	75	25.2	-	-	-	-	135300	5400	0.17
H12	35	D890053	75	24.7	21.7	0.0007	0.572	0.133	90900	3600	0.17
H13	35	D890053	75	25.8	-	-	-	-	119100	4800	0.17
H14	35	D890053	75	25.0	12.0	0.0010	1.076	0.471	70700	2800	0.17
H19	35	D890053	75	22.0	14.3	0.0008	0.654	0.168	70500	2800	0.17
H20	35	D890053	75	23.0	19.8	0.0006	0.498	0.117	70500	2700	0.17
D3	35	87H149	75	21.4	-	0.0009	0.690	0.164	100700	4200	0.17
D7	35	87H149	75	22.1	-	0.0006	0.484	0.109	68800	3000	0.17
D11	35	87H149	75	20.6	-	-	-	-	80600	3300	0.17
H2 <sup>(1)</sup>	35	D890053	75	26.2	-	0.0011	0.768	0.139	135300	5300	0.17
H15 <sup>(1)</sup>	35	D890053	75	24.9	20.6	0.0005	0.356	0.039	70700	2900	0.17
H17A <sup>(1)</sup>	35	D890053	75	24.9	-	-	-	-	70400	2900	0.17
H18A <sup>(1)</sup>	35	D890053	75	23.9	22.3	0.0007	0.483	0.068	90900	3600	0.17
H5 <sup>(2)</sup>	35	D890053	75	24.9	-	0.0011	0.774	0.109	135200	5600	0.17
H17B <sup>(2)</sup>	35	D890053	75	23.7	-	0.0007	0.508	0.068	90500	3600	0.17
H18B <sup>(2)</sup>	35	D890053	75	23.3	-	0.0006	0.379	0.031	70700	2800	0.17

(1) 热处理: 真空下 700°C/24 小时 + 427°C/24 小时。  
(2) 热处理: 真空下 788°C/15 分钟 + 300°C/24 小时。

表C4.1(e) (续)

试件编号	控制模式	R	工作段尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
H4	载荷	0.05	0.5	0.323	0.068	9/25/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H12	载荷	0.05	0.5	0.323	0.066	7/10/90	-	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H13	载荷	0.05	0.5	0.323	0.067	9/20/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H14	载荷	0.05	0.5	0.322	0.068	9/12/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H19	载荷	0.05	0.5	0.312	0.067	3/11/91	-	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
I20	载荷	0.05	0.5	0.312	0.068	2/25/91	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
D3	载荷	0.05	0.5	0.292	0.079	10/18/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.08 in	-
D7	载荷	0.05	0.5	0.292	0.077	10/19/90	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.08 in	-
D11	载荷	0.05	0.5	0.292	0.075	10/17/90	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.08 in	-
H2 <sup>(1)</sup>	载荷	0.05	0.5	0.324	0.066	10/19/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H15 <sup>(1)</sup>	载荷	0.05	0.5	0.324	0.068	3/4/91	-	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H17A	载荷	0.05	0.5	0.313	0.067	11/7/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H18A	载荷	0.05	0.5	0.312	0.068	11/13/90	工作段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H5	载荷	0.05	0.5	0.317	0.066	10/23/90	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H17B	载荷	0.05	0.5	0.312	0.068	11/27/90	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-
H18B	载荷	0.05	0.5	0.314	0.067	11/28/90	圆弧段	钻-织物	0.5x6x0.07 in	-

表 C4.1(e) (总 8 页第 6 页)

SiC/Ti-15-3

疲劳

层压板

NASA-GRC

原始数据

材料: SiC/Ti-15-3

纤维: SCS-6

基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn

产品形式: 箔/纤维/箔

产品尺寸: 12 in×12 in

铺层形式: 层压板

层数: 8 层

机械加工: EDM

试验方法: 1.4.2.4 节 疲劳

试验前曝露: 1292°F, 24h, 真空

试验环境: 空气

波形: 三角形

试件几何形状: 鞍背形

表面状态: 机械加工

失效模式

失效部位

备注

试件尺寸

失效模式

表C4.1(e) (续)

表C4.1(e) (总 8 页第 7 页)										表 C4.1(e) (总 8 页第 7 页)					
SIC/Ti-15-3										SIC/Ti-15-3					
疲劳 层压板 NASA-GRC 原始数据															
<b>试验方法: 1.4.2.4 小波分</b>															
试验前曝露: 1292°F, 24h, 真空															
试验环境: 空气															
产品尺寸: 12 in×12 in															
铺层形式: [±30] <sub>8s</sub>															
层 数: 32 层															
机械加工: EDM+金刚砂磨削															
试件编号			纤维体积	批次号	试验温度	E	N <sub>f</sub> /2 小时			N <sub>f</sub>					
			含量 (板)	(F)	(°F)	N=1 时 (Ms) <sup>1</sup>	E (Ms)	应变速率 (1/s)	ε <sub>max</sub> (%)	ε <sub>min</sub> (%)	σ <sub>max</sub> (psi)	σ <sub>min</sub> (psi)	频率 (Hz)		
[±30]															
G2	35	J890508	75	21.5	14.6	0.0023	0.350	-0.350	65000	-72000	0.16	>17434			
8-15	35	J890508	800	19.7	14.4	0.0010	0.603	-0.599	66700	-69200	0.04	2056			
9-1	35	J890509	75	22.8	21.0	0.0010	0.500	-0.500	90000	-100000	0.05	5453			
9-2	35	J890509	75	21.3	19.2	0.0010	0.400	-0.400	71000	-73000	0.06	16109			
9-3	35	J890509	75	21.6	19.6	0.0010	0.300	-0.300	53000	-59000	0.08	36823			
9-6	35	J890509	800	19.5	16.9	0.0010	0.305	-0.305	45000	-45000	0.08	56303			
9-10	35	J890509	800	19.7	17.5	0.0010	0.405	-0.405	45000	-58000	0.06	28269			
9-11	35	J890509	800	20.2	12.7	0.0010	0.500	-0.500	62000	-65000	0.05	4921			
9-12	35	J890509	800	20.0	14.0	0.0010	0.455	-0.455	55000	-61000	0.05	9531			
9-13	35	J890509	800	20.2	16.9	0.0010	0.355	-0.355	42000	-47000	0.07	45547			
9-14	35	J890509	800	19.5	12.8	0.0011	1.170	0.640	70300	3200	0.10	2003			
9-15	35	J890509	800	20.8	13.5	0.0014	1.520	1.150	50300	2200	0.19	39432			
9-17	35	J890509	800	20.3	13.8	0.0024	1.400	0.500	62500	3400	0.13	3342			
9-18	35	J890509	800	21.2	14.3	0.0013	2.700	2.200	55300	2400	0.13	12412			
9-19	35	J890509	800	20.5	14.6	0.0011	1.800	1.100	95500	4300	0.08	244			
9-20	35	J890509	800	20.9	13.3	0.0010	0.705	-0.705	71100	-73200	0.04	841			

