



复合材料

设计手册

航空航天
科学技术研究院编
工业部



航空工业出版社

内 容 简 介

本手册是一本供复合材料结构设计和分析用的工具书。手册内容共分为 17 章和 4 个附录，给出了复合材料结构设计的基本原理和方法、必需的性能数据、有关的计算公式和必要的基础知识。大量具有重要应用价值的资料，以图表、曲线等形式给出，便于查阅和应用。

本手册主要供飞机设计人员从事复合材料结构设计使用，也可供航空航天和其他部门从事复合材料结构设计人员以及从事复合材料研究、生产和使用部门的工程技术人员和高等院校的师生参考。

复 合 材 料 设 计 手 册

航空航天工业部科学技术研究院编

责任编辑 程志远

航空工业出版社出版发行。

(北京和平里小关东里 14 号)

邮政编码：100029

内部发行

化工印刷厂印刷

1990 年 12 月第 1 版 1990 年 12 月第 1 次印刷

787×1092 毫米^{1/16} 印张：42

印数：1-3000 字数：1089.6 千字，插页：5

ISBN 7-80046-308-7/Z·065

定价：精装 79 元

平装 68 元

编 审 委 员 会

主任委员：何文治
副主任委员：王俊奎 张耀 陈绍杰

主 编：陈绍杰
副 主 编：高树理 宋焕成 李顺林
常 务 编 委：于德昌 王慧杰 杨乃宾 李顺林
陈绍杰 宋焕成 赵渠森 高树理
童贤鑫

编 委：于德昌 王山根 王全荣 王慧杰
刘方龙 刘悟泉 张佐 张存祥
沈真 杨乃宾 何连珠 李文华
李武铨 李顺林 俞秉良 汪裕炳
宋焕成 陈绍杰 范成忠 赵渠森
倪景连 高树理 秦玉定 黄承恭
童贤鑫 谢鸣九 管德 樊发芬

主 审：张耀
副 主 审：马祖康 范棠 乔新
委：马祖康 乔新 刘多朴 何恻晋
迟之范 张耀 张登高 郑作棣
范棠 胡建国 赵沛霖 高镇同
顾震隆 章怡宁 魏曾苏

各章主编、主审及编写人员

第一章

编 审 《复合材料设计手册》编审委员会
执 笔 陈绍杰 王慧杰

第二章

主 编 陈绍杰
审 校 李顺林

第三章

主 编 赵渠森 王慧杰
审 校 于德昌

第四章

主 编 李顺林
编 写 李顺林 骆心怡 熊中侃
审 校 樊发芬

第五章

主 编 王山根
编 写 王山根 张锡昌 杨乃宾 于德昌 张登高
范 棠
审 校 范成忠

第六章

主 编 刘方龙
审 校 赵永枢

第七章

主 编 范成忠
编 写 范成忠 赵建华 樊光华 樊发芬 吴观石
审 校 马祖康 高树理

第八章

主 编 高树理
编 写 高树理 张存祥 俞秉良 刘英卫 史静文
杨 斌 胡崇辉
审 校 刘悟泉

第九章

主 编 管 德 倪景连

编写 管 德 邹丛青 陈桂彬 朱凤辉 邱 涛
审校 林梦鹤

第十章

主编 谢鸣九 汪裕炳
编写 谢鸣九 汪裕炳 张全纯 高树理 王洪珠
张文荣 方玉龙
审校 高树理

第十一章

主编 童贤鑫
编写 童贤鑫 李武铨 张志民
审校 李武铨

第十二章

主编 沈 真 杨乃宾
编写 沈 真 杨乃宾 马祖康 羊 矜 罗安民
审校 成万植

第十三章

主编 王全荣
编写 王全荣 杨和铮 周晓融 王 勇 陈立松
高满同
审校 高树理

第十四章

主编 何连珠
编写 何连珠 杜修德 杨 海 沈亚鹏
审校 姚起杭

第十五章

主编 宋焕成
编写 宋焕成 张佐光 李兴华
审校 高树理

第十六章

主编 李文华
编写 李文华 田正怡 黄承恭 宋志刚 马珊梅
闫家湘
审校 宋志刚

第十七章

主编 张 佐 丁桂珍

编写 张 佐 丁桂珍 张存祥
审校 张存祥

附录 A

主编 张林瑞
编写 张林瑞 李武铨 敬禄云
审校 丁惠良 章怡宁

附录 B

主编 陈绍杰
审校 陈宗联

附录 C

翻译 陈绍杰
校对 王全荣 丁桂珍

附录 D

主编 王山根
审校 杨乃宾

审 委 分 工

第一章	刘多朴	
第二章	张登高	
第三章	范 棠	胡建国
第四章	迟之范	
第五章	张登高	范 棠
第六章	马祖康	顾震隆
第七章	章怡宁	魏曾苏
第八章	马祖康	魏曾苏
第九章	乔 新	
第十章	迟之范	章怡宁
第十一章	张 耀	
第十二章	高镇同	顾震隆
第十三章	胡建国	
第十四章	乔 新	
第十五章	赵沛霖	
第十六章	郑作棣	
第十七章	赵沛霖	
附录 A	何恫晋	
附录 B	何恫晋	
附录 C	何恫晋	
附录 D	张登高	

