

美国军用手册 MIL-HDBK-17F

复合材料手册

第三卷 聚合物基复合材料的
使用、设计和分析

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

7B 33

1014-C

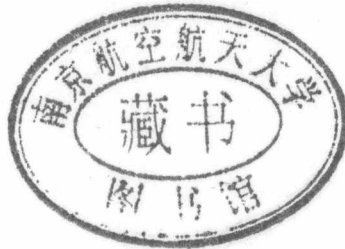
TB33
1014-C1

MIL-HDBK-17F VI
2002年6月17日

代替
MIL-HDBK-17-3E
1997年1月23日

复合材料手册

第三卷 聚合物基复合材料的使用、设计和分析



本书承《复合材料手册》译校工作组惠赠
特此
南航
2005年3月28日



200537200

二〇〇四年九月

200537200

NOT MEASUREMENT
SENSITIVE

MIL-HDBK-17-3F
Volume 3 of 5
17 JUNE 2002

Superseding
MIL-HDBK-17-3E
23 JANUARY 1997

DEPARTMENT OF DEFENSE
HANDBOOK

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK

VOLUME 3. POLYMER MATRIX COMPOSITES
MATERIALS' USAGE, DESIGN, AND ANALYSIS



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 Do not cite this document as a requirement.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，在此一并表示感谢。

译校工作组
2004年7月

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” 第三卷译校名单

章 号	翻 译	校 对
第 1 章	丁惠梁	沈真
第 2 章	石定杜	沈真、孙曼林
第 3 章	石定杜	沈真
第 4 章	丁惠梁	沈真
第 5 章	童贤鑫	马祖康、羊姪
第 6 章	谢鸣九	羊姪、沈真
第 7 章	沈真、郑锡涛	丁惠梁、沈真
第 8 章	丁惠梁	徐继南
第 9 章	李野	羊姪
第 10 章	李野	陶梅贞
第 11 章	李野	陶梅贞
第 12 章	沈真	丁惠梁

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。

目 录

第1章 总的说明

1.1 引言	1
1.2 目标、范围与第三卷的组成	1
1.3 符号、缩写及单位制	2
1.3.1 符号及缩写	2
1.3.1.1 组分的性能	7
1.3.1.2 单层与层压板	8
1.3.1.3 下标	9
1.3.1.4 上标	10
1.3.1.5 缩写词	11
1.3.2 单位制	13
1.4 定义	14

第2章 材料和工艺——变异性对复合材料性能的影响

2.1 引言	34
2.2 目的	34
2.3 范围	34
2.4 组分材料	35
2.4.1 纤维	35
2.4.1.1 碳和石墨纤维	35
2.4.1.2 芳纶	38
2.4.1.3 玻璃	40
2.4.1.4 硼	44
2.4.1.5 氧化铝	46
2.4.1.6 碳化硅	47
2.4.1.7 石英	47
2.4.1.8 超高分子量聚乙烯	50
2.4.2 树脂	53
2.4.2.1 概述	53
2.4.2.2 环氧	53
2.4.2.3 聚酯(热固性)	53
2.4.2.4 酚醛	54
2.4.2.5 双马来酰亚胺	54
2.4.2.6 聚酰亚胺	55
2.4.2.7 热塑性材料	56
2.4.2.8 特种与新兴树脂体系	59

2.5 产品形式的成形	59
2.5.1 织物和预成形件	59
2.5.1.1 机织物	59
2.5.2 预浸渍的形式	60
2.5.2.1 预浸无捻粗纱	60
2.5.2.2 预浸带	61
2.5.2.3 预浸织物	62
2.5.2.4 预压实热塑性塑料片材	62
2.6 装运和贮存过程	62
2.6.1 包装	62
2.6.2 运送	62
2.6.3 开启包装与贮存	63
2.7 制作工艺	63
2.7.1 手工铺贴	63
2.7.2 单向带自动铺设/单向带自动铺叠	63
2.7.2.1 背景	63
2.7.2.2 效益/能力	63
2.7.2.3 变异性来源	64
2.7.3 自动纤维束铺放/纤维铺放	64
2.7.3.1 背景	64
2.7.3.2 纤维铺放工艺流程	65
2.7.3.3 效益/能力	65
2.7.3.4 材料产品形式	66
2.7.3.5 专门考虑的问题	67
2.7.4 编织	69
2.7.5 纤维缠绕	69
2.7.6 拉挤	70
2.7.7 夹层结构	70
2.7.8 胶粘剂胶接	71
2.7.9 预结合水分	73
2.8 固化和压实工艺	73
2.8.1 真空袋模压	73
2.8.2 烘箱固化	74
2.8.3 热压罐固化工艺	74
2.8.3.1 一般说明	74
2.8.3.2 变异性来源	75
2.8.4 压机模压	75
2.8.5 整体加热模具	75
2.8.6 拉挤型模固化和压实	76

