



工业和信息化部“十二五”规划专著

先进复合材料 连接结构分析方法

XIANJIN FUHE CAILIAO
LIANJIE JIEGOU FENXI FANGFA

赵丽滨 徐吉峰 著



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



工业和信息化部“十二五”规划专著

先进复合材料 连接结构分析方法

赵丽滨 徐吉峰 著

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

先进复合材料在航空航天中的应用日趋广泛,其连接结构的强度是结构安全性的核心问题之一。本书基于国内外先进复合材料连接结构分析基础及作者在该领域的研究成果和经验总结,结合理论和实践系统地阐述了复合材料的基本概念、复合材料结构分析的理论基础和有限元分析技术、先进复合材料机械连接和胶接连接的基本知识和强度预测的典型分析方法,以及典型分析方法的应用实例和试验验证。

本书可作为航空、航天专业、力学专业研究生的教科书,也可供飞机结构设计和强度专业的教师和工程技术人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料连接结构分析方法 / 赵丽滨, 徐吉峰
著. -- 北京: 北京航空航天大学出版社, 2015. 3
ISBN 978-7-5124-1424-2

I. ①先… II. ①赵… ②徐… III. ①复合材料—联接—结构分析 IV. ①TB33

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2014)第 120272 号

版权所有,侵权必究。

先进复合材料连接结构分析方法

赵丽滨 徐吉峰 著

责任编辑 蔡 喆 唐甜甜

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱:goodtextbook@126.com 邮购电话:(010)82316936

北京时代华都印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:787×1 092 1/16 印张:17.25 字数:442 千字

2015 年 3 月第 1 版 2015 年 3 月第 1 次印刷 印数:2 000 册

ISBN 978-7-5124-1424-2 定价:39.00 元



序

先进复合材料具有优异的性能(高比强度、高比模量和优异的综合性能)、性能可设计性(可根据构件的应力流向和大小进行剪裁设计)、材料与构件一体性(材料与构件同时成型,提高构件的整体性)等特点,已成为航空航天器及其他装备结构的基本材料。实际结构常常需要将两个或两个以上的先进复合材料结构元件连接起来,并保证连接部位能够承受和传递一定的载荷。值得注意的是,连接是结构中的关键环节,其承载能力直接影响复合材料结构的完整性和安全性,而由于结构减重的需要,任何对其不够正确详尽的设计分析或验证,往往会使其成为结构中的薄弱环节。因此,先进复合材料连接一直是轻质、高效、低成本复合材料结构关键技术的中中之重。

现有复合材料连接结构的设计分析方法主要是在 20 世纪 70—80 年代基础上,基于试验数据建立起来的,而对试验数据的依赖,使得连接结构的设计周期长、成本高。复合材料的性能分散性和环境依赖性也使连接结构的设计和分析问题变得相当复杂,因而其设计准则和分析方法也比较保守。在过去的 30 年里,随着先进的试验测试技术和数值分析方法的发展,美国 AIM(Accelerated Insertion of Materials)计划以及欧盟的 BOJCAS(Bolted Joints in Composite Aircraft Structures)计划,均以过去的试验为主向以分析为主的设计方法转变。这就需要高效可靠的设计理论和分析方法,实现高可信度的设计和分析。

《先进复合材料连接结构分析方法》这本书即将问世。本书作者在先进复合材料连接结构方面作了多年研究工作并作出了突出贡献。本书总结了作者近些年在复合材料结构分析领域内的最新研究成果,深入系统地介绍了先进复合材料结构分析的基础理论、典型复合材料机械连接分析方法和典型胶接连接的分析方法。本书既涵盖了传统的经验方法,又创新性地发展了先进有限元分析技术,完善了机械连接的工程算法,并吸纳了近年来复合材料结构分析的一些新理论,如渐进损伤方法、内聚力模型方法等。书中首次对非平面胶接连接的分析方法进行了系统阐述。同时,对于机械连接和胶接连接,分别提供了大量工程实例,对各种分析方法进行验证和对比。在传统的强度和刚度分析的基础上,本书还描述了先进复合材料连接结构复杂的损伤演化过程和失效行为,以及关键因素对连接结构



