



大飞机出版工程  
总主编 顾诵芬

# 飞机复合材料 结构强度分析

Strength Analysis of  
Composite Aircraft Structures

陈业标 汪 海 陈秀华 编著  
李武铨 主校  
李 刚 主审



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

# 飞机复合材料结构强度分析

---

Strength Analysis of Composite Aircraft Structures

陈业标 汪 海 陈秀华 编著  
李武铨 主校  
陈普会 敬录云 张晓晶 校对  
李 刚 主审



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

## 内 容 提 要

本书是基于作者多年从事飞机结构设计及强度分析的实践经验和体会编撰而成,从理论和实践两方面系统地介绍了飞机复合材料结构设计和强度分析的具体内容、方法、基本原理及发展方向。全书共分9章,分别介绍与强度分析有关的复合材料基本概念、飞机复合材料结构设计要求和设计准则、强度计算包括的具体项目、复合材料结构分析的理论方法、复合材料连接强度分析方法、屈曲分析方法、损伤容限耐久性和结构强度试验等。并且,书中给出较多的计算例题并介绍所用的计算机软件。

本书可供飞机结构设计、结构强度的工程人员和高等院校强度专业研究生参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

飞机复合材料结构强度分析/陈业标,汪 海,陈秀华编  
著. —上海:上海交通大学出版社,2011

(大飞机出版工程)

ISBN 978 - 7 - 313 - 07882 - 7

I. ①飞… II. ①陈…②汪…③陈… III. ①飞机—复合  
材料—结构强度—分析 IV. ①V257

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 228219 号

## 飞机复合材料结构强度分析

陈业标 汪 海 陈秀华 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

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 字数: 371 千字

2011 年 12 月第 1 版 2011 年 12 月第 1 次印刷

ISBN 978 - 7 - 313 - 07882 - 7/V 定价: 80.00 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:0573-86577317

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。

顾诵芬

2009年12月15日

# 前 言

飞机结构强度分析是飞机设计重要的专业分工以及关键问题之一,它直接影响飞机结构的安全性与飞机性能的先进性。从20世纪60年代复合材料问世以来,复合材料已在飞机结构上获得越来越多的应用。复合材料具有比强度和比刚度高、性能可设计等特点,这给飞机结构与材料工程师带来了新的希望和美好憧憬。但是,从20世纪70年代以来,对复合材料在飞机结构上的应用进行调查研究发现,复合材料结构的一大致命问题是飞机在制造装配、使用和维护过程中可能会出现外物冲击,致使外表面肉眼很难发觉而内部却存在严重损伤,有些情况会使受压性能降低60%之多。复合材料层压板结构这种致命的强度问题几乎断送它在飞机上的应用。由于复合材料突出优点的吸引力,国外从20世纪80年代以来,对复合材料损伤容限的这种特性进行了大量的试验及理论研究,包括材料体系本身、设计构型以及强度分析等方面,企图寻找解决问题的方法。结构设计及强度分析方面的大量研究成果对复合材料结构设计及其在飞机上的应用发挥了巨大作用。同时,我们也不得不指出,由于复合材料结构过分复杂,时至今日,理论分析结果与试验结果还有较大的差距。因此,还不能完全像金属结构那样通过定量的理论计算进行结构设计。

飞机复合材料结构强度分析是在金属结构强度分析的基础上发展起来的。但是由于复合材料的特点和复杂性,其强度分析要比金属的复杂得多,也带有更多的不确定性。对有些问题,甚至有些是设计准则的顶层问题,目前还存在分歧,出于安全可靠考虑,即使有些问题似乎达成共识,但并不尽合理,也还缺乏充足的理论及试验依据。正因为如此,使飞机复合材料强度分析问题更富有挑战性,也带来广阔的研究空间,本书第8章中对此做了较详细的论述。

目前,似乎还没有看到一本系统的、较权威的关于飞机复合材料结构强度分析的参考书,这归因于问题的复杂性和不成熟性,因此编写飞机复合材料结构强度分析教科书有一定难度。由于是给学生讲课,本书十分强调基本概念及基本



理论,书中没有给出大量的设计公式及图线(这些在各种设计手册中大多能找到),因为根据编者从事飞机强度分析工作多年的体会,即使是从事工作多年的结构强度工程师,掌握基本概念及基本理论仍比大量的设计公式及图线更为重要,但本书中也不乏非常实际的工程应用方面的材料。