目 录

第一章 绪言	(1)
第二章 名词术语和符号	(3)
2.1 名词术语	(3)
2.2 主要符号说明	(8)
2.3 层压板的表示法	(11)
参考资料	(12)
第三章 材料工艺简介	(13)
3.1 复合材料简介	(13)
3.2 原材料	(14)
3.2.1 增强材料	(14)
3.2.2 基体材料	(17)
3.2.3 预浸料	(21)
3.2.4 夹层结构用材料	(23)
3.3 复合材料的成型工艺	(25)
3.3.1 复合材料成型工艺特点	(25)
3.3.2 工艺方法简介	(25)
3.3.3 用热压罐成型构件的工序介绍	(28)
3.3.4 复合材料成型用模具	(31)
3.3.5 复合材料构件的修补	(33)
3.3.6 复合材料构件制造的机械化自动化	(34)
3.4 复合材料的质量控制	(38)
3.4.1 复合材料的质量控制及其意义	(38)
3.4.2 复合材料内部缺陷及其分类	(39)
3.4.3 无损检验方法简述	(40)
参考资料	(41)
第四章 复合材料的力学基础	(42)
4.1 铺层的刚度与强度	(42)
4.1.1 铺层的应力-应变关系	(42)
4.1.2 铺层的正轴刚度	(47)
4.1.3 铺层的偏轴刚度	(50)

4.1.4	铺层的基本强度	(62)
4.1.5	铺层的失效准则	(63)
4.1.6	铺层的强度比计算	(63)
4.2	层压板的刚度与强度	(67)
4.2.1	层压板的内力-应变关系	(67)
4.2.2	层压板的刚度	(71)
4.2.3	层压板的强度	(78)
4.2.4	湿热效应	(88)
4.3	层压板的层间问题	(93)
4.3.1	层间应力	(93)
4.3.2	层间强度	(99)
4.3.3	层间失效准则	(101)
4.3.4	层间分层破坏效应	(101)
	参考资料	(102)
第五章 材料性能数据		(104)
5.1	原材料性能数据	(104)
5.1.1	树脂基体性能	(104)
5.1.2	增强材料性能	(105)
5.1.3	胶粘剂性能	(107)
5.2	中间材料性能数据	(108)
5.2.1	预浸料性能	(108)
5.2.2	蜂窝芯性能	(108)
5.2.3	泡沫芯性能	(111)
5.3	复合材料性能数据	(111)
5.3.1	概述	(111)
5.3.2	T300/4211 性能	(114)
5.3.3	T300/5222 性能	(122)
5.3.4	T300/CFR-150 性能	(130)
5.3.5	T300/HD01 和 T300/HD03 性能	(132)
5.3.6	T300/3231 性能	(132)
5.3.7	T300/LWR-1 性能	(135)
5.3.8	T300/QY8911 性能	(136)
5.3.9	几种国外复合材料性能	(141)
第六章 层压板设计		(151)
6.1	层压板设计的一般原则	(151)
6.2	按刚度设计	(152)
6.2.1	工程设计方法	(152)

6.3	按强度设计	(157)
6.3.1	工程设计方法	(157)
6.3.2	优化设计方法	(168)
6.4	按稳定性设计	(172)
6.4.1	工程设计方法	(172)
6.4.2	优化设计方法	(173)
6.5	满足特殊要求的设计	(173)
6.5.1	零膨胀系数层压板设计	(174)
6.5.2	无限大刚度层压板的设计	(175)
6.5.3	负泊松比层压板的设计	(176)
	参考资料	(176)
第七章	结构设计	(178)
7.1	设计选材	(178)
7.1.1	选材原则	(178)
7.1.2	纤维选择	(179)
7.1.3	树脂选择	(180)
7.2	设计原则	(181)
7.2.1	铺层设计的一般原则	(181)
7.2.2	强度、刚度设计原则	(183)
7.2.3	混杂复合材料的选用原则	(184)
7.2.4	工艺性要求	(184)
7.3	许用值与安全系数	(185)
7.3.1	许用值的确定	(186)
7.3.2	安全系数	(187)
7.4	开口及其补强	(187)
7.4.1	开口区的应力分布	(188)
7.4.2	开口影响区	(190)
7.4.3	开口补强设计	(190)
7.5	机翼整体油箱及其设计	(198)
7.5.1	复合材料整体油箱设计的一般要求	(198)
7.5.2	复合材料整体油箱的防雷击设计	(198)
7.5.3	复合材料整体油箱的防静电设计	(199)
7.5.4	复合材料整体油箱的密封设计	(199)
7.6	典型构件设计	(209)
7.6.1	梁、墙类构件设计	(209)
7.6.2	肋、框类构件设计	(209)
7.6.3	加筋板设计	(210)
7.6.4	复合材料桨叶设计	(214)

