

MIL-HDBK-17F Vol.5  
2002年6月17日

# 复合材料手册

第五卷 陶瓷基复合材料

二〇〇四年九月



NOT MEASUREMENT  
SENSITIVE

MIL-HDBK-17-5  
Volume 5 of 5  
17 JUNE 2002

DEPARTMENT OF DEFENSE  
HANDBOOK  
**COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK**  
VOLUME 5. CERAMIC MATRIX COMPOSITES



This handbook is for guidance only. Do not cite this document as a requirement.

AMSC N/A

AREA CMPS

DISTRIBUTION STATEMENT A. Approved for public release; distribution unlimited.



## 译 者 序

MIL-HDBK-17《复合材料手册》是由美国国防部下属的MIL-HDBK-17协调委员会编制，有关复合材料性能表征、性能数据和在结构中应用指南的军用手册，它是对美国和欧洲过去30余年复合材料研究、设计和使用经验的全面总结，同时也是美国陆海空三军、NASA（美国国家航空和宇宙航行局），FAA（美国民航管理局）及工业界应用复合材料及其结构的最具权威的指导文件。该委员会成立于1970年代初期（MIL-HDBK-17A于1971年1月颁布），美国数百位复合材料专家参与了手册的编写和改版。该手册原名《聚合物基复合材料手册》分为三卷，迄今已进行过6次改版，内容得到了不断的更新和补充。它们是：

第一卷《结构材料表征用聚合物基复合材料指南》

第二卷《聚合物基复合材料性能》

第三卷《聚合物基复合材料的使用、设计和分析》

最新版本是2002年6月17日颁布的MIL-HDBK-17F版本，此次改版不仅对聚合物基复合材料增添了大量内容，体现了近年来技术和应用的飞跃发展，而且增加了金属基复合材料和陶瓷基复合材料（包括碳-碳复合材料）的内容，书名改为《复合材料手册》，并增加了两卷，即：

第四卷《金属基复合材料》

第五卷《陶瓷基复合材料》

鉴于该手册对我国复合材料研究及其应用有着重要的意义，中国飞机强度研究所新结构研究中心、西北工业大学超高温复合材料重点实验室和国防科技工业标准化研究中心联合组织了本手册的翻译出版，为了保证翻译质量，参与这项工作的多数人员都是长期从事复合材料研究和应用工作的专家，全书由沈真统校。

本书的翻译出版还得到了中国航空工业第一集团公司科技发展部宋国珍、德固萨太平洋有限公司胡培、北京航空航天大学杨乃宾和中国飞机强度研究所102组刘俊石、孙坚石、沈薇和徐国栋的大力支持，其中第四卷和第五卷的翻译出版得到了国防973项目的支持，在此一并表示感谢。

译校工作组  
2004年7月



## 前 言

1. 经批准，本复合材料手册系列，MIL-HDBK-17，适用于国防部的所有部门与机构。
2. 本手册仅作为指南使用。不得将此手册作为要求引用。如果用作要求，承包商不必强制遵守。这个指令仅只是国防部的要求；并不适用于联邦航空局（FAA）或其他政府机构。
3. 手册力求反映聚合物（有机物），金属及陶瓷基复合材料的最新信息。为了保持手册的完整性和先进性，将不断对这手册进行审阅和修订。给秘书处的文件应当直接送到：Materials Sciences Corporation, MIL-HDBK-17 Secretariat, 500 Office Center Drive, Suite 250, Fort Washington, PA 19034。
4. MIL-HDBK-17提供了聚合物（有机）、金属、和陶瓷基复合材料的指南和材料性能。目前，这个手册的前三卷专注于飞机和宇航飞行器应用的聚合物基复合材料，但并不仅限于此。关于金属基复合材料（MMC）和陶瓷基复合材料（CMC），包括碳-碳复合材料（C-C），则分别收入第四和第五卷。
5. 这个标准化的手册由国防部和联邦航空管理局共同开发和维护，并将其作为双方共同努力的成果。
6. 本手册所包含的信息来源于材料生产商、工业界、政府资助的研究、公开文献、与研究研究工作实验室以及所有参与MIL-HDBK-17协调工作部门的交流。
7. 本手册中包含的信息和数据在出版前已与工业界、美国陆军、美国海军、美国空军、NASA、以及美国联邦航空局的代表一起，进行了整理与评定。
8. 可以由文献自动处理与成果服务部门得到这个文件的副本与修订本：The Document Automation and Production Service (DAPS), Bldg. 4D, (DODSSP/ASSIST), 700 Robbins Avenue, Philadelphia, PA 19111-5094。
9. 有益的评论（建议、增加、删节），以及可以用来完善本文件的任何相关数据，应当使用此文件结尾处提供的标准文件改进建议（DD Form 1426）或信函，提交：U.S. Army Research Laboratory, Weapons and Materials Research Directorate, Attn: AMSRL-WM-MA, Aberdeen Proving Ground, MD 21005-5069。



# 美国军用手册 MIL-HDBK-17F “复合材料手册”

## 译校工作组

顾问：张立同 孙侠生

组长：沈 真

副组长：成来飞 杨胜春 萧雪梅 柴亚南

成员：（按姓氏笔划排列）

丁惠梁 马祖康 王宝生 王 炜 王 健 王 林 石定杜

孙曼林 羊 姓 华云峰 李 野 李新祥 李武铨 杨文彬

陈普会 陈 晋 陈照峰 张开达 郑锡涛 武文明 顾志芬

高列义 徐继南 陶梅贞 崔德渝 童贤鑫 谢鸣九

编辑：王 健 杨胜春

美国军用手册 MIL-HDBK-17F “复合材料手册”

### 第五卷译校名单

翻译：王宝生 王 炜 王 林 华云峰 杨文彬 陈 晋 陈照峰  
武文明 高列义

校对：成来飞 丁惠梁 沈 真



# 目 录

## Part A：引言和指南

第1章 MIL-17指南和规程 .....	1
1.1 引言 .....	1
1.1.1 陶瓷基复合材料（CMC）工作组的目标 .....	1
1.1.1.1 数据审核工作组的目标和任务 .....	2
1.1.1.2 材料与工艺工作组的对象、目标与目的 .....	2
1.1.1.3 结构分析和设计程序工作组的远景、目标及目的 .....	2
1.1.1.4 试验工作组的远景、目标及目的 .....	3
1.2 目的 .....	4
1.3 范围 .....	4
1.3.1 Part A: 引言和指南 .....	4
1.3.2 Part B: 设计的可支持性 .....	4
1.3.3 Part C: 试验 .....	5
1.3.4 Part D: 数据要求和数据集 .....	5
1.4 文件的使用和限制 .....	5
1.4.1 信息来源 .....	5
1.4.2 数据的使用和应用指南 .....	5
1.4.3 强度性能和许用值的术语 .....	6
1.4.4 文献的使用 .....	6
1.4.5 商标和产品名的使用 .....	6
1.4.6 毒性、对健康的危害和安全性 .....	6
1.4.7 消耗臭氧的化学物质 .....	6
1.5 批准程序 .....	7
1.6 符号、缩写以及单位体系 .....	8
1.6.1 符号和缩写 .....	8
1.6.1.1 组分的性能 .....	13
1.6.1.2 单层与层压板 .....	14
1.6.1.3 下标 .....	15
1.6.1.4 上标 .....	16
1.6.1.5 缩写词 .....	17
1.6.2 单位制 .....	20
1.7 定义 .....	21

第2章 引言、历史和概述 .....	40
2.1 历史和概述 .....	40
2.2 应用 .....	41
第3章 工艺、表征和制造 .....	43
3.1 CMC体系、工艺、性能和应用 .....	43
3.1.1 CMC工艺方法 .....	43
3.1.1.1 化学气相渗透（CVI）CMC .....	43
3.1.1.2 直接金属氧化（DIMOX） .....	45
3.1.1.3 聚合物转化陶瓷 .....	47
3.1.1.4 碳-碳复合材料 .....	50
3.1.1.5 氧化物体系——烧结/热压 .....	51
3.1.1.6 溶胶-凝胶工艺 .....	51
3.1.1.7 熔体渗透 .....	55
3.1.1.8 反应工艺 .....	57
3.1.1.9 纤维独石（FM） .....	58
3.1.1.10 混杂体系 .....	60
3.2 纤维增强体系和技术 .....	61
3.2.1 引言——CMC中增强体的作用和功能 .....	61
3.2.2 连续纤维 .....	61
3.2.2.1 氧化物纤维 .....	61
3.2.2.2 SiC长丝 .....	63
3.2.2.3 小直径SiC基纤维 .....	65
3.2.2.4 碳纤维 .....	66
3.2.3 连续陶瓷纤维的高温性能 .....	74
3.2.3.1 碳纤维 .....	75
3.2.4 非连续增强体——晶须、颗粒和自增韧 .....	75
3.3 界面相/界面技术和方法 .....	75
3.3.1 引言 .....	75
3.3.1.1 纤维界面和界面层的作用及要求 .....	76
3.3.1.2 制备纤维界面层 .....	77
3.3.2 界面组分 .....	79
3.3.2.1 碳 .....	79
3.3.2.2 氮化硼 .....	79
3.3.2.3 氧化物 .....	80
3.3.3 其他 .....	82
3.4 纤维织构的制备和成形 .....	82
3.4.1 概述 .....	82
3.4.2 纤维织构 .....	82

3.4.2.1	无纬布 .....	84
3.4.2.2	2-D机织组织 .....	84
3.4.2.3	3-D组织 .....	84
3.4.2.4	2-D编织组织 .....	84
3.4.2.5	3-D编织组织 .....	84
3.4.3	机织和编织织物的制造商 .....	84
<b>3.5</b>	<b>外部防护界面层 .....</b>	<b>85</b>
3.5.1	外部界面层功能 .....	85
3.5.1.1	环境保护 .....	85
3.5.1.2	热控制 .....	85
3.5.1.3	磨损和磨蚀 .....	85
3.5.1.4	信号控制 .....	85
3.5.1.5	空气动力表面的控制 .....	85
3.5.2	组分和制造方法 .....	85
3.5.2.1	组分和结构 .....	86
3.5.2.2	制造方法 .....	86
3.5.3	工程注意事项 .....	86
3.5.3.1	热力学相容性 .....	86
3.5.3.2	界面层工艺相容性 .....	86
3.5.3.3	机械相容性 .....	86
3.5.3.4	部件几何形状可界面层性 .....	87
3.5.3.5	界面层的环境稳定性 .....	87
3.5.4	CMC外部界面层举例 .....	87
<b>3.6</b>	<b>表征方法（化学的和微观结构的） .....</b>	<b>87</b>
3.6.1	块体复合材料 .....	87
3.6.1.1	组分 .....	87
3.6.1.2	密度 .....	87
3.6.1.3	孔隙率 .....	87
3.6.1.4	微结构 .....	87
3.6.1.5	缺陷 .....	87
3.6.1.6	其他物理性能 .....	87
3.6.2	纤维/增强体 .....	88
3.6.2.1	组分 .....	88
3.6.2.2	密度 .....	88
3.6.2.3	孔隙率 .....	88
3.6.2.4	微结构 .....	88
3.6.2.5	缺陷 .....	88
3.6.2.6	浸润剂 .....	88
3.6.2.7	滑移 .....	88

3.6.2.8 其他物理性能 .....	88
3.6.3 基体 .....	88
3.6.3.1 组分 .....	88
3.6.3.2 密度 .....	88
3.6.3.3 孔隙率 .....	88
3.6.3.4 微结构 .....	88
3.6.3.5 缺陷 .....	88
3.6.3.6 其他物理性能 .....	88
3.6.4 界面 .....	89
3.6.4.1 组分/化学相 .....	89
3.7 CMIC无损评定方法(缺陷表征) .....	89
3.7.1 需要和要求 .....	89
3.7.2 成本 .....	90
3.7.3 标准 .....	90
3.7.4 目前的方法和状态 .....	90
3.7.4.1 孔隙率 .....	91
3.7.4.2 密度 .....	93
3.7.4.3 要求的热性能 .....	94
3.7.4.4 缺陷探测 .....	95
3.7.4.5 NDE/NDC的使用检测 (ISI) .....	95
3.7.5 正在研究中的方法 .....	96
3.8 原始材料的质量控制 .....	96
3.9 机械加工 .....	96
<b>第4章 最终产品的质量控制.....</b>	<b>97</b>
4.1 引言 .....	97
4.2 质量保证 .....	97
4.3 材料性能的验证 .....	97
4.4 统计的过程控制 .....	97
<b>第5章 应用、各种情况的历史和经验教训.....</b>	<b>97</b>
<b>参考文献 .....</b>	<b>98</b>
<b>PART B 设计和可支持性</b>	
<b>第6章 设计和分析 .....</b>	<b>101</b>
6.1 引言 .....	101
6.2 设计考虑的问题 .....	101
6.2.1 CMC设计指南.....	101

6.2.2 CMC设计系统的状态.....	101
6.2.3 CMC部件的设计和发展.....	101
6.2.4 设计许用值 .....	101
6.3 设计要求 .....	101
6.3.1 静力和蠕变载荷——机械, 热, 应力/蠕变断裂, 热条痕(缺陷) .....	101
6.3.2 低周疲劳 .....	101
6.3.3 高周疲劳 .....	101
6.3.4 热循环 .....	101
6.3.5 热-机械疲劳 .....	102
6.4 设计准则 .....	102
6.4.1 耐久性要求 .....	102
6.4.2 损伤容限 .....	102
6.5 数据要求 .....	102
6.5.1 剔除试验 (Killer tests) .....	102
6.5.1.1 环境调节和预裂纹 .....	102
6.5.1.2 载荷 .....	102
6.5.1.3 在定常应力下的梯级温度蠕变.....	102
6.5.1.4 在定常温度下的梯级应力蠕变.....	102
6.5.1.5 低周疲劳试验 .....	102
6.5.1.6 高周疲劳试验 .....	102
6.5.2 具有结构外形的试件 .....	102
6.5.3 具有层间裂纹的复合材料“T”型子元件 .....	102
6.6 接头 .....	103
6.6.1 无热接头设计 .....	103
6.6.2 无热卷曲衬垫 .....	103
6.6.3 无热平板衬垫 .....	103
6.6.4 肋加强衬垫 .....	103
6.6.5 复合材料紧固件设计 .....	103
第7章 可支持性 .....	104
7.1 引言和术语 .....	104
7.2 支持性要素 .....	104
7.2.1 系统工程和一体化 .....	104
7.2.2 连接 .....	104
7.2.3 可检性 .....	104
7.2.4 可修理性 .....	104
7.2.5 可维护性 .....	104
7.2.6 环境依顺性 .....	104
7.2.7 支持的实施 .....	104

7.2.8 后勤要求 .....	104
------------------	-----

## PART C 试验

第8章 热-力学-物理试验方法——总览 .....	105
---------------------------	-----

8.1 引言 .....	105
8.1.1 积木式方法 .....	105
8.1.2 试验级别和数据的使用 .....	106
8.1.2.1 结构复杂性级别 .....	106
8.1.2.2 数据应用分类 .....	106
8.2 试验计划的编制 .....	107
8.2.1 概述 .....	107
8.2.2 基于统计性能的基准方法和替代方法 .....	107
8.2.3 数据等同问题 .....	107
8.2.4 试验方法选择 .....	108
8.2.5 母体样本和规模 .....	108
8.2.6 材料和工艺的变异 .....	108
8.2.7 材料使用极限 .....	108
8.2.8 非大气环境试验 .....	108
8.2.9 数据归一化 .....	108
8.2.10 数据文件 .....	108
8.2.11 应用情况所特有的试验要求 .....	108
8.3 推荐的试验矩阵 .....	108
8.3.1 材料筛选 .....	108
8.3.2 材料收证 .....	109
8.3.3 材料验收试验矩阵 .....	110
8.3.4 替代材料等同性试验矩阵 .....	110
8.3.5 一般材料/结构元件试验矩阵 .....	110
8.3.6 基准值的替代方法 .....	110
8.3.7 为使用MIL-HDBK-17基准值的数据证实 .....	110
8.4 数据处理和文件要求 .....	110
8.4.1 引言 .....	110
8.4.2 由复合材料得出的单层性能 .....	110
8.4.3 数据归一化 .....	110
8.4.3.1 归一化理论 .....	110
8.4.3.2 归一化方法 .....	111
8.4.3.3 归一化理论的实际应用 .....	112
8.4.4 数据文件的要求 .....	112

<b>第9章 提交MIL-HDBK-17数据用的材料试验和表征 .....</b>	<b>113</b>
9.1 引言 .....	113
9.2 材料和工艺规范要求 .....	113
9.3 数据取样的要求 .....	113
9.4 试验方法的要求 .....	113
9.4.1 热 .....	113
9.4.1.1 热传导率 .....	113
9.4.1.2 扩散率 .....	114
9.4.1.3 膨胀 .....	115
9.4.1.4 比热 .....	115
9.4.1.5 热冲击 .....	115
9.4.1.6 热疲劳 .....	116
9.4.2 力学性能 .....	119
9.4.2.1 拉伸 .....	119
9.4.2.2 压缩 .....	120
9.4.2.3 剪切 .....	120
9.4.2.4 弯曲 .....	121
9.4.2.5 断裂 .....	122
9.4.3 物理性能 .....	122
9.4.3.1 密度 .....	122
9.4.3.2 电性能 .....	123
9.4.3.3 弹性常数 .....	123
9.4.3.4 体积含量 .....	124
9.4.3.5 尺寸规格 .....	124
9.4.4 化学性能 .....	124
9.4.5 电性性能 .....	124
9.4.6 环境试验 .....	124
<b>第10章 增强体评估 .....</b>	<b>141</b>
10.1 引言 .....	141
10.2 力学性能 .....	141
10.2.1 弹性（泊松比，模量） .....	141
10.2.2 强度（FT, RT） .....	141
10.2.3 蠕变/蠕变断裂 .....	141
10.2.4 疲劳 .....	141
10.3 热性能 .....	141
10.3.1 热膨胀 .....	141
10.3.2 热传导率 .....	141
10.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损等） .....	141

10.3.4 氧化 .....	141
<b>第11章 基体材料评估.....</b>	<b>142</b>
11.1 引言 .....	142
11.2 力学性能 .....	142
11.2.1 弹性（泊松比，模量） .....	142
11.2.2 强度（FT, RT） .....	142
11.2.3 蠕变/蠕变断裂 .....	142
11.2.4 疲劳 .....	142
11.3 热性能 .....	142
11.3.1 热膨胀 .....	142
11.3.2 热传导率 .....	142
11.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损等） .....	142
11.3.4 氧化 .....	142
11.3.5 其他物理性能（粉末或预成形件性能） .....	142
<b>第12章 界面材料评估.....</b>	<b>143</b>
<b>第13章 复合材料评估.....</b>	<b>143</b>
13.1 引言 .....	143
13.2 力学性能 .....	143
13.2.1 弹性（泊松比，模量） .....	143
13.2.2 强度（HT, RT）（ILT/ILS） .....	143
13.2.3 蠕变/蠕变断裂 .....	143
13.2.4 疲劳 .....	143
13.2.5 开孔拉伸 / 压缩强度（缺口敏感性） .....	143
13.2.6 界面的剪切性能 .....	143
13.3 环境性能 .....	143
13.3.1 热膨胀 .....	143
13.3.2 热传导率 .....	143
13.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损、盐雾等） .....	143
13.3.4 环境影响（氧化、腐蚀等） .....	144
13.3.5 氧化 .....	144
13.4 界面反应（脱胶、扩散等）（7.9） .....	144
13.5 热冲击阻抗 .....	144
13.6 电性能 .....	144
13.7 绝缘性能 .....	144
13.8 冲击阻抗 .....	144
13.9 静态和动态疲劳 .....	144

13.10 比例极限 .....	144
13.11 层间剪切性能 .....	144
13.12 断裂应变 .....	144
13.13 应力-应变曲线 .....	144
<b>第14章 组合件试验——问题综述 .....</b>	<b>145</b>
14.1 引言 .....	145
14.2 连接试验 .....	145
14.2.1 定义 .....	145
14.2.2 失效模式 .....	145
14.2.3 热影响 .....	145
14.2.4 连接构型 .....	145
14.2.5 设计要求 .....	145
14.2.6 材料挤压强度 .....	145
14.2.7 开孔拉伸/压缩强度 .....	145
14.2.8 热-机械疲劳强度 .....	145
14.2.9 蠕变和应力断裂 .....	145
14.2.10 紧固件取证试验 .....	145
14.3 管 .....	145
<b>第15章 机械加工和研磨 .....</b>	<b>146</b>
15.1 引言 .....	146
15.2 机械加工考虑事项 .....	146
15.3 模具要求 .....	146
15.4 试验件准备 .....	146
<b>PART D 数据要求及数据集</b>	
<b>第16章 数据提交、格式和要求 .....</b>	<b>147</b>
16.1 引言 .....	147
16.2 目的 .....	147
16.3 格式和单位 .....	147
16.4 设计性能 .....	147
<b>第17章 统计方法 .....</b>	<b>176</b>
17.1 引言 .....	176
17.1.1 基于统计的性能的计算方法概述 .....	176
17.1.2 计算机软件 .....	176
17.1.3 符号 .....	176

17.1.4 统计术语 .....	176
<b>17.2 背景 .....</b>	<b>176</b>
17.2.1 基于统计的设计许用值 .....	176
17.2.2 非结构数据的基准值 .....	176
17.2.3 存在批次-批次变异时的基准值 .....	176
17.2.4 批、板和混合 .....	176
17.2.5 确定基准值的采样尺寸指南 .....	176
<b>17.3 基于统计的材料性能计算 .....</b>	<b>176</b>
17.3.1 计算程序指南 .....	177
17.3.2 子体相容性——结构型数据或非结构型数据 .....	177
17.3.3 检查异常数据 .....	177
17.3.4 非结构型数据的基准值 .....	177
17.3.5 结构型数据的基准值 .....	177
17.3.6 探索性数据分析 .....	177
17.3.7 计算方法实例 .....	177
<b>17.4 各种统计学方法 .....</b>	<b>177</b>
17.4.1 离散系数的置信区间 .....	177
17.4.2 工艺控制的统计方法 .....	177
17.4.3 替代材料的统计方法 .....	177
17.4.4 典型的应力-应变曲线 .....	177
<b>17.5 统计表和近似 .....</b>	<b>177</b>
<b>第18章 CMC性能数据 .....</b>	<b>178</b>
<b>18.1 引言 .....</b>	<b>178</b>
18.1.1 手册中数据的结构 .....	178
18.1.2 数据的表述 .....	178
18.1.3 材料代码和文件 .....	178
18.1.4 材料体系代码 .....	178
18.1.5 材料取向代码 .....	178
18.1.6 符号、缩写和单位体系 .....	178
18.1.7 定义 .....	178
<b>18.2 CMC体系——性能数据 .....</b>	<b>178</b>
18.2.1 CMC体系 <sup>1*</sup> .....	178
18.2.2 CMC 体系 <sup>2*</sup> .....	183
18.2.3 CMC 体系 <sup>3*</sup> .....	189
18.2.4 CMC 体系 <sup>4*</sup> .....	195
18.2.5 CMC 体系 <sup>5*</sup> .....	198
18.2.6 CMC 体系 <sup>6*</sup> .....	204
<b>附录A LCF和破坏载荷中剩余强度减缩公式推导（公式6-11） ..</b>	<b>209</b>

## Part A：引言和指南

### 第1章 MIL-17指南和规程

本手册的文件给出了工程的方法论，用于建立基于统计学理论的陶瓷基复合材料性能数据。手册中还对已有满足本手册出版要求数据的一些相关的复合材料体系，提供了其数据汇总。另外，还综述了有关的复合材料支持技术和生产技术及其常见惯例做法。

#### 1.1 引言

通常，标准化的、基于统计学基础上的材料性能数据，是一个高效的工程开发过程所必需的；不仅材料的供应商需要这些数据，工程用户和材料体系的最终用户也需要这些数据。由于材料的固有性能并不依赖于某一特定的应用项目，数据开发的方法论和材料性能数据可适用于一系列不同的工业部门。这些性能数据也是在统计学基础上建立设计值的主要技术基础，这些设计值是得到采购或认证机构（采购机构，例如美国国防部（DoD）的下属部门；认证机构，例如联邦航空局的某个部门）接受认可的。评定陶瓷基复合材料的固有性能，是MIL-HDBK-17 第五卷的中心问题。材料的性能在不断的改进，因此在手册中报告的性能为本手册出版时的典型性能。

##### 1.1.1 陶瓷基复合材料（CMC）工作组的目标

###### 陶瓷基复合材料整体前景：

MIL-HDBK-17是对现有和新出现的先进陶瓷基复合材料进行表征，并提供统计性能与特性数据的主要与权威来源。它反映了最好的可用数据，和进行表征、试验、分析和设计的最好方法，并包括了支持部件设计方法需要的数据开发和使用指导。

###### 目标：

- 成功使用陶瓷基复合材料的框架
- 为搜集设计者使用陶瓷基复合材料时所需的有统计意义的关键数据，对工业界提供指导。
- 适当的突出性能要求及公认的试验步骤——包括基于设计部门要求考虑确定精度的水准
- 对陶瓷基复合材料和结构的表征、加工、试验、设计和利用，给出指导和建议
- 现有和新出现陶瓷基复合材料体系表征、性能与特性数据的主要与权威来源
- 对材料数据和结构可靠性进行统计分析的建议。

###### 目的：

- 为今后成功应用陶瓷基复合材料建立框架
- 为搜集设计者使用陶瓷基复合材料时所需的有统计意义的关键数据，对工业界提供指导
- 基于设计部门的要求，识别适当的性能和公认的试验步骤——包括考虑确定精度的水准和所需性能的优先顺序

- 对陶瓷基复合材料和结构的表征、加工、试验、设计和利用，给出指导和建议
- 对现有和新出现陶瓷基复合材料体系的表征、性能与特性数据，提供主要与权威来源
- 对材料数据和结构可靠性的统计分析提供建议

#### 1.1.1.1 数据审核工作组的目标和任务

- 为今后成功应用陶瓷基复合材料建立框架
- 为搜集设计者使用陶瓷基复合材料时所需的有统计意义的关键数据，对工业界提供指导
- 识别适当的性能和试验步骤并确定优先顺序
- 基于设计部门要求建立需要的精度水平
- 提供一种方法以确定对材料性能起重要作用的材料关键特性（组成，微结构和缺陷），可能包括加工信息
- 用上述方法，对选择的陶瓷基复合材料族系，收集其代表性的数据集；这些材料包括有大量可用数据的材料，直到数据虽少但有很大潜力的材料。

#### 1.1.1.2 材料与工艺工作组的对象、目标与目的

**远景：**

- 成为陶瓷基复合材料的工程材料与结构组成，生产和表征等信息的首要权威来源。

**目标：**

- 定义陶瓷基复合材料中有关组成、结构和加工信息的基本要素，这些要素是在设计、选择、制造和使用陶瓷基复合材料结构时所必需的。
- 规定准备用于进行陶瓷基复合材料及其组分的表征方法和步骤
- 对陶瓷基复合材料技术，历史概要，应用，优点，陶瓷复合材料体系，生产方法，质量控制和可支持性，进行全面的评述

**目的：**

- 为陶瓷基复合材料数据表，定义材料和工艺数据的要素与格式
- 以术语、方法、格式和优先权的方式，定义材料和工艺数据包的要求
- 对表征陶瓷基复合材料及其组分的方法和步骤，提供详细的指导
- 准备陶瓷基复合材料手册的引言部分（历史、应用、优点、陶瓷基复合材料体系等）
- 准备陶瓷基复合材料手册的材料、工艺和制造部分；并准备了陶瓷基复合材料手册的可支持性部分

#### 1.1.1.3 结构分析和设计程序工作组的远景、目标及目的

**远景：**

- 成为陶瓷基复合材料的工程材料和结构设计与分析所需信息和方法的主要权威来源

**目标：**

- 确定采用陶瓷基复合材料制造的工程结构的设计和分析所需的信息和方法
- 规定材料性质和性能的输入，并验证设计分析所需的数据
- 识别得到上述数据所需的试验参数，以及规定解释这些数据所需的分析方法，以保

证与设计需求的相容性

目的:

- 定义陶瓷基复合材料设计分析所需的输入
- 确定设计和分析陶瓷基复合材料及结构的途径和方法
- 确定设计和分析陶瓷基复合材料结构连接的途径和方法

#### 1.1.1.4 试验工作组的远景、目标及目的

远景:

- 成为试验和表征陶瓷基复合材料及其组分材料的推荐/规定方法的主要权威来源

目标:

- 识别用于陶瓷基复合材料及其组分材料的一致认为恰当的现有标准试验方法
- 对于还没有这些标准方法的情况,为陶瓷基复合材料及其组分材料开发适当的标准试验方法提供帮助

目的:

- 在手册中加入适合于陶瓷基复合材料及其组分的现有标准;在手册中加入适合于陶瓷基复合材料及其组分的新标准/标准草案。

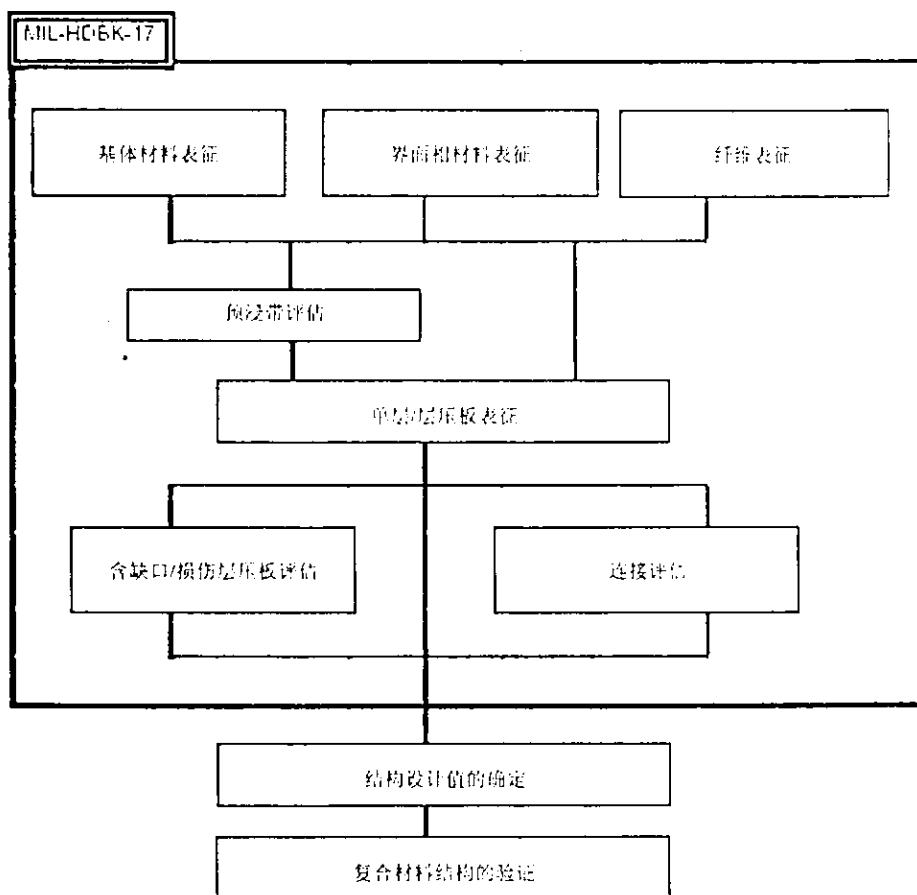


图1.1 阴影区表示MIL-HDBK-17的主要内容

## 1.2 目的

MIL-HDBK-17的首要目标是，将与陶瓷基复合材料的工程数据开发中，有关性能的表征试验、数据处理和数据记录等方法加以标准化。为了达到这个目标，对于其可用性能数据满足规定要求的复合材料体系，MIL-HDBK-17公布了其性能。另外，MIL-HDBK-17对与复合材料相关其他技术问题提供了指导，包括典型陶瓷基复合材料的材料选择、材料规格、材料加工、设计、分析、质量控制和修理。因而，MIL-HDBK-17第五卷成为单独一卷，分成四个部分，作以下方面的来源：

- Part A：用文件规定了材料性能数据开发方法的指南，可用于一系列不同的需要；并规定了在本手册发表数据时所需要满足的具体要求。大多数采购和认证机构倾向于，有些甚至要求：在关键应用中使用的复合材料体系，要么按照Part A的指南进行表征，要么选自Part D所公布的材料体系。
- Part B：作为附加技术指南、及从与陶瓷基复合材料有关的不同学科所取得的经验教训的来源。
- Part C：提供对材料性能试验方法和统计评定的技术指导。
- Part D：提供可能的设计数据仓库。所发布的材料体系性能汇总中提供的数据，满足MIL-HDBK-17三个数据类别（筛选、临时和正式批准）的任一标准。

## 1.3 范围

就国防部而言，本手册仅提供指导性意见；不得作为标准来引用；如果被引用，也不是承包方必须执行的。并且手册仅是国防部的要求，不适用于联邦航空管理局（FAA）或者其他政府机构。

MIL-HDBK-17第五卷的四个部分，是陶瓷基复合材料技术信息的总参考源，包括：

### 1.3.1 Part A：引言和指南

这部分包括用于确定复合材料体系、其组分和一般结构部件性能的指南，包括试验方案、试验矩阵、采样、状态调节、试验程序选择、数据记录、数据处理、统计分析和其他相关问题。Part A中包括了建立材料性能数据的总指导原则，和在MIL-HDBK-17中发布材料数据的具体要求。

必须强调的是，手册中区分了材料的基准值（材料许用值）和设计许用值。本手册所关注的焦点是作为复合材料体系内在性能的材料基准值。而设计许用值，虽然其通常源于材料的基准值却是与应用相关的，并包括了可能进一步影响结构强度或刚度的特殊附加考虑。另外，在建立针对应用的设计值时，还可能有附加的采购或认证机构要求，这些都超出了MIL-HDBK-17手册的范围。

### 1.3.2 Part B：设计的可支持性

PART B提供了复合材料结构设计、制造、分析和可支持性，以及如何按照Part A提供的指南利用Part D所提供的材料性能数据的方法与经验教训。在Part B中讨论的内容包括材料及工艺、质量控制、设计与分析、连接、可靠性、厚复合材料和可支持性问题。

### **1.3.3 Part C: 试验**

Part C讨论了向MIL-17手册提交数据有关的试验方法和要求。

### **1.3.4 Part D: 数据要求和数据集**

Part D包含了一些基于统计的性能数据，这些数据满足具体的MIL-HDBK-17母体采样和数据文件要求，覆盖了通常感兴趣的材料组分和材料体系。Part D公布的这些数据经过了数据审核工作组的审核，并得到全面协调组的批准（关于MIL-HDBK-17的协调组和工作组见1.1节）。在可得到经批准的数据时，将收录新材料体系的数据并增加现有材料体系的补充数据。

Part D决定包含的材料性能覆盖了一定范围的可能使用情况，只要可能，就关注于其材料的上、下环境限；因此，应用的具体环境不会限制到这些数据的使用。特别注意了对于数据的统计处理和分析。如果有中间环境条件下的数据，将对确定材料响应和环境的关系提供附加的定义点。

虽然为具体的应用项目建立结构设计值的过程，开始时可能以Part D所公布的数据为基础，但是大多数应用问题还需要收集附加的数据，特别是当需要的数据来自层压板或更高复杂程度的结构时。另外，必须向采购机构或认证机构证明，所制造出的材料与Part D数据所用的典型材料相当，这通常要包括有限的试验和数据比较。在Part A已给出了进行这些材料/工艺等同性评估的一般指导，然而，这种评估过程的很多细节还有赖于采购或认证机构的决定。

## **1.4 文件的使用和限制**

### **1.4.1 信息来源**

MIL-HDBK-17中包含的信息来源于材料生产商和制造商、宇航工业界、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手册协调工作的参与者。本文件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、FAA（美国联邦航空管理局）、能源部以及NASA（国家航空航天局）的代表的协作和审核。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。为了使手册保持为当前最新的技术状态以保证其完整性和准确性，将对手册进行不断的评估和修订。

### **1.4.2 数据的使用和应用指南**

这里的所有数据都基于特定环境下、主要为单轴准静态受载的小尺寸试验件<sup>\*</sup>。用户的责任是，要确定本手册的数据是否适用于其面临的具体问题，并按需要对数据进行转化，或依比例对数据进行处理，以使用于：

- 多向层压板中；
- 具有不同特征尺寸和几何形状的结构中；

<sup>\*</sup>如无说明，试验一律按照注明的具体实验方法实施，重点是用美国材料试验协会（ASTM）关于先进复合材料的标准试验方法获得的数据，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缺乏此方法时，或者当可以得到用非标准但常用试验方法得出的数据时，则可以认可由非标准试验方法得到的数据并予发表，在数据文件中注明了所用的具体试验方法，关于试验方法的认可标准，见第一卷2.5.5节的论述。

- 在多向应力状态下；
- 当曝露于不同环境时，及/或
- 当受到非静态载荷作用时。

在Part D中对这些问题及其他方面问题进行了进一步的讨论。对手册数据的具体应用超出了MIL-HDBK-17的范围和职责；所以手册具体条款的适用性和解释，可能需要得到某个相应采购或认证机构的批准。

#### **1.4.3 强度性能和许用值的术语**

手册的意图是为生成材料性能数据提供指导，包括在极端环境下以统计为基础的强度数据，极端环境涵括了大多数中间的具体应用环境条件。其主导思想是要避免因为具体应用问题而制约了一般的材料性能表征程序。如果仍能得到在中间环境条件下的数据，可用其来更完全地定义材料性能和环境对性能影响之间的关系。然而，在某些情况下，对于复合材料体系的环境限制可能依赖于应用问题，而在另一些情况下，可能得不到环境限制处的数据。

在Part D列表给出了现有的基于统计基础的强度数据。当应力和强度分析能力允许进行单层水平的安全裕度计算时，把这些数据作为建立结构设计许用值的起点将是有用的。对此情况，也可把MIL-HDBK-17的强度基准值称为材料的设计许用值。取决于具体的应用问题，可能必须由MIL-HDBK-17中没有提供的附加层压板、部件或者更高级别试验数据，来经验地确定某些结构设计许用值。

#### **1.4.4 文献的使用**

尽管在每章结束的部分都列出了许多文献，但还是要注意，这些引用的信息可能或者未必都符合数据开发的一般指南，或者未必符合本手册中有关的数据发布具体要求。这些文献仅仅是为了提供帮助，而未必是各具体领域中相关附加信息的完整或权威来源。

#### **1.4.5 商标和产品名的使用**

使用商标和专有产品名称本身，并不是美国政府或MIL-HDBK-17协调小组对那些产品的许可承认。

#### **1.4.6 毒性、对健康的危害和安全性**

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

#### **1.4.7 消耗臭氧的化学物质**

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

## 1.5 批准程序

本手册的内容是由MIL-HDBK-17协调组发展和批准的，如图1.5所示：协调组每八个月就会考虑有关手册内容的更改和增添。这个组的组成包括主席团成员、协调员、秘书处、工作组主席和现任的工作组成员（其中除了生产厂商和学术、研究机构的代表外，还包括来自美国及国际的各个采购、取证部门的代表）。每次MIL-HDBK-17协调组会议，大约在计划会期的八周前用邮件通知参加者，并在会议结束八周后把会议的备忘录邮寄给参加者。

虽然这些工作组的职能相似，它们还是可以分为两类：执行的，一个负有监管职责的工作组，由工作组主席、手册的主席团、协调员和秘书处组成；以及常设的，包括数据审核、材料与工艺、结构分析与设计、以及试验工作组。协调组及工作组的组成与组织、以及文件更改批准所遵循的程序，均汇总并分别发表在MIL-HDBK-17协调组成员指南中，可以从协调员或秘书处得到。

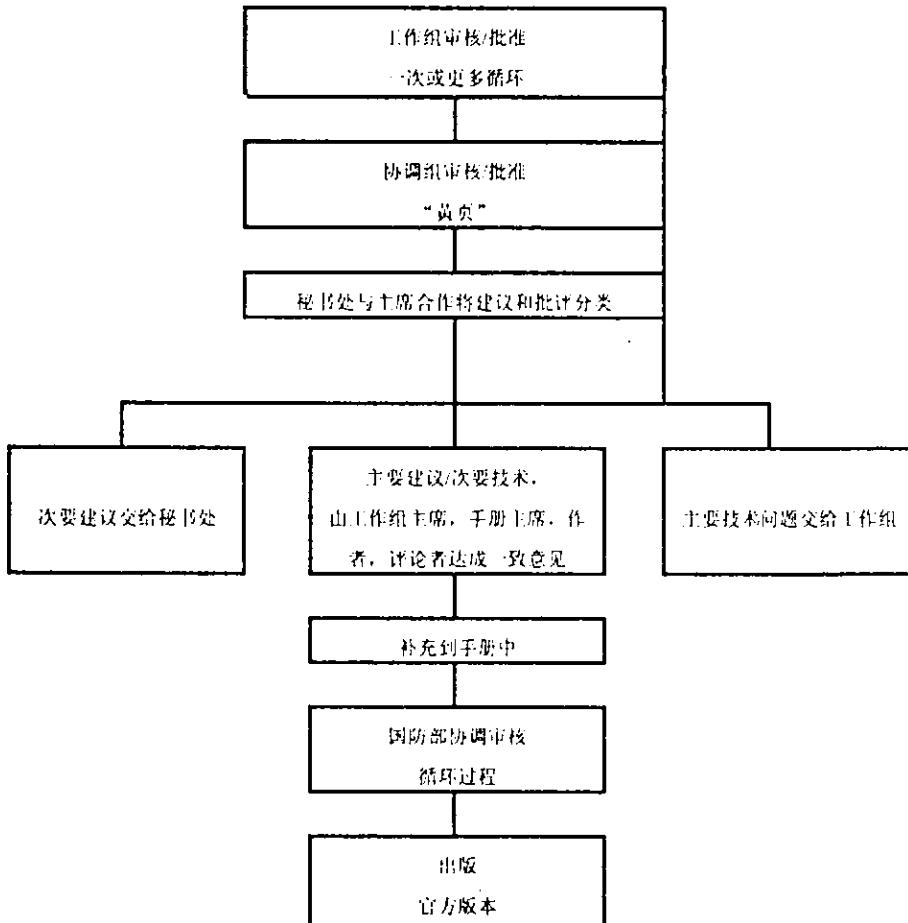


图1.5 批准程序

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）。

关于将材料性能数据收入MIL-HDBK-17的申请，应该向协调员或秘书处提出，同时附上在Part D第17章中指定的文件。已经建立了数据源信息包，来帮助那些考虑为MIL-HDBK-17提供数据的人们，这可以从协调员或秘书处那里得到。秘书处对所提交的每份数据进行审查和分析，并在可能的下次协调组会议上提出一份汇总，供数据审查工作组进行评审。收入新材料的选择，是由MIL-HDBK-17协调组掌握控制的。出于实际的考虑，排除了包括所有的先进复合材料的做法，但将会进行合理的努力，以适时地增加一些有用的复合材料体系。

## 1.6 符号、缩写以及单位体系

这部分定义了在MIL-HDBK-17中使用的符号和缩写，并描述了采用的单位体系。尽可能保持其普通用法。这部分信息主要来源于文献1.6(a), 1.6(b)和1.6(c)。

### 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Part C 16.1.3节。单层/层压板材料性能用到的坐标和力学性能符号汇总见图1.6.1。

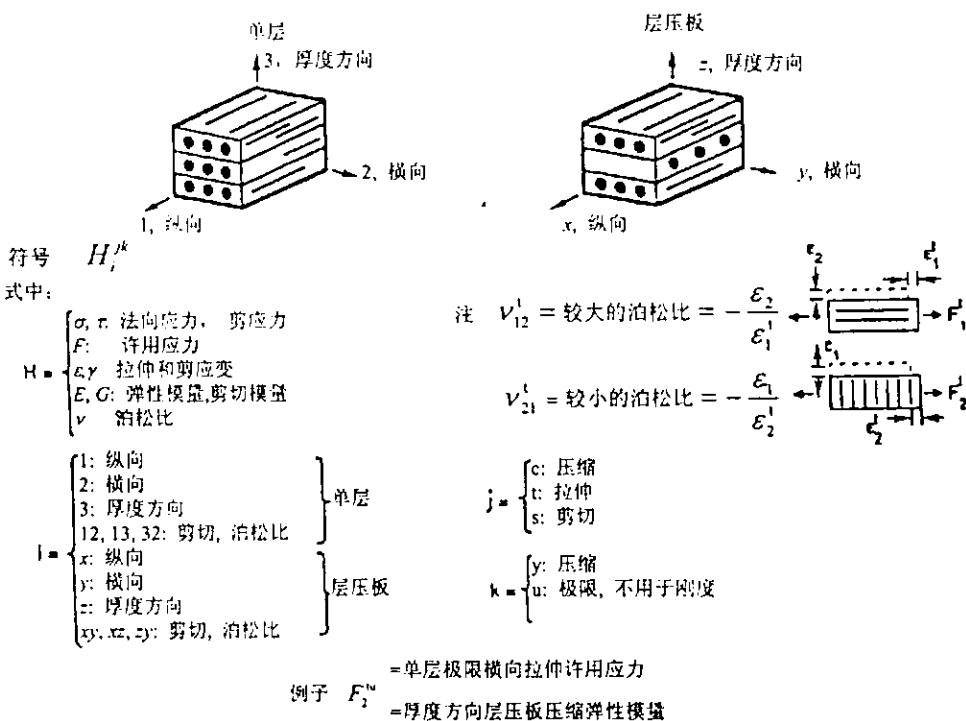


图1.6.1 力学性能的符号

- 当用作为上标或下标时，符号 $f$ 和 $m$ 分别表示纤维和基体。
- 表示应力类型的符号（如 $\sigma_y$ ——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。
- 铺层序号的顺序标示符（如 $1, 2, 3$ 等）用于上标位置，且必须用括号括起来，以区别于数学的幂指数。
- 其他标示符，只要明确清楚，可用于下标位置，也可用于上标位置。
- 由上述规则导出的复合符号（即基本符号加标示符），以下列的特定形式表示。

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

A	(1)面积 ( $\text{m}^2, \text{in}^2$ ) (2)交变应力与平均应力之比 (3)力学性能的A基准
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 ( $\text{mm}, \text{in}$ )
B	(1)力学性能的B基准值 (2)双轴比率
Btu	英制热单位
b	宽度 ( $\text{mm}, \text{in}$ )，例如与垂直载荷的挤压面或受压板宽度，或十字梁截面宽度
C	(1)比热 ( $\text{kJ/kg}^\circ\text{C}, \text{Btu/lb}^\circ\text{F}$ ) (2)摄氏的
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
c	柱屈曲的根部固定系数
$\bar{c}$	蜂窝夹芯高度 ( $\text{mm}, \text{in}$ )
cpm	每分钟周数
D	(1)直径 ( $\text{mm}, \text{in}$ ) (2)孔或紧固件的直径 ( $\text{mm}, \text{in}$ ) (3)板的刚度 ( $\text{N-m}, \text{lbf-in}$ )
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 ( $\text{GPa}, \text{Msi}$ )
$E'$	储能模量 ( $\text{GPa}, \text{Msi}$ )
$E''$	损耗模量 ( $\text{GPa}, \text{Msi}$ )

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

$K_{lc}$	平面应变断裂韧性 (MPa/m, ksi/in)
$K_N$	按经验计算的疲劳缺口因子
$K_s$	板或圆筒的剪切屈曲系数
$K_t$	(1)理论的弹性应力集中因子 (2)蜂窝夹芯板的 $t_w/c$ 比
$K_v$	电介质强度, 绝缘强度 (KV/mm, V/mil)
$K_x, K_y$	板或圆筒的压缩屈曲系数
$k$	单位应力的应变
$L$	圆筒、梁或柱的长度 (mm, in)
$L'$	柱的有效长度 (mm, in)
lb	磅
$M$	外力矩或力偶 (N-m, in-lbf)
Mg	百万克 (兆克)
MPa	兆帕斯卡 (s)
$m$	(1)质量 (kg, lb) (2)半波数 (3)米 (4)斜率
N	(1)破坏时的疲劳循环数 (2)层压板中的单层数 (3)板的面内分布力 (lbf/in) (4)牛顿 (5)归一化
NA	中性轴
$n$	(1)在一个集内的次数 (2)半波数或全波数 (3)经受的疲劳循环数
$P$	(1)作用的载荷 (N, lbf) (2)曝露参数 (3)概率 (4)比电阻、电阻系数 ( $\Omega$ )
$P_f$	破坏荷载
$P^u$	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 ( $\text{mm}^3, \text{in}^3$ )
$q$	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
<i>r</i>	(1)半径 (mm, in) (2)根部半径 (mm, in) (3)减缩比 (回归分析)
<i>S</i>	(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
<i>S<sub>a</sub></i>	疲劳中的应力幅值 (MPa, ksi)
<i>S<sub>c</sub></i>	疲劳限 (MPa, ksi)
<i>S<sub>m</sub></i>	疲劳中的平均应力 (MPa, ksi)
<i>S<sub>max</sub></i>	应力循环中应力的最大代数值 (MPa, ksi)
<i>S<sub>min</sub></i>	应力循环中应力的最小代数值 (MPa, ksi)
<i>S<sub>R</sub></i>	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
<i>s</i>	(1)弧长 (mm, in) (2)蜂窝夹层芯格尺寸 (mm, in)
<i>T</i>	(1)温度 (°C, °F) (2)作用的扭矩 (N·m, in-lbf)
<i>T<sub>d</sub></i>	热解温度 (°C, °F)
<i>T<sub>F</sub></i>	曝露的温度 (°C, °F)
<i>T<sub>g</sub></i>	玻璃化转变温度 (°C, °F)
<i>T<sub>m</sub></i>	熔融温度 (°C, °F)
<i>t</i>	(1)厚度 (mm, in) (2)曝露时间 (s) (3)持续时间 (s)
<i>V</i>	(1)体积 (mm <sup>3</sup> , in <sup>3</sup> ) (2)剪力 (N, lbf)
<i>W</i>	(1)重量 (N, lbf) (2)宽度 (mm, in) (3)瓦特
<i>x</i>	沿一个坐标轴的距离
<i>Y</i>	关联构件几何学特性与裂纹尺寸的无因次系数
<i>y</i>	(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
<i>Z</i>	截面模量, $I/y$ (mm <sup>3</sup> , in <sup>3</sup> )
$\alpha$	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)

$\delta$	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
$[\eta]$	本征黏度
$\eta^*$	动态复黏度
$\nu$	泊松比
$\rho$	(1)密度 (kg/m <sup>3</sup> , lb/in <sup>3</sup> ) (2)回转半径 (mm, in)
$\rho_c$	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>i</i> 的平面上沿 <i>j</i> 方向的应力 ( <i>I</i> , <i>j</i> = 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

### 1.6.1.1 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)
$E_x^g$	预浸玻璃稀纱布沿纤维方向或沿织物经向的弹性模量 (MPa, ksi)
$E_y^g$	预浸玻璃稀纱布在垂直于纤维方向或织物经向的弹性模量 (MPa, ksi)
$G^f$	纤维材料剪切模量 (MPa, ksi)
$G^m$	基体材料剪切模量 (MPa, ksi)
$G_y^g$	预浸玻璃稀纱布剪切模量 (MPa, ksi)
$G_{cx}$	夹芯沿x轴的剪切模量 (MPa, ksi)
$G_{cy}$	夹芯沿y轴的剪切模量 (MPa, ksi)
$l$	纤维长度 (mm, in)
$\alpha^f$	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)
$\alpha_x^g$	预浸玻璃稀纱布沿纤维方向或织物经向的热膨胀系数 (m/m°C, in/in°F)
$\alpha_y^g$	预浸玻璃稀纱布垂直纤维方向或织物经向的热膨胀系数 (m/m°C, in/in°F)
$\nu^f$	纤维材料泊松比
$\nu^m$	基体材料泊松比
$\nu_x^g$	由纵向(经向)伸长引起横向(纬向)收缩的玻璃稀纱布泊松比
$\nu_y^g$	由横向(经向)伸长引起纵向(纬向)收缩的玻璃稀纱布泊松比
$\sigma_z$	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)

### 1.6.1.2 单层与层压板

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

$A_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 6$ )	(面内) 拉伸刚度 (N/m, lbf/in)
$B_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 6$ )	耦合矩阵 (N, lbf)
$C_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 6$ )	刚度矩阵元素 (Pa, psi)
$D_x, D_y$	弯曲刚度 (N·m, lbf-in)
$D_{xy}$	扭转刚度 (N·m, lbf-in)
$D_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 6$ )	弯曲刚度 (N·m, lbf-in)
$E_1$	平行于纤维或经向的单层杨氏模量 (MPa, Msi)
$E_2$	垂直于纤维或经向的单层杨氏模量 (MPa, Msi)
$E_x$	沿参考轴X的层压板杨氏模量 (MPa, Msi)
$E_y$	沿参考轴Y的层压板杨氏模量 (MPa, Msi)
$G_{12}$	在12平面内的单层剪切模量 (MPa, Msi)
$G_{xy}$	在参考平面xy内的层压板剪切模量 (MPa, Msi)
$h_i$	第 <i>i</i> 铺层或单层的厚度 (mm, in)
$M_x, M_y, M_{xy}$	(板壳分析中的) 弯矩及扭矩分量 (N·m/m, in-lbf/in)
$n_f$	每个单层在单位长度上的纤维数
$Q_x, Q_y$	分别垂直于x及y轴的板截面上, 与z平行的剪力 (N/m, lbf/in)
$Q_{ij}$ ( $i, j=1, 2, 6$ )	折算刚度矩阵 (Pa, psi)
$u_x, u_y, u_z$	位移向量的分量 (mm, in)
$u_x^0, u_y^0, u_z^0$	层压板中面的位移向量分量 (mm, in)
$V_V$	空隙含量 (用体积百分数表示)
$V_f$	纤维含量或纤维体积 (用体积百分数表示)
$V_g$	玻璃稀纱布含量 (用体积百分数表示)
$V_m$	基体含量 (用体积百分数表示)
$V_x, V_y$	边缘剪力或支承剪力 (N/m, lbf/in)
$W_f$	纤维含量 (用重量百分数表示)
$W_g$	玻璃稀纱布含量 (用重量百分数表示)
$W_m$	基体含量 (用重量百分数表示)
$W_s$	单位表面积的层压板重量 (N/m <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 $v_{xy}$ 与 $v_{yx}$ 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*
$\rho_c$	单层的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ , $\text{lbf}/\text{in}^3$ )
$\bar{\rho}_c$	层压板的密度 ( $\text{kg}/\text{m}^3$ , $\text{lbf}/\text{in}^3$ )
$\phi$	(1)广义角坐标 ( $^\circ$ ) (2)偏轴加载中, $x$ 轴与载荷方向之间的夹角 ( $^\circ$ )

### 1.6.1.3 下标

认为下列下标记号是MIL-HDBK-17的标准记号:

1, 2, 3	单层的自然直角坐标 (1是纤维方向或经向)
A	轴
a	(1)胶粘的 (2)交变的
app	表观的
byp	旁路的
c	(1)复合材料体系, 特定的纤维/基体组合。复合材料作为一个整体, 区别于单一的组分。当与上标撇号(')连用时, 指夹层芯子 (4)临界的
cf	离心力
e	疲劳或耐久性
eff	有效的
eq	等效的
f	纤维
g	玻璃稀纱布
H	圈
i	顺序中的第 <i>i</i> 位置
L	横向
m	(1)基体 (2)平均
max	最大
min	最小
n	(1)序列中的第 <i>n</i> 个 (最后) 位置 (2)标准的、法向的
p	极的、极性的
s	对称
st	加筋条
T	横向

\*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。

<i>t</i>	在 <i>t</i> 时刻的参量值
<i>x, y, z</i>	广义坐标系
$\Sigma$	总和或求和
$o$	初始点数据或参考数据
( )	表示括号内的项相应于特定温度的格式。RT——室温(21°C, 70°F)；除非另有说明，所有温度以华氏温度(°F)表示。

#### 1.6.1.4 上标

在MIL-HDBK-17中，认为下列上标记号是标准的。

<b>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
<b>cc</b>	压缩折曲
<b>cr</b>	压缩屈曲
<b>e</b>	弹性
<b>f</b>	纤维
<b>g</b>	玻璃稀纱布
<b>is</b>	层间剪切
<b>(i)</b>	第 <i>i</i> 铺层或单层
<b>lim</b>	限制，用指限制载荷
<b>m</b>	基体
<b>ohc</b>	开孔压缩
<b>oht</b>	开孔拉伸
<b>p</b>	塑性
<b>pl</b>	比例极限
<b>rup</b>	断裂
<b>s</b>	剪切
<b>scr</b>	剪切屈曲
<b>sec</b>	割线(模量)
<b>so</b>	偏轴剪切
<b>T</b>	温度或热
<b>t</b>	拉伸
<b>tan</b>	切线(模量)
<b>u</b>	极限的
<b>y</b>	屈服
<b>'</b>	二次(模量)，与下标c连用时指蜂窝夹芯的性能。
<b>CAI</b>	冲击后压缩

\* 译者注：在译文中一般情况下用摄氏温度(°C)表示。

### 1.6.1.5 缩写词

在MIL-HDBK-17中，使用下列缩写词。

AA	Atomic absorption (原子吸收)
ACUT	Air coupled ultrasonic testing system (空气耦合超声试验系统)
AES	Auger electron spectroscopy (Auger电子能谱术)
AIA	Aerospace Industries Association (航宇工业协会)
ANL	Argonne National Laboratory (阿尔贡国家试验室)
ANOVA	Analysis of variance (变异分析)
ARL	US Army Research Laboratory (美国陆军研究所)
ASNT	American Society of Nondestructive Testing (美国非破坏性试验协会)
ASTM	American Society for Testing and Materials (美国材料试验学会)
BMI	Bismaleimide (双马来酰亚胺)
BVID	Barely visible impact damage (目视勉强可见冲击损伤)
CA	Commercially available (商业可得的)
CAI	Compression after impact (冲击后压缩)
CAT	Computer aided tomography (计算机辅助的断层分析)
CCA	Composite cylinder assemblage (复合材料圆柱组合)
CFCC	Continuous fiber ceramic composite (连续纤维陶瓷基复合材料)
CLS	Crack lap shear (裂纹搭接剪切)
CPT	Cured ply thickness (固化后单层厚度)
CTA	Cold temperature ambient (低温环境)
CTD	Cold temperature dry (低温干态)
CTE	Coefficient of thermal expansion (热膨胀系数)
CV	Coefficient of variation (离散系数)
CVD	Chemical vapor deposition (化学气相沉积)
CVI	Chemical vapor infiltration (化学气相渗透)
DCB	Double cantilever beam (双悬臂梁)
DDA	Dynamic dielectric analysis (动态电介质分析)
DLL	Design limit load (设计限制载荷)
DMA	Dynamic mechanical analysis (动态力学分析)
DoD	Department of Defense (国防部)
DoE	Department of Energy (能源部)
DSC	Differential scanning calorimetry (差示扫描量热法)
DT	Dye penetrant testing (染色渗透探伤)
DTA	Differential thermal analysis (示差热分析)
ECT	Eddy current testing (涡流探伤)
ENF	End notched flexure (端部缺口弯曲)
EOL	End-of-life (寿命结束)
ESCA	Electron spectroscopy for chemical analysis (化学分析的电子能谱术)
ESR	Electron spin resonance (顺磁共振、电子自旋共振)
ETW	elevated temperature wet (湿热)

FAA	Federal Aviation Administration (联邦航空管理局)
FAW	Fiber aerial weight (纤维面积重量)
FFF	Field flow fractionation (场溢分馏法)
FM	Fibrous monolith (纤维整料)
FMEA	Failure Modes Effects Criticality Analysis (失效模式影响的危险度分析)
FOD	Foreign object damage (外来物损伤)
FTIR	Fourier transform infrared spectroscopy (傅立叶变换红外光谱法)
FWC	Finite width correction factor (有限宽修正系数)
GC	Gas chromatography (气相色谱分析)
GSCS	Generalized Self Consistent Scheme (广义自相容方案)
HAW	Hypersonic aerodynamic weapons (高超音速空气动力学武器)
HDT	Heat distortion temperature (热扭变温度)
HPLC	High performance liquid chromatography (高精度液相色层分离法)
ICP	Inductively coupled plasma emission spectroscopy (感应耦合等离子体发射光谱学)
ID	Identification (标识, 鉴定, 鉴别)
IR	Infrared spectroscopy (红外光谱学)
ISI	In-service inspection (服役中检查、探伤)
ISS	Ion scattering spectroscopy (离子散射光谱学)
JANNAF	Joint Army, Navy, NASA and Air Force (陆、海军、NASA及空军联合体)
LA	Limited availability (有限适用)
LC	Liquid chromatography (液相色层分离法)
LCF	Low cycle fatigue (低周疲劳)
LPT	Laminate plate theory (层压板理论)
LSS	Laminate stacking sequence (层压板铺层顺序)
MI	Melt infiltration (熔体渗透)
MMB	Mixed mode bending (混合型弯曲)
MOL	Material operational limit (材料工作极限)
MPIT	Magnetic particle testing (磁性粒子探伤)
MS	(1) Mass spectroscopy (质谱分析, 质谱(分析)法) (2) Military standard (军用标准)
M.S.	Margin of safety (安全裕度)
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)
MW	Molecular weight (分子量)
MWD	Molecular weight distribution (分子量分布)
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 (非破坏性表征, 无损表征)
NDE	Nondestructive evaluation (非破坏性评定, 无损评定)
NDI	Nondestructive inspection (无损检测)

NDT	Nondestructive testing (无损试验)
NMR	Nuclear magnetic resonance (核磁共振)
OSL	Observed significance level (观察的显著水平)
P	Prototype (原型, 典型)
PC	Pyrolytic carbon (热解碳)
PP	Polymer pyrolysis (聚合物热解)
PEEK	Polyether ether ketone (聚醚醚酮)
PT	Dye penetrate testing (染色渗透探伤)
RA	Reduction of area (面积减少量)
RBSN	Reaction bonded silicon nitride (反应结合的氮化硅)
RDS	Rheological dynamic spectroscopy (流变动态波谱学)
RH	Relative humidity (相对湿度)
RMS	Root-mean-square (均方根)
RT	Room temperature (室温)
RTA	Room temperature ambient (室温大气环境)
RTD	Room temperature dry (室温干态)
RTM	Resin transfer molding (树脂转移模塑)
RV	Reentry vehicle (再入航天器, 或火箭重返地球大气层的部分)
SACMA	Suppliers of Advanced Composite Materials Association(先进复合材料供应商协会)
SBS	Short beam shear strength (短梁剪切强度)
SAE	Society of Automotive Engineers (汽车工程师协会)
SANS	Small-angle neutron scattering spectroscopy (小角度中子散射光谱学)
SEC	Size-exclusion chromatography (尺度筛析色谱法)
SEM	Scanning electron microscopy (扫描电子显微镜)
SFC	Supercritical fluid chromatography (超临界流体色谱法)
SI	International System of Units(Le Système International d'Unités) (国际单位制)
SIMS	Secondary ion mass spectroscopy (次级离子质谱 (法))
TBA	Torsional braid analysis (扭转编织分析)
TEM	Transmission electron microscopy (发射电子显微镜)
TGA	Thermogravimetric analysis (热解重量分析)
TLC	Thin-layer chromatography (薄层色谱法)
TMA	Thermal mechanical analysis (热力学分析)
TOS	Thermal oxidative stability (热氧化稳定性)
TVM	Transverse microcrack (横向微裂纹)
UDC	Unidirectional fiber composite (单向纤维复合材料)
UT	Ultrasonic testing (超声波探伤)
VNB	V-notched beam (V缺口梁)
WoF	Work of fracture (断裂功)
XCT	Xray computed tomography (计算机层析X-射线摄影术)
XD	Experimental development (试验进展)

