



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

复合材料飞机结构强度 设计与验证概念

An Introduction to Design and Verification
for Composite Aircraft Structures

沈真 张晓晶 编著



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



大飞机出版工程
总主编 顾诵芬

复合材料飞机结构强度 设计与验证概念

An Introduction to Design and Verification
for Composite Aircraft Structures

沈 真 张晓晶 编著
汪 海 审校



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

内 容 提 要

本书基于国内外飞机复合材料结构强度设计与验证方面的经验教训和作者 30 年来在该领域的研究成果和经验总结,通过对复合材料与金属在力学性能等方面的差别分析,系统总结了飞机复合材料结构强度设计与验证的六大特点,给出了复合材料许用值和设计值的确定方法,阐述了飞机复合材料结构强度设计要求和验证方法。

为便于读者有效地使用本书,作者在相关章节内对有关知识和文献以章内附录的形式给出。此外,本书还带有两个附录:材料力学性能表征和咨询通报 AC 20-107B 复合材料飞机结构(译稿)。

本书适用于飞机结构专业的研究生和从事复合材料飞机结构设计的技术人员,也可供其他领域复合材料结构设计人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

复合材料飞机结构强度设计与验证概论/沈真,张晓晶编
著. —上海:上海交通大学出版社,2011

(大飞机出版工程)

ISBN 978-7-313-07960-2

I. ①复… II. ①沈…②张… III. ①飞机—复合材料—
—结构强度—设计 IV. ①V257

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 241353 号

复合材料飞机结构强度设计与验证概论

沈 真 张晓晶 编著

汪 海 审校

出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

浙江云广印业有限公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:19.75 字数:388 千字

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07960-2/V 定价:85.00 元

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:0573-86577317

丛书编委会

总主编：

顾诵芬（中国航空工业集团公司科技委副主任、两院院士）

副总主编：

金壮龙（中国商用飞机有限责任公司副董事长、总经理）

马德秀（上海交通大学党委书记、教授）

编委：（按姓氏笔画排序）

王礼恒（中国航天科技集团公司科技委主任、院士）

王宗光（上海交通大学原党委书记、教授）

刘洪（上海交通大学航空航天学院教授）

许金泉（上海交通大学船舶海洋与建筑工程学院工程力学系主任、教授）

杨育中（中国航空工业集团公司原副总经理、研究员）

吴光辉（中国商用飞机有限责任公司副总经理、总设计师、研究员）

汪海（上海交通大学航空航天学院副院长、研究员）

沈元康（国家民航总局原副局长、研究员）

陈刚（上海交通大学副校长、教授）

陈迎春（中国商用飞机有限责任公司常务副总设计师、研究员）

林忠钦（上海交通大学副校长、教授）

金兴明（上海市经济与信息化委副主任、研究员）

金德琨（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

崔德刚（中国航空工业集团公司科技委委员、研究员）

敬忠良（上海交通大学航空航天学院常务副院长、教授）

傅山（上海交通大学航空航天学院研究员）

总 序

国务院在 2007 年 2 月底批准了大型飞机研制重大科技专项正式立项,得到全国上下各方面的关注。“大型飞机”工程项目作为创新型国家的标志工程重新燃起我们国家和人民共同承载着“航空报国梦”的巨大热情。对于所有从事航空事业的工作者,这是历史赋予的使命和挑战。

1903 年 12 月 17 日,美国莱特兄弟制作的世界第一架有动力、可操纵、重于空气的载人飞行器试飞成功,标志着人类飞行的梦想变成了现实。飞机作为 20 世纪最重大的科技成果之一,是人类科技创新能力与工业化生产形式相结合的产物,也是现代科学技术的集大成者。军事和民生对飞机的需求促进了飞机迅速而不间断的发展,应用和体现了当代科学技术的最新成果;而航空领域的持续探索 and 不断创新,为诸多学科的发展和相关技术的突破提供了强劲动力。航空工业已经成为知识密集、技术密集、高附加值、低消耗的产业。