力学特性的影响规律,不仅对复合材料结构技术具有促进作用,而且对复合材料连接结构的工程应用具有重要的指导意义。本书的出版,有利于推广先进科学的设计理念和分析方法,对于推动先进复合材料连接结构技术的发展,进而促进和带动复合材料的科学应用发挥重要作用,特为之序。

2014年11月



前 言

应用先进复合材料可显著降低飞机结构的重量,提高飞机的性能,这对现代飞机具有特殊重要的意义。50多年来复合材料及结构技术的发展,已给飞机结构设计带来了革命性的飞跃,有力地推动了航空航天事业的进一步发展。目前世界先进飞机结构已经出现了复合材料化的趋势,先进复合材料在飞机结构上应用的部位和用量已成为衡量飞机结构先进性和民机技术与市场竞争力的重要指标之一。

复合材料结构部件通常需由不同构件连接而成,如何将两个或两个以上的结构件有效连接为一体是制约飞机上进一步应用复合材料的瓶颈问题。近几年的研究工作和工程实践表明,飞机结构中的复合材料出现了很多问题,尤其在连接结构部位,制造缺陷、意外损伤以及损伤的无规则扩展十分严重。先进复合材料连接结构已经成为飞机机体结构大面积采用复合材料的重点和难点,是美欧一系列轻质、高效、低成本复合材料和整体化机体结构计划的重中之重。先进复合材料连接结构是复合材料整体结构中的薄弱环节,其强度直接影响复合材料结构的承载能力。结合理论、数值模拟和试验测试技术,深入理解复合材料连接结构的失效机理,准确地评价复合材料连接结构在外载荷作用下的力学性能,有效地预测先进复合材料连接结构的强度,理解各种关键因素对复合材料连接结构力学特性的影响规律,对于工程实践中复合材料连接的应用具有重要的意义。本书全面介绍了复合材料机械连接和胶接连接结构的强度分析方法,并给出大量得到试验验证的应用实例,可作为工程技术人员进行复合材料结构设计和分析的参考书,也可以作为相关专业研究生的教科书。

全书共分为三篇。第一篇为先进复合材料结构分析基础,包括1~5章:第1章介绍了复合材料的基本概念及性能特点;第2~3章阐述了单层板和层压板的弹性力学基础知识,这是复合材料结构分析重要的理论基础;第4章介绍了强度的概念和典型的失效准则,这一章对于理解复合材料的结构强度尤为重要;第5章概述了复合材料结构有限元分析的基本单元和软件功能,着重阐述了有限元分析中材料参数的设置方法以及计算结果的综合显示方法。

第二篇为先进复合材料机械连接分析方法,包括6~10章:第6章介绍了机械连接相关基础知识和欧盟BOJCAS计划情况;第7章针对机械连接的钉载分配问题,详细介绍了钉载分配的直接刚度法和采用有限元计算钉载分配的技术;第8章主要对螺栓连接的解析方法进行了总结,并简要说明了应力分析的有限元方法;第9章详细阐述了机械连接的强度预测方法,主要有工程常用的强度包线方法、特征尺寸方法和20世纪末以来广为流行的渐进损伤方法,这部分内容篇幅较大,囊括了多种方法的改进措施;第10章为典型机械连接分析方法应用实例,这



一章中,首先介绍了一系列机械连接的强度试验内容,然后分别采用第7章涉及到的钉载分配分析方法、第8章的应力分析方法和第9章的多种强度预测方法分别对典型机械连接试验件的钉载分配、应力分布和静强度进行计算,通过计算结果与试验结果的比较分析各种分析方法的适用性。

第三篇为先进复合材料胶接连接分析方法,包括11~14章:第11章介绍了胶接连接的基础知识和胶接连接分析方法的研究现状;第12章总结了胶接连接的理论应力分析方法,并简单介绍了有限元方法;第13章分别阐述了基于弹塑性力学的胶接连接强度预测方法、基于损伤力学的强度预测方法、基于断裂力学的强度预测方法以及基于损伤-断裂力学的强度预测方法;第14章为典型胶接连接分析方法应用实例,主要针对非平面 π 胶接连接结构,首先介绍了静力试验内容,然后阐述了拉伸载荷作用下非平面 π 胶接连接的渐进损伤模型、失效机理和承载/传载特性、弯曲载荷下非平面 π 胶接连接的失效和结构参数影响规律。考虑分层是胶接连接的主要失效模式,本章还研究了典型分层扩展试验和基于内聚力模型的分层扩展数值模拟方法。

