



大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 民用飞机复合材料 结构与验证

Composite Structure Design and  
Certification of the Civil Aircraft

郑晓玲 编著



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



国家出版基金项目  
NATIONAL PUBLICATION FOUNDATION

大飞机出版工程

总主编 顾诵芬

# 民用飞机复合材料 结构与验证

---

Composite Structure Design and  
Certification of the Civil Aircraft

郑晓玲 编著



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

## 内 容 提 要

本书总结了作者近三十年来从事军机、民机研制的经验,系统地阐述了民用飞机复合材料结构应用的技术实施方案及途径,包括材料选择、工艺控制、新型的结构设计、分析方法、制造与装配、试验验证,以及使用维护等全寿命的技术要求;重点介绍了民用飞机复合材料结构与验证过程中应遵循的适航程序、适航准则;并给出了如何按照适航的程序与技术要求进行民机复合材料结构的研制取证的技术思路和方法。

本书可作为高等工科院校理工科研究生、博士生教材,还可供广大工程技术人员使用。

### 图书在版编目(CIP)数据

民用飞机复合材料结构与验证/郑晓玲编著. —上海:  
上海交通大学出版社,2011  
(大飞机出版工程)  
ISBN 978-7-313-07716-5

I. ①民… II. ①郑… III. ①民用飞机—复合材料—结构设计②民用飞机—复合材料—材料试验 IV. ①V257

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 183506 号

## 民用飞机复合材料结构与验证

郑晓玲 编著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 951 号 邮政编码 200030)

电话: 64071208 出版人: 韩建民

常熟市华通印刷有限公司印刷 全国新华书店经销

开本: 787mm×1092mm 1/16 印张: 19.25 字数: 379 千字

2011 年 11 月第 1 版 2011 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-313-07716-5/V 定价: 89.00 元

---

版权所有 侵权必究

告读者:如发现本书有质量问题请与印刷厂质量科联系  
联系电话:0512-52391383

大飞机出版工程

## 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* (《运输机气动设计》),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。

顾诵芬

2009年12月15日

# 前 言

为了满足我国“大型飞机”重大专项对飞机研制人才的迫切需求,上海交通大学在上海市政府的大力支持下,启动了“上海交通大学大型民机创新工程”项目。本书作为该项目三个子项目之一的“人才工程”配套内容,于2008年初正式立项,并在2009年春季和秋季两个学期的飞行器设计研究生“特班”得以试用和完善。

众所周知,复合材料以其独特的性能在航空航天结构中获得越来越广泛的应用,而且随着复合材料制造技术的不断进步,结构设计理念及安全性要求也发生了重大转变。复合材料结构需要采用设计—制造—装配一体化的概念进行工程研制,并通过一个完整的“积木式”结构设计分析和验证试验的过程之后,才能应用于民用飞机(以下简称“民机”)结构。

近年来,我国军用飞机复合材料结构有了大的应用发展,但要在民用飞机上广泛应用仍缺乏对复合材料结构技术深度的理解和适航验证技术途径的掌握,以及全寿命的安全性、经济性的透彻研究。为了使中国的民机发展尽快赶上世界水平,需要大量具有民机复合材料结构研制知识的技术人才,为此本书作者总结了自己近三十年从事军机、民机研制的经验,尤其是近十几年对民用飞机关键技术研究、实际型号研制,以及与国际交流研究的经验,并结合最近几年的工程应用实践编写了这本教材。

本书主要阅读对象为工科专业毕业的硕士研究生、在读和毕业的博士生、从事航空工程结构的技术人员。因此本书的内容编排首先从工程技术应用体系上给出完整的技术思路,然后再从各专业细节方面阐述其设计方法和验证方法,并强调工程的应用实践。同时紧密结合航空工程应用给出具体实施方法和技术途径,并反映当今最新成果与发展方向,为读者尽快掌握民机复合材料结构工程应用技术提供指导。