从大型飞机工程项目开始论证到确定为《国家中长期科学和技术发展规划纲要》的十六个重大专项之一,直至立项通过,不仅使全国上下重视起我国自主航空事业,而且使我们的人民、政府理解了我国航空事业半个世纪发展的艰辛和成绩。大型飞机重大专项正式立项和启动使我们的民用航空进入新纪元。经过 50 多年的风雨历程,当今中国的航空工业已经步入了科学、理性的发展轨道。大型客机项目其产业链长、辐射面宽、对国家综合实力带动性强,在国民经济发展和科学技术进步中发挥着重要作用,我国的航空工业迎来了新的发展机遇。

大型飞机的研制承载着中国几代航空人的梦想,在 2016 年造出与波音 B737 和

空客 A320 改进型一样先进的“国产大飞机”已经成为每个航空人心中奋斗的目标。然而,大型飞机覆盖了机械、电子、材料、冶金、仪器仪表、化工等几乎所有工业门类,集成了数学、空气动力学、材料学、人机工程学、自动控制学等多种学科,是一个复杂的科技创新系统。为了迎接新形势下理论、技术和工程等方面的严峻挑战,迫切需要引入、借鉴国外的优秀出版物和数据资料,总结、巩固我们的经验和成果,编著一套以“大飞机”为主题的丛书,借以推动服务“大型飞机”作为推动服务整个航空科学的切入点,同时对于促进我国航空事业的发展和加快航空紧缺人才的培养,具有十分重要的现实意义和深远的历史意义。

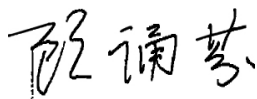
2008年5月,中国商用飞机有限公司成立之初,上海交通大学出版社就开始酝酿“大飞机出版工程”,这是一项非常适合“大飞机”研制工作时宜的事业。新中国第一位飞机设计宗师——徐舜寿同志在领导我们研制中国第一架喷气式歼击教练机——歼教1时,亲自撰写了《飞机性能捷算法》,及时编译了第一部《英汉航空工程名词字典》,翻译出版了《飞机构造学》、《飞机强度学》,从理论上保证了我们飞机研制工作。我本人作为航空事业发展50年的见证人,欣然接受了上海交通大学出版社的邀请担任该丛书的主编,希望为我国的“大型飞机”研制发展出一份力。出版社同时也邀请了王礼恒院士、金德琨研究员、吴光辉总设计师、陈迎春副总设计师等航空领域专家撰写专著、精选书目,承担翻译、审校等工作,以确保这套“大飞机”丛书具有高品质和重大的社会价值,为我国的大飞机研制以及学科发展提供参考和智力支持。

编著这套丛书,一是总结整理50多年来航空科学技术的重要成果及宝贵经验;二是优化航空专业技术教材体系,为飞机设计技术人员培养提供一套系统、全面的教科书,满足人才培养对教材的迫切需求;三是为大飞机研制提供有力的技术保障;四是将许多专家、教授、学者广博的学识见解和丰富的实践经验总结继承下来,旨在从系统性、完整性和实用性角度出发,把丰富的实践经验进一步理论化、科学化,形成具有我国特色的“大飞机”理论与实践相结合的知识体系。

“大飞机”丛书主要涵盖了总体气动、航空发动机、结构强度、航电、制造等专业方向,知识领域覆盖我国国产大飞机的关键技术。图书类别分为译著、专著、教材、

工具书等几个模块；其内容既包括领域内专家们最先进的理论方法和技术成果，也包括来自飞机设计第一线的理论和实践成果。如：2009年出版的荷兰原福克飞机公司总师撰写的 *Aerodynamic Design of Transport Aircraft*（《运输类飞机的空气动力设计》），由美国堪萨斯大学2008年出版的 *Aircraft Propulsion*（《飞机推进》）等国外最新科技的结晶；国内《民用飞机总体设计》等总体阐述之作和《涡量动力学》、《民用飞机气动设计》等专业细分的著作；也有《民机设计1000问》、《英汉航空双向词典》等工具类图书。

