

Composite Material Handbook

共 6 卷 **6**

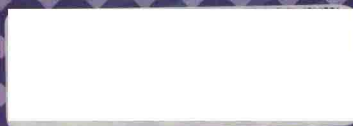
复合材料手册

【美】CMH-17协调委员会 编著

汪海 沈真 等译

复合材料夹层结构

Structural Sandwich Composites



CMH-17

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK



上海交通大学出版社
SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

复合材料手册

6

CMH-17协调委员会 编著

汪海 沈真 等译

共 6 卷

复合材料夹层结构

Structural Sandwich Composites

CMH-17

COMPOSITE MATERIALS HANDBOOK



上海交通大学出版社

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY PRESS

内容提要

本书是《复合材料手册》(以下简称 CMH-17)的第 6 卷,其前身是已撤销的 Military Handbook 23。本书主要包括聚合物基复合材料夹层结构设计、分析、制造、试验、修理、质量控制和检测方法与技术,以及相关的材料和结构性能数据和曲线。书中内容主要来自军用和民用飞行器中聚合物基复合材料夹层结构的相关研究和应用成果。

本书可供航空、航天、汽车、材料等领域及其相关行业的工程技术人员、研发人员、管理人员,以及高等院校相关专业师生参考使用。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料手册.第 6 卷,复合材料夹层结构/美国 CMH-17 协调委员会编著;汪海等译. —上海:上海交通大学出版社,2016

ISBN 978-7-313-14803-2

I. ①复… II. ①美…②汪… III. ①复合材料—手册 IV. ①TB33-62

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 076160 号

复合材料手册 第 6 卷

复合材料夹层结构

编 著:【美】CMH-17 协调委员会

出版发行:上海交通大学出版社

邮政编码:200030

出 版 人:韩建民

印 制:苏州市越洋印刷有限公司

开 本:787mm×1092mm 1/16

字 数:406 千字

版 次:2016 年 4 月第 1 版

书 号:ISBN 978-7-313-14803-2/TB

定 价:168.00 元

译 者:汪海 沈真等

地 址:上海市番禺路 951 号

电 话:021-64071208

经 销:全国新华书店

印 张:20.25

印 次:2016 年 4 月第 1 次印刷

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有印装质量问题请与印刷厂质量科联系

联系电话:0512-68180638

《复合材料手册》(CMH-17G) 译校工作委员会

顾 问 林忠钦 姜丽萍 郭延生

主 任 汪 海 沈 真

成 员 (按姓氏笔划排列)

丁惠梁 白嘉模 朱 珊 李玉亮

李新祥 杨楠楠 汪 海 沈 真

宋恩鹏 张开达 陈普会 徐继南

梁中全 童贤鑫 谢鸣九

《复合材料手册》第6卷 译校人员

第1章 总论

翻译 李玉亮 校对 沈 真

第2章 性能试验指南

翻译 李玉亮 校对 沈 真

第3章 材料数据

翻译 丁惠梁 校对 沈 真

第4章 夹层结构的设计和分析

翻译 周 翔 赵 剑 校对 陈 杰 梁 嫻

第5章 夹层结构的制造

翻译 刘龙权 校对 周 翔

第6章 质量控制

翻译 张开达 校对 徐继南

第7章 支持性

翻译 徐继南 校对 张开达

译者序

1971年1月,《美国军用手册》第17分册(MIL-HDBK-17)第一版 MIL-HDBK-17A《航空飞行器用塑料》(*Plastics for Air Vehicles*)正式颁布。当时,手册中几乎没有关于复合材料的内容。随着先进复合材料在美国军用飞机上的用量迅速增大,美国于1978年在国防部内成立了《美国军用手册》第17分册协调委员会。1988年,该委员会颁布了 MIL-HDBK-17B,并把手册名称改为《复合材料手册》(*Composite Materials Handbook*)。近年来,先进复合材料在结构上的应用重心开始从最初的军用为主向民用领域转变,用量也迅速增加。为了适应这种变化,该委员会的归口管理机构于2006年从美国国防部改为美国联邦航空局,该手册退出军用手册系列,改为 CMH-17(*Composite Materials Handbook-17*),但协调委员会的组成保持不变,继续不断地将新的材料性能和相关研究成果纳入手册。2012年3月起,该委员会陆续颁布了最新的 CMH-17G 版,用以替代2002年6月颁布的 MIL-HDBK-17F。