全书分为9章。第1章介绍了复合材料层压板的基本概念及有趣的特性;第2章说明飞机复合材料结构基本的设计准则;第3章概述飞机复合材料结构强度计算的内容以及计算中应注意的问题,这是非常重要的一章;第4章介绍设计许用值,这是实际设计中最必要的试验项目;第5~8章是强度计算的具体内容及方法;第9章为飞机复合材料结构试验。其中第8章篇幅较大,是较主要的一章,有些小节涉及损伤容限验证(也可称强度分析)的概率方法;虽然目前国内还未涉及这方面的问题,仍然采用确定性的方法,但是由于进行损伤容限分析的初始输入参数,例如外物冲击威胁(以能量大小表示)存在太多的不确定因素,使得确定性方法中存在不少不确定性的因素,因此,保证结构安全性的概率方法越来越受到理论界及工程界的重视和深入研究。编者认为,这可能是真正发挥复合材料潜力及实际结构设计的努力方向。

要特别说明的是,本书是在编者“上海交通大学大型民用飞机研究生特班”开设的“飞机复合材料结构设计实践”课程的部分讲稿基础上编写的,主要内容为飞机复合材料结构强度分析。

(1) 本书所指复合材料结构仅涉及层压板结构,而不包括缝纫及编织结构;

(2) 本书有些内容是编者从事飞机结构设计及强度分析的部分实践,有些是个人看法及体会;也有相当部分是介绍别人的工作,出处大多给出说明并注明参考文献。

鉴于我国飞机设计中复合材料应用时间短,在应用的深度和广度上与西方先进国家还有不小差距,本书仅供飞机结构设计、强度工程师及强度专业研究生参考。由于编者水平所限,编写本书作为抛砖引玉,给有兴趣编写教材的老师和专家提供参考,不妥之处,敬请读者指正。

在讲课资料和本书编写过程中得到张晓晶、余音、于哲峰和刘龙权老师以及史文华、陈海欢等研究生的热情支持与帮助,编者对此表示深切感谢!

编 者

# 符号表

## (1) 刚度、模量符号

$[A], A$	层压板面内刚度矩阵
$A_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	$[A]$ 矩阵的元素
$[\check{A}]$ (阶数 $2 \times 2$ )	考虑横向变形的刚度矩阵
$[D], D$	层压板弯曲刚度矩阵
$D_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	$[D]$ 矩阵的元素
$[B], B$	层压板(拉弯)耦合刚度矩阵
$B_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	$[B]$ 矩阵的元素
$[Q], Q_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	单层(或单向板)正轴方向模量矩阵及元素
$[\bar{Q}], \bar{Q}_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	单层(或单向板)面内任意方向模量矩阵及元素
$L, T$ (或 1, 2)	单层(或单向板)纤维方向及垂直纤维方向坐标轴
$[a], [s]$	面内柔度矩阵

## (2) 材料性能及强度参数

$L, W, T$	分别为沿蜂窝的条带方向、垂直条带方向和垂直蜂窝面板方向的坐标轴
$G_{WT}$	蜂窝芯子 $W, T$ 方向横向剪切模量
$G_{TL}$	蜂窝芯子 $T, L$ 方向横向剪切模量
$E_T$	蜂窝芯子法向( $T$ 向)拉伸弹性模量, $E_c$ 蜂窝芯子法向( $T$ 方向)压缩弹性模量
$E_{1t}, E_{L_t}$	单层纤维方向拉伸弹性模量, 下标 $t$ 表示拉伸
$E_{1c}, E_{L_c}$	单层纤维方向压缩弹性模量, 下标 $c$ 表示压缩
$G_{12}, G_{LT}$	单层面内剪切弹性模量
$E_i (i=x, y, \theta, \dots)$	层压板面内 $i$ 方向弹性模量
$E_f$	层压板弯曲模量, 下标 $f$ 表示弯曲
$\nu_{12}$ 或 $\nu_{LT}, \nu_{21}$ 或 $\nu_{TL}$	单层(或单向板)的泊松比
$\nu_{xy}, \nu_{yx}$	层压板平面 $x, y$ 方向的泊松比, $E_x \nu_{yx} = E_y \nu_{xy}$