2.8.7 树脂传递模塑 (RTM)	76
2.8.8 热成形	79
2.9 装配工艺	79
2.10 工艺过程控制	80
2.10.1 普通工艺过程控制方案	80
2.10.1.1 经验方法	80
2.10.1.2 基于传感器主动控制	80
2.10.1.3 基于模型的被动控制	80
2.10.2 实例——热固性复合材料的热压罐固化	80
2.10.2.1 固化度	81
2.10.2.2 黏度	81
2.10.2.3 树脂压力	82
2.10.2.4 空隙预防措施	83
2.10.2.5 流动	83
2.11 制定材料与工艺规范	83
2.11.1 规范的类型	83
2.11.1.1 材料规范	83
2.11.2 规范的格式	84
2.11.2.1 范围	84
2.11.2.2 适用的文件	84
2.11.2.3 技术要求/工艺过程控制	84
2.11.2.4 验收检验和合格鉴定试验	84
2.11.2.5 交付	85
2.11.2.6 说明	85
2.11.2.7 批准的货源及其他	85
2.11.3 规范示例	85
2.11.3.1 行业规范	85
2.11.3.2 军用规范	85
2.11.4 结构管理	85
参考文献	87

第3章 生产材料和工艺过程的质量控制

3.1 引言	89
3.2 材料采购质量保证程序	89
3.2.1 规范和文件	89
3.2.2 验收检验	89
3.3 部件制造检验	91
3.3.1 工艺过程检验	91
3.3.2 无损检测	92
3.3.3 破坏性试验	93

3.3.3.1	背景	93
3.3.3.2	用途	93
3.3.3.3	破坏性试验方法	93
3.3.3.4	实施指南	94
3.3.3.5	试验类型	95
3.4	统计的工艺过程控制	95
3.4.1	引言	95
3.4.2	质量手段	95
3.4.3	收集和标绘数据	95
3.4.4	控制图表	95
3.4.5	工艺能力	95
3.4.6	故障排除与改进	96
3.4.6.1	工艺反馈调整	96
3.4.6.2	试验设计	98
3.4.6.3	Taguchi	102
3.4.7	批验收	103
3.5	材料和工艺过程变化的处理	103
3.5.1	引言	103
3.5.2	新材料或工艺过程的取证	103
3.5.2.1	问题说明	103
3.5.2.2	业务情况	103
3.5.2.3	差异与风险	105
3.5.2.4	技术上的可接受性	105
3.5.2.5	许用值的建立和等效性确认	105
3.5.2.6	生产准备状态	105
3.5.2.7	经验教训	105
3.5.3	差异和风险	105
3.5.3.1	差异	106
3.5.3.2	风险评估	108
3.5.3.3	风险分析	108
3.5.4	生产准备状态	109
	参考文献	110
第4章	复合材料结构的积木式方法	111
4.1	引言与原理	111
4.2	基本原理与假设	114
4.3	方法	115
4.3.1	一般方法	115
4.4	具体应用考虑	116
4.4.1	飞机原型	116