该套图书得到国家出版基金资助，体现了国家对“大型飞机项目”以及“大飞机出版工程”这套丛书的高度重视。这套丛书承担着记载与弘扬科技成就、积累和传播科技知识的使命，凝结了国内外航空领域专业人士的智慧和成果，具有较强的系统性、完整性、实用性和技术前瞻性，既可作为实际工作指导用书，亦可作为相关专业人员的学习参考用书。期望这套丛书能够有益于航空领域里人才的培养，有益于航空工业的发展，有益于大飞机的成功研制。同时，希望能为大飞机工程吸引更多的读者来关心航空、支持航空和热爱航空，并投身于中国航空事业做出一点贡献。

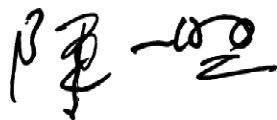


2009年12月15日

序

近年来,复合材料在飞机结构中的应用迅猛增加,特别是波音 B787 和空客 A350 飞机结构中复合材料用量已达到结构重量的 50%,标志着低成本复合材料技术已进入了工程化应用的新阶段。目前国内所有在研飞机结构,均不同程度使用了复合材料。由于复合材料和金属材料性能存在明显差别,复合材料结构强度设计与金属结构也明显不同。因此迫切要求飞机结构设计人员掌握复合材料结构强度设计与验证技术,才能充分发挥复合材料的优势,扬长避短,从而设计出性能与成本均优于金属结构的飞机。目前虽然已出版了很多有关复合材料的教科书,但缺乏此类较工程实用的著作,因此该书的出版可以填补这方面的空缺。

沈真研究员从 20 世纪 80 年代初即开始进行复合材料力学,特别是有关冲击损伤和复合材料结构耐久性/损伤容限的研究,近年来又在复合材料力学性能表征方面做出了开拓性的努力。与此同时参与了国内几乎所有复合材料飞机结构的研制,翻译了大量国外文献,引进了国外的先进技术。近年来又主持编写了军用飞机复合材料结构强度规范和民用飞机复合材料结构强度刚度设计与验证指南。该书在对国内外文献进行归纳、理解和消化的同时,融入了他的毕生经验,是一本既有理论高度,又能指导工程实践的实用书籍。



2011 年 8 月

(陈一坚:中国工程院院士,JH7(飞豹)总设计师)

前 言

飞机结构设计的目标是得到能满足结构完整以及长寿命和低成本要求的结构。由于复合材料与金属在性能,特别是破坏机理上有着明显差别,使得飞机复合材料结构完整性要求的很多具体内容都不同于金属结构,因此,复合材料飞机结构强度设计和验证技术与金属结构也有很多不同。本人30年来一直从事复合材料强度研究,参与了迄今为止几乎所有国内复合材料飞机结构的研制,对复合材料飞机结构强度设计与验证技术有一些粗浅的体会,而迄今为止尚未见到国内外有相关内容的著作,深感有必要将这些经验教训进行总结,以供复合材料飞机结构设计人员参考。近年来本人有幸主持编写了 GJB 67.14—2008《军用飞机结构强度规范——复合材料结构》和《民用飞机结构强度刚度设计与验证指南——复合材料结构分册》(中国飞机强度研究所),对国内外的有关文献和国内复合材料飞机结构研制的经验教训进行了总结,并受邀在上海交通大学大型民机研究生“特班”开设了“飞机复合材料结构耐久性和损伤容限设计”课程(2009~2011),在讲授过程中逐渐形成了本书的雏形。根据讲课过程中学生的反映,特别是对2009年9月颁布的FAA咨询通报AC 20-107B中新增内容的理解,作者对初稿作了进一步修改,才有本书的诞生。