各章节后面给出了相关综述和研究涉及到的参考文献。附录中给出了各向同性材料孔边弹性应力集中系数和紧固件强度校核方法,以便于读者查询。

本书的研究工作获得国家自然科学基金项目“整体化复合材料结构 π 胶接接头的破坏理论研究和结构设计(10902004)”和“先进复合材料连接渐进失效机理及大型飞机典型连接结构强度预测理论研究(11372020)”的资助。北京航空航天大学宇航学院以及北京航空航天大学出版社对本书的出版给予了大力支持。北京航空航天大学的张建宇和陈玉丽老师、博士后付月以及博士生刘丰睿、秦田亮、龚愉为本书内容的校核作了大量工作,硕士生周龙伟、王雅娜、支杰、齐德轩、林文娟、山美娟完成了本书录入、排版、绘图等大量工作。在本书即将出版之际,作者向他们表示衷心的感谢!

在撰写过程中,我们力求阐述全面、系统、准确,论述简洁,但由于本书涉及面颇广,内容含有较多的国际前沿研究进展和我们的研究成果,加上时间和作者水平有限,本书难免存在不足之处,至诚地希望读者和专家批评、指正。

作者
2014年5月

目 录

第一篇 先进复合材料结构分析基础

第 1 章 复合材料基本概念	1
1.1 复合材料的定义	1
1.2 复合材料的分类	1
1.3 复合材料的性能特点	2
1.4 复合材料结构的力学性能特点	5
参考文献	8
第 2 章 单层板弹性力学基础	9
2.1 各向异性体弹性力学基本方程	9
2.2 平面应力与平面应变	13
2.3 单层板的弹性特征	15
2.4 单层板的工程常数	19
参考文献	22
第 3 章 层压板弹性力学基础	23
3.1 经典层压板理论	23
3.2 层压板铺层应力分析	26
3.3 典型层压板刚度特征	27
参考文献	31
第 4 章 强度理论	32
4.1 本位强度	32
4.2 就地强度	33
4.3 复合材料结构强度特点	35
4.4 强度比	35
4.5 层间强度	37
4.6 典型失效准则	38
4.7 层间失效准则	45
参考文献	47
第 5 章 复合材料结构有限元分析技术基础	49
5.1 复合材料结构基本分析方法	49



5.2 基于 ABAQUS [®] 软件的有限元模型基本单元	51
5.2.1 基本单元	51
5.2.2 单元相关知识	54
5.3 材料本构参数设置	56
5.3.1 二维材料模型本构参数设置方法	57
5.3.2 三维材料模型本构参数设置方法	61
5.4 复杂复合材料结构载荷、强度和失效模式综合显示方法	66
5.5 基于 ABAQUS [®] 软件的二次开发功能	70
参考文献	71

第二篇 先进复合材料机械连接分析方法

第 6 章 复合材料机械连接概论	73
6.1 机械连接形式及典型失效模式	74
6.2 机械连接分析的主要内容	77
6.3 BOJCAS 计划简介	77
参考文献	79
第 7 章 钉载分配分析方法	81
7.1 概 述	81
7.2 钉载分配的刚度法	83
7.2.1 单排钉连接	83
7.2.2 多排单列钉连接	84
7.2.3 规则的多排多列钉连接	88
7.3 钉载分配计算的有限元方法	88
7.3.1 传统的二维有限元模型	89
7.3.2 新二维有限元模型	92
7.3.3 三维有限元模型	95
参考文献	97
第 8 章 机械连接应力分析方法	98
8.1 概 述	98
8.2 解析法	100
8.3 有限元法	103
参考文献	103
第 9 章 机械连接静强度预测方法	105
9.1 概 述	105
9.2 强度包线方法	105