7.7	部件设计举例	(220)
7.7.1	材料设计	(220)
7.7.2	结构设计	(220)
7.7.3	编制技术文件	(222)
	参考资料	(222)
第八章	夹层结构设计	(224)
8.1	概述	(224)
8.1.1	夹层结构的特点	(224)
8.1.2	夹层结构的破坏模式	(224)
8.1.3	夹层结构的设计原则	(225)
8.2	夹层结构选材原则	(226)
8.2.1	面板材料的选择	(226)
8.2.2	芯子材料的选择	(226)
8.2.3	胶粘剂的选择	(226)
8.3	夹层结构设计	(227)
8.3.1	夹层结构参数选择	(227)
8.3.2	受法向均布载荷的夹层板的设计	(227)
8.3.3	夹层梁的设计	(234)
8.3.4	受轴压夹层板的设计	(238)
8.3.5	受剪夹层板的设计	(244)
8.3.6	受扭夹层圆柱壳的设计	(251)
8.3.7	受轴压夹层圆柱壳的设计	(253)
8.3.8	受均匀外压的夹层圆柱壳的设计	(260)
8.3.9	计算面板起皱	(269)
8.3.10	蜂窝孔间凹陷	(272)
8.4	应力分析	(272)
8.4.1	复合材料夹层结构的元素	(272)
8.4.2	各元素的刚度方阵和应力矩阵	(272)
8.5	稳定性分析	(276)
8.5.1	稳定性计算问题的数学表达	(276)
8.5.2	面板夹芯组合夹层元素	(277)
8.5.3	相当板元法	(278)
8.6	连接设计	(282)
8.6.1	概述	(282)
8.6.2	连接设计原则	(282)
8.6.3	连接形式	(283)
8.6.4	夹层结构连接用紧固件	(290)
	参考资料	(293)

第九章 气动弹性剪裁	(294)
9.1 概述	(294)
9.2 气动弹性剪裁的设计目标	(294)
9.2.1 设计目标	(294)
9.2.2 各向异性层压翼面的弯曲、扭转、弯度耦合	(294)
9.2.3 提高发散速度	(297)
9.2.4 提高颤振速度	(297)
9.2.5 改善操纵安定品质	(298)
9.2.6 减缓机动载荷	(300)
9.2.7 提高升阻比	(300)
9.2.8 综合优化	(302)
9.3 复合材料翼面气动弹性剪裁的方法	(302)
9.3.1 复合材料翼面气动弹性剪裁的特点	(302)
9.3.2 基本分析	(303)
9.3.3 结构模型和元素	(303)
9.3.4 应力分析	(303)
9.3.5 颤振分析	(303)
9.3.6 静气动弹性分析	(305)
9.3.7 优化设计	(306)
9.4 工程算例	(312)
9.4.1 计算对象	(312)
9.4.2 结构模型	(312)
9.4.3 优化设计条件	(313)
9.4.4 结果	(313)
参考资料.....	(317)
第十章 连接	(319)
10.1 概述.....	(319)
10.2 机械连接设计的一般原则.....	(320)
10.2.1 破坏模式.....	(320)
10.2.2 连接形式.....	(321)
10.2.3 连接接头几何参数选择.....	(321)
10.2.4 连接区的铺层设计.....	(323)
10.2.5 螺母拧紧力矩.....	(323)
10.3 螺栓连接强度.....	(323)
10.3.1 开孔及应力集中系数.....	(323)
10.3.2 单钉连接强度.....	(324)
10.3.3 多钉连接强度.....	(328)