应该指出,复合材料飞机结构强度设计与验证的内容涉及静力学、动力学、疲劳、损伤容限及使用维护与修理等很多学科,本书的宗旨仅限于阐明与金属结构在处理相关问题时的差别和处理方法,因此没有提及与金属结构在设计及验证技术中相同的内容,例如动力学问题。复合材料结构的使用维护和修理是强度设计与验证的重要内容之一,但国内缺乏这方面的研究,限于作者的水平,书中没有给出有关的论述。结构分析、连接设计、稳定性设计等是强度设计的重要内容,国内已有相关的专著,限于篇幅,本书没有予以详细的论述。

本书在编撰过程中,得到了国内外同行专家章怡宁、黎观生、杨乃宾、李东升、李书欣、李武铨、王全荣、李令芳、陈绍杰、钟至人、郑晓玲、矫桂琼、汪海、李强、王进、柴亚南、杨胜春等的帮助,对很多问题,例如许用值与设计值、CAI(冲击后压缩强度)等方面的观点是在与他们多年的讨论和争论中逐渐形成的。本人还要对中国飞机强度研究所同事仝永喆、沈薇、孙坚石、王俭、刘峰、刘俊石、张立鹏、萧娟、陈涛、杨宇、陈向明、林国伟、李磊、熊华锋等表示深深的谢意,他们提供了大量支持本书观点的试验数据,并进行了相关分析。本书的附录 B——FAA 咨询通报 AC 20-107B《复合材料飞机结构》的译稿经过了丁惠梁、陈绍杰、杨乃宾、钟至人、李东升、李书欣、白嘉模、吴一波、李卫、王国平、朱梅庄和刘秀芝的校对或润色,使译稿的错误减到了最少,在此一并表示感谢。除此之外,还要对陈普会和唐啸东表示特别的感谢,多年来长期共事,除了日常对各种学术观点的切磋与讨论外,书中还采纳了他们的部分研究成果。同时,也衷心感谢江苏恒神的钱云宝先生,他为作者提供了发挥余热的舞台,从而完成了对本书的最后一次修订。最后对妻子王锐数十年来在背后默默的支持表示发自内心的感激,正是她的无私奉献,使得作者能在复合材料的广袤空间里无忧无虑地专致探索。

虽然本人对本书的内容进行了仔细的推敲,但复合材料飞机结构强度设计与验证技术仍在发展中,对某些问题的看法在业界仍有争议,本书的观点作为一家之言仅供参考。

本书主要由本人编写,张晓晶参与了全书结构和内容取舍的讨论、部分章节的编写和全书的校订。汪海对本书进行了审校。

沈 真

2011年12月

术语和缩略语

1. 术语

复合材料(composites, composite materials)——由异质、异性、异形的有机聚合物、无机非金属、金属等材料作为基体或增强体,通过复合工艺组合而成的材料。

单向带(tape)——平行排列的连续纤维或以连续纤维为经向而在纬向加少量更细纤维的织物,经浸胶后的中间产品称为单向带,亦称预浸带。

织物(fabric)——以纱线、长丝等为材料,运用各种织造及其他方法制成的平状物。如机织物、针织物、编织物、无纺织物等。

固化(curing)——通过热、光、辐射或化学添加剂等的作用,使热固性树脂经不可逆化学反应完成交联的过程。

残余应力(residual stress)——复合材料制件内部由于固化后的降温和吸湿等引起的应力。

层(单层)(lamina, ply)——复合材料制件中一层单向带或织物称为层,是复合材料制件中最基本的单元。

层压板(laminate)——由单向或多向铺层压制而成的复合材料板,有时也称为层合板。

纤维含量(fiber content)——复合材料中含有的纤维数量。通常,用复合材料的体积分数或千克(重)量分数来表示。

玻璃化转变温度(glass transition temperature)——在无定形聚合物或部分结晶聚合物无定形区域内,在黏流态或橡胶态和玻璃态之间发生可逆变化温度范围的近似中点值(T_g)。复合材料体系最高使用温度的确定与其有关。