本书共分为13章。第1章复合材料结构总论,介绍了复合材料的特点与优越性,民机复合材料结构的发展应用历程与经验,以及当今国际复合材料在飞机



结构上的应用情况。第2章民机复合材料结构的适航审定基础,介绍了民机复合材料结构的应用应该符合的所有适航条款的要求,全面给出了规章的规定。第3章民机适航审查程序,介绍了要取得民机适航证所必须遵循的适航审查程序,以及按此技术途径与程序执行才能取得适航证,并保证飞机飞行的安全。第4章符合适航要求的验证技术途径分析,全面解读与分析了适航条款的技术内涵,分析了需要采取的符合性方法与技术途径,并介绍了“积木式”验证方法。第5章材料与制造工艺及控制,介绍了复合材料的材料与制造工艺,以及关键的技术特点与质量控制要求,并给出了满足适航要求的材料与工艺的适航验证方法、规范编制、试验标准等。第6章复合材料力学性能与设计许用值,介绍了材料的性能、层板性能的试验方法,以及结构设计许用值的确定方法和试验标准。第7章复合材料结构设计,全面介绍了复合材料结构设计流程,从选材、工艺方案确定、结构总体设计,到层板设计、连接设计、各类结构形式设计,给出了结构设计准则与要求,并介绍了先进的复合材料结构设计概念。第8章复合材料强度计算方法,介绍了复合材料强度的计算方法,详细给出了模型建立、许用值选取的要求、强度校核思路,并就稳定性分析、连接分析、细节分析给出了具体方法,最终给出了强度验证方法。第9章复合材料损伤容限设计,介绍了民机损伤容限的设计要求、复合材料损伤容限的技术要求,详细分析了复合材料损伤容限的特点,给出了复合材料结构的损伤容限设计要求、检测要求、维护要求、评定要求和符合性验证方法。第10章复合材料结构持续适航,介绍了满足持续适航要求的维修、检测、损伤检查与修理要求,并给出了在设计时考虑持续适航的设计要求,详细给出了结构修理方法与验证方法。第11章复合材料特殊问题的处理,阐述了复合材料需要特殊考虑的问题,如湿热环境、太阳光/热辐射、闪电防护、易燃性等设计要求。第12章复合材料结构强度工作思路及内容,全面给出了复合材料结构研制的技术思路与工作内容。第13章复合材料结构的适航验证技术,介绍了“积木式”验证试验的确定方法,以及各类试验方法和试验方案的设计。

本书除了可作为飞机结构强度专业硕士班、博士班的教材之外,还可作为广大工程技术人员学习掌握复合材料结构设计的参考书。由于作者工作繁忙,时间仓促,书中不妥和错误之处,敬请批评指正。

最后,感谢上海交通大学航空航天学院的老师和上过这门课的历届研究生为本书的电子文档所做的工作。

# 目 录

- 1 复合材料结构总论 1
  - 1.1 复合材料的定义 1
  - 1.2 复合材料的构造形式 1
  - 1.3 先进复合材料结构的应用 2
  - 1.4 复合材料性能和制造工艺特点 9
  - 1.5 复合材料结构设计特点 10
  
- 2 民机复合材料结构的适航审定基础 12
  - 2.1 条款 CCAR25.601 总则 12
  - 2.2 条款 CCAR25.603 材料 12
  - 2.3 条款 CCAR25.605 制造方法 12
  - 2.4 条款 CCAR25.613 材料的强度性能和设计值 12
  - 2.5 条款 CCAR25.305 强度和变形 13
  - 2.6 条款 CCAR25.307 结构符合性的证明 14
  - 2.7 条款 CCAR25.571 结构的损伤容限和疲劳评定 14
  - 2.8 条款 CCAR25.611 可达性措施 16
  - 2.9 条款 CCAR25.629 气动弹性稳定性要求 16
  - 2.10 条款 CCAR25.581 闪电防护 17
  - 2.11 条款 CCAR25.609 结构保护 18
  - 2.12 应急着陆情况 18
    - 2.12.1 条款 CCAR25.561 总则 18
    - 2.12.2 条款 CCAR25.783(c, g) 舱门 19
    - 2.12.3 条款 CCAR25.785 座椅、卧铺、安全带和肩带 19
    - 2.12.4 条款 CCAR25.787(a, b) 储存舱 21
    - 2.12.5 条款 CCAR25.789 客舱和机组舱以及厨房中物件的固定 21
    - 2.12.6 条款 CCAR25.801 水上迫降 21

