

美国军用手册 MIL-HDBK-17F

复合材料手册

第五卷 陶瓷基复合材料

中国飞机强度研究所
西北工业大学
国防科技工业标准化研究中心

TB 33
1014-E

TB33
1014-E1

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



本书承《复合材料手册》译校工作组惠赠
特此致谢
南京航空航天大学 2005年3月28日



200537202

二〇〇四年九月

200537202

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 Do not cite this document as a requirement.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 俭 王 林 石定杜
孙曼林 羊 姪 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 俭 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机织结构	84
3.4.2.3	3-D结构	84
3.4.2.4	2-D编织结构	84
3.4.2.5	3-D编织结构	84
3.4.3	机织和编织织物的制造商	84
3.5	外部防护界面层	85
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
3.6	表征方法（化学的和微观结构的）	87
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 CMC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
第4章 最终产品的质量控制的.....	97
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
第5章 应用、各种情况的历史和经验教训.....	97
参考文献	98
PART B 设计和可支持性	
第6章 设计和分析	101
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	材料取证	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

第9章 提交MIL-HDBK-17数据用的材料试验和表征	113
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
第10章 增强体评估	141
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
第11章	基体材料评估	142
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
第12章	界面材料评估	143
第13章	复合材料评估	143
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
第14章	组合件试验——问题综述	145
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
第15章	机械加工和研磨	146
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
PART D 数据要求及数据集		
第16章	数据提交、格式和要求	147
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
第17章	统计方法	176
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
17.2	背景	176
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
17.3	基于统计的材料性能计算	176
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
17.4	各种统计学方法	177
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
17.5	统计表和近似	177
第18章	CMC性能数据	178
18.1	引言	178
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
18.2	CMC体系——性能数据	178
18.2.1	CMC体系1 [#]	178
18.2.2	CMC体系2 [#]	183
18.2.3	CMC体系3 [#]	189
18.2.4	CMC体系4 [#]	195
18.2.5	CMC体系5 [#]	198
18.2.6	CMC体系6 [#]	204
附录A	LCF和破坏载荷中剩余强度减缩公式推导（公式6-11） ..	209

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