### 1.6.2 单位制

遵照1991年2月23日的国防部指示5000.2, Part 6, Section M “使用公制系统”的规定, 通常, MIL-HDBK-17中的数据同时使用国际单位制(SI制)和美国习惯单位制(英制)。ASTM E-380, 《度量制实施标准》, 则对将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))中提供了使用SI制的进一步指南以及换算的因子:

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

表1.6.2列出了将MIL-HDBK-17数据由英制向SI制换算的因子。

表1.6.2 英制与SI制换算因子

由	换算为	乘以
Btu/in <sup>2</sup> s	W/m <sup>2</sup>	1.054246E+06
Btu-in (s·ft <sup>2</sup> ·°F)	W/(mK)	5.192204E+02
华氏度 (°F)	摄氏度 (°C)	$T_c = (T_f - 32)/1.8$
华氏度 (°F)	开氏度 (K)	$T_k = (T_f + 459.67)/1.8$
ft	m	0.3048000E-01
ft <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	9.290304E-02
ft/sec	m/s	3.048000E-01
ft/s <sup>2</sup>	m/s <sup>2</sup>	3.048000E-01
in	m	2.540000E-02
in <sup>2</sup>	m <sup>2</sup>	6.451600E-04
in <sup>3</sup>	m <sup>3</sup>	1.638706E-05
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
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>	gm/m <sup>2</sup>	7.0303696E+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)	4.448222E+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。

## 1.7 定义

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

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

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

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

**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。

**粘合（Adhesion）**——通过加力或联锁作用，或者通过二者同时作用，使得两个表面在界面处结合在一起的状态。

**胶粘剂（Adhesive）**——能通过表面粘合，把两种材料结合在一起的一种物质。在本手册里，专指所生成的连接部位能传递大结构载荷的那些结构胶粘剂。

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

**代表性样本（Aliquot）**——较大样本中一个小的代表性样本。

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

**大气环境（Ambient）**——周围的环境情况，例如压力与温度。

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

**角铺层（Angleply）**——任何由正、负 $\theta$ 铺层构成的均衡层压板，其中 $\theta$ 与某个参考方向成锐角。见正交铺层（Crossply）。

**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。

**纤维面积重量（Areal Weight of Fiber）**——单位面积预浸料的纤维重量，常用 $\text{g}/\text{m}^2$ 表示，换算因子见表1.3.2。

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

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

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

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

这个压力袋通常与外界相通。

**编织轴 (Axis of Braiding)** —— 编织的构型沿其伸展的方向。

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

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

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

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

**挤压面积 (Bearing Area)** —— 销子直径与试件厚度之积。

**挤压载荷 (Bearing Load)** —— 作用于接触表面上的压缩载荷。

**挤压屈服强度 (Bearing Yield Strength)** —— 指当材料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。

**偏离 (Bias)** —— 相对于经向的偏斜方向

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

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

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

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

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

**胶接 (Bond)** —— 用胶作粘接剂或不用胶，把一个表面粘着到另一个表面上。

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

**编织角 (Braid Angle)** —— 与编织轴之间的真实角度。

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

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

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

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

**Hercules 编织物 (Braid, Hercules)** —— 图案为三上三下 ( $3\times 3$ ) 的编织织物。

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

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

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

**二维编织物 (Braid, Two-Dimensional)** —— 沿厚度方向没有编织纱的编织织物。

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

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

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

**钎焊 (Braze)** —— 用填充材料将两种物质连接起来，所用填充材料的熔点低于被连接的任一种材料。

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

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

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

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

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

**碳纤维 (Carbon Fibers)** —— 将有机前驱体纤维（如人造纤维、聚丙烯腈 (PAN)）进行热解，再置于一种惰性气体内，从而生产出的纤维。这个术语通常可与“石墨”纤维 (graphite) 互相通用；然而，碳纤维与石墨纤维的差别在于，其纤维制造和热处理的温度不同，以及所形成纤维的碳含量不同。典型情况是，碳纤维在大约 $1\ 300^{\circ}\text{C}$  ( $2\ 400^{\circ}\text{F}$ ) 时进行碳化，经检验含有93%-95%的碳；而石墨纤维则在 $1\ 900\text{-}3\ 000^{\circ}\text{C}$  ( $3\ 450\text{-}5\ 450^{\circ}\text{F}$ ) 进行石墨化，经检验含有99%以上的元素碳。

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

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

**检查 (Censoring)** —— 如果每当观测值小于或等于 $M$ （大于或等于 $M$ ）时，记录其实

际观测值，则称数据在M处是右（左）检查的。若观测值超过（小于）M，则观测值记为M。

**CMC，陶瓷基复合材料(Ceramic Matrix Composite)** —— 一种包含两种或两种以上组分的材料，通常陶瓷基体是其主要组分，并加入另外的组分以增强，增韧、和/或增强其热物理性能。

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

**表征 (Characterization)** —— 描述材料组分和的结构（包括缺陷）的那些特点，这些特点对于材料的准备、性能研究、或使用、以及对材料的再生产（再现）都是重要的。

**化学气相渗透 (Chemical Vapor Infiltration (CVI))** —— 一种陶瓷基复合材料的制作工艺，利用将气相反应物渗透到纤维/晶须预成形件中，产生化学反应并且形成/沉积固态基体。

**化学气相沉积 (Chemical Vapor Deposition (CVD))** —— 使一种材料在另一种固态材料表面沉积的工艺，该工艺是气态反应物在固体表面发生化学反应的结果。

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

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

**共固化 (Cocuring)** —— 指在同一固化周期中，在将一个复合材料层压板固化的同时，将其胶接到其他已经准备的表面上（见二次胶接Secondary Bonding）。

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

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

**准直 (Collimated)** —— 使平行。

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

#### **部件 (Components)**

- **关键部件 (Critical Component)** —— 其失效将导致灾难性破坏或对整个系统有重大经济影响的部件。
- **主要部件 (Primary Component)** —— 其失效将明显降低系统性能，可能明显损伤系统中的其他部件，或会带来大的费用影响的部件。
- **次要部件 (Secondary Component)** —— 其失效会略微降低系统性能，不会明显损伤到系统中的其他部件，或费用影响很小的部件。
- **其他部件 (Other Components)** —— 其失效不会影响系统的近期性能，但可能降低系统中其他部件长期耐久性的部件。

**复合材料分类 (Composite Class)** —— 手册中，指复合材料的一种主要分类方式，其

分类按纤维体系和基体类型定义，如有机基纤维复合材料层压板。

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

**混合料 (Compound)** ——一种或多种聚合物与所有用于最终成品的材料的紧密混合物。

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

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

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

- (1)  $p\{\theta < \theta\} \leq 1 - \alpha$
- (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  $1 - \alpha$ 。

**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。

**连续纤维陶瓷复合材料 (Continuous Fiber Ceramic Composites, CFCC)** ——一种陶瓷基复合材料，其中增强相由连续长丝、纤维、纱、或经编（机织）织物组成。

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

**覆盖率 (Coverage)** ——表面上被编织物所覆盖部分的量度。

**龟裂 (Crazing)** ——在有机基体表面或表面下的可见细裂纹。

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

**蠕变 (Creep)** ——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。

**卷曲 (Crimp)** ——编织过程中在编织织物内产生的波纹。

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

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

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

**正交铺层 (Crossply)** ——指任何非单向的长纤维层压板，与角铺层的意义相同。在

某些文献中，术语“正交铺层”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。在本手册中，这两个术语被作为同义词使用。由于使用了层压板铺层方向代码，因而没有必要只为其中某一种基本铺层方向情况保留单独的术语。

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

**固化（Cure）(1)**——通过化学反应、或通过热或催化剂单独或联合作用，在加压或不加压情况下，改变材料的物理性能（通常从液态到固态）。

**固化（Cure）(2)**——通常在高温情况下，通过化学反应，即通过缩聚作用、闭环（作用）或添加物，不可逆地转变热固性树脂的性能。可通过添加固化（交联）剂，采用或不采用加热预加压固化周期，来完成固化。固化周期。

**固化周期（Cure Cycle）**——用来固化热固性树脂体系或预浸料的时间/温度/压力循环。

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

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

**变形（Deformation）**——由于施加载荷或外力所引起的试件形状变化。

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

**分层（Delamination）**——指层压板中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9000m长的纱、长丝、纤维或其他纺织纱线所具有的质量（克）。

**密度（Density）**——单位体积的质量。

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

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

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

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

**直接金属氧化（Directed Metal Oxidation）**——通过熔化金属和氧化剂的直接反应，形成陶瓷复合材料基体的方法。

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

**非连续纤维增强的陶瓷基复合材料（Discontinuous Fiber-Reinforced Ceramic Composite）**——用短切纤维增强的陶瓷基复合材料。

<sup>\*</sup>译者注：原文为A deliberate separation of a bonded joint or interface.

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

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

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

**延展性 (Ductility)** ——材料在出现断裂之前的塑性变形能力。

**耐久性 (Durability)** ——结构在其整个使用寿命期间保持强度和刚度的能力。

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

**伸长 (率) (Elongation)** ——在拉伸试验中，试件工作段长度的增加或伸长，通常用初始工作段的百分数来表示。

**洗出液 (Eluate)** ——(液相层析分析中)由分离塔析出的液体。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**单丝、长丝 (Filament)** ——纤维材料的最小单元。这是在抽丝过程中形成的基本单元，把它们聚集构成纤维束(以用于复合材料)。通常长丝的长度很长直径很小，长丝一

般不单独使用。当某些纺织长丝具有足够的强度和韧性时，可以用作为纱线。

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

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

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

**纬纱 (Fill)** ——机织织物中与经纱成直角、从布的织边到织边布置的纱线。

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

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

**首例基体开裂 (First Matrix Cracking)** ——第一个可测量出的基体微裂纹。

**固定影响 (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（见第一卷，8.1.4节。）

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

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

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

**工作段 (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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**坯布 (Greige)** ——指未经表面处理的织物。

**手工铺贴 (Hand Lay-up)** ——一种工艺过程，即把构件放到模具上或工作台上，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) 试验及维克 (Vickers) 试验。

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

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

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

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

**热压 (Hot pressing)** ——用升温和单轴压力达到所希望的密度和外形形状，来制造陶瓷件的方法。通过颗粒重新排列、粘性/塑性流、或扩散转移达到增加密度的效果。

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

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

**吸湿的 (Hygroscopic)** ——指能够吸纳并保存大气的湿气。

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

**夹杂 (Inclusion)** ——在材料或部件内部中出现的物理的或机械的不连续体，一般由固态、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元件的结构，作为一个单一、复杂、连续的整体进行铺贴和固化，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零件，而不是去分别制造这些结构元件后，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)** ——有关两个或多个相邻单层之间出现或存在的某个物体（如空隙）、事件（如断裂）或势场（如剪应力）的说明性术语。

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

**中间挤压应力 (Intermediate Bearing Stress)** ——指挤压的载荷-变形曲线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%）。

**中间相 (Interphase)** ——连续纤维增强陶瓷基复合材料中位于纤维与基体之间的界面区域，它们的结合度被控制以产生复合状的适度纤维。大多数（但不是全部）陶瓷基复合材料要求在界面区域有纤维界面层。对于颗粒、晶须和片晶增强的复合材料，界面层可能对增加强度、增加韧性、和提高热物理性能是必要的。

**层内的 (Intralaminar)** ——有关完全在某个单层内存在而与相邻单层无关的某些物体（如空隙）、事件（如断裂）、或势场（如应力）的说明性术语。

**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。

**挤卡状态 (Jammed State)** ——编织织物在受拉伸或压缩时的状态，此时，织物的变形情况取决于纱的变形性能。

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

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

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

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

**单层 (Lamina)** ——指层压板中一个单一的铺层或层片。

讨论：在缠绕时，一个单层就是一个层片。

**单层 (laminae)** ——单层 (Lamina) 的复数形式。

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

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

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

**铺贴 (Lay-up)** ——制造工艺，有关按照规定的顺序和取向将树脂浸渍的单层材料进行逐层叠合。

**液态渗透 (Liquid Infiltration)** ——通过用液体渗透使复合材料致密和通过可控工艺实现液固转变，达到预期的基体组成、密度、和性能。

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

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

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

**宏观应变 (Macro Strain)** ——指任何有限测量工作段范围内的平均应变；与材料的原子间距相比，这个工作段是个大值。

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

**毡子 (Mat)** ——用粘接剂把随机取向的短切纤维或卷曲纤维松散地粘合在一起而构成的一种纤维材料。

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

**材料取证(Material Qualification)**——公司或机构在验收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。（见第一卷8.1.4节）。

**基体 (Matrix)** ——基本上是均质的材料；复合材料的纤维体系被嵌入其中。

**基体开裂 (Matrix Cracking)** ——完全包含在基体中而不跨越通过增强体的开裂。

**基体贫乏区 (Matrix Starved Area)** ——复合材料中基体没有连续平滑包覆纤维的区域。

**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)。

**熔体渗透 (Melt Infiltration)** ——通过（会遇冷固化的）热液体的渗透或通过原位化学反应，使预加热预成形件/复合材料致密。

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

**微裂纹 (Microcracks)** ——有限尺寸的裂纹，通常是微观尺度的。

**注意：**在不同种类的体系中，微裂纹通常是由热残余应力导致的，或是由于对总体机械、化学或热作用条件的响应有局部差异而导致的。所发现典型微裂纹有复合材料中的基体裂纹，它们扩展透过整个薄层的厚度，平行于该层内的纤维方向，但是在陶瓷基复合材料中，这些裂纹也可能横过来垂直于增强纤维行进，并扩展穿过纤维束，或甚至透过整个试样或构件薄片的厚度。

**微应变 (Microstrain)** ——在工作段的长度可与材料的原子间距相比时的应变。

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

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

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

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

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

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

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

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

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。

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

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

**正态分布 (Normal Distribution)** ——一种双参数 ( $\mu$ ,  $\sigma$ ) 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：

$$f(x) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} \exp\left[-\frac{(x-\mu)^2}{2\sigma^2}\right] \quad 1.7(c)$$

(见第一卷 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直接计算这个比值。

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

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

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

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

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

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

**PAN纤维 (PAN Fibers)** ——由聚（丙烯腈）纤维经过受控热解而得到的增强纤维。

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

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

**颗粒增强的陶瓷基复合材料 (Particulate Reinforced Ceramic Matrix Composites)** ——一种陶瓷基复合材料，其增强成分是（不同于晶须或短纤维的）由等轴晶粒组成或片晶状的粒子。

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

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

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

**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，均匀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）。

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

**聚合物渗透/热解 (Polymer Infiltration/Pyrolysis)** ——通过渗透热固性聚合物的方法使复合材料致密化，聚合物的硬化和随后的热处理把聚合物转换成陶瓷基体。

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

**母体 (Population)** ——指要对其进行推论的一组测量值，或者，指在规定的试验条件下有可能得到的测量值全体。例如，“在相对湿度95%和室温条件下，碳/环氧树脂体系

A所有可能的极限拉伸强度测量值”。为了对母体进行推论，通常有必要对其分布形式作假设，所假设的分布形式也可称为母体（见第一卷，8.1.4节）。

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

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

**母体方差(Population Variance)**——母体离差的一种度量。

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

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

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

**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。

**预陶瓷聚合物(Preceramic Polymer)**——可以通过热处理转变成陶瓷的无机或有机金属聚合物（聚合物固化后）。

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

**(陶瓷基体)前驱体(Precursor (to Ceramic Matrix))**——一旦曝露在合适的加工条件下就被转换成陶瓷的聚合物材料。

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

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

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

**压力(Pressure)**——单位面积上的力或载荷。

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

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

**准各向同性层压板(Quasi-Isotropic Laminate)**——通过在几个或更多方向上铺层，达到近似各向同性的层压板。

**随机影响(Random Effect)**——由于某个外部（通常不可控）因素有特定量级的改变，测量值出现的变化（见第一卷，8.1.4节）。

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

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

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

**可靠性 (Reliability)** ——性能一致性的度量。

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

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

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

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

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

**室温大气环境 (RTA)** ——(1)在试验室大气相对湿度下， $23\pm3^{\circ}\text{C}$  ( $73\pm5^{\circ}\text{F}$ ) 的环境条件；(2)一种材料调节状态，即在紧随其压实/固化后，将材料储存在 $23\pm3^{\circ}\text{C}$  ( $73\pm5^{\circ}\text{F}$ ) 和最大相对湿度60%条件下。

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

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

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

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

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

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

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

**夹层结构 (Sandwich Construction)** ——一种结构壁板的概念，其最简单的形式是在两块较薄而且相互平行的结构板材中间，胶接一块较厚的轻型芯子。

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

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

**二次胶接 (Secondary Bonding)** ——通过胶粘剂胶接工艺，将两件或多件已固化的复合材料零件结合在一起，这个过程中唯一发生的化学反应或热反应，是胶粘剂自身的固化。

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

**残留应变 (Set)** ——当完全卸除产生变形的作用力后，物体中仍然残留的应变。

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

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

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

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

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

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

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

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

**管状织物 (sleevings)** ——管状编织织物的一般名称。

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

**泥浆渗透法 (Slurry Infiltration)** ——通过粒子-流体悬浮体的渗透再干燥，使复合材料/预成形件致密。也可以进行附加的热处理，以改善微结构、密度、相的组成、和/或晶体结构。

**溶胶 (Sol)** ——胶质固体粒子的分散液体，尺寸通常在5 nm和100 nm之间。

**溶胶-凝胶 (Sol-gel)** ——一种工艺，基于水解金属醇盐进行氧化物陶瓷的化学合成，以形成溶胶和凝胶；由于是流体，该溶胶适合于铸造和渗透。

**溶质 (Solute)** ——被溶解的材料。

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

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

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

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

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

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

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

**强度 (Strength)** ——材料能够承受的最大应力。

**应力 (Stress)** ——物体内某点处，在通过该点的给定平面上作用的内力或内力分量的

**烈度。** 应力用单位面积上的力 (lbf/in<sup>2</sup>, MPa等) 来表示。

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

**应力-应变曲线 (Stress-Strain Curve (Diagram))** —— 一种图形表示方法, 表示应力作用方向上试件的尺寸变化与作用应力的幅值的相互关系。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)** —— (见第一卷, 8.1.4节)。

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

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

**黏性 (Tack)** —— 预浸料的粘附性。

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

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

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

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

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

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

**容限 (Tolerance)** —— 允许一个参量变化的总量。

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

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

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

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

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

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

**捻度 (Twist)** ——纱或其他纺织原丝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)** ——材料不断裂而可承受的最大应力（拉伸，压缩或剪切），由试验中的最大载荷除以试样的初始横截面积而得。

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

**单向层压板 (Unidirectional Laminate)** ——采用非织物增强材料，且所有单层都按同一方向铺设而成的层压板。

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

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

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

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

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

**黏度 (Viscosity)** ——材料体内抵抗流动的一种性能。

**空隙 (Void)** ——复合材料内部所包容的任何小气泡或或接近真空的空穴。

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

**(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。（见第一卷，8.1.4节）。

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

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

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

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

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

**使用寿命 (Work Life)** ——在与催化剂、溶剂或其他组合成分混合以后，一个化合物

仍然适合于其预期用途的时间周期。

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

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

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

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

**XY平面 (XY 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。

## 第2章 引言、历史和概述

### 2.1 历史和概述

在整个历史时期中一直都在使用复合材料，例如在砖中加稻草，钢筋增强的水泥，和轻质的航宇结构。纤维增强的聚合物基复合材料在军事系统中的使用不断增加，并已经成为国防部减轻武器的关键手段。然而，由于聚合物基复合材料本身是以碳氢结构为基础，所以其本身受到使用温度的限制。对高密度金属的高温替代材料是陶瓷，它能够减重并具有抗高温和抗氧化的性能。

单相陶瓷对于小裂纹敏感并导致的脆断，严重限制了其独特性能（高温强度，低密度，化学稳定性，抗磨蚀性）在军事及宇航领域的应用。开发陶瓷复合材料和相应的缺陷容限的微结构，一直是过去二十多年的主要目标。

复合材料被定义为包含两相或更多相，并在组合中每一相都可明显区别的物质（见1.7节）。基于这个广泛的定义，陶瓷基复合材料（CMCs）被分成两类：非连续增强的和连续纤维增强的CMC。非连续增强CMC中包括粒子、片晶、晶须、短纤维、和原位增强的复合材料（包括纳米复合材料）。通常用单相陶瓷的成形技术，来加工包含非连续第二相的CMC，即用注射模塑，粉浆浇铸，带状铸造（tape casting），随后用烧结使陶瓷致密。相反地，对连续纤维陶瓷复合材料（CFCCs）则需要发展渗透（蒸汽，溶胶，熔体，液态预陶瓷聚合物）的方法，以使各种在连续纤维铺贴和无余量机织纤维预成形件中的陶瓷基体致密。可进一步将连续纤维增强陶瓷基复合材料分成碳纤维增强的碳复合材料（又叫做碳-碳复合材料）和其他复合材料。

非连续增强和连续纤维增强的复合材料，二者都使陶瓷构件减小了对灾难性热结构“脆性破坏”的敏感性。非连续增强和连续纤维增强CMC延迟裂纹起始和/或扩展的机理取决于材料增强体的性质（几何外形、数量和分布）。可以理解，在非连续和连续陶瓷基复合材料中的增强体导致不同的固有力学性能，不同的优点和不同的最终用途。碳-碳连续增强CMCs和非连续增强CMCs的一般优点列于表2.1中。

可通过测量断裂韧性来定量确定陶瓷对小缺陷、裂纹扩展、和失效的阻抗。断裂韧性和足够的统计力学性能数据，提供了设计者进行陶瓷结构分析和设计安全裕度所需的信息。

通常，单相陶瓷（不包括改造的增韧材料）的断裂韧性值不会超过 $5 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ( $4.5 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$ )。非连续增强CMC的典型值在 $7\text{--}12 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ( $6\text{--}10.92 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$ ) 之间。连续纤维CMC可达到 $20 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ( $18 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$ ) 左右，并能达到与金属体系相近的断裂韧性值 $30 \text{ MPa}\cdot\text{m}^{1/2}$  ( $27 \text{ ksi}\cdot\text{in}^{1/2}$ )，这取决于纤维织构。连续纤维增强的CMC和非连续增强的CMC在屈服强度、线性应力-应变比例极限和极限强度方面也表现出显著的差异，非连续晶须、原位增韧、和粒子纳米复合材料陶瓷可达到的屈服强度和极限强度接近于 $1000 \text{ MPa}$ 。

反之，连续纤维增强CMC的屈服强度和极限强度大约分别为 $75 \text{ MPa}$ 和 $350 \text{ MPa}$ 。对连续纤维增强CMC的高破坏应变，从而对高断裂韧性起主要作用的纤维，也决定了复合材料的承载（屈服强度和极限强度）能力。实际上不可能消除连续纤维CMC的基体中孔隙率的存在及其不均匀的分布。这些缺陷和纤维与陶瓷基体间的性能差异的耦合，对所谓的“基

体的开裂强度”起主要作用。一般来说，连续纤维增强CMCs的基体开裂强度和屈服强度两个值是一样的。一旦载荷超过了基体开裂强度，纤维和基体的载荷分配就改变了，从而应力-应变关系变成了非线性。

表2.1 不同类型CMC的特性

碳-碳复合材料	连续CMC	非连续CMC
特别好的高温力学性能	优异的高温力学性能	优异的高温力学性能
高比强度和比刚度	高比强度和比刚度	高的比强度和比刚度
高断裂韧性	高断裂韧性	较高的有用强度
尺寸稳定性	尺寸稳定性	好的断裂韧性但比连续CMC低
低的热膨胀	低的热膨胀	
高热冲击阻抗	良好的热冲击阻抗	热冲击阻抗不如连续CMC
好的失效模式	好的失效模式	
性能可剪裁	抗氧化性	可采用较便宜的传统工艺
可机加性	机械加工比较困难	机械加工昂贵
抗氧化性差	加工更加复杂和昂贵	

基于非氧化物的基体和纤维例如C和SiC的另一趋向，是在氧化和腐蚀环境下的寿命有限。考虑到设计安全原因，大多数非氧化物CMC部件被设计成在低于一般约为50 MPa的屈服强度条件下使用。对于短期应用情况，连续纤维增强CMC的高破坏应变特性允许其在超过比例极限的情况下使用。它的损伤容限性能提供了优异的抗热冲击环境能力和良好的失效模式。迄今，连续纤维增强CMC的应用涉及在较小机械载荷与严重热冲击环境下使用的结构构件或热防护件，一般是涡轮机和火箭发动机。

## 2.2 应用

碳-碳复合材料是一种成熟的技术。在非氧化的环境下，石墨状基体在2 204°C(4 000°F)仍能保持其强度。碳-碳复合材料的使用历史，可以追溯到30多年前的ICBM火箭喷嘴。在过去的15年中，军用和商用飞机的碳-碳刹车片已经发展成为CMC的最大单独市场。

碳-碳复合材料的轻质和在高温下具有的高刚度-重量比特性，不断激励人们资助军事论证项目如宇宙飞船的太阳能电池，雷达天线，反射镜支持结构，热防护层以及散热器。涡轮机发动机部件，返回式航天器的鼻锥，高超音速前缘构件也已得到验证的资助。

即将显现的碳-碳复合材料两用市场是电子封装。开发极高导电率的碳纤维和低成本的基体致密技术，为印刷电路板或多芯片模块基底、热平面、和其他热耗散部件提供了可能。表2.2(a)中汇总了许多这些应用情况。

非连续CMC正在商用方面经历最大的市场增长。晶须和第二相粒子增强的陶瓷刀具的销售额以每年45%的速度增长。对这种类型复合材料各种抗腐蚀和抗磨损应用正在涌现。铝浇铸混合器轴的保护套筒、热气过滤器、防火地板砖和许多其他的应用也正在出现。

正在考虑中的非碳-碳连续纤维增强CMC应用列于表2.2(b)。其中多数是在涡轮机和火箭发动机的热结构环境应用，在此种环境下金属合金不能满足性能和/或耐久性要求，而碳-碳复合材料会由于氧化而烧蚀。歼击机涡轮发动机加力燃烧室的扩散叶片和密封、外大气

层拦截导弹的火箭发动机转向推进器和姿态控制喷口是主要的实例。

表2.2(a) 碳-碳复合材料的应用

部门 应用	碳-碳复合材料	
军事	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 导热空间结构</li> <li>● 电子封装的散热片</li> <li>● 太阳能阵列结构</li> <li>● 石墨替代物</li> <li>● 前缘材料</li> <li>● 天线窗材料</li> <li>● 高频雷达/反射器结构件</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 空间散热器</li> <li>● 热防护</li> <li>● 涡轮发动机排气</li> <li>● 高超音速空气动力武器 (HAW)</li> <li>● 返回式航天器鼻锥</li> </ul>
商业/两用	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 航路运载工具的制动器</li> <li>● 石墨结构替代物</li> <li>● 柴油机活塞和排气构件</li> <li>● 商用飞机刹车片</li> <li>● 电子封装</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 高温炉部件</li> <li>● 核反应堆部件</li> </ul>

表2.2(b) 连续纤维CMC的应用

部门 应用	连续纤维CMC			
军事	<ul style="list-style-type: none"> <li>● F414和F110喷管叶片和密封</li> <li>● F117后甲板热防护</li> <li>● 发动机叶片</li> <li>● 火焰稳定器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 轨道转换器发动机推进器</li> <li>● 低成本大型火箭推进器 (百万磅) 超重发射</li> <li>● 战术导弹燃烧室, 转子</li> <li>● 转向和姿态控制推进器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 涡轮冲压组合喷气发动机可变面积喷管</li> <li>● 监视OTV推进器</li> <li>● 高超音速前缘, 进气锥, 喷管</li> <li>● 线性Aerospike发动机, 推进单元和调节板</li> </ul>	
商用/两用	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 热交换器</li> <li>● 辐射燃烧管</li> <li>● 陆基燃气涡轮</li> <li>● 火花塞过滤器</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● MDH空气加热管</li> <li>● 渗透加热器</li> <li>● 非密封磁力泵</li> <li>● 竞赛摩托车刹车片</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 柴油机部件</li> <li>● 阀导向器</li> <li>● 活塞</li> <li>● 涡轮增压器转子</li> </ul>	

下一代可重复使用的发射航天器会有可能将CMC用于推进单元和Aerospike的调节板。正在评估将CMC用于未来高超音速飞行器的前缘、机头部、进气罩、和喷管部分。涡轮发动机的进一步应用可能包括燃烧室、外壳、定子、叶片和涡轮发动机的其他推力增大装置部件。在许多飞机应用中也正考虑将其用作保护金属结构的热防护件。工业的应用中包括多孔辐射燃烧管、浸渍加热管、热交换器、炼油装置的管状挂耳、竞赛摩托车的刹车片、柴油机阀导向器、和/或化学泵的抗腐蚀外壳。

计划将CMC引入到军事系统的进展，很大程度上为技术可达到的可能程度所决定，即要绝对满足未来军事系统的性能要求。即使如此，如果认为使用CMC材料太冒险，那么就会降低性能并要进行设计折衷。

MIL-HDBK-17预期用于培训潜在用户，了解CMC的优点、应用、设计原理、制造选择，表征和试验方案、以及标准等。希望本手册能够作为试验和性能表征标准方面的权威指导，促进CMC供应商推动其发展。MIL-HDBK-17的这一卷给最终的用户和供应商提供一套初始工具，鼓励他们投资于未来的军事机遇。

## 第3章 工艺、表征和制造

### 3.1 CMC体系、工艺、性能和应用

#### 3.1.1 CMC工艺方法

许多陶瓷复合材料体系已经达到商业开发阶段，其工艺和性能是已经定义好的，并可以从市场得到商用的批量和几何外形。采用其不同的制造技术来说明不同的陶瓷复合材料体系——化学气相渗透、直接金属氧化、聚合物转化的陶瓷、烧结或热压的氧化物体系、以及热解或CVD碳-碳复合材料。现在的CMC来源列于表3.1.1。

表3.1.1 CMC制造商

● Albany International Techniveave
● Ceramic Composites Inc. (陶瓷复合材料公司)
● Composite Factory, Inc.
● Composite Optics Inc. Ceramics (formerly a Dow Coming business unit)
● General Electric (通用电器)
● Goodrich - Aircraft wheels and brakes division (Goodrich 航空轮胎和刹车片公司)
● Hexcel
● Honeywell Advanced Composites (formerly DuPont Lanxide Composites)
● Hitco
● Hyper-Therm
● Northrop-Grumman
● Refractory Composites, Inc.
● Textron, Inc.
● Ultramet
● Synterials

对于陶瓷材料来说，许多历史的和正在开发的制造技术还没有达到商业实用的要求。根据背景和历史信息，以及对今后商业化的潜力（取决于技术和经济上的成功）而言，这些方法对市场是重要的。具体的制造体系是：溶胶-凝胶工艺、反应工艺和纤维催化陶瓷。

#### 3.1.1.1 化学气相渗透 (CVI) CMC

##### 3.1.1.1.1 CVI制造技术

由化学气相渗透制造的CFCC（连续纤维陶瓷复合材料），通常含由纤维塑造成型的预成形件，在界面上有界面层，并通过CVI来渗透陶瓷基体（文献3.1.1.1.1(a)）。CVI工艺包括在多孔的纤维增强预成形件内用陶瓷基体进行化学气相沉积。在该工艺中，CVI反应物被抽进装有已加热预成形件的炉内；这些气态反应物渗透预成形件，并在纤维的表面生成固态基体材料，从而将预成形件致密。

为了能优化致密，可以通过下面定义的5种不同工艺来完成CVI（文献3.1.1.1.1(a))：

- **等温法：**在恒温下用反应物包围预成形件，通过扩散进入其中。
- **热梯度法：**反应物接触预成形件较冷的部分，并通过扩散进入到预成形件的热区，在热区进行反应。
- **等温强制流动法：**强制反应物流动通过处于恒温的预成形件。

- 热梯度-强制流动法：强制反应物从预成形件的冷区流到其热区。
- 脉冲流动法：通过循环抽空和回注系统的办法使反应物流进和流出预成形件。

等温法是使用最广泛的也是唯一商业化的方法（文献3.1.1.1(b)-(i)）。虽然其他四种方法优于等温法，但它们还不太成熟，对零件和形状有限制，并需要专门的设备和控制方法。（文献3.1.1.1(a)）。

在等温工艺中，反应物进入预成形件和气态的反应产物离开预成形件是借助化学扩散来实现的（文献3.1.1.1(j)）。为了得到经济的致密速率，通常快速进行沉积，以致在渗透完成前就堵塞了扩散的通道（文献3.1.1.1(a)）。常常需要中断CVI工艺进行周期性的表面机械加工，以重新打开扩散的通道（文献3.1.1.1(a)）。

因为CVI是一种已经完善建立的CVD技术，几乎任何陶瓷化合物都可作为CFCC基体进行沉积。市场上最普遍可得的CVI基体是SiC和碳。表3.1.1.1描述了这些基体和其他可能的基体、所使用的典型纤维增强体、以及基本的化学反应。

表3.1.1.1 CVI CFCC

基 体	纤维/增强体	应用的典型反应
碳化物		
C	碳	$\text{CH}_4 \rightarrow \text{C} + 2\text{H}_2$
SiC	Nicalon, Nextel, 碳, $\text{Al}_2\text{O}_3$ , SiC	$\text{CH}_4\text{SiCl} + \text{H}_2 \rightarrow \text{SiC} + 3\text{HCl}$
TiC	碳	$\text{TiCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{TiC} + 4\text{HCl}$
$\text{B}_4\text{C}$	碳	$4\text{BCl}_3 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{B}_4\text{C} + 12\text{HCl}$
ZrC (HfC)	碳	$\text{ZrCl}_4 + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{ZrC} + 4\text{HCl}$
$\text{Cr}_3\text{C}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{CrCl}_x + \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Cr}_3\text{C}_2 + \text{HCl}$
TaC	碳	$\text{TaCl}_5 - \text{CH}_4 + \text{H}_2 \rightarrow \text{TaC} + \text{HCl}$
氮化物		
$\text{Si}_3\text{N}_4$	Nicalon, Nextel, 碳	$3\text{SiCl}_4 + 4\text{NH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{Si}_3\text{N}_4 + 12\text{HCl}$
BN	BN, $\text{SiO}_2$ , Nextel, 碳	$\text{BX}_3 + \text{NH}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{BN} + 3\text{HX}$ (X=Cl, F)
硼化物		
$\text{TiB}_2$	碳, Nicalon™, $\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{TiCl}_4 + 2\text{BCl}_3 + \text{H}_2 \rightarrow \text{TiB}_2 + 10\text{HCl}$
氧化物		
$\text{ZrO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , 莫来石, 碳	$\text{ZrCl}_4 + 2\text{CO}_2 + 2\text{H}_2 \rightarrow \text{ZrCl}_4 + 2\text{H}_2\text{O} + 2\text{CO} \rightarrow \text{ZrO}_2 + 2\text{CO} + 4\text{HCl}$
$\text{Al}_2\text{O}_3$	$\text{Al}_2\text{O}_3$ , Nextel, 碳	$2\text{AlCl}_4 + 3\text{CO}_2 + 3\text{H}_2 \rightarrow 2\text{AlCl}_4 + 3\text{H}_2\text{O} + 3\text{CO} \rightarrow \text{Al}_2\text{O}_3 + 3\text{CO} + 6\text{HCl}$

可能要在CVI致密化过程之间进行一些机械加工，以控制尺寸和重开启进入零件内部的扩散通道。最后的CVI致密化将密封所有机械加工的边缘并完成此零件。在某些情况下，在此时要施涂外部的环境界面层（文献3.1.1.1(k)）。

用CVI制造的CFCC的关键工艺如图3.1.1.1所示。对于不同的生产者，这些步骤的顺序和特征是不同的。有关预成形件技术的描述见3.4节。将压实的预成形件放在石墨模具内，以在加工过程中保持零件形状。通常通过CVI技术对模具内的预成形件加涂界面层（参见

3.3节）。把带有界面层的预成形件连同石墨模具一起放进CVI炉进行基体的渗透。使最初的循环沉积足够的基体以使预成形件硬化，以便去除模具，进一步用CVI来致密。

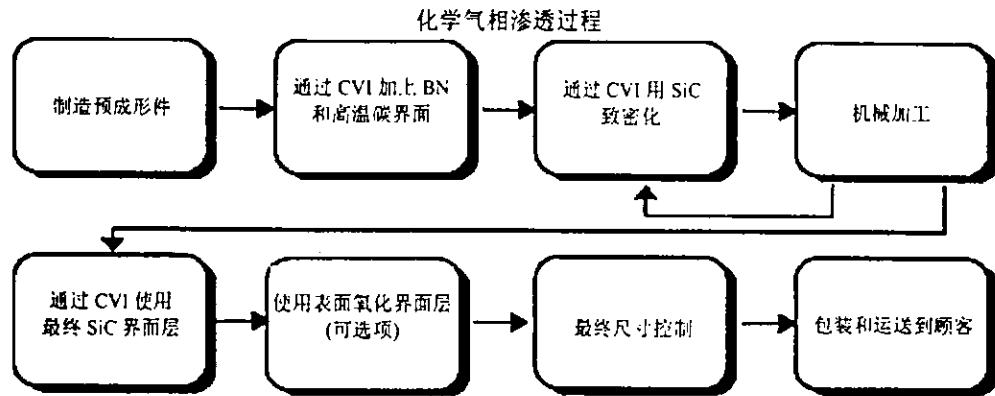


图3.1.1.1.1 SiC的恒温CVI过程流程图

### 3.1.1.1.2 CVI CFCC 的典型性能

在加载过程中，连续纤维陶瓷复合材料表现出线弹性行为，接着当基体开裂之后则出现非线性的应力-应变响应（文献3.1.1.1(a)）。由CVI制造的CMC目前的拉伸强度和延伸率至少分别为250 MPa (6.3 ksi) 和0.5%，并且使用温度可达1 100°C (2 012°F)。CVI制造的SiC基复合材料涡轮机叶片显现出对热冲击和热梯度及对热机械疲劳的优良阻抗性能（文献3.1.1.1.1(a)和3.1.1.1.2(a)）。

用CVI加工的基体在纯度和微结构方面都优于其他加工方法（参见3.1.1.1.1(b)）。因此，CVI的CFCC提供了改善的化学相容性和抗腐蚀性（文献3.1.1.1.2(b)和3.1.1.1.1(a)）。

### 3.1.1.1.3 CVI CFCC 的典型应用

CVI的CFCC现正在许多工业和宇航应用中进行评估。例如：

产品领域	例子
涡轮发动机（宇航和固定的）	燃烧室，衬垫，涡轮转子
热防护设备	预热器，回热式热交换器，热交换器
燃烧炉	辐射管和屏蔽燃烧器
加工设备	转化炉，反应器，热交换器
废物焚烧	炉壁，粒子分离器
分离/过滤	过滤器，基底，离心分离机
结构部件	梁，壁板，顶梁
宇航	热保护，推进器喷嘴，涡轮泵部件，前缘

### 3.1.1.2 直接金属氧化 (DIMOX)

#### 3.1.1.2.1 DIMOX 的基本加工方法

Dimox是通过熔融金属与氧化剂的直接反应而形成陶瓷复合材料基体的方法。最普遍的Dimox体系是氧化铝化物，然而，人们正作出努力来发展氮化铝和氮化硅体系。Dimox工艺是Newark, Delaware的Honeywell Advanced Composites, Inc., Newark, Delaware所有的专利，其基本技术是使熔融的金属（铝）和氧化剂（空气）直接反应形成复合材料的基体；该过程中靠毛细作用，把液态金属沿着氧化铝中互相联通的微通道送到自由表面，促使其

从原始金属的表面向外生长。所产生的基体材料通常是三维互联，具有一些互连金属的陶瓷反应产品。对氧化铝基体的透射电子显微镜(TEM)研究显示出干净的晶界，没有可导致性能降低(尤其是在高温时出现蠕变的)的低熔点相。

可以通过在向外生长的反应产物的通道内添加填充物或增强体材料(如SiC和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>纤维、粒子或片晶)，来形成陶瓷复合材料。该成形工艺是把想要的定向增强体材料首先修整成形到具有所需尺寸的预成形件中来实现的。预成形技术可以包括传统的陶瓷工艺，例如对粒子和片晶的情况，采用压制、注浆成形、喷射模塑法等；而对纤维增强体的情况，可以采用织物铺设、机织、编织、或长丝缠绕等。可在—个或多个预成形件表面上采用生长抑制材料以局部阻止基体生长，使能够制造出无余量或近无余量制件。把预成形件和母体金属合金加热到生长温度，此时出现母体金属合金快速氧化，并向外进入邻近的预成形件。对于氧化铝基体复合材料，通常把预成形件和铝合金在空气中加热到900-1 200°C(1 652-2 192°F)。在这些条件下，铝被氧化并且有三维互联的α氧化铝基体增长进入邻近配置的预成形件中。在基体相内出现一个互相连接的微观金属通路，其直径最多为几个微米。由于表面能的驱使，毛细作用通过显微金属通道把铝合金熔池内的熔融金属送到生长前沿，在此处熔融金属完成反应并继续基体的生长过程。当熔融金属与加在预成形件表面的可透气的阻挡层接触时，反应就被终止了；这样就允许把复合材料制造成所需的形状。这些复合材料的典型生长的炉内时间从一天到三天。直接金属氧化过程示意图如图3.1.1.2.1所示。

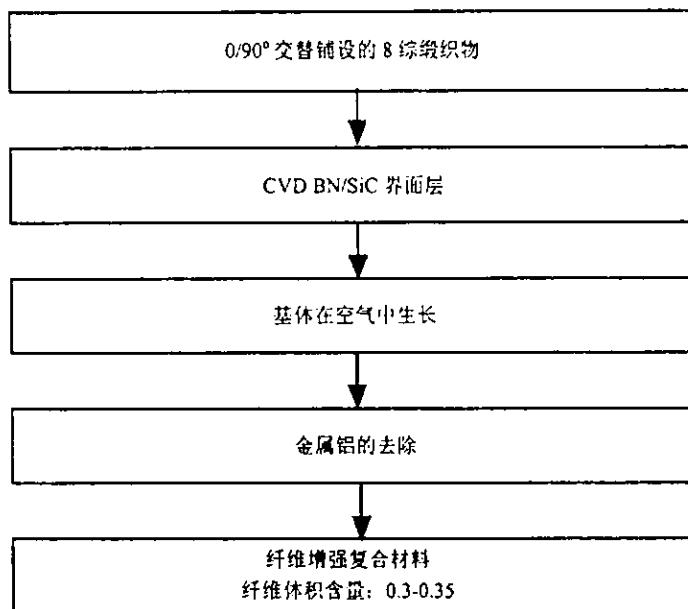


图3.1.1.2.1 直接金属氧化过程示意图

### 3.1.1.2.2 DIMOX 的典型性能

力学性能	单 位	温 度 73°F/23°C	温 度 2 012°F/1 100°C
拉伸强度	ksi/MPa	35.6/246	27.5/190
延伸率	%	0.62	0.53
模 量	Msi/GPa	21.0/144	18.7/129
比例极限	ksi/MPa	9.4/65	9.6/66

### 3.1.1.2.3 DIMOX 的典型应用

Dimox的CFCC现正在许多工业和航空应用中评估，例如：

产品领域	例 子
涡轮发动机（宇航和固定的）	燃烧室，衬垫，涡轮转子
热防护设备	预热器，回热式热交换器
燃烧炉	辐射管和屏蔽燃烧器
加工设备	转化炉，反应器，热交换器
分离/过滤	过滤器，基底，离心分离机
结构部件	梁，壁板，顶梁

### 3.1.1.3 聚合物转化陶瓷

#### 3.1.1.3.1 简介

聚合物转化陶瓷为陶瓷基复合材料的制造提供了独特的方法。通过对聚合物分子结构和分子量的剪裁，所产生的材料可采用聚合物复合材料的工艺，例如铺设-热压罐压实、树脂传递模塑、长丝缠绕、纤维铺放等方法。使用具有高碳（high char yields）的聚合物，所获零件可以在惰性气体或反应气氛下进行热处理（热分解）来得到纤维增强陶瓷基复合材料。已经采用这种方法来制造各种陶瓷基复合材料的组分，包括通常可以买到的Si-C，Si-C-O，Si-N和Si-N-C。

如同所讨论的其他陶瓷基复合材料一样，在聚合物转化陶瓷基体中加入带界面层的连续纤维，以获得希望的强度、韧性和“良好的失效”（“graceful failure”）。界面层被用来适当剪裁纤维-基体界面来达到预期的材料性能；而该界面层在组成和施加的方法上均与其他陶瓷基复合材料所使用的界面层相似。当聚合物转化陶瓷在低加工温度下（<1 000°C (<1 832°F)）制造时，在聚合物转化陶瓷中，使用类似的纤维并加入具有低温使用能力的纤维（Astroquartz，Nextel 312）。

可使用颗粒陶瓷和陶瓷晶须与片晶，来补足热解聚合物提供的基体。填充物可减少和破坏聚合物前驱体的收缩时所形成的规律的基体裂纹，从而改善性能。此外，填充物可以在初始热解过程中，通过其本身的质量或通过其与热解副产品或与热解大气的反应，来增加陶瓷产量，并且可用来使基体增强和增韧。仔细选择的填充物可以略微提高复合材料的模量，并改善层间性能。

#### 3.1.1.3.2 制造

使用聚合物热解方法来生产陶瓷基复合材料的一般过程示于图3.1.1.3.2(a)。该过程包括：(1)低温成形，(2)高温热解，(3)重复的浸渍-热解循环来达到合适的密度。陶瓷基复合材料的预陶瓷聚合物工艺与聚合物复合材料应用的工艺非常相似。原则上可以使用任何适用于聚合物复合材料成形的方法。虽然由于毒性较小、聚合物容易使用、热解周期短，使其操作简单得多，但其致密化循环名义上与碳-碳复合材料所使用的方法类似。热解环境稍微有点差别，但是所有的体系都需要至少在700°C (1292°F)（通常为900-1200°C (1652-2192°F)）下，在惰性气氛中进行热解。重复浸渍的次数取决于聚合物体系和最终的使用目标，但至少要两次以获得适当的力学性能，一般需要4-10次重复浸渍。

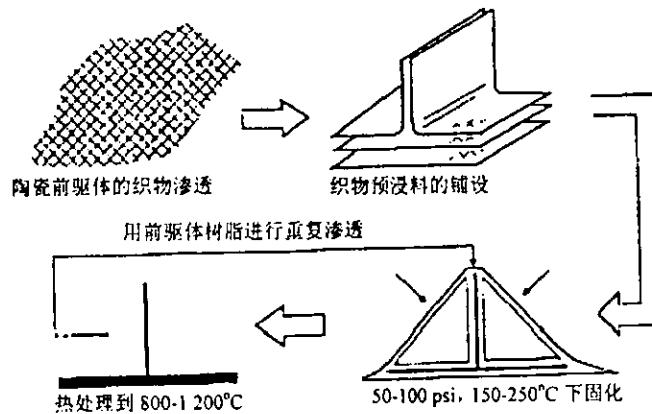


图3.1.1.3.2(a) 聚合物转化陶瓷的制造工艺

广泛应用的聚合物热解法制造陶瓷基复合材料方法是使用平整铺设的布或预浸带材料，然后在热压罐或低温压机内压固。复杂的零件的制造是先在合适的模具上包贴切成片状的预浸料，然后进行热压罐压固。通常，预浸料通常是在陶瓷机织布上浸涂预陶瓷聚合物而得到的。对于平层压板材料研究，通常使用综缎织物，按经向对齐或按0/90方向铺设，通过交替的取向改变，获得良好的机织“套样”。通常使用的树脂为低分子量、溶剂可溶、蜡状的聚合物。聚合物通常由浓缩的溶剂溶液浸涂到布上；可以把颗粒填充物散布到预浸渍溶液中。为了获得良好的黏性，典型的平均分子量为1 000-3 000。

通常首选的是单向纤维的预浸料。这种预浸料由单向丝束的薄片构成，可以将行进的丝束通过聚合物溶液、或聚合物-填充物浆液而制得；适当的铺开丝束会促进填充物的渗入。之后，把湿的丝束干燥，并将其小心地缠绕到鼓轮上使丝束保持平行。然后，把预浸料薄片从鼓轮上割下。预浸料的压固最好使用热压罐，它可以对整个零件施加均匀的压力（对于复杂形状的零件是显著的优点）。可以将类似的时间-温度-压力条件用于简单的电加热聚合物压机（例如Carver压机），来压固平层压板。铺设用的预浸料片是从预浸渍布上切割下的；在布的两边包上涂有Teflon的脱模纸，把预浸渍布在冰箱中放一晚上，然后在冷的预浸渍布上用样板和剃刀片或滚刀割下预浸料片。在铺设前可以从冷的预浸渍布上剥掉脱模纸。在复杂的模具上铺敷时，预浸料必须有好的黏性。如果需要重新设置带和布，可通过喷射冷却气溶剂，使此区域冷却促使脱粘。

热压罐铺贴的典型配置示于图3.1.1.3.2(b)。对于复杂的形状，适合于纤维-环氧树脂复合材料的模具就足够了。通常使用机械加工的铝模具。在使用前要在模具上涂抹非硅酮脱模剂。热压罐的循环随所使用的预陶瓷聚合物而变，但基本原理是类似的：聚合物必须在高于 $T_g$ 温度下进行压固，理想地要在熔融黏度（≤103泊（poise））下，但要在聚合物开始热固以前。

最初的热解把聚合物转换成陶瓷，同时产生挥发性的副产品。因为大部分这些气体是低分子量的（如H<sub>2</sub>，CO），即使是高陶瓷产量的预聚物在热解过程也产生大量气体。热解循环需要慢速进行，特别是对于厚大零件，以便让挥发物慢慢扩散出基体而不引起分层。需要对等变速率（Ramp rates）进行剪裁，以便在有大量活性物要扩散的区域其等变速率能减慢。这通常可以通过考虑热比重测定数据来实现；但最好用质谱仪来分析，以能较好地考虑所释放物种的分子量。典型的热解循环需要1-2天才能升到800-1 400°C（1 472-2 552°F）的温

度，以避免分层。正如前面讨论的，我们希望在低于所选增强纤维失去强度的温度下进行热解。热解的气氛通常是氩气或氮气。然而，现已知道，氨气气氛可以形成具有低自由碳含量的纯无定形氮化硅。这样的反应环境还由于与反应填充物生成氮化物，可以导致陶瓷产量的增加。虽然许多零件在热解时没有支持，但在关注热引起的畸变时，可以使用石墨模具。

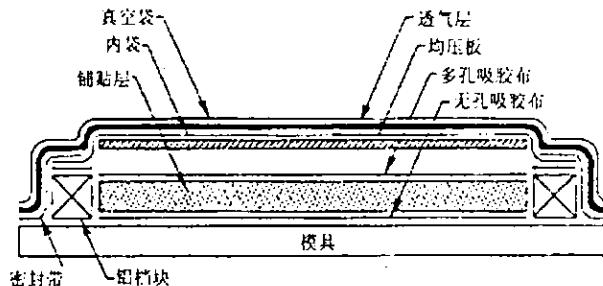


图3.1.1.3.2(b) 用于热压罐压固的真空袋结构

成功的聚合物加工将产生100%密实的纤维增强聚合物复合材料。然而，由于在热解过程的重量损耗，加上将密度约为 $1.0 \text{ g/cm}^3$ 预陶瓷聚合物转变成密度约为 $2.0 \text{ g/cm}^3$ 的无定形陶瓷时会出现体积收缩，在最初的热解后导致20%-30%的空隙含量。为了减少孔隙率，重复浸渍最初的陶瓷基复合材料体是必要的。最好使用低黏度的预聚物进行重复浸渍。有一些不太成功的替代方法是采用加热的聚合物以减少黏度，或采用溶液溶解的聚合物的来重复浸渍。较高黏度的聚合物可能需要用压力浸渍。重复浸渍的低密度聚合物应该在热解前进行热固而不产生挥发物，并应当有较高的产量。图3.1.1.3.2(c)显示了典型的密度与重复浸渍次数关系，同时也展示了附加工艺变量的影响。例如，显示了利用弱热固聚硅氨烷的一个早期实验。注意，由于热解过程中的层间膨胀其初始密度较低。另外两个试验在预浸料中加入了15%体积的填充物。使用这种方法，有可能使致密更快。未加填充物的层压板显示了典型的密度与重复浸渍次数数据。在这个陶瓷复合材料中，大约40%的体积为纤维，假设纤维和基体的密度分别为 $2.3 \text{ g/cm}^3$ 和 $2.0 \text{ g/cm}^3$ ，可以计算最初的陶瓷密度约为 $1.4 \text{ g/cm}^3$ 。同样，假设在全部空隙中充填了聚合物，在热解过程中聚合物有20%的损失、在转化为陶瓷的过程中剩余的基体有50%的收缩，则可以计算出进一步致密-热解循环后的密度。

为了达到可接受的拉伸性能，看来至少需要3次重复浸渍。为了改善层间性能，减少孔隙率，并改善不稳定纤维基体界面的氧化稳定性，通常需要进行额外的重复浸渍。重复浸渍时最好把被抽真空的零件浸入真空袋中的液态聚合物中。替代的方法是，将零件先浸入液态聚合物中，然后放进钟形的玻璃容器或真空炉中，直到停止冒气泡。如果不可能完全浸渍，可以在零件表面反复刷聚合物。较高黏度的聚合物可能需要压力浸渍。重复浸渍后，把零件置于低温炉加热以固化重复浸渍的聚合物，要小心减少蒸发，例如，在固化过程中将零件覆盖或包裹。然后就可以按前面讨论的方法将零件热解。

可在部分密实或完成致密后，进行聚合物转化陶瓷复合材料的机械加工。通常在2-3次重复浸渍才进行零件的机械加工，以确保有足够的强度进行操作。处于制造过程的这个阶段，通常使用常规的机加工工具。由于在加工聚合物转化陶瓷复合材料时的变形量小，机械加工通常限于制孔、配合面加工和修配。整个制造过程可以使用一些常规的无损评定方法，例如热成像、X-射线、超声波以确保质量。

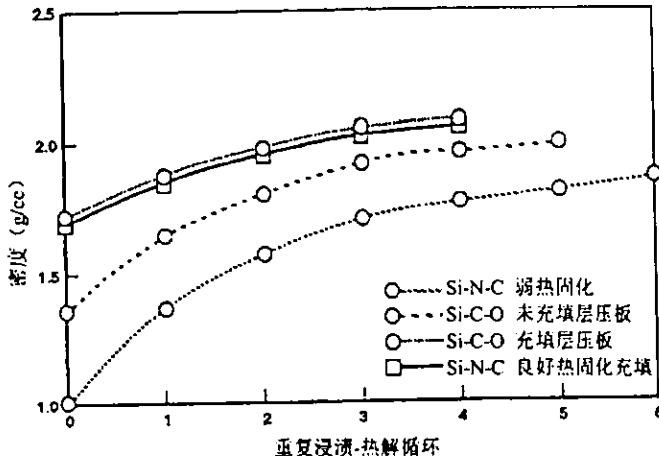


图3.1.1.3.2(c) 典型的密度变化与重复浸渍-热解循环关系

### 3.1.1.4 碳-碳复合材料

碳在没有氧的环境中是特别稳定的材料，在真空和惰性气体条件下其存活温度大于 $2200^{\circ}\text{C}$  ( $3992^{\circ}\text{F}$ )；此外，碳是轻质材料，密度大约为 $2.0\text{ g/cm}^3$ 。然而单相石墨是脆性的低强度材料，难以形成复杂形状。

为了克服强度和加工的局限，由国防和宇航资助的研究人员开发了碳-碳复合材料，把高强度的碳纤维加入到碳基体中。Buckley详细描述了碳-碳复合材料的历史、发展和一般性能（文献3.1.1.4(a))。碳-碳复合材料对无氧化环境的高温应用提供了异常的热稳定性( $>2200^{\circ}$  ( $3992^{\circ}\text{F}$ ))，并具有低密度( $1.5\text{--}2.0\text{ g/cm}^3$ )。

从结构和热的观点，使用高强和高模量的碳纤维是开发机械强度和耐久性，同时又保持高温能力的关键因素。通过使用这样的纤维，碳-碳复合材料现被应用于火箭喷管、返回式航天器鼻锥、前缘、整流罩、热防护、飞机刹车片、赛车刹车片以及高温炉调节器和绝缘。这些应用中利用了碳-碳复合材料的以下标称性能（取决于纤维类型、纤维织构、基体密度）。

- 极限拉伸强度  $> 40\,000\text{ psi}$  ( $266\text{ MPa}$ )
- 弹性模量  $> 10\text{ Ms}i$  ( $69\text{ GPa}$ )
- 热传导率  $0.9\text{--}19\text{ Btu-in/s-ft}^2\text{-}^{\circ}\text{F}$  ( $6\text{--}100\text{ W/m}\cdot\text{K}$ )
- 热膨胀系数  $1.1\text{ ppm/K}$
- 密度  $< 2\text{ g/cm}^3$

这些性能对碳-碳复合材料在结构、低热膨胀、热管理应用中是关键性能因素。特别是，低的热膨胀和导热率范围，使碳-碳复合材料具有高的抗热冲击性能。

碳-碳复合材料的主要缺点是其氧化敏感性。在温度高于 $932^{\circ}\text{F}$  ( $500^{\circ}\text{C}$ ) 度时，如果没有防护曝露在氧气环境下，则基体和纤维易受到氧化。抗氧化的两种主要方法，是采用外部界面层和用内部氧化抑制剂。表面界面层提供了对氧气渗入的外部屏障，SiC是外部界面层体系中常用的成分。附加的内部氧化抑制剂或者充当氧气渗入的内部屏障，或作为氧气汇收器（形成保护屏障）。这些抗氧化屏障的时间-温度循环能力，是限制当前碳-碳复合材料在氧化环境中高温性能的首要制约因素。目前的短期曝露温度极限是 $2912^{\circ}\text{F}$  ( $1600^{\circ}\text{C}$ )。

碳-碳复合材料是用碳基体渗透碳纤维预成形件（编织带、机织、织物、毡）进行制造

的。基体是用液态渗透、化学气相渗透、或者将两者相结合而得的。液态渗透法使用碳的热固性前驱体树脂（例如酚醛树脂或呋喃树脂）；树脂在惰性气体氛围中固化和热解转变成碳。重复该渗透/固化/热解循环以逐渐增加密度，因为在热解循环中会在基体部分出现孔隙率和裂纹。也使用热塑性碳源如煤焦油和沥青进行重渗透，用重复的致密化循环减少孔隙率，直至达到预期的孔隙率。

另外一种碳-碳复合材料的致密化方法是化学气相渗透（文献3.1.1.4(b)），其中使用碳氢化合物气体（如甲烷、乙烷、丙烷）作为碳源。将碳纤维预成形件加热到大约1 832-2 192°F（1 000-1 200°C），然后让反应物气体流过预成形件；气体热解，在预成形件中形成碳。

两种不同的致密化方法，产生出不同的碳微结构。使用一种方法或采用两种方法的结合会使基体性能有所不同，基体性能不同会影响复合材料的性能。碳（来源于树脂或者CVI）在结构上倾斜于无定形或微晶结构。生成高性能碳-碳复合材料的通常做法是，在3 632-5 432°F（2 000-3 000°C）范围内进行热处理，把基体转化成高度结晶的石墨。基体中碳的石墨化转变会增加复合材料的模量、承载能力和热传导率。

碳纤维的性能、微结构和加工则在本卷的碳纤维章中进行介绍。不同的碳纤维的力学性能差别很大，这取决于碳含量、微结构和石墨化程度。极限拉伸强度在200-820 ksi（1.38-8.5 GPa）之间，拉伸模量在23-120 GPa（150-830 GPa）之间。同样，沿着纤维长度方向的热传导率在4-212 Btu-in/s·ft·°F（22-1 100 W/m·K）之间。给定的碳-碳复合材料，其力学和热性能将主要取决于增强碳纤维的强度和织构，同样也取决于碳基体的成分、密度和晶粒结构。

### 3.1.1.5 氧化物体系——烧结/热压

此节留待以后补充。

### 3.1.1.6 溶胶-凝胶工艺

#### 3.1.1.6.1 引言

术语溶胶-凝胶（sol-gel）是“solution-gelation”的缩写，它包括种类广泛的化学合成前驱体，和一系列形成陶瓷与玻璃的液态加工技术。通常，将化学前驱体先水解、聚合成凝胶，然后加以干燥和加热燃烧以生成特定的玻璃或陶瓷合成物。前驱体的范围包括从水的混合物、酒精与金属醇盐、到市场可以买到的含离散陶瓷粒子的稳定的胶体，以及含有从金属盐得出的无机聚合物的溶液。Johnson在1985年建议把传统的溶胶-凝胶工艺分成(A)聚合醇盐(B)胶质溶胶；其中每种又再加细分（文献3.1.1.6.1(a)）。第三类现在可能包括无机聚合物溶液。按成分聚合醇盐被分成：(1)全醇盐组分，(2)加有某些金属盐成分的醇盐前驱体。胶体溶胶则被分成：(1)包括沉淀和胶溶的，(2)包含胶体粒子弥散体系。Johnson承认，某些金属有机物，如异丙氧化铝，可以同时属于“聚合醇盐”和“胶质溶胶”中，因为在某些加工条件下，水解的异丙氧化铝能形成胶体粒子。然而，这样广义的分类是有用的，适用于大多数实例。

基于醇盐的工艺涉及到使用有机金属，如铝-丁氧金属（aluminum sec-butoxide）或四乙基正硅酸盐，它们被先水解后在酸或盐基催化剂的作用下聚合成凝胶。因为水解速率不同，所以通常需要一些特殊的步骤来维持这些醇盐前驱体的混合物的化学均质性。醇盐为基础的加工技术中，通常包括试验室规模的准备步骤，利用特殊的玻璃器皿和回流冷凝