表C4.1(e) (完)

试件编号	控制模式	R	工作段尺寸			试验时间	失效部位	备注	试件尺寸	失效模式
			L (in)	W (in)	t (in)					
G2	应变	-1	0.5	0.330	0.299	4/9/90	(1)	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
8-15	应变	-1	0.5	0.390	0.299	3/9/93	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-1	应变	-1	0.5	0.399	0.299	4/29/91	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-2	应变	-1	0.5	0.399	0.299	5/13/91	工作段(1)	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-3	应变	-1	0.5	0.399	0.300	3/18/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-6	应变	-1	0.5	0.398	0.300	3/31/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-10	应变	-1	0.5	0.390	0.301	4/29/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-11	应变	-1	0.5	0.390	0.301	5/6/92	圆角处	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-12	应变	-1	0.5	0.390	0.300	5/11/92	圆角处	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-13	应变	-1	0.5	0.390	0.301	5/18/92	工作段(1)	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-14	载荷	0.05	0.5	0.390	0.301	6/11/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-15	载荷	0.05	0.5	0.390	0.301	6/15/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-17	载荷	0.05	0.5	0.390	0.300	6/19/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-18	载荷	0.05	0.5	0.389	0.299	6/29/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-19	载荷	0.05	0.5	0.389	0.299	7/6/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-
9-20	应变	-1	0.5	0.388	0.299	7/8/92	工作段	钩-织物	0.5×6.0×0.3	-

(1) 载荷降低 30%时破坏。

表 C4.1(e) (总 8 页第 8 页)  
 SiC/Ti-15-3  
 SCS-6  
 基体: Ti-15V-3Cr-3Al-3Sn  
 产品形式: 箍/纤维/箍  
 产品尺寸: 12 in×12 in  
 辅层形式: [±30]<sub>8s</sub>  
 层数: 32 层  
 机械加工: EDM+金刚砂磨削

疲劳  
层压板  
NASA-GRC  
原始数据

表C4.2(a)

试件 编号	纤维 体积 含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1^t$ (Msi)	$F_1^{0.02}$ (ksi)	$F_1^w$ (ksi)	$\epsilon_1^t$ (%)	$\nu_{12}^t$	备注	
										筛选数据:	接受状态:
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2											
材料:	TRIMARC-1										
纤维:	TRIMARC-1										
基体:	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo										
产品形式:	平板										
铺层形式:	[0] <sub>10</sub>										
试验方法:	1.4.2.1 节										
表 C4.2(a) (总 4 页第 1 页)											
94-H89	32.4	2-5410418-1	73	0.0008	30.6		169.2	0.550	0.276	工作段长度外断裂; 引伸计打滑, 获得最大应变	
96-J85	29.2	1-7353451-2	73	0.0001	29.8		225.4	0.760		工作段长度外断裂	
96-J86	29.3	1-7353451-2	73	0.0001	29.2		236.6	0.810		工作段长度外断裂	
96-J87	30.1	1-7353451-2	73	0.0001	29.8		210.3	0.690		工作段长度外断裂	
96-J90	29.9	1-7353451-3	325	0.001	30.3		216.5	0.540		工作段长度外断裂; 引伸计打滑, 获得最大应变	
96-J91	29.6	1-7353451-3	325	0.001	29.8		214.1	0.760		工作段长度外断裂	
96-J92	29.5	1-7353451-3	325	0.001	30.9		227.4	0.770		工作段长度外断裂	
96-J93	29.4	1-7353451-3	325	0.001	29.2		217.3	0.770		工作段长度外断裂	
96-J94	29.4	1-7353451-3	325	0.0001	29.6		187.1	0.660		工作段长度外断裂; 引伸计打滑, 获得最大应变	
96-J95	29.6	1-7353451-3	325	0.00001	28.6		165.9	0.570		工作段长度外断裂	
96-J96	29.2	1-7353451-3	700	0.001	26.9		202.7	0.820		工作段长度外断裂	
96-J97	29.3	1-7353451-3	700	0.001	31.1		191.8	0.680		工作段长度外断裂	
96-J98	29.1	1-7353451-3	700	0.001	28.4		186.5	0.620		工作段长度外断裂	
96-J99	29.2	1-7353451-3	700	0.0001	28.4		141.6	0.510		工作段长度外断裂	
96-K00	29.3	1-7353451-3	700	0.00001	28.2		207.1	0.760		工作段长度外断裂	
96-P97	27.5	1-7353451-6	73	0.0001	29.0		251.3	0.720		工作段长度外断裂; 引伸计打滑, 获得最大应变	
96-P98	27.3	1-7353451-6	73	0.0001	31.0		229.7	0.800		工作段长度外断裂	
96-P99	27.3	1-7353451-6	73	0.0001	29.5		216.7	0.630		工作段长度外断裂; 引伸计打滑, 获得最大应变	