- 2.12.7 条款 CCAR25.809 应急出口的布置 22
- 2.12.8 条款 CCAR25.963(d) 燃油箱:总则 22
- 2.13 防火 23
  - 2.13.1 条款 CCAR25.853 座舱内部设施 23
  - 2.13.2 条款 CCAR25.855 货舱和行李舱 24
  - 2.13.3 条款 CCAR25.859 燃烧加热器的防火 24
  - 2.13.4 条款 CCAR25.863 可燃液体的防火 26
  - 2.13.5 条款 CCAR25.865 飞行操纵系统、发动机架和其他飞行结构的防火 26
  - 2.13.6 条款 CCAR25.867 其他部件的防火 26
  - 2.13.7 条款 CCAR25.903(c) 发动机 26
  - 2.13.8 条款 CCAR25.967(e) 燃油箱安装 27
  - 2.13.9 条款 CCAR25.1121(c) 总则 28
  - 2.13.10 条款 CCAR25.1181 指定火区的范围 28
  - 2.13.11 条款 CCAR25.1182 防火墙后面的短舱区域和包含可燃液体导管的发动机吊舱连接结构 29
  - 2.13.12 条款 CCAR25.1183 输送可燃液体的组件 29
  - 2.13.13 条款 CCAR25.1185 可燃液体 29
  - 2.13.14 条款 CCAR25.1189(a)(2) 切断措施 29
  - 2.13.15 条款 CCAR25.1191 防火墙 30
  - 2.13.16 条款 CCAR25.1193(c, d, e) 发动机罩和短舱蒙皮 30
- 2.14 条款 CCAR25.1529 持续适航文件 30
- 2.15 附录 H 持续适航文件 31
  - 2.15.1 附录 H25.1 总则 31
  - 2.15.2 附录 H25.2 格式 31
  - 2.15.3 附录 H25.3 内容 31
  - 2.15.4 附录 H25.4 适航限制条款 32
- 2.16 AC 咨询通报 32
- 2.17 政策声明 33
- 2.18 技术报告 33

### 3 民机适航审查程序 35

- 3.1 民机型号合格证的申请和受理 35
  - 3.1.1 设计保证 35
  - 3.1.2 设计保证系统 35
  - 3.1.3 型号合格证的申请 35

- 3.1.4 型号合格证的受理 35
- 3.1.5 申请人资料的提交 35
- 3.1.6 受理的初步评审 36
- 3.1.7 受理过程 36
- 3.2 民机适航符合性方法 36
- 3.3 审查程序 37
- 3.4 适航验证试验的审查要求和程序 37
  - 3.4.1 审查要求 37
  - 3.4.2 工作程序 38
  - 3.4.3 试验大纲 38
  - 3.4.4 试验报告 38
- 3.5 技术资料 and 试验的工程评审 39
  - 3.5.1 结构(强度)专业需要审查的基本技术资料 39
  - 3.5.2 结构(强度)专业的动载分析 40
  - 3.5.3 结构(强度)专业的应力分析 41
  - 3.5.4 结构(强度)专业的试验 43
  - 3.5.5 设计与构造 43
  - 3.5.6 工艺和工艺规范或说明书 45
  - 3.5.7 设备目录、图纸目录的审查 45
- 3.6 表明适航符合性的工作程序 45
  - 3.6.1 掌握适航法规 45
  - 3.6.2 提供证据表明符合法规 46
  - 3.6.3 执行法规的法律程序 46
- 4 符合适航要求的验证技术途径分析 47**
  - 4.1 符合性方法的确定 47
  - 4.2 确定审定大纲与验证项目 48
  - 4.3 符合性验证与审查 48
  - 4.4 各条款符合性方法和验证技术途径分析 49
    - 4.4.1 条款 CCAR25.601(总则)的分析 49
    - 4.4.2 条款 CCAR25.603(材料)的分析 50
    - 4.4.3 条款 CCAR25.605(制造方法)的分析 50
    - 4.4.4 条款 CCAR25.613(材料的强度性能和设计值)的分析 51
    - 4.4.5 条款 CCAR25.305(强度和变形)的分析 52
    - 4.4.6 条款 CCAR25.307(结构符合性的证明)的分析 52
    - 4.4.7 条款 CCAR25.571(结构的损伤容限和疲劳评定)的分析 53