$v_f, v_m$	分别为单层板纤维及基体的体积含量
$X_t, X_c, Y_t, Y_c, S$	单层板 5 个基本的强度
$X'_t, X'_c, Y'_t, Y'_c, S'$	“现场单层强度”，它们和上面 5 个基本强度对应
$F_{ij} (i, j=1, 2, 6)$	由试验确定的单层板强度参数(也称强度张量)
$F_{tu}, \sigma_b$	层压板拉伸极限强度
$F_{bru}$	钉孔挤压强度
$\sigma_{cr}$	屈曲临界正应力
$\sigma_{cf}, \sigma_{cc}$	分别表示长桁的压缩破坏应力及许用压损应力
$\tau_{cr}$	屈曲临界剪应力
$\sigma_{cr, e}$	用线弹性理论计算的 $\sigma_{cr}$
$\tau_{cr, e}$	用线弹性理论计算的 $\tau_{cr}$
$F_{cc}$	压损强度
$\eta$	剩余强度系数
$[\alpha_L \quad \alpha_T \quad 0]^T$	单层板热膨胀系数列阵
$[\alpha_x \quad \alpha_y \quad \alpha_{xy}]^T$	层压板面内 $x, y$ 轴方向的热膨胀系数列阵
$[\epsilon_t], [\epsilon_c], [\gamma_{xy}]$	分别为层压板拉伸, 压缩, 剪切应变设计许用值, 也称限制应变

### (3) 载荷、应力(系数)、应变和变形

$\{N\} = [N_x \quad N_y \quad N_{xy}]^T$	单位长度面内力列阵及其分量
$\{M\} = [M_x \quad M_y \quad M_{xy}]^T$	单位长度内力矩列阵及其分量
$\{N^T\} = [N_x^T, N_y^T, N_{xy}^T]^T$	与 $\{N\}$ 对应的热内力(热载)列阵及其分量
$\left\{ \begin{matrix} Q_x \\ Q_y \end{matrix} \right\}$	单位长度横向剪力
$P, F$	载荷
$N, P$	轴力
$P_{br}$	孔的挤压载荷(或称钉载)
$P_{by}$	孔的旁路载荷
$\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$	主应力
$\sigma_L$ (或 $\sigma_1$ )	单层(或单向板)纤维方向正应力
$\sigma_T$ (或 $\sigma_2$ )	单层(或单向板)垂直纤维方向正应力
$\sigma_{br}$	孔挤压应力
$\sigma_{net}$	含孔板孔处断面净面积均布拉伸应力
$\sigma_{net, f}$	含孔板孔处断面破坏时的 $\sigma_{net}$
$\sigma_{net}^M$	由弯矩 $M$ 引起孔处断面 $\sigma_{net}$ 的最大值
$\sigma_{br}^M$	由弯矩 $M$ 引起的 $\sigma_{br}$ 的最大值

$q$	分布载荷
$K_{te}, K_{bc}$	分别表示金属板孔的弹性拉伸, 挤压应力集中因子
$K_{tc}, K_{bc}$	分别表示层压板孔的拉伸, 挤压应力集中减缓因子
$\epsilon$	正应变
$\gamma$	剪应变
$u, v, w$	分别为 $x, y, z$ 方向的位移
$u', v', w'$	分别为 $x', y', z'$ 方向的位移
(4) 有限元分析中的符号	
$x, y, z$	统一坐标轴方向
$x', y', z'$	有限元单元自身坐标轴方向
$\delta_i$	$i$ 方向位移
$\{\delta_i\}$	位移列阵
$\{\delta'_e\}$	单元自身坐标方向节点位移列阵
$\{\delta_e\}$	单元统一坐标方向节点位移列阵
$\{F'_e\}$	与 $\{\delta'_e\}$ 对应的单元节点力列阵
$\{F_e\}$	与 $\{\delta_e\}$ 对应的单元节点力列阵
$[K'_e]$	自身坐标轴方向的单元刚度矩阵
$[K_e]$	统一坐标轴方向的单元刚度矩阵
$[K]$	结构节点刚度矩阵
$[k_\sigma]$	单元应力刚度矩阵(或称微分刚度)
$[k_b]$	单元弯曲刚度矩阵
$[K_\sigma]$	结构应力刚度矩阵(或称微分刚度)
$[K_b]$	结构弯曲刚度矩阵
$[N], N$	表示单元形函数与单元节点位移列阵关系的形态函数矩阵
$[B], B$	单元应变列阵与自身坐标系中节点位移列阵关系的几何矩阵
$[D], D$	材料弹性矩阵
$[G]_{6 \times 6}$	体元材料弹性矩阵
$\{\epsilon\}, \epsilon_x, \epsilon_y, \gamma_{xy}$	应变列阵及它的分量
$\{\epsilon^0\}, \epsilon_x^0, \epsilon_y^0, \gamma_{xy}^0$	中面面内应变列阵及它的分量
$\{\kappa\}, \kappa_x, \kappa_y, \kappa_{xy}$	中面的弯曲应变列阵及它的分量
$\{\sigma\}, \sigma_x, \sigma_y, \tau_{xy}$	应力列阵及它的分量
(5) 概率分析中的主要符号	
$E$	冲击能量
$P, P_j$	概率