表C4.2(a) (续)

TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2					
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2					
试件 编号	试验 日期	失效 部位	失效 方式	收缩率 (%)	伸长率 (%)	面积 (in <sup>2</sup> )	载荷 (lb)	0.2%偏移 (in)	载荷 (lb)	宽度 (in)	厚度 (in)	初始 长度 (in)	最终 长度 (in)	厚度 (in)	最终 面积 (in <sup>2</sup> )
94-I189				0.0311		5265	0.0800	1.0158	1.0176	0.3880	0.0800	0.0310			
96-J85				1.79	0.0280	6310	0.3151	0.0889							
96-J86				0.72	0.0279	6600	0.3152	0.0886							
96-J87				1.48	0.0271	5700	0.3154	0.0860							
96-J90				1.10	0.0273	4900	0.3157	0.0866							
96-J91				0.73	0.0276	5910	0.3157	0.0875							
96-J92				1.44	0.0277	6300	0.3157	0.0878							
96-J93				1.44	0.0278	6040	0.3154	0.0862							
96-J94				0.72	0.0278	5200	0.3153	0.0881							
96-J95				0.36	0.0276	4580	0.3150	0.0877							
96-J96				2.86	0.0280	5675	0.3156	0.0887							
96-J97				1.79	0.0279	5350	0.3152	0.0885							
96-J98				3.56	0.0281	5240	0.3158	0.0891							
96-J99				1.42	0.0281	3980	0.3159	0.0888							
96-K00				0.71	0.0280	5800	0.3162	0.0885							
96-P97				2.69	0.0298	7490	0.3157	0.0943							
96-P98				0.67	0.0300	6890	0.3163	0.0930							
96-P99				1.33	0.0300	6500	0.3162	0.0930							

表C4.2(a) (续)

筛选数据										表C4.2(a) (续)	
试件几何形状: 直边 接受状态: 尚未水、金刚砂磨削										C4.2(a) (总 4 页第 3 页) TRIMARC-1/TI 6-2-4-2 拉伸 [0] <sub>10</sub> 空军研究实验室(AFRL/MLLN)	
试件 编号	纤维体 积含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	E <sub>1</sub> (ksi)	比例极限 (ksi)	F <sub>1</sub> <sup>00.02</sup> (ksi)	F <sub>1</sub> <sup>u</sup> (ksi)	E <sub>1</sub> <sup>u</sup> (%)	V <sub>12</sub> '	备注 计算数据 得最大应变 工作段长度外断裂
96-Q00	27.2	2-7353451-6	325	0.001	27.6			200.7	0.660		工作段长度外断裂滑移, 获得最大应变
96-Q01	27.3	2-7353451-6	325	0.001	28.7			216.5	0.800		工作段长度外断裂
96-Q02	27.7	2-7353451-6	325	0.001	30.2			209.1	0.730		工作段长度外断裂
96-Q03	27.6	2-7353451-6	325	0.001	27.8			186.9	0.680		工作段长度外断裂
96-Q04	27.5	2-7353451-6	325	0.0001	27.9			212.4	0.740		工作段长度外断裂
96-Q05	27.3	2-7353451-6	325	0.00001	27.9			198.3	0.720		工作段长度外断裂
96-Q06	27.4	2-7353451-6	700	0.001	30.5			178.6	0.630		工作段长度外断裂
96-Q07	27.5	2-7353451-6	700	0.001	26.1			199.7	0.830		工作段长度外断裂
96-Q08	27.6	2-7353451-6	700	0.001	29.5			197.6	0.680		工作段长度外断裂
96-Q09	27.4	2-7353451-6	700	0.0001	27.9			185.3	0.710		工作段长度外断裂
96-Q10	27.4	2-7353451-6	700	0.00001	26.3			185.6	0.750		工作段长度外断裂
96-Q73	29.5	3-7353451-10	73	0.0001	29.0			223.4	0.770		工作段长度外断裂
96-Q74	29.7	3-7353451-10	73	0.0001	31.8			240.1	0.840		工作段长度外断裂
96-Q75	29.8	3-7353451-10	73	0.0001	28.8			239.9	0.850		工作段长度外断裂
96-Q76	29.5	3-7353451-10	325	0.001	27.7			205.0	0.740		工作段长度外断裂
96-Q77	29.4	3-7353451-10	325	0.001	28.1			203.4	0.700		工作段长度外断裂
96-Q78	29.4	3-7353451-10	325	0.001	31.8			215.1	0.750		工作段长度外断裂
96-Q79	29.5	3-7353451-10	325	0.001	30.7			219.1	0.690		工作段长度外断裂
96-Q80	29.4	3-7353451-10	325	0.0001	27.7			206.8	0.750		工作段长度外断裂
96-Q81	29.7	3-7353451-10	325	0.00001	27.7			217.8	0.850		工作段长度外断裂
96-Q82	29.2	3-7353451-10	700	0.001	29.8			202.9	0.760		工作段长度外断裂
96-Q83	29.1	3-7353451-10	700	0.001	28.2			179.7	0.650		工作段长度外断裂
96-Q84	29.0	3-7353451-10	700	0.001	27.8			195.1	0.740		安装时破坏
96-Q85	28.9	3-7353451-10	700	0.0001	28.9			189.0	0.720		工作段长度外断裂
96-Q86	29.0	3-7353451-10	700	0.00001	28.9						工作段长度外断裂