- 4.4.8 条款 CCAR25.611(可达性措施)的分析 54
- 4.4.9 条款 CCAR25.629(气动弹性稳定性要求)的分析 55
- 4.4.10 条款 CCAR25.581(闪电防护)的分析 55
- 4.4.11 条款 CCAR25.609(结构保护)的分析 55
- 4.4.12 应急着陆情况 56
- 4.4.13 防火 58
- 4.4.14 条款 CCAR25.1529(持续适航文件)的分析 61
- 4.5 解读 AC20-107B 的新要点 61
  - 4.5.1 新增名词定义 61
  - 4.5.2 重点更新与强调的内容 63
- 4.6 积木式验证方法 63
  - 4.6.1 积木式方法 63
  - 4.6.2 积木式方法要点 64
  - 4.6.3 为何要建立积木式的验证方法 65
  - 4.6.4 不同级别试验的目的 65
  - 4.6.5 材料基本力学性能与物理性能 66
  - 4.6.6 结构构型 67
  - 4.6.7 分析与试验的关系 67
  - 4.6.8 Mil-HDBK-17 涉及积木式方法的章节 67
  - 4.6.9 用于 B777 基本结构的积木式方法 68
  - 4.6.10 关于积木式结构验证方法的思考 69
- 5 材料与制造工艺及控制 70
  - 5.1 材料 70
    - 5.1.1 环氧树脂 70
    - 5.1.2 环氧树脂的固化及固化剂 70
    - 5.1.3 高性能环氧树脂 71
    - 5.1.4 环氧树脂的增韧途径 71
    - 5.1.5 碳纤维 72
    - 5.1.6 碳纤维的分类 72
    - 5.1.7 碳纤维的性能 73
    - 5.1.8 碳纤维的生产方法 74
    - 5.1.9 碳纤维的结构 77
    - 5.1.10 碳纤维的性质 78
    - 5.1.11 小结 82
  - 5.2 制造技术 83

- 5.2.1 热压罐成形工艺 83
- 5.2.2 树脂传递模塑(RTM)成形工艺 90
- 5.2.3 真空辅助树脂渗透(VARTM或VARI)成形工艺 91
- 5.2.4 树脂膜熔浸(RFI)成形工艺 92
- 5.2.5 胶接工艺 92
- 5.3 材料和工艺的技术要求 94
- 5.4 重点说明的问题 94
- 5.5 材料的控制 95
- 5.6 工艺的控制 96
  - 5.6.1 采用预浸料成型的叠层板制造技术 96
  - 5.6.2 对结构性能有影响的关键制造因素 96
  - 5.6.3 叠层板铺贴的控制 96
  - 5.6.4 零件封装和固化的控制 97
  - 5.6.5 加工过程的控制 98
  - 5.6.6 胶接装配过程的控制 99
  - 5.6.7 螺接装配过程的控制 99
  - 5.6.8 新制造技术的控制 100
  - 5.6.9 复合材料的培训 100
- 5.7 制造缺陷 101
  - 5.7.1 制造缺陷的控制要求 101
  - 5.7.2 制造缺陷的类型 101
- 5.8 设计中需要考虑的制造问题 103
- 5.9 规范编制要求 104
  - 5.9.1 材料规范 104
  - 5.9.2 工艺规范 104
- 5.10 材料和工艺的验证方法 105
  - 5.10.1 材料的验证 105
  - 5.10.2 工艺的验证 106
  - 5.10.3 部件的制造检验 106
- 5.11 工艺评审 110
  - 5.11.1 概述 110
  - 5.11.2 工艺规范内容的评审 111
  - 5.11.3 工艺实施的检查 111
  - 5.11.4 工艺符合性的检查 112
  - 5.11.5 无损检验(NDI)方法的评审 112
  - 5.11.6 工艺规范的批准 112

- 5.12 综述 112
  
- 6 复合材料力学性能与设计许用值 113**
  - 6.1 单层的基本性能和细观力学 113
    - 6.1.1 分类 113
    - 6.1.2 单层的细观力学分析 113
  - 6.2 复合材料基本力学性能测试 118
    - 6.2.1 试件的制造要求 118
    - 6.2.2 力学性能测试 119
  - 6.3 层压板分析和宏观力学 123
    - 6.3.1 单层的应力-应变关系 123
    - 6.3.2 层压板理论 125
    - 6.3.3 层压板的性能 128
    - 6.3.4 湿热分析 129
    - 6.3.5 层压板的应力分析 130
  - 6.4 层压板的强度和失效 130
    - 6.4.1 单层板强度 130
    - 6.4.2 层压板的失效准则 131
  - 6.5 结构设计许用值的确定 132
    - 6.5.1 设计许用值确定方法 132
    - 6.5.2 设计许用值试验 133
  