$f(x)$	随机变量 $x$ 的概率密度函数
$F(x) = P(X \leq x)$	随机变量 $x$ 的概率分布函数
$f(x, \alpha, \beta)$	随机变量 $x$ 的双参数 Weibull 分布的概率密度函数
$\alpha, \beta$	分别为 Weibull 分布中的形状参数, 尺度参数
$\tilde{\beta}$	置信度为 95% 时的尺度参数
(6) 主要的缩写符号	
$DLL$	design limit load(设计限制载荷), 有时也可当载荷值使用, 即 $DLL = P_{DLL}$
$DUL$	design ultimate load(设计极限载荷), 有时也可当载荷值使用, 即 $DUL = P_{DUL}$
$BVID$	barely visible impact damage(目视勉强可见冲击损伤)
$CAI$	compression after impact(冲击后压缩)

# 目 录

<b>1 复合材料结构基本概念</b>	<b>1</b>
1.1 引言	1
1.2 复合材料结构特点	1
1.2.1 一般特点	1
1.2.2 奇特性	3
1.3 复合材料层压板屈曲的奇特性	5
1.3.1 平板稳定性与相关曲线简单概念	5
1.3.2 复合材料层压板奇特的相关曲线	7
1.3.3 几个特殊铺层层压板单轴压缩举例	8
1.4 与结构设计及强度相关的几个概念	9
1.4.1 对称铺层层压板	9
1.4.2 均衡铺层	9
1.4.3 准各向同性层压板	9
1.5 结构试验与理论分析	10
参考文献	12
<b>2 飞机复合材料结构设计要求及设计准则</b>	<b>13</b>
2.1 基本原则	13
2.2 外载荷的规定	13
2.3 设计准则具体要求	14
2.4 损伤容限要求的有关条款	15
2.4.1 涉及的军用和民用航空要求	15
2.4.2 损伤容限要求及符合性机理	16
2.4.3 关于符合性的基本概念	17
参考文献	19

- 
- 3 飞机复合材料结构验证方法介绍 20
    - 3.1 飞机复合材料结构强度验证的概念 20
      - 3.1.1 问题的提出 20
      - 3.1.2 复合材料与金属结构强度验证主要差别 21
    - 3.2 飞机复合材料结构强度验证要点 21
      - 3.2.1 静强度验证 22
      - 3.2.2 耐久性验证 22
      - 3.2.3 损伤容限验证 22
    - 3.3 飞机复合材料结构强度分析的主要内容 23
      - 3.3.1 铺层优化设计 24
      - 3.3.2 强度分析内容 24
      - 3.3.3 应变分析及限制应变 24
      - 3.3.4 结构承载能力分析 26
      - 3.3.5 破损安全分析 27
      - 3.3.6 实际需求分析 27
      - 3.3.7 复合材料结构积木式方法 27
  - 参考文献 28
  
  - 4 许用值 29
    - 4.1 引言 29
    - 4.2 许用值要求的试验项目 30
      - 4.2.1 复合材料的性能 30
      - 4.2.2 典型层压板强度试验 34
    - 4.3 复合材料层压板设计许用值的试验确定 34
      - 4.3.1 确定许用值的原则 34
      - 4.3.2 层压板许用值 35
      - 4.3.3 T300/双马层压板许用值小结 41
    - 4.4 复合材料连接许用值 42
    - 4.5 冲击后层板压缩许用值确定方法 42
  - 参考文献 42
  