器来制备溶胶。有大量关于基于醇盐的溶胶，尤其是基于氧化硅和硅酸盐玻璃的溶胶的文献（文献3.1.1.6.1(b)-(e)）。（通常加入金属盐，典型地为硝酸盐，以引入一些小量的成分。下面是一个涉及到使用硝酸盐的基于醇盐的加工例子。可以把铝干-丁氧金属和四乙基正硅酸盐（TEOS）、 $\text{Si}(\text{C}_2\text{H}_5\text{O})_4$ 、进行水解并与硝酸镁结合，来形成镁硅铝酸盐溶胶）。

可以在市场上买到某些氧化物体系用的胶质溶液，例如二氧化硅和氧化铝的胶质溶液。由E. I. DuPont de Nemours & Co (DuPont) 制造的Ludox大概是使用最广泛的，其中含有弥散在溶液介质中的球状无定形硅；它通常应用于纤维增强的天线罩生产，并由于在制造溶胶-凝胶时是使用方便、高产量的二氧化硅源而受到欢迎。在加工溶胶-凝胶莫来石时会产生很多二氧化硅。Nalco化学公司也生产一系列胶体产品，包括胶质的二氧化硅、氧化铝、和氧化铝界面层二氧化硅胶体。Nyacol Products公司生产氧化铝、氧化钇、二氧化铈和氧化锆的溶胶。

无机聚合溶液现在被许多团体用于CFCC的基体形成，也被用于纤维界面层。McDermott Technology, Inc. (MTI) 从硝酸铝中制得一种无机的氧化铝聚合物。MTI也将聚合物连同其他的盐或醇盐添加剂，以形成多铝红柱石（莫来石）、尖晶石、和磷酸铝基体的前驱体。Rockwell Science Center和ACT/西北大学已经开发出磷酸镧（ $\text{LaPO}_4$ ）、独居石（磷铈镧矿）的无机聚合物，应用于纤维界面层和基体加工。

### 3.1.1.6.2 单一氧化物组分

对单氧化物溶胶如硅石（ $\text{SiO}_2$ ）（文献3.1.1.6.1(b)和(d)）或矾土（ $\text{Al}_2\text{O}_3$ ）（文献3.1.1.6.1(e)）的形成，可以找到大量文献，通常都包括一步步的加工方法。

对采用二氧化硅基连续增强纤维的天线罩应用，已经广泛研究了二氧化硅基的陶瓷基复合材料（CMC）。这些复合材料的最大高温性能限为1 799°F (982°C)，以避免过量的非晶态到结晶相的转变和相应的基体开裂，并避开二氧化硅的退火点。

可以用溶胶-凝胶法生产氧化铝，来说明基于醇盐的单氧化物加工（文献3.1.1.6.1(e)）经典例子。在该工艺中，先将有机金属前驱体水解，用盐酸使溶液胶体化，然后不断升温燃烧生产出最初的 $\gamma$ 氧化铝，然后是 $\alpha$ 氧化铝。目前正在使用氧化铝溶胶生产金属基复合材料的纤维界面层，并且是用于需要极高温基体能力陶瓷复合材料的潜在基体前驱体溶胶。已经研究将Yoldas方法得到的氧化铝溶胶，用作为碳化硅晶须增强陶瓷复合材料和碳化硅纤维增强陶瓷复合材料的基体（文献3.1.1.6.2(a)和(b)）。

### 3.1.1.6.3 溶胶-凝胶工艺的优点和缺点

**优点**——溶胶-凝胶工艺的固有优点之一是加工温度很低。现在许多可买到的陶瓷增强纤维其高于1 832°F (1 000°C) 温度时的寿命是有限的。一种需要在1 832°F (1 000°C) 以上温度中曝露时间为最少的基体加工方法，如溶胶-凝胶法，限制了对纤维的热损伤，并可减少加工时基体/纤维之间的相互作用。因此，溶胶-凝胶方法可以通过减少在加工过程中的高温曝露，来延长最终产品的高温寿命。使用真空渗透或类似于聚合物基复合材料的热压罐模压技术，溶胶-凝胶基体渗透可以在很低的温度（低于572°F (300°C)）下进行。溶胶-凝胶技术允许加工复杂的外形，不需要高温模具，同时，因为系统不需要热压，消除了对3-D复合材料纤维的可能机械损伤。

由于毛细作用溶胶有沿着纤维束长丝吸浸的趋势，这使得可将便宜的无余量成形模具用于复杂的3-D外形。一旦完成了最初的基本渗透和机织结构的低温焙烧，因为外形不再改

变，就可以从模具中取出CMC。所以，随后的渗透和焙烧，包括烧结陶瓷材料的最后高温焙烧，可不再使用模具。尽管最终产品的孔隙率可能大于预期值，但是可只采用真空渗透的随后渗透完成进一步的致密化。可以使用热压罐模压（尤其是在初始循环中）来获得更高的密度。

可以在市场上买到高纯度的溶胶前驱体，并容易在加工过程中保持其纯度。不需要用标准的陶瓷基体加工步骤，如球研磨，来减小前驱体粉末的尺寸，因此不会引入杂质。因为加工温度本身就很低，因此也不需要用助烧剂来降低加工的温度。不需要如 $B_2O_3$ 这样的助烧剂是有利的，因为助烧剂通常会降低陶瓷复合材料的总体高温性能。

一些通过其他方法很难生产出的复杂高纯度氧化物组分，包括三元氧化物如堇青石（ $2MgO \cdot 2Al_2O_3 \cdot 5SiO_2$ ）和四元氧化物如Nasicon ( $Na_3Zr_2Si_2PO_12$ )，可以以各种化学计量比配制。溶胶-凝胶工艺通常用于较简单的基体成分，如矾土 ( $Al_2O_3$ )、莫来石 ( $3Al_2O_3 \cdot 2SiO_2$ )、尖晶石 ( $MgAl_2O_4$ ) 或磷酸铝 ( $AlPO_4$ )。

缺点——用溶胶-凝胶工艺制造陶瓷基复合材料时的某些缺点，是由于该技术的发展阶段所致，其他一些则是该技术所固有的。尽管对多数感兴趣材料，某些醇盐前驱体化学药品通常是可以得到的，但是很多只能买少量并且通常很昂贵。如果在试验室规模上使用超纯和昂贵的前驱体化学药品进行基体溶胶的制备，则生产的复合材料可能很昂贵。幸运的是，溶胶-凝胶现在已经扩展，包括使用低成本的盐前驱体而不是醇盐为前驱体的无机聚合物溶液。现在还可以在市场上买到氧化铝、二氧化硅、莫来石、氧化钇和其他的胶体溶胶。

由于必须去除凝胶体溶胶中的大量水和酒精，导致的凝胶体溶胶收缩可能很严重，并经常导致基体微裂纹。对于基于醇盐的溶胶，通常使用过量的水以确保完全的水解反应。试图减少水量会导致前驱体的混合较差，影响溶胶的均匀性并最终升高了加工温度。使用大量的溶剂也会限制每次渗透所获干燥基体的总量，因此通常需要重复渗透以达到预期密度。

用溶胶-凝胶工艺制造CMC的优点和缺点总结于表3.1.1.6.3中。

#### 3.1.1.6.4 干燥控制剂和填料

在连续纤维增强陶瓷基复合材料的溶胶-凝胶工艺中，其最重要的问题之一就是干燥和烧结过程中的收缩和随之产生的基体开裂。在氧化铝溶胶中加入甘油 ( $C_3H_8O_3$ )，可以增强干燥后产品的易操作性，并减少在碳化硅晶须增强铝基复合材料制造过程中的收缩开裂（文献3.1.1.6.2(b)）。除了甘油之外，Hench（文献3.1.1.6.4(a)和(b)）已经用其他的干燥化控制剂（DCCA），如甲酰胺 ( $NH_2CHO$ ) 来制造大块透明的二氧化硅，并通过控制干燥收缩率来制备更易于处理的2-D溶胶-凝胶预浸料。

也可以加入陶瓷粉末来减少基体在失去溶剂时固有的收缩和开裂，以作为溶胶结晶的晶核，并使每一次渗透过程获得最大程度的基体致密化。往溶胶中加入固体粉末颗粒，通常可以降低基体干燥裂纹的数量和严重程度，同时提高复合材料的整体密度。如果注意避免过早闭合表面的连接孔隙，可以用填料显著提高每次渗透过程的产量。

对溶胶-凝胶前驱体加入晶种也会使最终烧结体的微结构有显著变化，并有可能提高最终复合材料产品的强度和/或者韧性。向一种胶状莫来石前驱体凝胶中加入4%质量的莫来石晶体粉末，会产生等轴晶粒构成的微结构，而不是在未加入引晶的溶胶中通常由针状晶（长径比为3:1）构成的微结构（文献3.1.1.6.4(c)）。

一种可以显著减少工艺步骤并已用于工业和学术界的方法，即与溶胶-凝胶基体工艺有关的渗透法，是在溶胶-凝胶渗透之前用压力粉浆浇铸法将基体粉末压入纤维预成形件。为保证颗粒可以填充到纤维束内部的空隙，要使用小直径的浆体。仔细控制浆体颗粒的粒径分布，可以优化预成形件的空隙处基体颗粒的填充密度，以最大限度减少为达到期望复合材料密度所需要的溶胶-凝胶渗透次数。

表 3.1.1.6.3 溶胶-凝胶法的优缺点

优 点	结 果
工艺温度低	限制了纤维破坏 限制了纤维/基体界面的反应 使用低成本的模具
无余量制造	使2维和3维结构成为可能 成本较低 机械加工最少
高纯度	降低活性 增强抗高温能力
组分可控	可以生产多组分复合材料
缺 点	结 果
收缩率高	基体开裂
产量低	需要多次渗透
前驱体成本高	目前高成本限制其广泛使用
热解过程中析出酸性气体	可能造成纤维损伤
溶胶的储存期有限	增加基体成本

### 3.1.1.6.5 2-D 结构的溶胶-凝胶工艺

可以用一种极其类似于聚合物基复合材料的方法，进行2-D结构的溶胶-凝胶工艺过程。或者对织物预浸渍或者应用树脂转移模塑法。一旦通过试验室规模的工艺或由商业途径得到了溶胶，可以加入聚合物粘接剂来增加溶胶对织物的涂敷能力，并可加入填料以增加最终的陶瓷产量。可以将织物浸入溶胶或者已加填料的溶胶中，得到预浸料。一旦制成预浸料之后就可用类似于制造聚合物复合材料的方法，将其切割、铺叠层、进行热压罐固化。区别在于，聚合物复合材料通常具有100%的产量，而陶瓷基复合材料预成形件的基体相产出偏低，因而通常需要额外的渗透过程以得到高密度。但是，有些组分体系如通用电气公司的GEN IV采用了成形的CMC，因而没有额外的渗透过程。这些材料中目前的孔隙率水平在20%-25%之间。

### 3.1.1.6.6 3-D 结构的溶胶-凝胶工艺

陶瓷基复合材料的一种溶胶-凝胶工艺是，将陶瓷纤维的机织（或编织）3-D预成形件进行渗透。对于陶瓷基复合材料来说，应用3-D机织物比应用2-D铺贴的优点是，通过3-D机织物厚度方向的纤维提供了结构的增强。

为了增加3-D复合材料的致密程度，能使用传统的聚合物复合材料制备技术，如随后进行热压罐模压的真空袋技术。现在的纤维预成形件渗透是用真空渗透技术或用热压罐模压技术进行的。制备或从市场上购得溶胶，并将其倒入真空室内的一个容器中；将3-D预成形件完全浸入溶胶中，同时施加低真空度以抽出气泡，并帮助溶胶进入机织物的内部。然后，

溶胶在加热条件下(302°F(150°C))或在催化剂(如果合适)作用下凝胶,重复这个渗透过程直到达到要求的密度。每一次渗透之后对凝胶产物的低温热处理(212-392°F(100-200°C))将排出其物理吸附的水和乙醇,而温度较高的热处理(572-752°F(300-400°C))则可以排除任何残余的有机物。为得到增强的力学性能通常希望进一步致密,这可以用低压(50-100 psi)的热压罐模压技术得到。热压罐模压技术的另外的优点就是可以得到紧公差,从而减少任何随后的机械加工。

通常经过两、三次的渗透过程,一旦复合材料预成形件硬化之后,可以在没有模具的条件下完成剩下的渗透循环。当达到所需的密度之后,就采用无支持的焙烧循环来制造一个晶态的陶瓷基复合材料。无论有没有施加真空,低黏度的溶胶都可容易地通过毛细作用沿长丝进入3-D预成形件的内部。每一次渗透都在纤维丝上产生一层薄的界面层,随后的渗透过程使界面层加厚,直到整个纤维束被完全渗透。最后,表面的孔隙开始闭合,但通常在达到所要求的密度之前不会闭合。

已经证实,可通过一次浆体涂附3-D预成形件的工艺步骤,获得到充分致密的基体。McDermott Technology Inc.使用了Techniweave Inc.织造的3-D的圆筒形预成形件。用专用的模具压缩圆筒壁,以得到较高的纤维含量。通过将浆体压涂进预成形件内,从而在预成形件的厚度方向沉积出一层基体粉末。在干燥此零件之前,涂上溶胶-凝胶基体前驱体,以烧结工艺开始之前为预成形件提供强度。如果还需要进一步的对基体致密,可以继续进行溶胶-凝胶渗透。该工艺方法对板状和圆筒形预成形件进行良好,但对于加劲结构还有困难。

### 3.1.1.6.7 总结

陶瓷基复合材料的溶胶-凝胶工艺,是对传统的高温陶瓷工艺技术的一种低温替代方法。该工艺具有以下一些重要的工艺优点,包括:无余量制造技术、对完全机织物的适应性、易于测量和简单、便宜的模具。用溶胶-凝胶工艺制造大型的、形状复杂形状的制件是非常有吸引力的,但是由于其力学性能低,所以现在还没有广泛使用。改进力学性能要以下几个方面入手:控制干燥期间的基体开裂,耐温更高的基体,基体的致密化,纤维/基体界面的控制,和可在高温下保持高强度的陶瓷纤维。

### 3.1.1.7 熔体渗透

熔体渗透是一种基体制造的工艺方法,用熔融的金属渗透到预成形件所残余的空隙中。这种工艺中在渗透之前,通常需要对纤维增强体涂一层界面和保护层。该工艺得到的基体材料,通常为所渗透金属的固态形式和某些第二相组分的混合物。熔融渗透CFCC需要的关键工艺步骤如图3.1.1.7所示。

纤维增强体的准备包括将纤维成形到需要的形状,并涂以界面层(BN, C等)和阻挡层(SiC, Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>等)。通常用CVD(化学气相沉积)技术进行界面层。界面层用于提供纤维和基体之间的载荷传递。阻挡界面层用于在渗透过程中保护界面和纤维,使免遭高温熔融金属的影响。

初始的基体工艺步骤中包括一个或者两个方法,以将组分加入已界面层预成形件中。这两个方法是:

- 树脂渗透、热解和反应
- 泥浆浇注成形

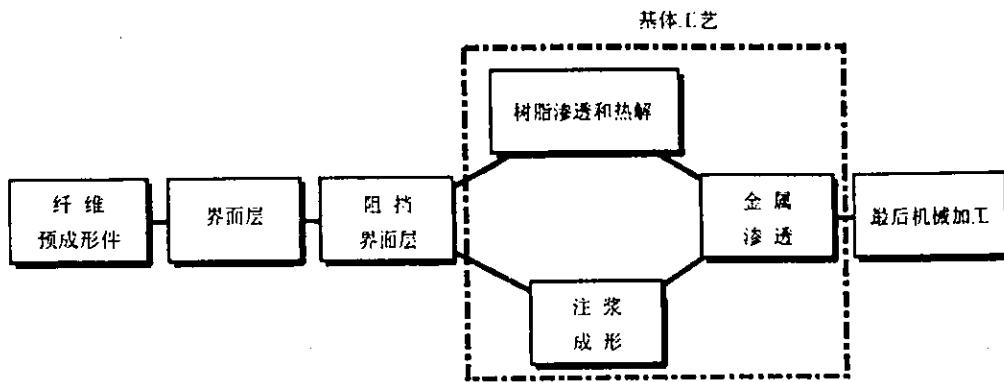


图3.1.1.7 CFCC材料的熔体渗透工艺步骤

### 3.1.1.7.1 树脂渗透、热解和反应

这种方法中用液态的丙烯酸脂渗透界面层的预成形件；丙烯酸脂经过热解后在预成形件的孔隙中留下了供反应的组分（通常大多为碳）。在金属渗透工艺过程中，这些组分和熔融的金属反应，生成基体的第二相组分。

### 3.1.1.7.2 注浆成形

注浆成形的方法中可以将第二相基体组分直接注入到预成形件的空隙中。这些组分在金属渗透中残留，并形成最后基体的整体组成部分。

最后的基体工艺步骤是金属渗透。该步骤先将准备好的预成形件在真空条件下加热到超过所用金属的熔点。所提供的金属和预成形件接触，使得可以通过毛细现象进入预成形件空隙。预成形件在该温度保持很短时间之后冷却，同时金属凝固得到刚硬的复合材料结构。表3.1.1.7.2所示为典型系统和其代表性的性能。

表3.1.1.7.2 典型系统和代表性的性能

基 体	纤维/增强体	制造商	
Si-SiC	Hi-Nicalon, Sylramic, 碳	Honeywell Advanced Composites Inc, B.F. Goodrich, General Electric...	
		大气环境	2192°F (1200°C)
纤维: HiNicalon	极限拉伸应力	52.7ksi (363MPa)	38.1ksi (263MPa)
界面: 氮化硼	极限拉伸应变	0.75%	0.55%
基体: 通过注浆成形的熔体渗透Si-SiC	比例极限	17.6ksi (121MPa)	207ksi (143MPa)
	拉伸模量	29.2Gsi (201GPa)	35.1Gsi (242GPa)

比较其他的基体致密化方法，熔体渗透技术有很多优点，包括：

- 开孔隙率低
- 热传导率较高
- 氧化/环境退化影响小
- 可能更短的加工时间

致密的基体提供了：

- 优异的纤维/界面保护
- 比例极限较高

### 3.1.1.8 反应工艺

反应工艺或者反应成形是一种技术，其中，组成复合材料的基体几个不同的相，在处理过程中产生反应生成一个新相。通常，预成形件包括增强体和包围增强体的一种（或者多种）致密的基体前驱体压块；然后压块和气体、熔融材料或者与其自身进行反应。该技术使用的反应物要能够制成浆料或粉体，有低或适度的熔化温度。这些特征要优于传统的陶瓷加工工艺：传统的陶瓷加工工艺的烧结温度非常高，收缩率很大，并由于陶瓷出现升华或分解而不是熔化，其发展受到影响。反应工艺的另外优点包括：可以制造复杂外形和近无余量的形状，可以一步致密，以及在某些情况下可以得到零孔隙率或低孔隙率。

在陶瓷基复合材料的反应工艺中，需要考虑的重要因素包括最终的密度和增强体是否遭到损伤。密实的基体在反应工艺中出现体积膨胀，因此候选的反应工艺通常都导致其产物的密度低于初始材料。增强纤维可能由于在高温下曝露或由于成形反应而受到损伤。为了避免损伤纤维，考虑采用反应温度足够低及化学亲和力低的纤维体系。在反应物可能对纤维产生化学浸蚀的情况下，可以使用界面层。

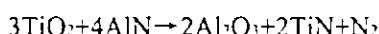
本章先前已经讨论了两种反应工艺，即DIMOX方法和熔体渗透法。其他的反应工艺举例如下：

**反应结合氮化硅法：**反应结合氮化硅（RBSN）的制造，是通过按要求的形状将硅颗粒压塑成形，再将该多孔的压块放入氮气环境中，起始温度约为2 192°F（1 200°C），终止温度约为2 552°F（1 400°C）。硅和氮气反应生成氮化硅；因为孔洞内生成氮化硅，该反应约增重60%；这导致理论上密度增加80%-85%，而外部尺寸的变化小于1%。由于硅-氮反应为放热反应，所以要小心控制反应以免温度高于硅的熔点温度。依据需要氮化的零件尺寸，反应过程可以花费几天甚至超过一个星期（文献3.1.1.8(a)）。由于可能要在高温下曝露长的时间，使用该工艺制造CMC时增强纤维会受损伤。长丝纤维，如SCS-6CVDSiC，在氮化过程中显示了其稳定性，但是聚合物生成的多丝纤维可能退化。氮结合碳化硅（下节讨论）提供了一种防止纤维退化的解决办法。

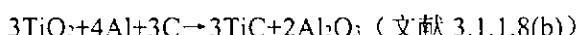
**氮气结合碳化硅法：**氮气结合采用氮气和硅的反应在SiC颗粒之间生成结合相，而不是复合材料的基体。减少硅的聚集程度，可使氮化时间比反应结合氮化硅（RBSN）方法短得多，纤维材料的选择面也更宽。Textron Specialty Materials已经用SCS-6 CVD长丝纤维、Tyranno SiC基多丝纤维和碳纤维，成功制备出氮气结合SiC（NB-SiC）复合材料（文献3.1.1.8(a))。

**反应烧结和燃烧合成法：**反应烧结意味着压块中有两种或更多的组分，在烧结过程中反应生成一个或多个新相。这反应通常是放热反应，放热有助于烧结。有时放热反应产生的热量很大，可以在不需要外部热源的情况下进行自烧结，只需要在开始反应时加热即可。这就是燃烧合成的基础，如果控制的好，可以生成相对密实的合成反应产物。从而，在反应之后能立即加压，在进一步的热固中利用反应热。复合材料产物的两个例子如下：

- 反应烧结：



- 燃烧合成：



**水泥基复合材料：**可以通过似水泥的结合得到很多不同的陶瓷复合材料。可以在低温

下并通常包括水合反应（如波特兰水泥或石膏）或其他反应（如氧化物和磷酸的反应）来形成这些结合。最早成功的陶瓷基复合材料之一，就是由玻璃纤维增强的水泥（GFRC）。另一个例子是用1%-3%非连续碳纤维增强的水泥。纤维改变了断裂行为，并增高了韧性，提高可靠性（文献3.1.1.8(a)）。

### 3.1.1.9 纤维独石（FM）

#### 3.1.1.9.1 引言

通常，纤维独石（FM）是一类新的结构陶瓷，它具有类似于CFCC材料的力学性能，包括：很高的断裂能、损伤容限和合适的失效模式。但由于纤维独石是块体式陶瓷，可以通过传统的粉末加工技术，利用便宜的原材料来制备。其高性能和低成本的结合是一个突破，可使陶瓷在能源和国防相关的应用中得到更广泛的使用。纤维独石是具有清晰纤维组织的烧结（热压）单相陶瓷。构成FM宏观结构的两个相是，以细长多晶胞或纤维形式存在的一个主相，和被以晶胞边界形式出现的薄的第二相，主相被第二相隔离开来。在这两相中，主（晶胞）相的体积含量为80%-95%，贯通（晶胞边界）相的体积含量为5%-20%。主（晶胞）相通常为结构陶瓷，如 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 、 $\text{SiC}$ 、 $\text{ZrB}_2$ 、 $\text{HfB}_2$ 、 $\text{HfC}$ 、 $\text{ZrO}_2$ 或 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 等；而贯通（晶胞边界）相或者是韧性金属，如Ni、Ni-Cr、Nb等，或者是弱结合的低剪切强度材料，如石墨或六边形BN。表3.1.1.9.1列举了许多已为各种应用领域开发的FM材料体系。

表3.1.1.9.1 供大量用途的已制造的FM材料体系

• 氮化物	• 二硼化物	• 陶瓷基FM:
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$	$\text{ZrB}_2/\text{BN}$ $\text{HfB}_2/\text{BN}$	$\text{WC}/\text{CO}$
• 碳化物	• 氧化物	• 三层FM:
$\text{SiC}/\text{BN}$ $\text{SiC}/\text{石墨}$ $\text{SiC}-\text{AIN}/\text{BN}$ $\text{HfC}/\text{W}-3.6\text{w\%Re}$ 金刚石/ $\text{WC}$	$\text{Al}_2\text{O}_3/\text{graphite}$ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$ $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}-20\text{Cr}$ $\text{ZrO}_2(\text{PSZ})/\text{Ni}$	$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}/\text{Si}_3\text{N}_4$ $\text{ZrO}_2(\text{PSZ})/\text{Al}_2\text{O}_3/\text{Ni}$

基本的FM结构，是通过简单的过程，将普通的原材料粉末转变成含有粉体和热塑性聚合物粘接剂的“坯体”丝。这些丝可以压实成“坯体”状态，在烧结之后形成多晶胞结构。在制造过程中加入第二相晶胞边界，在熔融纺丝过程中提供双组分甚至多组分纤维丝。该工艺广泛适用，使得可用任意可作为烧结粉体的热力学相容材料组，制成晶胞/晶胞边界纤丝。微结构的尺度由坯体纤维直径（对于晶胞尺寸）和界面层厚度（对于晶胞边界）确定。一旦坯体复合材料丝制造出之后，可以按传统的复合材料的织构（如单轴铺贴、双轴铺贴、机织织物等）进行缠绕或编织，形成所需的部件形状。所需部件成形之后，通过加热使粘接剂挥发，通过热压法最后压固物体。

#### 3.1.1.9.2 纤维独石的宏观结构

图3.1.1.9.2(a)所示为 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  FM单轴排列结构的典型抛光剖面和侧边。阴暗部分为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ 的多晶晶胞，明亮部分为连续的BN晶胞边界。图3.1.1.9.2(b)所示为45°角联锁3-D机织 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  FM结构的剖面。

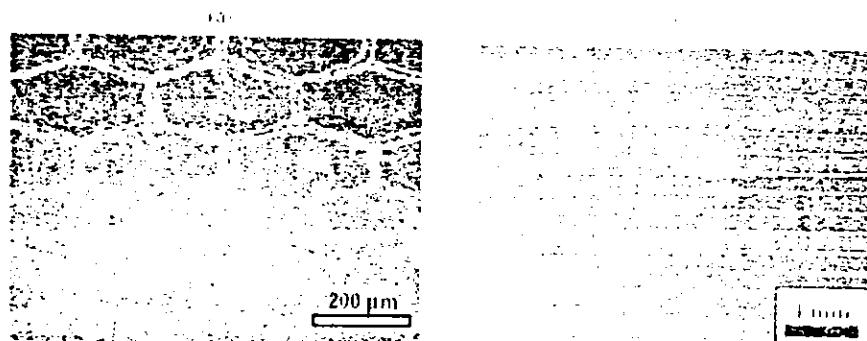


图3.1.1.9.2(a) 单向 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ FM结构的剖面微观图(a)和热压平面(b)

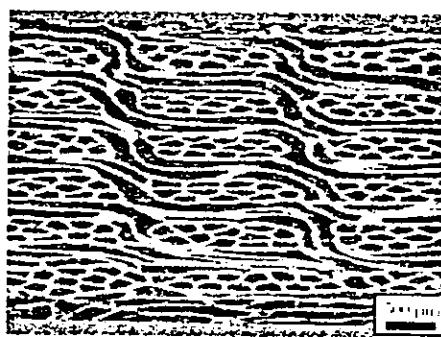


图3.1.1.9.2(b) 45°角联锁3-D机织 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ FM结构的剖面微观图

### 3.1.1.9.3 纤维独石的力学性能

已制造出的FM体系具有弯曲强度102 ksi (700 MPa)，断裂能接近 $6.1 \times 10^{-3}$  Btu/in<sup>2</sup>s (10 000 J/m<sup>2</sup>s)，使用温度为4 040°F (2 500 K)。图3.1.1.9.3为 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 弱界FM在室温条件下用四点弯曲法试验的载荷-变形曲线，显示了峰值表观弯曲强度73 ksi (500 MPa)，在第一次断裂发生之后有显著的承载能力，该曲线下面积用于计算材料的断裂功(WoF)， $\sim 5.3 \times 10^{-3}$  Btu/in<sup>2</sup>s (~8 600 J/m<sup>2</sup>s)。

纤维独石陶瓷利用基本材料(这里为 $\text{Si}_3\text{N}_4$ )的固有弯曲强度，将断裂韧性提高了一个或两个数量级。结果是得到一种材料，由于晶胞界面的分离和滑移耗散裂纹能量，从而使它合适地失效。表3.1.1.9.3所示为几种结构的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 和二硼化物/BN纤维独石在室温条件下的典型弯曲性能。

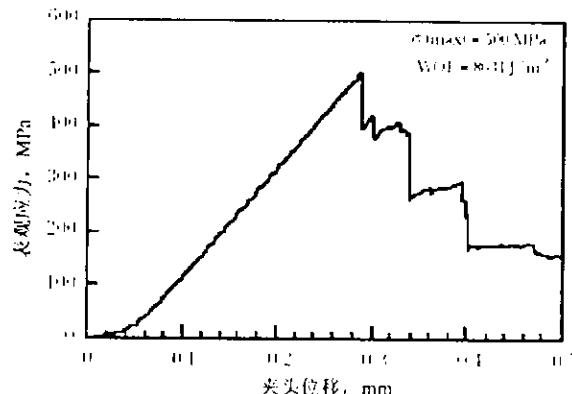


图3.1.1.9.3 室温条件下 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 纤维独石四点弯曲试验的载荷-变形曲线

表 3.1.1.9.3  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  和二硼化物/BN FM s 室温下四点弯曲试验的力学性能

FM结构	E (Msi)	$\sigma$ (ksi)	断裂功 (Btu/in <sup>2</sup> /in)
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ —单轴	$39.7 \pm 0.7$	$66.1 \pm 19.9$	$4.96 \times 10^{-3} \pm 5.6 \times 10^{-4}$
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ — $0^\circ/90^\circ$	$28.7 \pm 0.6$	$48.4 \pm 5.1$	$3.91 \times 10^{-3} \pm 5.6 \times 10^{-4}$
$\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ — $\pm 45^\circ/90^\circ$	$30.3 \pm 0.6$	$38.0 \pm 2.5$	$1.99 \times 10^{-3} \pm 2.14 \times 10^{-4}$
$\text{ZrB}_2/\text{BN}$ —单轴	$53.5 \pm 1$	$46.4 \pm 5.9$	$7.18 \times 10^{-4} \pm 9.73 \times 10^{-5}$
$\text{ZrB}_2/\text{BN}$ — $0^\circ/90^\circ$	$48.9 \pm 1.5$	$19.6 \pm 2.8$	$1.98 \times 10^{-4} \pm 2.69 \times 10^{-5}$
$\text{HfB}_2/\text{BN}$ —单轴	$55.0 \pm 3.5$	$42.4 \pm 5.5$	$6.56 \times 10^{-4} \pm 7.89 \times 10^{-5}$
$\text{HfB}_2/\text{BN}$ — $0^\circ/90^\circ$	$46.9 \pm 1$	$24.2 \pm 2.8$	$2.16 \times 10^{-4} \pm 3.37 \times 10^{-5}$

### 3.1.1.9.4 纤维独石的热性能

图3.1.1.9.4所示为这些FM体系热传递率随温度和热各向异性程度的变化情况。复丝共挤塑 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 和二硼化物/BNFM的热传导率，是用激光闪蒸技术通过热扩散率测量得到的。热扩散率的测量值是用（晶胞材料名义体积含量为85%、晶胞边界材料的体积含量为15%的）单轴试样，沿其平行和垂直于纤维结构的方向进行测量而得到的。

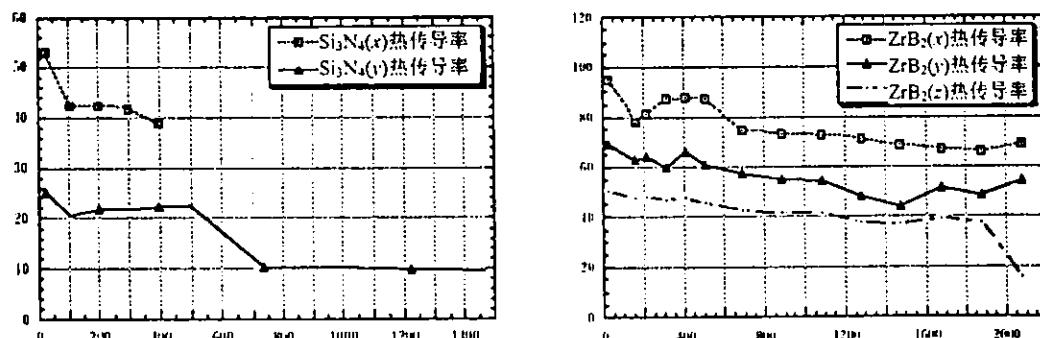


图3.1.1.9.4  $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$ 和 $\text{ZrB}_2/\text{BN}$  FM s 材料沿晶胞轴(x轴)和垂直晶胞轴(y轴)面内方向以及沿热压方向(z)的热传导率(W/mk)-温度关系曲线图

### 3.1.1.9.5 纤维独石的应用

FM已经得到了广泛的应用，最近的应用包括一些结构，如平板、固态热气管容器、辐射燃烧器板、火箭喷嘴和火箭推进器部件、飞机和地面车辆的防弹装甲板、和钻/切割工具部件，这些都可以很容易地用坯体材料成形。

Advanced Ceramics Research, Inc. in Tucson, Arizona正在进行FM的应用开发工作，主要集中在用于中温涡轮发动机的 $\text{Si}_3\text{N}_4/\text{BN}$  FM，以及用于火箭和太阳热能推进器的 $\text{ZrB}_2$ 基/BN,  $\text{HfB}_2$ 基/BN, 和 $\text{HfC}/\text{W}-\text{Re}$  FM的应用研究。最近的开发成果使得可以把Diamond/WC FM作为工具钻头镶嵌件应用于石油钻探工业。这些材料力学性能的改进，促使产品有极大改进。

### 3.1.1.10 混杂体系

此节留待以后补充。

## 3.2 纤维增强体系和技术

### 3.2.1 引言——CMC 中增强体的作用和功能

在陶瓷基复合材料中，陶瓷纤维是复合材料中的直接承载组分，是体系内提供高强度、高模量和损伤容限能力的关键结构要素。

现在已经生产了很多种具有各种成分、几何形状和性能的陶瓷纤维。以下章节介绍现在可以生产的纤维种类。

### 3.2.2 连续纤维

#### 3.2.2.1 氧化物纤维

陶瓷复合材料增强体用的商用多晶氧化物纤维，是将化学前驱体通过纺丝然后热解生成的，该工艺通常叫做溶胶-凝胶工艺。利用化学工艺可制备高氧化铝含量（氧化铝含量高达55%）的纤维，因而比用二氧化硅基熔体进行熔融玻璃纺丝得到的纤维具有更加优异的高温性能。无论是氧化物纤维还是非氧化物纤维，都有种类繁多的前驱体和加工技术；已经将其用来控制纤维微结构的增长，和开发多种纤维性能，如模量、密度、介电常数和拉伸强度。

氧化物纤维通常有多纤维连续丝束或粗纱。由500-1 000根长丝纤维组成，每根长丝纤维直径为10-15  $\mu\text{m}$ 的纤维束柔软、易于操作，使得可用其机织成织物再用于制造复杂形状的复合材料。氧化物和其他增强纤维的关键特征是其超细甚至是纳米级的微结构，小于0.5  $\mu\text{m}$ 的晶粒尺寸是最适合于提供高强度的。但晶粒小的缺点是增大了高温蠕变的速率。但是，由于过去十年在纤维制备工艺的改进，使得所制备的氧化物纤维或是非氧化物纤维都具有极大改进的高温蠕变性能。

所有用于CFCC的商用多晶氧化物纤维都是基于氧化铝的纤维。增强纤维的高氧化铝含量具有很多优点，包括提高了化学稳定性、高熔点、高模量、和高达2 192°F (1 200°C) 下的高强度。已用许多适于做纤维的氧化铝前驱体。铝的水成化学性使得能形成黏性的基本铝盐溶液，可通过干纺丝制成纤维。最近，还采用铝烷聚合物前驱体来制备氧化铝基纤维。由于几个原因，把硅石作为添加剂；绝大部分还含有 $\text{SiO}_2$ ，数量在0%-24%之间。硅石针对 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和莫来石的有害结晶而稳定氧化铝基纤维，避免形成粗晶、多孔微结构和因此产生的低纤维强度。

图3.2.2.1(a)所示为溶胶-凝胶纤维合成的流程图。纤维前驱体由氧化铝前驱体和其他无机物添加剂如二氧化硅、和有机添加剂的前驱体混合而成。合成方法提供了可以制备适用于纤维纺丝的高黏度液体的一种化学手段。这纺丝溶液或纺丝黏液对于不能溶解的结晶/络合物沉淀必须是稳定的，还要对前驱体逐步交联反应所造成的黏度或凝胶迅速增加保持稳定。商业纤维的常用氧化铝前驱体有：铝-氯水（Almax氧化铝纤维）、醋酸铝（Nextel系列纤维）、铝-聚合物（Sumitomo Altex）。作为向纤维组分中加入 $\text{SiO}_2$ 的方法， $\text{SiO}_2$ 前驱体包括胶状的硅溶胶、和部分水解的硅醇盐和聚硅氧烷。可以通过可溶盐（如硝酸盐）把其他的无机改性剂加入纤维组分中。

图3.2.2.1(b)所示为典型的商业纤维制备工艺示意图。纺丝黏液的黏度为100-1 000 Pa·s，可用泵将其通过多喷嘴喷丝头喷出，同时喷出400-1 000根丝甚至更多。通过仔细控制湿度、

温度和气流条件，纺丝过程在纺丝塔中进行。溶剂挥发之后纤维开始变硬。可以相对拖拽轮的速度改变泵出的浆料的体积速率，控制纤维的直径。

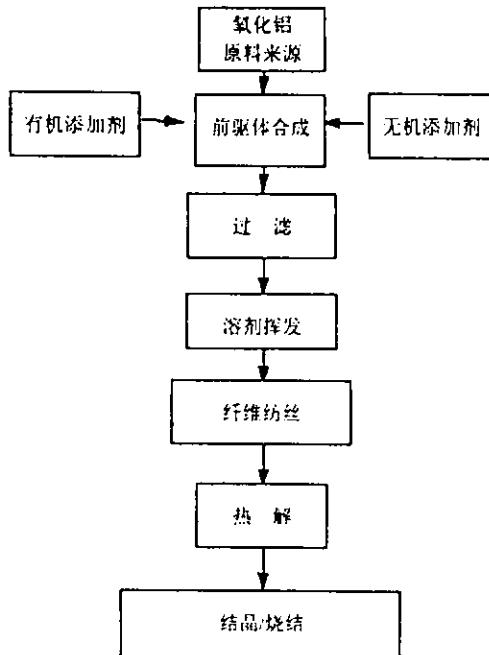


图3.2.2.1(a) 溶胶/凝胶纤维合成流程图

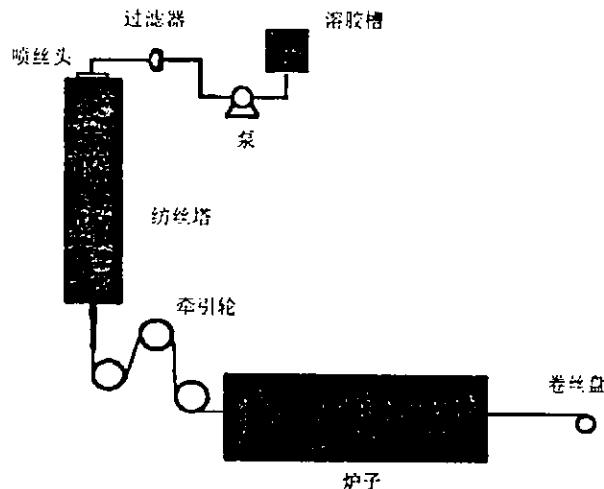


图3.2.2.1(b) 干纺丝工艺示意图

纺丝之后，将纤维坯体移入炉中进行热处理。热解，或将化学前驱体转化为陶瓷，要使坯体的初始重量损失50%-80%。挥发性成分必须在该阶段从纤维中挥发出来。因而，要非常小心地实施热解过程使纤维坯体慢慢转化为氧化物形式，而不形成会降低纤维强度的缺陷或瑕疵。在1 472°F (800°C) 条件下完成热解；高于1 472°F (800°C) 时，热处理会使纤维结晶成氧化铝或其他化合物，这取决于成分和选择的前驱体。结晶之前或之后可能会发生烧结现象。

热处理的目的是为了形成具有良好强度和高温性能（即蠕变、蠕变断裂、抵抗因晶粒生长出现热退化的能力）的陶瓷微结构。为了达到室温下的高纤维强度，需要有小的晶粒尺寸（ $0.5 \mu\text{m}$ ）。Griffith方程， $\sigma = K_{\text{k}} / \sqrt{\pi c}$  显示，对于 $\text{Al}_2\text{O}_3$ ，( $K_{\text{IC}}=4$ )，如果缺陷尺寸为 $0.6 \mu\text{m}$ ，强度只能达到 $3 \text{ GPa}$ 。所以不仅与工艺相关的缺陷尺寸要很小，同时，晶粒尺寸也不应超过该极限。

许多商业的氧化物纤维其主相为用无定形二氧化硅来稳定的过渡型氧化铝（如Nextel 550, SumitomoAltex）。过渡型氧化铝，如 $\eta\text{-Al}_2\text{O}_3$ （立方）或 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ （四方晶系），是一系列的氧化铝尖晶石（通过阳离子点阵的有序程度不同来区分），它是氧化铝前驱体在 $1472\text{-}1652^\circ\text{F}$ ( $800\text{-}900^\circ\text{C}$ )下热处理时形成的。过渡型氧化铝的晶粒尺寸很小，通常为 $100\text{nm}$ 或更小；这种纤维可以在直到大约 $1200^\circ\text{C}$ 的温度条件下仍保持稳定；在高于 $1200^\circ\text{C}$ 温度条件，过渡型氧化铝转变为 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ ，或者，在有二氧化硅的情况下转变为莫来石。通常，由于在该结晶过程中大晶粒的增长，它起到缺陷的作用，纤维的强度会降低。

这种纤维中的一个变种是Nextel 312，它除了莫来石中 $3\text{:}2$ 原子比的氧化铝和二氧化硅之外，还有 $14\%$ 的 $\text{B}_2\text{O}_3$ 。Nextel 312不是转变为 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 而是结晶成 $9\text{Al}_2\text{O}_3\text{B}_2\text{O}_3$ ，它在高于 $1000^\circ\text{C}$ 的更进一步热处理中通过交换晶格点阵中Si和B离子，逐渐转变为莫来石。和其他纤维相比， $\text{B}_2\text{O}_3$ 含量高有以下优点，包括低密度、低热膨胀、和低弹性模量（因而有高柔性和高断裂应变）。但是， $\text{B}_2\text{O}_3$ 降低了纤维的高温性能（如蠕变），并使纤维对可能的氧化物基体更具有活性。

有几种氧化物纤维是以 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 为主相的。两种商业纤维Nextel 610和Mitsui Almax中的 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 含量大于 $99\%$ 。这样，这些纤维比含二氧化硅的纤维具有更高的化学和热稳定性，因而，在制造过程中对潜在的氧化物基体反应的可能性更低，在腐蚀的使用环境中更加稳定。高氧化铝含量的缺点是高密度和高弹性模量，这降低了断裂应变和操作过程中的柔性。 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 还有固有的高断裂阻抗，可以制造高强度的纤维。例如，Nextel 610纤维的拉伸强度为 $440 \text{ ksi}$  ( $3.0 \text{ GPa}$ )，比其他商业纤维的强度高出 $50\%$ 。另一种多晶 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 纤维，即FP纤维已在文献中得到充分的表征，但现在已不再进行商业生产了。

另外一种完全结晶的纤维是Nextel 720纤维，它是 $\alpha\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和莫来石的两相混合体。它比其他的氧化物纤维具有更高的抗蠕变性能，这是由于其莫来石的含量高。莫来石是一种高蠕变阻抗的化合物，再就是由于其独特的晶体结构或互相贯穿相，这减少了晶体界面滑移产生的变形。具有几乎同样化学组成的Sumitomo Altex，由于其微结构包括纳米级的 $\gamma\text{-Al}_2\text{O}_3$ 和无定形二氧化硅，所以蠕变阻抗低下。由于存在无定形的相，其在应力作用下的变形速率较高。

### 3.2.2.2 SiC长丝

连续SiC长丝是通过化学气相沉积（CVD）工艺将 $\beta\text{-SiC}$ 沉积在连续的碳长丝基底上得到的。已用如图3.2.2.2(a)图示的工艺制造具有分级和分层结构的纤维丝。

该类由Textron制造并定名为“SCS”的纤维，由从碳芯向外辐射的柱状晶结构的化学计量的SiC组成（图3.2.2.2(b)）。在具有脆性基体如氮化硅或碳化硅的复合材料中，富碳的表面界面层提供一个提高韧性的隔离层。

相对于制造SiC的其他工艺，化学气相沉积法的优点是能高温快速逐层形成SiC微结构，而不需要引入有害的氧化物相。但是，由硅和含碳化学前驱体SiC成形的机理非常复杂，并且对很多参数十分敏感，包括反应气体种类、载体和/或还原气体、沉积压力、温度、气相

浓度、流速等。

这种CVD SiC纤维的剖面如图3.2.2.2(b)所示。作为商业供应的陶瓷增强体，SCS纤维的直径为142 μm和79 μm，分别命名为SCS-6和SCS-9A。

第三种纤维，SCS-ULTRA是最近为得到更高的强度而开发的，其直径为142 μm。SCS-ULTRA纤维的强度显著高于其他任何商业的增强纤维，达到957 ksi (6.6 GPa) (表3.2.2.2)。

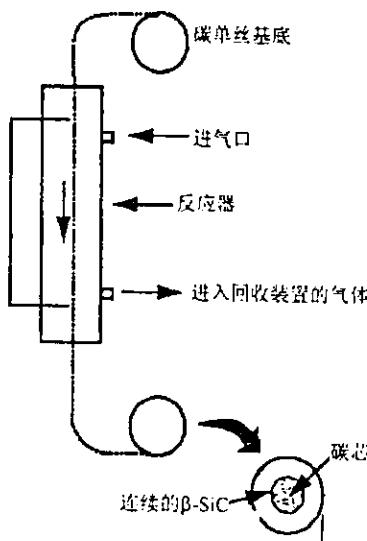


图3.2.2.2(a) 用化学气相沉积(CVD)法在碳芯基体上生产SiC长丝

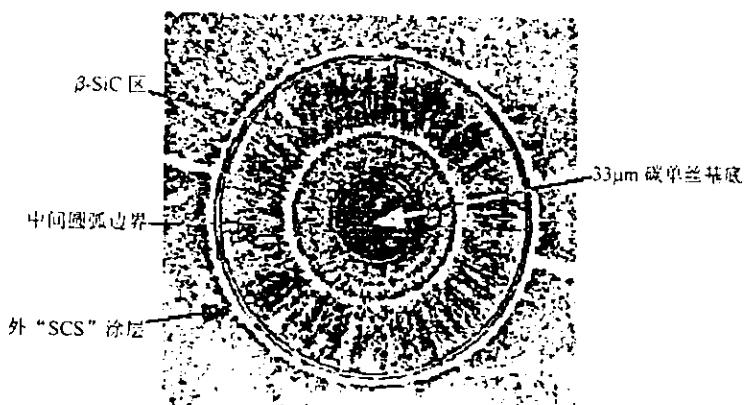


图3.2.2.2(b) SCS纤维剖面显微照片

表3.2.2.2 CVD SiC长丝性能

CVD SiC纤维的室温性能	SCS-Ultra	SCS-6	SCS-9A
名义组分			
纤维直径(μm)	140	140	79
密度(g/cm <sup>3</sup> )	NA	3.0	2.8
拉伸强度 ksi (MPa)	900+ (6210+)	500 (3 450)	500 (3 450)
杨氏模量 Gsi (GPa)	60 (414)	60 (400)	44 (307)
线热膨胀系数(ppm/K)	NA	在73°F (23°C) 下2.3	在73°F (23°C) 下4.3

该信息来自Textron网址 (2001.2.26) (<http://www.systems.textron.com/sicfiber.htm>) Textron纤维性能。

### 3.2.2.3 小直径SiC基纤维

现在从市场上可得到的小直径（小于20  $\mu\text{m}$ ）和多丝形态的硅-化合物纤维，是通过有机硅聚合物热解合成得到的。用聚合物热解(PP)工艺制造SiC基纤维的方法是首先由Yajima等人发展的，该方法把二甲基二氯硅烷( $(\text{CH}_3)_2\text{SiCl}_2$ )转换为十二甲基六硅烷( $[(\text{CH}_3)_2\text{Si}]_6$ )，接着再将其转化为有机硅聚合物(-Si-C-)<sub>n</sub>（文献3.2.2.3(a)-(e)）。总的工艺流程图如图3.2.2.3所示。

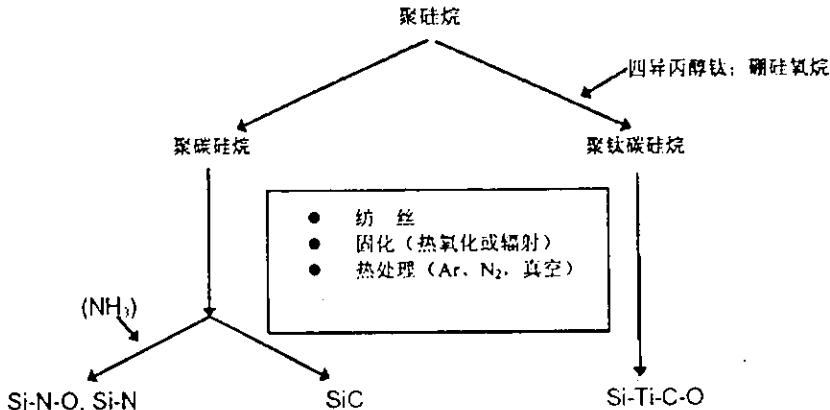


图3.2.2.3 聚合物热解纤维工艺流程图

可以很容易地将黏质的有机硅流体熔融纺织成小直径的多丝纤维，接着在空气中或离子辐射中将纤维进行固化或交联处理，以得到好操作的“坯体”纤维。在惰性气氛或含氮气气氛下将坯体纤维缓慢加热到~2 192°F (~1 200°C)，使其转化为陶瓷纤维。

通过原始的聚合物热解工艺得到的陶瓷纤维，其直径为10-20  $\mu\text{m}$ 范围，是纳米尺寸的无定形和微晶形态的 $\beta$ -SiC或 $\text{Si}_3\text{N}_4$ （文献3.2.2.3(e)）。其微结构中仍存在不同数量的自由碳、氧（可能结合成Si-O-C和Si-O-N）和微孔隙。结果是纤维的密度和模量要比纯的密实形式硅化合物小很多。但是更重要的是，在温度高于~2 192°F (~1 200°C)的条件下，由于Si-C-O相分解为SiO和CO气体而使得纤维的微结构是热不稳定的（文献3.2.2.3(f)）。由于出现这种分解，在纤维内部产生大的孔洞，使纤维强度随时间/温度出现明显下降。已经证实，可以通过适当的方法不让分解的气体逸出，或者采用方法以极大减少氧的含量，使得这种性能的下降推延到更高的温度条件下（文献3.2.2.3(g)和(h)）。

为提高纤维性能，一些厂家已经改进了聚合物热解纤维的成分。Ube Industries提供了“Tyranno”纤维，在这种纤维中加入了约2wt%的钛，以抑制晶粒在高温下的增长（文献3.2.2.3(i)）。Tonen公司已开发了基于氮化硅的纤维（文献3.2.2.3(j)），用硅烷、嘧啶和氨来生产一种可纺丝的聚合物。Dow Corning公司通过热解聚氯二矽酸盐聚合物，用Si-N-O-C组成开发了HPZ纤维（文献3.2.2.3(k)）。

基于上世纪80年代后期和90年代早期的这些发展，这些硅化合物纤维的生产厂家改进了其纤维的化学组成和工艺方法，得到了低氧含量、高Si-C化学计量和晶粒尺寸控制较好的硅化合物纤维。这些组分和微结构的改进产生了新一代具有更高模量和热稳定性的硅-化合物纤维（Sylramic, Hi-Nicalon, 和Nicalon-S）。

表3.2.2.3所示为不同厂家所生产聚合物高温解纤维的一般信息和典型性能。

表3.2.2.3 聚合物热解纤维的性能

性能/纤维名称	Nicalon CG	Hi-Nicalon	Nicalon S	Sylramic*	Tyr-anno	HPZ	Tonen
制造商	Nippon Carbon	Nippon Carbon	Nippon Carbon	Dow Corning	Ube	Dow Corning	Tonen
纤维直径	14	12	11	10	10	10	10
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.55	2.74	3.10	3.0	2.50		
拉伸强度 (GPa)	3.0	3.4	2.6	3.1	2.76		
拉伸模量 (GPa)	190	270	420	400	193		
Si组分含量wt.%	56.6	62.4	68.9	69	SiTICO	S-C-N	
C	31.7	37.1	30.9	29	-		
O	11.7	0.5	0.2	-	-		
C/Si (原子)	1.31	1.39	1.05	1.0	-		
晶粒尺寸 (nm)	< 2	5-10	11	500			
热稳定性 (℃)	1 110	1 230	1 450	1 420	1 300		

\*可以得到另外的实验的Sylramic纤维：基于高纯度、很好结晶的β-SiC；用于耐更高温度、低蠕变的应用情况。

### 3.2.2.4 碳纤维

#### 3.2.2.4.1 简介和应用

碳纤维并不是新技术。爱迪生 (Thomas Edison) 曾经制造出碳纤维作为其电灯泡的灯丝。但是直到20世纪60年代，碳纤维才首次成为高强度、高模量的纤维用于宇航和国防应用作为结构复合材料。自从引入了这些纤维后，质量和性能有了很大的提高，而价格也急剧下降。结果，现在碳纤维已被广泛用于商业/工业/消费领域，如运动器材（高尔夫球棒、网球拍、自行车框架、箭）、复合材料船体、航空刹车片、汽车部件、工业滚筒和贮藏罐、炉子的绝缘体、电子部件屏蔽和风能系统的风车叶片。

所有这些应用中，碳纤维提供了任何其他结构材料都达不到的高强度、高刚度、低密度和低热膨胀系数。另外，碳纤维还具有高的导热和电导率，使其适用于需要对热能和电流进行特殊控制的特定领域。

碳纤维独特的特点是，在3 992°F (2 200°C) 的温度条件下仍能保持其力学性能，而其他材料（聚合物、金属和陶瓷）则已经失去其力学性能完整性或者已经显著软化。必须说明的是，这样的高温稳定性是在非氧化环境下的。碳纤维在高于932°F (500°C) 条件下就会迅速氧化。这种易氧化的性能要求有无氧环境、有隔离氧的防护、或要求短时间运行等。

碳纤维被用于各种不同的复合材料基体体系——聚合物、金属、碳和陶瓷基体。在每一种体系中，碳纤维都是基本结构成分，生成的产品有极好的强度、刚度并能减轻重量。

碳/碳复合材料已是很成熟的技术，被用于高性能飞机的刹车片、火箭尾喷管、导弹鼻锥和密封。和其他结构材料相比，碳—碳复合材料具有低密度，并能在非常高温下保持其力学性能的优点，如图3.2.2.4.1所示。

#### 3.2.2.4.2 碳纤维的结构和一般性能

碳纤维一般在非反应气氛下通过热解碳氢前驱体制得。有机前驱体在热解过程中向碳的初始转换，在碳纤维内产生无定形的晶体结构。对碳纤维进行高温热处理使无定形态转变为石墨晶体。纯度、晶状结构和晶粒尺寸，是决定碳纤维性能的关键因素。可以调整碳

晶体结构的尺度和方向，以提供期望的力学、热和电性能。高度结晶化的原子结构得到最高的模量、最高的热传导率和最低的电阻率。

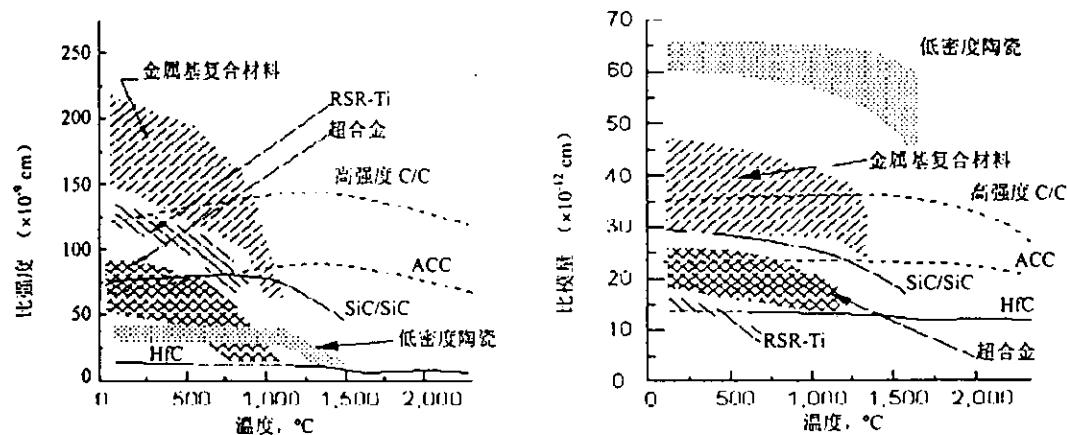
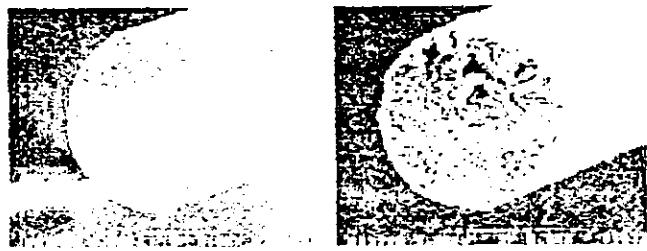


图3.2.2.4.1 不同材料的比强度和比模量与温度的关系

碳纤维的拉伸强度主要由缺陷水平决定，而模量则由晶体方向和结晶程度决定。这样，在制备前驱体和碳纤维的过程中改变影响晶体方向和结晶程度的工艺参数（如前驱体纯度、伸展率、整个过程的拉伸水平、热处理炉的温度），就可以生产出性能范围很广的碳纤维（表3.2.2.4.2）。通常碳纤维分三个主要等级——标准或航宇级、中等模量和高模量。

表3.2.2.4.2 碳纤维主要级别

级别	模量 (GPa)	断裂应变 (%)	热传导率 (W/m·K)	电阻率 ( $\mu\Omega \cdot m$ )
标准/航宇	~33/230	~2.0	~8	18
	~37/255	~2.0	~14	11
中等模量	~60/414	~1.5	~120	8.5
高模量	>100/758	~1.0	~520	2.5



AMORPHOUS CARBON FIBER HIGH MODULUS CARBON FIBER

迄今为止，绝大部分销售和进行质量取证的航宇用碳纤维，一直都是标准级碳纤维，而且，只要还继续进行目前各项应用的生产，多半还会继续使用这类纤维。然而，在新的航宇（和某些娱乐）应用中，则主要涉及中等模量和高模量纤维的使用。

在所有商业供应的增强纤维中，碳纤维具有最大的比模量（模量/密度）（是传统金属的几倍）。然而，自从20年前第一次引入商业PAN基碳纤维之后，其物理性能有了显著的提高。事实上，经过过去10年前驱体和碳纤维技术的改进，已经将该类纤维的拉伸强度由500 ksi (3.45 GPa) 提高到1 000 ksi (6.9 GPa)。现在，PAN基碳纤维可以达到的比强度（拉伸强度/密度）在商业供应的所有增强纤维中属最高的一员，同时还具有很好的性能均衡。

现在可以从市场得到很多不同的纤维，其拉伸模量在30-120 GPa (207-800 GPa) 之间，而延伸率从小于1%到高于2%。最后，在将碳纤维转变为中间产品形式的能力方面已经有大量的进展。可以将纤维进行编织、机织、针织、和转变成单向带，最终将其加工成复合材料。但是，这些材料天生要比传统的纺织纤维更难操作，并且传统的加工速度也不适合。因此，为提高加工效率不断发展了很多专门的技术。

沥青纤维被用于要求高模量和高热传导率，多半高抗氧化能力的应用领域。另一方面，PAN基碳纤维典型的小晶体尺寸为中模高强应用提供了更高的强度。

碳纤维的一个独特特征是，其沿纤维轴向的热膨胀系数为零或略微为负值。这是沿着纤维轴向的石墨晶体结构的效应；结晶的程度和方向直接决定了纤维的轴向热膨胀。具有高结晶度和有序排列的碳纤维，在轴向的热膨胀系数为负，其值达到 $-1.5 \text{ ppm}^{\circ}\text{C}$ 。碳纤维的负轴向膨胀系数的特征被用于复合材料，生产反射镜和精确校正设备中的低膨胀部件。关于碳纤维的结构与一般性能的其他信息，见文献3.2.2.4.2。

### 3.2.2.4.3 碳纤维的制造

市场供应的碳纤维是两步法工艺制造的——有机前驱体纺丝和热转化为碳。这里有3种商业用制备碳纤维的前驱体：人造丝、聚丙烯腈（PAN）和沥青。人造纤维丝是首先被用于制备高性能碳纤维的原料，是20世纪60年代到70年代早期占统治地位的前驱体原材料。但是，由于其低产碳率（2%-30%）、高工艺成本和物理性能有限，现在人造纤维丝前驱体在商业碳纤维制造中只占不到1%的份额（文献3.2.2.4.2）。

#### PAN基碳纤维

PAN基碳纤维是由聚丙烯腈或丙烯腈系共聚物得到的。通常，聚合物溶液或湿纺或干纺入最后转化为碳纤维的PAN前驱体纤维内。图3.2.2.4.3(a)为其工艺流程图。主要PAN基碳纤维供应商所用的纤维前驱体，与纺织腈纶服装和工业应用中使用的丙烯酸纤维大不相同。比起纺织应用的纤维，PAN前驱体纤维每束纤维的长丝数少、纯度高、长丝直径小、而且丙烯腈（AN）含量高（即通常大于90%AN）；此外，为得到所需的碳纤维性能，要改进聚合物成分和分子量。因为这些区别，丙烯酸前驱体的成本比纺织用丙烯酸纤维的成本高3-5倍。

商业生产的PAN基前驱体纤维是基于PAN聚合物的溶液纺丝。通常，把稀释的聚丙烯酸溶液挤压到凝固浴槽（湿纺）或热空气（干纺）中。使用大量的溶剂是生产工艺中的基本要素，这导致了环境和产品设计受到限制。