在过去的四十多年里,大量来自工业界、学术界和其他政府机构的专家参与了该手册的编制和维护工作。他们在手册中建立和规范化了复合材料性能表征标准,总结了复合材料和结构在设计、制造和使用维护方面的工程实践经验。这些持续的改进最终都体现在了 MIL-HDBK-17(或 CMH-17)的多次改版和维护上,并极大地推动了先进复合材料(特别是碳纤维增强树脂基复合材料)在美国和欧洲航空航天及相关工业领域的广泛应用。

由于手册中收录的数据在测试、处理和使用等各个环节上完全符合相关规范和标准,收录的设计、分析、试验、制造和取证等方法均经过严格验证,因此,该手册在权威性和实用性方面超越了其他所有手册,成为美国联邦航空局(Federal Aviation Administration, FAA)适航审查部门认可的具有重要指导意义的文件,在国际航空

航天和复合材料工业界得到广泛应用,甚至被誉为“复合材料界的圣经”。

最新版 CMH-17G 共分为 6 卷。名称如下:

第 1 卷 《聚合物基复合材料——结构材料表征指南》

第 2 卷 《聚合物基复合材料——材料性能》

第 3 卷 《聚合物基复合材料——材料应用、设计和分析》

第 4 卷 《金属基复合材料》

第 5 卷 《陶瓷基复合材料》

第 6 卷 《复合材料夹层结构》

相比 MIL-HDBK-17F 版,CMH-17G 无论在内容完整性还是在对工程设计的具体指导方面,都有较大变化。特别是在聚合物基复合材料性能表征、结构设计与应用等方面,增加了大量最新研究成果,还特别对原来的 MIL-HDBK-23(复合材料夹层结构)进行了更新,并纳入为 CMH-17G 版的第六卷。

CMH-17G 是对美国和欧洲过去四十多年复合材料及其结构设计与应用研究经验的全面总结,也是美国陆海空三军、NASA(美国国家航空航天局)、FAA 及工业部门应用复合材料及其结构最具权威性的手册。虽然手册中多数信息和内容来自航空航天领域研究成果,但其他所有使用复合材料及其结构的工业领域,无论是军用还是民用,都会发现本手册是非常有价值的。

鉴于本手册对我国研发和广泛应用先进复合材料结构具有重要意义,在上海市科学技术委员会的支持下,上海航空材料与结构检测中心与上海交通大学航空航天学院民机结构强度综合实验室联合组织国内长期从事先进复合材料研究和应用的专家翻译了本手册。

本手册经原著版权所有者——美国 Wichita 州立大学国家航空研究院(NIAR, National Institute of Aviation Research)授权,经与 SAE International 签订手册中文版版权转让协议后,在其 2012 年 3 月陆续出版的 CMH-17G 英文版基础上翻译完成。

本手册的翻译出版得到了上海交通大学出版社和江苏恒神纤维材料有限公司的大力支持,在此一并表示感谢。同时,也对南京航空航天大学乔新教授为本手册做出的贡献表示感谢。

译校工作委员会

2014 年 4 月

序

《复合材料手册》(CMH-17)为复合材料结构件的设计和制造提供了必要的资讯和指南。其主要作用是:①规范与现在和未来复合材料性能测试、数据处理和数据发布相关的工程数据生成方法,并使之标准化。②指导用户正确使用本手册中提供的材料数据,并为材料和工艺规范的编制提供指南。③提供复合材料结构设计、分析、取证、制造和售后技术支持的通用方法。为实现上述目标,手册中还特别收录了一些满足某些特殊要求的复合材料性能数据。总之,手册是对快速发展变化的复合材料技术和工程领域最新研究进展的总结。随着有关章节的增补或修改,相关文件也将处于不断修订之中。