10.3.4	强度校核	(328)
10.4	连接工艺和防腐	(330)
10.4.1	制孔及工艺要求	(330)
10.4.2	螺接工艺要求	(331)
10.4.3	铆接工艺要求	(331)
10.4.4	连接防腐	(332)
10.5	紧固件	(332)
10.5.1	紧固件的选择	(332)
10.5.2	紧固件强度、质量	(332)
10.6	铆接	(346)
10.6.1	铆接设计	(346)
10.6.2	螺纹抽钉连接强度	(347)
10.6.3	纯钛铆钉连接强度	(347)
10.6.4	钛环槽铆钉连接强度	(347)
10.7	胶接	(349)
10.7.1	胶接接头基本破坏模式	(349)
10.7.2	胶接连接设计原则	(350)
10.7.3	极限承载能力估算	(353)
10.8	设计举例	(356)
10.8.1	受拉伸载荷连接接头设计举例	(356)
10.8.2	受剪切载荷连接接头设计举例	(358)
	参考资料	(360)

第十一章 稳定性分析与承载能力计算 (361)

11.1	概述	(361)
11.2	正交各向异性矩形平板的屈曲分析	(362)
11.2.1	正交各向异性矩形平板的轴压屈曲分析	(362)
11.2.2	正交各向异性矩形平板的剪切屈曲分析	(366)
11.2.3	正交各向异性矩形平板在复合载荷作用下的屈曲分析	(368)
11.2.4	正交各向异性层压板的屈曲载荷公式	(371)
11.3	矩形层压平板的屈曲分析	(371)
11.3.1	对称层压平板的屈曲分析	(371)
11.3.2	非对称层压平板的屈曲分析	(374)
11.3.3	矩形层压平板在压剪复合载荷作用下的屈曲分析	(375)
11.4	加筋层压平板的屈曲分析	(377)
11.4.1	加筋层压平板的局部屈曲分析	(378)
11.4.2	加筋层压平板的总体屈曲分析	(385)
11.4.3	加筋层压平板的有限条元素法的屈曲分析	(387)
11.5	加筋层压平板在轴压载荷作用下承载能力分析	(392)

11.5.1	分段处理法	(392)
11.5.2	有效刚度法	(393)
11.5.3	有效宽度法	(395)
11.5.4	实例	(395)
11.6	正交各向异性层压壳的屈曲分析	(397)
11.6.1	层压圆柱曲板的屈曲分析	(397)
11.6.2	层压圆柱壳的屈曲分析	(401)
11.6.3	加筋层压圆柱曲板和加筋层压圆柱壳的屈曲分析	(406)
	参考资料	(409)
第十二章	耐久性和损伤容限设计	(410)
12.1	概述	(410)
12.2	耐久性设计	(411)
12.2.1	耐久性设计要求	(411)
12.2.2	耐久性设计原则	(411)
12.2.3	使用载荷/环境谱的编制	(413)
12.2.4	耐久性分析	(413)
12.2.5	耐久性试验	(416)
12.3	损伤容限设计	(417)
12.3.1	缺陷尺寸假设	(417)
12.3.2	损伤容限设计要求	(418)
12.3.3	损伤容限设计原则	(419)
12.3.4	冲击损伤谱	(420)
12.3.5	损伤容限分析	(422)
12.3.6	损伤容限试验	(426)
12.4	全尺寸结构耐久性和损伤容限验证试验	(429)
12.4.1	一般要求	(429)
12.4.2	验证试验方法	(429)
12.4.3	示例——复合材料垂尾全尺寸验证试验的要求和程序	(430)
12.5	结构可靠性设计	(432)
12.5.1	结构可靠性设计的内容和特点	(432)
12.5.2	结构可靠性设计的优缺点及其基本分析方法	(433)
12.5.3	层压板的可靠度计算	(435)
12.5.4	结构系统的可靠度计算	(439)
	参考资料	(440)
第十三章	环境影响及其防护	(442)
13.1	温度和湿度的影响	(442)
13.1.1	我国的典型环境条件	(442)

13.1.2	温度和湿度对复合材料的影响	(444)
13.1.3	温湿环境试验	(449)
13.2	腐蚀及其防护	(453)
13.2.1	复合材料的腐蚀	(453)
13.2.2	复合材料与金属的电偶腐蚀	(455)
13.3	雷击静电及其防护	(459)
13.3.1	雷击及其防护	(459)
13.3.2	静电及其防护	(461)
13.3.3	电磁屏蔽	(461)
13.4	复合材料的防护涂层	(465)
13.4.1	涂层及其作用	(465)
13.4.2	防护涂层的质量控制	(465)
13.4.3	复合材料制件的表面处理	(466)
13.4.4	表面涂料及涂层系统	(467)
13.4.5	特种涂料(导电涂料)	(467)
13.4.6	大气曝晒试验	(472)
	参考资料	(474)

第十四章 复合材料结构的动力分析 (475)