9.2.1	复合材料应力集中减缩系数及应力集中减缓因子	106
9.2.2	经典强度包线方法	107
9.2.3	应力集中减缓因子修正方法	113
9.2.4	强度系数修正方法	114
9.2.5	钉载均布修正方法	115
9.2.6	基于旁路载荷影响的修正方法	116
9.3	特征尺寸方法	118
9.3.1	特征尺寸方法研究进展	118
9.3.2	经典特征曲线方法	119
9.3.3	特征曲线方法的修正研究	121
9.4	渐进损伤方法	125
9.4.1	复合材料机械连接中渐进损伤方法研究现状	125
9.4.2	渐进损伤方法四要素	127
9.4.3	渐进损伤方法预测流程	131
	参考文献	132
第 10 章	典型机械连接分析方法应用实例	135
10.1	典型螺栓连接静强度试验	135
10.1.1	试验件	135
10.1.2	试验过程	137
10.1.3	静强度试验结果	138
10.2	钉载分配计算	140
10.2.1	直接刚度法计算钉载分配	140
10.2.2	有限元法计算钉载分配	143
10.2.3	直接刚度法与有限元法计算结果的比较	145
10.3	螺栓连接的应力分析	146
10.3.1	解析法计算孔边应力分布	146
10.3.2	有限元法计算孔边应力分布	151
10.3.3	孔边应力分布曲线	155
10.3.4	紧固件对孔边应力的影响研究	156
10.4	基于强度包线方法的强度预测	162
10.4.1	经典强度包线方法	163
10.4.2	钉载均布修正方法	165
10.4.3	应力集中减缓因子修正方法	166
10.4.4	基于旁路载荷影响修正方法	169
10.5	基于特征尺寸方法的强度预测	171
10.5.1	经典特征曲线方法	172
10.5.2	基于关键层的特征曲线方法	173
10.5.3	三参数特征曲线方法	174



10.6 基于渐进损伤方法的强度预测	175
10.6.1 复合材料开孔板的渐进损伤分析	176
10.6.2 单钉连接渐进损伤分析	178
10.6.3 多钉连接渐进损伤分析	180
参考文献	182

第三篇 先进复合材料胶接连接分析方法

第 11 章 复合材料胶接连接概论	183
11.1 胶接连接的特点、基本形式及典型失效模式	183
11.2 胶接连接分析方法研究现状	187
11.2.1 国外相关研究计划	187
11.2.2 平面胶接连接	189
11.2.3 非平面胶接连接	191
参考文献	194
第 12 章 胶接连接应力分析方法	198
12.1 理论分析方法	198
12.1.1 复合材料单搭接胶接接头应力分析方法	198
12.1.2 复合材料双搭接胶接接头应力分析方法	201
12.2 有限元分析方法	203
参考文献	203
第 13 章 胶接连接静强度预测方法	204
13.1 概 述	204
13.2 基于弹塑性力学的传统强度预测方法	205
13.2.1 应力/应变极值方法	205
13.2.2 等效应力方法	206
13.2.3 胶层的失效准则	206
13.3 基于损伤力学的方法	207
13.3.1 传统的损伤力学分析方法	207
13.3.2 损伤区域理论	208
13.3.3 渐进损伤方法	209
13.4 基于断裂力学的方法	209
13.4.1 弹塑性的断裂力学预测方法	209
13.4.2 虚拟裂纹闭合技术	210
13.5 基于损伤-断裂力学的方法	212
13.5.1 内聚力模型	212
13.5.2 内聚力模型的分层萌生及分层扩展准则	214



13.5.3 基于双线性本构的内聚力模型基本参数	215
参考文献	218
第 14 章 典型胶接连接分析方法应用实例	222
14.1 典型复合材料 π 胶接接头静强度试验	222
14.1.1 试验件	222
14.1.2 拉伸试验	224
14.1.3 弯曲试验	227
14.2 拉伸载荷下复合材料 π 胶接接头的渐进损伤模型研究	228
14.2.1 复合材料 π 胶接接头渐进损伤模型	228
14.2.2 复合材料 π 胶接接头强度预测	230
14.2.3 修正最大应力准则的验证研究	235
14.3 拉伸载荷下复合材料 π 胶接接头的失效机理及承载/传载特性	239
14.3.1 失效机理及破坏过程	239
14.3.2 应力分布及传载路径	241
14.4 弯曲载荷下复合材料 π 胶接接头的失效	243
14.5 典型复合材料 π 胶接接头结构参数影响	246
14.6 基于内聚力模型的分层扩展模拟	249
14.6.1 典型分层扩展试验	249
14.6.2 内聚力模型的参数模型	251
14.6.3 分层扩展模拟及参数模型验证	254
参考文献	255
附录 A 各向同性材料孔边弹性应力集中系数	256
A.1 各向同性材料受载孔挤压弹性应力集中系数	256
A.2 各向同性材料开孔拉伸弹性应力集中系数	258
参考文献	259
附录 B 紧固件强度校核	260
B.1 螺栓抗拉强度校核	260
B.2 螺栓抗剪强度校核	260
B.3 螺栓挤压强度校核	260
B.4 拉剪同时作用下螺栓强度校核	260
B.5 螺纹强度校核	261
参考文献	261