CMH-17 组织机构

《复合材料手册》协调委员会通过深入总结技术成果,创建、颁布并维护经过验证的、可靠的工程资讯和标准,支撑复合材料和结构的发展与应用。

CMH-17 的愿景

《复合材料手册》成为世界复合材料和结构技术资讯的权威宝典。

CMH-17 组织机构工作目标

- 定期约见相关领域专家,讨论复合材料结构应用方面的重要技术条款,尤其关注那些可在总体上提升生产效率、质量和安全性的条款。
- 提供已被证明是可靠的复合材料和结构设计、制造、表征、测试和维护综合操作工程指南。
- 提供与工艺控制和原材料相关的可靠数据,进而建立一个可被工业部门使用的完整的材料性能基础值和设计信息的来源库。
- 为复合材料和结构教育提供一个包含大量案例、应用和具体工程工作参考方案的来源库。

- 建立手册资讯使用指南,明确数据和方法使用限制。
- 为如何参考使用那些经过验证的标准和工程实践提供指南。
- 提供定期更新服务,以维持手册资讯的完整性。
- 提供最适合使用者需要的手册资讯格式。
- 通过会议和工业界成员交流方式,为国际复合材料团体的各类需求提供服务。

与此同时,也可以使用这些团队和单个工业界成员的工程技能为手册提供资讯。

注释

(1) 已尽最大努力反映聚合物(有机)、金属和陶瓷基复合材料的最新资讯,并将不断对手册进行审查和修改,以确保手册完整反映最新内容。

(2) CMH-17 为聚合物(有机)、金属和陶瓷基复合材料提供了指导原则和材料性能数据。手册的前三卷目前关注(但不限于)的主要是用于飞机和航天飞行器的聚合物基复合材料,第4,5和6卷则相应覆盖了金属基复合材料(MMC)、包括碳-碳复合材料(C-C)在内的陶瓷基复合材料(CMC)及复合材料夹层结构。

(3) 本手册中所包含的资讯来自材料制造商、工业公司和专家、政府资助的研究报告、公开发表的文献,以及参加 CMH-17 协调委员会活动的成员与研究实验室签订的合同。手册中的资讯已经经过充分的技术审查,并在发布前通过了全体委员会成员的表决。

(4) 任何可能推动本手册使用的有益的建议(推荐、增补、删除)和相关的数据可通过信函邮寄到:

CMH-17 Secretariat, Materials Sciences Corporation, 135 Rock Road,
Horsham, PA 19044,

或通过电子邮件发送到: handbook@materials-sciences.com.

致谢

来自政府、工业界和学术团体的自愿者委员会成员帮助完成了本手册中全部资讯的协调和审查工作。正是由于这些志愿者花费了大量时间和不懈的努力,以及他们所在的部门、公司和大学的鼎力支持,才确保了本手册能够准确、完整地体现当前复合材料界的最高水平。

《复合材料手册》的发展和维护还得到了材料科学公司手册秘书处的大力支持,美国联邦航空局为该秘书处提供了主要资金。

目 录

第 1 章 总论	1
1.1 手册介绍	1
1.2 手册内容概述	1
1.3 简介	3
1.4 术语和定义	3
1.4.1 载荷、几何参数和材料特性	3
1.4.2 单位制	11
参考文献	12
第 2 章 性能测试指南	13
2.1 引言	13
2.2 数据处理和描述	13
2.3 夹芯材料的评定	14
2.3.1 引言	14
2.3.2 力学性能	14
2.3.3 环境影响	14
2.3.4 试验方法	16
2.4 板芯胶的评定	18
2.4.1 引言	18
2.4.2 力学性能	18
2.4.3 环境影响	18
2.4.4 试验方法	18
2.5 面板性能的评定	19
2.5.1 引言	19
2.5.2 力学性能	19
2.5.3 环境影响	19
2.5.4 试验方法	20