PAN基纤维的稳定过程包括在空气中将纤维加热，温度范围为392-572°F (200-300°C)，保温约1小时。稳定处理之后，就在高于2 192°F (1 200°C) 的温度下，在惰性气氛中进行碳化。可以通过在高达5 450°F (3 000°C) 温度下的热处理（称为石墨化处理），进一步增强石墨状晶体结构的定向，从而进一步提高纤维的模量。然后，在将连续的纤维丝缠绕到绕筒之前，给连续的石墨或碳纤维进行表面处理并涂以浸润剂。表面处理是对纤维表面进行氧化，来提高复合材料中基体树脂和纤维的粘着性，而浸润则可提高可操作性和纤维与基体树脂的润湿性（文献3.2.2.4.2）。

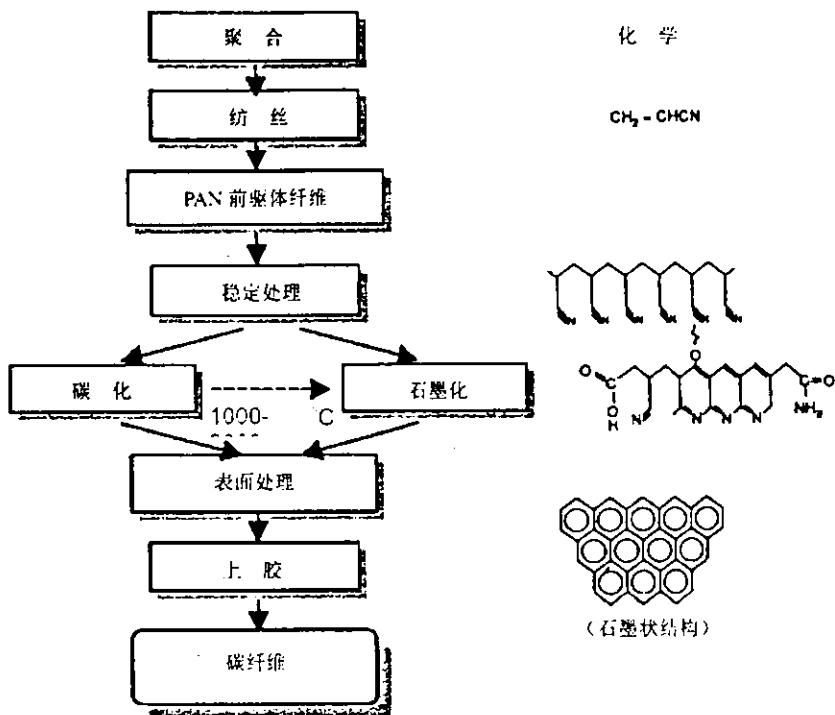


图3.2.2.4.3(a) PAN基纤维加工工艺

#### 沥青基碳纤维（文献3.2.2.4.2）

高模量沥青基碳纤维的生产，从对石油或煤焦油沥青的热处理开始，得到液态晶体前驱体，称为“中间相”。液态晶体材料被熔融拉丝称为前驱体纤维，再用与PAN基碳纤维相似的工艺转化为碳纤维。与PAN不同的是，其拉丝型纤维的很高的分子取向程度，使得能在碳化/石墨化阶段形成真实的石墨晶体结构，基本的工艺过程如图3.2.2.4.3(b)所示。

沥青基碳纤维的潜在优点包括经济性和由于分子高度取向所得到的一些独特的性能。由于开始时沥青前驱体的含碳量就明显高于PAN前驱体（约为93%对68%），沥青纤维的理论产量也显著高于PAN基纤维。还有，由于制备PAN纤维的丙烯腈原料，其价格几乎比制备沥青基纤维的沥青原料高两倍。这些差别应当使得沥青基纤维的成本比PAN基纤维的成本低很多。但是，对于性能相近的两种碳纤维，现在的售价是一样的。然而，将来有可能显现出这些潜在的价格优势。

沥青基碳纤维在所有的商业增强纤维中具有最高的比模量（拉伸模量/密度）。现在沥青基碳纤维可以达到的模量高达140 GPa (965 GPa)。其石墨结构可以得到卓越的轴向导率（电和热）和非常低的轴向热膨胀系数。商业的沥青基碳纤维可以得到的热传导率为铜的3-4倍。因此，沥青基碳纤维现在是对刚度、热膨胀系数、或导率有苛刻要求的空间应用的首选材料。但是商业沥青基碳纤维延伸的石墨结构使得其对纤维的表面缺陷和结构缺陷更加敏感。由于这些敏感性的增加，使得这些纤维的拉伸强度比PAN基碳纤维低40%-50%；也导致其压缩强度仅为PAN基碳纤维的1/3。

在沥青基碳纤维方面，技术改进主要集中在提高产品的拉伸强度、压缩性能、改善中间相产物的路线、高导率、和改善可加工性等方面。应该指出，只有沥青基碳纤维（和气相成长碳纤维）才具有提高热传导率所需的石墨晶体结构；这就为这种纤维开辟了一个独

特的市场。改进的中间相生产技术既是改善工艺经济性的关键，也是提高产品质量的关键。另外的关键就是减少纤维对缺陷的敏感性。最近研究表明，通过改进沥青基碳纤维的纺丝工艺过程，可以在不显著改变晶粒取向的条件下改进沥青基碳纤维的微结构，从而改进纤维的拉伸强度（减少缺陷敏感性）和压缩强度。尽管商业沥青基碳纤维的模量已达到了理想石墨模量的93%，但是其拉伸强度低于理论预计值的4%。显而易见，沥青基碳纤维的拉伸强度还可能有很大的改善。关于沥青基碳纤维的其他信息可以参见文献3.2.2.4.2。

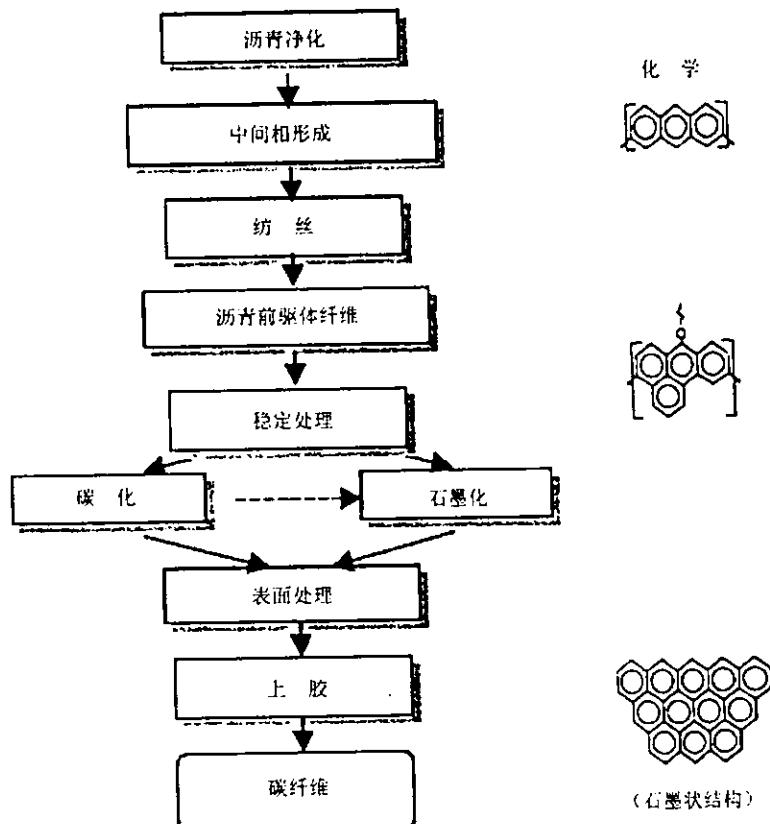


图3.2.2.4.3(b) 沥青基纤维的工艺流程

#### 3.2.2.4.4 碳纤维的可用性和来源

碳纤维可以制成直径5-15  $\mu\text{m}$ 的纤维。多丝纤维束/粗纱所含长丝数为1 000-48 000，线密度为0.066-3.20 g/m。标准的绕线量为1 000-5 000 m的纤维束。为了提高可操作性和可机织性，通常在纤维束上涂1-1.5 wt%的浸润胶。可以从纺织公司和复合材料供应公司得到不同机织物（平纹、缎纹、斜纹、席纹等）。碳纤维的主要生产厂家如表3.2.2.4.4所示。

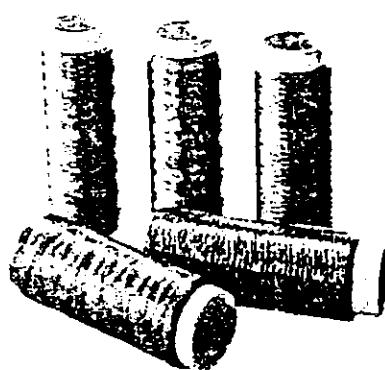


表3.2.2.4.4 碳纤维主要生产厂家

生产厂家	美国地点	网址	电话
BP Amoco	Alpharetta, GA	<a href="http://www.bparmocarbonfibers.com">http://www.bparmocarbonfibers.com</a>	800-222-2448
Conoco	Houston, TX	<a href="http://carbonfiber.conoco.com/index_dynamic.html">http://carbonfiber.conoco.com/index_dynamic.html</a>	877-319-8853
Grafil	Irvine, CA	<a href="http://www.grafil.com">http://www.grafil.com</a>	800-365-5533
Hexcel	Salt Lake City, UT	<a href="http://www.hexcelfibers.com">http://www.hexcelfibers.com</a>	800-987-0658
Nippon Graphite	Cypress, CA (T.Wong)	<a href="http://plaza6.mbn.or.jp/~NGF/english/ngf.htm">http://plaza6.mbn.or.jp/~NGF/english/ngf.htm</a>	714-826-3235
Toho Carbon	Menlo Park, CA	<a href="http://www.tohorayon.co.jp/rayon/eng/index_4.html">http://www.tohorayon.co.jp/rayon/eng/index_4.html</a>	650-614-0765
Toray Carbon	Santa Ana, California	<a href="http://www.toray.com/cfa/fiber.htm">http://www.toray.com/cfa/fiber.htm</a>	714-431-2320
Zoltek	St.Louis, MO	<a href="http://www.zoltek.com">http://www.zoltek.com</a>	314-291-5110

## 3.2.2.4.5 碳纤维具体性能

下列各表为不同的碳/石墨纤维的性能数据。数据来源于产品手册和产品说明书（2000年9月）。

表3.2.2.4.5 具体碳纤维的性能（见3.2.2.4.5(a)-(c)）

来源/种类	强度		模量		拉伸应变(%)	热传导率 W/m·K
	ksi	GPa	Msi	GPa		
<b>BPAMOCO</b>						
T-300	545	3.75	33	231	1.4%	8
T-650	620	4.28	37	255	1.7%	14
P-25	200	1.38	23	159	0.9%	22
P-30X	300	2.07	30	207	0.7%	50
P-55S	275	1.90	55	379	0.5%	120
P-75S	300	2.10	75	517	0.4%	185
P-100S	350	2.41	110	758	0.3%	520
P-120S	350	2.41	120	827	0.3%	640
<b>CONOCO</b>						
<b>GRAFIL</b>						
34-700	650	4.50	34	234	1.9%	
34-600	600	4.15	34	234	1.8%	
TR-30	640	4.41	34	235	1.9%	
TR-40	680	4.70	34	235	2.0%	
TR-50	710	4.90	35	240	2.0%	
TR-H50	710	4.90	37	255	1.9%	
MR35E	640	4.41	43	295	1.5%	
MR40	640	4.41	43	295	1.5%	
MR50	790	5.40	42	290	1.8%	
MS40	670	4.61	50	345	1.3%	
HR40	640	4.41	57	390	1.1%	
HS40	640	4.41	66	450	1.0%	

表3.2.2.4.5 具体碳纤维的性能(续)

来源/种类	强度		模量		拉伸应变(%)	热传导率 W/m·K
	ksi	GPa	Msi	GPa		
<b>HEXCEL</b>						
AS4C	610	4.20	33.5	231	1.8	
AS4D	660	4.55	35	241	1.9	
IM4	650	4.48	40	276	1.6	
IM4A	650	4.48	42	290	1.5	
AS4	602	4.15	33	228	1.8	
IM6	799	5.51	40.5	279	2.0	
IM7	737	5.08	40	276	1.4	
IM6(5 000Spec)	802	5.53	40	276	2.0	
IM7(5 000Spec)	835	5.76	42	292	2.0	
IM8	809	5.58	44	304	1.8	
IM9	887	6.12	44	304	4.8	
UHM	518	3.57	64	440	0.8	
<b>NIPPON-GRANOC</b>						
XN-05	156	1.13	8	55		4.7
XN-10	230	1.66	17	115		-
XN-15	303	2.19	23	160		6.3
XN-20	378	2.73	29	200		13
XN-35	502	3.63	50	350		-
XN-50	484	3.50	72	500		-
XN-50A	560	3.83	75	520	0.7	-
XN-60	484	3.50	87	600		-
XN-70	484	3.50	101	700		-
XN-70A	530	3.63	105	720	0.5	-
XN-80	484	3.50	115	800		320
XN-80A	530	3.63	114	785	0.5	-
XN-85A	530	3.63	120	830	0.4	-
XN-90	470	3.40	128	890		500
YS-50A	560	3.83	75	520	0.7	-
YSH-50A	530	3.83	75	520		120
YSH-60A	530	3.83	91	630		180
YSH-70A	502	3.63	104	720		250
YS-80A	502	3.63	113	785		320
YS-90A	488	3.53	127	880		500
YS-95A	488	3.53	133	920		600
HT grade	664	4.80	33	230		9.4
HM grade	609	4.40	54	377		69

表3.2.2.4.5 具体碳纤维的性能 (完)

来源/种类	强度		模量		拉伸应变 (%)	热传导率 W/mK
	ksi	GPa	Msi	GPa		
<b>TOHO</b>						
HTA	515	3.72	34	235	1.7%	
UT500	666	4.81	35	240	2.0%	
IM400	624	4.51	43	295	1.5%	
IM600	801	5.79	41	285	2.0%	
LM16	435	3.14	22	155	2.0%	
HM35	407	2.94	50	345	0.9%	
UM40	678	4.90	55	380	1.2%	
UM46	650	4.70	63	435	1.1%	
UM55	529	3.82	78	540	0.7%	
UM63	488	3.53	88	610	0.6%	
UM68	461	3.33	94	650	0.5%	
<b>TORAY</b>						
T300	512	3.53	33.4	230	1.5%	
T300J	611	4.21	33.4	230	1.8%	
T400H	640	4.41	36.3	250	1.8%	
T800S	600	4.14	33.4	230	1.8%	
T700S	711	4.90	33.4	230	2.1%	
T700G	711	4.9	34.8	240	2.0%	
T800H7	798	5.49	42.7	294	1.9%	
T1000G	924	6.37	42.7	294	2.2%	
M35J	683	4.70	49.8	343	1.4%	
M40J	640	4.41	54.7	377	1.2%	
M46J	611	4.21	63.3	436	1.0%	
M50J	697	4.12	69.0	475	0.8%	
M55J	583	4.02	78.2	540	0.8%	
M60J	569	3.92	85.3	588	0.7%	
M30S	796	5.49	42.7	294	1.9%	
M30G	739	5.10	42.7	294	1.7%	
M40	398	2.74	56.9	392	0.7%	
<b>ZOLTEK</b>						
Panex30	500	3.60	30	207	1.5%	
Panex33	550	3.80	33	228	1.6%	

### 3.2.3 连续陶瓷纤维的高温性能

连续陶瓷纤维的高温性能，决定了能将其用作为CFCC的增强体。即使在零应力状态，绝大多数商业纤维，包括氧化物和非氧化物的纤维，无论在复合材料制备和使用过程中短时间曝露在2 192°F (1 200°C) 温度下，都会经历强度损失。强度的下降和许多因素有关，包括已有相或结晶过程中新相的晶粒生长、热诱导的缺陷生长、或纤维中非平衡相的分解等。对多晶的 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基纤维，强度下降主要和晶粒生长及与晶粒生长引起的缺陷有关。对于由聚合物热解产生的小直径Si基纤维，纤维中的Si-C-O开始分解而形成裂纹，并最终导致孔隙率。

变形阻抗和时间依变断裂是选择CMC用连续陶瓷纤维的关键。CFCC的许多使用场合，纤维承受长时间的结构载荷，范围能从100小时到10 000小时以上。甚至在作为“非结构”材料应用时，也能使纤维受到复合材料内部的热梯度引起的高热应力。一般认为，应力引起的小尺寸变化（在使用寿命期内通常不超过1%）是能容许的。第二个评定标准是应力断裂寿命，在许多情况下，远低于达到1%应变极限的时间。断裂寿命的因素受制于很多与纤维组分及显微结构有关的因素，其中包括源于已有缺陷处或蠕变空隙处的缓慢裂纹生长。

图3.2.3给出了CFCC所用商业纤维的最大承载温度估计值，这些估计值是由DiCarlo得到的，估计中假设纤维的最高使用温度受纤维断裂限制或者受过度蠕变应变（假设是1%）的限制，用测量长丝的蠕变速率和蠕变断裂寿命来确定。为举例说明使用应力的影响，分别给出了纤维在14 ksi (100 MPa) 和72 ksi (500 MPa) 应力下的最高使用温度，认为前者是CFCC中经历的最小应力，后者代表了结构承载元件的应力。当然，纤维最高使用温度和一系列假设有关。不利的环境效应（如存在碱）会显著降低最高使用温度；相反，若复合材料中是基体提供了承载能力的话（如CVD SiC），使用温度能力还可提高。最高承载温度和应力有关：对SiC和 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基纤维，当应力由100 MPa升高到500 MPa时，使用温度大约降低~100°C (~212°F)。

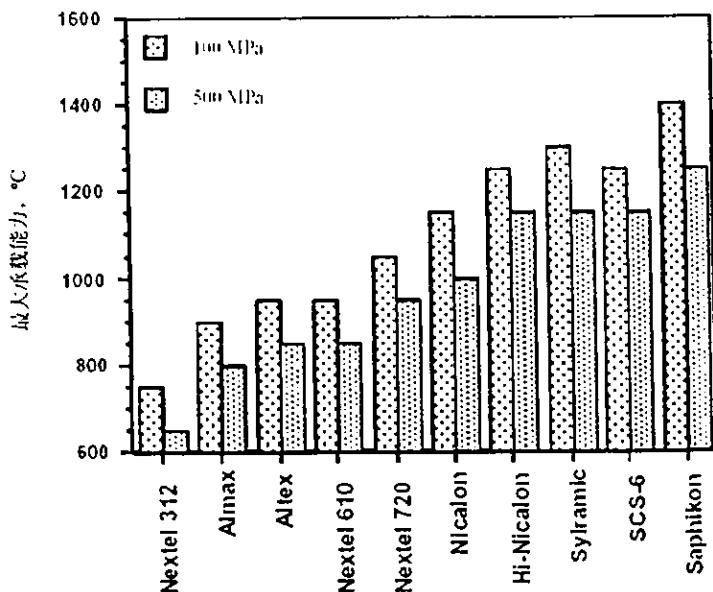


图3.2.3 商业纤维的最大承载能力估计

很明显，作为一类纤维，多晶 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基纤维的最高承载温度要比 $\text{SiC}$ 基纤维低很多：当高于1 000°C时，这些纤维在500 MPa应力下的寿命不超过100小时。在 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 基纤维中，消除 $\text{B}_2\text{O}_3$ 添加剂可提高使用温度（如从Nextel 312到Altex纤维），通过添加抗蠕变相如莫来石（如从Nextel 610到Nextel 720纤维），还可进一步提高使用温度。最好性能的氧化物纤维是Saphikon单晶纤维，其在低于2 912°F (1 600°C) 时几乎没有可测出的蠕变，使之甚至优于 $\text{SiC}$ 基纤维。

$\text{SiC}$ 基纤维的最高承载温度是2 192-2 372°F (1 200-1 300°C)。Hi-Nicalon、Sylramic及SCS-6均在此范围内，鉴于其明显不同的显微结构、化学成分、控制变形的复杂机理，这个结果令人感到惊奇。每种情况下，承载能力都受1%的蠕变极限限制。由于Nicalon纤维中存在低黏度的含氧非晶第二相，其纤维承载能力较低。

纤维制造商正在试验新的和不断提高加工方法，力图消除或降低那些导致强度下降、和高温蠕变的微结构根源。例如，已证实正在生产的 $\text{SiC}$ 纤维比已经商业应用的纤维改善了强度保持能力和抗蠕变能力。已经通过获得化学配比的或近化学配比的 $\text{SiC}$ 显微结构、消除增强蠕变及与蠕变有关裂纹生长的第二相（如Si-C-O）和增加晶粒尺寸来实现这目的。对氧化物纤维而言，证明用莫来石和YAG等氧化物成分较氧化铝更能提高抗蠕变能力。也需要添加晶粒生长抑制剂以维持小的氧化物纤维晶粒尺寸，并可阻止晶界运动，进一步提供纤维抗蠕变能力。

### 3.2.3.1 碳纤维

此节留待以后补充。

### 3.2.4 非连续增强体——晶须、颗粒和自增韧

此节留待以后补充。

## 3.3 界面相/界面技术和方法

### 3.3.1 引言

纤维/基体界面对决定复合材料的断裂行为和力学性能有重要作用。发展纤维增强陶瓷复合材料的关键推动力，是其具有合适的失效和损伤容限。与脆性陶瓷不同的是，陶瓷复合材料能经受住局部损伤和非弹性变形，而不发生灾难性破坏。简单的说，它们比单相陶瓷有更高的应变能力如图3.3.1(a)所示，其应力-应变曲线在高应变水平时出现非线性响应。

纤维增强复合材料通过纤维和基体两种材料的结合，其强度高于基体自身。而且，复合材料较其任何组分本身有更高的应变能力。

通过将高强度、高模量的纤维引入低强度、低模量的基体，由于将载荷转移到高强度的纤维上，材料设计者提高了复合材料的强度。载荷转移的有效性取决于纤维与基体的模量差、纤维体积含量与纤维织构/分布、纤维长度、以及纤维与基体之间的界面结合（文献3.3.1(a))。

纤维增强陶瓷复合材料比其两个组分的应变能力都更高。从实际的观点看，复合材料具有“假塑性”，类似于一般金属的延性响应。金属中非线性应力-应变关系是通常由位错机理产生的塑性变形的函数。相反，纤维增强陶瓷复合材料的非线性力学响应是基于Zok

等人所述的3种基本机理（文献3.3.1(b)）。这3种机理分别是，纤维-基体界面的摩擦耗散、基体开裂所增加的弹性柔度、以及因基体开裂引起的应力再分布。这些机理暗含着的假设是，纤维在某种程度上桥联了基体内的裂纹。

从材料的设计角度看（如Faber在文献3.3.1(c)和Kerans等人在文献3.3.1(d)中所述的），纤维增强陶瓷复合材料有两个关键问题——如何使裂纹在纤维周围偏转，及如何控制纤维在基体中的滑移阻力。历史表明，直接将陶瓷纤维引入陶瓷基体通常产生脆性的复合材料，这是因为纤维和基体之间形成了强的化学结合。在强化学结合的情况下，基体的裂纹将直接贯穿纤维而不发生偏转。

要获得弱结合的纤维-基体界面，主要的方法一直是围绕陶瓷纤维采用一个薄的(0.1-5 μm)界面层，以形成所希望的裂纹偏转和滑移摩擦。这个界面层起到脱胶层和“低摩擦”滑移界面的作用。这说起来很简单，但实际上，界面层的功能和许多复杂因素有关：

- 界面上纤维和基体的化学键
- 与纤维韧性有关的界面固有韧性
- 基底纤维的表面粗糙度
- 由于热膨胀系数差异在制造过程中导致的残余应力
- 界面的剪切面和剪切强度

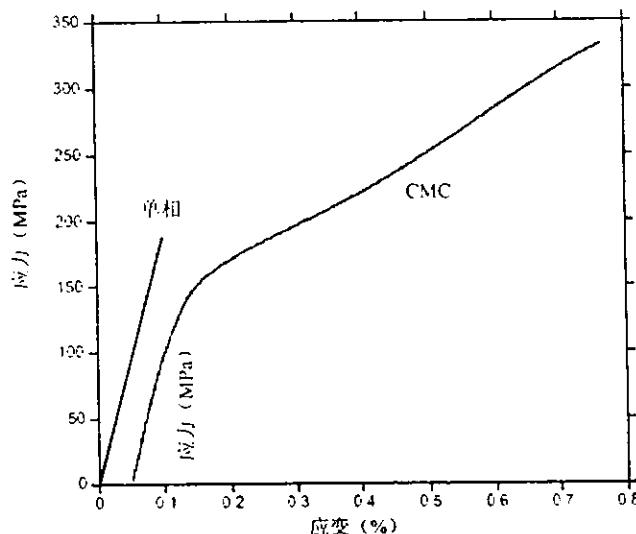


图3.3.1(a) 单相陶瓷与高强纤维增强低强度基体复合材料的力学响应比较图

### 3.3.1.1 纤维界面和界面层的作用及要求

CMC中纤维界面层的主要作用，是通过脱胶和摩擦滑移，提供一种裂纹偏转的机理。成功的纤维界面层将在纤维-基体界面使微裂纹止裂或将其偏转。不发生脱粘，基体裂纹将穿过陶瓷纤维，而不是沿高强度的纤维周围发生偏转。当应力进一步增加时，微裂纹开始合并和张开，被弱束缚的纤维将桥联这些裂纹并在基体中滑移，消耗应变能。没有纤维在基体中的可控制滑移，应变能就不会被消耗，并将随裂纹扩展产生高应力，导致纤维断裂。更详细的信息可参阅文献3.3.1.1(a)-(c)。

在预定的工作条件下，界面层应当在化学上和微结构上是稳定的。理想情况是，在高

温或重复的热循环下界面层的化学组分、相含量或晶粒尺寸应当不会有显著的变化（例外的情况是，希望界面层形成微裂纹或发生相变，以控制应力的力学响应）。

界面层对纤维基底和基体应该在热力学上是稳定的，能够防止出现固相反应。最后，界面层应当能抗氧化、抗侵蚀、抗蒸汽和抗还原性环境的腐蚀。由于界面对强度和断裂韧性起的关键作用，因此，在性能要求的范围内，界面层对环境腐蚀的任何显著的敏感性，都是其应用的主要障碍。

界面层在CMC中还有第二个作用。复合材料的制造条件和基体前驱体可能对于高温和反应性化学物质如卤化物、自由基等具有化学侵蚀性。界面层可以作为其下面陶瓷纤维的反应和扩散阻挡层，防止化学腐蚀和纤维降级。同样地，多层界面层体系可能要求其最上层是阻挡层，防止下面的敏感界面层受到腐蚀。为达到上述目标，阻挡层应是热力学稳定的，无裂纹和孔隙，并在均匀的和可控制的方式下进行沉积。

CMCs中陶瓷纤维还可能遭受环境腐蚀，和在高温性能状态下出现与固态基体的相互作用。纤维界面层在侵蚀性环境中起到反应和扩散阻挡层的作用，保护下层的纤维和中间的界面层不受化学腐蚀。

界面层的沉积和热处理条件也可能是具有化学或（和）热力学侵蚀性的。陶瓷纤维上形成或沉积的任何界面层，应和纤维显微结构、组分、物理性能相容。

陶瓷界面层中的残余应力和（或）热应力对裂纹偏转具有负面作用。在理想条件下，界面层的热膨胀应当和纤维热膨胀相等或相近。这种匹配可使制造和应用过程中形成应力变为最小。

### 3.3.1.2 制备纤维界面层

在陶瓷纤维上制备一薄界面层（ $0.5 \mu\text{m}$ ）是一项重大的制造难题。界面层沉积技术必须是可控制的和可设计的，以制造出组分、厚度、形态均匀的纤维界面层。特别是对于多丝纤维束和2-D、3-D机织物，则更是一项挑战。此时，细小直径（ $< 20 \mu\text{m}$ ）的纤维紧密地成束并直接接触在一起。极其重要的是，所有的陶瓷纤维都要有均匀的界面层，因为没有界面层的纤维在低应力下就发生断裂，并且易于氧化。

界面层沉积过程应在批次之间具有高度的可重复性，对多丝纤维束、2-D织物、3-D机织与编织几何体提供均匀的界面层。理想情况下，界面层的过程应是连续性的，能在很长的纤维束和机织织物上沉积界面层。

已经采用两种方法来制备陶瓷复合材料的界面纤维界面层——原位化学界面层法，和直接涂敷界面层法。原位制造是指化学物质在纤维表面发生反应，形成希望得到的组成或形貌。（原位化学法的一个例子是在玻璃陶瓷复合材料的碳氧化硅纤维表面形成富碳层。）其构成的化学物质可在复合材料中以其固有组分存在，或也可以添加剂的形式加入纤维或基体。所有情况下，所希望界面的形成需要进行很精确的热处理，这取决于扩散机理和反应物的均匀分布，而可重复性是不容易控制的。

复合材料制造之前直接在纤维上制备所需界面层，是首选的界面层方法。可以容易地控制和设计界面层的组分、形貌以及厚度，而和后续的复合材料制造条件及热处理无关。对陶瓷纤维直接界面层的主要方法是，化学气相沉积和液态前驱体（溶胶-凝胶前驱体和聚合物前驱体）界面层。这两种方法在多丝几何体界面层时较有利，可很好地渗透到长丝束的内部。也研究了其他的方法——视线技术（line-of-sight techniques）、电化学技术和化学

镀 (electroless plating) 等工艺。

化学气相沉积 (CVD) 利用气态物质的气相运输，局部进行反应并在纤维基底上沉积反应产物。沉积反应的驱动力包括热能、射频能 (RF)、等离子体能和光子能能源。反应化学的控制与所形成的界面层的组分、均匀性，依赖于对反应化学、反应物分压、气体流速、温度均匀性、和对纤维织构内局部扩散情况的仔细控制。

正如在CVD复合材料工艺一节中描述的，可通过CVD沉积出各种陶瓷组分——碳化物、氮化物和氧化物等。界面层厚度可在纳米到几微米之间变化，取决于沉积的速率和时间。

液态前驱体界面层技术是用含有有关化学物质的水溶液或有机物液，对细纤维浸渍和界面层。溶剂蒸发或液态物质化学反应之后，在纤维上遗留一薄界面层，随后通过反应或热处理产生期望的陶瓷界面层。

溶胶-凝胶界面层使用溶解于酒精-水混合溶剂中的金属醇盐。醇盐水解后产生一种金属-氧化物-金属凝胶，将其干燥以除去溶剂和反应产物。干燥的凝胶被加热转化成致密的氧化物。通常有硅、铝、锆和钛的醇盐，它们适合于生产单组分和混合组分的氧化物陶瓷。溶胶-凝胶界面层的主要优点是，界面层和转化过程是在相对的低温和温和条件下进行的。溶胶-凝胶界面层的主要局限是，在干燥和转化过程中界面层有很大的收缩，这限制了所能生产的（无收缩裂纹的）界面层厚度，但可通过多次界面层实现较厚的界面层。

预陶瓷聚合物通常由含反应基的碳基和硅基低聚体组成，它们可通过加热、催化或高能量的方式发生交联。可以用纯溶液或稀释溶液的形式的预陶瓷聚合物对纤维进行界面层，接着进行聚合物固化。然后，在可控大气环境中对固化的聚合物界面层进行热处理，生产出期望的陶瓷组分。已经用这方法生产出了碳、碳化硅、氮化硅和碳氧化物。通过把酰亚胺及酰胺基团结合进聚合物中，或通过在氮气中热解固化的聚合物，形成氮化物组分。基于可获得的具有铝、锆、钛等所期望元素的前驱体聚合物，可将附加的金属元素结合到聚合物中。与较适于制备氧化物界面层的溶胶-凝胶方法相比，聚合物前驱体界面层方法更适合于制备碳化物和氮化物的界面层。由于在热解步骤中会发生收缩，聚合物界面层的界面层厚度也受限制。和溶胶-凝胶界面层一样，可通过多次界面层，累积界面层的厚度。

视线技术是指基于溅射、物理气相沉积、离子注入、和电子束蒸发的一些方法。所有这些方法都依赖于从材料源至靶基体的直线路径。受此限制，视线技术适用于大直径 ( $> 40 \mu\text{m}$ ) 陶瓷纤维，而对多丝束和机织物上的应用有很多限制，此处，进入多丝束和机织物的“视线”被间歇地隔断。

可以通过电解和化学镀沉积技术在陶瓷纤维上沉积金属界面层。在这两种方法中都从溶液中沉积出金属。电解时，通过在阳极和阴极之间施加一电压，金属离子被还原并在阴极基底上沉积。通过其组分（碳化硅或碳）或闪光金属沉积技术，陶瓷纤维可实现导电。全部金属都可实现电解金属界面层的沉积，包括铜、镍、铬、锌、锡、铅、银、金、铂等。然而，大多数金属都不具有高温抗氧化稳定性，并且密度高，或者成本很高。

化学镀界面层时不用电流，而是通过化学剂在氧化还原反应中的作用，将溶液中金属离子进行沉积。他们涉及到用温和的还原剂进行复杂的金属还原。化学镀界面层可以沉积镍、铜、银、金、铂等金属。

### 3.3.2 界面组分

#### 3.3.2.1 碳

1970和1980年代陶瓷基复合材料的最初成功，是基于用碳和氮化硼作为界面的界面层。在大约 $1\ 832^{\circ}\text{F}$  ( $1\ 000^{\circ}\text{C}$ ) 的较低温度下，利用化学气相沉积/渗透，在纤维束、布或预成形件上沉积出石墨碳界面层。已经用不同的前驱体气体来生产石墨碳层；也已在相近的温度下生产出由丙稀、乙烯、甲烷产出的石墨碳界面层。在相同的加工温度下，获得了不同的沉积速率和界面层组织形态。用丙稀产生的石墨界面层将具有典型的高度对准排列的石墨结构（按垂直于纤维表面的（002）轴优先排列），而用丙稀和甲烷产生的界面层则倾向于随机排列的多晶结构小晶粒。还可用不同树脂基的技术，对纤维使用无定形的和（或）石墨碳的界间层。

有碳界面层的陶瓷复合材料具有优异的室温力学性能。据推测，石墨沿C轴具有非常低的模量，界面是柔顺的，所以可减轻由于纤维与基体热膨胀差异所引起的界面应力。界面剪切强度依赖于碳层的厚度；界面层越厚，界面剪切强度越低。大多数复合材料的最优碳界面层厚度是 $0.25\text{--}0.30\ \mu\text{m}$ 。对于大多数低温和非腐蚀性的CFCC应用，碳的工作性能良好。然而，碳在低达 $797^{\circ}\text{F}$  ( $425^{\circ}\text{C}$ ) 的温度下开始氧化，当高于 $1\ 562^{\circ}\text{F}$  ( $850^{\circ}\text{C}$ ) 时，氧化很快。当把含碳的陶瓷基复合材料曝露于氧化环境中时，氧化以腐蚀/损耗纤维末端曝露的碳界面层开始。碳从整个纤维长度上被分离（碳损耗的速率取决于温度），导致纤维-基体界面上形成开口的通道。随后，通道内部的表面（纤维和基体）将被氧化，形成二氧化硅（至少对SiC/SiC体系），最终由其将组元结合在一起。此时，界面“充满”脆性的、完全结合的材料，这些材料不允许出现脱粘和纤维滑移，导致脆性断裂。纤维表面氧化也可使纤维性能下降，导致复合材料的强度显著降低。

#### 3.3.2.2 氮化硼

碳的抗氧化性能差，于是人们考察了其他可供选择的CFCC纤维界面层。六方氮化硼具有晶体结构，力学性能和石墨碳相似。使用BN界面层取代碳界面层，最重要的一点是能显著提高抗氧化性能。热解的BN界面层在高达 $2\ 192^{\circ}\text{F}$  ( $1\ 200^{\circ}\text{C}$ ) 的温度下，仍具有良好的抗氧化性能。然而，在很大的温度区间内，水蒸气的存在会明显加速BN的分解。可以通过化学气相沉积和渗透工艺，在纤维束、布和预成形件上沉积BN，其通常来自 $\text{BCl}_3$ 或 $\text{BF}_3$ ， $\text{NH}_3$ 及 $\text{H}_2$ 。BN的工艺温度不同，产生的界面层晶体结构也不同：沉积温度低于 $1\ 652^{\circ}\text{F}$  ( $900^{\circ}\text{C}$ ) 会产生非晶的BN；中等的温度产生细晶粒多晶的六方BN；沉积温度高于 $2\ 372^{\circ}\text{F}$  ( $1\ 300^{\circ}\text{C}$ ) 则产生高度取向排列、晶粒尺寸较大的BN。使用的沉积温度也取决于所选择的增强纤维类型。BN的晶体结构对BN界面层在腐蚀环境中的稳定性有深远的影响：非晶界面层本质上是不稳定的，甚至在相当低的温度下也会发生分解，然而，高温沉积的高度晶化的BN，在含氧和水蒸气的高温环境中也很稳定。BN的纯度也是一个重要因素：制造过程中结合进BN晶格的氧对长期稳定性是有害的，因为它能引起和非氧化物纤维、基体的反应。高纯BN的高温稳定性更好。可对BN人为掺杂不同元素以增加其稳定性，近来对用Si掺杂的BN所进行的试验表明，这提高了复合材料的抗氧化性能。高温高纯BN非常有希望被用于腐蚀环境下的CFCC。

### 3.3.2.3 氧化物

在预期最频繁使用CFCC的高温、氧化等使用环境中，氧化物纤维界面层具有热力学稳定的优点。应该指出，开始时，通常是将氧化物界面层用在氧化物纤维上，非氧化物界面层用在非氧化物纤维上。氧化物界面层的发展落后于氮化硼等非氧化物界面层的发展，原因如下：(1)非氧化物纤维优于氧化物纤维，界面层的发展一般随着纤维的改进一起进行，(2)有希望的层状氧化物和可能的氧化物纤维在化学上不相容，(3)较难识别对氧化物纤维是稳定的、弱结合的非层状氧化物界面层组分，(4)和碳、氮化硼等非氧化物界面层相比，氧化物的化学复杂性较高，使得界面层沉积更困难。

#### 3.3.2.3.1 非层状氧化物界面

近来，在鉴别对已有的氧化物纤维组分（如氧化铝及莫来石等）呈现化学稳定性、并与纤维呈弱胶接的非层状氧化物方面已取得进展。这些氧化物纤维界面层一般要比层状氧化物更容易结合到复合物中，因为在界面层内不再有为获得弱界面所需的优先晶粒排列。已鉴别出对氧化铝呈弱胶接的化合物包括分子通式为 $M_3+PO_4$ 的稀土磷酸盐。这既包括镧系大分子稀土元素(La, Ce, Pr, Nd, Pm, Sm, Eu, Gd, Tb)的独居石族矿物，也包括Sc, Y和镧系小分子稀土元素(Dy, Ho, Er, Tm, Yb, Lu)的磷钇矿族矿物。也研究了分子通式为 $ABO_4$ 的化合物。其包括各种钨酸盐( $Me_2+WO_4$ )和钽酸盐( $Re_3+TaO_4$ )族。用独居石( $LaPO_4$ )和白钨矿( $CaWO_4$ )纤维界面层的复合材料，对于Nextel 610和Nextel 720纤维表现出良好的脱胶情况。

这些 $ABO_4$ 化合物是氧化物-氧化物CFCC的最新界面概念，因此，也在刚开始进行详细的研究，以便投入真实的复合材料使用。目前看来，需要仔细控制沉积这些界面层所用溶胶-凝胶前驱体的化学组成，以防止纤维的强度下降。仍然需要进行大量研究工作，来证实这个界面概念在高温下长期工作时的有效性。

#### 3.3.2.3.2 层状氧化物界面

层状氧化物界面层受到高度的关注，希望其能模仿用层状非氧化物碳、氮化硼界面层时所观察到的易脱胶行为，这些层状非氧化物界面层在非氧化物CFCC中工作性能良好（虽然还只在非氧化性环境中长期使用）。早期工作集中在被称为氟云母的硅酸盐片上，包括 $KMg_{2.5}(Si_4O_{10})F_2$ 和 $KMg_3(AlSi_3O_{10})F_2$ 等。形成的这些化合物容易沿界面分层，然而，其复杂的化学组成使之成为化学上不稳定的界面，于是，放弃了对这些化合物的研究工作。现正在研究具有简单化学组成的层状氧化物，如 $\beta-Al_2O_3$ ( $Me_1+Al_{11}O_{17}$ )和磁铁铅矿( $Me_2+Al_{12}O_{19}$ )等。已经显示，在蓝宝石长丝纤维的复合材料体系模型中，黑铝钙石 $CaAl_{12}O_{19}$ 可促进界面脱胶。这种界面方法在真实的复合材料中的使用受到限制，其原因如下：(1)一直需要高于商业纤维能力的温度来形成并具有层状结构（尽管近来已在降低温度方面有进展），(2)层状化合物对具有最高高温性能的Nextel 720纤维在化学上不稳定。要在真实复合材料中用层状氧化物作为纤维界面层，可能要求使用具有更高温度能力的非硅酸盐的纤维。

#### 3.3.2.3.3 多孔基体和多孔/易挥发界面层

因为鉴别有希望的氧化物纤维组分存在着困难，也已付出了很大的努力来开发不依靠纤维界面层的CFCCs；即CFCCs将依靠基体的显著多孔性来形成弱的纤维-基体界面胶接，

或者依靠纤维-基体界面上易挥发界面层所形成的间隙。本节总结了为氧化物-氧化物CFCCs所寻求的各种界面方法。

### 3.3.2.3.3.1 多孔基体

许多机构已通过完全避免纤维界面层的办法，开发了损伤容限的氧化物-氧化物CFCC。这些复合材料体系的基体具有大量的残余孔隙，经常超过40%；这些多孔基体强度一般较低，其结果，这些复合材料通过在偏轴载荷下的损伤扩展和分布，通常表现出一定的损伤容限能力。因为其性能是由纤维控制的，这些复合材料在轴向加载时一般得到非常好的线性应力-应变曲线。其极限破坏应变代表了非增强纤维束的预期结果。这些多孔基体CFCC是氧化物-氧化物体系的最新发展和特征，因为其不需要单独的纤维界面层步骤，比较容易制造。General Electric、Composite Optics Inc.、Boeing-McDonnell Douglas和3M等公司正在制造这类复合材料。表3.3.2.3.3.1汇总了这些体系的性能。

这些复合材料体系的成本低，并具有好的轴向性能和损伤容限。因为基体强度低，这复合材料体系均表现出低的层间强度。由于没有纤维-基体界面相，该类型复合材料体系潜在的不足是可能在纤维和基体接触点产生反应或烧结，导致纤维强度下降。为防止复合材料性能下降，可能要限制这些复合材料的使用时间和/或温度。无纤维界面层、采用多孔基体，这使得纤维在应用环境下曝露于腐蚀物质之中，引起纤维强度下降。

表3.3.2.3.3.1 0°/90°Nextel纤维的性能

氧化物基纤维 室温性能	Nextel 312	Nextel 610	Nextel 650	Nextel 720
名义组分	铝-硼硅酸盐	氧化铝	氧化铝w/氧化锆	氧化铝-莫来石
密度 (g/cm <sup>3</sup> )	2.70	3.88	4.10	3.40
拉伸强度 (ksi)	24.6	42.5	36.9	30.4
杨氏模量 (GPa)	21.7	54.1	51.9	37.7
最大使用温度 (°F) =80%强度保持	-	1 472	2 012	2 282
热传导率 (Btu/in·s·ft <sup>2</sup> ·°F) (估计)	=5.0×10 <sup>-3</sup>	=5.7×10 <sup>-2</sup> (估计)	无	=1.9×10 <sup>-2</sup> (估计)
线性热膨胀系数 (ppm/K) 212-1 832°F	3.0	7.9	8.0	6.0
比热 (J/(g·K))	≈0.7	≈0.9	无	≈0.85

3M于2000.9提供的信息。

### 3.3.2.3.3.2 多孔界面层

多孔基体概念的逻辑外延是，将孔隙局限在靠近纤维的一薄层上。研究人员评估了将多孔氧化物 ( $ZrO_2$ 、 $Y_2O_3$ 和 $Al_2O_3$ ) 作为氧化铝基体中蓝宝石纤维界面层的情况。界面层中孔隙 (30 vol.%) 产生了期望的脱胶，但滑移应力较高并只有有限的纤维拔出，猜想这是多孔界面上的裂纹路径过于粗糙和盘绕，形成了高的滑移应力。建议对晶粒尺寸和界面上的孔隙率进行设计，使滑移应力降低到可接受的水平。

### 3.3.2.3.3.3 易挥发界面

易挥发界面层概念依赖于适当位置上具有碳界面层的复合材料的工艺，碳界面层在复合材料致密化以后能被氧化掉，从而沿纤维-基体界面造成空隙。本质上，界面是从开始脱胶的，而不是依靠裂纹扩展前沿的应力强度来促使界面脱胶。这个界面方法受到广泛研究，因为通过溶胶-凝胶和CVD方法来沉积碳界面层都较容易，成本也低。空军莱特试验室进行了大量的发展工作，研究表明，即使界面脱胶，在纤维和基体之间仍存在一定程度的载荷转移。载荷转移量则依赖于相对纤维粗糙度的碳界面层厚度和沿纤维长度方向的直径变化。这个界面层概念也产生了一些复合材料体系，这些体系多半将在应用的时间和温度上受到限制，这是因为在一段时间后，纤维和基体接触点（这必定是发生载荷转移的地方）的纤维性能会下降。在一段时间后，基体烧结也会产生另外一些纤维和基体接触点。可以通过仔细选择纤维-基体组合，将这些可能的纤维退化机理变为最小。这种界面概念也使纤维曝露于应用环境，在苛刻的应用环境下可导致纤维性能下降。

这些不同的界面方法提供了广泛的选择余地，来发展一种有效的界面层方法。虽然对有效界面，这些基本概念很清楚，但在基础的和实际的层次上仍存在重大的挑战。从功能性的角度看，性能的目标是要一种具有中等滑移应力和高温抗氧化性能的、柔顺的脱胶界面层/中间层。然而，除非能够用可控制、可重复、低成本的方法，在纤维束和机织物（2-D和3-D）上制备出界面层，否则，界面层很少会得到实际应用。界面领域的目标是要发展具有如下性能的界面层体系：

- 与期望的纤维和指定的基体有可控制的结合。
- 经过设计的力学性能和热膨胀性能，产生裂纹偏转和受控的滑移应力。
- 在高温(1 200°C)氧化/腐蚀工作条件下，复合材料的化学和力学稳定性。
- 低屈服以补偿复合材料中的残余应力和失配应力。
- 在无纤维桥联的纤维束和机织物上，以最小的环境影响，进行受控、可重复、低成本的沉积。

### 3.3.3 其他

此节留待以后补充。

## 3.4 纤维组织的制备和成形

### 3.4.1 概述

航空及相关工业部门急需高强、轻质、耐久、抗腐蚀和用于高温的复合材料（文献3.4.1）。通过选择性的纤维、基体和界面控制机理设计，陶瓷基复合材料（CMC）正在满足上述要求。所描述的这个设计问题将详细说明工艺、材料体系、和终端产品应用的特殊需求。本节将就纤维形式、如何使用、和可从哪里得到商业化的纤维做一概括性的综述。

### 3.4.2 纤维组织

纤维材料形态包括低卷曲无纬布、2-D及3-D整体机织造型、和2-D/3-D编织预成形件（文献3.4.2(a)和(b))。上述每种类别都有其自身独特的优点和缺点，表3.4.2（文献3.4.2(a))简要地描述了它们的优缺点。图3.4.2图示说明了各种机织组织。纤维预成形件的恰当应用和

选择，会在下述的一个或多个方面影响其最后的使用：降低成本，减少连接，减少紧固件，简化零件设计，增加设计灵活性，提高冲击和损伤容限。

由于设计的灵活性和有大量可用的纤维体系，使CMC中预成形件的使用增加。通常，具有一定程度的柔性和表面润滑的纤维都能被加工处理。然而，随纤维模量和直径的增加，机织速度和/Z方向增强体的纤维半径会受到限制，缩小制造的窗口。

表3.4.2 预成形件的优点和缺点

预成形件类型	优 点	缺 点
无纬布	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 面内性能高</li> <li>● 设计灵活性好</li> <li>● 可自动化加工</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 横向性能和面外性能低</li> <li>● 织物稳定性差</li> </ul>
2-D机织织物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 面内性能高</li> <li>● 不同批次的高度一致性</li> <li>● 常常是与性能平衡的最经济选择</li> <li>● 铺覆性好</li> <li>● 自动化加工程度高</li> <li>● 复杂形状的设计灵活性高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 横向性能和面外性能低</li> </ul>
3-D机织织物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 适中的面内性能和面外性能</li> <li>● 铺覆性好</li> <li>● 自动化工艺</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 偏轴性能有限</li> </ul>
2-D编织织物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 偏轴性能得到很好的平衡</li> <li>● 铺覆性好</li> <li>● 复杂零件</li> <li>● 自动化的预成形工艺</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 面外性能低</li> <li>● 尺寸限制性</li> <li>● 非轴对称形状受到限制</li> <li>● 设备费用高</li> </ul>
3-D编织织物	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 面内性能和面外性能得到很好的平衡</li> <li>● 铺覆性好</li> <li>● 自动化加工程度高</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>● 加工预成形件慢</li> <li>● 尺寸限制性</li> <li>● 非轴对称形状受到限制</li> <li>● 设备费用高</li> <li>● 可重复性差，即，纤维含量不易控制</li> </ul>

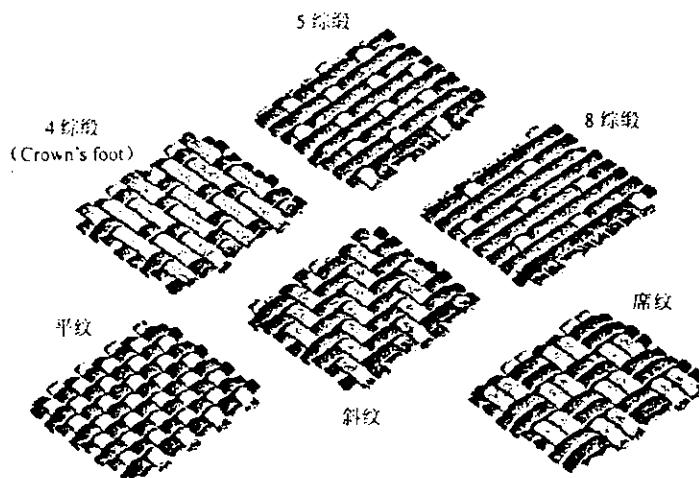


图3.4.2 各种纤维机织组织的示意图

### 3.4.2.1 无纬布

低卷曲无纬布是高度非平衡（约98%的经纱，约2%的纬线）的预成形件，和单向带的性能相近，并有一些织物可操作的优点。低卷曲无纬布用于要求高面内性能的场合。无纬布也允许在经纱方向大量使用高模量纤维。

### 3.4.2.2 2-D机织织构

在要求具有良好面内性能、铺覆性、大面积覆盖的场合，经常使用2-D机织织物。2-D织物通常应用于制造发动机喷管结构、热防护系统和其他面外承载较低不太复杂的结构件上。

### 3.4.2.3 3-D织构

目前，基本上使用三种类型的3-D预成形件，它们是极线的、正交的、角联锁。可按客户要求改变这三种基本的纤维方向，形成满足具体设计要求的连续结构。3-D结构具有优异的损伤容限性能、改良的剪切性能、和可设计的比强度、比刚度。

#### 3.4.2.3.1 3-D 极线织构

极线预成形件包括轴向、径向和周向的纤维方向。这些机织物用在有回转体（圆柱体，喉部元件，鼻锥，出口锥，收敛和发散的形状）的应用情况。对于非轴对称的情况（前沿，圆锥的/直角的过度部分），可以先编成预成形件，然后再将其开口成期望的尺寸。

#### 3.4.2.3.2 3-D 正交织构

3-D正交预成形件定义为所有纤维都彼此互相成90°角交叉的制件。用该工艺制备的零件通常是在金属坯中成形，然后机械加工至最终的尺寸。这些预成形件往往用在比较扁平的应用情况（刹车片，转子和汇热槽）。

#### 3.4.2.3.3 3-D 角联锁织构

3-D角形联锁预成形件用于能通过整体机织零件来降低零件复杂性的场合，如密封装置、热交换器、加筋件、桁架结构、和相关的复合材料接插件（如T形夹和π形夹）。应用中通常允许面内性能有所降低而改善面外性能。这些纤维预成形件一般与2-D机织物同时使用。近余量一般可减少为铺贴多层2-D织物相关的制造成本。

### 3.4.2.4 2-D编织织构

2-D编织预成形件是高度自动化生产的，同时用2-D三轴构型( $\theta+f$ )可使偏轴性能得到很好的平衡。2-D编织预成形件特别适合于复杂的应用（飞机导管和管路，飞机发动机外罩，推进器叶片，导弹鼻锥和卫星元件）。

### 3.4.2.5 3-D编织织构

3-D编织预成形件的独特特征是能提供沿厚度方向的增强体。这种工艺适合于实心和/或空心接插件和不同几何形状的横截面接头（文献3.4.2(b)）。

## 3.4.3 机织和编织织物的制造商

表3.4.3给出陶瓷纤维预成形件的制造商（2-D和3-D的机织商和编织商），包括地址和电话号码。

表3.4.3 机织和编织制造商 (2000.3)

预成形件制造商	地址	电话
AlbanyInternationalResearchCo.	Mansfield, MA	(508) 339-7300
AlbanyInternationalTechniweaveCo	Rochester, NH	(603) 335-2115
AtlanticResearchCorp.	Gainesville, VA	(703) 754-5000
BallyRibbonMills	Bally, PA	(610) 845-2211
FabricDevelopment, Inc.	Quakertown, PA	(215) 536-1420
FiberConcepts, Inc.	Conshohocken, PA	(610) 834-3234
FiberInnovations, Inc.	Walpole, MA	(508) 660-2622
FiberMaterials, Inc.	Biddeford, ME	(207) 282-5911
HexcelCorporation	Austin, TX	(512) 326-2995
IntecProducts, Inc.	Anaheim, CA	(714) 630-9192
LydallManning	Ft. Washington, PA	(215) 542-2433
3MCeramicFiberProducts	St. Paul, MN	(612) 736-3627
Pull-RopeCompany, Inc.	ColoradoSprings, CO	(719) 391-1892
TextileProducts, Inc.	Anaheim, CA	(714) 761-0401
TextronSystems	Wilmington, MA	(978) 657-2961

## 3.5 外部防护界面层

此节留待以后补充。

### 3.5.1 外部界面层功能

此节留待以后补充。

#### 3.5.1.1 环境保护

此节留待以后补充。

#### 3.5.1.2 热控制

此节留待以后补充。

#### 3.5.1.3 磨损和磨蚀

此节留待以后补充。

#### 3.5.1.4 信号控制

此节留待以后补充。

#### 3.5.1.5 空气动力表面的控制

此节留待以后补充。

### 3.5.2 组分和制造方法

此节留待以后补充。

### **3.5.2.1 组分和结构**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.1.1 氧化物组分**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.1.2 非氧化物组分**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.1.3 多层界面层**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.1.4 粒子复合材料界面层**

此节留待以后补充。

### **3.5.2.2 制造方法**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.2.1 化学气相沉积**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.2.2 热喷涂**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.2.3 物理气相沉积**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.2.4 烧结/釉面界面层**

此节留待以后补充。

#### **3.5.2.2.5 扩散和反应烧结**

此节留待以后补充。

### **3.5.3 工程注意事项**

此节留待以后补充。

#### **3.5.3.1 热力学相容性**

此节留待以后补充。

#### **3.5.3.2 界面层工艺相容性**

此节留待以后补充。

#### **3.5.3.3 机械相容性**

此节留待以后补充。

#### **3.5.3.3.1 热膨胀匹配**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.3.2 界面层强度**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.3.3 界面层附着力**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.3.4 应变调节**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.3.5 残余应力**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.4 部件几何形状可界面层性**

此节留待以后补充。

### **3.5.3.5 界面层的环境稳定性**

此节留待以后补充。

## **3.5.4 CMC 外部界面层举例**

此节留待以后补充。

## **3.6 表征方法（化学的和微观结构的）**

此节留待以后补充。

### **3.6.1 块体复合材料**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.1 组分**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.2 密度**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.3 孔隙率**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.4 微结构**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.5 缺陷**

此节留待以后补充。

#### **3.6.1.6 其他物理性能**

此节留待以后补充。

### **3.6.2 纤维/增强体**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.1 组分**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.2 密度**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.3 孔隙率**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.4 微结构**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.5 缺陷**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.6 浸润剂**

此节留待以后补充。

#### **3.6.2.7 滑移**

此节留待以后补充。

### **3.6.2.8 其他物理性能**

此节留待以后补充。

### **3.6.3 基体**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.1 组分**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.2 密度**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.3 孔隙率**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.4 微结构**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.5 缺陷**

此节留待以后补充。

#### **3.6.3.6 其他物理性能**

此节留待以后补充。

### 3.6.4 界面

此节留待以后补充。

#### 3.6.4.1 组分/化学相

此节留待以后补充。

## 3.7 CMC无损评定方法（缺陷表征）

可用多种无损检测技术（NDT）来探测复合材料的表面和内部缺陷。目视检查和液体渗透方法用来鉴别表面缺陷，而内部缺陷（空隙，分层，外来夹杂，脱粘）的检测则需要更高级的技术。这些技术包括超声波、射线照相、热成像、声发射、X-射线和涡流检测。这些检测方法的基本原理和步骤包含在MIL-HDBK-728丛书中，而更详细的理论信息和数据解释则参见：

- MIL-HDBK-731 Thermography（热成像）
- MIL-HDBK-732 Acoustic Emission（声发射）
- MIL-HDBK-733 Radiography（射线照相）
- MIL-HDBK-787 Ultrasonic（超声波）

这些文献未讨论NDT技术这个目前研究和发展活跃领域的最新进展。

虽然无损评定（NDE）、无损检测（NDT）和无损表征（NDC）具有相似含义，但有微妙而不同的实用结果。NDT是NDE中由来已久的子集，通常认为其是对某一种已经明确定义的NDT方法的应用：X-射线照相（通常称为射线照相检测（RGT））、超声波（经常称为超声波检测（UT））、涡流检测（ECT）、磁粒子检测（MPIT）、染色渗透检测（PT）。（美国无损检测协会（ASNT）赞助并为想成为具有不同专门技术水平的“检查员”个人，开设上述每种NDT方法的专业水平课程）

历史上，NDE主要用于金属，几乎没有陶瓷材料（单相材料或复合材料）的NDE数据库。对核能设备（主要是不锈钢焊件）、燃煤能量系统（主要是碳钢压力容器）、和石油精炼压力容器、存储罐及其他压力容器的探伤需求，极大地推动了对金属的应用。对不同部件和不同应用的标准探伤方法，通常规定了满足该检查所需要的持证检查员的水平。保险公司或部件生产商的保单经常推进了检测要求的水平。目前，对陶瓷材料目前还没有普遍承认的规范或标准。因而，还没有明确规定先进陶瓷材料的探伤要求。

### 3.7.1 需要和要求

有4种基本的NDE/NDC需要/要求领域：

- 对生产部件接受/拒绝的不通过/通过（No-Go/Go）。
- 使用检测，用于作出更换/继续运转的决定。
- 评估使用损伤的程度/范围。
- 确定损伤部件修补的质量。

这4种领域适用于单独的部件和部件之间的连接。

对于CMC来说，对于一个具体应用的接受/拒绝，买方必须制定恰当的微结构要求。对复合材料微结构要求的例子是：

- 孔隙率的可接受的水平和变异性。

- 密度的可接受的水平和变异性。
- 要求的热性能。
- 复合材料“缺陷”的可接受的尺寸和程度，例如分层、空隙的程度和范围、缺层、层脱落、机加损伤程度等。

使用时的NDC必须能够检测出降级的程度和范围，如：

- 纤维-基体界面氧化会使性能下降的程度。
- 分层的开始及其范围。
- 全面降级，例如整体承载能力降低（对承载部件）。

需要提及的是，在上述说明中很少注意部件是用2-D机织铺贴还是用3-D编织结构来制备的。目前，除分层检测外，目前没有任何其他的数据库，允许从NDE的角度来区别2-D铺贴结构和3-D编织结构之间存在的差异。尽管纤维织构影响到所使用的协议和最终数据的信噪比，但目前，从根本上讲，在NDE/NDC方法的应用中还没有显著的差别。

就被连接的部件来说，目前，基本上没有什么信息，所知道的只是陶瓷-陶瓷的铜焊连接，需对连接件进行检测伤，了解：

- 铜焊渗透的完整性，
- 铜焊渗透的均匀性，
- 界面连接强度的质量。

就损伤标准的NDE/NDC需求/要求而言，目前，对具体的CMC体系中，不同水平的损伤如何影响力学性能还知之甚少。至少一旦初步确定这情况后，就可更好地决定对NDC/NDE的要求。利用目前已知的关于2-D铺贴纤维织构CMC的知识，已经证实了现正在发展的NDE/NDC方法（见以下各节）对冲击损伤的检测，它可能是由外来物体损伤（FOD）造成的。

### 3.7.2 成本

目前，由于没有充分开发出CMC的NDE/NDC方法，所以，没有任何把CMC的NDE技术转移到私营工业NDE/NDC设备的销售、维修和培训工作的明显企图。因而，目前一般不能确定实施NDE/NDC方法需要的成本。很明显，用于确定接受/拒绝的任何NDE/NDC方法，其增加的成本必须小于每个部件成本的5%-10%。

### 3.7.3 标准

为使NDE/NDC数据可以定量，必须制定标准。因为不同CFCC体系中在密度、热性能、和模量上存在的差异，必须对每一种材料体系都建立标准。因而，应投入足够力量开始建立这些标准，并且任何合同的各部分工作都应包括发展NDE/NDC的检测标准。对单个部件都需要有厚度、密度、孔隙率、空隙尺寸、分层尺寸与部位范围的检测标准。每一种连接形式（对接、搭接或斜接）的连接都需制定检测标准。此外，需要有每组连接的材料的检测标准。

### 3.7.4 目前的方法和状态

本节内容是以陶瓷特征/缺陷而不是以NDE/NDC方法来排列组织的；然后，讨论能够检测/测量该参数的NDE/NDC方法，指出了其状态。当前有3种基本的NDE/NDC方法，它

们已能够在评定CMC体系时提供大量的信息，这些方法是：

- 高灵敏度热成像（具有10-12 bit焦点平面阵列CCD探测器）和专用的计算机软件。
- X-射线成像（主要是计算机辅助的层析成像）。
- 空气耦合的超声方法（特别是具有8 bit动态范围）。