第一篇 先进复合材料结构分析基础

第 1 章 复合材料基本概念

先进复合材料(Advanced Composites)主要指结构性能相当于或优于铝合金的复合材料。先进复合材料诞生于 20 世纪 60 年代末,由于其具有高的比强度和比刚度、性能可剪裁设计、抗疲劳性和腐蚀性好、易于整体成型等优异性能,一经问世就显示了巨大的生命力。在飞机结构上应用先进复合材料,可比常规的金属结构减重 25%~30%,并可明显提高飞机的性能,这对现代飞行器具有特殊重要的意义^[1]。50 多年来,复合材料及结构技术的发展,已给飞机结构设计带来了革命性的飞跃,有力地推动了航空航天事业的进一步发展。目前世界先进飞机结构已经出现了复合材料化的趋势,先进复合材料在飞机结构上应用的部位和用量已成为衡量飞机结构先进性和民机技术与市场竞争力的重要指标之一。国际民机市场上,波音 787 飞机复合材料占机体结构重量的 50%,空中客车公司的 A350XWB 宽体飞机复合材料用量达到 52%^[2]。

1.1 复合材料的定义

复合材料是由两种或两种以上不同性质的材料用物理和化学方法在宏观尺度上组成的具有新性能的材料。其中的每一种组成材料称为复合材料的组分,包容组分称为基体材料(简称基体),而被包容组分称为增强材料,基体与增强材料的结合面称为界面。

基体材料采用各种树脂、金属和非金属材料。增强材料采用各种纤维状材料或其他材料。增强材料在复合材料中起主要作用,由它提供复合材料的刚度和强度。基体材料起配合作用,它支持、粘结和固定纤维材料、传递纤维间的载荷、保护纤维、防止磨损或腐蚀等。基体材料也可以改善复合材料的某些性能,如要求比重小,则选取树脂作基体材料;要求有耐高温性能,可用陶瓷作为基体材料;为得到较高的韧性和剪切强度,一般考虑用金属作为基体材料。复合材料的性能不仅取决于组分材料各自的性能,还依赖于基体材料与增强材料的界面性质。两者粘合性好,能形成较理想的界面,可有效提高复合材料的刚度和强度。

1.2 复合材料的分类

复合材料按应用的性质可以分为功能复合材料和结构复合材料两大类。功能复合材料主要具有特殊的功能。例如导电复合材料采用聚合物与各种导电物质构成,可用于飞机的闪电防护;烧蚀材料由各种无机纤维增强树脂或非金属基体构成,可用于高速飞行器头部的热防



护。而结构复合材料大致可以按照基体材料性质、增强材料形状和结构形式进行分类。

按照基体材料性质,复合材料可分为非金属基复合材料和金属基复合材料。用作复合材料基体的非金属主要是树脂、陶瓷和碳,相应的复合材料分别称为树脂基、陶瓷基和碳基复合材料。树脂基复合材料的基体是一种高分子聚合物,因此也称聚合物基复合材料。基体树脂主要有热固性树脂和热塑性树脂两大类。热固性树脂固化后相当刚硬,加热不会软化,固化过程不可逆。热塑性树脂在高温下可以软化和熔融,韧性和抗冲击性能好。陶瓷基复合材料的基体主要有碳化硅、氮化硅和氧化铝等。碳基复合材料的基体基本是碳,由于它的增强材料一般都是碳纤维,因此也称为碳/碳复合材料。金属基复合材料的基体主要是密度较低的铝合金、钛合金以及金属间化合物,增强物一般有硼纤维、碳化硅纤维、晶须和颗粒。