  - 5 复合材料应力分析及强度校核 43
    - 5.1 基础知识 43
      - 5.1.1 结构分析能量原理 43
      - 5.1.2 有限元基础知识 49
    - 5.2 复合材料结构应力分析 70

- 5.2.1 基本原理和理论 70
- 5.2.2 有限元建模技术 84
- 5.3 强度分析 110
  - 5.3.1 强度的基本概念 110
  - 5.3.2 飞机结构分析中的“总体”强度与“局部”强度 113
  - 5.3.3 关于强度分析工作的设想 114
  - 5.3.4 复合材料层压板强度和失效 114
- 参考文献 129
- 6 复合材料连接强度分析 130**
  - 6.1 连接强度问题概述 130
  - 6.2 点应力准则及平均应力准则 133
  - 6.3 Hart-Smith 方法 135
    - 6.3.1 基本内容 135
    - 6.3.2 应力集中系数定义 135
    - 6.3.3 多钉连接受力模型强度校核 137
    - 6.3.4 引入连接效率 $\lambda$ 及强度计算 139
    - 6.3.5 Hart-Smith 方法存在的问题 141
  - 6.4 考虑弯曲的厚板连接工程分析方法 141
  - 6.5 基于特征曲线基础上的有限元法 143
  - 6.6 “当量挤压强度”方法计算螺接接头 144
  - 6.7 关于填充孔的强度问题 147
    - 6.7.1 填充孔的概念 147
    - 6.7.2 含填充孔板件压缩载荷下的受力分析 148
  - 参考文献 150
- 7 结构稳定性分析 152**
  - 7.1 引言 152
  - 7.2 基本概念 152
  - 7.3 结构稳定分析中的塑性修正 160
    - 7.3.1 说明 160
    - 7.3.2 塑性修正的意义 160
    - 7.3.3 关于“A”折算系数法 164
  - 7.4 复合材料矩形板稳定分析“解析法” 167
    - 7.4.1 引言 167
    - 7.4.2 板的势能 167



- 7.5 局部二次稳定分析方法 173
  - 7.5.1 引言 173
  - 7.5.2 “局部二次稳定分析”方法基本原理 174
  - 7.5.3 “局部二次稳定分析”方法的特点及计算机软件 179
  - 7.5.4 例题 180
  - 7.5.5 讨论 181
- 参考文献 182
- 8 损伤容限耐久性 183**
  - 8.1 引言 183
  - 8.2 实际设计中的损伤容限/耐久性的设计考虑 184
    - 8.2.1 复合材料飞机结构损伤容限设计/耐久性设计概念 184
    - 8.2.2 目前复合材料结构损伤容限设计问题 185
  - 8.3 复合材料飞机结构损伤容限实际应用情况简介 187
    - 8.3.1 引言 187
    - 8.3.2 复合材料飞机结构损伤容限分析方法介绍 187
    - 8.3.3 复合材料结构损伤容限分析方法和实用性评价 192
  - 8.4 复合材料结构冲击损伤分析 193
    - 8.4.1 分析内容及分析概述 193
    - 8.4.2 一种工程分析方法 194
  - 8.5 冲击损伤剩余强度分析 204
    - 8.5.1 损伤尺寸描述 204
    - 8.5.2 模型1:分层屈曲模型 205
    - 8.5.3 模型2:弹性核模型 210
    - 8.5.4 模型3:损伤凹坑当量椭圆孔分析FD判据 211
    - 8.5.5 模型4:DI模型 217
    - 8.5.6 理论分析结果和试验结果比较 217
    - 8.5.7 理论分析和实际应用——“当量破损法” 219
  - 8.6 复合材料结构损伤容限验证方法 221
    - 8.6.1 引言 221
    - 8.6.2 冲击威胁在飞机上的概率分布分析 222
    - 8.6.3 层压板冲击损伤压缩设计许用值分析 237
    - 8.6.4 概率或半概率简化的符合性方法 250
  - 8.7 耐久性 256
    - 8.7.1 引言 256
    - 8.7.2 分散性分析方法 256