需要提及的是，上述方法都已用于：

- 带有2-D和3-D纤维织构（使用CG-Nicalon和Hi-Nicalon纤维），并采用CVI、PIP和熔融渗透工艺的SiC/SiC材料体系。
- 采用溶胶-凝胶工艺，和带有长丝缠绕/布铺贴纤维织构的Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。
- 采用溶胶-凝胶工艺的SiC/Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>体系。
- 连接的SiC/SiC材料。

现结合被检测/测量的参数/特征，讨论上述的每一种方法。

#### 3.7.4.1 孔隙率

有两种类型的孔隙需要通过NDE/NDC方法进行检测/测量：(1)和表面孔隙连接的分布式开孔，(2)不和表面连接的分布式内部孔隙。NDE/NDC评定时，必须将分布式孔隙和单一的大空隙加以区分。我们把单一的大空隙定义为缺陷——不是分布的材料特征。分布式孔隙的量通常由CMC制造商用称重和测量方法来确定。由此得到平均容积孔隙率；有时通过所注入的酒精量来决定（假定孔隙总是互相连接，并和表面连通）。这也提供了容积的平均孔隙率。这两种方法都不能提供孔隙的空间分布情况。

有3种NDE/NDC方法可用来进行孔隙率的测量，其中有两种可提供空间分布信息。

- 具有图像处理功能的热成像技术
- 具有图像处理功能的超声波技术
- 冲击声共振（无空间分布信息）

##### 3.7.4.1.1 高灵敏度热成像

进行高灵敏度热成像时，给所研究的试样提供一个热激励脉冲（用闪光灯），将试样所产生的热响应按照时间序列用高灵敏度红外照相机进行记录，并连接到计算机进行数据采集和分析。测量的结果是对热扩散能力的度量，经过一定程度的标定就可确定其和孔隙程度的关系。ASTM已经对该方法提供了一个标准化的版本和商业化的设备，用激光闪光作为热脉冲，同时正在建造和销售具有有限视图的探测器。但这种商业化设备的问题是，只能使用1-1.5 cm小直径的纽扣大小的试样，因而对全尺寸商业部件无能为力。

###### 3.7.4.1.1.1 状态

这些系统使用两种方案：(1)穿透式，热激励脉冲在物体的一侧，而探测器则在物体的相反一侧，(2)单侧式，热激励脉冲和探测器都在物体的同一侧。经典的和经过ASTM批准的是穿透式方法。然而，由于复杂的形状和其他限制，有需要在同一侧获得数据。Argonne国家试验室和其他部门已经发展了一个适用于全尺寸元件的完全穿透式的系统，其最大尺寸可达30 in，但存在壁厚的限制，所有部件的壁厚应小于7 mm，唯一的例外是一个碳-碳刹车系统，其壁厚为25 mm。另一个局限是对材料体系的依赖性——氧化物基材料是光学半透明的，因而需要采用某种可接受的方法，在热脉冲一侧获得光学不透明的表面。对于可采用碳烧蚀方案涡轮发动机燃烧室，成功地使用了薄石墨“涂料”。另一个选择是“调

谐”热激励脉冲的光谱，使试样内部不发生光的吸收现象，这就要求知道CMC材料的光学传导性能。

直到现在，还没有完全开发出单侧式的检测能力。存在的问题是，仍需充分发展适当的算法来分析数据，并适当地理解热脉冲的细节。

### 3.7.4.1.2 具有图像处理的超声波方法

具有图像处理的超声方法，使用了两个超声波传感器。其中一个提供声脉冲，将弹性波“注入”材料，另一个传感器具有特殊的低噪声前置放大器，“接收”所研究材料的声响应。和经典的超声波探伤一样，通过扫描试件的光栅谱，记录下声信号的“图像”，其强度则和材料性能成比例——性能之一就是孔隙率，因为孔隙衰减了弹性脉冲的传播。

对许多具有某种吸湿敏感性的CMC体系，不希望用将这些材料放入水槽的最常用的超声波检测方法。过去5年里，已发展了不需要任何耦合液体的新技术，即空气耦合的超声波方法。如果已知所研究的材料制件的孔隙率范围，就能够建立具体材料的孔隙率与超声衰减之间的关系，进而可建立标定关系。已将上述做法用于PIP材料。

#### 3.7.4.1.2.1 状态

该方法使用两种方案：(1)穿透法，两个传感器分别放在研究部件的相反两侧，(2)单侧式（所谓的投出-俘获），两个传感器放在所研究部件的同侧。较经典的超声波情况仅采用一个传感器，利用所谓的脉冲-回波模式，但这对CVI、PIP、Sol-Gel工艺制造的CMC材料无效，因为这些材料对所考虑的声波具有很高的声衰减特性。因为大多数CMC的声衰减严重，所以，采用的传感器中心频率比较低，为400 kHz。另外，所用传感器是“聚焦”的。这意味着“发射”传感器的能量聚焦到试样上约 $1 \text{ mm}^2$ 的一个非常小的区域，而“接收”传感器也经过聚焦，从约 $1 \text{ mm}^2$ 的非常小区域“接收”能量。

对熔体渗透(MI)的SiC CMC材料，浸入水槽中时不会引起大的问题，所以有可能使用经典的超声波的脉冲-回声方法。这种情况下，也可增大中心频率。

目前，上述任何一个UTS方案都不能实现急需的外形随动；特别是对于传感器放在同侧的应用情况，因为复杂外形的物体而不能使用穿透的方式。对于用CVI、PIP、Sol-Gel工艺制造的材料，关于衰减与孔隙率之间的函数关系，还存在一些问题没有解决。

### 3.7.4.1.3 冲击声共振（“Ping 检测”）

冲击声共振，是指给所研究试样一个瞬时脉冲，再通过非接触式高灵敏电容拾音器，探测所产生的部件振动。对这种检测已有ASTM标准方法(C1259——用脉冲激励振动，测试先进陶瓷的动态杨氏模量、剪切模量和泊松比(Dynamic Young's Modulus, Shear Modulus, and Poisson's Ratio for Advanced Ceramics by Impulse Excitation of Vibration)）。J.W.Lemmens公司制造了一种仪器(GrindO-Sonic)，用脉冲方法确定标准挠曲杆的弹性模量。Argonne国家试验室(ANL)和其他部门开发了一个类似的系统，但可用于较大的全尺寸部件。它用带有“冲击”锤的可控电动振动器来施加冲击；用高灵敏电容拾音器来检测声/振动。在一个高频数字转换器中将这两个模拟信号数字化，并用频率分析软件包来分析转化后的数字信号。通过研究主要的声共振峰值，可确定试件的比阻尼能力，并确定主共振峰值的幅值。利用这两个信息，建立起阻尼能力和振峰幅值与孔隙率之间的相互关系。在这个情况下测量的是整个部件的平均孔隙率。

### 3.7.4.1.3.1 状态

ASTM已制定了用冲击声共振确定标准挠曲杆（假定各向同性）弹性模量的标准试验方法。Argonne国家试验室（ANL）和其他部门一直在试图为大尺寸的复杂形状建立这样的标准试验方法。待解决的是需要证实在冲击载荷下的振动模态，以便证实振动分析模式，从而能在分析中使用所探测的合适频率，对具有复杂振动模式的复杂形状结构，这个分析极其复杂。目前正在探讨的一种可能的解决方法是，使用具有很高频响应的新型扫描激光振动计，再结合可建立详细振动模态的新分析软件包。如果成功，就意味着用这种方法能够确定孔隙的空间分布情况，也确立了将这种方法用于确定整体孔隙率的可靠性。

### 3.7.4.2 密度

有两种感兴趣的密度度量：(1)体密度，(2)密度分布（甚至在3-D中）。CMC制作者通常用阿基米德法测量密度，测量时，用某种密封胶密封，防止水（或其他液体）的浸入。然而，计算的这个孔隙率值是体积值。采用有限元分析CMC部件性能时，需要了解密度和孔隙率在部件内的分布，因此，需要知道孔隙的空间分布情况。

有两种主要的NDE/NDC方法来测量密度，每种方法都能提供在3-D坐标上的信息：(1)X-射线成像（主要是X-射线层析成像），(2)超声波方法。

#### 3.7.4.2.1 X-射线成像

##### 3.7.4.2.1.1 X-射线图像

图3.7.4.2.1.1是两张传统X-射线照相的照片，取自两个完全加工的Sylramic/SiC/MI板。两个板的尺寸均为6 in×9 in，名义厚度为0.090 in，照片中灰度水平直接和厚度方向的密度相关。为了比较，每张照片的左上角均放置一个0.5 in×2.5 in的X-射线照相标定标准。这个证据样本的存在提供了一致的标定标准，用来定量评定各个板射线照片之间的相对密度差异。这个证据样本是充分密实的相同的Sylramic/SiC/MI材料；证据样本射线照片中最亮的方格与这板具有相同的名义厚度；证据样本的其余部分沿长度方向的厚度被机械加工出一序列0.005 in的台阶。这些台阶提供了一个定量的方法，将照片中的灰度水平转换成等同的密度。由于两个板具有相等的不变厚度，所以灰度水平的任何变化都是整个厚度方向上密度变化的结果。板1的X-射线图像具有均匀的外貌，根据所应用的NDE技术，认为这是个高质量的板。板2的X-射线照相照片中的畸变则通常和劣质板有关。板2图像中目视可见的大片黑区，是携带的孔隙区域引起厚度方向上密度降低的结果。

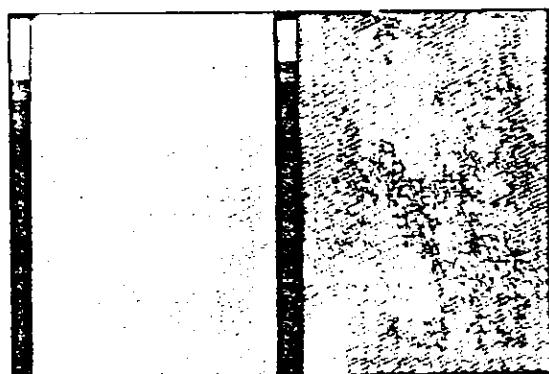


图3.7.4.2.1.1 分别取自于“好”（左侧）和“坏”（右侧）复合材料的X-射线照片

### 3.7.4.2.1.2 X-射线计算机辅助层析成像

X-射线计算机辅助层析成像中，将一个X-射线源和一个X-射线探测器结合起来（所示为所谓的2-D探测器或面积探测器）。探测器的输出直接与安装了高级图像处理软件的高效能PC或工作站连接。所研究物体则放在计算机控制的比例平台上，位于X-射线源和探测器之间。

对简单投影X-射线成像而言，X-射线源发出的X-射线强度能穿透物体，并在计算机屏幕上显现阴影图像。如果部件是平板的或近似为平板，通过将部件图像投影到X-射线探测器上，可以获得密度和图像灰色调之间的相互对应关系。可是，没有密度沿平板厚度方向上的分布情况。

对于比简单平板更复杂的物体进行密度映射绘图时，有必要使用计算机辅助X-射线层析成像。在此情况下，需要使用计算机控制的工作台，获得一系列的投影图像；然后，用这组图像（实际是X-射线的衰减数据）“重建”出物体的横截面。因为是根据X-射线相对衰减的测量数据获得的重建图像，如果获取适当，就可以建立起图像灰色调与密度之间的关系；由于可获得3-D图像，就可确定3-D的密度（使用X-射线成像进行映射得出密度变化，这被称为X-射线密度计量学）。

ASTM也制定了X-射线计算机辅助层析成像（XCT）的指南，现正在制定关于密度计量学的应用指南。这两种方法可实现的空间分辨率取决于许多变量，包括所研究物体的尺寸、所用探测器的特性、软件的完美程度、和对设备进行标定的仔细程度。

### 3.7.4.2.1.2.1 状态

X-射线成像准备使用两种方案：(1)穿透投影成像，(2)计算机辅助层析成像（常常称为CAT扫描）。如前面所说的那样，ASTM已经制定了X-射线成像的指南，近来，又制定了评定X-射线成像设备成像质量的指南，以及使用CAT扫描仪进行密度计量研究的指南。对CMC材料而言，因为目前数据采集和图像处理的时间仍然很长，需要有关于密度计量研究的标准和极高速的计算机软件。

### 3.7.4.2.2 具有图像处理的超声波技术

通过使用数据处理进行图像信息分析，极大地拓展了超声波成像的价值。这里要说的重要问题是，弹性模量和密度直接相关。如果为所有CMC均制出一组仅密度不同的试件，那么，就可清楚了解超声波衰减与密度的关系。厚度方向上密度分析要复杂得多，这就需要开发一个非常高级的软件程序，来得到深度方向上的图像剖面与频率的关系，然后推断出衰减以得到3-D密度。

### 3.7.4.3 要求的热性能

CMC通常应用在高温环境下；所以，对单个部件的热性能分布非常感兴趣。目前，大多数CMC制造商用测量试件热性能（热传导率和热扩散率）的ASTM标准试验来发展这种处理方法。如前面所说的，ANL已经研制了对全尺寸部件进行全场热性能（扩散率）映射绘图的NDC/NDE系统。如前所指出的，应注意区分氧化物和非氧化物。在红外区和可见光区，氧化物是部分透明的，当采用红外方法获得数据时，要注意这问题。

仅有一种NDE/NDC方法可测量热性能——红外成像。前面已叙述了该方法及其现状。

### 3.7.4.4 缺陷探测

CMC内的缺陷可分为：(1)分层，(2)空隙的程度和范围，(3)缺层和层脱落，(4)机加引起缺陷的程度。

#### 3.7.4.4.1 分层

分层主要发生在2-D布铺贴的纤维织构中，在长丝缠绕的纤维织构较少出现。因为出现的分层平行于表面，用穿透X-射线成像检测不出这些缺陷。但由于分层影响热迁移，并作为弹性波传播的重要衰减器，因此，红外成像和超声波方法都可检测出分层。对于复杂形状的结构，X-射线CAT扫描是有用的，已经证明能检测出分层。对这些方法都没有零件尺寸的限制。

分层的量化被解释为平均尺寸和深度位置。通过使用单侧热成像，如果可得到标定的标准，就可确定分层的深度。同样的方法可适用于空气耦合或水耦合的超声波系统。X-射线CAT扫描几乎可精确提供分层的深度。

#### 3.7.4.4.2 空隙的程度和范围

经常能够通过穿透X-射线图像，检测出平板形状的试件（只要试样不太厚，即小于6 mm厚）中的大空隙（通常认为其最大的尺寸超过1-2 mm）。对于复杂形状的试件，已经证明能够通过X-射线CAT扫描技术，检测出来这样大的空隙。虽然红外和超声波技术似乎是完全可以互相替代的方法，虽然允许用超声波方法进行检测，但由于超声波的热扩散和散射，使其不宜于像X-射线成像检测系统那样来直接检测空隙。

#### 3.7.4.4.3 缺少铺层

在需要通过添加铺层来增加强度的复杂形状结构中，确定是否漏了某个铺层的能力就很重要。经验表明，可能通过使用具有适当带通透镜的新型12-bit动态量程热成像照相机，由所得到的热像照片灵敏地检测出一些必要铺层是否存在的情况，这取决于部件的几何形状（即该处是否有显著的曲度）。如果几何形状很复杂，那么可以使用X-射线CAT扫描，但是迄今为止还没有出现这种必要。

#### 3.7.4.4.4 铺层递减（ply drop-off）

当用2-D纤维织构制造复杂形状的CMC结构时，在铺贴织物时会存在某些位置，在该处可能出现铺层偏移向一个方向或者另外一个方向的趋势。这就造成了这个位置上的铺层并不始终朝着希望的边界方向，产生所谓的铺层递减。从NDE/NDC的角度看，这和缺少铺层是相似的，可以采用同样的处置办法。

#### 3.7.4.4.5 机械加工引起的损伤

机械加工引起的损伤/缺陷，可能是也可能不是会直接影响性能的关键缺陷，这取决于该CMC的损伤容限性能。然而，在大多数的情形下，机械加工引起的损伤是表面的缺陷，它可以通过光学或染色剂渗透的方法来测定，而不用通过更复杂的超声波、X-射线和热成像方法。

#### 3.7.4.5 NDE/NDC的使用检测（ISI）

使用检测（ISI）被定义成，能够在部件使用过程中评估其状态的（NDC/NDE）检测程序。有了ISI的信息，可以作出关键性的决策，决定是否应该继续使用该部件，或者将其

拆下更换该部件。对载人的应用情况或需要停机的系统，更换的决定可能是昂贵/危险的，并且错误的决定可能导致严重的后果。

对CMC材料，所关心的环境效应和累积效应是：

- 在具有已知氧化敏感性的纤维-基体界面的氧化，如热解碳（PC）或氮化硼（BN）
- 外来物损伤
- 分层的形成
- 对CMC连接的材料还会有其他的未详细说明的问题

#### 3.7.4.5.1 纤维-基体界面的退化

虽然在此时还得到证实，可能用两种主要候选的NDE/NDC方法来检测此类材料退化现象：(1)冲击声共振，因为由退化导致的局部夹紧应力变化，引起了阻尼能力的变化以及结构总体刚度的变化，产生自然频率的下降；(2)热成像，因为纤维-基体界面层的变化改变了材料的热传导率。这两种方法都需要进一步的发展和验证。

#### 3.7.4.5.2 外来物损伤（FOD）和分层

从CMC的角度来看这是一个新的研究领域，因而只有很少的NDE/NDC数据可以利用。然而，FOD更趋于类似具有广泛损伤区域的分层。迄今为止，热成像、空气耦合的超声波、和X-射线成像技术已经有希望应用于检测损伤区域并加以定量。

### 3.7.5 正在研究中的方法

此节留待以后补充。

## 3.8 原始材料的质量控制

此节留待以后补充。

## 3.9 机械加工

此节留待以后补充。

## **第4章 最终产品的质量控制**

### **4.1 引言**

此节留待以后补充。

### **4.2 质量保证**

此节留待以后补充。

### **4.3 材料性能的验证**

此节留待以后补充。

### **4.4 统计的过程控制**

此节留待以后补充。

## **第5章 应用、各种情况的历史和经验教训**

此章留待以后补充。

## **第4章 最终产品的质量控制**

### **4.1 引言**

此节留待以后补充。

### **4.2 质量保证**

此节留待以后补充。

### **4.3 材料性能的验证**

此节留待以后补充。

### **4.4 统计的过程控制**

此节留待以后补充。

## **第5章 应用、各种情况的历史和经验教训**

此章留待以后补充。

## 参考文献

- 1.6(a) Military Standardization Handbook, Metallic Materials and Elements for Aerospace Vehicle Structures, MIL-HDBK-5F, 1 November 1990.
- 1.6(b) DoD/NASA Advanced Composites Design Guide, Air Force Wright Aeronautical Laboratories, Dayton, OH, prepared by Rockwell International Corporation, 1983 (distribution limited).
- 1.6(c) ASTM E 206, "Definitions of Terms Relating to Fatigue Testing and the Statistical Analysis of Fatigue Data," 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 3.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.
- 1.6.2(a) ASTM E 380, "Standard for Metric Practice," 1984 Annual Book of ASTM Standards, Vol 14.01, ASTM, Philadelphia, PA, 1984.
- 1.6.2(b) Engineering Design Handbook: Metric Conversion Guide, DARCOM P 706-470, July 1976.
- 1.6.2(c) The International System of Units (SI), NBS Special Publication 330, National Bureau of Standards, 1986 edition.
- 1.6.2(d) Units and Systems of Weights and Measures, Their Origin, Development, and Present Status, NBS Letter Circular LC 1035, National Bureau of Standards, November 1985.
- 1.6.2(e) The International System of Units Physical Constants and Conversion Factors, NASA Special Publication 7012, 1964.
- 2.1 Adams, R.D. and Cawley, P. "A Review of Defect Types and Nondestructive Testing Techniques for Composites and Bonded Joints," NDT International V21, No 4, p 208, 1988.
- 3.1.1.1.1(a) "Handbook for Continuous Fiber-reinforced Ceramic Matrix Composites", Chapter 6, Lowden, Stanton, and Besmann
- 3.1.1.1.1(b) Naslain, R., et al., "Chemical Vapor Infiltration Technique," Euro-CVD-Four (Eindhoven, The Netherlands: The Centre, 1983), 293-304.
- 3.1.1.1.1(c) Naslain, R., "CVI Composites," Ceramic Matrix Composites, ed. R. Warren (New York: Chapman and Hall, 1992), 199-244.
- 3.1.1.1.1(d) Fitzer, E. and Gadow, R., "Fiber Reinforced Silicon Carbide," Am. Ceram. Soc. Bull. 65 (2):326-35, 1986.
- 3.1.1.1.1(e) Christin, F., Naslain, R., and Bernard, C., "A Thermodynamic and Experimental Approach of Silicon Carbide-CVD Application to the CVD-Infiltration of Porous Carbon Carbon Composites," Proceedings of the 7th International Conference on Chemical Vapor Deposition, ed. T. D. Sedwick and H. Lydan (Pennington, NJ: The Electrochemical Society, 1991), 499-514.
- 3.1.1.1.1(f) Canalier, J. C., Lacombe, A., and Rouges, J. M., "Composites à Matrice Ceramique, Nouveaux Matériaux à Très Hautes Performances," Proceedings of ECCM3, Developments in the Science and Technology of Composite Materials, eds. A. R. Bunsell, P. Lamicq, and A. Massiah, (London: Elsevier Applied Science, 1989), 99-110.
- 3.1.1.1.1(g) Naslain, R., "Two-Dimensional SiC/SiC Composites Processed According to the Isobaric-Isothermal Chemical Vapor Infiltration Gas Phase Route," J. Alloys Compd. 188 (1-2):42-8, 1992.
- 3.1.1.1.1(h) Naslain, R., and Langlais, F., "Fundamental and Practical Aspects of the Chemical Vapor Infiltration of Porous Substrates," High Temp. Sci. Part 2 27:221-35, 1990.
- 3.1.1.1.1(i) Naslain, R., Rossignol, J. Y., Hagenmuller, P., Christin, F., Heraud, L., and Choury, J. J., "Synthesis and Properties of New Composite Materials for High Temperature Applications Based on Carbon Fibers and C-CiC or C-TiC Hybrid Matrices," Revue de Chimie Minerale 18 (5):544-64, 1981.
- 3.1.1.1.1(j) Fiber Reinforced Ceramic Composites: Material, Processing and Technology, edited by KS Mazdiyasni, "Fabrication of Fiber-Reinforced Ceramic Composites by Chemical Vapor Infiltration: Processing , Structure and Properties," Noyes Publisher

- 3.1.1.1.1(k) Paraphrased Honeywell Advanced Composites Inc. proposals and reports.
- 3.1.1.1.2(a) Jamet, J., and Lamicq, P., "Composite Thermostructures: An Overview of the French Experience." Proceedings of the Sixth European Conference on Composite materials, High Temperature Ceramic Matrix Composites, eds. R. Naslain, J. Lamon and D. Doumeingts (Cambridge: Woodhead Publishing Limited, 1993), 735-42.
- 3.1.1.1.2(b) Heraud, L. H., Christin, F., Naslain, R., and Hagenmuller, P., "Properties of Oxidation-Resistant Composites Materials Obtained by SiC Infiltration." Proceedings of the Eight International Conference on Chemical Vapor Deposition, eds. J. N. Blocher, Jr. G. E. Vuillard, and G. Wahl (Pennington, NJ: The Electrochemical Society, 1981), 782-9.
- 3.1.1.4(a) Buckley, J. D., "Carbon-Carbon, An Overview", *Ceramic Bulletin*, 67(2):364-368 (1988).
- 3.1.1.4(b) Relcik, G. S., "Carbon and Graphite Matrices in Carbon-Carbon Composites: An Overview of the Formation, Structure and Properties," Technical Report TR-0091(6935-06)-3, The Aerospace Corporation, 23 October 192.
- 3.1.1.6.1(a) Johnson, D.W., Jr., "Sol-Gel Processing of Ceramics and Glass," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 64[12], 1597-1602 (1985).
- 3.1.1.6.1(b) Matsuyama, I., "Synthesis of High Purity Silica Glass by the Sol-Gel Method," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 63 [11], 1408-1411 (1984).
- 3.1.1.6.1(c) Nogami, M., and Moriya, Y., "Glass Formation of the SiO<sub>2</sub>-B<sub>2</sub>O<sub>3</sub> System by Gel Process from Metal Alkoxides," *J. Non-Cryst. Sol.*, 48, 359-366 (1982).
- 3.1.1.6.1(d) Yamane, M., "Low Temperature Synthesis of a Monolithic Silica Glass by the Pyrolysis of a Silica Gel," *J. Mater. Sci.*, 14, 607-611 (1979).
- 3.1.1.6.1(e) Voldus, B.E., "Alumina Sol Preparation from Alkoxides," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 54 (3), 289-290 (1975).
- 3.1.1.6.2(a) Lannutti, J.J. and Clark, D.E., "Long Fiber Reinforced Sol-Gel Derived Alumina Composites," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Better Ceramics Through Chemistry, Vol. 32, pp. 375-381. North-Holland, New York, 1984.
- 3.1.1.6.2(b) Lannutti, J.J. and Clark, D.E., "Sol-Gel Derived Ceramic-Ceramic Composites Using Short Fibers," *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.*, Better Ceramics Through Chemistry, Vol. 32, pp. 369-374. North-Holland, New York, 1984.
- 3.1.1.6.4(a) Brinker, C.J., Clark, D.E., Ulrich, D.R., eds. *Mat. Res. Soc. Symp. Proc.* (a) Better Ceramics Through Chemistry, Vol. 32, North-Holland, New York, 1984; (b) Better Ceramics Through Chemistry II, Vol. 73, North-Holland, New York, 1986; and (c) Better Ceramics Through Chemistry III, Vol. 121, North-Holland, New York, 1988.
- 3.1.1.6.4(b) Hench, L.L. and Ulrich, D.R., eds. (a) *Ultrastucture Processing of Ceramics, Glasses and Composites*, John Wiley & Sons, New York, 1984; and (b) *Science of Ceramic Chemical Processing*, John Wiley & Sons, New York, 1986.
- 3.1.1.6.4(c) Mroz, T.J., Jr., and Laughner, J.W., "Microstructures of Mullite Sintered from Seeded Sol-Gels," *J. Am. Ceram. Soc.*, 72 [3], 508-509 (1989).
- 3.1.1.7.(a) "Toughened Silcomp Composites-Process and Preliminary Properties.", Krishan L. Luthra, Raj N. Singh, and Milivoj K. Brun, *American Ceramic Society Bulletin*, Vol 72, No. 7, July 1993. P. 79-85.
- 3.1.1.7(b) Honeywell Advanced Composites Inc. proposals and reports.]
- 3.1.1.8(a) "Composites Engineering Handbook", Edited by PK Mallick, Marcel Dekker, Inc., 1997, ISBN 0-8247-9304-8.
- 3.1.1.8(b) "Ceramic-Matrix Composites", edited by R Warren, Blackie and Son Ltd, 1992, ISBN 0-412-02021-1.
- 3.2.2.3(a) Yajima, S., Okamura, K., Hayashi, J., and Omori, M., "Synthesis of Continuous SiC Fibers with High Tensile Strength," *J. Am. Cer. Soc.* 59(7-8): 324-27 (1976).
- 3.2.2.3(b) Yajima, S., K., Hayashi, J., and Omori, M., "Continuous Silicon Carbide Fiber of High Tensile Strength," *Chem. Lett.* 4:931-34 (1975).
- 3.2.2.3(c) Yajima, S., Hasegawa, Y., Hayashi, J., and Omori, M., "Synthesis of Continuous Silicon Carbide Fiber. Part 1," *J. Mater. Sci.* 13, (12) 2569-76 (1978).

- 3.2.2.3(d) Hasegawa, Y., Iimure, M., and Yajima, S., "Synthesis of Continuous Silicon Carbide Fiber. Part 2," *J. Mater. Sci.* 15, (3):720-8 (1980).
- 3.2.2.3(e) Hasegawa, Y. and Okamura, K., "Synthesis of Continuous Silicon Carbide Fiber. Part 3," *J. Mater. Sci.* 18, (12):3633-48 (1983).
- 3.2.2.3(f) Mah, T., Hecht, N., McCullum, D., Hoenigman, J., Kin, H., Lipsit, H., and Katz, A., "Thermal Stability of SiC Fibers," *J. Mater. Sci.*, 19 (4):11910201 (1984).
- 3.2.2.3(g) Jaskowiak, M. H. and DiCarlo, J. A., "Pressure Effects on the Thermal Stability of Silicon Carbide Fibers," *J. Amer. Ceram. Soc.*, 72(2):192-7 (1989).
- 3.2.2.3(h) Takeda, M., Imai, Y., Ichikawa, H., Ishikawa, T., Kasai, H., Seguchi, T., and Okamura, K., "Thermal Stability of the Low Oxygen Silicon Carbide Fibers Derived from Polycarbosilane," *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 13(7-8):192-7 (1989).
- 3.2.2.3(i) Yamamura, T., Ishikawa, T., Shibuya, M., Tamura, M., Nogawara, T., and Okamura, K., "A New Type of Ceramic Matrix Composite Using Si-Ti-C-O Fiber," *Ceram. Eng. Sci. Proc.* 10(7-8):736-47 (1989).
- 3.2.2.3(j) "SiN Ceramics Fiber by Precursor Process", JPRS-JST-90-017-L, Vol 13, March 1990.
- 3.2.2.3(k) Legrow, G.E., Lin, T.F., Lipowitz, J., and Reach, R.S., "Ceramics from Hydridopolysilazane," *Am. Ceram. Soc. Bull.*, 66(2):363-7 (1987).
- 3.2.2.4.2 High Performance Synthetic Fibers for Composites, National Materials Advisory Board, Report # NMAB-458, National Academy Press, 1992.
- 3.2.2.4.5(a) Carbon Fibers: Formation, Structure, and Properties, L.H. Peebles, Jr. CRC Press, 1998.
- 3.2.2.4.5(b) Advanced Structural Fibers from Precursors: Carbon, Silicon Carbide, Business Communications Company Incorporated, 1997.
- 3.2.2.4.5(c) Carbon Fibers, Jean-Baptiste Donnet (Editor) Marcel Dekker, 1998.
- 3.3.1(a) Richerson, D. W., "Ceramic Matrix Composites" Composites Engineering Handbook Ed. P.K. Mallic, Marcel-Dekker Inc: 983-138. (1997)
- 3.3.1(b) Zok, F. W., Evans, A. G., Mackin, T. J., "Theory of Fiber Reinforcement," Handbook on Continuous Fiber Reinforced Ceramic Matrix Composites, Ed. R. L. Lehman, S.K. El-Rahaiby, J. B. Wachtman, Jr., (Purdue Research Foundation, 1995), p. 35-110.
- 3.3.1(c) Faber, K.T., "Ceramic Composite Interfaces: Properties and Design," *Annual Rev. Materials Science*, 1997 (27):499-524.
- 3.3.1(d) Kerans, R.J., Hay, R.S., Pagano, N.J., "The Role of the Fiber-Matrix Interface in Ceramic Composites", *Ceramic Bulletin* 68(2): 429-441 (1989)
- 3.3.1.1(a) Ceramic Fibers and Coatings, Advanced Materials for the Twenty-First Century, National Materials Advisory Board, Publication NMAB-494, National Academy Press, 1998.
- 3.3.1.1(b) D. Cranmer, "Fiber Coating and Characterization" Ceramic Bulletin, Vol #68, #2, (1989) p.415-419.
- 3.3.1.1(c) J. B. Davis, J. P. A. Lofvander, A. G. Evans, E. Bischoff, M. L. Emiliani, "Fiber Coating Concepts for Brittle-Matrix Composites," *J. Amer. Ceramic Soc.* Vol 76, #5. (1993) p. 1249-1257.
- 3.4.1 Karnitz, M.A., et. al., "Continuous Fiber Ceramic Composite Program", Ceramic Bulletin, Vol. 70, No. 3, 1991.
- 3.4.2(a) Baxter, H. B., "Innovative Textile Reinforcement Composite Materials for Aircraft Structures", SAMPE Technical Conference, November 4-7, 1996.
- 3.4.2(b) "Advanced Composites Manufacturing" Edited by Gutowski. 1997, Massachusetts Institute of Technology, 581 pages. 50 Pages on Processing of Textile Preforms, 57 pages on Cost, Automation, and Design.

## PART B 设计和可支持性

### 第6章 设计和分析

#### 6.1 引言

此节留待以后补充。

#### 6.2 设计考虑的问题

此节留待以后补充。

##### 6.2.1 CMC 设计指南

此节留待以后补充。

##### 6.2.2 CMC 设计系统的状态

此节留待以后补充。

##### 6.2.3 CMC 部件的设计和发展

此节留待以后补充。

#### 6.2.4 设计许用值

此节留待以后补充。

#### 6.3 设计要求

此节留待以后补充。

##### 6.3.1 静力和蠕变载荷——机械, 热, 应力/蠕变断裂, 热条痕(缺陷)

此节留待以后补充。

##### 6.3.2 低周疲劳

此节留待以后补充。

##### 6.3.3 高周疲劳

此节留待以后补充。

##### 6.3.4 热循环

此节留待以后补充。

### **6.3.5 热-机械疲劳**

此节留待以后补充。

## **6.4 设计准则**

此节留待以后补充。

### **6.4.1 耐久性要求**

此节留待以后补充。

### **6.4.2 损伤容限**

此节留待以后补充。

## **6.5 数据要求**

此节留待以后补充。

### **6.5.1 剔除试验 (Killer tests)**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.1 环境调节和预裂纹**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.2 载荷**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.3 在定常应力下的梯级温度蠕变**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.4 在定常温度下的梯级应力蠕变**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.5 低周疲劳试验**

此节留待以后补充。

#### **6.5.1.6 高周疲劳试验**

此节留待以后补充。

### **6.5.2 具有结构外形的试件**

此节留待以后补充。

### **6.5.3 具有层间裂纹的复合材料“T”型子元件**

此节留待以后补充。

## 6.6 接头

此节留待以后补充。

### 6.6.1 无热接头设计

此节留待以后补充。

### 6.6.2 无热卷曲衬垫

此节留待以后补充。

### 6.6.3 无热平板衬垫

此节留待以后补充。

### 6.6.4 肋加强衬垫

此节留待以后补充。

### 6.6.5 复合材料紧固件设计

此节留待以后补充。

## 第7章 可支持性

### 7.1 引言和术语

此节留待以后补充。

### 7.2 支持性要素

此节留待以后补充。

#### 7.2.1 系统工程和一体化

此节留待以后补充。

#### 7.2.2 连接

此节留待以后补充。

#### 7.2.3 可检性

此节留待以后补充。

#### 7.2.4 可修理性

此节留待以后补充。

#### 7.2.5 可维护性

此节留待以后补充。

#### 7.2.6 环境依顺性

此节留待以后补充。

#### 7.2.7 支持的实施

此节留待以后补充。

#### 7.2.8 后勤要求

此节留待以后补充。

## PART C 试验

### 第8章 热-力学-物理试验方法——总览

#### 8.1 引言

本章对陶瓷基复合材料及其组分的热-力学-物理特征进行试验表征，以及随后的文件编制，提供了MIL-HDBK-17范围内的指南。并讨论了推荐的标准试验方法、试验参数和对一些应用情况的试验矩阵。

##### 8.1.1 积木式方法

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

可以用这种积木式方法来建立时间依变的环境补偿值，用于在大气环境下的全尺寸试验，因为要在预期使用中的实际环境、湿度和温度条件下进行这些试验经常是不切实际的。低级别的试验可用来证明这些环境补偿因子的正确性。相似地，可以其他的积木式试验来确定循环机械疲劳、循环热力疲劳的截止方法，以及确定全尺寸试验的疲劳分散性补偿系数。

在图 8.1.1 中图示了积木式方法，并可以把这个方法归纳为以下的步骤：

1. 生成材料的基准值和初步的设计许用值。
2. 基于对结构的设计/分析，选取以后试验验证的关键区域。
3. 对每个设计特征确定最严重的强度破坏模式。
4. 选择将出现最严重强度破坏模式的环境条件。要特别注意对组分敏感的破坏模式（比如界面相的氧化、基体的退化，或者纤维的退化），以及由于面外载荷或刚度裁剪设计导致的潜在“热点”。
5. 设计并试验一系列试验件，式中每个模拟一个单独的破坏模式和载荷情况，与分析预计相对比，并按需要调整分析模型或设计许用值。
6. 设计并进行逐渐复杂的试验，评估可能由于几个潜在破坏模式引起破坏更复杂的载荷状态。与分析预计相对比，并按需要调整分析模型。

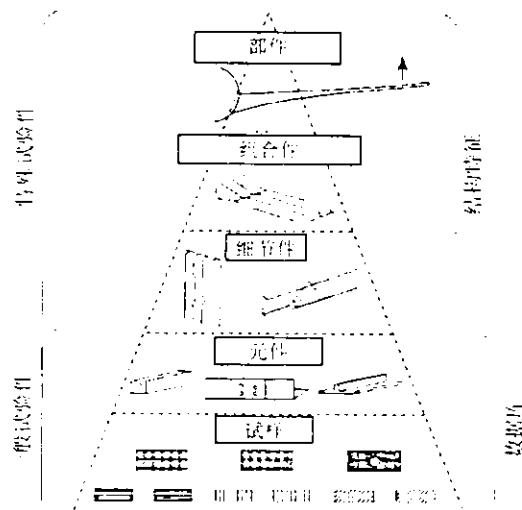


图8.1.1 “积木式”方法中的“金字塔”试验

7. 按需要设计（包括补偿因子）并进行全尺寸部件的静力与疲劳试验，以最终验证内力和结构完整性。与分析进行比较。

### 8.1.2 试验级别和数据的使用

可以按照两个基本途径来定义试验工作：结构复杂水平和数据应用类型。在随后各节中将仔细讨论每一种分类，并用于构思大型的试验规划，来便编制试验计划。

#### 8.1.2.1 结构复杂性级别

5种结构复杂级别基于各自的几何尺寸或形式：组分，小复合材料（mini-composite），块状复合材料（bulk-composite），结构元件和结构组合件。在材料数据研制计划过程的早期，应当确定要试验的材料形式和对每个等级相对强调的重点；而这又将取决于很多因素，包括：制造工艺、结构应用、公司/机构的惯例、和/或采购或适航部门。虽然在某些罕见的例子中使用一级就足够了，但大多数应用情况至少需要两级，而通常是完整地实施积木式方法的所有五级。无论所选择的结构复杂水平是什么，都需要包括纤维、界面相、基体的物理、化学和工艺方面，来支持热-力学-物理性能的试验结果。每个采购或适航部门均规定了数据使用的具体最低要求与指南。建议MIL-HDBK-17的用户在着手计划和进行任何用于支持结构认证或取证的试验以前，要与采购或取证机构进行协调。

这5种结构复杂性级别包括以下的方面：

- **组分试验**——评估纤维、纤维形式、界面相、基体和外部界面层的各自性能。关键的性能可包括密度，强度，或刚度。
- **小复合材料试验**——评估在复合材料形式中的纤维，界面相和基体的性能，但是经常限于单个有捻纱而不是织物层。关键的性能可能包括基体开裂，纤维脱粘和环境效应。
- **块状复合材料试验**——评估在给定的铺层（铺叠的纺织物层，或铺叠的单向层等）时复合材料的响应。关键的性能包括比例极限行为，极限强度，弹性常数。
- **结构元件试验**——评估复合材料容忍普通块状材料不连续的性能。关键性能包括开孔拉伸/压缩，缺口拉伸/压缩，连接的剪切/挤压和层间响应。
- **结构组合件（或更高层的）试验**——该试验对复杂度逐渐增加的结构元件评估其行为和失效模式。是应用情况所特有的，因而没有明确包括在MIL-HDBK-17内。

#### 8.1.2.2 数据应用分类

材料的性能试验可以根据数据的应用分成下列4种类型：筛选、取证、验收和等同。对大多数材料体系的试验通常从材料筛选开始。对倾向于工程制件的材料体系，还要作进一步的筛选，以获得更多的数据。下面将详细介绍这4种数据应用类别。

##### 8.1.2.2.1 筛选试验

这是按照所给定的应用对候选材料进行评估，经常考虑到特殊的应用/环境/部件。筛选的目的是在最恶劣情况的环境和载荷试验条件下，对新材料体系进行的初始评估。在MIL-HDBK-17中给出了这些所谓“剔除试验”（“killer tests”）的指南。MIL-HDBK-17中筛选试验矩阵提供了不同的强度、模量和物理性能数据，并被用来在材料选择过程中剔除不完善的材料体系，在制订下步更深入的评估计划以前，发现有希望的新材料体系。

#### **8.1.2.2.2 材料取证试验**

这一步是证明给定的材料/工艺满足材料规范要求的能力；这也是建立原始规范要求值的过程。严格的材料认证试验考察数据的统计，并在理念上是为满足结构证实要求而实施的设计许用值试验的一个子集，或与设计许用值的试验直接相关。（然而，虽然某个材料可能对某种规定的规范是合格的，但对每个具体的应用情况仍然必须被批准。）目标是定量地评定关键材料性能的变异性，得出各种统计量以建立材料的验收、等价性、质量控制和设计基准值。由于在工业界有各种不同的采样和统计方法，因此，必须明确规定所使用的方法。虽然能通过很多方法获得一般的B基准值，但被正式批准的MIL-HDBK-17 B基准值却具有其特殊的取样和统计确定过程，并强调了附加的考虑如试验方法、失效模式和数据的文件表述等。

#### **8.1.2.2.3 验收试验**

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

#### **8.1.2.2.4 等同性试验**

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

### **8.2 试验计划的编制**

#### **8.2.1 概述**

可以使用表8.2.1中给出的矩阵，来制定大规模的试验计划。按照结构复杂性级别和数据应用的类别所需要的材料性能试验，都列在阵列的行、列中，以每一个交叉点的单元描述各自的试验任务（虽然偶尔也有用到某些组合的可能）。可用这些单元组汇总出整个积木式试验计划的规模。表8.2.1的阵列，说明了证实基于复合材料的航宇结构应用中的一个普通（但决不意味其是普遍的）试验顺序。这个序列从阵列的左上单元开始，按时间继续进行，直到右下角单元，用数字标明大致的前后顺序。

#### **8.2.2 基于统计性能的基准方法和替代方法**

此节留待以后补充。

#### **8.2.3 数据等同问题**

此节留待以后补充。

#### 8.2.4 试验方法选择

此节留待以后补充。

#### 8.2.5 母体样本和规模

此节留待以后补充。

#### 8.2.6 材料和工艺的变异

此节留待以后补充。

#### 8.2.7 材料使用极限

此节留待以后补充。

#### 8.2.8 非大气环境试验

此节留待以后补充。

#### 8.2.9 数据归一化

此节留待以后补充。

#### 8.2.10 数据文件

此节留待以后补充。

#### 8.2.11 应用情况所特有的试验要求

此节留待以后补充。

表8.2.1 试验计划的定义

结构复杂性级别	数据应用类别			
	材料筛选	材料取证	材料验收	材料等同
组分	1	-	-	
小复合材料	2	4		
块状复合材料	-	5		7
结构元件	3	6		8
结构组件	-			9

### 8.3 推荐的试验矩阵

#### 8.3.1 材料筛选

筛选过程的目的是，揭示新候选材料体系中关键性能和特性的品质和/或不足，并保持试验工作量为最小。筛选过程对一个具体的复合材料体系，识别其关键的试验和环境条件，以及任何其他特别的考虑事项。通过适当的试验矩阵设计，使得其能同目前生产的材料体系进行比较。

设计筛选试验矩阵的大体方法是，选择关键的静力试验，以提供足够的数据来评定小

复合材料和块状复合材料级别的刚度和强度平均值。小复合材料级别的试验，提供了通常用于陶瓷基复合材料微观力学模型的固有的材料刚度和强度性能，包括拉伸、压缩和剪切。块状复合材料级别的试验，提供了有关应用问题中应力不连续情况（如过渡半径和缺口等）的筛选强度数据。基准试验在大气环境的条件下进行。然而，“剔除试验”则要在关键的受控环境条件下进行，以便能够尽快暴露材料体系的不足之处。

表8.3.1给出了力学性能筛选试验矩阵的一个示例。在极端环境下，如随后各节所讨论的那样，可能必须考虑附加的因素。对运行环境的敏感性和其他特别的问题，可能要在筛选评估中增加一些补充的特殊试验。

表8.3.1 静强度的材料筛选矩阵示例

试验	试验件的数量		评估重点
	室温大气环境	高温环境	
小复合材料：			
拉伸	3	3	纤维
压缩	3	3	纤维/基体
剪切	3	3	界面相
块状复合材料：			
开孔压缩	3	3	纤维
冲击后压缩	3	3	纤维/基体
缺口拉伸	3	3	应力集中

### 8.3.2 材料取证

推荐的热、力学和物理性能的试验矩阵，是基于跨越材料批次进行的重复试验（见表8.3.2(a)和(b))。对于热性能和物理性能，当要确定B-基准性能值时，至少要对5批材料进行3个重复件的试验，用于进行参数分析/非参数分析。对于力学性能，当要确定B-基准性能值时，也至少要对5批材料进行6个重复件的试验，用于进行参数分析/非参数分析。如果承包商和采购商之间达成一致，较少的材料批次和重复试验件的个数也可以接受。

表8.3.2(a) 热/物理性能的材料取证示例

热/物理性能	试验方法	每一试验条件下 每批的试验数		试验总数
		参见手册的章节	室温大气环境	高温环境
纤维体积	7.5.4.3	3	N/A	15
基体体积	7.5.4.3	3	N/A	15
密度	7.5.4.3	3	N/A	15
扩散率	7.5.4.1	3	N/A	15
膨胀系数	7.5.4.1	3	N/A	15
比热	7.5.4.1	3	N/A	15

表8.3.2(b) 力学性能的材料取证示例

力学性能	试验方法	每一试验条件下 每批的试验数		试验总数
		参见手册的章节	室温大气环境	高温环境
面内拉伸	9.4.2	6	6	60
厚度方向拉伸	9.4.2	6	6	60
压缩	9.4.2	6	6	60
面内剪切	9.4.2	6	6	60
层间剪切	9.4.2	6	6	60

### **8.3.3 材料验收试验矩阵**

此节留待以后补充。

### **8.3.4 替代材料等同性试验矩阵**

此节留待以后补充。

### **8.3.5 一般材料/结构元件试验矩阵**

此节留待以后补充。

### **8.3.6 基准值的替代方法**

此节留待以后补充。

### **8.3.7 为使用 MIL-HDBK-17 基准值的数据证实**

此节留待以后补充。

## **8.4 数据处理和文件要求**

此节留待以后补充。

### **8.4.1 引言**

此节留待以后补充。

### **8.4.2 由复合材料得出的单层性能**

此节留待以后补充。

### **8.4.3 数据归一化**

出于多种原因要对热、物理和力学试验数据进行数据分析，式中包括确定多批的统计量和基于统计的性能值（许用值），比较不同来源的材料，材料选择，评估工艺参数和质量保证的评估。如果用具有不同纤维体积含量的试件进行试验，那么这种计算或直接比较可能不是有效的。归一化是将原始试验数据调整到单一（规定的）纤维体积含量情况的一个方法。以下各节将讨论归一化理论、方法和实际应用。

#### **8.4.3.1 归一化理论**

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

有两个因素可能使层压板纤维体积含量产生变化：(1)相对于纤维总量的基体树脂总量（树脂含量）和(2)孔隙率总量（空隙体积）。这些因素导致由材料之间、批次之间、板件

之间以及甚至是一个板件内试件之间纤维体积含量的变化。为了数据分析可对材料、批次、板件和试件进行比较，必须把纤维控制的性能数据修正到一个公共的纤维体积含量基础上。如果不这样，将在数据中引入附加的变异源，可能导致错误的结论。数据归一化过程试图消除或减少纤维控制性能的变异性。

#### 8.4.3.2 归一化方法

因为理论上纤维控制的强度与刚度性能随纤维体积含量线性变化，首先一个显见的方法就是用适当的方法确定试验件真实纤维体积含量，并利用一个（选取或规定的）公共的纤维体积含量比值把原始数据修正为实际值，再如8.4.3.2(a)式所示。

$$\text{归一化值} = \text{试验值} \times \frac{\text{FV}_{\text{公}}}{\text{FV}_{\text{实}}} \quad 8.4.3.2(\text{a})$$

式中  $\text{FV}_{\text{公}}$ =所选的公共纤维含量（体积含量或%）， $\text{FV}_{\text{实}}$ =试件的真实纤维含量（体积含量或%）。

虽然这看来是个最直接的方法，但有其局限性。最严重的不足是，通常并不测量每个单独试验件的纤维体积。最多从每块试验板件取有代表性的一片，来估计板件的平均纤维体积含量。

首选的数据归一化方法采用了某种措施来考虑各试验件之间纤维体积的变异。这个方法的基础是纤维体积含量和最终单层厚度之间的关系。如同早先所述，纤维体积含量是树脂含量和空隙含量的函数。对于给定的空隙含量，层压板的纤维体积含量完全取决于树脂的含量。此外，对于给定的空隙含量和纤维面积重量，板件的厚度（从而单层的厚度）也只取决于树脂含量。于是，对于不变的纤维面积重量和空隙含量，固化后单层厚度就只取决于纤维体积含量。这种依赖关系就能够对各个试验件用它的单层厚度（总厚度除以铺层数）进行归一化。图8.4.3.2给出了最终的单层厚度和纤维体积含量关系的一个例子（在结构复合材料通常感兴趣的纤维体积含量范围即0.45和0.65内，这实际上也是线性关系）。

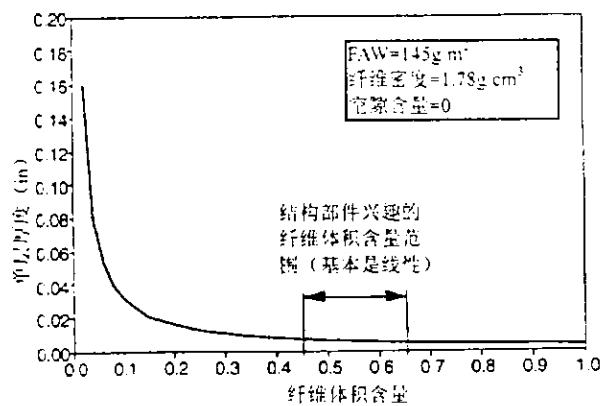


图8.4.3.2 最终单层厚度与纤维体积含量之间的关系示例

由复杂的推导，得出对个别试件进行归一化如下关系式：

$$\text{归一化值} = \text{试验值} \times \frac{\text{FAW}_{\text{公}}}{\text{FAW}_{\text{实}}} \times \frac{\text{CPT}_{\text{公}}}{\text{CPT}_{\text{实}}} \quad 8.4.3.2(\text{b})$$

式中， $\text{FAW}_{\text{公}}$ 取自从材料规范或其他来源的名义纤维面积重量； $\text{FAW}_{\text{实}}$ 是试验件的实际纤维面积重量， $\text{CPT}_{\text{公}}$ 是相应于归一化纤维体积含量的最终单层厚度， $\text{CPT}_{\text{实}}$ 是试验件的

单层厚度（即试验件厚度除以铺层数）。

如果CPT<sub>归一化</sub>不是计算得到的，并假定在一批材料中其纤维面积重量变化不大，则式8.4.3.2(b)可以转化成一种较简单的形式。因而，可以假定将FAW<sub>实测</sub>近似取为此批的纤维面积重量FAW<sub>批次</sub>：

$$\text{归一化值} = \text{试验值} \times \frac{FV_{\text{归一化}} CPT_{\text{归一化}} \rho_f}{FAW_{\text{批次}}} \quad 8.4.3.2(c)$$

式中， $\rho_f$ 是纤维密度（质量/体积）。

#### 8.4.3.3 归一化理论的实际应用

通常的做法是对由单向带、多向织物和粗纱（即缠绕件）制造的复合材料，将纤维控制的性能（对力学性能为无缺口和有缺口两种情况）进行归一化。虽然已经观察到纤维体积会影响各种由基体控制的性能（如面内和层间剪切、厚度方向拉伸），但对这些影响还没有清晰的模型，因此不对这些性能进行归一化处理。通常在 MIL-HDBK-17 中，对单向层压板所有强度与刚度的力学性能值给出了归一化值，但下列的性能除外：单向层压板的90°（横向）拉伸和压缩、层间（3-或z-方向）拉伸、层间剪切、面内剪切、短梁强度、挤压、挤压/旁路、应变能释放率和泊松比。

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

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

- 如果测量的单层厚度接近归一化厚度，同时纤维面积重量接近名义值，则修正系数将是小值，并可能基本上与这些数量测量时的误差同一量级。
  - 破坏起始的模式有可能随纤维体积含量而变。例如，当纤维体积含量在一个给定范围内增加时，测量的（未归一化）压缩强度可能增大。但在某个点，由于已经超过了基体支持纤维的能力因而出现宏观尺度上的失稳破坏，增加的纤维并不能增加强度。在这个情况下，强度与纤维体积的关系遭到破坏，因而数据分散未必由于归一化而减小。
  - 试验件的缺陷可能引起提前破坏。如果某些试件由于缺陷而破坏，而其他的达到了材料的真实极限值，归一化结果将是不可预计的。
  - 如果离散系数已经是小量（例如小于3%），将不能预期归一化能使其有进一步减少，因为对大多数复合材料性能，所观测到的这个变异水平几乎已是最小的了。
- 归一化以后数据分散没有改变一般不是要关心的问题。但是，如果归一化以后数据分散明显增大，则应研究其原因。

#### 8.4.4 数据文件的要求

此节留待以后补充。

## **第9章 提交MIL-HDBK-17数据用的材料试验和表征**

### **9.1 引言**

此节留待以后补充。

### **9.2 材料和工艺规范要求**

此节留待以后补充。

### **9.3 数据取样的要求**

此节留待以后补充。

### **9.4 试验方法的要求**

这一部分分成三个主要的小节：热、力学、和物理。每个小节都可按试验方法类型进一步细分。最后，在每个小小节中对块状陶瓷基复合材料和每一主要组分（纤维、基体、界面相和界面层），给出试验方法的参考文献和它们的汇总。对每一种试验类型，列出了具体的为国内和国际一致认可的试验方法，并介绍了每种试验方法的试验参数，以便对材料进行取证，包括在MIL-HDBK-17之中。

#### **9.4.1 热**

热力试验方法中包括了与直接影响材料设计使用的热性能直接相关的那些方法，特别突出了热传导率、热扩散率、热膨胀率、比热、热冲击性能和热疲劳。

##### **9.4.1.1 热传导率**

对块状CMC或它们的组分还没有国家标准或国际标准。

###### **9.4.1.1.1 块状 CMC**

对块状CMC的热传导率还没有国家标准或国际标准。

###### **9.4.1.1.2 基体**

对CMC基体的热传导率还没有国家标准或国际标准。

###### **9.4.1.1.3 纤维**

对CMC纤维的热传导率还没有国家标准或国际标准。

###### **9.4.1.1.4 界面相**

对CMC界面相的热传导率还没有国家标准或国际标准。

###### **9.4.1.1.5 界面层**

对CMC界面层的热传导率还没有国家标准或国际标准。

### 9.4.1.2 扩散率

只对块状CMC，发展了关于CMC热扩散率的唯一的国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.2.1 块状CMC

已经由CEN对块状CMC，发展了关于CMC热扩散率的唯一国家或国际标准。有一个综述文献，CEN ENV 1159-2 “Thermal Diffusivity of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（见表9.4.1.2.1）

表9.4.2.1 CEN ENV 1159-2 “连续纤维增强CMC的热传导率”

<b>1. 概要</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强的CMC</li> <li>● 试验方法：环境控制箱</li> <li>● 试验环境：大气环境或惰性气体</li> <li>● 试件数量：最少3个</li> </ul>	<b>5. 计算</b> <p>将试验得到的温度曲线和一组计算得到的温度曲线比较（温度曲线的举例见图2）</p>
<b>2. 试验设备</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 热脉冲源（闪光管或激光脉冲），环境控制箱，瞬态温度变化探测设备（红外线或热电偶）</li> </ul>	<b>6. 试验报告</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构的名称与地址</li> <li>● 试验日期，试验报告的编号</li> <li>● 客户名、地址和签署人</li> <li>● 试验标准的参考文献</li> <li>● 试验材料的描述，纤维的类型，批次和收货日期</li> <li>● 试验件描述：尺寸、制备方法、取向、重量、体积</li> <li>● 所用设备的简要描述</li> <li>● 相关的试验参数</li> <li>● 所用的瞬态温度检测设备</li> <li>● 试验环境条件：真空、惰性气体等</li> <li>● 变化一半时间时的测量值</li> <li>● 温度曲线</li> <li>● 比奥（1比奥=10安培）值和特征时间</li> <li>● 理论计算曲线和残差</li> <li>● 所采用的计算方法</li> <li>● 对所需试件数的各试验结果</li> <li>● 试验数据的平均值和标准差</li> <li>● 对试验和/或试验结果的有关说明</li> </ul>
<b>3. 试验步骤</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 脉冲持续时间：<math>t_d \leq 0.002e^2/\alpha</math>，式中<math>t_d</math>是响应时间（s），<math>e</math>是厚度（m），<math>\alpha</math>是热扩散率（<math>m^2/s</math>）</li> <li>● 依据ISO6906标准，用卡尺测量试件的厚度</li> <li>● 将试验安装到试验装置上</li> <li>● 在脉冲前开始记录，确定基线</li> <li>● 记录温度曲线</li> </ul>	
<b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b> 目前尚未规定。	

#### 9.4.1.2.2 基体

对CMC基体热扩散率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.2.3 纤维

对CMC纤维热扩散率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.2.4 界面相

对CMC界面相热扩散率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.2.1.2.5 界面层

对CMC界面层热扩散率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.3 膨胀

对CMC热膨胀系数的唯一国家标准或国际标准，是针对块状CMC材料建立的标准。

##### 9.4.1.3.1 块状 CMC

对CMC热膨胀系数的唯一国家标准或者国际标准，是由CEN针对块状CMC材料建立的标准。对CEN ENV 1159-1“连续纤维增强的CMC的热膨胀系数”有一个概述（见表9.4.1.3.1）。

##### 9.4.1.3.2 基体

对CMC基体热膨胀率还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.1.3.3 纤维

对CMC纤维热膨胀率还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.1.3.4 界面相

对CMC界面相热膨胀率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.2.1.3.5 界面层

对CMC界面层热膨胀率还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.4 比热

对CMC比热的唯一国家标准或国际标准，是针对块状CMC材料建立的标准。

##### 9.4.1.4.1 块状 CMC

对CMC比热的唯一国家标准或者国际标准，是由CEN针对块状CMC材料建立的标准。对CEN ENV 1159-1“连续纤维增强的CMC的比热”有一个概述（见表9.4.1.3.1）。

##### 9.4.1.4.2 基体

对CMC基体比热还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.1.4.3 纤维

对CMC纤维比热还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.1.4.4 界面相

对CMC界面相比热还没有国家标准或国际标准。

#### 9.2.1.4.5 界面层

对CMC界面层比热还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.5 热冲击

对块状CMC材料（或它的构造）热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.5.1 块状 CMC

对块状CMC材料热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.5.2 基体

对CMC基体热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.5.3 纤维

对CMC纤维热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.5.4 界面相

对CMC界面相热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.2.1.5.5 界面层

对CMC界面层热冲击还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6 热疲劳

对块状CMC材料（或其组分）热疲劳还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6.1 CMC 块状

对块状CMC材料热疲劳还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6.2 基体

对CMC基体热疲劳还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6.3 纤维

对CMC纤维热疲劳还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6.4 界面相

对CMC界面相热疲劳还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.1.6.5 界面层

对CMC界面层热疲劳还没有国家标准或国际标准。

表9.4.1.3.1 CEN ENV 1159-1 “连续纤维增强CMC的热膨胀率”

1. 概要 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强的CMC</li> <li>● 试验方法：线性测量</li> <li>● 试验环境：高温，在大气环境或惰性气体环境下</li> <li>● 试件数量：按试件件</li> </ul>	5. 计算 <p>试件夹具的长度改变，<math>\Delta l</math> (mm)：<math>\Delta l=L_0 \bar{\alpha}_a (T_2-T_1)</math>，式中<math>\bar{\alpha}_a</math>是平均线热膨胀系数(<math>K^{-1}</math>)，<math>L_0</math>是初始长度(mm)，<math>T_2-T_1</math>是温度间隔(K)，<math>L_0</math>是试件初始长度(mm)</p> <p>试件的长度改变，<math>\Delta L</math> (mm)：<math>\Delta L=S_{\Delta L} \tau \Delta l</math>，式中<math>S_{\Delta L}</math>是测量的位移值(mm)</p> <p>热膨胀系数(直接)，<math>\bar{\alpha}</math> (<math>K^{-1}</math>)：<math>\bar{\alpha}=\Delta l/[L_0(T_2-T_1)]</math>，式中<math>\bar{\alpha}</math>是平均热膨胀系数(<math>K^{-1}</math>)，<math>L_0</math>是初始长度(mm)，<math>T_2-T_1</math>是温度间隔(K)</p> <p>热膨胀系数(差分)：</p> $\bar{\alpha}=\frac{S_{\Delta L}-\delta}{L_0(T_2-T_1)}+\bar{\alpha}(R)\frac{L(R)}{L_0}$ <p>校正，<math>L(R)</math>是参照件的初始长度(mm)，<math>\bar{\alpha}(R)</math>是参照件的热膨胀系数</p>
2. 试验设备 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件夹具和顶杆要用同样的热化学稳定的材料制作，应当在化学上是惰性的</li> <li>● 能控制氛围的炉子</li> <li>● 试验支架能让试件和参照件轴向自由移动</li> <li>● 数据采集系统应测量温度和以高于<math>0.1 \mu m</math>的精度测量位移</li> <li>● 应用精密度高于<math>0.005 mm</math>的设备测量试件(按附录A或附录B为<math>\mu m</math>)</li> </ul>	6. 试验报告 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构的名称和地址</li> <li>● 试验日期，试验报告的唯一标识</li> <li>● 客户名、地址和签署人</li> <li>● 试验标准的参考文献</li> <li>● 描述：试验材料，纤维类型，批次，和收货日期</li> <li>● 试件的描述：尺寸、制备方法、取向、重量和体积等</li> <li>● 报告直接试验方法和差分试验方法</li> <li>● 热循环数、夹持周期数、各夹持周期的时间和相邻夹持之间的温差</li> <li>● 加热循环和冷却循环之间的迟滞</li> <li>● 测量之前试件上的热循环迹象</li> <li>● 在所需温度下的平均线热膨胀系数表</li> <li>● 任何明显的试验现象如相变或软化现象</li> <li>● 对试验和/或试验结果的有关说明</li> </ul>
3. 试验步骤 <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件件和参照件必须长度一致</li> <li>● 在室温下测量试件件和参照件的长度，精度应于<math>0.2 mm</math></li> <li>● 检验试验机的标定情况</li> <li>● 如果试验要在惰性气体环境下进行，建立试验环境</li> <li>● 加热速率：<math>1 K/min</math></li> <li>● 在高温状态下测量测量试件件和参照件的长度，精度应于<math>0.2 mm</math></li> <li>● 冷却速率：<math>5 K/min</math></li> </ul>	
4. MII-HDBK-17的试验参数 目前尚未规定。	