4.4.1.1	DoD/NASA原型飞机结构聚合物基复合材料许用值的生成	116
4.4.1.2	DoD/NASA原型飞机的PMC复合材料积木式结构研制.....	118
4.4.1.3	DoD/NASA原型复合材料飞机结构的许用值和积木式试验任务小结	122
4.4.2	工程制造发展型(EMD)飞机和生产型的飞机.....	122
4.4.2.1	用于DoD/NASA EMD和生产型飞机结构的PMC复合材料许用值生成.....	122
4.4.2.2	DOD/NASA EMD和生产型飞机的PMC复合材料积木式结构研制.....	124
4.4.2.3	DoD/NASA EMD和生产型复合材料飞机结构许用值和积木式试验任务 小结	126
4.4.3	商用飞机	127
4.4.3.1	引言	127
4.4.3.2	积木式方法	127
4.4.3.2.1	取证的方法	128
4.4.3.3	复合材料路线图	129
4.4.3.4	商用的积木式方法	131
4.4.3.5	A组, 材料性能的确定.....	131
4.4.3.6	B组, 确定设计值.....	133
4.4.3.7	C组, 分析验证.....	135
4.4.3.8	波音777飞机复合材料主结构的积木式方法.....	135
4.4.4	公务飞机和私人飞机	141
4.4.4.1	高性能飞机	141
4.4.4.2	轻型飞机和微型机	145
4.4.5	旋翼飞机	145
4.4.5.1	设计许用值试验	146
4.4.5.2	设计发展试验	148
4.4.5.3	全尺寸验证试验	150
4.4.6	宇宙飞船	152
4.5	特定工艺和材料形式的特殊考虑和变化	152
4.5.1	室温	152
	参考文献	153

第5章 设计与分析

5.1	引言	154
5.2	单层的基本性能和细观力学	154
5.2.1	假设	155
5.2.1.1	材料的均质性假设	155
5.2.1.2	材料的正交各向异性假设	155
5.2.1.3	材料的线性假设	155
5.2.1.4	残余应力	155
5.2.2	纤维(增强)复合材料: 物理性能.....	155
5.2.2.1	弹性性能	156

5.2.2.2	粘弹性性能	159
5.2.2.3	热膨胀和湿膨(泡)胀	161
5.2.2.4	热传导和湿扩散	163
5.2.3	纤维(增强)复合材料:强度和破坏	164
5.2.3.1	轴向拉伸强度	165
5.2.3.2	轴向压缩强度	166
5.2.3.3	基体模式的强度	168
5.2.4	组合应力下的强度	168
5.2.5	小结	170
5.3	层压板分析	171
5.3.1	单层的应力-应变关系	171
5.3.2	层压板理论	174
5.3.3	层压板的性能	178
5.3.3.1	薄膜应力	179
5.3.3.2	弯曲	181
5.3.3.3	热膨胀	183
5.3.3.4	湿膨胀	186
5.3.3.5	传导	186
5.3.4	湿热分析	186
5.3.4.1	对称层压板	188
5.3.4.2	非对称层压板	188
5.3.5	层压板的应力分析	189
5.3.5.1	机械载荷引起的应力	189
5.3.5.2	由温度和湿度引起的应力	190
5.3.5.3	网格分析	191
5.3.5.4	层间应力	193
5.3.5.5	非线性应力分析	193
5.3.6	小结	193
5.4	层压板的强度和失效	194
5.4.1	后续层失效(分析)方法	194
5.4.1.1	初始层	194
5.4.1.2	后续失效	197
5.4.2	纤维失效分析方法(层压板级失效)	197
5.4.3	层压板设计	199
5.4.4	应力集中	200
5.4.5	分层	201
5.4.5.1	压缩	203
5.4.6	损伤和失效模式	204
5.4.6.1	拉伸	204