按照增强材料的形状分类,复合材料可分为纤维增强复合材料与颗粒增强复合材料。纤维增强复合材料有连续纤维增强复合材料和不连续纤维增强复合材料。在复合材料中,增强纤维的长度相对于复合材料的总体尺度而言,同一量级的为长纤维,具有长纤维的复合材料称为连续纤维增强复合材料;小于这一量级的为短纤维,具有短纤维的复合材料称为不连续纤维增强复合材料。复合材料中的纤维一般具有较高的强度,是主要的承载材料,起到了增强基体的作用,常见的纤维主要有玻璃纤维、碳纤维和芳纶纤维等。颗粒增强复合材料颗粒在 $0.01 \sim 50 \mu\text{m}$ 之间,通过颗粒阻止基体变形或阻止基体材料的位错运动,起到增强作用。

按照结构形式来分,复合材料可以分为层压复合材料、三维编织复合材料和夹层复合材料。层压复合材料是将物理性质不同的复合材料单层或单一材料薄片铺叠粘结制成的层压板或层压壳,这类复合材料在航空航天器结构中得到了最广泛的使用。另外,可以将玻璃纤维复合材料单层或芳纶纤维复合材料单层与铝合金薄片粘结在一起,形成混杂的层压复合材料,这类复合材料具有优异的抗冲击损伤和抗疲劳性能,可用于飞机结构中易受冲击或震动较大的部位。还可以将玻璃纤维或芳纶纤维与碳纤维在同一层内进行混杂或是一层一层相间混杂,制成混杂的层压复合材料,这类复合材料具有较高的抗冲击性能,可用于飞机复合材料防弹装甲。三维编织复合材料是将碳纤维束或碳化硅纤维束采用编织的方法,编织成三维预成形骨架,然后充入基体制成的复合材料。基体可以是树脂、陶瓷或碳。这类材料克服了层状复合材料层间强度低的弱点,具有较高的抗冲击性能和损伤容限。夹层复合材料是在两块复合材料层压板之间填充低密度的芯材所做的复合材料,芯材主要有蜂窝和硬质泡沫塑料等。蜂窝可采用铝制蜂窝、玻璃布蜂窝和 Nomex 蜂窝。夹层复合材料具有优异的弯曲刚度,质量轻,在航空航天结构中广泛应用。

本书中所涉及的分析方法主要是针对连续纤维增强的热固性树脂基层压复合材料结构进行阐述的。

1.3 复合材料的性能特点

玻璃纤维增强复合材料的特点是比强度高、耐腐蚀、电绝缘、易制造、成本低,很早就开始应用,目前应用广泛,其缺点是比模量较低。碳纤维复合材料有很高的比强度和比模量,耐高温、耐疲劳、热稳定性好,由于近年来其制造成本显著降低,现已逐步扩大应用,成为主要的先进复合材料。芳纶纤维增强复合材料有较高的比强度和比模量,成本比玻璃纤维增强复合材料高,但比碳纤维复合材料低,正发展成较广泛应用的材料。纤维增强复合材料的主要特性



如下:

1) 比强度及比刚度高

比强度是强度与密度之比,比模量(比刚度)是模量与密度之比。这两个比值反映了相同的强度或刚度条件下材料的轻质特性。表1-1列出了典型材料的比强度与比刚度特性^[3]。除玻璃环氧复合材料外其余复合材料的比刚度比金属要高很多,特别是高模量碳纤维复合材料。而芳纶纤维复合材料、硼纤维复合材料及碳纤维复合材料等具有较高的比强度。这是由于材料的强度和刚度是随着它们的分子排列的完善程度而增加的,但并非任意一种块状或纤维状结构材料就可以具有高的强度和刚度,只有当纤维均匀分布在某一种适当的基体之中这种性能才能充分发挥出来。普通状态下,碳、硼颗粒的强度并不大,可是一旦使硼、碳晶粒处于定向结构的纤维状态时就显出惊人的强度和刚度,再加上碳和硼都是元素周期表中排在前面位置的轻质材料,因此该类材料呈现出很高的比强度和比刚度。