- 7 复合材料结构设计 137**
  - 7.1 结构选材 137
  - 7.2 结构工艺方案确定 137
    - 7.2.1 构件结构工艺可行性确定 137
    - 7.2.2 结构设计方案确定 138
    - 7.2.3 影响复合材料构件的结构工艺性因素 138
  - 7.3 层压板设计 140
    - 7.3.1 层压板刚度预测与设计 140
    - 7.3.2 利用 Carpet 曲线初步设计 140
    - 7.3.3 层压板强度特性 141
    - 7.3.4 层压板应力应变分布 142
    - 7.3.5 层压板破坏机理 143
    - 7.3.6 层压板铺层及顺序设计 145
    - 7.3.7 环境影响的考虑 147

- 7.4 结构连接设计 150
  - 7.4.1 机械连接设计 150
  - 7.4.2 胶接连接设计 152
- 7.5 结构细节设计 155
  - 7.5.1 结构细节设计要求 155
  - 7.5.2 考虑强度评定的设计特性 156
  - 7.5.3 面外破坏分析与试验数据 158
  - 7.5.4 结构细节设计导致的破坏 160
- 7.6 复合材料结构设计要求 161
  - 7.6.1 结构设计原则 161
  - 7.6.2 结构设计要求 161
- 7.7 壁板类结构设计 164
  - 7.7.1 适用的结构类型 164
  - 7.7.2 载荷特点 165
  - 7.7.3 设计原则 165
  - 7.7.4 结构总体参数优化 165
- 7.8 夹层类结构设计 166
  - 7.8.1 适用的结构类型 166
  - 7.8.2 载荷特点 166
  - 7.8.3 设计要点 166
- 7.9 多梁类结构设计 167
  - 7.9.1 适用的结构类型 167
  - 7.9.2 设计特点 168
- 7.10 整体化结构设计概念 168
  - 7.10.1 整体化结构概念 168
  - 7.10.2 复合材料整体化结构特点 169
  - 7.10.3 复合材料整体化结构发展趋势 172
- 8 复合材料强度计算方法 173**
  - 8.1 复合材料强度设计关注的问题 173
    - 8.1.1 复合材料的基本材料特性 173
    - 8.1.2 复合材料静强度评定中要考虑的设计问题 173
    - 8.1.3 关注的问题 173
  - 8.2 复合材料的材料特性 173
  - 8.3 强度分析时材料数据的选取 174
  - 8.4 有限元分析模型的建立 174



- 8.5 强度校核内容 175
  - 8.6 稳定性分析方法 176
    - 8.6.1 平板的轴向屈曲和压损 176
    - 8.6.2 平板的剪切屈曲 182
    - 8.6.3 加筋层压板的屈曲分析 182
  - 8.7 夹层结构分析方法 188
    - 8.7.1 基本参数 188
    - 8.7.2 夹层结构局部失效分析 189
    - 8.7.3 复合材料夹层结构总体稳定性分析 192
  - 8.8 连接强度分析方法 193
    - 8.8.1 机械连接的静力分析 193
    - 8.8.2 机械连接钉载分配 193
    - 8.8.3 单钉强度估算 193
    - 8.8.4 单钉经验方法 195
    - 8.8.5 许用挤压强度值 197
    - 8.8.6 单钉被连接板的强度校核 197
    - 8.8.7 单钉紧固件的强度校核 197
    - 8.8.8 多钉连接强度校核 197
  - 8.9 细节分析 198
    - 8.9.1 结构单元要素的设计因素 198
    - 8.9.2 结构单元的受力分析 198
    - 8.9.3 复合材料整体化结构特有的失效模式 200
  - 8.10 积木式分析与试验的迭代 200
  - 8.11 静强度的符合性验证方法 201
- 9 复合材料损伤容限设计 203**
- 9.1 复合材料结构损伤容限设计要求 203
  - 9.2 损伤容限三大要素 204
    - 9.2.1 损伤容限三大要素 204
    - 9.2.2 结构检查大纲三大要素 204
  - 9.3 结构分类和主要结构件的确定 205
    - 9.3.1 结构分类 205
    - 9.3.2 主要结构件的确定 207
  - 9.4 损伤容限技术要求 207
    - 9.4.1 损伤的阶段和来源与物理表征 207
    - 9.4.2 缺陷尺寸假设 208