表9.4.1.4.1 CEN ENV 1159-3 “连续纤维增强CMC的比热”

<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强的CMC</li> <li>● 试验方法：滴液量热法，差示扫描量热法</li> <li>● 试验环境：空气，温度</li> <li>● 试件数量：至少3个</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p><u>滴液量热法：</u></p> <p>量热计标定系数，<math>K</math>：</p> $K = \frac{\text{消耗的功率}}{\text{量热计的输出信号}}$ <p>式中热变化<math>Q</math>: <math>Q_s = KS</math>, <math>S</math>是量热计输出信号</p> <p>平均比热容, <math>C_p</math>:</p> $\bar{C}_p(T_1, T_2) = \frac{1}{m_1} \cdot \frac{Q_s(T_1 \rightarrow T_2)}{(T_2 - T_1)}$ <p>式中<math>m_1</math>是(试验/参照件或坩埚的)质量(g), <math>Q_s</math>是热变化, <math>T_2</math>是量热计的温度(K), <math>T_1</math>是试件的初始温度(K)</p> <p><u>差分法：</u></p> <p>热量:</p> $Q_E = \int P_E dt = (m_1 \bar{C}_p(T_1, T_2) + C_0)(T_2 - T_1)$ <p>热容量:</p> $Q_B = \int P_B dt = [C_c + C_0](T_2 - T_1)$ <p>式中, <math>P_E</math>, <math>P_B</math>分别是试验坩埚和空坩埚的热功率, <math>m_1</math>是试验件的质量, <math>C_0</math>是量热计的热容量, <math>C_c</math>是坩埚的热容量</p> <p>平均比热容:</p> $\bar{C}_p(T_1, T_2) = \frac{Q_E - Q_B}{m_1(T_2 - T_1)}$ <p><u>连续法：</u></p> <p>热量: <math>P_E = (m_1 C_p + C_c + C_0) \beta</math></p> <p>热容: <math>P_B = (C_c + C_0) \beta</math></p> <p>平均比热容: <math>C_p = \frac{P_E - P_B}{m_1 \beta}</math></p> <p><u>差示扫描量热法：</u></p> <p><math>KS_C = (C_c + C_0) \beta</math></p> <p><math>KS_{C_{ref}} = (m_1 C_{ref} + C_c + C_0) \beta</math></p> <p><math>KS_{C_{sample}} = (m_1 C_{sample} + C_c + C_0) \beta</math></p> <p>平均比热容:</p> $C_{sample} = C_{ref} \frac{m_1 S_{C_{ref}} - S_C}{m_1 S_{C_{sample}} - S_C}$
<p><b>2. 试验设备</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 滴液量热计, 平衡精度0.1mg, 热电偶(按HD 446.1标准), 数据采集系统</li> <li>● 差示扫描量热计, 平衡精度0.1mg, 热电偶(按HD 446.1标准), 数据采集系统</li> </ul>	
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <p><u>滴液量热法:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 标定设备</li> <li>● 在373±5K温度下, 对试件和参照件进行干燥处理</li> <li>● 当不用坩埚时, 称量试件质量, 精度±0.1mg</li> <li>● 当用坩埚时, 称量每个液组合的质量(空坩埚, 坩埚和参照件, 坩埚和试件)</li> <li>● 将试件置于环境控制箱, 等待15分钟使试件达到热平衡</li> <li>● 测量<math>T_1</math>和<math>T_2</math>的温度</li> <li>● 对参照件重复上述步骤</li> </ul> <p><u>差示扫描量热法:</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 基线方法</li> <li>● 称量2个空坩埚</li> <li>● 将2个坩埚置于环境控制箱</li> <li>● 设定量热计的加热速率(在1K/min和20K/min之间), 设定初始温度和最终温度</li> <li>● 加热到初始设定温度, 等稳定后, 记录初始温度</li> <li>● 加热到最终温度</li> <li>● 记录基线最终温度</li> <li>● 冷却到初始温度</li> <li>● 称量试件并放到坩埚里</li> <li>● 在环境控制箱对试件重复确定基线的步骤</li> <li>● 在环境控制箱对参照件重复确定基线的步骤</li> </ul>	
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	
<p><b>6. 试验报告</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构的名称和地址</li> <li>● 试验日期, 试验报告的编号</li> <li>● 客户名、地址和签署人</li> <li>● 试验标准的参考文献</li> <li>● 所用设备的简要描述</li> <li>● 标定程序</li> <li>● 试件描述: 试验材料, 纤维类型, 批次、收货日期、制造方法</li> <li>● 相关的试验参数</li> <li>● 各个试验的结果</li> <li>● 试验数据的平均值和标准差(如果需要的话)</li> <li>● 对试验和/或试验结果的有关说明</li> <li>● 对至少3个试件, 在两个计算温度之间的平均比热容值</li> </ul>	<p><b>K</b>是量热计标定系数, <math>C_0</math>是量热计的热容, <math>C_c</math>是坩埚的热容, <math>C_{sample}</math>是试件的平均比热容, <math>C_{ref}</math>是参照件的平均比热容, <math>m_1</math>是参照件的质量, <math>m_1</math>是试件的质量, <math>S</math>是关于坩埚、试件和参照件的输出信号(mV)</p>

## 9.4.2 力学性能

力学试验方法包括直接影响设计用途的那些力学性能参数试验，特别着重的是平板拉伸、压缩、剪切、弯曲和断裂等。

### 9.4.2.1 拉伸

目前有很多CMC和其组分的拉伸试验方法。这些方法包括单调面内和厚度方向单调强度（室温和高温），循环疲劳（室温和高温）以及蠕变等试验。下面各节包括了为对CMC材料取证，使能包括到MIL-HDBK-17中所需的试验方法详细说明。

#### 9.4.2.1.1 块状CMC

有关块状CMC拉伸试验的试验参数，将在下列试验方法和相应表格中加以详细说明。

##### 9.4.2.1.1.1 单调面内拉伸强度（室温）

面内单调拉伸强度（室温）：ASTM C 1275-95 “Standard Test Method for Monotonic Tensile Strength Testing of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross Sections at Ambient Temperatures”（“实心矩形截面连续纤维增强先进陶瓷材料的室温单调拉伸强度标准试验方法”）（见表9.4.2.1.1.1）。

##### 9.4.2.1.1.2 单调面内拉伸强度（高温）

面内单调拉伸强度(高温条件)：ASTM C 1359-97 “Standard Test Method for Monotonic Tensile Strength Testing of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross Sections at Elevated Temperatures”（“实心矩形截面连续纤维增强先进陶瓷材料的高温单调拉伸强度标准试验方法”）（见表9.4.2.1.1.2）。

##### 9.4.2.1.1.3 厚度方向单调拉伸强度（室温）

厚度方向单调拉伸强度（室温）：目前没有任何标准。

##### 9.4.2.1.1.4 厚度方向单调拉伸强度（高温）

厚度方向单调拉伸强度（高温）：目前没有任何标准。

##### 9.4.2.1.1.5 循环疲劳（室温）

循环疲劳（室温）：ASTM C 1360-97 “Standard Practice for Constant-Amplitude, Axial, Tension-Tension Cyclic Fatigue of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Ambient Temperatures”（“室温下连续纤维增强先进陶瓷的等幅轴向拉伸-拉伸循环疲劳标准试验方法”）（见表9.4.2.1.1.5）。

##### 9.4.2.1.1.6 循环疲劳（高温）

循环疲劳（高温）：目前没有任何标准。

##### 9.4.2.1.1.7 蠕变

蠕变：ASTM C 1337-96“Standard Test Method for Creep and Creep Rupture of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics under Tensile Loading”（“拉伸载荷下连续纤维增强先进陶瓷的蠕变及蠕变断裂的标准试验方法”）（见表9.4.2.1.1.7）。

#### 9.4.2.1.2 基体

对CMC基体拉伸试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.1.3 纤维

在下列试验方法和相应表格中，包含了CMC的纤维拉伸试验所用的具体试验参数。

##### 9.4.2.1.3.1 单调拉伸强度（室温）

单调拉伸强度（室温）：ASTM D 3379-75 “Standard Test Method for Tensile Strength and Young's Modulus for High-Modulus Single-Filament Materials”（“高模量单丝材料拉伸强度和杨氏模量的标准试验方法”）（见表9.4.2.1.3.1）。

##### 9.4.2.1.3.2 单调拉伸强度（高温）

单调拉伸强度（高温）：目前没有任何标准。

#### 9.4.2.1.4 界面相

对CMC界面相拉伸试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.1.5 界面层

对CMC界面层拉伸试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.2 压缩

目前只有少数关于CMC材料及其组分的压缩试验方法。这些方法包括面内单调强度（室温和高温）。最终将包括面内和厚度方向单调强度（室温和高温），循环疲劳（室温和高温）和蠕变试验。下面各节包括了为对CMC材料取证，使能包括到MIL-HDBK-17中所需的试验方法详细说明。

##### 9.4.2.2.1 块状 CMC

下面列出的试验方法和相应表格中，将详细说明块状CMC压缩试验的有关试验参数。

##### 9.4.2.2.2 面内单调压缩强度（室温）

面内单调压缩强度（室温）：ASTM C 1258-97 “Standard Test Method for Monotonic Compressive Strength Testing of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics with Solid Rectangular Cross Sections at Ambient Temperatures”（“实心矩形截面连续纤维增强先进陶瓷材料的室温单调压缩强度标准试验方法”）（见表9.4.2.2.2）。

##### 9.4.2.2.3 基体

对CMC基体压缩试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.2.4 纤维

对CMC纤维压缩试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.2.5 界面相

没有任何关于CMC界面相压缩试验的国家标准或世界标准。

##### 9.4.2.2.6 界面层

对CMC界面层压缩试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.3 剪切

目前有数种CMC材料及其组分的剪切试验方法，这些方法包括面内和层间剪切强度试验（室温和高温）。最终将包括高温面内和层间剪切强度，以及室温和高温下的界面剪切

强度。下面各节包括了为对CMC材料取证，使能包括到MIL-HDBK-17中所需的试验方法详细说明。

#### 9.4.2.3.1 块状 CMC

下面列出的试验方法和相应表格中，将详细说明块状CMC剪切试验的有关试验参数。

##### 9.4.2.3.1.1 面内单调剪切强度（室温）

面内单调剪切强度（室温）：ASTM C 1292-95 “Standard Test Method for Shear Strength of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Ambient Temperatures”（“连续纤维增强先进陶瓷材料的室温剪切强度标准试验方法”）（见表格9.4.2.3.1.1）。

##### 9.4.2.3.1.2 面内单调剪切强度（高温）

面内单调剪切强度（高温）：目前没有任何标准。

##### 9.4.2.3.1.3 层间单调剪切强度（室温）

层间单调剪切强度（室温）：ASTM C 1292-95 “Standard Test Method for Shear Strength of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics at Ambient Temperatures”（“连续纤维增强先进陶瓷材料的室温剪切强度标准试验方法”）（见表9.4.2.3.1.3）。

##### 9.4.2.3.1.4 层间单调剪切强度（高温）

层间单调剪切强度（高温）：目前没有任何标准。

#### 9.4.2.3.2 基体

对CMC基体剪切试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.3.3 纤维

对CMC纤维剪切试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.3.4 界面相

对CMC中间剪切缩试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.3.5 界面层

对CMC界面层剪切试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.4 弯曲

目前有数种CMC材料及其组分的弯曲试验方法。这些方法包括单调弯曲和剪切强度试验（室温和高温）。最终将包括室温和高温条件下的循环疲劳试验和蠕变试验。下面各节包括了为对CMC材料取证，使能包括到MIL-HDBK-17中所需的试验方法详细说明。

#### 9.4.2.4.1 块状 CMC

下面列出的试验方法和相应表格中，将详细说明块状CMC弯曲试验的有关试验参数。

##### 9.4.2.4.1.1 单调弯曲强度（室温条件）

单调弯曲强度（室温条件）：ASTM C 1341-95 “Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics”（“连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的标准试验方法”）（见表格9.4.2.4.1.1）。

#### 9.4.2.4.1.2 单调弯曲强度（高温）

单调弯曲强度（高温）：ASTM C-1341-95 “Standard Test Method for Flexural Properties of Continuous Fiber-Reinforced Advanced Ceramics”（“连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的标准试验方法”）（表9.4.2.4.1.2）。

#### 9.4.2.4.1.3 单调剪切强度（室温）

单调剪切强度（室温）：CEN ENV 658-5 “Shear Strength (3-point) of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（“连续纤维增强CMC的剪切强度（3点）”）（见表9.4.2.4.1.3）。

#### 9.4.2.4.2 基体

对CMC基体的弯曲试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.4.3 纤维

对CMC纤维的弯曲试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.4.4 界面相

对CMC界面相的弯曲试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.4.5 界面层

对CMC界面层的弯曲试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.2.5 断裂

还没有关于CMC或其组分断裂试验的国家或国际标准。最终将包括这些试验方法，包括面内断裂、层间断裂、与时间有关的断裂和裂纹扩展断裂。

##### 9.4.2.5.1 块状 CMC

对CMC块状断裂试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.5.2 基体

对CMC基体断裂试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.5.3 CMC 纤维

对CMC纤维断裂试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.5.4 CMC 界面

对CMC界面断裂试验还没有国家标准或国际标准。

##### 9.4.2.5.5 CMC 界面层

对CMC界面层断裂试验还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3 物理性能

物理性能试验方法中，包括对材料固有的那些非热力或非力学属性进行测试的方法；尤其着重密度、电、弹性常数、体积含量和尺度等。

##### 9.4.3.1 密度

已经对块状CMC和纤维，建立了CMC密度的唯一国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.1.1 块状 CMC

关于块状CMC密度的唯一国家或国际标准是CEN ENV 1389 “Density of Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（“连续纤维增强CMC的密度”）（见表9.4.3.1.1）。

#### 9.4.3.1.2 基体

对CMC基体密度还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.1.3 纤维

已经由CEN制订了CMC纤维密度的唯一国家或国际标准。表9.4.3.1.3中包括了ENV 1007-2 “Linear Mass of Fibers for Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（“连续纤维增强CMC纤维的线质量”）的综述，以及其特定的试验参数。

#### 9.4.3.1.4 界面相

对CMC界面相密度还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.1.5 界面层

对CMC界面层密度还没有国家标准或国际标准。

### 9.4.3.2 电性能

对块状CMC或其组分电性能还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.2.1 块状 CMC

对块状CMC电性能还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.2.2 基体

对CMC基体电性能还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.2.3 纤维

对CMC纤维电性能还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.2.4 界面

对CMC界面电性能还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.2.5 界面层

对CMC界面层电性能还没有国家标准或国际标准。

### 9.4.3.3 弹性常数

对块状CMC或其组分弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.3.1 块状 CMC

对块状CMC弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.3.2 基体

对CMC基体弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### 9.4.3.3.3 纤维

对CMC纤维弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### **9.4.3.3.4 界面相**

对CMC界面相弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### **9.4.3.3.5 界面层**

对CMC界面层弹性常数还没有国家标准或国际标准。

#### **9.4.3.4 体积含量**

已对块状CMC制订了CMC纤维体积含量的唯一国家标准或国际标准，

#### **9.4.3.4.1 块状 CMC**

关于纤维体积含量的唯一的国家标准或国际标准是CMCs CEN ENV 1007-1“Size Level of Fiber for Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（“连续纤维增强CMC的纤维浸润水平”）（见表9.4.3.4.1）。

#### **9.4.3.5 尺寸规格**

已经制订了关于CMCs尺寸规格的唯一国家标准或国际标准。

##### **9.4.3.5.1 基体（粒度）**

对CMCc基体粒度还没有国家标准或国际标准。

##### **9.4.3.5.2 纤维（直径）**

关于CMC纤维直径的唯一国家或国际标准是CEN ENV 1007-3“Filament Diameter of Fiber for Continuous Fiber Reinforced Ceramic Composites”（“连续纤维增强CMC的长丝直径”）（见表9.4.3.5.2）。

#### **9.4.4 化学性能**

此节留待以后补充。

#### **9.4.5 电性性能**

此节留待以后补充。

#### **9.4.6 环境试验**

此节留待以后补充。

表9.4.2.1.1.1 ASTM C 1275-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料的室温剪切强度标准试验方法”

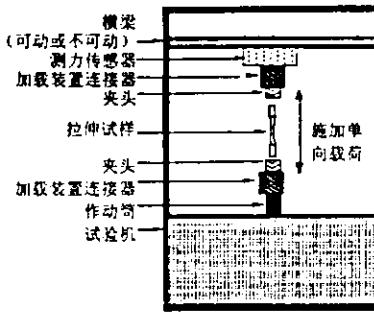
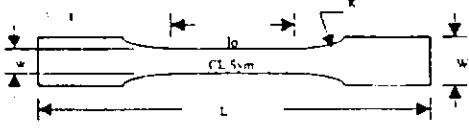
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：面内的单轴拉伸强度</li> <li>● 试验环境：空气，室温</li> <li>● 试件数量：最少3个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>工程应力，<math>\sigma</math> (MPa)：<math>\sigma=P/A</math>，式中<math>P</math>是外加作用力(N)，<math>A</math>是初始横截面面积(<math>\text{mm}^2</math>)，<math>A=w t</math> (<math>\text{mm}^2</math>)</p> <p>工程应变，<math>\varepsilon</math> (m/m)：<math>\varepsilon=(l-l_0)/l_0</math>，式中<math>\varepsilon</math>是工程应变，<math>l</math>是某一时间的工作段长度(mm)，<math>l_0</math>是原始工作段长度(mm)</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM E4试验标准</li> <li>● 引伸计应符合ASTM E83的要求</li> </ul>	<p>拉伸强度，<math>S_u</math> (MPa)：<math>S_u=P_{\max}/A</math>，式中<math>P_{\max}</math>是最大载荷(N)</p>
 <p>图1 拉伸强度试验机示意图</p>	<p>拉伸强度下的应变<math>\varepsilon_u</math> (m/m)：<math>\varepsilon_u</math>=(拉伸强度下的)<math>\varepsilon</math></p> <p>断裂强度，<math>S_t</math> (MPa)：<math>S_t=P_{\max}/A</math>，式中<math>P_{\max}</math>是断裂时的载荷(N)</p> <p>断裂强度下的应变<math>\varepsilon_t</math> (mm)：<math>\varepsilon_t</math>=(断裂强度下的)<math>\varepsilon</math></p> <p>弹性模量，<math>E</math> (MPa)：<math>E=\Delta \sigma / \Delta \varepsilon</math>，式中<math>\Delta \sigma / \Delta \varepsilon</math>是<math>\sigma-\varepsilon</math>曲线的斜率</p> <p>泊松比，<math>\nu</math>：<math>\nu = \Delta \varepsilon_t / \Delta \varepsilon_L</math>，式中<math>\Delta \varepsilon_t / \Delta \varepsilon_L</math>是横向应变-纵向应变曲线线性部分的斜率</p>
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸(见图2)：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度(在不同横截面上测量至少3次)</li> <li>● 试验速率：0.1mm/min或以能在5-10s内使试件破坏的速度进行试验</li> <li>● 试验步骤：记录载荷-位移或应力-应变的结果；测量并记录相对于中点的破坏处位置</li> </ul>	<p>回弹能模量，<math>U_R</math> (MJ/m<sup>3</sup>)：</p> $U_R = \int_0^{\sigma_0} \sigma d\varepsilon = \frac{1}{2} \sigma_0 \varepsilon_0$ <p>韧性模量，<math>U_T</math> (MJ/m<sup>3</sup>)：</p> $U_T = \int_0^{\sigma_0 + S_u} \sigma d\varepsilon = \frac{\sigma_0 + S_u}{2} \sum_{i=1}^n X_i$ <p>平均值：<math>\bar{X} = \frac{\sum_{i=1}^n X_i}{n}</math></p>
 <p>图2 试件几何形状示例</p>	<p>标准差：s.d. = <math>\sqrt{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2) / (n-1)}</math></p>
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数量和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，引伸计，夹具和加载装置</li> <li>● 环境：温度，相对湿度、气氛和试验模式</li> <li>● 以下性能的平均值、标准差和离散系数：拉伸强度，拉伸强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 拉伸强度，拉伸强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，应力-应变曲线图、弹性模量</li> </ul>

表9.4.2.1.1.2 ASTM C 1359-97 “实心矩形截面连续纤维增强先进陶瓷材料的高温单调拉伸强度标准试验法”

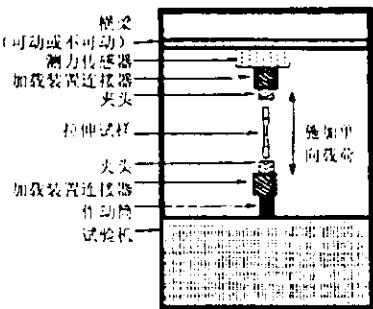
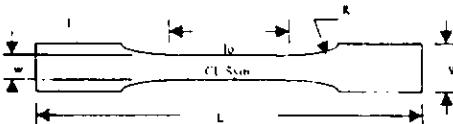
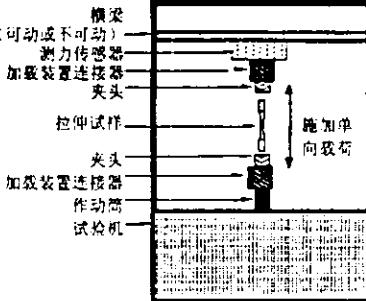
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：面内的单调拉伸强度</li> <li>● 试验环境：空气，高温</li> <li>● 试件数量：最少5个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>工程应力<math>\sigma</math>(MPa)：<math>\sigma=P/A</math>, 式中<math>P</math>是外加作用力(N), <math>A</math>是初始横截面面积(<math>\text{mm}^2</math>)，<math>A=wL</math> (<math>\text{mm}^2</math>)</p> <p>工程应变<math>\epsilon</math> (m/m)：<math>\epsilon=(l-l_0)/l_0</math>, 式中<math>\epsilon</math>是工程应变, <math>l</math>是任何时间的工作段长度 (mm)，<math>l_0</math>是原始工作段长度 (mm)</p> <p>拉伸强度<math>S_u</math> (MPa)：<math>S_u=P_{max}/A</math>, 式中<math>P_{max}</math>是最大载荷 (N)</p> <p>拉伸强度下的应变<math>\epsilon_u</math> (m/m)：<math>\epsilon_u</math>下<math>\epsilon_u</math>=(拉伸强度下的)<math>\epsilon</math></p> <p>断裂强度<math>S_f</math> (MPa)：<math>S_f=P_{break}/A</math>, 式中<math>P_{break}</math>是断裂载荷 (N)</p> <p>断裂强度下的应变<math>\epsilon_f</math> (mm)：<math>\epsilon_f</math>=(断裂强度下的)<math>\epsilon</math></p> <p>弹性模量<math>E</math> (MPa)：<math>E=\Delta\sigma/\Delta\epsilon</math>, 而<math>\Delta\sigma/\Delta\epsilon</math>是<math>\sigma-\epsilon</math>曲线斜率</p> <p>泊松比<math>\nu</math>：<math>\nu=\Delta\epsilon_t/\Delta\epsilon_L</math>, 式中<math>\Delta\epsilon_t/\Delta\epsilon_L</math>是横向-纵向应变曲线上线性部分的斜率</p> <p>回弹能模量：<math>U_R</math> (<math>\text{MJ}/\text{m}^3</math>)：</p> $U_R = \int_0^{\epsilon_u} \sigma d\epsilon = \frac{1}{2} \sigma_u \epsilon_u$ <p>韧性模量：<math>U_T</math> (<math>\text{MJ}/\text{m}^3</math>)：</p> $U_T = \int_0^{\epsilon_f} \sigma d\epsilon = \frac{\sigma_0 + S_u}{2} \sum_{i=1}^n X_i$ <p>平均值：<math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math>,</p> <p>标准差：<math>s.d. = \sqrt{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2)/(n-1)}</math></p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM(美国材料试验协会)Practice E4 试验标准</li> <li>● 引伸计应符合ASTM Practice E83要求</li> </ul>  <p>图1 拉伸试验机示意图</p>	
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验件尺寸(见图2)：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度(至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 试验速率：0.1mm/min或以能使试件在5至10s内破坏的速率进行试验</li> <li>● 温度限制：指示值<math>\leq 1273\pm 3\text{K}</math>；名义值<math>&gt;1273\pm 6\text{K}</math>；工作段部分<math>\leq 773\pm 5\text{K}</math>；<math>&gt;773\pm</math>试验温度的1%</li> <li>● 加温速率与保持：<math>&lt; 50\text{K}/\text{min}</math>, 保持时间<math>\leq 30\text{ min}</math></li> <li>● 试验步骤：记录载荷-位移或应力-应变；测量并记录破坏处位置(相对于中点的位置)</li> </ul>  <p>图2 试验件几何形状示意图</p>	
<p><b>4. MIL-HDBK-17的试验参数</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数量和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，引伸计，夹具和加载装置</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛和试验模式</li> <li>● 以下性能的平均值、标准差和离散系数：拉伸强度，拉伸强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试验件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 拉伸强度，拉伸强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，应力-应变曲线图、弹性模量</li> </ul>

表9.4.2.1.1.5 ASTM C 1360-97 “室温下连续纤维增强先进陶瓷的等幅轴向拉-拉循环疲劳标准试验方法”

<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：循环疲劳</li> <li>● 试验环境：室温，大气环境</li> <li>● 试件数量：参考STP 91-A标准</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>工程应力 <math>\sigma</math> (MPa)：<math>\sigma = P/A</math>，式中 <math>P</math> 是外加作用力 (N)，<math>A</math> 是初始横截面面积 (<math>\text{mm}^2</math>)，<math>A = w t</math> (<math>\text{mm}^2</math>)</p> <p>工程应变 <math>\epsilon</math> (m/m)：<math>\epsilon = (l - l_0)/l_0</math>，式中 <math>\epsilon</math> 是工程应变，<math>l</math> 是任何时间的工作段长度 (mm)，<math>l_0</math> 是原始工作段长度 (mm)</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM(美国材料试验协会)Practice E4 试验标准</li> <li>● 引伸计应符合ASTM Practice E83 试验标准</li> </ul>	<p>最大应力 <math>\sigma_{\max}</math> (MPa)：<math>\sigma_{\max} = P_{\max}/A</math>，式中 <math>P_{\max}</math> 是施加的最大循环载荷 (N)</p> <p>最小应力 <math>\sigma_{\min}</math> (MPa)：<math>\sigma_{\min} = P_{\min}/A</math>，式中 <math>P_{\min}</math> 是施加的最小循环载荷 (N)</p> <p>应力比 <math>R</math>：<math>R = \sigma_{\min}/\sigma_{\max}</math></p> <p>弹性模量 <math>E</math> (MPa)：<math>E = \Delta \sigma/\Delta \epsilon</math>，而 <math>\Delta \sigma/\Delta \epsilon</math> 是 <math>\sigma-\epsilon</math> 曲线斜率</p>
 <p>图1 拉伸试验机示意图</p>	<p>平均值：<math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math></p> <p>标准差：<math>s.d. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}</math></p>
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸（见图2）：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度（至少在3个不同横截面上测量）</li> <li>● 试验速率：正弦波，<math>R=0.1</math>，频率=1-10 Hz</li> <li>● 最大应力：ASTM C 1275确定拉伸强度的百分比</li> <li>● 试验步骤：预加载试件；记录预载荷、循环次数、破坏位置</li> </ul>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测量仪，夹持接触面，加载装置连接器，加热系统，测温系统</li> <li>● 条件：温度，相对湿度，气氛，和试验模式</li> <li>● 以下性能的平均值，标准差，离散系数：应变-寿命，应力-寿命，拉伸强度，拉伸强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 应变-寿命，应力-寿命，<math>R</math>比（最大/最小循环应力），频率，循环数，应力幅，波形</li> </ul>
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	

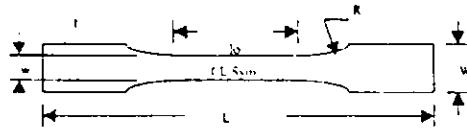


图2 试件几何形状示例

表9.4.2.1.1.7 ASTM C 1337-96 “拉伸载荷下连续纤维增强先进陶瓷的蠕变及蠕变断裂标准试验方法”

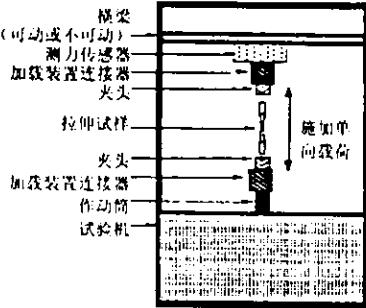
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：蠕变及蠕变断裂</li> <li>● 试验环境：空气，高温</li> <li>● 试件数量：按实际情况确定</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>工程应力<math>\sigma</math>(MPa)：<math>\sigma=P/A</math>, 式中<math>P</math>是外加作用力(N), <math>A</math>是初始横截面面积(<math>\text{mm}^2</math>)，<math>A=w_l</math> (<math>\text{mm}^2</math>)</p> <p>工程应变<math>\varepsilon</math> (m/m)：<math>\varepsilon=(l-l_0)/l_0</math>, 式中<math>\varepsilon</math>是工程应变, <math>l</math>是即时的工作段长度(mm), <math>l_0</math>是原始工作段长度(mm)</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</li> <li>● 引伸计应符合ASTM Practice E83 要求</li> </ul> 	
<p>图1 拉伸试验机示意图</p>	
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验件尺寸：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度(至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 热电偶数目：工作段长度为25-50mm的用2个热电偶；工作段长度大于50mm的用3个热电偶</li> <li>● 温度限制：指示值<math>\leq 1273\pm 3 \text{ K}</math> 名义值<math>&gt; 1273\pm 6 \text{ K}</math> 工作段部分<math>\leq 773\pm 5 \text{ K}</math> <math>&gt;773\pm 5 \text{ K}</math>试验温度的1%</li> <li>● 升温速率：30分钟内从室温升到试验温度</li> <li>● 保持时间：到引伸计的输出信号平稳为止</li> <li>● 预加载荷为试验载荷的10%</li> <li>● 数据采集：小于24小时的0.1%的试验时间</li> <li>● 测量应变</li> <li>● 试验后：工作段内断裂处的截面面积，测量并记录相对于中点处的破坏位置，记录试件失效时间，断裂的模式以及类型。</li> </ul>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试验件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测量仪，夹具界面，加载装置连接器，加热系统，测温系统</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛，和试验模式</li> <li>● 完整的热力学进程：加载/卸载速率，加热/冷却速率，应力和温度水平</li> </ul> <p>单个试验件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试验件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 应力-应变曲线图，和蠕变应变-时间曲线图</li> </ul>
<p><b>4. MIL-HDBK-17的试验参数</b> 目前尚未规定。</p>	

表9.4.2.1.3.1 ASTM D 3379-75 “高模量单丝材料拉伸强度和弹性模量的标准试验方法”

<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC的纤维</li> <li>● 试验方法：拉伸强度</li> <li>● 试验环境：室温，大气环境</li> <li>● 试件数量：最少10个</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>面积 <math>A(\text{m}^2)</math>: <math display="block">A = \frac{\sum a_i \times 10^{-6}}{(N \times M_f)^2}</math>, 而 <math>A</math> 是平均纤维面积(<math>\text{m}^2</math>)。  <math>a_i</math> 是单根纤维面积 (<math>\text{mm}^2</math>)， <math>N</math> 是纤维数， <math>M_f</math> 是显微照片放大倍数</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</li> </ul>	<p>拉伸强度 <math>T(\text{Pa})</math>: <math display="block">T = F/A</math>, 式中 <math>F</math> 是破坏载荷 (N)，  <math>A</math> 是平均纤维面积 (<math>\text{m}^2</math>)</p>
<p>图1 拉伸试验机示意图</p>	<p>指示的柔度 <math>C_s(\text{mm/N})</math>: <math display="block">C_s = l/P \times H/S</math>, 式中 <math>l</math> 是总伸长量，  <math>P</math> 是满量程力 (full scale force) (N)， <math>H</math> 是横梁移动速度  (<math>\text{mm/s}</math>)， <math>S</math> 是刻度记录纸的速率 (<math>\text{mm/s}</math>)</p> <p>真实的柔度 <math>C(\text{mm/N})</math>: <math display="block">C = C_s - C_0</math>, 式中 <math>C_0</math> 是系统的柔度 (<math>\text{mm/N}</math>)</p> <p>弹性模量, <math>E(\text{Pa})</math>: <math display="block">E = l/C</math>, 式中 <math>l</math> 是试件工作段长度 (mm)</p>
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸：从显微照片确定试件组的平均尺寸</li> <li>● 试验机标定：初始标定，试验时每4小时一次</li> <li>● 试验速率：横梁的速度可在1min之内使试件破坏</li> <li>● 试件安装：夹住一端，切掉加湿片，再夹住另一端</li> <li>● 试验：拉断试件，记录失效时的载荷和伸长量</li> </ul>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件的标识：材料类型、来源、制造商名称和代码编号、材料先前的历史</li> <li>● 进取试件的方法、试件数目、安装试件的方法、测量横截面面积的方法</li> <li>● 横截面积、试件工作段长度、系统柔度</li> <li>● 横梁移动速度、图纸移动速率、测力计等</li> <li>● 确定工作段长度的方法、破坏时的载荷</li> <li>● 各个试验的弹性模量、拉伸强度结果、平均值和标准差</li> <li>● 试验环境：温度、相对湿度、气氛</li> <li>● 试验日期</li> </ul>
<p>图2 试件安装示意图</p>	
<p><b>4. MIL-HDBK-17的试验参数</b></p>	<p>目前尚未规定。</p>

表9.4.2.2.2 ASTM C 1258-97 “实心矩形截面连续纤维增强先进陶瓷材料的室温单调压缩强度标准试验方法”

<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强的CMC</li> <li>● 试验方法：面内的单调压缩强度</li> <li>● 试验环境：室温，空气</li> <li>● 试件数量：最少5个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>长径比：<math>\frac{1}{k} = \sqrt{12} \frac{l}{b}</math>，式中l是工作段长度，k是横截面的最小回转半径，b是截面厚度</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4试验标准</li> <li>● 引伸计应符合ASTM Practice E83要求</li> </ul>	<p>临界屈曲应力<math>\sigma_{cr}</math> (MPa)：<math>\sigma_{cr} = \frac{P_{cr}}{wb} = \frac{4\pi^2 EI}{l^2 wb}</math>，式中<math>P_{cr}</math>是临界压缩载荷 (N)，w是试件的宽度，b是试件的厚度，E是纵向弹性模量，I是b向的转动惯量 (<math>wb^3/12</math>)，l是试件的自由 (无支持) 工作段长度</p>
<p>图1 试验机示意图</p>	<p>工程应力<math>\sigma</math> (MPa)：<math>\sigma = P/A</math>，式中P是外加作用力 (N)，A是初始横截面面积 (<math>\text{mm}^2</math>)，<math>A = w l</math> (<math>\text{mm}^2</math>)</p> <p>工程应变<math>\varepsilon</math> (<math>\text{m/m}</math>)：<math>\varepsilon = (l - l_0)/l_0</math>，式中l是任一时间的工作段长度 (mm)，<math>l_0</math>是原始工作段长度 (mm)</p> <p>压缩强度<math>S_u</math> (MPa)：<math>S_u = P_{max}/A</math>，式中<math>P_{max}</math>是破坏载荷 (N)</p> <p>弹性模量E (MPa)：<math>E = \Delta \sigma / \Delta \varepsilon</math>，式中<math>\Delta \sigma / \Delta \varepsilon</math>是<math>\sigma - \varepsilon</math>曲线线性段的斜率</p>
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸 (见图2)：长径比，<math>1/k \leq 30</math>；在工作段范围内测量试件的厚度和宽度 (至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 试验速率：是以在5-10s内达到最终破坏</li> <li>● 试验方法：在单程内由位移或载荷控制加载</li> <li>● 试验：记录应力、应变、断裂位置、温度、相对湿度。检查并确认断裂处在工作段范围内，断裂应力小于临界屈曲应力</li> </ul>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测试仪，夹具界面，加载装置连接器</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛，和试验模式</li> <li>● 下列性能的平均值，标准差，离散系数：压缩强度，压缩强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 压缩强度，压缩强度下的应变，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量，应力-应变曲线图</li> </ul>
<p>图2 试件几何形状示例</p> <p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	

表9.4.2.3.1.1 ASTM C1292-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料的室温面内 (Iosipescu) 剪切强度标准试验方法”

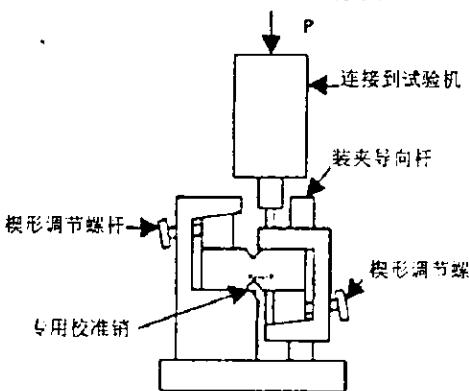
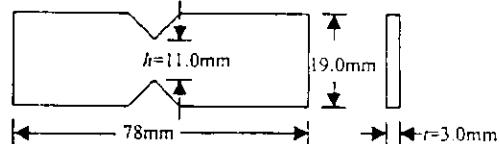
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料: 连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法: 面内剪切强度</li> <li>● 试验环境: 室温, 大气</li> <li>● 试件数量: 最少10个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>面内剪切强度, <math>\tau</math> (MPa): <math>\tau = \frac{P_{\max}}{A}</math>, 式中 <math>A=bt</math> 是受剪切应力处的截面面积 (<math>\text{mm}^2</math>) , <math>b</math> 是缺口间距离 (<math>\text{mm}</math>) , <math>t</math> 是试件的厚度 (<math>\text{mm}</math>)</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</li> </ul> 	<p>平均值: <math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math>,</p> <p>标准差: <math>s.d. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}</math></p>
<p><b>图1 面内剪切试验设备示意图</b></p>	
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸 (见图2): 在工作段范围内测量试件的厚度和宽度 (至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 试验速率: 0.05mm/s, 或者能在10-30s内造成最终破坏的速率</li> <li>● 记录载荷-位移或者应力-应变数据</li> <li>● 测量并记录相对于中点的破坏位置</li> </ul>	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置: 试验机, 应变测试仪, 试验装置</li> <li>● 环境: 温度, 相对湿度, 气氛, 和试验模式</li> <li>● 下列性能的平均值、标准差、离散系数: 剪切强度, 剪切强度下的应变</li> </ul> <p>单个试件:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试件尺寸, 平均横截面面积, 平均表面粗糙度</li> <li>● 剪切强度, 剪切强度下的应变, 应力-应变曲线图</li> </ul>
 <p><b>图2 试件几何形状</b></p>	
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b> 目前尚未规定。</p>	

表9.4.2.3.1.3 ASTM C 1292-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料的室温面内层间（双缺口挤压）剪切强度标准试验方法”

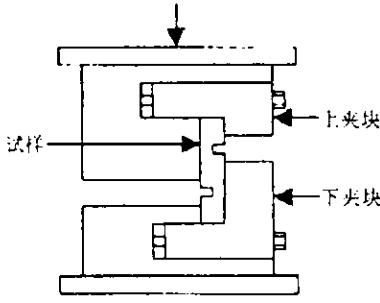
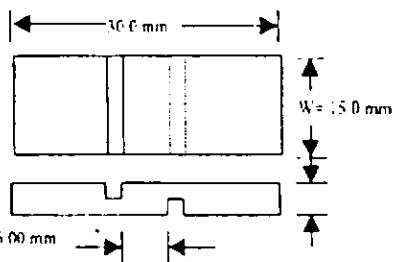
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：层间剪切强度</li> <li>● 试验环境：室温，大气环境</li> <li>● 试件数量：至少10个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>层间剪切强度，<math>\tau</math> (MPa)：<math>\tau = \frac{P_{\max}}{A}</math>，式中<math>A=Wh</math>是受剪切应力处的截面面积(<math>\text{mm}^2</math>)，<math>h</math>是缺口间距离(<math>\text{mm}</math>)，<math>W</math>是试件的平均厚度(<math>\text{mm}</math>)</p>
<p><b>2. 装置</b></p> <p>试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</p> 	<p>平均值：<math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math>，</p> <p>标准差：<math>s.d. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}</math>。</p>
<p><b>3. 试验步骤</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸（见图2）：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度（至少在3个不同横截面上测量）</li> <li>● 试验速率：0.05mm/s，或者能在10-30s内造成最终破坏</li> <li>● 记录载荷-位移或者应力-应变数据</li> <li>● 测量并记录相对于中点处的破坏位置</li> </ul> 	<p><b>6. 试验报告</b></p> <p>试验设备：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测试仪，试验装置，夹具界面</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛，和试验模式</li> <li>● 下列性能的平均值、标准差、离散系数：剪切强度，剪切强度下的应变</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试件尺寸，平均横截面面积，平均表面粗糙度</li> <li>● 剪切强度，剪切强度下的应变，应力-应变曲线图</li> </ul>
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b> 目前尚未规定。</p>	

表9.4.2.4.1.1 ASTM C1341-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的标准试验方法”（室温）

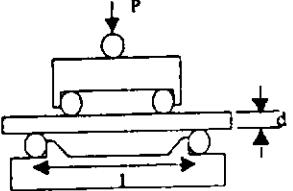
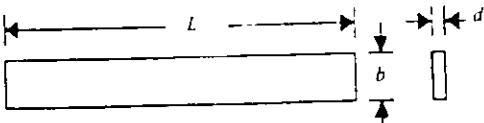
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：面内单调弯曲强度</li> <li>● 试验环境：室温，大气环境</li> <li>● 试件数量：最少10个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算：</b></p> <p><b>3点加载方式</b></p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa) : <math>\sigma = 3PL/2bd^2</math>, 式中, <math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa), <math>P</math>=试验中在给定点的载荷 (N), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处) (mm), <math>b</math>=试件宽度 (平均值或中间点) (mm).</p>
<p><b>2. 仪器:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</li> <li>● 试验夹具：(1)对平行度公差为0.02mm或0.5% (以较大的为准)的试件用半较接的夹具, (2)对不符合这项要求的试件用全较接的夹具。</li> </ul>	<p>弯曲应变 <math>\varepsilon</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon = 6Dd/L^2</math>, 式中, <math>\varepsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m), <math>D</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处).</p>
 <p>图1 弯曲夹具示意图</p>	<p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa) : <math>S_u = 3P_u L/2bd^2</math>, 式中, <math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N).</p>
<p><b>3. 试验步骤:</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸 (见图2) : 在工作段范围内测量试件的厚度和宽度 (至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 横梁速度: 3点和4点-1.4点: <math>D=0.167\varepsilon L^2 d</math></li> <li>● 4点-1/3: <math>D=0.185\varepsilon L^2 d</math></li> <li>● 式中 <math>D</math>=横梁运动速率 (mm/s), <math>\varepsilon</math>=预期的应变速率 (mm/mms) (推荐 <math>1000 \times 10^{-6}</math>), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (mm).</li> <li>● 在试件的端头和前表面做标记</li> <li>● 对试件预加载, 不超过断裂强度的5%</li> <li>● 记录载荷-位移或者应力-应变数据</li> <li>● 测量和报告断裂位置 (相对于中点).</li> <li>● 记录断裂模式</li> <li>● 试验是否有效? 在加载点是否出现压碎或剪切失效? 破坏是否出现在4点加载方式的内跨, 或在3点加载方式加载点的2mm内?</li> </ul>	<p>弯曲强度下的应变 <math>\varepsilon_u</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon_u = 6D_u d/L^2</math>, 式中, <math>D_u</math>=最大载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>断裂强度 <math>S_F</math> (MPa) : <math>S_F = 3P_F L/2bd^2</math>, 式中, <math>P_F</math>=弯曲破坏载荷 (N).</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\varepsilon_F</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon_F = 6D_F d/L^2</math>, 式中, <math>D_F</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa) : <math>E = m L^3 / 4bd^3</math>, 式中, <math>m</math>=载荷-变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm).</p>
 <p>图2 试件示意图</p>	<p><b>4点加载方式, II-A</b></p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa) : <math>\sigma = 3PL/4bd^2</math>, 式中, <math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa), <math>P</math>=试验中给定点的载荷 (N), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处) (mm), <math>b</math>=试件宽度 (平均值或中间点) (mm).</p>
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数:</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	<p>弯曲应变 <math>\varepsilon</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon = 4.36Dd/L^2</math>, 式中, <math>\varepsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m), <math>D</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa) : <math>S_u = 3P_u L/4bd^2</math>, 式中, <math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N).</p> <p>弯曲强度下的应变 <math>\varepsilon_u</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon_u = 4.36D_u d/L^2</math>, 式中, <math>D_u</math>=最大载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>断裂强度 <math>S_F</math> (MPa) : <math>S_F = 3P_F L/4bd^2</math>, 式中, <math>P_F</math>=弯曲破坏载荷 (N).</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\varepsilon_F</math> (mm/mm) : <math>\varepsilon_F = 4.36D_F d/L^2</math>, 式中, <math>D_F</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa) : <math>E = 0.17m L^3 / 4bd^3</math>, 式中, <math>m</math>=载荷-变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm).</p>

表9.4.2.4.1.1 ASTM C 1341-95“连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的标准试验方法”（室温）（续）

<p><b>5. 计算：</b></p> <p><b>4点加载方式，II-B</b></p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa)： <math>\sigma = PL/bd^2</math>，式中，<math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa)，<math>P</math>=试验中给定点的载荷 (N)，<math>L</math>=外支撑跨距 (mm)，<math>d</math>=试验件厚度 (平均值或破断点处) (mm)，<math>b</math>=试验件宽度 (平均值或中间点) (mm)。</p> <p>弯曲应变 <math>\epsilon</math> (m/m)： <math>\epsilon = 4.70Dd/L^2</math>，式中，<math>\epsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m)，<math>D</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm)。</p> <p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa)： <math>S_u = P_u L/bd^2</math>，式中，<math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N)。</p> <p>弯曲强度下的应变 <math>\epsilon_u</math> (mm/mm)： <math>\epsilon_u = 4.70D_u d/L^2</math>，式中，<math>D_u</math>=最大载荷下梁中心的挠度 (mm)。</p> <p>断裂强度 <math>S_f</math> (MPa)： <math>S_f = P_f L/bd^2</math> 式中，<math>P_f</math>=弯曲破坏载荷 (N)。</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\epsilon_f</math> (mm/mm)： <math>\epsilon_f = 4.70D_f d/L^2</math>，式中，<math>D_f</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm)。</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa)： <math>E = 0.21mL^3/4bd^3</math>，式中，<math>m</math>=载荷变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm)</p> <p>平均值： <math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math></p> <p>标准差： <math>s.d. = \sqrt{\frac{\sum (X_i - \bar{X})^2}{(n-1)}}</math></p>	<p><b>6. 报告：</b></p> <p><b>试验装置：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试验件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测试仪，试验装置</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛，和试验模式，加载的几何形式(3点，4点-1/4，4点-1/3)</li> <li>● 下列性能的平均值、标准差、离散系数：弯曲应力，弯曲强度下的应变，弯曲强度，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量，比例极限应力，比例极限应力下的应变。</li> </ul> <p><b>单个试件：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试验件尺寸，平均横截面尺寸，平均表面粗糙度</li> <li>● 失效模式位置</li> <li>● 弯曲应力，弯曲强度下的应变，弯曲强度，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量，比例极限应力，比例极限应力下的应变，应力-应变曲线图</li> </ul>
---	--

表9.4.2.4.1.2 ASTM C 1341-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的标准试验方法”（高温）

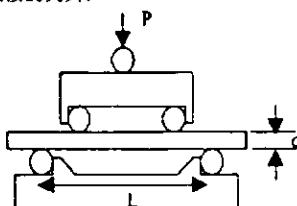
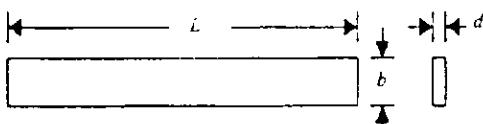
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：面内单调弯曲强度</li> <li>● 试验环境：高温，空气</li> <li>● 试件数量：最少10个有效试验</li> </ul>	<p><b>5. 计算：</b></p> <p><b>3点加载方式</b></p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa) : <math>\sigma = 3P_e L / 2bd^2</math>, 式中, <math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa), <math>P_e</math>=试验中在给定点的载荷 (N), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处) (mm), <math>b</math>=试件宽度 (平均值或中间点) (mm).</p> <p>弯曲应变 <math>\epsilon</math> (mm/mm) : <math>\epsilon = 6D_e d / L^2</math>, 式中, <math>\epsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m), <math>D_e</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处).</p> <p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa) : <math>S_u = 3P_u L / 2bd^2</math>, 式中, <math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N).</p> <p>弯曲强度下的应变 <math>\epsilon_u</math> (mm/mm) : <math>\epsilon_u = 6D_u d / L^2</math>, 式中, <math>D_u</math>=最大载荷下梁中心的挠度 (mm).</p> <p>断裂强度 <math>S_F</math> (MPa) : <math>S_F = 3P_F L / 2bd^2</math>, 式中, <math>P_F</math>=弯曲破坏载荷 (N).</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\epsilon_F</math> (mm/mm) : <math>\epsilon_F = 6D_F d / L^2</math>, 式中, <math>D_F</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa) : <math>E = m L^3 / 4bd^3</math>, 式中, <math>m</math>=载荷-变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm).</p>
<p><b>2. 装置：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应符合ASTM Practice E4 试验标准</li> <li>● 试验夹具：(1)对平行度公差为0.02mm或0.5% (以较大的为准)的试件用半较接的夹具。(2)对不符合这项要求的试件用全较接的夹具.</li> </ul>  <p>图1 弯曲夹具示意图</p>	<p><b>4点加载方式</b>, II-A</p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa) : <math>\sigma = 3PL / 4bd^2</math>, 式中, <math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa), <math>P</math>=试验中给定点的载荷 (N), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (平均值或破断点处) (mm), <math>b</math>=试件宽度 (平均值或中间点) (mm).</p> <p>弯曲应变 <math>\epsilon</math> (mm/mm) : <math>\epsilon = 4.36D_e d / L^2</math>, 式中, <math>\epsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m), <math>D_e</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa) : <math>S_u = 3P_u L / 4bd^2</math>, 式中, <math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N).</p> <p>弯曲强度下的应变 <math>\epsilon_u</math> (mm/mm) : <math>\epsilon_u = 4.36D_u d / L^2</math>, 式中, <math>D_u</math>=最大载荷下梁中心的挠度 (mm).</p> <p>断裂强度 <math>S_F</math> (MPa) : <math>S_F = 3P_F L / 4bd^2</math>, 式中, <math>P_F</math>=弯曲破坏载荷 (N).</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\epsilon_F</math> (mm/mm) : <math>\epsilon_F = 4.36D_F d / L^2</math>, 式中, <math>D_F</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm).</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa) : <math>E = 0.17mL^3 / 4bd^3</math>, 式中, <math>m</math>=载荷-变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm).</p>
<p><b>3. 试验步骤：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸 (见图2)：在工作段范围内测量试件的厚度和宽度 (至少在3个不同横截面上测量)</li> <li>● 横梁速度：3点和4点-1.4点: <math>D=0.167\varepsilon L2/d</math> 4点-1/3: <math>D=0.183\varepsilon L2/d</math></li> <li>● 式中 <math>D</math>=横梁运动速率 (mm/s), <math>\varepsilon</math>=期望的应变速率 (mm/mms) (推荐 <math>1000 \times 10^{-6}</math>), <math>L</math>=外支撑跨距 (mm), <math>d</math>=试件厚度 (mm).</li> <li>● 在试件的端头和前表面做标记</li> <li>● 对试件预加载，不超过断裂强度的5%</li> <li>● 记录载荷-位移或者应力-应变数据</li> <li>● 测量和报告断裂位置 (相对于中点)</li> <li>● 记录断裂模式</li> <li>● 试验是否有效?在加载点是否出现压碎或剪切失效? 破坏是否出现在4点加载方式的内跨，或在3点加载方式加载点的2mm内?</li> </ul>  <p>图2 弯曲试件示意图</p>	<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数：</b></p> <p>目前尚未规定。</p>

表9.4.2.4.1.2 ASTM C 1341-95 “连续纤维增强先进陶瓷材料弯曲性能的  
标准试验方法”（高温环境）（续）

<p><b>5. 计算：</b></p> <p><b>4点加载方式，II-B</b></p> <p>弯曲应力 <math>\sigma</math> (MPa)： <math>\sigma = PL/bd^2</math>，式中，<math>\sigma</math>=给定载荷下外部纤维的最大拉伸应力 (MPa)，<math>P</math>=试验中给定点的载荷 (N)，<math>L</math>=外支撑跨距 (mm)，<math>d</math>=试验件厚度 (平均值或破断点处) (mm)，<math>b</math>=试验件宽度 (平均值或中间点) (mm)。</p> <p>弯曲应变 <math>\varepsilon</math> (m/m)： <math>\varepsilon = 4.70 D d/L^2</math>，式中，<math>\varepsilon</math>=给定载荷下外部纤维的最大应变 (m/m)，<math>D</math>=试验中给定载荷下梁中心处的挠度 (mm)。</p> <p>弯曲强度 <math>S_u</math> (MPa)： <math>S_u = P_u L/bd^2</math>，式中，<math>P_u</math>=最大弯曲载荷 (N)。</p> <p>弯曲强度下的应变 <math>\varepsilon_u</math> (mm/mm)： <math>\varepsilon_u = 4.70 D_u d/L^2</math>，式中，<math>D_u</math>=最大载荷下梁中心的挠度 (mm)。</p> <p>断裂强度 <math>S_f</math> (MPa)： <math>S_f = P_f L/bd^2</math> 式中，<math>P_f</math>=弯曲破坏载荷 (N)。</p> <p>断裂强度下的应变 <math>\varepsilon_f</math> (mm/mm)： <math>\varepsilon_f = 4.70 D_f d/L^2</math>，式中，<math>D_f</math>=断裂载荷下梁中心处的挠度 (mm)。</p> <p>切线弹性模量 <math>E</math> (MPa)： <math>E = 0.21 m L^3 / 4 b d^3</math>，式中，<math>m</math>=载荷变形曲线中起始直线段部分的切线斜率 (N/mm)</p> <p>平均值： <math>\bar{X} = \frac{\sum X_i}{n}</math>，</p> <p>标准差： <math>s.d. = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n ((X_i - \bar{X})^2)}{(n-1)}}</math></p>	<p><b>6. 报告：</b></p> <p>试验装置：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验时间和地点</li> <li>● 试验件数目和几何尺寸</li> <li>● 类型和配置：试验机，应变测试仪，试验装置</li> <li>● 环境：温度，相对湿度，气氛，和试验模式，加载的几何形式(3点，4点-1/4，4点-1/3)</li> <li>● 下列性能的平均值、标准差、离散系数：弯曲应力，弯曲强度下的应变，弯曲强度，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量，比例极限应力，比例极限应力下的应变。</li> </ul> <p>单个试件：</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 所有的试验件尺寸，平均横截面尺寸，平均表面粗糙度</li> <li>● 失效模式/位置</li> <li>● 弯曲应力，弯曲强度下的应变，弯曲强度，断裂强度，断裂强度下的应变，弹性模量，比例极限应力，比例极限应力下的应变，应力-应变曲线图</li> </ul>
---	---

表9.4.2.4.1.3 CEN ENV 658-5“连续纤维增强CMC的剪切强度（3点）”

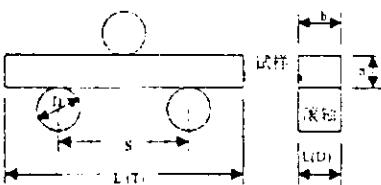
<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：短跨弯曲试验</li> <li>● 试验环境：室温大气环境</li> <li>● 试件数量：至少5个有效试件</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>在12面内的层间剪切强度，ILSS (MPa)：  <math display="block">ILSS = 3F/4bh</math> 式中，<math>F</math>=层间失效力 (N)，<math>b</math>=平均试件宽度 (mm)，<math>h</math>=平均试件厚度 (mm)</p>															
<p><b>2. 仪器</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机应该满足EN10002-2的1级要求，并能记录力。</li> <li>● 精度0.1mm的千分尺并且符合ISO 9611</li> <li>● 试验夹具应该有中心辊和能够向外滚动的外部支撑滚轴。中心辊和支撑滚轴的直径D为3mm，其长度L(D)不能小于试件宽度b。(见表1)</li> <li>● 试件应符合表1中的尺寸规格</li> </ul>																
<p><b>表1 试件规格</b></p> <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse;"> <thead> <tr> <th>测量项目</th> <th>尺寸 (mm)</th> <th>公差 (mm)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>总长, L (T)</td> <td>20-25</td> <td>±1</td> </tr> <tr> <td>厚度, h</td> <td>3</td> <td>±0.1</td> </tr> <tr> <td>宽度, b</td> <td>10</td> <td>±0.1</td> </tr> <tr> <td>加工零件的平行度</td> <td></td> <td>0.05-0.1</td> </tr> </tbody> </table>	测量项目	尺寸 (mm)	公差 (mm)	总长, L (T)	20-25	±1	厚度, h	3	±0.1	宽度, b	10	±0.1	加工零件的平行度		0.05-0.1	
测量项目	尺寸 (mm)	公差 (mm)														
总长, L (T)	20-25	±1														
厚度, h	3	±0.1														
宽度, b	10	±0.1														
加工零件的平行度		0.05-0.1														
<p><b>3. 试验步骤：</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件尺寸：测量试件中心和每一端的宽度和厚度，精确到0.1 mm</li> <li>● 测量支撑距离，精确到0.1 mm</li> <li>● 横梁速度：0.1 mm/mm，或在15 s内完成试验。</li> <li>● 在试验机上安装试件，并设置横梁速度，记录力-时间。</li> <li>● 检验失效位置和失效模式</li> <li>● 试验有效性：下列情况将宣告试验失败           <ul style="list-style-type: none"> <li>不按说明和记录试验条件</li> <li>不纪录失效位置和模式</li> <li>试件破壞没有发生在距中点±h/4的范围内</li> </ul> </li> </ul>  <p>图3 试验夹具示意图</p>	<p><b>6. 报告</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构名称和地址</li> <li>● 试验日期，报告的编号</li> <li>● 用户名称、地址和签署人</li> <li>● 标准的参考文献</li> <li>● 描述试验材料，纤维类型，批次号，接受日期，试件的面积和试件取向</li> <li>● 试验件数和有效试件数</li> <li>● 力-时间记录</li> <li>● 层间剪切强度：单个的结果和平均值</li> <li>● 失效模式和失效位置</li> <li>● 关于试验和或试验结果的说明</li> </ul>															
<p><b>4. MII-HDBK-17的试验参数：</b> 目前尚未规定。</p>																

表9.4.3.1.1 CEN ENV 1389 “连续纤维增强CMC的密度”

<b>1. 概要</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：连续纤维增强CMC</li> <li>● 试验方法：几何法，液体置换法</li> <li>● 试验环境：大气环境，蒸馏水</li> <li>● 试件数量：单个试件</li> </ul>	<b>5. 计算</b> <p>体密度, <math>\rho(\text{g}/\text{cm}^3)</math>: <math>\rho=m/v</math>, 式中 <math>m</math>=质量(g), <math>v</math>=体积(<math>\text{cm}^3</math>)</p> <p>干燥试件质量, <math>m_1(\text{g})</math></p> <p>表观质量, <math>m_2(\text{g})</math>: <math>m_2=m_3-m_4</math>, 式中 <math>m_3</math>=沉没质量(g), <math>m_4</math>=线的质量(g)</p> <p>浸透试件的质量 <math>m_3(\text{g})</math></p> <p>体密度, <math>\rho_0(\text{g}/\text{cm}^3)</math>: <math>\rho_0=m_1/(m_3-m_2)\rho_1</math>, 式中 <math>\rho_1</math>=液体密度 (<math>\text{g}/\text{cm}^3</math>)</p> <p>表观孔隙率, <math>\pi_a(\%)=\pi_a=(m_2-m_1) \times 100 / (m_3-m_2)</math>.</p>
<b>2. 装置</b> <p>采用这两种密度测量方法需要下列设备:</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 方法A: 烘干炉, 天平, 标定测量装置(具有0.01mm精度的卡尺或千分表), 干燥器</li> <li>● 方法B: 烘干炉, 天平, 直径&lt;0.15mm的去污金丝, 抽气设备, 温度计, 玻璃烧杯, 干燥器, 压力计, 吸水布, 蒸馏水</li> </ul>	<b>6. 报告</b> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构名称和地址</li> <li>● 试验报告日期, 标识和编号, 操作者, 签署人</li> <li>● 所用标准和方法的参考文献</li> <li>● 试验材料描述, 制造商, 类型, 批次号</li> <li>● 试件编号</li> <li>● 烧结或机加工试件的形状和表面状态</li> <li>● 对于方法B: 压力, 浸渍液和温度, 浸渍时间</li> <li>● 体密度和表观孔隙率(单个值和平均值)</li> <li>● 关于试验和/或试验结果的说明</li> </ul>
<b>3. 试验步骤</b> <p>方法A, [几何的]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件应大于2 g并且每个方向尺寸都应大于3 mm</li> <li>● 在干燥炉中以283K±5K烘干试件, 直至2小时后两次连续称重的差不超过0.03%</li> <li>● 放置干燥器中, 使其冷却至室温</li> <li>● 在大气环境中测称质量</li> <li>● 每个方向至少测三个点的尺寸, 精确到0.001 mm</li> <li>● 删除在一个方向上与平均值差大于1%的任何试件.</li> </ul> <p>方法B, [液体置换法, 即阿基米德法]</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试件应大于2 g并且每个方向尺寸都应大于3 mm</li> <li>● 在干燥炉中以283K±5K烘干试件, 直至2小时后两次连续称重的差不超过0.03%</li> <li>● 放置干燥器中, 使其冷却至室温</li> <li>● 在大气环境中测称质量</li> <li>● 将冷却干燥的试验片放置在密闭容器中, 抽气使气压降至2 500Pa以下, 保持至少15分钟.</li> <li>● 将试件没入到浸渍液中直至液面下约20 mm.</li> <li>● 当完全浸渍后, 用细线将试件从载体盒吊起, 并称重</li> <li>● 将试件解开, 并在液体中称量线的质量</li> <li>● 测量液体温度</li> <li>● 将试件从液体中取出, 用吸水布擦干</li> <li>● 在空气中测量试件的重量</li> </ul>	
<b>4. MII-HDBK-17的试验参数</b> <p>目前尚未规定。</p>	

表9.4.3.1.3 “连续纤维增强CMC的纤维线质量”

1. 概要	5. 计算 线密度: $T_i = m \times 10^3 / L$ $T_i$ =线密度(g/m), $m$ =试件质量(g), $L$ =试件长度(m)
● 目标材料: 陶瓷纤维, 碳化硅, 氮化硅, 碳氮化硅, 硅酸铝, 氧化铝或砖 ● 试验方法: 线质量试验 ● 试验环境: 室温下大气环境 ● 试件数量: 至少3个试件	
2. 装置	
● 切割装置 ● 天平 ● 塑料手套	
3. 试验步骤 ● 将陶瓷细纱放入切割装置, 切成所规定的测量长度 ● 进行预拉伸(大约 $5\pm2.5$ mN/tex), 并切割到所规定的测量长度 ● 将每个测量部分分成很多小段, 直至达到最小称重质量为0.1 g	6. 报告 ● 试验机构名称和地址 ● 试验日期, 报告的编号 ● 用户名称, 地址和签署人 ● 标准的参考文献 ● 试验材料描述, 纤维类型, 批次号, 接收日期 ● 每个试件片的线密度 ● 关于试验和/或试验结果的说明
4. 试验参数MII-HDBK-17 目前尚未规定。	

表9.4.3.4.1 CEN ENV1007-1 “连续纤维增强CMC的纤维浸润水平”

1. 概要	5. 计算 浸润材料含量: $\tau = [M_2 - (M_1 - M_3)] \times 100 \cdot M_1$ $\tau$ =浸润材料含量, $M_1$ =试件重量(g), $M_2$ =干燥滤纸重量(g), $M_3$ =含溶剂滤纸重量(g)
● 目标材料: 陶瓷纤维, 碳化硅, 氮化硅, 碳氮化硅, 硅酸铝, 氧化铝或砖 ● 试验方法: 质量浸润含量 ● 试验环境: 液态溶剂 ● 试件数量: 至少3个试件	
2. 装置	
天平, 热空气炉, 干燥器, 滤环, 烧结玻璃过滤器, 镊子, 刀片, 反流萃取器, 加热装置, 长颈烧瓶, 有机溶剂	
3. 步骤 ● 在 $378K\pm5K$ 下将滤纸和滤环放置1h进行干燥 ● 称量干燥滤纸和试件 ● 将干燥滤纸和试件放入滤环 ● 将适当的溶剂加入长颈烧瓶 ● 调整溶液的体积以确保有足够的量充满回流系统 ● 将干燥滤纸和试件放入萃取器, 并配上长颈烧瓶 ● 调整反流速率到5次/h并确保能完全萃取浸润材料的小时数 ● 最后一次反流后将滤环和滤纸取出 ● 在高于溶剂沸点 $5K$ 的炉温下, 将滤纸和试件置于热气炉中烘干 ● 使滤纸在干燥器中冷却, 并称重精确到 $0.1mg$	6. 报告 ● 试验机构名称和地址 ● 试验日期, 报告的独特标识 ● 用户名称, 地址和签署 ● 标准的参考文献 ● 描述试验材料, 纤维类型, 批次编号, 接收日期 ● 每个试件片的浸润材料含量 ● 关于试验和/或试验结果的说明
4. MII-HDBK-17的试验参数 目前尚未规定。	

表9.4.3.5.2 CEN ENV 1007-3 “连续纤维增强CMC的长丝直径”

<p><b>1. 概要</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 目标材料：陶瓷纤维单丝</li> <li>● 试验方法： 方法A——纵剖面； 方法B——横断面； 方法C——激光干涉测量</li> <li>● 试验环境： 大气环境空气</li> <li>● 试件数量： 按单丝或纤维而定</li> </ul>	<p><b>5. 计算</b></p> <p>长丝直径，<math>d(\mu\text{m})</math></p> <p>方法A： <math>d = N_R / 2n</math>， 式中， <math>N_R</math>=刻度数， <math>n</math>=标定常数。</p> <p>方法B： <math>d = 2\sqrt{S/\pi}</math>， 式中， <math>S</math>=截面积(<math>\mu\text{m}^2</math>)</p> <p>方法C： <math>d = \lambda D/i</math>， 式中， <math>\lambda</math>=波长(<math>\mu\text{m}</math>)， <math>D</math>=试件和屏幕之间的距离(mm)， <math>i</math>=内部条纹距离(mm)。</p>
<p><b>2. 仪器</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 具有照明设备的显微镜，目镜上具有两条正交线和平行于一个方向的两根线段，放大倍数1000×</li> <li>● 具有照相设备的光学显微镜，求积仪或图像分析仪，树脂</li> <li>● 低功率激光仪，立式支架，投影屏，刻度尺</li> </ul>	
<p><b>3. 步骤</b></p> <p><u>方法A</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 在显微镜承物玻片和盖片间固定一些短的陶瓷纤维</li> <li>● 用光束扫描选定的纤维</li> <li>● 聚焦显微镜的计数线，并转动目镜观察平行于陶瓷纤维的两条线</li> <li>● 聚焦在单丝上，并成功将两条平行线与图像的两边相重合</li> <li>● 读出数字或刻度数</li> </ul> <p><u>方法B</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 选一种能使陶瓷纤维和基体很好粘结的树脂</li> <li>● 调整试件使得纤维垂直于树脂块表面</li> <li>● 灌注纤维样本并在设定温度-时间周期内将其聚合</li> <li>● 放大倍数选在1000×到1500×的范围内</li> <li>● 利用照片或影像分析仪用测面积法测量每根丝的横截面积</li> <li>● 测量每根丝的影象的表面面积</li> </ul> <p><u>方法C</u></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 利用固定片来准备长丝</li> <li>● 在纤维丝头上涂少量的胶，将纤维丝粘接到固定片的狭缝上</li> <li>● 把固定片安放在激光和屏幕之间</li> <li>● 测量试件到屏幕之间的距离(≥500mm)</li> <li>● 用刻度尺测量内部条纹距离(interfringe distance)，到0.5mm</li> </ul>	<p><b>6. 报告</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>● 试验机构名称和地址</li> <li>● 试验日期，报告的编号</li> <li>● 用户名称，地址和签署人</li> <li>● 标准的参考文献</li> <li>● 试验材料描述，纤维类型，批次号，接收日期</li> <li>● 选取的测量方法</li> <li>● 测量的直径类型</li> <li>● 取样的法则或采样计划</li> <li>● 测量的长丝纤维数</li> <li>● 平均的长丝直径与直径范围</li> <li>● 需要时，平均的横截面积与范围</li> <li>● 关于试验和/或试验结果的说明</li> </ul>
<p><b>4. 试验参数MII-HDBK-17</b></p> <p>目前尚未规定。</p>	

## 第10章 增强体评估

### 10.1 引言

此节留待以后补充。

### 10.2 力学性能

此节留待以后补充。

#### 10.2.1 弹性（泊松比，模量）

此节留待以后补充。

#### 10.2.2 强度（FT, RT）

此节留待以后补充。

#### 10.2.3 蠕变/蠕变断裂

此节留待以后补充。

#### 10.2.4 疲劳

此节留待以后补充。

### 10.3 热性能

此节留待以后补充。

#### 10.3.1 热膨胀

此节留待以后补充。

#### 10.3.2 热传导率

此节留待以后补充。

#### 10.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损等）

此节留待以后补充。

#### 10.3.4 氧化

此节留待以后补充。.