- 2.6 夹层板的评定 20
 - 2.6.1 引言 20
 - 2.6.2 力学性能 21
 - 2.6.3 环境影响 21
 - 2.6.4 损伤阻抗 21
 - 2.6.5 损伤容限 21
 - 2.6.6 修理 22
 - 2.6.7 试验方法 22
- 2.7 镶嵌件和紧固件的评定 23
 - 2.7.1 引言 23
 - 2.7.2 环境影响 23
 - 2.7.3 试验方法 24
 - 2.7.4 力学性能 24
- 2.8 其他特征的评定 25
 - 2.8.1 引言 25
 - 2.8.2 力学性能 26
 - 2.8.3 环境影响 26
 - 2.8.4 试验方法 26
- 参考文献 26

第3章 材料数据 28

- 3.1 芯子 28
 - 3.1.1 芯子的类型 28
 - 3.1.2 芯子的标准 29
 - 3.1.3 蜂窝芯子 30
 - 3.1.4 带状交叉的芯子 31
 - 3.1.5 波纹状的芯子 32
 - 3.1.6 波纹槽芯 33
 - 3.1.7 泡沫芯子 33
 - 3.1.8 木头芯子 34
 - 3.1.9 芯子的性能 34
- 3.2 面板 41
 - 3.2.1 面板的类型 41
 - 3.2.2 面板的性能 42
- 3.3 胶黏剂 42
 - 3.3.1 胶黏剂的类型 43
 - 3.3.2 胶黏剂标准 43

- 3.3.3 胶黏剂的形式/类型与应用 44
- 3.3.4 胶黏剂的化学性质 45
- 3.3.5 胶黏剂的性能 47

参考文献 48

第4章 夹层结构设计和分析 50

- 4.1 引言 50
- 4.2 设计和认证 51
 - 4.2.1 基本设计原则 51
 - 4.2.2 设计过程 52
 - 4.2.3 飞机损伤容限 54
- 4.3 认证 57
 - 4.3.1 认证问题介绍 57
 - 4.3.2 用于认证试验的方法 58
 - 4.3.3 分析验证 58
 - 4.3.4 一致性检查 59
 - 4.3.5 无损检测(NDT) 59
 - 4.3.6 文件要求 59
 - 4.3.7 持续适航性 59
- 4.4 夹层板的失效模式 60
- 4.5 刚度和内部载荷 62
 - 4.5.1 夹层梁的刚度分析 62
 - 4.5.2 夹层板的刚度分析 64
 - 4.5.3 面外和面内载荷同时作用 66
 - 4.5.4 面板内部载荷 66
- 4.6 局部强度分析方法 67
 - 4.6.1 面板失效 67
 - 4.6.2 芯材剪切载荷 68
 - 4.6.3 平面拉伸和平面压缩 69
 - 4.6.4 芯材受弯压溃 71
 - 4.6.5 单胞屈曲(面板微凹) 71
 - 4.6.6 面板皱曲 85
 - 4.6.7 芯材剪切皱折 92
 - 4.6.8 附着件和硬点 92
- 4.7 平板在压力载荷下的内力和应力 98
 - 4.7.1 受各种面外载荷作用的矩形夹层结构平板设计 98
 - 4.7.2 受均布面外载荷的夹层结构平板设计 99