5.4.6.2	压缩	205
5.4.7	小结	206
5.5	复杂载荷	206
5.5.1	面内双轴向载荷	206
5.5.2	面外载荷	207
5.6	由单层到层压板的考虑	207
5.6.1	残余应力和残余应变	207
5.6.2	厚度效应	207
5.6.3	边缘效应	207
5.6.4	单向带横向拉伸性能的影响	209
5.6.5	层压板铺层顺序的影响	209
5.6.5.1	引言	209
5.6.5.2	设计指南	210
5.6.6	单层和层压板的统计数据	211
5.6.7	小结	211
5.7	压缩屈曲和压损	212
5.7.1	平板的屈曲和压损	212
5.7.1.1	引言	212
5.7.1.2	初始屈曲	213
5.7.1.3	单轴载荷——所有边简支的长平板	213
5.7.1.4	单轴载荷——所有边固支的长平板	214
5.7.1.5	单轴载荷——三边简支、一非受载边自由的长平板	214
5.7.1.6	单轴和双轴载荷——所有边简支的平板	214
5.7.1.7	单轴载荷——加载边简支、非加载边固支的平板	215
5.7.1.8	铺层顺序对屈曲的影响	215
5.7.2	压缩后屈曲和压损	217
5.7.2.1	分析模型	221
5.7.2.2	疲劳影响	222
5.7.2.3	压损曲线的确定	223
5.7.2.4	筋条压损强度的确定	223
5.7.2.5	转角半径和填充料的影响	225
5.7.2.6	细长比修正	225
5.7.3	小结	225
5.8	毯式曲线	225
5.9	蠕变和松弛	225
5.10	疲劳	226
5.11	振动	226
5.11.1	引言	226
5.11.2	铺层顺序的影响	226

5.12 结构的其他性能	226
5.13 计算程序	227
5.14 验证要求	227
参考文献	228

第6章 连接的结构特性

6.1 序言	233
6.2 胶接连接	234
6.2.1 引言	234
6.2.2 连接设计考虑	235
6.2.2.1 被胶接件厚度的影响: 被胶接件破坏与胶接破坏的关系	235
6.2.2.2 连接几何形状的影响	235
6.2.2.3 被胶接件刚度不匹配的影响	236
6.2.2.4 胶粘剂韧性响应的影响	237
6.2.2.5 复合材料被胶接件的性能	238
6.2.2.6 胶接缺陷的影响	239
6.2.2.7 胶接连接的耐久性	240
6.2.3 胶接连接的应力和结构特性	242
6.2.3.1 概述	242
6.2.3.2 胶粘剂剪应力	242
6.2.3.3 剥离应力	246
6.2.3.4 等厚度被胶接件的单搭接和双搭接	247
6.2.3.5 斜削和多阶梯被胶接件	260
6.2.3.6 有限元建模	268
6.2.4 胶粘剂的力学响应	269
6.2.5 复合材料被胶接件的力学响应	269
6.2.6 胶接连接结论	270
6.3 机械紧固连接	270
6.3.1 引言	270
6.3.2 结构分析	270
6.3.2.1 连接中的载荷分配	270
6.3.2.2 螺栓连接局部破坏分析	272
6.3.2.3 失效准则	277
6.3.3 设计考虑	278
6.3.3.1 几何形状	278
6.3.3.2 铺贴和铺层顺序	278
6.3.3.3 紧固件选择	278
6.3.4 疲劳	279
6.3.4.1 载荷模式的影响	279
6.3.4.2 连接几何形状的影响	280

6.3.4.3	接头细节的影响	280
6.3.4.4	层压板铺层比例的影响	280
6.3.4.5	环境的影响	281
6.3.4.6	试件厚度的影响	281
6.3.4.7	剩余强度	281
6.3.5	试验验证	281
	参考文献	283

第7章 损伤阻抗、耐久性和损伤容限

7.1	概述和一般指南	287
7.1.1	原理	287
7.1.2	与复合材料有关的内容	287
7.1.3	通用指南	288
7.1.4	各节的安排	289
7.2	飞机损伤容限	290
7.2.1	涉及到的军用和民用航空要求	290
7.2.2	与航空条例符合性的方法	295
7.2.2.1	对静强度要求的符合性 (民用航空)	295
7.2.2.2	对损伤容限要求的符合性 (民用航空)	296
7.2.2.3	确定性符合方法 (民用航空的例子)	299
7.2.2.4	概率或半概率符合性方法 (民用航空)	303
7.2.2.5	确定性方法和概率方法的比较	308
7.2.2.6	用于结构验证的全尺寸试验 (民用航空)	308
7.3	损伤类型、特征和来源	309
7.3.1	出现阶段表征的损伤	309
7.3.1.1	制造	309
7.3.1.2	使用	310
7.3.2	用物理缺陷表征的损伤	311
7.3.3	对飞机实际可能遇到的冲击能量威胁	312
7.4	损伤检测	314
7.4.1	飞机检测程序	315
7.4.2	对获得损伤检测数据的建议	316
7.4.2.1	目标	316
7.4.2.2	检测技术	316
7.5	损伤阻抗	318
7.5.1	影响因素	318
7.5.1.1	对以前冲击研究结果的概述	318
7.5.1.2	穿透冲击	319
7.5.1.3	材料类型和形式的影响	321
7.5.1.4	损伤的深度	322