# 第11章 基体材料评估

## 11.1 引言

此节留待以后补充。

## 11.2 力学性能

此节留待以后补充。

### 11.2.1 弹性（泊松比，模量）

此节留待以后补充。

### 11.2.2 强度（FT, RT）

此节留待以后补充。

### 11.2.3 蠕变/蠕变断裂

此节留待以后补充。

### 11.2.4 疲劳

此节留待以后补充。

## 11.3 热性能

此节留待以后补充。

### 11.3.1 热膨胀

此节留待以后补充。

### 11.3.2 热传导率

此节留待以后补充。

### 11.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损等）

此节留待以后补充。

### 11.3.4 氧化

此节留待以后补充。

### 11.3.5 其他物理性能（粉末或预成形件性能）

此节留待以后补充。

## 第12章 界面材料评估

此章留待以后补充。

## 第13章 复合材料评估

### 13.1 引言

此节留待以后补充。

### 13.2 力学性能

#### 13.2.1 弹性（泊松比，模量）

此节留待以后补充。

#### 13.2.2 强度（HT, RT）（ILT/ILS）

此节留待以后补充。

#### 13.2.3 蠕变/蠕变断裂

此节留待以后补充。

#### 13.2.4 疲劳

此节留待以后补充。

#### 13.2.5 开孔拉伸 / 压缩强度（缺口敏感性）

此节留待以后补充。

#### 13.2.6 界面的剪切性能

此节留待以后补充。

### 13.3 环境性能

此节留待以后补充。

#### 13.3.1 热膨胀

此节留待以后补充。

#### 13.3.2 热传导率

此节留待以后补充。

#### 13.3.3 环境（腐蚀、侵蚀、磨损、盐雾等）

此节留待以后补充。

### **13.3.4 环境影响（氧化、腐蚀等）**

此节留待以后补充。

### **13.3.5 氧化**

此节留待以后补充。

## **13.4 界面反应（脱胶、扩散等）（7.9）**

此节留待以后补充。

## **13.5 热冲击阻抗**

此节留待以后补充。

## **13.6 电性能**

此节留待以后补充。

## **13.7 绝缘性能**

此节留待以后补充。

## **13.8 冲击阻抗**

此节留待以后补充。

## **13.9 静态和动态疲劳**

此节留待以后补充。

## **13.10 比例极限**

此节留待以后补充。

## **13.11 层间剪切性能**

此节留待以后补充。

## **13.12 断裂应变**

此节留待以后补充。

## **13.13 应力-应变曲线**

此节留待以后补充。

## 第14章 组合件试验——问题综述

### 14.1 引言

此节留待以后补充。

### 14.2 连接试验

此节留待以后补充。

#### 14.2.1 定义

此节留待以后补充。

#### 14.2.2 失效模式

此节留待以后补充。

#### 14.2.3 热影响

此节留待以后补充。

#### 14.2.4 连接构型

此节留待以后补充。

#### 14.2.5 设计要求

此节留待以后补充。

#### 14.2.6 材料挤压强度

此节留待以后补充。

#### 14.2.7 开孔拉伸/压缩强度

此节留待以后补充。

#### 14.2.8 热-机械疲劳强度

此节留待以后补充。

#### 14.2.9 蠕变和应力断裂

此节留待以后补充。

#### 14.2.10 紧固件取证试验

此节留待以后补充。

### 14.3 管

此节留待以后补充。

## 第15章 机械加工和研磨

### 15.1 引言

此节留待以后补充。

### 15.2 机械加工考虑事项

此节留待以后补充。

### 15.3 模具要求

此节留待以后补充。

### 15.4 试验件准备

此节留待以后补充。

## PART D 数据要求及数据集

### 第16章 数据提交、格式和要求

#### 16.1 引言

此节留待以后补充。

#### 16.2 目的

这部分的目的是提出CMC谱系、组成、结构和工艺所需的最低限度信息要素，以支持CMC数据库的初始开发，即作为支持性能特性数据库的元素。

#### 16.3 格式和单位

这个格式是试验、发展性的，因而并不意味着是对CMC的全面、充分描述。相反，这是建立CMC数据库计划的初步开发努力中，所采用的一个实施工具。这个列表中的具体项目是由对原始描述符列表的500个数据元素进行筛选，区分优先次序和缩减后建立的。

数据库的基本元素可组成6类：

- 复合材料描述符
- 基体描述符
- 增强体描述符
- 界面相描述符
- 织构描述符
- 工艺描述符
- 外部界面层描述符

每类所需要的信息项目可以分成3组：试件识别（名称，来源，数据等），关键技术数据（组成，结构，密度，织构等）和分级数据。分级数据是建立格式描述符时的关键元素。

#### 16.4 设计性能

此节留待以后补充。

# 连续纤维陶瓷复合材料数据提交表

## 支持MIL-HCBK-17 CMIC数据的提交要求

March 01版 (STG-Gateway)

这个通过EXCEL发布的表格，用于提交连续纤维增强CMC的力学性能数据，供MIL-HCBK-17收集。

个人和组织向MIL-HDBK-17提交CMC力学性能数据时，应该尽可能完整提供表格的内容。然而，

专利数据并不是必需的，在一些情况下，由于材料或者试验的限制，对数据的要求并不适用。

关于数据的提交，见手册数据提交网页，

<http://www.mil17.org/submit.htm>

发布的表分为八页

[提供的热链接](#)

[引言页面](#)

[提交信息页面 - 强制性数据](#)

[复合材料描述页面 - 强制性数据](#)

[拉伸数据页面](#)

[剪切数据页面](#)

[中间层剪切数据页面](#)

[面内剪切数据页面](#)

复合材料描述页面分成七个部分

A. 复合材料描述符

B. 基体描述符

C. 增强体描述符

D. 界面相描述符

E. 织构描述符

F. 工艺描述符

G. 外部界面层描述符

如果有技术问题，联系方法见

<http://www.mil17.org/coordination.htm>

## MIL手册数据提交表

第1页

[转到概要页](#)

这部分用于提交数据提供三组信息——来源信息、材料数据，以及试验数据类型/质量。

### A. 来源信息

提供的热链接

### B. 材料数据

### C. 试验数据类型和质量

用所有可用的非专利数据，填充三组数据域。

#### A 组——来源信息

ID #1-	ID名称	格式	数据域
A - 1	提交日期	日期	
A - 2	来源机构	文字和数字	
A - 3	来源地址(城市/州)	文字和数字	
A - 4	联系人姓名	文字和数字	
A - 5	联系电话	文字和数字	
A - 6	联系E-Mail	文字和数字	

#### 关键问题：

提交的试验或材料数据是否有出口管制限制？

是,否,不详—>

[回到表格顶部](#)

#### B 组——材料数据

ID #1-	ID名称	格式	数据域
B - 1	材料分类	文字和数字	陶瓷基复合材料
B - 2	商业名称/牌号	文字和数字	
B - 3	厂商的复合材料说明	文字和数字	
B - 4	厂商及位置	文字和数字	
B - 5	厂商批次(Lot) ID号	文字和数字	
B - 6	生产日期	文字和数字	
B - 7	增强体成分种类 (选一种)	氧化铝, 硼, 碳/石墨, 金/碳化物, 金/硅化物, 贝来石, 氧化物陶瓷 石英, 多壁碳, 碳化钻, 氮化钻, 硅氧化碳/氮化物, 及其他指定的	
B - 8	增强体结构种类 (选一种)	连续纤维, 非连续, 定向纤维, 非连续短纤维, 研磨纤维, 颗粒, 薄片, 浆化纤维, 球状, 针状纤维, 品须, 及其他指定的	
B - 9	基体成分种类 (选一种)	氧化铝, 硼酸铝, 碳/石墨, 贝来石, 硅化钻, 氮化硅, 硅氧化 砖, 硼基化砖, 氧化钻, 氧化硅, 及其他指定的	
B - 10	纤维界面相/界面层 成分种类 (选一种)	无, 氢化硼, 碳/石墨, 碳化钻, 金/碳化物, 金/硅化物, 金 属硅化物, 氧化物陶瓷, 多层的, 难熔金属, 及其他指定的	
B - 11	织构种类 (选一种)	颗粒, 品须, 1-D纤维, 2-D纤维, 3-D纤维, 及其他指定的	
B - 12	对称性说明 (选一种)	面内准各向同性, 各向同性, 横向各向同性, 正交各向异性, 三轴-双轴, 不适用, 及其他指定的	
B - 13	复合材料/基体生产方 法种类 (选一种)	化学汽相渗透, 直接金属氧化, 热压, 预购瓷聚合物, 烧结, 溶胶-凝胶, 涂敷-渗透, 及其他指定的	

B - 14	外界面层成分种类 (选一种)	无, 碳化硅, 玻璃, 氧化物, 碳化物, 氮化物, 硅化物, 层状 成分, 粉末, 难熔金属, 及其他指定的	
B - 15	开发/生产状态 (选一种)	商业应用(CA), 有限应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	
B - 16	密度 (g/cc)	浮点(3位有效数字)	
B - 17	孔隙率/孔隙含量 (%)	浮点(3位有效数字)	
B - 18	增湿体体积含量 (%)	浮点(3位有效数字)	
B - 19	其他注释	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

#### C组——试验数据类型和质量

ID #1-	提交的数据	格式	数据域
<b>拉伸试验</b>			
C - 1	提交的数据	是 - 否	
C - 2	试验温度	数字 - °C	
C - 3	数据质量	A类(>20数据点), B类(6-20数据点), C类(<6数据点), 每个试 件组.	
<b>弯曲试验</b>			
C - 4	提交的数据	是 - 否	
C - 5	试验温度	数字 - °C	
C - 6	数据质量	A类(>20数据点), B类(6-20数据点), C类(<6数据点), 每个试 件组.	
<b>压缩试验</b>			
C - 7	提交的数据	是 - 否	
C - 8	试验温度	数字 - °C	
C - 9	数据质量	A类(>20数据点), B类(6-20数据点), C类(<6数据点), 每个试 件组.	
<b>层间剪切试验</b>			
C - 10	提交的数据	是 - 否	
C - 11	试验温度	数字 - °C	
C - 12	数据质量	A类(>20数据点), B类(6-20数据点), C类(<6数据点), 每个试 件组.	
<b>面内剪切试验</b>			
C - 13	提交的数据	是 - 否	
C - 14	试验温度	数字 - °C	
C - 15	数据质量	A类(>20数据点), B类(6-20数据点), C类(<6数据点), 每个试 件组.	

[回到表格顶部](#)

**复合材料说明**[转到介绍页面](#)

这部分提供复合材料的基本说明，分成七个数据组。

<u>A. 复合材料描述符</u>	<u>E. 结构描述符</u>	提供的热链接
<u>B. 基体描述符</u>	<u>F. 工艺描述符</u>	
<u>C. 增强体描述符</u>	<u>G. 外部界面层描述符</u>	
<u>D. 界面相描述符</u>		

用所有可用的非专利数据填充这七组数据域。

**A组——复合材料描述符**

ID #-	ID名称	格式	数据域
A - 1	材料种类	文字和数字	陶瓷基复合材料
A - 2	商业名称/牌号	文字和数字	
A - 3	厂商提供的复合材料说明	文字和数字	
A - 4	厂商及地址	文字和数字	
A - 5	厂商批次(Lot)-ID号	文字和数字	
A - 6	生产日期	文字和数字	
A - 7	增强体成分种类 (选一种)	氧化铝、硼、碳石墨、金红石氧化物、二氧化硅、二氧化氮 石英、氧化钇、碳化硅、氮化硅、碳化铪、碳化铪镁铝氧化物、及其他指定的	
A - 8	增强体结构种类 (选一种)	连续纤维、非连续长纤维、半连续短纤维、断续纤维、颗粒、 片晶、浆化纤维、球状、针状纤维、晶须、及其他指定的	
A - 9	基体成分种类 (选一种)	氧化铝、硅酸铝、碳石墨、莫来石、氧化硅、氧化硅、碳 氧化硅、模基化硅、氧化钠、氧化钇、及其他指定的	
A - 10	纤维界面相界面层 成分种类(选一种)	无、氧化硼、碳石墨、碳化硅、金红石氧化物、金红石氧化物、 金红石氧化物、氧化物陶瓷、多层的、单层金属及其他指定的	
A - 11	结构种类(选一种)	颗粒、晶须、1-D纤维、2-D纤维、3-D纤维、及其他指定的	
A - 12	对称性说明(选一种)	面内各向同性、各向同性、横向各向同性、正交各向异性、 三轴双轴、不可用、及其他指定的	
A - 13	复合材料基体生产方法 种类(选一种)	化学气相渗透、直接金属化、热压、预陶瓷聚合物、烧结、 溶胶-凝胶、扩散渗透、及其他指定的	
A - 14	外界面层成分种类 (选一种)	无、碳化硅、玻璃、氧化物、碳化物、氧化物、硅化物、层 状成分、搪瓷、难熔金属、及其他指定的	
A - 15	开发/生产状态 (选一种)	商业应用(CA)、有限应用(LA)、原型(P)、实验开发(XD)	
A - 16	密度(g/cc)	浮点(3位有效数字)	g/cc
A - 17	孔隙率/空隙含量(%)	浮点(3位有效数字)	%
A - 18	增强体体积含量(%)	浮点(3位有效数字)	%
A - 19	使用/公开历史记录	文字和数字	
A - 20	报告/发表来源	文字和数字	
A - 21	报告/发表参考文献	文字和数字	
A - 22	报告/发表日期	文字和数字	

[回到表格列表](#)

**B组——基体描述符**

<u>ID #2-</u>	<u>ID名</u>	<u>格式</u>	<u>数据域</u>
B - 1	普通/商业名称	文字和数字	
B - 2	附加名称信息	文字和数字	
B - 3	厂商及地址	文字和数字	
B - 4	厂商批次(Lot) ID号	文字和数字	
B - 5	生产日期	文字和数字	
B - 6	主要组分及含量	文字和数字	
B - 7	主要相及含量	文字和数字	
B - 8	开发/生产状态 (选一种)	商业应用(CA), 有限应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	
B - 9	其他注释	文字和数字	

**C组——增强体描述符**

<u>ID #2-</u>	<u>ID名</u>	<u>格式</u>	<u>数据域</u>
C - 1	普通/商业名称	文字和数字	
C - 2	附加名称信息	文字和数字	
C - 3	厂商及地址	文字和数字	
C - 4	厂商批次(Lot) ID号	文字和数字	
C - 5	生产日期	文字和数字	
C - 6	纤维直径 粒子尺寸(μm)	浮点(2位有效数字)	μm
C - 7	主要化学成分及含量	文字和数字	
C - 8	主要相及含量	文字和数字	
C - 9	填充剂 颗粒—— 生产方法 (选一种)	填充剂 颗粒—— Mine, Mill, & Size, 固相反应物, 液相反应物, 气相反应物, 及其他制定的	
C - 10	纤维——生产方法 (选一种)	化学气相沉积(CVD), 热纺, 溶胶-凝胶纺及热处理, 无机聚合物纺及热处理, 颗粒固结及烧结, 及其他指定的	
C - 11	声称纤维拉伸强度		MPa
C - 12	开发/生产状态(选一种)	商业应用(CA), 有限应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	

[回到表格目录](#)

**D组——界面相/界面层描述符**

<u>ID #2-</u>	<u>ID名</u>	<u>ID#及格式</u>	<u>数据域</u>
D-1	普通/商业名称	文字和数字	
D-2	附加名称信息	文字和数字	
D-3	厂商及位置	文字和数字	
D-4	厂商批次(Lot) ID号	文字和数字	
D-5	生产日期	文字和数字	
D-6	总界面层厚度(μm)	浮点(3位有效数字)	μm
D-7	主要成分及含量	文字和数字	
D-8	主要相及含量	文字和数字	
D-9	界面相/界面层结构 (选一种)	单层, 多层, 多孔的, 微裂纹, 多相, 易挥发及其他指定的	
D-10	界面相/界面层生产方法 (选一种)	化学气相沉积, 原位反应, 气相反应, 液体界面层, 粒子界面层, 及其他指定的	
D-11	开发/生产状态 (选一种)	商业应用(CA), 有限应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	
D-12			

[回到表格目录](#)

### E组——织构描述符

ID#2-	ID名	格式	数据域
E - 1	普通商业名称	文字和数字	
E - 2	附加名称信息	文字和数字	
E - 3	厂商及地址	文字和数字	
E - 4	厂商批次(Lot)ID号	文字和数字	
E - 5	生产日期	文字和数字	
E - 6	组织种类 (选一种)	颗粒, 品须, 1-D带, 1-D缠绕, 2-D机织, 3-D机织, 2-D编织, 3-D编织, 及其他指定的	
E - 7	对称性说明 (选一种)	面内准各向同性, 各向同性, 横向各向同性, 正交各向异性, 三轴-双轴, 不可用, 及其他指定的	
E - 8	层数(如果适用)	整数	
E - 9	每层厚度(mm)	浮点(3位有效数字)	mm
E - 10	铺层序列编码 (如果适用)	文字和数字	
E - 11	丝束/纱束/粗纱/纱线说明	文字和数字	
E - 12	主方向(1, 2, 3)的线支 数(w/in)	整数	#/in
E - 13	机织说明(选一种)	平纹, 缎纹, 5-经缎纹, 8-经缎纹, 12-经缎纹, 其他指定	
E - 14	复合材料制造中的工作方 式(选一种)	干态纱束, 涂渍纱束, 非机织垫, 干态织物, 预浸料——带 或织物, 预成型件, 及其他指定的	
E - 15	其他注释	文字和数字	
E - 16	开发/生产状态(选一 种)	商业应用(CA), 有翼应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	

[回到表格顶部](#)

### F组——工艺/制造描述符

ID#2-	ID名	ID及格式	数据域
F-1	普通商业名称	文字和数字	
F-2	附加名称信息	文字和数字	
F-3	厂商及地址	文字和数字	
F-4	厂商批次(Lot)ID号	文字和数字	
F-5	复合材料基体制造方法 和类(选一种)	化学气相渗透, 直接金属化, 热压, 预均混聚合物, 烧结, 溶液-凝胶, 热塑渗透, 及其他指定的	
F-6	形成/成形方法(选一种)	预成形件成形, 冷/热模压, 层压, 树脂传递模塑, 注射模 型, 真空袋成形, 粉浆浇铸, 及其他指定的	
F-7	开发/生产状态(选一 种)	商业应用(CA), 有翼应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	
F-8	预浸料名称(如果适 用)	文字和数字	
F-9	预浸料来源及位置 (如果适用)	文字和数字	
F-10	预浸料批ID号(如果适 用)	文字和数字	
F-11	预浸料开发/生产状态 (选一种)	商业应用(CA), 有翼应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	
F-12	最终机加状态	文字和数字	
F-13	最高生产温度	整数	°C
F-14	其他注释	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

## G组——外界面层描述符(如果适用)

ID#2-	ID名	格式	数据域
G-1	普通/商业名称	文字和数字	
G-2	附加名称信息	文字和数字	
G-3	厂商及地址	文字和数字	
G-4	厂商批次(Lot)ID号	文字和数字	
G-5	外部界面层成分种类 (选一种)	无, 硅化硅, 玻璃, 氧化物, 碳化物, 氮化物, 硅化物, 层状成分, 粉瓷、难熔金属, 及其他指定的	
G-6	生产日期	文字和数字	
G-7	总界面层厚度 (mm)	浮点(3位有效数字)	mm
G-8	主要成分及含量	文字和数字	
G-9	主要相及含量	文字和数字	
G-10	层数	整数	
G-11	外界面层制造方法 (选一种)	化学气相沉积, 原位反应, 液态界面层, 粒子界面层, 扩散 渗碳处理及其他指定的	
G-12	外界面层结构 (选一种)	单层, 多层, 多孔, 多相, 及其他指定的	
G-13	其他注释	文字和数字	
G-14	开发/生产状态(选一种)	商业应用(CA), 有限应用(LA), 原型(P), 实验开发(XD)	

[回到表格顶部](#)

拉伸数据[转到简介页](#)

这部分是在提交拉伸数据时有关试验来源、试验方法、试验件和试验结果的数据格式，数据格式服从ASTM C1278。

试验数据分为六组 --

- A. 来源说明 提供的热链接
- B. 试验设备和步骤
- C. 试件说明
- D. 试验结果汇总
- E. 单个试验结果
- F. 应力应变数据曲线

用所有可用的非专利数据，填充六组数据域。

**A组——来源说明**

ID #3-	ID名	格式	数据域
A - 1	试验日期	日期	
A - 2	试验机构	文字和数字	
A - 3	试验地点(城市/州)	文字和数字	
A - 4	联系人姓名	文字和数字	
A - 5	联系电话	文字和数字	
A - 6	联系E-Mail	文字和数字	
A - 7	报告出版参考文献	文字和数字	
A - 8	报告出版日期	文字和数字	
A - 9	机构运作ID	文字和数字	

[回到表格顶部](#)**B组——拉伸试验设备和步骤描述符**

ID #3-	ID名	格式	数据域
B - 1	拉伸试验标准规范	文字和数字	
B - 2	试验机说明 识别	文字和数字	
B - 3	试验控制方法 (选一种)	载荷、位移、应变	
B - 4	试验速率(mm/min., N/min., %/min.)	文字和数字	
B - 5	夹持方法 (选一种)	表面加载, 端部加载, 铸加载	
B - 6	夹具厂商/型号	文字和数字	
B - 7	夹持压力 (Pa, psi)	浮点(3位有效数字)	Pa
B - 8	载荷耦合器厂商/型号	文字和数字	
B - 9	耦合器类型 (选一种)	刚性, 自矫正	
B - 10	应变测量系统厂商/型号	文字和数字	
B - 11	应变测量方法 (选一种)	夹式引伸计, 应变计, 电容法, 激光标记法, 激光干涉测量法	
B - 12	引伸计工作段长度(mm) (如果适用)	浮点(3位有效数字)	mm
B - 13	环境 (选一种)	空气, 惰性气体, 氧化及其他指定的	
B - 14	试验温度 (°C)	浮点(3位有效数字)	°C

B-15	湿度 (RH%)	浮点(2位有效数字)		RH%
B-16	到达温度的时间 (分钟)	浮点(2位有效数字)		分钟
B-17	温度下湿润时间 (分钟)	浮点(2位有效数字)		分钟
B-18	对准-试验前弯曲%	浮点(2位有效数字)		
B-19	对准-试验后弯曲%	浮点(2位有效数字)		

[回到表格顶部](#)

#### C组——拉伸试件描述符 (基准数据见材料页)

ID# 3-	ID名称	格式	数据区	
C-1	制造厂商序列号	文字和数字		
C-2	试样几何形状 (选一种)	狗骨形, 直边		
C-3	工作段宽度(mm)	浮点(4位有效数字)		mm
C-4	厚度(mm)	浮点(4位有效数字)		mm
C-5	试件工作段长度(mm)	浮点(4位有效数字)		mm
C-6	应力方向 (选一种)	文字和数字 (11.22.33) 或与主纤维轴的夹角		
C-7	试件的准备与机加	文字和数字		
C-8	预调节处理 喷漆	文字和数字		
C-9	其他说明	文字和数字		

[回到表格顶部](#)

#### D组——拉伸试验数据汇总

ID# 3-	ID 名称	格式	平均值	标准差	数量	最大值	最小值
D-1	试验温度 (°C)	浮点(3位有效数字)					
D-2	拉伸强度 (MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-3	拉伸强度下的应变 (%)	浮点(3位有效数字)					
D-4	断裂应力 (MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-5	断裂应变 (%)	浮点(3位有效数字)					
D-6	弹性模量(GPa)	浮点(4位有效数字)					
D-7	泊松比, $\nu_{12}$ (平面内横向 应变与纵向应变之比)	浮点(3位有效数字)					
D-8	泊松比 $\nu_{31}$ (厚度方向横 向应变和纵向应变之比)	浮点(3位有效数字)					
D-9	应力比例极限 $\sigma_0$ (MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-10	确定比例极限方法 (选一种)	偏离屈服 [OY] 或加载后 延展 [EL], 其他的规定					
D-11	比例极限应变 (偏移应变 或应变延长量) (%)	浮点(4位有效数字)					
D-12	韧性模量 (Msi)	浮点(4位有效数字)					
D-13	回弹模量 (Msi)	浮点(4位有效数字)					

[回到表格顶部](#)

E组——单个试件拉伸试验数据

试件 #												
试验温度(°C)												
拉伸强度(MPa)												
拉伸强度下的应变 (%)												
断裂应力 (MPa)												
断裂应变 (%)												
弹性模量(GPa)												
泊松比 $\nu_{12}$ (面内横向应变与 纵向应变之比)												
泊松比 $\nu_{13}$ (厚度方向横向 应变和纵向应变之比)												
应力比例极限 $\sigma_0$ (MPa)												
NA												
比例极限变量 (偏移应变或 应变延长量) (%)												
韧性模量 (Ms)												
回弹模量 (Ms)												
断裂形式 (选一种)												
工作段、圆弧段、夹持处、热 梯度处												
断裂位置 (mm)												
离试件工作段底部的距离												

F 组——应力应变数据表

试验#	$\Delta \psi_{\infty}$ (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)	$\Delta \psi_{\infty}$ (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)	应变 (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)	$\Delta \psi_{\infty}$ (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)	$\Delta \psi_{\infty}$ (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)	$\Delta \psi_{\infty}$ (%)	$\Delta \psi_J$ (MPa)
数据点 1												
数据点 2												
数据点 3												
数据点 4												
数据点 5												
数据点 6												
数据点 7												
数据点 8												
数据点 9												
数据点 10												
数据点 11												
数据点 12												
数据点 13												
数据点 14												
数据点 15												
数据点 16												
数据点 17												
数据点 18												
数据点 19												
数据点 20												
数据点 21												
数据点 22												
数据点 23												
数据点 24												
数据点 25												
数据点 26												
数据点 27												
数据点 28												

F 组——应力应变数据曲线 (续)  
应力应变数据表, tab delimited

试验号	拉伸变形 (%)	拉伸强度 (MPa)	拉伸应变 (%)								
数据点 29											
数据点 30											
数据点 31											
数据点 32											
数据点 33											
数据点 34											
数据点 35											
数据点 36											
数据点 37											
数据点 38											
数据点 39											
数据点 40											
数据点 41											
数据点 42											
数据点 43											
数据点 44											
数据点 45											
数据点 46											
数据点 47											
数据点 48											
数据点 49											
数据点 50											
数据点 51											
数据点 52											
数据点 53											
数据点 54											
数据点 55											

弯曲数据[转到简介页](#)

这部分是在提交弯曲数据时有关试验来源、试验方法、试验件和试验结果的数据格式。数据格式服从ASTM C1341。

试验数据分为六组

- A. 来源说明 提供的热链接
- B. 试验设备和步骤
- C. 试件说明
- D. 试验结果汇总
- E. 单个试验结果
- F. 应力应变数据曲线

用所有可用的非专利数据，填充六组数据域

## A组——来源描述

ID# 4-	ID名称	格式	数据域
A-1	试验日期	数据	
A-2	试验机构	文字和数字	
A-3	试验地点(城市+州)	文字和数字	
A-4	联系人姓名	文字和数字	
A-5	联系电话	文字和数字	
A-6	联系E-Mail	文字和数字	
A-7	报告书或参考文献	文字和数字	
A-8	报告书或报告日期	文字和数字	
A-9	机构运作ID	文字和数字	

转到工具箱

## B组——弯曲试验设备和步骤描述

ID# 4-	ID名称	格式	数据域
B-1	弯曲试验机标准机型	文字和数字	
B-2	试验机ID	文字和数字	
B-3	试验控制方法(选一种)	数荷、位移、应变	
B-4	试验速率(mm/min, N/min, %min.)	浮点(3位有效数字)	mm/min
B-5	加载方式(选一种)	3 点, 4点-1.4点, 4点-1.3点	
B-6	夹具制造厂商描述	文字和数字	
B-7	夹具类型(选一种)	固定的, 半较接的, 全较接的	
B-8	滚柱轴承(选一种)	固定的, 滚动的	
B-9	外部跨距长度(mm)	浮点(3位有效数字)	mm
B-10	加载跨距长度(mm, 仅对4点情况)	浮点(3位有效数字)	mm
B-11	应变测量方法(选一种)	挠度计, 应变计	
B-12	应变测量系统生产商型号	文字和数字	
B-13	气氛(选一种)	空气、活性气体、燃气、或其他规定	
B-14	试验温度	浮点(3位有效数字)	°C
B-15	湿度(RH%)	浮点(2位有效数字)	RH%
B-16	达到预定温度的时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟
B-17	在温度下的浸泡时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟

回到表格顶部

**C组——弯曲试件描述符 (见基线数据的第一页)**

ID# 4-	ID名称	格式	数据域
C-1	制造商序列号	文字和数字	
C-2	试件厚度(mm)	浮点(4位有效数字)	
C-3	试件宽度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-4	试件长度(mm)	浮点(2位有效数字)	mm
C-5	应力方向平面 (选一种)	文字和数字 (11,22,33), 或与主纤维轴的夹角	
C-6	试件准备和机械加工	文字和数字	
C-7	预调节/氯化	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

**D组——弯曲试验数据汇总**

ID# 4-	ID名称	格式	均值	标准差	个数	最大	最小
D-1	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)					
D-2	弯曲强度(MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-3	弯曲强度处的应变(%)	浮点(3位有效数字)					
D-4	断裂温度(MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-5	断裂应变(%)	浮点(3位有效数字)					
D-6	弹性模量(GPa)	浮点(4位有效数字)					
D-7	比例极限应力 $\sigma_0$ (MPa)	浮点(3位有效数字)					
D-8	比例极限方法 (选一种)	偏移屈服[OY]或加载至 伸长 [EL]					
D-9	比例极限应变 (偏移应变 或应变延伸率)(%)	浮点(3位有效数字)					
D-10	韧性模量(Msi)	浮点(3位有效数字)					

[回到表格顶部](#)

**E组——单个试件弯曲试件数据**

试件 #							
试验温度(°C)							
弯曲强度(MPa)							
弯曲强度处的应变(%)							
断裂应力 (MPa)							
断裂应变 (%)							
弹性模量(GPa)							
比例极限应力 $\sigma_0$ (MPa)							
NA							
比例极限应变 (偏移应变 或应变延伸率)(%)							
韧性模量 (Msi)							
断裂形式 (选一种) 标准段、圆弧段、尖持 段、热梯度段							
断裂位置 (mm) 离试件工作段底面的 距离							

[回到表格顶部](#)

Y 组——应力应变数据曲线  
grid Jgrid & grid

grid Jgrid & grid						grid Jgrid & grid					
id	Y_H	log $\Psi$ (%)	log $J_f$ (MPa)	log $\Psi$ (%)	log $J_f$ (MPa)	log $\Psi$ (%)	log $J_f$ (MPa)	log $\Psi$ (%)	log $J_f$ (MPa)	log $\Psi$ (%)	log $J_f$ (MPa)
WR1.1											
WR1.2											
WR1.3											
WR1.4											
WR1.5											
WR1.6											
WR1.7											
WR1.8											
WR1.9											
WR1.10											
WR1.11											
WR1.12											
WR1.13											
WR1.14											
WR1.15											
WR1.16											
WR1.17											
WR1.18											
WR1.19											
WR1.20											
WR1.21											
WR1.22											
WR1.23											
WR1.24											
WR1.25											
WR1.26											
WR1.27											
WR1.28											

图11—应力应变数据曲线(续)

应力应变数据  
ascii, tab delimited

$\sigma/\sigma_0$	$\delta\epsilon/\epsilon_0(\%)$	$\delta\sigma/\sigma(\text{MPa})$	$\delta\epsilon/\epsilon(\%)$								
W4W.329											
W4W.330											
W4W.331											
W4W.332											
W4W.333											
W4W.334											
W4W.335											
W4W.336											
W4W.337											
W4W.338											
W4W.339											
W4W.340											
W4W.341											
W4W.342											
W4W.343											
W4W.344											
W4W.345											
W4W.346											
W4W.347											
W4W.348											
W4W.349											
W4W.350											
W4W.351											
W4W.352											
W4W.353											
W4W.354											
W4W.355											

**压缩数据**

这一节为压缩数据的提交，提供了试验条件、试验方法、试验件和试验结果的格式。这一数据格式遵从ASTM C1358。

试验数据被分为6组

- |                    |       |
|--------------------|-------|
| <u>A: 来源描述</u>     | 提供热链接 |
| <u>B: 试验设备和步骤</u>  |       |
| <u>C: 试件描述</u>     |       |
| <u>D: 试验结果汇总</u>   |       |
| <u>E: 单独试验的结果</u>  |       |
| <u>F: 应力应变数据曲线</u> |       |

用所有可用的非专利数据，填充六组数据域。

**A组——来源描述**

ID# 5- ID 名称	格式	数据域
A-1 试验目的	数据	
A-2 试验机构	文字和数字	
A-3 试验地址(城市名)	文字和数字	
A-4 联系人姓名	文字和数字	
A-5 联系电话	文字和数字	
A-6 联系E-Mail	文字和数字	
A-7 报告中段参考文献	文字和数字	
A-8 报告上表日期	文字和数字	
A-9 机构运行ID	文字和数字	

[回到表格顶端](#)

**B组——弯曲试验设备和程序描述**

ID# 5- ID 名称	格式	数据域
B-1 试验机类型(机型)	文字和数字	
B-2 试验机描述 ID	文字和数字	
B-3 试验荷载方法(选一种)	载荷、位移、应变	
B-4 试验速度(mm/min., % min., % min.)	文字和数字	mm/min
B-5 试验夹具描述	文字和数字	
B-6 夹具制造商及型号	文字和数字	
B-7 应变测量系统生产厂商及型号	文字和数字	
B-8 应变测量方法(选一种)	夹式引伸计, 应变计, 电容, 激光标记, 激光干涉测量法	
B-9 引伸计间距长度(mm)	浮点(3位有效数字)	mm
B-10 环境——选一种	空气、惰性气体、燃气、或其他规定	
B-11 试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)	°C
B-12 湿度 (RH%)	浮点(2位有效数字)	(RH%)
B-13 达到预定温度的时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟
B-14 在温度下的保温时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟
B-15 校准——°在试验前弯曲	浮点(2位有效数字)	%
B-16 校准——°在试验后弯曲	浮点(2位有效数字)	%

[回到表格顶端](#)

**C组——压缩试件描述 (参见材料页的基线数据)**

ID# S-	ID 名称	格式	数据域
C-1	制造厂商序列号	文字和数字	mm
C-2	工作段宽度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-3	工作段厚度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-4	试件工作段长度(mm)	浮点(4位有效数字)	
C-5	试件制备和机械加工	文字和数字	
C-6	应力方向 (选一种)	文字和数字(11, 22, 33), 或与主纤维轴夹角	
C-7	预调节螺钉	文字和数字	
C-8	计算的欧拉屈曲应力(MPa)	浮点(4位有效数字)	MPa

[回到表格的顶部](#)

**D组-压缩试验数据汇总**

ID# S-	ID名称	格式	平均值	标准差,	数量	最大值	最小值
D-1	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)					
D-1	压缩强度(MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-2	压缩强度的应变(%)	浮点(3位有效数字)					
D-3	断裂强度(MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-4	断裂时的应变(%)	浮点(3位有效数字)					
D-5	弹性模量(GPa)	浮点(4位有效数字)					
D-6	泊松比 $\nu_{12}$ (面内横向应变与纵向应变的比值)	浮点(3位有效数字)					
D-7	泊松比 $\nu_{13}$ (厚度方向横向应变与纵向应变的比值)	浮点(3位有效数字)					
D-8	比例极限应力 $\sigma_0$ (MPa)	浮点(4位有效数字)					
D-9	比例极限方法 (选一种)	屈服偏移[OY]或载荷扩展[EL]					
D-10	比例极限变量(偏移应变或应变伸长值)(%)	浮点(4位有效数字)					
D-11	韧性模量(Msi)	浮点(3位有效数字)					
D-12	回弹模量(Msi)	浮点(3位有效数字)					

[回到表格的顶部](#)

**E组——单个试件压缩试验数据**

试件#											
试验温度(°C)											
压缩强度(MPa)											
压缩强度的应变(%)											
断裂强度(MPa)											
断裂应变(%)											
弹性模量(GPa)											
泊松比 $\nu_{12}$ (面内横向应变与纵向应变的比值)											
泊松比 $\nu_{13}$ (沿厚度横向应变与纵向应变之比)											
比例极限应力 $\sigma_0$ (MPa)											
NA											
比例极限变量(偏移应变或应变伸长值)(%)											
韧性模量(Msi)											
回弹模量(Msi)											
断裂形式(选一种) 工作段, 圆弧段, 热梯度段											
断裂位置(mm) 离试件工作段底部的距离											

[回到表格的顶部](#)

Fig.——应力应变数据曲线  
by  $J_1$  by  $\Delta\epsilon$  by  $\delta$   
ascii, tab delimited

id#	$\delta\Phi(\%)$	$J_1(\text{MPa})$								
W点1										
W点2										
W点3										
W点4										
W点5										
W点6										
W点7										
W点8	-									
W点9										
W点10										
W点11										
W点12										
W点13										
W点14										
W点15										
W点16										
W点17										
W点18	-									
W点19										
W点20										
W点21										
W点22										
W点23										
W点24										
W点25										
W点26										
W点27										
W点28										

F组——应力应变数据曲线 (续)  
应力应变数据  
ascii, tab delimited

ijkl #	$\delta\epsilon_{\parallel}$ (%)	$\delta\sigma_{\parallel}$ (MPa)	$\delta\epsilon_{\perp}$ (%)	$\delta\sigma_{\perp}$ (MPa)	$\delta\epsilon_{\parallel}(\%)$	$\delta\sigma_{\parallel}(\text{MPa})$	$\delta\epsilon_{\perp}(\%)$	$\delta\sigma_{\perp}(\text{MPa})$	$\delta\epsilon_{\parallel}(\%)$	$\delta\sigma_{\parallel}(\text{MPa})$
ijkl:529										
ijkl:530										
ijkl:531										
ijkl:532										
ijkl:533										
ijkl:534										
ijkl:535										
ijkl:536										
ijkl:537										
ijkl:538										
ijkl:539										
ijkl:540										
ijkl:541										
ijkl:542										
ijkl:543										
ijkl:544										
ijkl:545										
ijkl:546										
ijkl:547										
ijkl:548										
ijkl:549										
ijkl:550										
ijkl:551										
ijkl:552										
ijkl:553										
ijkl:554										
ijkl:555										

层间(I-L)剪切数据[转到简介页](#)

本数据格式遵循ASTM C1292

这一节为I-L剪切数据的提交，提供了试验来源、试验方法、试验件和试验结果的格式。

试验数据分成六组

- A: 来源描述 提供共连接
- B: 试验设备和程序
- C: 试件描述
- D: 试验结果汇总
- E: 单个的试验结果
- F: 尺寸移置数据

用所有可用的非专利数据，填充六组数据域。

## A组——来源描述

ID# 6-	ID名称	格式	数据域
A-1	试验日期	数据	
A-2	试验机构	文字和数字	
A-3	试验地点(城市)	文字和数字	
A-4	联系人姓名	文字和数字	
A-5	联系电话	文字和数字	
A-6	联系E-Mail	文字和数字	
A-7	报告和报告参考文献	文字和数字	
A-8	报告出版公司	文字和数字	
A-9	机构运作ID	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

## B组——I-L剪切试验设备和过程描述

ID# 6-	ID名称	格式	数据域
B-1	I-L剪切试验标准规程	文字和数字	
B-2	试验机构ID	文字和数字	
B-3	试验控制方法(选一种)	线荷、位移、应变	
B-4	试验速率(mm/min, N/min, %/min)	文字和数字	
B-5	I-L夹具描述	文字和数字	
B-6	I-L夹具制造厂家型号	文字和数字	
B-7	气氛——选一种	空气、惰性气体、燃气、或其他规定	
B-8	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)	
B-9	湿度(RH%)	浮点(2位有效数字)	
B-10	到试验温度的加热时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	
B-11	在试验温度的浸渍时间(分钟)	浮点(2位有效数字)	

[回到表格顶部](#)

**C组——IL剪切试件描述(参见材料页的基准数据)**

ID# 6-	ID名称	格式	数据域
C-1	制造厂商序列号	文字和数字	
C-2	试件长度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-3	试件宽度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-4	试件厚度(mm)	浮点(4位有效数字)	mm
C-5	槽口深度(mm)	浮点(2位有效数字)	mm
C-6	槽口间距(mm)	浮点(2位有效数字)	mm
C-7	剪切载荷方向, 选一种	12,21,13,23,13,32	
C-8	试件制备与机械加工	文字和数字	
C-9	预调节	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

**D组——IL剪切试验数据汇总**

ID# 5-	ID名称	格式	平均值	标准差	数量	最大值	最小值
D-1	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)					
D-2	IL剪切强度(MPa)	浮点(4位有效数字)					

[回到表格顶部](#)

**E组——单个试件IL剪切试验数据**

试件 #											
试验温度(°C)											
IL剪切强度(MPa)											
断裂形式描述											

[回到表格顶部](#)

[表]——位移数据曲线

Inv. J/J' 变形图  
ascii, tab delimited

测点号	位移 (mm)	$J_x$ (N)	$J_y$ (mm)	$J_z$ (N)	$J_{xW}$ (mm)	$J_y$ (N)	$J_{zW}$ (mm)	$J_x$ (N)	$J_y$ (mm)	$J_z$ (N)	$J_{xW}$ (mm)	$J_{yW}$ (mm)	$J_z$ (N)	
数据点 1														
数据点 2														
数据点 3														
数据点 4														
数据点 5														
数据点 6														
数据点 7														
数据点 8														
数据点 9														
数据点 10														
数据点 11														
数据点 12														
数据点 13														
数据点 14														
数据点 15														
数据点 16														
数据点 17														
数据点 18														
数据点 19														
数据点 20														
数据点 21														
数据点 22														
数据点 23														
数据点 24														
数据点 25														
数据点 26														
数据点 27														
数据点 28														

## F组——位移数据曲线(续)

测力点空格表

ascii, tab delimited

测力点	位移 (mm)	力 (N)										
W点29												
W点30												
W点31												
W点32												
W点33												
W点34												
W点35												
W点36												
W点37												
W点38												
W点39												
W点40												
W点41												
W点42												
W点43												
W点44												
W点45												
W点46												
W点47												
W点48												
W点49												
W点50												
W点51												
W点52												
W点53												
W点54												
W点55												

面内(I-P)剪切数据[转到简介页](#)

这一节为I-P剪切数据的提交，提供了试验来源，试验方法，试验件和试验结果的格式。本数据格式遵循ASTM C1292。

试验数据分成六组

- A: 来源描述 提供热链接  
B: 试验设备和程序  
C: 试件描述  
D: 试验结果汇总  
E: 单个的试验结果  
F: 力-位移数据曲线

用所有可用的非专利的数据，完成下列6组数据域

## A组——来源描述

ID# 7-	ID名称	格式	数据域
A-1	试验日期	数据	
A-2	试验机构	文字和数字	
A-3	试验地点(城市+州)	文字和数字	
A-4	联系人姓名	文字和数字	
A-5	联系电话	文字和数字	
A-6	联系E-Mail	文字和数字	
A-7	报告出版参考文献	文字和数字	
A-8	报告出版日期	文字和数字	
A-9	机构运作ID	文字和数字	

[回到表格顶部](#)

## B组——I-P剪切试验设备和过程描述

ID# 7-	ID名称	格式	数据域
B-1	I-L剪切试验标准规范	文字和数字	
B-2	试验机描述ID	文字和数字	
B-3	试验控制方法(选一种)	载荷, 位移, 应变	
B-4	试验速率 (mm/min, N/min, %/min)	文字和数字	
B-5	I-L夹具描述	文字和数字	
B-6	I-L夹具制造商/型号	文字和数字	
B-7	气氛——选一种	空气, 惰性气体, 燃气, 其他	
B-8	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)	°C
B-9	湿度(RH%)	浮点(2位有效数字)	RH%
B-10	到试验温度的加热时间 (分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟
B-11	在试验温度的浸渍时间 (分钟)	浮点(2位有效数字)	分钟

[回到表格顶部](#)

**C组——IP剪切试件描述(参见材料页的基准数据)**

ID# 7-	ID名称	格式	数据域
C-1	制造厂商序列号	文字和数字	
C-2	试件长度(mm)	浮点(4位有效数字)	
C-3	试件宽度(mm)	浮点(4位有效数字)	
C-4	试件厚度(mm)	浮点(4位有效数字)	
C-5	槽口间距(mm)	浮点(2位有效数字)	
C-6	槽口深度(mm)	浮点(2位有效数字)	
C-7	试件制备与机械加工	文字和数字	
C-8	预调节	文字和数字	
C-9	剪切载荷方向, 选一种 <a href="#">回到表格顶部</a>	12/21,13/23,13/32	

**D组——IL剪切试验数据汇总**

ID# 7-	ID名称	格式	平均值	标准差	数量	最大值	最小值
D-1	试验温度(°C)	浮点(3位有效数字)					
D-2	IP剪切强度(MPa)	浮点(4位有效数字)					

**E组——单个试件IP剪切试验数据**

试件#											
试验温度(°C)											
IP剪切强度(MPa)											
断裂形式描述											

[回到表格顶部](#)

图组——力-位移数据曲线

AS/force変数数据  
ascii, tab delimited

dat#	$G_{\text{FF}}$ (mm)	$J_f$ (N)										
数据点 1												
数据点 2												
数据点 3												
数据点 4												
数据点 5												
数据点 6												
数据点 7												
数据点 8												
数据点 9												
数据点 10												
数据点 11												
数据点 12												
数据点 13												
数据点 14												
数据点 15												
数据点 16												
数据点 17												
数据点 18												
数据点 19												
数据点 20												
数据点 21												
数据点 22												
数据点 23												
数据点 24												
数据点 25												
数据点 26												
数据点 27												
数据点 28												

图11——力-位移数据曲线(续)

(续表) 表2 力-位移数据

试验号	位移 (mm)	力 (N)	位移 (mm)								
数据点 29											
数据点 30											
数据点 31											
数据点 32											
数据点 33											
数据点 34											
数据点 35											
数据点 36											
数据点 37											
数据点 38											
数据点 39											
数据点 40											
数据点 41											
数据点 42											
数据点 43											
数据点 44											
数据点 45											
数据点 46											
数据点 47											
数据点 48											
数据点 49											
数据点 50											
数据点 51											
数据点 52											
数据点 53											
数据点 54											
数据点 55											

4.3.2.2.2.3

# 第17章 统计方法

## 17.1 引言

此节留待以后补充。

### 17.1.1 基于统计的性能的计算方法概述

此节留待以后补充。

### 17.1.2 计算机软件

此节留待以后补充。

### 17.1.3 符号

此节留待以后补充。

### 17.1.4 统计术语

此节留待以后补充。

## 17.2 背景

此节留待以后补充。

### 17.2.1 基于统计的设计许用值

此节留待以后补充。

### 17.2.2 非结构数据的基准值

此节留待以后补充。

### 17.2.3 存在批次-批次变异时的基准值

此节留待以后补充。

### 17.2.4 批、板和混合

此节留待以后补充。

### 17.2.5 确定基准值的采样尺寸指南

此节留待以后补充。

## 17.3 基于统计的材料性能计算

此节留待以后补充。

### **17.3.1 计算程序指南**

此节留待以后补充。

### **17.3.2 子体相容性——结构型数据或非结构型数据**

此节留待以后补充。

### **17.3.3 检查异常数据**

此节留待以后补充。

### **17.3.4 非结构型数据的基准值**

此节留待以后补充。

### **17.3.5 结构型数据的基准值**

此节留待以后补充。

### **17.3.6 探索性数据分析**

此节留待以后补充。

### **17.3.7 计算方法实例**

此节留待以后补充。

## **17.4 各种统计学方法**

此节留待以后补充。

### **17.4.1 离散系数的置信区间**

此节留待以后补充。

### **17.4.2 工艺控制的统计方法**

此节留待以后补充。

### **17.4.3 替代材料的统计方法**

此节留待以后补充。

### **17.4.4 典型的应力-应变曲线**

此节留待以后补充。

## **17.5 统计表和近似**

此节留待以后补充。

## **第18章 CMC性能数据**

### **18.1 引言**

此节留待以后补充。

#### **18.1.1 手册中数据的结构**

此节留待以后补充。

#### **18.1.2 数据的表述**

此节留待以后补充。

#### **18.1.3 材料代码和文件**

此节留待以后补充。

#### **18.1.4 材料体系代码**

此节留待以后补充。

#### **18.1.5 材料取向代码**

此节留待以后补充。

#### **18.1.6 符号、缩写和单位体系**

此节留待以后补充。

#### **18.1.7 定义**

此节留待以后补充。

### **18.2 CMC体系——性能数据**

#### **18.2.1 CMC 体系 1<sup>#</sup>**

<b>复合材料</b>					
复合材料名称	9/99EPM SiC/SiC	制造商	Honeywell ACI		
复合材料描述	SiC纤维/BN-SiC/M1 SiC	制造批号#	0981-01 and 0604-01		
增强体Vol%	36%	制造日期	Sep-99		
密度	2.86	制造类型	熔融硅渗透		
%孔隙率	10%-20%	开发/生产状态	有限应用		
<u>增强体</u>	名称	Sylramic	制造厂商	COI	
组分		SiC	结构/织物	5综缎机织物	
层数		8	单层厚度	0.25mm	
织物面積重量		281.58 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90/45]	
<u>基体</u>	组分	SiC + Siliconized SiC	来源	熔融渗透	
<u>界面相/纤维界面层</u>			组分	Si涂BN	
厚度		0.5μm	来源	CVI	
<u>外部界面层</u>	组分	na	厚度	na	
制造方法		na	来源	na	

试验日期 1999-02-00

数据提交日期

3.01

<u>试验数据汇总</u>	温度	816°C	1038°C	1204°C	1315°C
	气氛	空气	空气	空气	空气
	预调节	无	无	无	无
	归一化或测量值	测量值	测量值	测量值	测量值
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)	平均值 批准级别	208 s	209 s	182 s	158 s
弹性模量 $E_y^t$ (GPa)	平均值 批准级别	208 s	209 s	182 s	158 s
弹性模量 $E_z^t$ (GPa)	平均值 批准级别				
泊松比 $\nu_{xy}^t$	平均值 批准级别				
泊松比 $\nu_{xz}^t$	平均值 批准级别				
泊松比 $\nu_{yz}^t$	平均值 批准级别				
剪切模量 $G_{xy}^s$ (GPa)	平均值 批准级别				
剪切模量 $G_{yz}^s$ (GPa)	平均值 批准级别				
剪切模量 $G_{xz}^s$ (GPa)	平均值 批准级别				
比例极限应力 $F^{pl}$ (MPa)	平均值 批准级别				
热传导率 $\alpha_x$	平均值 批准级别				
热传导率 $\alpha_y$	平均值 批准级别				
热传导率 $\alpha_z$	平均值 批准级别				
热膨胀系数 $K_x$	平均值 批准级别				
热膨胀系数 $K_y$	平均值 批准级别				
热膨胀系数 $K_z$	平均值 批准级别				

批准级别：F——正式批准；T——临时；S——筛选

<u>复合材料</u>							
复合材料名称	9/99EPM SiC/SiC	制造商	Honeywell ACI				
复合材料描述	SiC纤维 BN-SiC/Mi SiC	制造批号#	0981-01 and 0604-01				
增强体 Vol%	36%	制造日期	Sep-99				
密度	2.86	制造类型	熔融硅渗透				
%孔隙率	10%-20%	开发/生产状态	有限应用				
<u>增强体</u>	名称	Sylramic	制造厂商	COI			
组分		SiC	结构/织构	5综缎机织物			
层数		8	单层厚度	0.25mm			
织物面积重量		281.58 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	10/90/l <sub>4</sub>			
<u>基体</u>	组分	SiC + Siliconized SiC	来源	熔融渗透			
界面相/纤维界面层			组分	Si掺BN			
厚度		0.5μm	来源	CVI			
<u>外部界面层</u>	组分	na	厚度	na			
制造方法		na	来源	na			
试验日期	1999-02-00	数据提交日期		3/01			
<u>试验数据汇总</u>		温度	816°C	1038°C	1204°C		
		气氛	空气	空气	空气		
		预调节	无	无	无		
归一化或测量值			测量值	测量值	测量值		
拉伸强度 $F_t^{tu}$ (MPa)	平均值	362	325	307	295		
	批准级别	s	s	s	s		
拉伸强度 $F_t^{tu}$ (MPa)	平均值	362	325	307	295		
	批准级别	s	s	s	s		
拉伸强度 $F_t^{tu}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
屈服 $\sigma_s^{tu}$ (MPa)	平均值	4810	4350	4590	4300		
	批准级别	s	s	s	s		
应变 $\epsilon_s^{tu}$ (με)	平均值	4810	4350	4590	4300		
	批准级别	s	s	s	s		
应变 $\epsilon_s^{tu}$ (με)	平均值						
	批准级别						
比例极限应力 $F_{pl}^{tu}$ (MPa)	平均值	177	168	166	163		
	批准级别	s	s	s	s		
比例极限应力 $F_{pl}^{tu}$ (MPa)	平均值	177	168	166	163		
	批准级别	s	s	s	s		
比例极限应力 $F_{pl}^{tu}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
压缩强度 $F_c^{tu}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
压缩强度 $F_c^{tu}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
压缩强度 $F_c^{tu}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
面内剪切强度 $F_{in}^{su}$ (MPa)	平均值	47.2					
	批准级别	s					
层间剪切强度 $F_{xy}^{su}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
层间剪切强度 $F_{yz}^{su}$ (MPa)	平均值						
	批准级别						
弯曲强度 $F_b^b$ (MPa)	平均值						
	批准级别						

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>					
复合材料名称	9.99EPM SiC/SiC	制造商	Honeywell ACT		
复合材料描述	SiC纤维/BN-SiC/MII SiC	制造批号#	0981-01 和 0604-01		
增强体 Vol%	36%	制造日期	Sep-99		
密度	2.86	制造类型	熔融硅渗透		
%孔隙率	10%-20%	开发/生产状态	有限应用		
<b>增强体</b>	名称	Sylramic	制造商	COI	
组分	SiC	结构/织构	5综级机织物		
层数	8	单层厚度	0.25mm		
织物面积重量	281.58 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>4s</sub>		
<b>基体</b>	组分	SiC + Siliconized SiC	来源	熔融渗透	
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	Si涂BN		
厚度	0.5 μm	来源	CVI		
<b>外部界面层</b>	组分	na	厚度	na	
制造方法	na	来源	na		
<b>拉伸试验方法</b>		试验文件ID			
试验方法标准	ASTM C1275-95	试验日期	1.99 -02-00		
归一化方法		载荷/应变速率	0.5%/min		
模量计算方法	在30-100MPa之间拟合	比例模量计算方法	偏离屈服+50μ偏移 (LS)		