表 C4.2(a) (完)

试件 编号	试验 日期	失效 部位	失效 方式	收缩率 (%)	伸长率 (%)	面积 (in <sup>2</sup> )	载荷 (lb)	0.2%偏移 (in)	最大 载荷 (lb)	宽度 (in)	厚度 (in)	实验空气回路 无	接受状态 高压水, 金刚砂磨削 无	表 C4.2(a) (总 4 页第 4 页)			
														筛选数据: 试件几何形状: 表面状态: 机械加工: 试验前曝露:	直边 拉伸	TRIMARC-I/TI 6-2-4-2 拉伸	
96-Q00				1.00	0.0301				6040	0.3164	0.0932						
96-Q01				1.33	0.0300				6495	0.3163	0.0949						
96-Q02				1.35	0.0296				6190	0.3156	0.0937						
96-Q03				1.35	0.0297				5550	0.3163	0.0939						
96-Q04				1.00	0.0299				6350	0.3163	0.0944						
96-Q05				1.00	0.0300				5950	0.3155	0.0951						
96-Q06				2.00	0.0300				5350	0.3166	0.0946						
96-Q07				1.34	0.0298				5950	0.3158	0.0943						
96-Q08				1.01	0.0296				5850	0.3156	0.0938						
96-Q09				1.34	0.0299				5540	0.3158	0.0948						
96-Q10				2.01	0.0299				5550	0.3158	0.0946						
96-Q73				2.52	0.0278				6210	0.3161	0.0879						
96-Q74				1.81	0.0277				6650	0.3170	0.0873						
96-Q75				1.09	0.0276				6620	0.3171	0.0871						
96-Q76				0.72	0.0278				5700	0.3158	0.0880						
96-Q77				0.72	0.0279				5675	0.3159	0.0882						
96-Q78				0.72	0.0279				6000	0.3160	0.0883						
96-Q79				0.72	0.0278				6090	0.3157	0.0880						
96-Q80				0.36	0.0278				5750	0.3157	0.0881						
96-Q81				0.73	0.0275				5990	0.3151	0.0873						
96-Q82				0.72	0.0277				5620	0.3149	0.0888						
96-Q83				0.36	0.0281				5050	0.3152	0.0890						
96-Q84					0.0282					0.3152	0.0895						
96-Q85				1.41	0.0283				5520	0.3150	0.0897						
96-Q86				2.13	0.0282				5330	0.3146	0.0895						

表 C4.2(b)

筛选数据:										表 C4.2(b)			
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2			
材 料:	试件几何形状: 直边									拉伸 [0] <sub>s</sub>	接受状态: 高压水, 金刚砂磨削	试验前螺钉: 无	空军研究实验室(AFRL/MILLN) 计算数据
	纤 维:	TRIMARC-1	表 面 状 态:	机 械 加 工:	试 验 环 境:	实验 室 空 气	$F_1^{u}$	$F_1^{0.02}$	$F_1^{0.2}$				
基 体:	Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	平 板	机 械 加 工:	无	试 验 环 境:	比例极限 $E_1^i$ (ksi)	比例极限 $E_1^i$ (ksi)	比例极限 $F_1^{u}$ (ksi)	比例极限 $F_1^{0.02}$ (ksi)	比例极限 $F_1^{0.2}$ (ksi)	屈服强度 $\sigma_y^f$ (%)	屈服强度 $\sigma_y^f$ (%)	备注
产品形式:	[0] <sub>s</sub>	铺层形式:	[0] <sub>s</sub>	试验方法:	1.4.2.1 节	纤 维 体 积 含 量 (板)	批 次 号 (板)	试 验 温 度 (°F)	应 变 率 (1/s)	试 验 数 据:	实验 室 空 气	计算 数 据	
94-H81	30.5	7-5410422-1	700	0.0008	24.0					190.0	0.840		工作段长度外断裂
94-H82	30.7	7-5410422-1	700	0.0008	25.7					205.5	0.860		工作段长度外断裂
94-H83	30.5	7-5410422-1	700	0.0008	26.9					191.5	0.730		工作段长度外断裂
94-H84	31.0	7-5410422-1	325	0.0008	25.9					220.1	0.870		工作段长度外断裂
94-H85	31.0	7-5410422-1	325	0.0008	26.0					230.1	0.960		工作段长度外断裂
94-H86	30.5	7-5410422-1	325	0.0008	26.8					230.3	0.920		工作段长度外断裂
94-H87	30.7	7-5410422-1	73	0.0008	29.5					239.4	0.810	0.292	工作段长度外断裂
94-H88	30.5	7-5410422-1	73	0.0008	28.2					255.2	0.920	0.298	工作段长度外断裂

表C4.2(c)