- 4.8 曲面夹层结构内部载荷与应力 133
 - 4.8.1 一般方程和分析方法 133
 - 4.9 平板稳定性分析方法 135
 - 4.9.1 矩形夹层平柱的屈曲 135
 - 4.9.2 受侧压矩形夹层平板的设计 136
 - 4.9.3 受侧边剪切载荷矩形夹层平板的设计 166
 - 4.9.4 扭转载荷下的夹层板条设计 185
 - 4.9.5 承受沿边弯矩的矩形夹层平板的设计 199
 - 4.10 夹层矩形平板在组合载荷下的设计方法 212
 - 4.10.1 组合加载时的屈曲 212
 - 4.10.2 面内载荷和面外载荷的组合情况 213
 - 4.11 夹层圆筒的设计方法 213
 - 4.11.1 引言 213
 - 4.11.2 外部径向受压下的夹层圆柱设计方法 214
 - 4.11.3 扭转载荷作用下的夹层圆柱设计方法 221
 - 4.11.4 轴向压缩或弯曲作用下的夹层圆筒设计方法 231
 - 4.11.5 夹层圆筒在组合载荷下的设计方法 237
 - 4.12 夹层结构的有限元建模 238
 - 4.12.1 引言 238
 - 4.12.2 总体模型 239
 - 4.12.3 层叠模型 239
 - 4.12.4 体模型 240
 - 4.12.5 夹层单元模型 240
 - 4.13 最优化夹层板 240
 - 4.13.1 夹层板质量 241
 - 4.13.2 夹层结构的弯曲刚度 242
 - 4.13.3 夹层抵抗弯曲能力 244
 - 4.13.4 夹层板屈曲 245
- 参考文献 247

第5章 夹层结构制造(材料和工艺) 254

- 5.1 介绍 254
- 5.2 材料 256
 - 5.2.1 芯材 256
 - 5.2.2 面板 257
 - 5.2.3 胶黏剂 259
 - 5.2.4 表面处理和密封 260

- 5.3 工艺 260
 - 5.3.1 芯材 261
 - 5.3.2 面板共固化与预固化和树脂压力的对比 271
 - 5.3.3 胶黏剂 274
- 5.4 蜂窝芯材压塌 280
 - 5.4.1 固化中芯材的压塌 280
 - 5.4.2 芯材压塌的理论讨论 282
 - 5.4.3 固化中芯材压塌的稳定性 283
 - 5.4.4 芯材特性和芯材变形 284
 - 5.4.5 预浸料和粘合材料特性与芯材变形 285
 - 5.4.6 固化周期和芯材变形 286
- 5.5 质量问题: 包括无损评估(NDI) 287
- 参考文献 290

第6章 质量控制 291

- 6.1 引言 291
- 6.2 材料生产质量认证程序 291
 - 6.2.1 规范和文档 291
 - 6.2.2 验收检验 291
- 6.3 零件制造认证 292
 - 6.3.1 制造过程认证 292
 - 6.3.2 无损检测 293
 - 6.3.3 破坏性试验 293
- 6.4 统计过程控制 293
- 6.5 材料和工艺变化的处理 293
- 参考文献 293

第7章 可支持性 295

- 7.1 引言 295
- 7.2 可支持性设计 295
 - 7.2.1 运行服务经验 295
 - 7.2.2 可检查性 296
 - 7.2.3 材料选择 296
 - 7.2.4 损伤阻抗 296
 - 7.2.5 环境顺应性 297
 - 7.2.6 可靠性和可维护性 297
 - 7.2.7 可修理性 298

- 7.3 支持的实施 299
 - 7.3.1 零件检测 299
 - 7.3.2 损伤评估 300
 - 7.3.3 修理设计准则 300
 - 7.3.4 复合材料结构修理 302
- 7.4 保障要求 308
- 参考文献 309

第 1 章 总 论

1.1 手册介绍

以统计为基础的标准化材料性能数据是进行复合材料结构研制不可或缺的,材料供应商、设计工程师、制造部门和结构最终用户都需要这样的数据。此外,复合材料结构的高效研制和应用,必须要有可靠且经验验证过的设计与分析方法。本手册的目的是旨在为下列领域提供全面的标准化做法:

- (1) 用于研制、分析和颁布复合材料性能数据的方法。
- (2) 基于统计基础的复合材料性能数据组。
- (3) 对采用本手册颁布的性能数据的复合材料结构,进行设计、分析、试验和支持的通用程序。