材料工作温度极限(Material Operational Limit, MOL)——考虑温度和湿度对聚合物基复合材料性能的影响,将使用可能达到的最高吸湿量时的玻璃化转变温度

减去一安全余量,所确定的材料允许的最高使用温度。

吸湿(moisture absorption)——复合材料在环境条件下吸进水分的一种行为。

吸湿量(moisture content)——复合材料暴露于环境条件下所含水分的度量,用质量分数表示。

吸湿平衡(moisture equilibrium)——在周围环境下吸湿量基本上不再变化时,材料所达到的状态。

平衡吸湿量(moisture equilibrium content)——对给定的湿暴露水平,材料在吸湿平衡状态下所达到的最大吸湿量,用材料干态质量的百分数表示。

湿暴露水平(moisture exposure level)——浸润环境严重程度的度量或描述,用存在的液体或蒸汽的量值来表征。

许用值(allowables)——在概率基础上(如分别具有 99% 概率和 95% 置信度,与 90% 概率和 95% 置信度的 A 或 B 基准值),由层压板或单层级的试验数据确定的材料值。导出这些值要求的数据量由所需的统计意义(或基准)决定。许用值通常包括材料许用值和设计许用值两部分。

材料许用值(material allowables)——由单层级的试验数据确定的材料值。

设计许用值(design allowables)——由含结构典型特征(包括铺层比例、开孔、充填孔、机械连接等)层压板的试验数据确定的材料值,适用于由同一材料体系和同一工艺规范制造的不同结构。

设计值(design values)——为保证整个结构的完整性具有高置信度,由试验数据确定并被选用的材料、结构元件和结构细节的性能。这些值通常基于为考虑实际结构状态而经过修正的许用值,并用于分析计算安全裕度。

A 基准值(A-basis value)——一个力学性能的限定值,在 95% 的置信度下,99% 性能数值群的值高于此值。

B 基准值(B-basis value)——一个力学性能的限定值,在 95% 的置信度下,90% 性能数值群的值高于此值。

平均值(average value)——有效试样试验结果的算术平均值,试样样本大小视具体性能要求而定。

环境(environment)——在使用中能预期到,且会影响结构的,单独或联合出现的外部、非偶然的状况(机械加载除外)(如温度、吸湿、紫外线辐射和燃油)。

湿热影响(hygrothermal effect)——由吸湿量和温度变化引起材料性能和制件尺寸改变的现象。

环境补偿系数(environmental compensation factor)——由于湿热环境引起复合材料结构件力学性能和承载能力的降低,对室温大气环境全尺寸结构静力试验极限载荷的放大系数,其值大于1。

制造缺陷(manufacturing defect)——在制造期间出现,并能引起强度、刚度和尺寸稳定性不同程度退化的异常或缺陷。预期在飞机零件寿命期内,由质量控制、制造验收准则允许的这些缺陷(或允许的制造变异性)会满足合理的结构要求。在损伤威胁评估中应把制造质量控制中漏检的其他制造缺陷包括在内,并在其被检出和修理前必须满足损伤容限要求。

损伤(damage)——制造(加工、生产、装配或处理)或使用引起的结构异常。

损伤类别(category of damage)——基于剩余强度能力、要求的载荷水平、可检性、检测间隔、损伤威胁,以及产生损伤的事件是否明显可察,定义了5类损伤。

退化(degradation)——材料性能(如强度、模量、膨胀系数)的变化,它可能是由于制造偏差或重复载荷和/或环境曝露所致。

脱胶(debond)——由各种因素引起的层间或胶层产生分离的现象。

分层(delamination)——层压板中材料层的分离。它可能是局部的,也可能覆盖层压板的大面积,它可能在固化或随后层压板使用的任意时刻出现,并可能由于各种不同原因引起。