试件 编号	纤维体 积含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_2^t$ (Msi)	比例极限 (ksi)	$F_{2y}^{0.02}$ (ksi)	$F_2^w$ (ksi)	$\varepsilon_2^t$ (%)	计算数据	
										直边 接受状态:	高压水, 金刚砂磨削 无
94-H79	32.2	1-5410417-1	73	0.0008	23.0			37.4	0.200	0.198	工作段长度外断裂
94-H80	32.2	2-5410418-1	73	0.0008	24.4			35.4	0.150	0.233	工作段长度外断裂
96-K45	28.7	1-7353452-2	73	0.0001	22.8			59.3	0.660		
96-K46	28.7	1-7353452-2	73	0.0001	22.0			59.4	0.680		
96-K47	28.7	1-7353452-2	73	0.0001	22.9			56.0	0.620		
96-K48	28.8	1-7353452-2	325	0.001							从XY记录仪得出的极限载荷
96-K49	28.7	1-7353452-2	325	0.001	19.1			63.2	0.960		工作段长度外断裂
96-K50	28.8	1-7353452-2	325	0.0001	20.1			58.8	0.820		
96-K51	28.8	1-7353452-2	325	0.00001	18.7			56.7	0.880		工作段长度外断裂
96-K52	28.9	1-7353452-2	700	0.001	19.0			55.3	1.120		工作段长度外断裂, 引伸计打滑, 得到最大应变
96-K55	28.8	1-7353452-1	700	0.0001	15.8			57.0	0.720		
96-K56	28.7	1-7353452-1	700	0.00001	12.2			53.9	57.7	1.640	工作段长度外断裂
96-Q21	29.2	2-7353452-3	73	0.0001	24.4			54.3	0.520		
96-Q22	29.2	2-7353452-3	73	0.0001	22.4			49.1	0.480		
96-Q23	29.3	2-7353452-3	73	0.0001	23.8			53.5	0.600		
96-Q24	29.5	2-7353452-3	325	0.0001	21.4			57.4	63.2	1.260	
96-Q25	29.5	2-7353452-3	325	0.001	20.5			58.0	60.2	1.000	工作段长度外断裂
96-Q26	29.5	2-7353452-3	325	0.001	21.1			60.7	62.2	1.000	工作段长度外断裂
96-Q27	29.6	2-7353452-3	325	0.00001	19.3			53.8	0.240		
96-Q28	29.9	2-7353452-3	700	0.001	20.0			46.0	49.6	1.060	
96-Q29	30.0	2-7353452-3	700	0.0001	18.6			45.6	47.1	1.040	在接头时破坏
96-Q30	30.1	2-7353452-3	700	0.00001	16.9			46.2	47.6		工作段长度外断裂
96-Q89	29.2	3-7353452-6	73	0.0001	23.0			41.6	0.380		
96-Q90	29.5	3-7353452-6	73	0.0001	22.0			45.5	0.420		
96-Q91	29.0	3-7353452-6	73	0.0001	22.9			46.1	0.500		

表 C4.2(c) (第 4 页第 1 页)  
TRIMARC-1/T1-6-2-4-2

拉伸

[90]<sub>10</sub>

空军研究室实验室(ARFL/MILLN)

表C4.2(c) (续)

材 料:	TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2				筛选数据:				表 C4.2(c) (第 4 页第 2 页)							
	纤 维:	TRIMARC-1			试件几何形状:	直边			接受状态:	TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2						
基 体:	Ti-6Al-2Sn-4Cr-2Mo			表面状态:	高压水, 金刚砂磨削			机械加工:	拉伸							
产 品 形 式:	平板			试验前厚度:	无			试验后厚度:	[90] <sub>10</sub>							
铺层形式:	[90] <sub>n</sub>			实验环境:	实验室空气			计算数据:	空军研究实验室(AFRL/MILLN)							
试件 编号:	1.4.2.1 节	试验 日期:	失效 部位:	失效 方式:	收缩率 (%)	伸长率 (%)	面积 (in <sup>2</sup> )	载荷 (lb)	0.2%偏移 (lb)	最大载荷 (lb)	宽度 (in)	厚度 (in)	初始长度 (in)	最终长度 (in)	最终厚度 (in)	最终面积 (in <sup>2</sup> )
94-H79					0.312	0.57	0.0284	1164	0.3870	0.0805	0.9975	0.9966	0.3870	0.0805	0.0312	
94-H80					0.312	0.62	0.0285	1102	0.3870	0.0805	1.0204	1.0188	0.3870	0.0805	0.0312	
96-K45					0.35	0.59	0.0284	1683	0.3140	0.0904						
96-K46					1.40	0.62	0.0285	1690	0.3144	0.0905						
96-K47					0.00	0.59	0.0284	1590	0.3141	0.0905						
96-K48					1.41	0.62	0.0284	1570	0.3153	0.0900						
96-K49					1.76	0.74	0.0284	1795	0.3152	0.0902						
96-K50					1.76	0.74	0.0284	1670	0.3155	0.0899						
96-K51					1.06	0.62	0.0284	1610	0.3159	0.0899						
96-K52					1.41	0.62	0.0284	1570	0.3166	0.0898						
96-K55					0.70	0.57	0.0285	1625	0.3170	0.0900						
96-K56					1.40	0.50	0.0286	1540	1650	0.3171	0.0902					
96-Q21					1.43	0.50	0.0280	1520	0.3155	0.0889						
96-Q22					1.08	0.46	0.0279	1370	0.3149	0.0887						
96-Q23					1.43	0.57	0.0280	1498	0.3154	0.0886						
96-Q24					1.81	0.77	0.0277	1590	1750	0.3149	0.0878					
96-Q25					1.09	0.92	0.0276	1660	1660	0.3148	0.0878					
96-Q26					0.36	0.277	0.0277	1680	1722	0.3149	0.0878					
96-Q27					1.45	0.59	0.0276	1485	0.3150	0.0875						
96-Q28					1.09	0.95	0.0276	1270	1370	0.3154	0.0868					
96-Q29					1.09	0.62	0.0275	1255	1295	0.3146	0.0864					
96-Q30					1.46	1.33	0.0275	1270	1310	0.3154	0.0860					
96-Q89					0.00	0.279	0.0279	1160	0.3146	0.0888						
96-Q90					1.40	0.39	0.0277	1260	0.3143	0.0880						
96-Q91					2.13	0.49	0.0282	1300	0.3158	0.0894						