正是由于复合材料的这一特性,复合材料用于航空航天器结构,可以大幅度地减轻重量。但需要注意的是,比强度高和比模量高只说明复合材料沿纤维方向受力的优越特性。在航空航天结构中一般使用层压板或层压壳,由不同铺层角度的复合材料单层铺叠而成,其模量和强度都比单层低,减轻重量的效果还需要针对材料体系和具体问题进行分析。

表1-1 常用金属材料 and 纤维增强复合材料的比强度及比刚度值

材料	密度 /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	拉伸强度 /MPa	拉伸模量 /GPa	比强度 /($\text{MPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$)	比模量 /($\text{GPa} \cdot \text{g}^{-1} \cdot \text{cm}^3$)
S玻璃/环氧	2.0	1790	55	895	27.5
高强碳/环氧	1.57	1520	138	968	87.9
高模碳/环氧	1.60	1210	221	756	138.0
芳纶/环氧	1.38	1520	86	1101	62.3
高强碳/双马	1.61	1548	135	961	83.9
硼纤维/Al	2.49	1343	217	539	87.1
高强铝合金	2.7	647	72	240	26.7
超高强钢	7.83	1750	207	223	26.4
镁合金	1.77	276	46	155	26
钛合金	4.43	1060	113	239	26

2) 显著各向异性^[4]

复合材料有明显的各向异性力学特点,这是与金属材料显著的区别。对于单向纤维铺设的单层,沿纤维方向和垂直于纤维方向是材料的两个主方向,两个方向的弹性模量、强度、热膨胀系数都有显著的差别,具有各向异性。一般来说,复合材料沿纤维方向的力学性能高,而垂直于纤维方向的性能一般较低,特别是层间剪切强度很低。表1-2列出了两种国产典型树脂基复合材料单层的力学性能。可以看到两个方向的弹性模量差一个数量级,强度的差别更大。这是由于复合材料的性能是由纤维和基体材料本身的性能决定的,沿纤维方向的性能主要由纤维性能决定,而垂直于纤维方向的性能则主要取决于基体材料的性能和基体与纤维间的结合能力。



表 1-2 典型树脂基复合材料单向板的力学性能

复合材料		T300/5222	X850
力学性能	纵向拉伸模量 E_1 /GPa	135.0	171.2
	横向拉伸模量 E_2 /GPa	9.4	8.8
	面内剪切模量 G_{12} /GPa	5.0	5.5
	泊松比 ν_{12}	0.28	0.35
	纵向拉伸强度 X_t /MPa	1490.0	3235.0
	横向拉伸强度 Y_t /MPa	40.7	70.9
	纵向压缩强度 X_c /MPa	1210.0	1054.0
	横向压缩强度 Y_c /MPa	197.0	195.3
	面内剪切强度 S /MPa	92.3	149.3

复合材料的各向异性带来了变形的复杂性。各向同性材料在单向拉伸时只引起正应变,纯剪切时只引起剪应变。复合材料单层在沿纤维方向拉伸时也只引起正应变,纯剪切时也只引起剪应变,但是在受到偏离纤维方向的拉伸时,除了引起正应变外,还会产生剪切变形;在受到偏离纤维方向的剪切时,除了有剪应变外还有正应变产生。这种现象称为耦合效应。耦合效应的存在大大增加了复合材料力学分析的复杂程度。

3) 具有可设计性

复合材料的性能除了取决于纤维和基体本身的性能外,还取决于纤维的含量和铺设方式。复合材料的各向异性特性为复合材料结构的可设计性创造了条件。设计人员可以根据载荷条件和结构构件形状,通过选择纤维的含量、铺层顺序、铺层角度等参数,进行剪裁设计,用最少的材料设计出符合具体性能要求的结构,实现最优设计。另外,复合材料非对称层压板的耦合效应也为结构设计提供了新的设计自由度,使均质各向同性材料无法实现的设计方案得以实现。

4) 抗疲劳性能好

复合材料抗疲劳性能的优越性是复合材料在飞机结构上应用的另一大优势。单向复合材料 $S-N$ 曲线相对比较平坦,拉伸疲劳极限与静强度之比一般可达 40%~70%,而金属材料一般为 30%~50%^[4]。