14.1	复合材料结构的动强度设计原则	(475)
14.1.1	动特性设计原则	(475)
14.1.2	动响应控制原则	(477)
14.1.3	声疲劳设计原则	(477)
14.2	复合材料结构的动特性分析	(478)
14.2.1	复合材料层压梁的动特性分析	(478)
14.2.2	复合材料层压板的动特性分析	(482)
14.2.3	加筋板的动特性分析	(489)
14.3	动载及动响应分析	(492)
14.3.1	动载荷的分类与确定	(493)
14.3.2	典型层压板的响应分析	(494)
14.3.3	复合材料构件的响应分析	(503)
14.4	声振及声疲劳分析	(505)
14.4.1	噪声源及其特性	(505)
14.4.2	噪声载荷的确定	(507)
14.4.3	声疲劳设计	(511)
14.4.4	声疲劳设计计算图表	(516)
	参考资料	(520)

第十五章 混杂纤维复合材料设计	(522)
15.1 概述.....	(522)
15.1.1 名词术语.....	(524)
15.1.2 混杂复合材料类型.....	(526)
15.1.3 混杂复合材料特点.....	(526)
15.2 混杂效应.....	(526)
15.2.1 混杂效应的表现形式.....	(526)
15.2.2 混杂效应系数及其表达式.....	(527)
15.2.3 拉伸应变的混杂效应系数.....	(527)
15.3 单一纤维层压板性能.....	(527)
15.3.1 单向芳纶层压板性能.....	(527)
15.3.2 芳纶编织物层压板力学性能.....	(530)
15.3.3 单向玻璃纤维层压板性能.....	(532)
15.3.4 单向碳纤维层压板性能.....	(533)
15.4 混杂复合材料层压板性能.....	(534)
15.4.1 混杂复合材料层压板的拉伸行为.....	(534)
15.4.2 混杂复合材料层压板的压缩行为.....	(538)
15.4.3 混杂复合材料层压板的弯曲行为.....	(539)
15.4.4 混杂复合材料层压板的剪切行为.....	(539)
15.4.5 混杂复合材料层压板的冲击行为.....	(540)
15.4.6 单向混杂复合材料层压板性能数据.....	(541)
15.5 混杂复合材料层压板湿热效应.....	(544)
15.5.1 混杂复合材料的吸湿特性.....	(544)
15.5.2 混杂复合材料层压板湿热力学性能.....	(546)
15.5.3 混杂复合材料吸湿效应的估算.....	(546)
15.6 混杂复合材料设计与构件设计.....	(547)
15.6.1 混杂复合材料设计.....	(547)
15.6.2 混杂复合材料构件的设计原则.....	(548)
15.6.3 混杂复合材料的应力-应变关系.....	(552)
15.6.4 混杂复合材料典型构件的设计示例.....	(553)
参考资料.....	(554)
第十六章 复合材料内装饰件设计	(555)
16.1 定义和范围.....	(555)
16.1.1 定义.....	(555)
16.1.2 范围.....	(555)
16.2 要求.....	(555)
16.2.1 一般要求.....	(555)

16.2.2 适航性要求	(557)
16.3 选材	(560)
16.3.1 选材原则	(560)
16.3.2 材料分类及性能	(560)
16.4 结构设计	(578)
16.4.1 一般结构形式	(578)
16.4.2 结构部位	(578)
16.4.3 连接形式	(580)
16.5 地板设计	(583)
16.5.1 地板分块一般原则	(583)
16.5.2 地板的典型连接形式	(583)
16.5.3 局部开口设计	(584)
16.5.4 防腐蚀设计	(584)
16.5.5 试验	(585)
16.6 表面装饰层	(585)
16.6.1 装饰覆盖层	(585)
16.6.2 表面装饰涂漆	(586)
16.7 制造工艺	(586)
16.7.1 特点	(586)
16.7.2 主要成形工艺方法	(586)
16.7.3 成形工艺分类	(587)
16.8 修理	(587)
16.8.1 修理范围与原则	(587)
16.8.2 修理标准	(588)
16.8.3 典型缺陷的修理	(589)
第十七章 图纸绘制和有关技术文件	(592)
17.1 图纸表达及有关规定	(592)
17.1.1 第1种表达方法与规定	(592)
17.1.2 第2种表达方法与规定	(604)
17.2 图注及有关技术文件	(614)
17.2.1 图纸附注内容	(614)
17.2.2 制造的基本要求	(614)
17.2.3 技术条件	(615)
17.3 图纸举例	(616)
附录 A 计算机程序	(621)
A.1 概述	(621)
A.2 程序功能简介	(625)