表 C4.2(c) (续)

表 C4.2(c) (续)									
筛选数据									
表件几何形状: 直边 接受状态									
基体: TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2									
纤维: TRIMARC-1	试件几何形状: 直边 接受状态								
产品形式: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo	表而状态: 高抛光, 金刚砂磨削								
铺层形式: [90] <sub>10</sub>	机械加工: 无								
试验方法: 1.4.2.1. 节	试验前曝露: 无								
试验环境: 实验室空气回路									
试件 编号	纤维体 积含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变速率 (1/s)	弹性模量 E (GPa)	比例极限 F <sub>1</sub> (MPa)	F <sub>1</sub> <sup>work</sup> (MPa)	F <sub>1</sub> <sup>u</sup> (MPa)	ε <sub>1</sub> <sup>tf</sup> (%)
96-Q92	29.5	3-7353452-6	325	0.001	19.3			56.5	0.920
96-Q93	29.5	3-7353452-6	325	0.001	23.4			57.8	0.260
96-Q94	29.2	3-7353452-6	325	0.0001	19.9			52.3	0.740
96-Q95	29.2	3-7353452-6	325	0.00001					从 X-Y 记录仪得到的极限载荷
96-Q96	29.1	3-7353452-6	700	0.001	17.5			49.7	55.5
96-Q97	29.0	3-7353452-6	700	0.0001	19.4			49.1	57.5
96-Q98	29.1	3-7353452-6	700	0.00001	18.9			47.2	49.5
								1.120	1.120

表C4.2(c) (完)

筛选数据:							表C4.2(c) (总4页第4页)						
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2							TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2						
基体: Ti-6Al-2Sn-4Zr-2Mo							接受状态: 拉伸						
产品形式: 平板							试验前曝露: 高压水, 金刚砂磨削 [90] <sub>16</sub>						
铺层形式: 无							空军研究实验室(AFRL/MLLN)						
试验方法: 1.4.2.1 垂							试验室空气						
筛选数据:							计算数据						
试件 编号	试验 日期	失效 部位	失效 方式	收缩率 (%)	伸长率 (%)	面积 (in <sup>2</sup> )	载荷 (lb)	极限 载荷 (lb)	厚度 (in)	厚度 (in)	初始 长度 (in)	最终 长度 (in)	最终 厚度 (in)
96-Q92		1.08		0.0278				1570	0.3157	0.0880			
96-Q93		1.08		0.0277				1600	0.3151	0.0880			
96-Q94		1.43	0.09	0.0279				1460	0.3144	0.0887			
96-Q95				0.0280					0.3154	0.0888			
96-Q96		2.13	0.63	0.0282				1565	0.3161	0.0891			
96-Q97		2.13		0.0282				1385	0.3154	0.0893			
96-Q98		1.42		0.0281				1325	0.3150	0.0892			

表C4.2(d)

筛选数据:										表 C4.2(d)			
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2			
试件 编号	纤维体 积含量	批次号 (板)	试验温度 (°F)	应变率 (1/s)	$E_1$ (GPa)	$F_{\text{pro}}^{\text{u}}$ (ksi)	$F_u$ (ksi)	$\epsilon_1^{\text{uf}}$ (%)	$\nu_{12}^1$	备注			计算数据
										高压水, 金刚砂磨削 [90]s			
94-H72	30.5	7-5410422-1	325	0.0008	18.3	51.5	52.3	0.520		无			工作段长度外断裂
94-H73	30.5	7-5410422-1	700	0.0008	13.3	42.9	45.6	0.620		接受状态			工作段长度外断裂
94-H74	30.5	7-5410422-1	700	0.0008	12.1		41.7	0.490		机械加工:			工作段长度外断裂
94-H75	30.3	7-5410422-1	700	0.0008	15.5	43.3	45.2	0.530		试验前螺钉:			工作段长度外断裂
94-H76	30.3	7-5410422-1	325	0.0008	18.4		49.3	0.430		试验环境:			工作段长度外断裂
94-H77	30.3	7-5410422-1	325	0.0008	18.6		50.0	0.430		实验室空气:			工作段长度外断裂
94-H78	30.5	7-5410422-1	73	0.0008	22.5		45.7	0.260	0.223	计算数据			工作段长度外断裂

试件 编号	试验 日期	失效 部位	失效 方式	伸长率 (%)	面积 (in <sup>2</sup> )	载荷 (lb)	0.2%偏移 载荷 (lb)	极限 宽度 (in)	厚度 (in)	初始 长度 (in)	最终 长度 (in)	最终 宽度 (in)	最终 面积 (in <sup>2</sup> )
94-H72	0.0247	1270	1290	0.3630	0.0680	1.0123	1.0121	0.3630	0.0680	0.0247			
94-H73	0.0252	1080	1148	0.3700	0.0680	1.0199	1.0108	0.3700	0.0675	0.0250			
94-H74	0.0254		1058	0.3730	0.0680	1.0107	1.0102	0.3730	0.0675	0.0252			
94-H75	0.0256	1110	1158	0.3740	0.0685	1.0116	1.0113	0.3740	0.0680	0.0254			
94-H76	0.0256		1260	0.3730	0.0685	1.0108	1.0104	0.3730	0.0680	0.0254			
94-H77	0.0256		1280	0.3740	0.0685	1.0075	1.0068	0.3740	0.0680	0.0254			
94-H78	0.0254		1161	0.3740	0.0680	0.9989	0.9969	0.3740	0.0680	0.0254			