7.5.1.5	层压板厚度的影响	323
7.5.1.6	结构尺寸影响	324
7.5.1.7	夹层结构	326
7.5.2	设计问题和指南	327
7.5.2.1	用对冲击的研究来确定关键损伤	327
7.5.2.2	结构布置和设计细节	328
7.5.2.3	地面冰雹	328
7.5.2.4	雷击	328
7.5.2.5	操作和踩踏载荷	329
7.5.2.6	外露的边缘	329
7.5.3	试验问题	329
7.5.4	分析方法——描述和评定	329
7.6	耐久性 (损伤起始)	329
7.6.1	引言	329
7.6.2	寿命因子方法	330
7.6.3	载荷放大系数方法	331
7.6.4	极限强度方法	333
7.6.5	谱截除	333
7.6.6	耐久性验证	333
7.6.7	影响因素	334
7.6.8	设计内容和指南	334
7.6.9	试验内容	334
7.6.10	分析方法——描述和评定	334
7.7	循环载荷下的损伤扩展	334
7.7.1	影响因素	334
7.7.2	设计问题和指南	335
7.7.3	试验问题	335
7.7.4	分析方法——描述和评定	335
7.7.4.1	大的穿透损伤	336
7.7.4.2	单一分层和脱胶	336
7.7.4.3	冲击损伤	336
7.7.4.4	切口和沟槽	336
7.8	剩余强度	336
7.8.1	影响因子	336
7.8.1.1	损伤阻抗与剩余强度的关系	336
7.8.1.2	带冲击损伤的结构	337
7.8.1.3	带有穿透损伤的结构	345
7.8.2	设计内容和指南	353
7.8.2.1	铺层顺序	353

7.8.2.2	夹层结构	354
7.8.3	试验内容	354
7.8.3.1	试样的冲击试验	354
7.8.3.2	加筋壁板的冲击试验	354
7.8.3.3	夹层壁板的冲击试验	354
7.8.3.4	大型穿透损伤加筋壁板试验	355
7.8.3.5	大型穿透损伤夹层壁板试验	355
7.8.4	分析方法——描述与评定	355
7.8.4.1	大型穿透损伤	355
7.8.4.2	单一分层与脱胶	375
7.8.4.3	冲击损伤	376
7.8.4.4	切口和凹槽	380
7.9	应用/实例	380
7.9.1	旋翼机 (Sikorsky)	380
7.9.1.1	损伤	381
7.9.1.2	环境	381
7.9.1.3	与关键失效模式有关的试验加载条件	381
7.9.1.4	试验载荷——载荷放大因子 (LEF)	381
7.9.1.5	谱载荷——截除	381
7.9.1.6	剩余强度试验	382
7.9.2	商用飞机 (波音777尾翼扭力盒段)	382
7.9.2.1	耐久性——环境	382
7.9.2.2	耐久性——机械载荷	382
7.9.2.3	损伤	383
7.9.2.4	损伤容限——“无扩展”试验	383
7.9.2.5	损伤容限——剩余强度	384
7.9.2.6	检测计划	385
7.9.3	通用航空 (Raytheon星舟号)	385
7.9.3.1	引言	385
7.9.3.2	损伤容限评估	385
7.9.3.3	使用经历	390
7.9.3.4	结论	391
7.9.4	军用飞机	391
	参考文献	392
第8章 可支持性		
8.1	引言	400
8.2	考虑可支持性的设计	401
8.2.1	使用的经验	401
8.2.2	可检性	403