冲击损伤(impact damage)——外来物撞击引起的结构异常。

偏差(discrepancy)——允许且用计划的检测程序可检出的制造异常。它们会在加工、生产或装配过程中产生。

弱胶接(weak bond)——力学性能低于预期值,但不可能通过正常的 NDI 方法检出的胶层,这样的情况主要是由低劣的化学键接所致。

复合材料损伤阻抗(damage resistance for composite materials)——a. 在复合材料及其结构中,抵抗外来物冲击不产生损伤的能力;b. 某一事件或一系列事件相关的力、冲击或其他参数与其所产生损伤尺寸及类型之间关系的度量,如一定能量的冲击所产生的损伤面积或凹坑深度。

复合材料损伤容限(damage tolerance for composite materials)——a. 在规定的检查门槛值所要求的服役寿命期内,复合材料结构抵抗由于缺陷、裂纹或其他损伤引起破坏的能力;b. 损伤尺寸和类型与性能参数(如强度或刚度)关系的度量。

阻止扩展方法(arrested growth approach)——一种要求验证带有明确定义缺陷的结构,能承受适当重复载荷,同时通过机械方法阻止损伤扩展或是在达到临界

尺寸(剩余静强度降低到限制载荷)前终止损伤扩展的方法,它与适当的检测间隔和损伤可检性相关。

无扩展方法(no-growth approach)——一种要求验证带有明确定义缺陷的结构,能承受适当重复载荷,并在结构寿命期间没有有害缺陷扩展的方法。

缓慢扩展方法(slow growth approach)——一种要求验证带有明确定义缺陷的结构,能承受适当重复载荷的方法,同时在结构寿命期间,或超出与适当损伤检测能力相关的适当检测周期内,只有缓慢、稳定和可预计的缺陷扩展。

试样(coupon)——用于评定单层和层压板性能,以及一般结构特征时所使用的小试验件,如通常使用的层压板条和胶接或机械连接的板条接头。

元件(element)——复杂结构件的典型承力单元,如蒙皮、桁条、剪切板、夹层板和各种连接形式的小接头。

结构细节(detail)——具有典型结构细节特征的较复杂的结构件,如特殊设计的复杂连接件、典型连接接头和较大的检查口等。

组合件(次部件)(subcomponent)——能提供一段完整结构全部特征的较大的结构,如加强翼肋、加强框、机翼壁板、机身壁板、盒段、框段和舱段等。

部件(component)——具有独立功能的飞机结构部分(机翼、机身、垂尾、水平安定面等)和能从飞机上整体分离的结构部分(如有设计分离面的外翼、前机身、后机身等)。

寿命(或载荷)放大系数(life (or load) enhancement factor)——用于考虑材料分散性,相对于原计划的设计载荷和寿命值,施加到结构重复载荷试验中的附加载荷系数和/或试验持续时间。用以得到所需的数据置信水平。

寿命分散系数(life scatter factor)——见寿命(或载荷)放大系数。

超载系数(overload factor)——施加到特定结构试验,用于说明在该试验中没有直接说清楚的参数(如环境、减量的金字塔状试验等),该系数通常由说明这种参数影响的较低级别金字塔状试验得到。