表C4.2(e)

筛选数据							表C4.2(e) (总2页第1页)		
试验几何形状: 直边 试验前曝露: 无 表面状态: 接收状态 机械加工: 高压水, 磨削 试验环境: 试验室空气							TRIMARC-Ti 6-2-4-2 压轴 [0] <sub>10</sub>		
空军研究试验室 (AFRL/MIL-N) 计算数据									
试件编号	纤维体 极含量	批次号 (板)	试验温 度 (°C)	应变率 (1/s)	$E_1^c$ (GPa)	比钢极限 (MPa)	$F_1^{cy0.2}$ (MPa)	$F_1^{cu}$ (MPa)	$\varepsilon_1^d$ %
94-H54	0.324	1-5410417-1	23	0.0008	23	2219			
94-H55	0.318	1-5410417-1	23	0.0008	23				引伸计打滑
94-H56	0.324	2-5410418-1	23	0.0008	225				引伸计打滑
94-H57	0.328	2-5410418-1	163	0.0008	225				引伸计打滑
94-H58	0.328	2-5410418-1	163	0.0008	221				引伸计打滑
94-H59	0.328	2-5410418-1	163	0.0008	201				引伸计打滑
94-H60	0.328	2-5410418-1	371	0.0008	181				
94-H61	0.328	2-5410418-1	163	0.0008	109				无载荷-位移数据
94-H62	0.326	2-5410418-1	23	0.0008	219				无载荷-位移数据
96-K21	0.28.3	1-7353451-4	23	0.0001					初始装夹时破坏
96-K22	0.27.9	1-7353451-4	23	0.0001					
96-K23	0.27.8	1-7353451-4	163	0.0001	196				
96-K24	0.28.4	1-7353451-4	163	0.0001	183				
96-K25	0.28.2	1-7353451-4	371	0.0001	183				
96-K26	0.28.0	1-7353451-4	371	0.001	184				
96-Q15	0.29.2	2-7353452-3	23	0.0001	201				
96-Q16	0.29.1	2-7353452-3	23	0.0001	200				引伸计打滑
96-Q17	0.29.2	2-7353452-3	163	0.0001	188				数值文件未包含屈服点
96-Q18	0.29.3	2-7353452-3	163	0.0001	197				数值文件未包含屈服点
96-Q19	0.29.2	2-7353452-3	371	0.0001	189				数值文件未包含屈服点
96-Q20	0.29.5	2-7353452-3	371	0.00001	193				数值文件未包含屈服点
96-R02	0.29.2	3-7353452-6	23	0.0001	207				数值文件未包含屈服点
96-R03	0.29.1	3-7353452-6	23	0.0001	201				数值文件未包含屈服点
96-R04	0.29.0	3-7353452-6	163	0.0001	201				数值文件未包含屈服点
96-R05	0.29.0	3-7353452-6	163	0.0001	200				数值文件未包含屈服点
96-R06	0.28.9	3-7353452-6	371	0.0001	178				引伸计打滑
96-R07	0.28.9	3-7353452-6	371	0.0001	161				
						2184			

表C4.2(e) (完)

筛选数据										表 C4.2(e) (第 2 页第 2 页)				
TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2				
压缩										压缩				
[0] <sub>10</sub>										[0] <sub>10</sub>				
空军研究试验室 (AFRL/MLLN)										空军研究试验室 (AFRL/MLLN)				
试件几何形状: 直边 试验前壁厚: 无 表面状态: 接收状态 机械加工: 高压水, 磨削 试验环境: 试验室空气										计算数据				
试件 编号	试验 日期	失效 部位	失效 方式	收缩率 (%)	伸长率 (%)	面积 (mm <sup>2</sup> )	载荷 (N)	最大 载荷 (N)	宽度 (mm)	厚度 (mm)	初始 长度 (mm)	最终 长度 (mm)	最终 厚度 (mm)	最终 面积 (mm <sup>2</sup> )
94-H54						31.35	69614.67	15.44	2.03	25.4				
94-H55						32.00		15.44	2.07	25.4				
94-H56						31.35		15.44	2.03	25.4				
94-H57						31.16		15.52	2.01	25.4				
94-H58						31.16		15.54	2.01	25.4				
94-H59						31.16		15.54	2.01	25.4				
94-H60						31.16	63609.57	15.52	2.01	25.4				
94-H61						31.16	75397.36	15.52	2.01	25.4				
94-H62						31.29	112317.6	15.49	2.02	25.4				
96-K21						36.97	64766.11	15.90	2.32					
96-K22						37.29	93590.58	15.79	2.36					
96-K23						37.68	93412.65	15.87	2.37					
96-K24						36.65	88070.34	15.81	2.32					
96-K25						36.90	92523.01	15.81	2.33					
96-K26						37.29	65388.86	15.82	2.35					
96-Q15						35.81	83359.67	15.89	2.25					
96-Q16						36.06	92878.87	15.91	2.27					
96-Q17						35.94	93412.65	15.91	2.26					
96-Q18						35.74	89320.29	15.91	2.25					
96-Q19						35.87	87896.86	15.91	2.26					
96-Q20						35.48	94302.3	15.88	2.24					
96-R02						35.87	93946.44	15.91	2.25					
96-R03						36.06	93412.65	15.91	2.27					
96-R04						36.13	93590.58	15.92	2.27					
96-R05						36.06	74352.02	15.89	2.27					
96-R06						36.19	79178.34	15.92	2.28					
96-R07						36.26		15.92	2.28					