数据提交日期 3.01							
试验数据 汇总	温度	816°C	1038°C	1204°C	1315°C		
	气氛	空气	空气	空气	空气		
预调节		无	无	无	无		
工作段长支		27.94mm	27.94mm	27.94mm	27.94mm		
应力方向		0°	0°	0°	0°		
归一化或测量值		归一化	测量值	归一化	测量值	归一化	测量值
板梁拉伸 强度 $F_x^u$ (MPa)	平均值			362			325
	标准差			32.2			29.2
	试件数量			24			6
	批 数			6			6
	批准级别			S			S
弹性模量 $E_x^u$ (GPa)	平均值			208			209
	标准差			14.0			14.5
	试件数量			24			6
	批 数			6			6
	批准级别			S			S
比例极限 应力 $F_x^p$ (MPa)	平均值			177			168
	标准差			19.4			19.9
	试件数量			24			6
	批 数			6			6
	批准级别			S			S
破坏应变 $\varepsilon_x^u$ (με)	平均值			4810			4350
	标准差			626			621
	试件数量			24			6
	批 数			6			6
	批准级别			S			S

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——通过

复合材料					
复合材料名称	9/99EPM SiC/SiC	制造商	Honeywell ACI		
复合材料描述	SiC纤维/BN-SiC/Ml SiC	制造批号#	0981-01 and 0604-01		
增强体Vol%	36%	制造日期	Sep-99		
密度	2.86	制造类型	熔融硅渗透		
%孔隙率	10%-20%	开发/生产状态	有限应用		
增强体	名称	Sylramic	制造商	COI	
组织		SiC	结构/机构	5缕丝机织物	
层数		8	单层厚度	0.25mm	
组织面积重量		281.58 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0°/90°] <sub>8</sub>	
基体	组织	SiC + Siliconized SiC	来源	熔融渗透	
界面相/纤维界面层			组织	Si涂层BN	
厚度		0.5μm	来源	CVI	
外部界面层	组织	na	厚度	na	
制造方法		na	来源	na	
层间剪切强度试验方法			试验文件ID		
试验方法标准		ASTM C 1292-95	缺口距离	6.35mm	
拉伸方法			试验日期	2/01	

剪切 试验数据	温度	816°C	测温值
	气氛	空气	
	热源	无	
	环境温度	0°C	
抗剪切强度 $F_{t,0}^{tu}$ (MPa)	标准 标准 试件数量 拉伸 拉伸速度	47.2 7.24 24 6 S	

批准级别：F——正式批准；I——临时；S——筛选

## 18.2.2 CMC 体系<sup>2</sup>

复合材料		增强 SiC/SiC SiC/Carbon/SiC	制造商 制造批号#	Honeywell AC1 多批	
复合材料描述		40%	制造日期	11/94-12/97	
增强体 Vol%		2.3g/cc	制造类型	CVI	
密度		12%	开发/生产状态	市场可供应	
%孔隙率					
增强体	名称	CG Nicalon	制造厂商	COI	
组分		SiC	结构/织构	5综缎机织物	
层数		11	单层厚度	~0.3mm	
织物/面积重量		~287 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>m</sub>	
基体	组分	SiC	来源	CVI	
外部界面层			厚度	0.1-0.2mm	
组分		SiC	来源	CVI	
制造方法		CVI	制造日期	11/94-12/97	
试验日期		11/94-12/97	数据提交日期	3.01	
试验数据汇总		温度 气氛 预调节	测量值 空气 无	850°C 空气 无	1100°C 空气 无
		归一化或测量值	测量值	测量值	测量值
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)		平均值 批准级别	129 S	113 S	122 S
弹性模量 $E_y^t$ (GPa)		平均值 批准级别	129 S	113 S	122 S
弹性模量 $E_z^t$ (GPa)		平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{xy}^t$		平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{xz}^t$		平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{yz}^t$		平均值 批准级别			
剪切模量 $G_n^t$ (GPa)		平均值 批准级别			
剪切模量 $G_{yz}^t$ (GPa)		平均值 批准级别			
剪切模量 $G_{xz}^t$ (GPa)		平均值 批准级别			
比例极限应力 $F^{pl}$ (MPa)		平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_1$		平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_2$		平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_3$		平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_1$		平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_2$		平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_3$		平均值 批准级别			

批准级别：F——正式批准；T——临时；S——筛选

<b>复合材料</b>		<b>增强</b>	<b>SiC/SiC</b>	<b>制造商</b>	<b>Honeywell ACI</b>			
复合材料名称		<b>SiC/Carbon/SiC</b>		<b>制造批号#</b>	<b>多批</b>			
复合材料描述		<b>40%</b>		<b>制造日期</b>	<b>11/94-12/97</b>			
增强体Vol%		<b>2.3g/cc</b>		<b>制造类型</b>	<b>CVI</b>			
密度		<b>12%</b>		<b>开发/生产状态</b>	<b>市场可供应</b>			
%孔隙率		<b>CG Nicalon</b>		<b>制造厂商</b>	<b>COI</b>			
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>SiC</b>	<b>5综丝机织物</b>		<b>织分</b>			
<b>织分</b>		<b>II</b>	<b>单层厚度</b>		<b>~0.3mm</b>			
<b>层数</b>		<b>-287 g/m<sup>2</sup></b>	<b>层压的铺层顺序</b>		<b> 0/90 <sub>m</sub></b>			
<b>基体</b>		<b>SiC</b>	<b>来源</b>		<b>CVI</b>			
<b>外部界面层</b>			<b>厚度</b>	<b>0.1-0.2mm</b>				
<b>织分</b>		<b>SiC</b>	<b>来源</b>	<b>CVI</b>				
<b>制造方法</b>		<b>CVI</b>	<b>制造日期</b>	<b>11/94-12/97</b>				
<b>试验日期</b>	<b>11/94-12/97</b>		<b>数据提交日期</b>	<b>3/01</b>				
<b>试验数据汇总</b>		<b>温度</b>	<b>23°C</b>	<b>850°C</b>	<b>1100°C</b>	<b>1200°C</b>		
		<b>气氛</b>	<b>空气</b>	<b>空气</b>	<b>空气</b>	<b>无</b>		
		<b>预调节</b>	<b>无</b>	<b>无</b>	<b>无</b>	<b>无</b>		
		<b>归一化或测量值</b>	<b>测量值</b>	<b>测量值</b>	<b>测量值</b>	<b>测量值</b>		
<b>拉伸强度 <math>F_t^{tu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>230</b>	<b>265</b>	<b>275</b>	<b>250</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>拉伸强度 <math>F_t^{tu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>230</b>	<b>265</b>	<b>275</b>	<b>250</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>拉伸强度 <math>F_t^{tu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>应变 <math>\epsilon_t^{tu}</math> (<math>\mu\epsilon</math>)</b>		<b>平均值</b>	<b>4680</b>	<b>5860</b>	<b>6090</b>	<b>7250</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>应变 <math>\epsilon_t^{tu}</math> (<math>\mu\epsilon</math>)</b>		<b>平均值</b>	<b>4680</b>	<b>5860</b>	<b>6090</b>	<b>7250</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>应变 <math>\epsilon_t^{tu}</math> (<math>\mu\epsilon</math>)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>比例极限应力 <math>F_t^{pl}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>72.2</b>	<b>79.1</b>	<b>89.3</b>	<b>76.9</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>比例极限应力 <math>F_t^{pl}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>72.2</b>	<b>79.1</b>	<b>89.3</b>	<b>76.9</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>	<b>S</b>		
<b>比例极限应力 <math>F_t^{pl}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>压缩强度 <math>F_c^{cu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>577</b>					
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>					
<b>压缩强度 <math>F_c^{cu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>577</b>					
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>					
<b>压缩强度 <math>F_c^{cu}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>面内剪切强度 <math>F_{xy}^{su}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>38.0</b>					
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>					
<b>层间剪切强度 <math>F_{xz}^{su}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>层间剪切强度 <math>F_{yz}^{su}</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>						
		<b>批准级别</b>						
<b>弯曲强度 <math>F_x^b</math> (MPa)</b>		<b>平均值</b>	<b>420</b>			<b>447</b>		
		<b>批准级别</b>	<b>S</b>			<b>S</b>		

批准级别：F——正式批准；I——临时；S——筛选

<b>复合材料</b>					
复合材料名称	增强 SiC/SiC	制造商	Honeywell ACT		
复合材料描述	SiC/Carbon/SiC	制造批号#	多批		
增强体Vol%	40%	制造日期	11/94-12/97		
密度	2.3g/cc	制造类型	CVI		
%孔隙率	12%	开发生产状态	市场可供应		
<u>增强体</u>	名称	CG Nicalon	制造厂商	COI	
组分	SiC	结构/组织	5综玻纤织物		
层数	11	单层厚度	~0.3mm		
织物面积重量	~287 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	0/90  <sub>12</sub>		
<u>基体</u>	组分	SiC	来源	CVI	
<u>界面相/纤维界面层</u>		组分	C		
厚度	0.5um	来源	CVI		
<u>外部界面层</u>	组分	SiC	厚度	0.1-0.2mm	
制造方法	CVI	来源	CVI		
<u>拉伸试验方法</u>	=	试验文件ID#	多批		
试验方法标准	C1275-95和C1359-96	试验日期	11.94-12/97		
归一化方法		载荷 应变率	0.5%/min		
模量计算方法	3.5-35.5MPa之间拟合(LS)	比例极限计算方法	偏移屈服(0.005%)		

数据提交日期		3.01					
<u>拉伸试验数据</u>		温度	23°C	850°C	1100°C	1200°C	
		气氛	空气	空气	空气	空气	
		预调节	无	无	无	无	
		工作段长度	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm	
		应力方向	0°	0°	0°	0°	
		归一化	测量值	归一化	测量值	归一化	测量值
板条拉伸强度 $F_t^u$ (MPa)	平均值		230		265		275
	标准差		20.1		(1.9)		10.8
	试件数量		90		8		9
	批 数		21		5		9
	批准级别						
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)	平均值		129		134		122
	标准差		13.1		3.94		12.4
	试件数量		90		8		9
	批 数		21		5		9
	批准级别						
比例极限应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值		72.2		79.1		89.3
	标准差		11.0		7.35		14.4
	试件数量		90		7		9
	批 数		21		4		9
	批准级别						
破坏应变 $\varepsilon_x^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值		4680		5860		6090
	标准差		531		318		325
	试件数量		90		7		9
	批 数		21		4		9
	批准级别						
泊松比 $V_x^t$	平均值						
	标准差						
	试件数量						
	批 数						
	批准级别						

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>				
复合材料名称	增强 SiC/SiC	制造商	Honeywell ACI	
复合材料描述	SiC/Carbon/SiC	制造批号#	多批	
增强体Vol%	40%	制造日期	11/94-12/97	
密度	2.3g/cc	制造类型	CVI	
%孔隙率	12%	开发/生产状态	市场可供应	
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>CG Nicalon</b>	<b>制造厂商</b>	<b>COI</b>
组分	SiC	结构/组织	5综丝机织物	
层数	11	单层厚度	-0.3mm	
钢纤维体积量	~287 g/m <sup>3</sup>	层压的铺层顺序	0/90  <sub>m</sub>	
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>来源</b>	<b>CVI</b>
<b>界面相 纤维界面层</b>			<b>组分</b>	<b>C</b>
厚度	0.5um	来源		CVI
<b>外部界面层</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>厚度</b>	0.1-0.2mm
制造方法	CVI	来源		CVI
<b>压缩试验方法</b>				
试验方法标准	ASTM C1358-96	试验文件ID#	多批	
归一化方法		比例极限计算方法		
成量计算方法		试验日期	11/94 -12/97	

报告提交日期		3.01		报告编号: 10000000000000000000000000000000
<b>压缩试验</b>	<b>温度</b>	23°C		
<b>数据</b>	<b>气氛</b>	空气		
	<b>扫描节</b>	无		
	<b>应力方向</b>	0°		
		归一化	测量值	
<b>F<sub>c<sup>cu</sup></sub> (MPa)</b>	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	577 13.8 5 5		
<b>E<sub>c<sup>cu</sup></sub> (GPa)</b>	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	141 11.7 5 5		
<b>F<sub>c<sup>pl</sup></sub> (MPa)</b>	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别			
<b>破坏应变 E<sub>c<sup>cu</sup></sub> (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	0.433 0.055 5 5		
<b>V<sub>fr</sub><sup>c</sup></b>	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别			

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	增强 SiC/SiC	制造商	Honeywell ACI
复合材料描述	SiC/Carbon/SiC	制造批号#	多批
增强体 Vol%	40%	制造日期	11/94-12/97
密度	2.3g/cc	制造类型	CVI
%孔隙率	12%	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	名称	CG Nicalon	制造商
组分	SiC	结构/织构	5综缎机织物
层数	11	单层厚度	~0.3mm
织物面积重量	~287 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>11</sub>
<b>基体</b>	组分	SiC	来源
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	C
厚度	0.5um	来源	CVI
<b>外部界面层</b>	组分	SiC	厚度
制造方法	CVI	来源	0.1-0.2mm
<b>面内剪切试验方法</b>			
试验方法标准	ASTM C1292-95a	试验文件ID#	多批
归一化方法		缺口距离	10mm
		试验日期	11/94 -12/97

数据提交日期 3.01		
<b>剪切试验 数据</b>	温度 气氛 预调节	23°C 空气 无
	归一化	测量值
极限面内 剪切强度 $F_u$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 次数 批准级别	38.0 2.73 2 1

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>		<b>增强</b>	<b>SiC/SiC</b>	<b>制造商</b>	<b>Honeywell ACI</b>
复合材料名称		SiC/Carbon/SiC		制造批号#	多批
复合材料描述		40%		制造日期	11/94-12/97
增强体 Vol%		2.3g/cc		制造类型	CVI
密度		12%		开发/生产状态	市场可供应
孔隙率					
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	CG Nicolon	<b>制造厂商</b>	COI	
织物		SiC	结构/织构	5 综丝机织物	
层数		11	单层厚度	-0.3mm	
织物面积重量		-287 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>11</sub>	
<b>基体</b>	<b>组分</b>	SiC	<b>来源</b>	CVI	
界面相 纤维界面层			组分	C	
厚度		0.5um	来源	CVI	
<b>外部界面层</b>	<b>组分</b>	SiC	<b>厚度</b>	0.1-0.2mm	
制造方法		CVI	来源	CVI	
<b>弯曲试验方法</b>			试验文件ID	多批	
试验方法标准		C1161-94和C1211-98a	几何形状(3点-4点)	4点	
外跨距(mm)		40mm	跨距/深度比	10-14	
归一化方法			比例极限计算方法		
结果计算方法			试验日期	11/94-12/97	
数据提交日期		3.01			
<b>弯曲试验</b>	<b>温度</b>	23°C	1200°C		
<b>数据</b>	<b>气氛</b>	空气	空气		
	<b>预调节</b>	无	无		
	<b>应力方向</b>	0°	0°		
		1 1/4 伦	1 1/4 伦		
		测量值	测量值		
<b>破坏载荷</b> $F_b^b$ (MPa)	平均值	420	447		
	标准差	36.6	30.9		
	试件数量	27	20		
	批 数	9	7		
	批准级别				
<b>弹性模量</b> $E^b$ (GPa)	平均值				
	标准差				
	试件数量				
	批 数				
	批准级别				
<b>比例极限</b> $F_p^b$ (MPa)	平均值				
	标准差				
	试件数量				
	批 数				
	批准级别				
<b>破坏应变</b> $\epsilon_b^b$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值				
	标准差				
	试件数量				
	批 数				
	批准级别				
<b>泊松比</b> $\nu_x^b$	平均值				
	标准差				
	试件数量				
	批 数				
	批准级别				

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

### 18.2.3 CMC 体系 3<sup>#</sup>

复合材料						
复合材料名称	C/SiC	制造商	Honeywell ACI			
复合材料描述	C/C/CVI SiC	制造批号#	多批			
增强体 Vol%	45%	制造日期	3/91-2.99			
密度	2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI			
%孔隙率	~10%	开发/生产状态	市场可供应			
增强体 组分	名称 C T300	制造商	BP Amoco			
组分	C	结构/织构	平纹织物			
层数	27	单层厚度	~0.1mm			
织物面积重量	~100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90]			
基体	组分 SiC	来源	CVI			
界面相/纤维界面层		组分	C			
厚度	0.5μm	来源	CVI			
外部界面层	组分 SiC	厚度	0.1-0.2mm			
制造方法	CVI	来源	CVI			
试验日期	3.91-2.99	数据提交日期	3.01			
试验数据汇总	温度 -157°C 气氛 空气 预调节 无	23°C 空气 无	600°C 惰性气体 无	1200°C 惰性气体 无	1400°C 惰性气体 无	
归一化或测量值	测量值	测量值	测量值	测量值	测量值	测量值
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)	平均值 S	70.2	102	114	95.7	S
弹性模量 $E_y^t$ (GPa)	平均值 S	70.2	102	114	95.7	S
弹性模量 $E_z^t$ (GPa)	平均值 S					
泊松比 $\nu_{xy}^t$	平均值 S					
泊松比 $\nu_{yz}^t$	平均值 S					
泊松比 $\nu_{xz}^t$	平均值 S					
剪切模量 $G_x^t$ (GPa)	平均值 S					
剪切模量 $G_y^t$ (GPa)	平均值 S					
剪切模量 $G_z^t$ (GPa)	平均值 S					
比例极限应力 $F_p^t$ (MPa)	平均值 S					
热传导率 $\alpha_x$	平均值 S					
热传导率 $\alpha_y$	平均值 S					
热传导率 $\alpha_z$	平均值 S					
热膨胀系数 $K_x$	平均值 S					
热膨胀系数 $K_y$	平均值 S					
热膨胀系数 $K_z$	平均值 S					

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>		<b>C/SiC</b>	<b>制造商</b>	<b>Honeywell ACI</b>		
复合材料名称		C/C/CVI SiC	制造批号#	多批		
复合材料描述		45%	制造日期	3/91-2/99		
增强体Vol%		2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI		
密度		~10%	开发/生产状态	市场可供应		
%孔隙率						
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>C T300</b>	<b>制造厂商</b>	<b>BP Amoco</b>		
组分		C	结构/组织	平纹机织物		
层数		27	单层厚度	~0.1mm		
织物面积重量		~100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0°/90°]		
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>来源</b>	<b>CVI</b>		
<b>界面相/纤维界面层</b>			<b>组分</b>	<b>C</b>		
厚度		0.5μm	<b>来源</b>	<b>CVI</b>		
<b>外部界面层</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>厚度</b>	<b>0.1-0.2mm</b>		
制造方法		CVI	<b>来源</b>	<b>CVI</b>		
试验日期	3/91-2/99		<b>数据提交日期</b>	3/01		
<b>试验数据汇总</b>	<b>温度</b> 气氛 预调节	-157°C 空气 无	23°C 空气 无	600°C 惰性气体 无	1200°C 惰性气体 无	1400°C 惰性气体 无
<b>拉伸强度</b>		<b>化或测量值</b>	<b>测量值</b>	<b>测尾值</b>	<b>测量值</b>	<b>测尾值</b>
拉伸强度 $F_{\text{t}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别	485 S	504 S	579 S	546 S
拉伸强度 $F_{\text{t}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别	485 S	504 S	579 S	546 S
拉伸强度 $F_{\text{t}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别				
应变 $\varepsilon_{\text{t}}^{\text{u}}$ (με)		平均值 批准级别	12300 S	10700 S	10500 S	11100 S
应变 $\varepsilon_{\text{t}}^{\text{u}}$ (με)		平均值 批准级别	12300 S	10700 S	10500 S	11100 S
应变 $\varepsilon_{\text{t}}^{\text{u}}$ (με)						
比例极限应力 $F_{\text{p}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别				
比例极限应力 $F_{\text{p}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别				
压缩强度 $F_{\text{c}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别		545 S		
压缩强度 $F_{\text{c}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别		545 S		
压缩强度 $F_{\text{c}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别				
面内剪切强度 $F_{\text{ss}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别		34.8 S		
层间剪切强度 $F_{\text{sl}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别		133 S		
层间剪切强度 $F_{\text{sl}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别		133 S		
弯曲强度 $F_{\text{b}}^{\text{u}}$ (MPa)		平均值 批准级别				

批准级别：F——正式批准；L——临时；S——筛选

复合材料							
复合材料名称	C/SiC	制造商	Honeywell ACI				
复合材料描述	C/C/CVI SiC	制造批号#	多批				
增强体Vol%	45%	制造日期	3.91-2.99				
密度	2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI				
%孔隙率	~10%	开发/生产状态	市场可供应				
<u>增强体</u>	名称	C T300	制造厂商	BP Amoco			
组分	C	结构/组织	平纹机织物				
层数	27	单层厚度	~0.1mm				
织物面积重量	100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>n</sub>				
<u>基体</u>	组分	SiC	来源	CVI			
<u>界面相/纤维界面层</u>			组分	C			
厚度	0.5μm	来源	CVI				
<u>外部界面层</u>							
组分	SiC	厚度	0.1-0.2mm				
制造方法	CVI	来源	CVI				
<u>拉伸试验方法</u>			试验文件ID#	多批			
试验方法标准	C1273-95和C1359-96	试验日期	3.91-2.99				
归一化方法		载荷/应变速率	0.5%/min				
校量计算方法	Instron 系列IX FN, 19.3	比例极限计算方法	无				
数据提交日期	3.01						
<u>拉伸试验数据</u>	温度	-157°C	23°C	600°C	1200°C		
	气氛	空气	空气	惰性气体	惰性气体		
	预调节	无	无	无	无		
	工作段长度	25.4mm	25.4mm	25.4mm	25.4mm		
	应力方向	0°	0°	0°	0°		
		归一化	测量值	归一化	测量值	归一化	测量值
<u>极限拉伸强度</u>	平均值			485			504
$F_x^{\text{u}}$ (MPa)	标准差						49.3
	试件数量			1			188
	批 数			1			31
	批准级别						
<u>弹性模量</u>	平均值			57.9			70.2
$E_x^{\text{e}}$ (GPa)	标准差						10.7
	试件数量			1			155
	批 数			1			30
	批准级别						
<u>比例极限应力</u>	平均值						
$F_x^{\text{pl}}$ (MPa)	标准差						
	试件数量						
	批 数						
	批准级别						
<u>破坏应变</u>	平均值			12300			10700
$\varepsilon_x^{\text{u}}$ (με)	标准差						1790
	试件数量			1			188
	批 数			1			31
	批准级别						
<u>泊松比</u>	平均值						
$\nu_x^{\text{e}}$	标准差						
	试件数量						
	批 数						
	批准级别						

批准级别: F——正式批准; I——意向; S——待定

<b>复合材料</b>				
复合材料名称	C/SiC	制造商	Honeywell ACI	
复合材料描述	C/C/CVI SiC	制造批号#	多批	
增强体Vol%	45%	制造日期	3/91-2/99	
密度	2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI	
%孔隙率	~10%	开发/生产状态	市场可供应	
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>C T300</b>	<b>制造商</b>	<b>BP Amoco</b>
组分	C	结构/组织	平纹织物	
层数	27	单层厚度	~0.1mm	
织物面积重量	~100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90]	
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>来源</b>	<b>CVI</b>
<b>界面相/纤维界面层</b>			<b>组分</b>	<b>C</b>
厚度	0.5μm	来源	CVI	
<b>外轮廓界面层</b>				
组分	SiC	厚度	0.1-0.2mm	
制造方法	CVI	来源	CVI	
<b>拉伸试验方法</b>			<b>试验文件ID#</b>	<b>多批</b>
试验方法标准	C1275-95和C1359-96	试验日期	3/91-2/99	
归一化方法		载荷/应变率	0.5%/min	
校准计算方法	Instron系列IX FN. 19.3	比例极限计算方法	无	

数据提交日期 3/01

<b>拉伸试验 数据</b>		温度 气氛 预调节 应力方向	1400°C 惰性气体 无 0°	
		归一化	测量值	
破壞拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批数 批准级别		523 70.0 12 11	
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)	平均值 标准差 试件数量 批数 批准级别		95.7 24.4 12 11	
比例极限应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批数 批准级别			
破坏应变 $\varepsilon_x^{tu}$ (με)	平均值 标准差 试件数量 批数 批准级别		13800 2800 10 9	
泊松比 $\nu_{xy}^t$	平均值 标准差 试件数量 批数 批准级别			

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	C/SiC	制造商	Honeywell ACI
复合材料描述	C/C/CVI SiC	制造批号#	多批
增强体Vol%	45%	制造日期	3.91-2/99
密度	2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI
%孔隙率	~10%	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	C T300	制造商
组分	C	结构/织构	平纹织物
层数	27	单层厚度	~0.1mm
织物面重重量	~100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90]
<b>基体</b>	<b>组分</b>	SiC	来源
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	C
厚度	0.5μm	来源	CVI
<b>外部界面层</b>			
组分	SiC	厚度	0.1-0.2mm
制造方法	CVI	来源	CVI
<b>压缩试验方法*</b>		试验文件ID#	多批
试验方法标准	C1258-97**	试验日期	3.91-2.99
归一化方法		载荷/应变速率	0.5%/min
模量计算方法	Instron IX FN, 19.3	比例极限计算方法	无

数据提交日期 3.01

<b>压缩试验 数据</b>	温度	23°C	
	气氛	空气	
	预调节	无	
	应力方向	0°	
		归一化	测量法
极限压缩强度 $F_c^{cu}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	545 42 59 21	
弹性模量 $E_x^s$ (GPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	191 7.14 56 21	
比例极限应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		
破坏应变 $\epsilon_x^{cu}$ (με)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	3807 717 55 21	
泊松比 $V_{\nu}^c$	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		

批准级别：F——正式批准；T——临时；S——筛选

\* 原文有误，为Tensile Test Method

\*\*原文有误，为C 1273-95和C 1359-96

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	C/SiC	制造商	Honeywell ACI
复合材料描述	C/C/CVI SiC	制造批号#	多批
增强体Vol%	45%	制造日期	3/91-2/99
密度	2.1±0.1 g/cc	制造类型	CVI
%孔隙率	~10%	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>C T300</b>	<b>制造厂商</b>
组分	C	结构/组织	平纹织物
层数	27	单层厚度	~0.1mm
织物单位重量	~100 g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90]
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>SiC</b>	<b>来源</b>
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	C
厚度	0.5μm	来源	CVI
<b>外部界面层</b>			
组分	SiC	厚度	0.1-0.2mm
制造方法	CVI	来源	CVI
<b>剪切试验方法</b>		试验文件ID#	多批
试验方法标准	ASTM C1292-95a	缺口距离	10 mm
归一化方法		试验日期	3/91-2/99

数据提交日期		3/01		
<b>剪切试验 数据</b>	温度	-157°C	23°C	
	气氛	空气	空气	
	预调节	无	无	
	归一化	测量值	归一化	测量值
极限层间	平均值	22.8		34.8
剪切强度	标准差	na		6.47
	试件数量	1		267
$F_{\text{剪}}^{\text{av}}$ (MPa)	批 数	1		24
	批准级别	S		F

<b>层间剪切 试验数据</b>	温度	23°C	
	气氛	空气	
	预调节	无	
	归一化	测量值	
极限层间	平均值	133	
剪切强度	标准差	na	
	试件数量	1	
$F_{\text{剪}}^{\text{av}}$ (MPa)	批 数	1	
	批准级别	S	

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

\* 原文有误, 为Tensile Test Method

## 18.2.4 CMC 体系 4#

复合材料				Honeywell ACI
复合材料名称	Hi-Nicalon/Mi SiC	制造商		
复合材料描述	SiC/BN/Mi SiC	制造批号#		多批
增强体Vol%	34-40%	制造日期		2.98-6.99
密度	2.6-2.75 g/cc	制造类型		CVI
%孔隙率	<5%	开发生产状态		市场可供应
增强体	名称	Hi-Nicalon	制造厂商	COI
组分		SiC	结构/组织	5综玻机织物
层数		8-12	单层厚度	~0.3mm
织物面积重量		~285g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0/90] <sub>n</sub>
基体	组分	SiC+硅化SiC	来源	熔融浆料浇铸渗透
界面相/纤维界面层			组分	氮化硼
厚度		-0.5μm	来源	CVI
外部界面层	组分	无	厚度	na
制造方法		na	来源	na
试验日期	2.98-6.99		数据提交日期	3.01
试验数据汇总		温度	23°C	1204°C
		气氛	空气	空气
		预埋节	无	无
归一化或剩余值		测量值	测量值	
弹性模量 $E_x^t$ (GPa)	平均值 批准级别	196 S	144 S	
弹性模量 $E_y^t$ (GPa)	平均值 批准级别	196 S	144 S	
弹性模量 $E_z^t$ (GPa)	平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{xy}^t$	平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{xz}^t$	平均值 批准级别			
泊松比 $\nu_{yz}^t$	平均值 批准级别			
剪切模量 $G_{xy}^s$ (GPa)	平均值 批准级别			
剪切模量 $G_{xz}^s$ (GPa)	平均值 批准级别			
剪切模量 $G_{yz}^s$ (GPa)	平均值 批准级别			
比例极限应力 $F^{pl}$ (N/Pa)	平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_x$	平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_y$	平均值 批准级别			
热传导率 $\alpha_z$	平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_x$	平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_y$	平均值 批准级别			
热膨胀系数 $K_z$	平均值 批准级别			

批准级别：F——法式批准；I——日本；S——苏达

<b>复合材料</b>		<b>Hi-Nicalon/Mi SiC</b>	<b>制造商</b>	<b>Honeywell ACI</b>
复合材料名称		SiC/BN/Mi SiC	制造批号#	多批
复合材料描述		34-40%	制造日期	2/98-6/99
增强体Vol%。		2.6-2.75 g/cc	制造类型	CVI
密度		<5%	开发/生产状态	市场可供应
%孔隙率				
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>Hi-Nicalon</b>	<b>制造商</b>	<b>C01</b>
组分		SiC	结构/组织	5综丝机织物
层数		8-12	单层厚度	~0.3mm
织物沉积重量		~285g/m <sup>2</sup>	层序的铺层顺序	[0°/90°]
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>SiC+硅化SiC</b>	<b>来源</b>	<b>熔融浆料浇铸渗透</b>
<b>界面层/纤维界面层</b>			<b>组分</b>	<b>氯化硼</b>
厚度		~0.5μm	<b>来源</b>	CVI
<b>外部界面层</b>	<b>组分</b>	<b>无</b>	<b>厚度</b>	<b>na</b>
制造方法		na	来源	na
试验日期	2/98-6/99		数据提交日期	3/01
<b>试验数据汇总</b>				
	温度	23°C	1204°C	
	气氛	空气	空气	
	载荷调节	无	无	
1) 化成测试值		测量值	测量值	
拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值	358	271	
	批准级别	S	S	
拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
回变 $\varepsilon_x^{tu}$ (με)	平均值	7430	5190	
	批准级别	S	S	
回变 $\varepsilon_y^{tu}$ (με)	平均值	7430	5190	
	批准级别	S	S	
回变 $\varepsilon_z^{tu}$ (με)	平均值			
	批准级别			
横向极限应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值	120	130	
	批准级别	S	S	
横向极限应力 $F_y^{pl}$ (MPa)	平均值	120	130	
	批准级别	S	S	
横向极限应力 $F_z^{pl}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
压缩强度 $F_x^{cu}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
压缩强度 $F_y^{cu}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
压缩强度 $F_z^{cu}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
面内剪切强度 $F_w^{su}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
层间剪切强度 $F_{xy}^{su}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
层间剪切强度 $F_{yz}^{su}$ (MPa)	平均值			
	批准级别			
弯曲强度 $F_v^b$ (MPa)	平均值			
	批准级别			

批准级别: F——正式批准; T——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>					
复合材料名称	Hi-Nicalon/Mi SiC	制造商	Honeywell ACI		
复合材料描述	SiC/BN/Mi SiC	制造批号#	多批		
增强体 Vol%	34-40%	制造日期	2.98-6/99		
密度	2.6-2.75 g/cc	制造类型	CVI		
%孔隙率	<5%	开发/生产状态	市场可供应		
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	Hi-Nicalon	制造厂商	COI	
组分	SiC	结构/组织	5综缎机织物		
层数	8-12	单层厚度	~0.3mm		
织物面积重量	~285g/m <sup>2</sup>	层压的铺层顺序	[0,90]ls		
<b>基体</b>	<b>组分</b>	SiC+硅化SiC	来源	熔融浆料浇铸渗透	
<b>界面相/纤维界面层</b>					
厚度	-0.5μm	组分	氯化硼		
<b>外部界面层</b>					
组分	无	厚度	na		
制造方法	na	来源	na		
<b>拉伸试验方法</b>					
试验方法标准	C1275-95和C1359-96	试验文件ID#	多批		
归一化方法		试验日期	2.98-6/99		
模量计算方法	3.5-69 MPa LS 拟合	载荷/应变速率	0.5%/min		
比例极限计算方法		比例极限计算方法	偏移屈服(0.005%)		

数据提交日期 3.01					
拉伸试验 数据	温度	-157°C	23°C		
	气氛	空气	空气		
预调节	预调节	无	无		
	工作段长度	na	na		
应力方向	应力方向	0°	0°		
		均一化	测量值	均一化	测量值
$F_x^{tu}$ (MPa)	平均值	358		271	
	标准差	34.6		19.6	
	试件数量	19		3	
	批次数	10		2	
	批准级别	S		S	
$E_x^t$ (GPa)	平均值	196		145	
	标准差	15.2		5.79	
	试件数量	19		3	
	批次数	10		2	
	批准级别	S		S	
$F_x^{pl}$ (MPa)	平均值	129		130	
	标准差	19.3		22.3	
	试件数量	19		3	
	批次数	10		2	
	批准级别	S		S	
$\varepsilon_x^{tu}$ (με)	平均值	7430		5190	
	标准差	1050		480	
	试件数量	19		3	
	批次数	10		2	
	批准级别	S		S	
$V_n^t$	平均值				
	标准差				
	试件数量				
	批次数				
	批准级别				

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——符合

\* 原文有误, 为23°C

### 18.2.5 CMC 体系 5<sup>#</sup>

<b>复合材料</b>			<b>COI CERAMICS</b>
复合材料名称	AS-N720-1	制造商	不同批次
复合材料描述	氧化物/氧化物	制造批号#	1997-1999
增强体Vol%	45%	制造日期	溶胶-凝胶法
密度	2.54g/cc	制造类型	市场可供应
孔隙率	25.5%	开发/生产状态	
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>Nextel 720</b>	<b>3M</b>
组分	氧化铝和莫来石	结构/机构	8综机织物
层数	12	单层厚度	0.229mm
纤维面积重量		层压的铺层顺序	[0°/90°] <sub>12s</sub>
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>氧化铝硅酸盐</b>	<b>溶胶-凝胶法</b>
界面相/纤维界面层		组分	无
厚度	na	来源	na
外基界面层	组分	无	厚度
制造方法	na	来源	na
试验日期	na	数据提交日期	3/01
<b>试验数据汇总</b>			
	温度	23°C	
	气氛	空气	
	气压调节	无	
归一化或测量值			测量值
弹性模量 $E_x^1$ (GPa)	平均值	75.8	
	批准级别		
弹性模量 $E_y^1$ (GPa)	平均值		
	批准级别		
弹性模量 $E_z^1$ (GPa)	平均值		
	批准级别		
泊松比 $V_{xy}^1$	平均值		
	批准级别		
泊松比 $V_{xz}^1$	平均值		
	批准级别		
剪切模量 $G_{yz}^1$ (GPa)	平均值		
	批准级别		
剪切模量 $G_{xz}^1$ (GPa)	平均值		
	批准级别		
剪切模量 $G_{xy}^1$ (GPa)	平均值		
	批准级别		
比例极限应力 $F^{pl}$ (MPa)	平均值		
	批准级别		
热传导率 $\alpha_x$	平均值		
	批准级别		
热传导率 $\alpha_y$	平均值		
	批准级别		
热传导率 $\alpha_z$	平均值		
	批准级别		
热膨胀系数 $K_x$	平均值		
	批准级别		
热膨胀系数 $K_y$	平均值		
	批准级别		
热膨胀系数 $K_z$	平均值		
	批准级别		

批准级别：F——正式批准；I——临时；S——筛选

<u>复合材料</u>							
复合材料名称	AS-N720-1	制造商	COI CERAMICS				
复合材料描述	氧化物/氯化物	制造批号#	不同批次				
增强体Vol%	45%	制造日期	1997-1999				
密度	2.54g/cc	制造类型	溶液-凝胶法				
%孔隙率	25.5%	开发/生产状态	市场可供应				
<u>增强体</u>	名称	Nextel 720	制造商	3M			
组分	氧化铝和莫来石	结构/组织	8综缎机织物				
层数	12	单层厚度	0.229mm				
纤维面积重量		层压的铺层顺序	[0/90]_S				
<u>基体</u>	组分	氧化铝硅酸盐	来源	溶液-凝胶法			
<u>界面相/纤维界面层</u>			组分	无			
厚度	na	来源	na				
<u>外轮廓面层</u>	组分	无	厚度	na			
制造方法		na	来源	na			
试验日期			数据提交日期	3.01			
<u>试验数据汇总</u>		温度 气氛 预调节	23°C 空气 无				
归一化或测量值			测量值				
拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别	222					
拉伸强度 $F_y^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别						
拉伸强度 $F_z^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别						
应变 $\varepsilon_x^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值 批准级别	3670					
应变 $\varepsilon_y^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值 批准级别						
应变 $\varepsilon_z^{tu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值 批准级别						
比例极限应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值 批准级别						
比例极限应力 $F_y^{pl}$ (MPa)	平均值 批准级别						
比例极限应力 $F_z^{pl}$ (MPa)	平均值 批准级别						
压缩强度 $F_x^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别	239					
压缩强度 $F_y^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别						
压缩强度 $F_z^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别						
面内剪切强度 $F_{xy}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别	14.4					
层间剪切强度 $F_{xz}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别	43.4					
层间剪切强度 $F_{yz}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别						
弯曲强度 $F_c^b$ (MPa)	平均值 批准级别						

批准级别: F——正式批准; I——初步; S——候选

<b>复合材料</b>				
复合材料名称	AS-N720-1	制造商	COI CERAMICS	
复合材料描述	氧化物/氧化物	制造批号#	不同批次	
增强体Vol%	45%	制造日期	1997-1999	
密度	2.54g/cc	制造类型	溶液-凝胶法	
%孔隙率	25.5%	开发/生产状态	市场可供应	
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>Nextel 720</b>	<b>制造厂商</b>	<b>3M</b>
组分	氧化铝和莫来石	结构/织构	8级丝机织物	
层数	12	单层厚度	0.229mm	
纤维面积重量		层压的铺层顺序	[0/90]_S	
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>氧化铝硅酸盐</b>	<b>来源</b>	<b>溶液-凝胶法</b>
<b>界面相/纤维界面层</b>			<b>组分</b>	<b>无</b>
厚度	na	来源	na	
<b>外部界面层</b>				
组分	无	厚度	na	
制造方法	na	来源	na	
<b>拉伸试验方法</b>			<b>试验文件ID</b>	<b>na</b>
试验方法标准	ASTM D3039	试验日期	na	
归一化方法	未归一化	载荷/应变速率	0.05 in/min	
校准计算方法	割线法, 0.01%-0.05%应变	比例极限计算方法	无	
数据提交日期	3/01			
<b>拉伸试验 数据</b>	<b>温度</b>	<b>23°C</b>		
	气氛	空气		
	环境带	无		
	上生段长度	na		
	荷重方向	0°		
		<b>归一化</b>	<b>测量值</b>	
<b>极限拉伸 强度 <math>F_t^u</math> (MPa)</b>	<b>平均值</b>		222	
	<b>标准差</b>		12.1	
	<b>试件数量</b>		11	
	<b>批 数</b>		na	
	<b>批准级别</b>			
<b>弹性模量 <math>E_s^t</math> (GPa)</b>	<b>平均值</b>		75.8	
	<b>标准差</b>		1.1	
	<b>试件数量</b>		8	
	<b>批 数</b>		na	
	<b>批准级别</b>			
<b>比例极限 应力 <math>F_t^{pl}</math> (MPa)</b>	<b>平均值</b>			
	<b>标准差</b>			
	<b>试件数量</b>			
	<b>批 数</b>			
	<b>批准级别</b>			
<b>破坏应变 <math>\varepsilon_t^u</math> (με)</b>	<b>平均值</b>		3670	
	<b>标准差</b>		180	
	<b>试件数量</b>		8	
	<b>批 数</b>		na	
	<b>批准级别</b>			
<b>泊松比 <math>V_{ta}^t</math></b>	<b>平均值</b>			
	<b>标准差</b>			
	<b>试件数量</b>			
	<b>批 数</b>			
	<b>批准级别</b>			

批准级别: F——正式批准; T——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	AS-N720-1	制造商	COI CERAMICS
复合材料描述	氧化物/氧化物	制造批号	不同批次
增强体 Vol%	45%	制造日期	1997-1999
密度	2.54g/cc	制造类型	溶胶-凝胶法
%孔隙率	25.5%	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	Nextel 720	制造商
组分	氧化铝和莫来石	结构/组织	8综缎机织物
层数	12	单层厚度	0.229mm
纤维面积重量		层压的铺层顺序	[0/90]s
<b>基体</b>	<b>组分</b>	氧化铝硅酸盐	来源
界面相/纤维界面层		组分	无
厚度	na	来源	na
<b>外部界面层</b>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<b>压缩试验方法</b>		试验文件ID	na
试验方法标准	ASTM D3410	试验日期	na
归一化方法	na	载荷/应变率	0.02 in/min
模量计算方法	割线法, 0.01%-0.05%应变	比例尺及计算方法	无

数据提交日期 3.01

<b>压缩试验 数据</b>	温度	23°C	
	气氛	空气	
	预调节	无	
	工件段长度	na	
	应力方向	0°	
		归一化	测量值
<b>极限压缩 强度</b> $F_c^{cu}$ (MPa)	平均值	239	
	标准差	14.1	
	试件数量	6	
	批 数	1	
	批准级别		
<b>弹性模量 <math>E_c</math> (GPa)</b>	平均值	80.6	
	标准差	1.65	
	试件数量	6	
	批 数	1	
	批准级别		
<b>比例极限 应力</b> $F_c^p$ (MPa)	平均值		
	标准差		
	试件数量		
	批 数		
	批准级别		
<b>破坏应变 <math>\varepsilon_c^{cu}</math> (<math>\mu\epsilon</math>)</b>	平均值	2990	
	标准差	250	
	试件数量	5	
	批 数	na	
	批准级别		
<b>泊松比 <math>\nu_{rr}^c</math></b>	平均值		
	标准差		
	试件数量		
	批 数		
	批准级别		

标记级别: F——正式批准; I——临时; S——首选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	AS-N720-1	制造商	COI CERAMICS
复合材料描述	氧化物/氯化物	制造批号#	不同批次
增强剂Vol%	45%	制造日期	1997-1999
密度	2.54g/cc	制造类型	溶胶-凝胶法
%孔隙率	25.5%	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>Nextel 720</b>	<b>3M</b>
组分	氧化铝和莫来石	结构/织构	8综缎机织物
层数	12	单层厚度	0.229mm
纤维直径/重量		层间的铺层顺序	10/90ds
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>氧化铝硅酸盐</b>	<b>熔吸-凝胶法</b>
<b>界面相 纤维界面层</b>			
		组分	无
厚度	na	来源	na
<b>外部界面层</b>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<b>剪切试验方法</b>		试验文件ID	
试验方法标准	na	缺口距离	na
门/飞刀去	na	试验日期	na
数据交叉日期		3.01	
<b>剪切试验</b>	<b>温度</b>	23°C	
<b>数据</b>	气氛	空气	
	环境调节	无	
		平均	测量值
极限强度	剪切率		14.4
剪切速度	材料		2.28
	法件数量		27
$F_{t0}^{su}$ (MPa)	加载		na
	标准级别		
<b>层间剪切</b>	<b>温度</b>	23°C	
<b>试验数据</b>	气氛	空气	
	环境调节	无	
		平均	测量值
极限层间	平均值		43.3
剪切强度	标准差		0.83
	法件数量		6
$F_{i0}^{su}$ (MPa)	批数		1
	标准级别		

批准级别: F——正式批准; T——临时; S——筛选

<u>复合材料</u>			
复合材料名称	AS-N720-I	制造商	COI CERAMICS
复合材料描述	氧化物/氧化物	制造批号#	不同批次
增强体Vol%	45%	制造日期	1997-1999
密度	2.54g/cc	制造类型	溶液-凝胶法
%孔隙率	25.5%	开发 生产状态	市场可供应
<u>增强体</u>	<u>名称</u>	Nextel 720	3M
组分	氧化铝和莫来石	结构 构造	8综编机织物
层数	12	单层厚度	0.229mm
纤维面积重量		层压的铺层顺序	[0/90]_S
<u>基体</u>	<u>组分</u>	氧化铝硅酸盐	溶液-凝胶法
<u>界面相/纤维界面层</u>		组分	无
厚度	na	来源	na
<u>外部界面层</u>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<u>弯曲试验方法</u>		试验文件ID	na
试验方法标准	ASTM D790	几何形状(3点/4点)	4点-1/4点
外跨距(mm)	122mm	跨距 深度比	20
模量计算方法	割线法, 0.01%-0.05%应变	比例段及计算方法	无
归一化方法		试验日期	na
数据提交日期	3.01		
<u>弯曲试验 数据</u>	<u>温度 气氛 预调节 应力方向</u>	23°C 空气 无 0°	
		归一化	测量值
板形弯曲 强度 $F_x^{bu}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	259 40.4 27 na	
弹性模量 $E^b$ (GPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	93.7 10.0 27 na	
比例极限 应力 $F_x^{pl}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		
破坏应变 $\epsilon_x^{bu}$ ( $\mu\epsilon$ )	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	2770 370 27 na	
泊松比 $\nu_{xy}^b$	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——草图

## 18.2.6 CMC 体系 6<sup>#</sup>

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	Sylramic S-200	制造商	COI
复合材料描述	SiC/BN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	制造批号#	#14416
增强体Vol%	45%	制造日期	1997夏
密度	2.2g/cc	制造类型	预陶瓷聚合物
%孔隙率	2.7%Open	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>CG Nicalon</b>	<b>COI</b>
组分	SiC	结构/机构	8综玻机织物
层数	8	单层厚度	0.346mm
织物面积重量		层压的铺层顺序	[0/90/0/90/0/90/0/90/0]s
<b>基体</b>	<b>组分</b>	Si-C-N w/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 颗粒填料	<b>COI</b>
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	氮化硼
厚度	0.5μm	来源	CVD
<b>外部界面层</b>	<b>组分</b>	无	厚度
制造方法	na	来源	na
试验日期	12-97-10-98	数据提交日期	3-01

<b>试验数据汇总</b>	温度	23°C
	气氛	空气
	预调节	无
<b>力学性能</b>		<b>测量值</b>
弹性模量 $E_1^t$ (GPa)	平均值	93.0
	批准级别	
弹性模量 $E_3^t$ (GPa)	平均值	93.0
	批准级别	
泊松比 $V_{12}^t$	平均值	
	批准级别	
泊松比 $V_{32}^t$	平均值	
	批准级别	
剪切模量 $G_{12}^s$ (GPa)	平均值	
	批准级别	
剪切模量 $G_{32}^s$ (GPa)	平均值	
	批准级别	
剪切模量 $G_{21}^s$ (GPa)	平均值	
	批准级别	
比例极限应力 $F_p^t$ (MPa)	平均值	
	批准级别	
热传导率 $\alpha_x$	平均值	
	批准级别	
热传导率 $\alpha_z$	平均值	
	批准级别	
热膨胀系数 $K_x$	平均值	
	批准级别	
热膨胀系数 $K_z$	平均值	
	批准级别	
热膨胀系数 $K_z$	平均值	
	批准级别	

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	Sylramic S-200	制造商	COI
复合材料描述	SiC/BN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	制造批号#	#14416
增强体Vol%	45%	制造日期	1997夏
密度	2.2g/cc	制造类型	预陶瓷聚合物
%孔隙率	2.7%Open	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	名称	CG Nicalon	制造商
组分	SiC	结构/组织	8综锻机织物
层数	8	单层厚度	0.346mm
织物面/积量		层压的铺层顺序	[0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°]
<b>基体</b>	组分	Si-C-N w/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 颗粒填料	来源
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	氮化硼
厚度	0.5μm	来源	CVD
<b>外部界面层</b>	组分	无	na
制造方法	na	来源	na
试验日期	12-97-10-98	数据提交日期	3-01
<b>试验数据汇总</b>		温度	23°C
归一化或测量值		气氛	空气
预调节		无	
拉伸强度 $F_x^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别	251	
拉伸强度 $F_y^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别	251	
拉伸强度 $F_z^{tu}$ (MPa)	平均值 批准级别		
应变 $\varepsilon_x^{tu}$ (με)	平均值 批准级别	4310	
应变 $\varepsilon_y^{tu}$ (με)	平均值 批准级别	4310	
应变 $\varepsilon_z^{tu}$ (με)	平均值 批准级别		
比例极限应力 $F_x^{pu}$ (MPa)	平均值 批准级别	85.0	
比例极限应力 $F_y^{pu}$ (MPa)	平均值 批准级别	85.0	
比例极限应力 $F_z^{pu}$ (MPa)	平均值 批准级别		
压缩强度 $F_x^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别		
压缩强度 $F_y^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别		
压缩强度 $F_z^{cu}$ (MPa)	平均值 批准级别		
面内剪切强度 $F_{xy}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别	33.0	
层间剪切强度 $F_{yz}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别	111	
层间剪切强度 $F_{xz}^{su}$ (MPa)	平均值 批准级别	111	
弯曲强度 $F_x^b$ (MPa)	平均值 批准级别	339	

批准级别：F——正式批准；T——临时；S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	Sylramic S-200	制造商	COI
复合材料描述	SiC/BN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	制造批号#	#14416
增强体Vol%	45%	制造日期	1997夏
密度	2.2g/cc	制造类型	预陶瓷聚合物
%孔隙率	2.7%Open	开发/生产状态	市场可供应
<u>增强体</u>	<u>名称</u>	CG Nicalon	COI
组分	SiC	结构/组织	8缕缎机织物
层数	8	单层厚度	0.346mm
织物沉积重量		层间的错层顺序	[0/-90/-0/+90/+90/-0]
<u>基体</u>	<u>组分</u>	Si-C-N w/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 颗粒填料	COI
界面相/纤维界面层		组分	氯化硼
厚度	0.5μm	来源	CVD
<u>外部界面层</u>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<u>拉伸试验方法</u>		试验文件ID	na
试验方法标准	ASTM C1275	试验日期	3/98-9/98
归一化方法		载荷/应变速率	0.02 mm/s
极限计算方法	na	比例极限计算方法	载荷下延伸

数据提交日期

3.01

<u>拉伸试验 数据</u>	温度 气氛 风调节 工作段长度 应力方向	23°C 空气 无 25mm 0°	
		归一化	
极限拉伸 强度 $F_{\text{t}}^{\text{u}}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	251 18.0 90 6	
弹性模量 $E_{\text{t}}^{\text{u}}$ (GPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	93.0 4.65 90 6	
比例极限 应力 $F_{\text{t}}^{\text{pl}}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	85.0 3 90 6	
破坏应变 $\epsilon_{\text{t}}^{\text{u}}$ (με)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别	4310 390 89 6	
泊松比 $\nu_{\text{t}}$	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	Sylramic S-200	制造商	COI
复合材料描述	SiC/BN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	制造批号#	#14416
增强体Vol%	45%	制造日期	1997夏
密度	2.2g/cc	制造类型	预陶瓷聚合物
%孔隙率	2.7%Open	开发生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	CG Nicalon™	制造商
组分	SiC	结构/组织	8综缎机织物
层数	8	单层厚度	0.346mm
织物面積重量		层压的铺层顺序	[0°/90°/0°/90°/0°/90°/0°]
<b>基体</b>	<b>组分</b>	Si-C-N w/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub> 颗粒填料	来源
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	氮化硼
厚度	0.5μm	来源	CVD
<b>外部界面层</b>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<b>剪切试验方法</b>			
试验方法标准	ASTM C1292	试验文件ID	na
归一化方法		缺口距离	6mm
试验日期		试验日期	7/98-10/98

数据提交日期 3/01

剪切试验 数据	温度	23°C	
	气压	空气	
	预调节	无	
		归一化	测量值
极表面对内 剪切强度 $F_{t,0}^{av}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		33.0 5.0 70 6

层间剪切 试验数据	温度	23°C	
	气压	空气	
	预调节	无	
		归一化	测量值
极表层间 剪切强度 $F_{t,0}^{av}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		111 5.0 80 6

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

<b>复合材料</b>			
复合材料名称	Sylramic S-200	制造商	COI
复合材料描述	SiC/BN/Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>	制造批号#	#14416
增强体Vol%	45%	制造日期	1997夏
密度	2.2g/cc	制造类型	预陶瓷聚合物
%孔隙率	2.7%Open	开发/生产状态	市场可供应
<b>增强体</b>	<b>名称</b>	<b>CG Nicalon</b>	<b>COI</b>
组分	SiC	结构/组织	8综编机织物
层数	8	单层厚度	0.346mm
织物面层重量		层压的铺层顺序	[0/90/0/90/90/0/0]
<b>基体</b>	<b>组分</b>	<b>Si-C-N w/Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub> 颗粒填料</b>	<b>COI</b>
<b>界面相/纤维界面层</b>		组分	氮化硼
厚度	0.5μm	来源	CVD
<b>外部界面层</b>			
组分	无	厚度	na
制造方法	na	来源	na
<b>弯曲试验方法</b>		试验文件ID	
试验方法标准	ASTM C1341	几何形状(3点/4点)	4点
跨距(mm)	80mm	跨距/深度比	29.2
模型计算方法	na	比例极限计算方法	na
归一化方法		试验日期	12/97-4/98

数据提交日期 3.01

<b>弯曲试验 数据</b>	温度 气氛 预调节 应力方向	23°C 空气 无 0°	
		归一化	测量值
极限弯曲 速度 $F_c^{bu}$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		339 37.0 100 6
弹性模量 $E^b$ (GPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		93.0 6.00 100 6
比例极限 应力 $F_p^b$ (MPa)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		
破坏应变 $\epsilon_x^{bu}$ (με)	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		4640 630 100 6
泊松比 $\nu^b$	平均值 标准差 试件数量 批 数 批准级别		

批准级别: F——正式批准; I——临时; S——筛选

## 附录A LCF和破坏载荷中剩余强度减缩公式推导（公式6-11）

这种方法的主要前提是，某种材料性能的下降即其剩余强度 $X$ 是疲劳应力和循环的函数，也是破坏应力和时间的函数。当剩余强度或残余的强度等于所作用应力的时候，损伤起始。在这里，剩余强度和残余的强度是可以互换使用的。图A.1表示了在常幅疲劳载荷下，CMC剩余强度相对于归一化循环数的理论函数曲线。根据经验，图A.1中的剩余强度下降典型地呈非线性关系，可以用一个表达式来适当地模拟

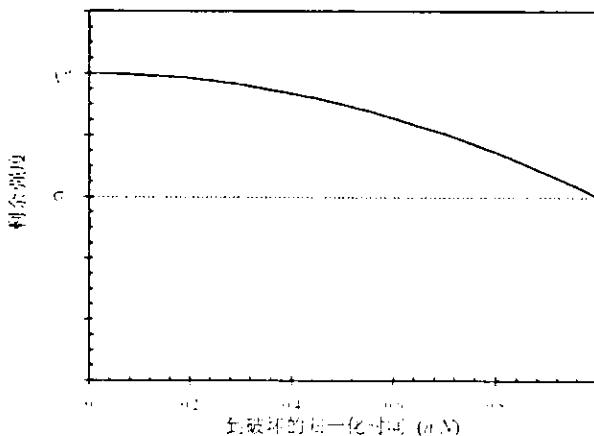
$$X = X^0 - \left[ X^0 - \sigma_r \left( \frac{n}{N} \right)^p \right] \quad (A.1)$$

式中， $X$ 代表材料的剩余强度， $X^0$ 是初始强度， $\sigma_r$ 是应力范围， $n$ 是在 $\sigma_r$ 应力作用下的循环次数， $N$ 是在S-N曲线中在 $\sigma_r$ 作用下到达失效的循环次数， $p$ 是疲劳的剩余强度形状参数。如果 $p > 1$ ，剩余强度曲线的形状将向下凹，如图所示。可以相对于材料的初始强度 $X^0$ 将(A.1)归一化，得到

$$R = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma}{X^0} \right] \left( \frac{n}{N} \right)^p \quad (A.2)$$

式中， $R$ 是归一化剩余强度，对于 $n$ 微分(A.2)，可得

$$dR = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma}{X^0} \right] \times p \left( \frac{n}{N} \right)^{p-1} d \left( \frac{n}{N} \right) \quad (A.3)$$



图A.1 剩余强度-归一化循环次数关系曲线 ( $p=2.0$ )

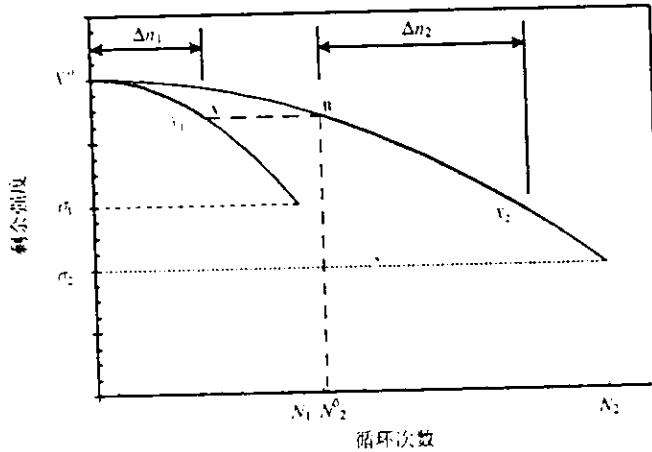
如果假设 $\sigma$ 在零件的整个使用过程中不是一成不变的，为了得到 $R$ ，需要对于不同 $\sigma_r$ 所有对应微分 $dR$ 取总和。用数学公式表示则有

$$R = 1 - \int \left[ 1 - \frac{\sigma}{X^0} \right] \times p \left( \frac{n}{N} \right)^{p-1} d \left( \frac{n}{N} \right) \quad (A.4)$$

对于复杂载荷，用平均应力和TMF影响修正后的 $\sigma_r$ 来代替 $\sigma$ 。根据这一点，我们回到式(A.2)，用 $\sigma_r$ 代替 $\sigma$ ，得到

$$R = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma_r}{X^0} \right] \left( \frac{n}{N} \right)^p \quad (A.5)$$

现考虑由 $\sigma_1$ 应力下循环次数 $\Delta n_1$ 和 $\sigma_2$ 应力下循环次数 $\Delta n_2$ 组成的载荷历程：假设 $\sigma_1 > \sigma_2$ ；可确定 $\Delta n_1 + \Delta n_2$ 个循环之后的剩余强度 $R_2$ 。剩余强度的计算见图A.2。对于初始为的 $\Delta n_1$ 个循环，强度沿曲线A-B下降。利用(A.5)式，经过 $\Delta n_1$ 个循环后的剩余强度为：



图A.2 西级载荷历程情况的剩余强度降低

$$R_1 = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma_1}{X^\circ} \right] \left( \frac{\Delta n_1}{N_1} \right)^p \quad (\text{A.6})$$

以及

$$X_1 = R_1 X^\circ \quad (\text{A.7})$$

为了从应力 $\sigma_1$ 向 $\sigma_2$ 转换，需要沿着线B-C移动，并必须计算C点处的等价循环 $n_2^0$ 以得到当前的剩余强度。根据等价剩余强度的概念和式(A.5)，也可以写成：

$$R_1 = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma_2}{X^\circ} \right] \left( \frac{n_2^0}{N_2} \right)^p \quad (\text{A.8})$$

整理这个等式，即

$$n_2^0 = N_2 \left[ \frac{1 - R_1}{1 - \frac{\sigma_2}{X^\circ}} \right]^{1/p} \quad (\text{A.9})$$

式中， $R_1$ 由式(A.6)确定。接着，将沿着线C-D继续 $\Delta n_2$ 个循环的强度下降，而在D点处的剩余强度 $R_2$ 则为：

$$R_2 = 1 - \left[ 1 - \frac{\sigma_2}{X^\circ} \right] \left( \frac{n_2^0 + \Delta n_2}{N_2} \right)^p \quad (\text{A.10})$$

由(A.10)减去(A.8)，得

$$\Delta R_2 = \left[ 1 - \frac{\sigma_2}{X^\circ} \right] \left\{ \left( \frac{n_2^0 + \Delta n_2}{N_2} \right)^p - \left( \frac{n_2^0}{N_2} \right)^p \right\} \quad (\text{A.11})$$

$$R_2 = R_1 - \Delta R_2 \quad (\text{A.12})$$

和

$$X_2 = R_2 X^{\circ} \quad (\text{A.13})$$

采用一般形式，可以写出第*i*次循环的式(A.9), (A.11)和(A.12)为：

$$n_i^{\circ} = N_i \left[ \frac{1 - R_{i-1}}{1 - \frac{\sigma_i}{X^{\circ}}} \right]^{1/p} \quad (\text{A.14})$$

$$\Delta R_i = - \left[ 1 - \frac{\sigma_i}{X^{\circ}} \right] \left\{ \left( \frac{n_i^{\circ} + \Delta n_i}{N_i} \right)^p - \left( \frac{n_i^{\circ}}{N_i} \right)^p \right\} \quad (\text{A.15})$$

$$R_i = R_{i-1} - \Delta R_i \quad (\text{A.16})$$

以及

$$X_i = R_i X^{\circ} \quad (\text{A.17})$$

可以对破坏载荷进行同样的推导，得到与上面基本相同的公式，只是将*n*, *N*, *p*, *k*分别代以*t*, *T<sub>rupt</sub>*, *q*和*j*：式中*t*为时间，*T<sub>rupt</sub>*为破坏寿命，*q*为破坏形状参数，而*j*为载荷级数。这些破坏公式如下

$$t_j^{\circ} = T_{\text{rupt},j} \left[ \frac{1 - R_{j-1}}{1 - \frac{\sigma_j}{X^{\circ}}} \right]^{1/q} \quad (\text{A.18})$$

$$\Delta R_j = - \left[ 1 - \frac{\sigma_j}{X^{\circ}} \right] \left\{ \left( \frac{t_j^{\circ} + \Delta t_j}{T_{\text{rupt},j}} \right)^q - \left( \frac{t_j^{\circ}}{T_{\text{rupt},j}} \right)^q \right\} \quad (\text{A.19})$$

$$R_j = R_{j-1} - \Delta R_j \quad (\text{A.20})$$

而可以计算出降低后的强度*X*为

$$X_j = R_j X^{\circ} \quad (\text{A.21})$$

当作用应力超过剩余强度的时候，即当

$$\sigma \geq X \quad (\text{A.22})$$

时预计损伤起始。式(A.14)到式(A.22)是剩余强度方法的核心。这些公式比较简单，可以在计算机程序内执行，处理复杂的载荷历程。