在很多情况下,这种标准化做法的目的是阐明管理机构的要求,同时为研制满足客户需求的结构提供有效的工程实践经验。

复合材料是一个正在成长和发展的领域,随着其变得成熟并经验验证可行,手册协调委员会正在不断地将新的信息和新的材料性能纳入手册。虽然多数信息的来源和内容来自于航宇应用,但所有使用复合材料及其结构的工业领域,不管是军用还是民用,都会发现本手册是有用的。本手册的最新修订版包括了更多与非航宇领域应用有关的信息,随着本手册的进一步修订,将会增加供非航宇领域使用的数据。

Composite Materials Handbook - 17 (CMH - 17)一直是由国防部和 FAA 共同编写和修订的,包括了大量来自工业界、学术界和其他政府机构的参与者。虽然最初复合材料的结构应用主要是军用的,但最近的发展趋势表明这些材料在民用领域的应用越来越多。部分是由于这种原因,本手册的正式管理机构于 2006 年已从国防部改为 FAA,手册的名称也由 *Military Handbook - 17* 改为 *Composite Materials Handbook - 17*,但手册的协调委员会组成人员和目的保持不变。

1.2 手册内容概述

Composite Materials Handbook - 17 由 6 卷本的系列丛书构成。

第 1 卷 聚合物基复合材料——结构材料表征指南 (Volume 1: Polymer Matrix Composites-Guidelines for Characterization of Structural Materials)

第 1 卷包括了用于确定聚合物基复合材料体系及其组分,以及一般结构元件性能的指南,包括试验计划、试验矩阵、取样、浸润处理、选取试验方法、数据报告、数据处理、统计分析及其他相关的专题。对数据的统计处理和分析给予了特别的关注。第 1 卷包括产生材料表征数据的一般指南,和将材料数据在 CMH-17 中发布的特殊要求。

第 2 卷 聚合物基复合材料——材料性能 (Volume 2: Polymer Matrix Composites-Material Properties)

第 2 卷中包含了以统计为基础的聚合物基复合材料数据,它们满足 CMH-17 特定的母体取样要求与数据文件要求,涵盖了普遍感兴趣的材料体系。由于 G 修订版的出版,在第 2 卷中发布的数据归数据审查工作组管辖,并且由总的 CMH-17 协调组批准。随着数据成熟并得到批准,新的材料体系和现有材料体系的附加材料数据也将会被收录进去。本卷收入一些从原版本中选出,且工业界仍感兴趣的数据,尽管不符合当前的数据取样、试验方法或文件的要求。

第 3 卷 聚合物基复合材料——材料应用、设计和分析 (Volume 3: Polymer Matrix Composites-Material Usage, Design, and Analysis)

第 3 卷提供了用于纤维增强聚合物基复合材料结构设计、分析、制造和外场支持的方法与得到的经验教训,还给出了有关材料与工艺规范,以及如何使用第 2 卷中列出数据的指南。所提供的信息与第 1 卷中给出的指南一致,并详尽地汇总了活跃在复合材料领域,来自工业界、政府机构和学术界的工程师与科学家的最新知识与经验。

第 4 卷 金属基复合材料 (Volume 4: Metal Matrix Composites)

第 4 卷公布了有关金属基复合材料体系的性能,这些数据满足本手册的要求,并能获取。还给出了经挑选出与这类复合材料有关其他技术专题的指南,包括典型金属基复合材料的材料选择、材料规范、工艺、表征试验、数据处理、设计、分析、质量控制和修理。

第 5 卷 陶瓷基复合材料 (Volume 5: Ceramic Matrix Composites)

第 5 卷公布了有关陶瓷基复合材料体系的性能,这些数据满足本手册的要求,并能获取。还给出了经挑选出与这类复合材料有关其他技术专题的指南,包括典型陶瓷基复合材料的材料选择、材料规范、工艺、表征试验、数据处理、设计、分析、质量控制和修理。

第 6 卷 复合材料夹层结构 (Volume 6: Structural Sandwich Composites)

第 6 卷是对已撤销的 Mil-HDBK-23 的更新,它的编撰目的是用于结构夹层聚合物基复合材料的设计,这种材料主要用于飞行器。给出的信息包括军用和民用飞行器中夹层结构的试验方法、材料性能、设计和分析技术、制造方法、质量控制和