表C4.2(f)

筛选数据										表 C4.2(f) (总 2 页第 1 页)		
试件几何形状: 直边 试验前暴露: 无 表面状态: 接收状态 机械加工: 高压水, 磨削 试验环境: 试验室空气										TRIMARC-1/Ti 6-2-4-2 压缩 $[90]_{10}$		
										空军研究试验室 (AFRL/MIL/N)		
										计算数据		
试件编号	纤维体 积含量	批次号 (板)	试验温度 (°C)	应变率 (1/s)	$E_2^e$ (GPa)	比例极限 (MPa)	$F_2^{e=0.02}$ (MPa)	$F_2^{e=0.2}$ (MPa)	$F_2^{cu}$ (MPa)	$\varepsilon_2^{cf}$ %	$V_{21}^e$	备注
94-H63	0.32.4	1-5410417-1	23	0.0008	151				1271			
94-H64	0.32.4	1-5410417-1	23	0.0008	157				1287			
94-H65	0.32.4	2-5410418-1	23	0.0008	155				1314			
94-H66	0.32.4	2-5410418-1	163	0.0008	147				1030			
94-H67	0.32.4	2-5410418-1	163	0.0008	150				1028			
94-H68	0.32.4	2-5410418-1	163	0.0008	148				1030			
94-H69	0.32.4	2-5410418-1	371	0.0008	140				783			
94-H70	0.32.4	2-5410418-1	371	0.0008	149				772			
94-H71	0.32.8	2-5410418-1	371	0.0008	147				785			
96-J65	0.29.0	1-7353451-1	23	0.0001	161				1332			
96-J66	0.28.9	1-7353451-1	23	0.0001	158				1349			
96-J88	0.29.7	1-7353451-2	163	0.0001								
96-J89	0.30.0	1-7353451-2	163	0.0001	144				1044			
96-K11	0.30.0	1-7353451-3	371	0.0001	139				815			
96-K12	0.29.8	1-7353451-3	371	0.001	140				851			
96-P89	0.28.8	2-7353451-5	23	0.0001	159				1355			
96-P90	0.28.4	2-7353451-5	23	0.0001	164				1348			
96-Q11	0.27.3	2-7353451-6	163	0.0001	140				1020			
96-Q12	0.27.3	2-7353451-6	163	0.0001	136				1011			
96-Q31	0.28.1	2-7353452-4	371	0.0001	144				780			
96-Q32	0.28.1	2-7353452-4	371	0.00001	154				776			
96-Q65	0.29.8	3-7353451-9	23	0.0001	159				1359			
96-Q66	0.29.0	3-7353451-9	23	0.0001	161				1347			
96-Q87	0.29.5	3-7353451-10	163	0.0001	143				1058			
96-Q88	0.28.9	3-7353451-10	163	0.0001	139				1038			
96-Q99	0.28.9	3-7353452-6	371	0.0001	133				802			
96-RO8	0.29.7	3-7353452-5	371	0.0001	158				789			

无载荷-位移数据  
在初始装夹时破坏

表C4.2(f) (完)

试件 编号	试验 日期	失效 部位	伸长率 (%)	收缩小 方式	面积 (mm <sup>2</sup> )	载荷 (N)	最大 载荷 (N)	宽度 (mm)	厚度 (mm)	初始 长度 (mm)	最终 长度 (mm)	最终 宽度 (mm)	最终 厚度 (mm)	筛选数据		计算数据		
														试验前形状: 直边	试验前壁厚:	表面状态: 接收状态	机械加工: 尚压水, 磨削	试验环境: 试验室空气
94-H63			31.35	39812	15.42	2.03												64.5
94-H64			31.29	40256	15.39	2.03												64.5
94-H65			31.48	41368	15.49	2.03												64.5
94-H66			31.55	32472	15.52	2.03												64.5
94-H67			31.61	32472	15.54	2.03												64.5
94-H68			31.55	32472	15.52	2.03												64.5
94-H69			31.55	24688	15.52	2.03												64.5
94-H70			31.42	24243	15.47	2.03												64.5
94-H71			30.90	24243	15.39	2.01												64.5
96-J65			36.19	48219	15.93	2.27												
96-J66			36.26	48930	15.94	2.28												
96-J88			35.35		15.96	2.22												
96-J89			35.03	36364	15.93	2.20												
96-K11			35.03	28558	15.95	2.20												
96-K12			35.23	29981	15.94	2.21												
96-P89			36.45	49375	15.94	2.29												
96-Q90			36.97	49920	15.95	2.32												
96-Q11			38.39	39144	15.92	2.41												
96-Q12			38.52	38966	15.96	2.41												
96-Q31			37.35	29136	15.91	2.35												
96-Q32			37.29	28913	15.93	2.34												
96-Q65			35.29	47942	15.94	2.21												
96-Q66			36.26	48841	15.94	2.27												
96-Q87			35.42	37454	15.85	2.24												
96-Q88			36.32	37721	15.95	2.28												
96-Q99			36.39	29180	15.95	2.28												
96-R08			35.23	27801	15.91	2.21												