由纤维和基体构成的复合材料,其疲劳破坏机理完全不同于金属材料。金属材料往往在形成疲劳主裂纹后,由于金属的各向同性特性,裂纹传播无阻碍,很快扩展并最终导致了疲劳失效。金属断裂破坏一般事前没有任何征兆,一旦发生,甚为严重。而复合材料在循环载荷下一般没有主裂纹,而是形成由大量各种微裂纹构成的损伤区,包括基体裂纹、纤维断裂、界面脱胶及分层等多种损伤形式。尽管这些损伤远超过金属材料的损伤,其导致的裂纹尺寸扩展达到临界尺寸也较金属快,但多向交错的铺层以及复合材料中不同的相与界面能很好地减缓和阻止裂纹的进一步扩展,致使复合材料构件在疲劳破坏前具有明显的征兆,能够及时进行补救。

5) 减振性能好

结构的自振频率除与结构本身形状有关外,还与材料比刚度的平方根成正比。复合材料



高比刚度特性所带来的高自振频率,可避免工作状态下的共振导致的早破坏。同时,复合材料的纤维与基体间的界面具有吸振能力,并且复合材料的基体是粘弹性材料,具有较高的振动阻尼。一般金属结构的阻尼比约为2~3%,而复合材料结构的阻尼比约为5~8%。因而复合材料具有优异的减振性能。

6) 某些复合材料高温性能好^[4]

通常铝合金可用于200~250℃,更高的温度将使其弹性模量和拉伸强度大幅度下降,但是碳纤维增强铝基复合材料能在400℃的高温下长期工作,力学性能稳定;碳纤维增强陶瓷基复合材料能在1200~1400℃下工作;碳/碳复合材料能承受近3000℃的高温。常用的树脂基复合材料能在176.7℃的温度下长期工作,而聚酰亚胺树脂则能在315℃下长期工作。

7) 良好的热稳定性

诸多结构材料中,纤维增强复合材料可获得良好的热稳定性,如碳纤维与Kevlar K-49纤维的热膨胀系数均是负值,当它们与具有正热膨胀系数的树脂基体结合,制成的复合材料热膨胀系数相当小,几乎为零。为此,可以设计复合材料热膨胀系数,使结构具有良好的热稳定性,当环境温度变化时减小结构的热应力和热变形。

8) 成形工艺好,节约能源

复合材料成形工艺的最大特点是容易加工成任意型面的零件,适合于整体成形。不需要很多复杂的机械加工设备,生产工序较少,可缩短生产周期,降低制造成本。其中共固化和整体成形技术,可以形成整体的复杂薄壁结构,提高结构的承载能力,并可显著减少零部件、紧固件和接头数目。复合材料构件与金属材料相比,制造过程中的能量消耗低,且由于这种材料大幅度减轻了飞机等结构重量,可以有效降低飞机使用过程中的能量消耗。

9) 材料性能分散性大

由于复合材料组分性能的分散性以及材料与构件同时成形的特点,使复合材料性能数据分散性较大,质量控制和检测困难,但随着加工工艺改进和检测技术的发展,材料质量可提高,性能分散性也会减小。

此外,复合材料还具有抗磁性、抗冲击性、透电磁波性、抗腐蚀、耐磨等良好性能。

1.4 复合材料结构的力学性能特点

构成复合材料的基本单元是单层板,简称单层或铺层。从宏观力学的角度对复合材料结构的力学特性进行分析时,根据单层的刚度和强度来分析复合材料结构的表观力学性能,将两相材料各自的性能及其相互作用的影响反映在平均的表观性能上。本书从结构应用角度分析,以单层作为研究对象,进一步阐述复合材料结构的基本特点:

1) 复合材料基本性能具有显著的方向性

复合材料的基本力学性能是通过单层的性能来描述的,具有显著的方向性。单向层压板沿纤维方向的拉伸性能主要由纤维控制,压缩性能则是由纤维和基体共同控制;垂直于纤维方向的力学性能主要由基体的性能控制。一般来说,单向层压板沿纤维方向的力学性能高于垂直于纤维方向的性能和纵横剪切性能1~2个数量级,如表1-2所列。偏离纤维方向的力学性能在纵、横向性能之间是有规律变化的,图1-1和图1-2给出X850复合材料单层工程弹性常数 E_x , G_{xy} 和 ν_{xy} 及剪拉耦合系数 $\eta_{x,xy}$ 随纤维偏离角 θ 变化的曲线。同时,热/湿膨胀系数