结构完整性(structural integrity)——影响飞机安全使用和成本费用的机体结构强度、刚度、损伤容限、耐久性和功能的总称。

2. 缩略语

BVID (Barely Visible Impact Damage) 目视勉强可见冲击损伤

VID (Visible Impact Damage) 目视可见冲击损伤

ADL (Allowable Damage Limit) 允许损伤极限
MDD (Maximum Design Damage) 最大设计损伤
CDT (Critical Damage Threshold) 临界损伤门槛值
RDD (Readily Detectable Damage) 易检的损伤
SDI (Special Detailed Inspection) 特殊详细检测
DET (Detailed Visual Inspection) 详细目视检测
GVI (General Visual Inspection) 一般目视检测
WA (Walk Around) 巡回检测
CTD (Cold Temperature Dry) 低温干态
RTD (Room Temperature Dry) 室温干态
RTA (Room Temperature Atmosphere) 室温大气
RTW (Room Temperature Wet) 室温湿态
ETD (Elevated Temperature Dry) 高温干态
ETW (Elevated Temperature Wet) 高温湿态
OHT (Open Hole Tension) 开孔拉伸
OHC (Open Hole Compression) 开孔压缩
FHT (Filled Hole Tension) 充填孔拉伸
FHC (Filled Hole Compression) 充填孔压缩
CAI (Compression After Impact) 冲击后压缩强度
MOL (Material Operational Limit) 材料工作温度极限

参考文献

- [1] 沈真. 复合材料结构设计手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2001.
- [2] Department of Defence, United States of America. Polymer Matrix Composites Guidelines for Characterization of Structural Materials [M]. MIL-HDBK-17-1F, 7 June 2002.
- [3] FAA AC 20-107B 复合材料飞机结构[S]. 2009. 9. 8.
- [4] 中华人民共和国国家军用标准 GJB 67. 14-2008. 军用飞机结构强度规模——复合材料分册[S]. 2008.
- [5] 张明轩. 英汉复合材料工程辞典[M]. 北京: 航空工业出版社, 2010.

目 录

1 总论	1
1.1 概述	1
1.2 复合材料的发展及其在飞机结构中的应用	2
1.2.1 复合材料的发展概况	2
1.2.2 复合材料在飞机结构中的应用	2
1.3 复合材料结构的特点	5
1.3.1 结构性能方面	5
1.3.2 制造工艺方面	9
1.4 复合材料结构的成本	10
1.4.1 材料	10
1.4.2 制造技术	10
1.4.3 整体化设计与制造技术	11
1.4.4 充分利用复合材料优异的抗疲劳和耐腐蚀性能	11
参考文献	11
2 强度设计要点和特点	12
2.1 飞机复合材料结构设计规范的演变	12
2.1.1 军机复合材料结构设计规范的发展	12
2.1.2 民机复合材料结构适航文件的发展	13
2.2 复合材料结构设计要点	15
2.2.1 设计特点	15
2.2.2 设计—分析—制造优化途径	15
2.2.3 应避免的问题	15
2.2.4 适航审定	15
2.2.5 整体化结构的设计流程	16

2.3 复合材料结构强度设计要点 16

2.3.1 材料/工艺 16

2.3.2 许用值和设计值 17

2.3.3 静强度设计 17

2.3.4 耐久性 17

2.3.5 损伤容限 18

2.3.6 验证试验 18

2.3.7 结论 18

参考文献 19

3 许用值和设计值 20

3.1 许用值和设计值术语的演变 20

3.2 许用值和设计值的定义和范畴 21

3.2.1 许用值 21

3.2.2 设计值 23

3.2.3 许用值试验要求的环境条件 24

3.2.4 总结 24

3.3 许用值与设计值的关系 25

3.4 国外飞机复合材料结构设计值的确定方法 25

3.4.1 早期设计值的确定方法 25

3.4.2 20世纪70~80年代的研究概况 26

3.4.3 确定拉伸和压缩设计值的一般方法 27

3.5 许用值及其确定 28

3.5.1 概述 28

3.5.2 确定许用值的路线图 28

3.5.3 试验矩阵 29

3.5.4 试验方法和试验数据的处理方法 36

3.5.5 许用值确定方法 38

3.5.6 不同结构研制阶段和关键程度的许用值试验要求 40

3.6 确定结构设计值的方法 42

3.6.1 基本原则 42

3.6.2 尺寸效应和边界支持的影响 43

3.7 有关冲击损伤的研究新进展 44

3.7.1 结构压缩设计值和复合材料体系的抗冲击性能 44

3.7.2 复合材料层压板抗冲击行为及表征方法 46