

Composite Materials for Aircraft Structures

Second Edition

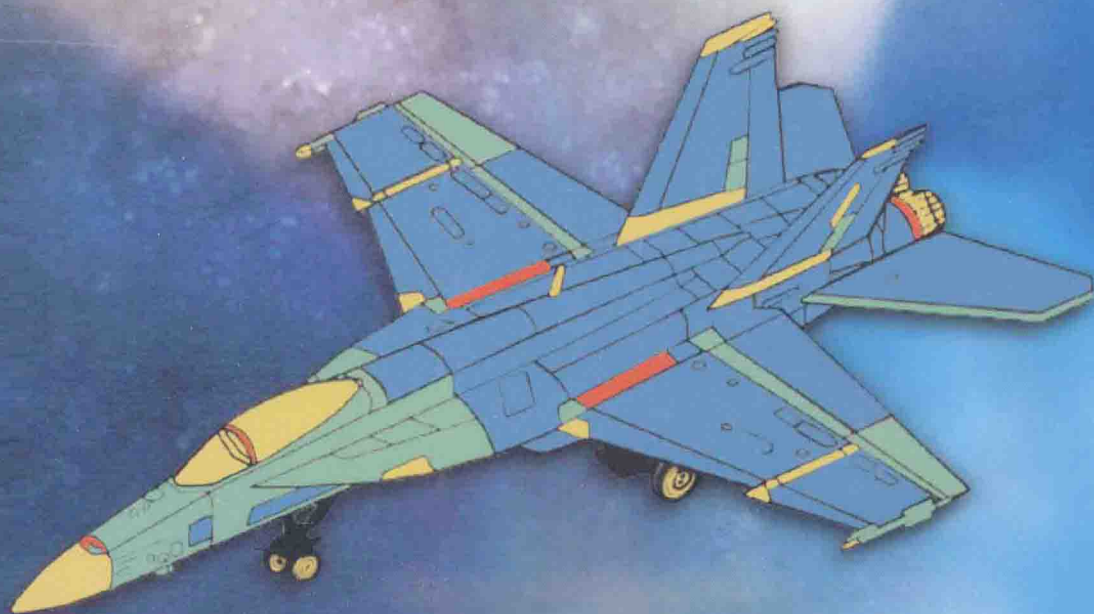
飞机结构复合材料技术 (第2版)

阿兰·贝克(Alan Baker)

(澳)斯图尔特·达特恩(Stuart Dutton) 编

唐纳德·凯利(Donald Kelly)

柴亚南 丁惠梁 译



航空工业出版社

AIAA EDUCATION SERIES

AIAA 航空航天技术丛书

“十二五”国家重点图书出版规划项目

飞机结构复合材料技术

(第2版)

阿兰·贝克 (Alan Baker)

(澳) 斯图尔特·达特恩 (Stuart Dutton) 编

唐纳德·凯利 (Donald Kelly)

柴亚南 丁惠梁 译

航空工业出版社

北京

内 容 提 要

本书对应用于飞机结构复合材料技术的各个方面做了广泛的介绍,包括纤维增强基体理论,常用于纤维、树脂与复合材料体系的材料特性,零件成形与制造,复合材料层压板结构力学,复合材料连接,环境影响,耐久性与损伤容限,无损检测(NDI)与修理程序,飞机的适航性考虑以及知识库工程技术及计算机辅助设计和有限元分析等内容。本书可作为航空航天复合材料领域技术人员的基础指导材料,也可作为相关专业高等教育的专业教科书。

图书在版编目(CIP)数据

飞机结构复合材料技术:第2版/(澳)贝克
(Baker, A.), (澳)达特恩(Dutton, S.), (澳)凯利
(Kelly, D.) 编;柴亚南,丁惠梁译. --北京:航空工
业出版社,2015.1

(AIAA 航空航天技术丛书)

书名原文:Composite materials for aircraft
structures, second edition

ISBN 978-7-5165-0635-6

I. ①飞… II. ①贝… ②达… ③凯… ④柴… ⑤丁
… III. ①飞机—航空材料—复合材料 IV. ①V257

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第300436号

北京市版权局著作权合同登记表

图字:01-2009-7766

Translated from English language edition: Composite Materials for Aircraft Structures (Second Edition), by Alan Baker, Stuart Dutton, Donald Kelly. Originally published by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. ISBN 978-1-56347-540-5. Copyright ©2004 by the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. All rights reserved.

飞机结构复合材料技术(第2版)

Feiji Jiegou Fuhe Cailiao Jishu (Di 2 Ban)

航空工业出版社出版发行

(北京市朝阳区北苑路2号院 100012)

发行部电话:010-84936597 010-84936343

三河市华骏印务包装有限公司印刷

全国各地新华书店经售

2015年1月第1版

2015年1月第1次印刷

开本:710×1000 1/16

印张:31.75

字数:636千字

印数:1—2000

定价:180.00元

《AIAA 航空航天技术丛书》审委会

顾问：(按姓氏笔画排列)

尹泽勇	石屏	冯培德	刘大响	关桥	杨凤田	李天
李明	宋文骢	张彦仲	陈一坚	陈祥宝	赵振业	唐长红
顾诵芬	曹春晓	颜鸣皋				

主任：林左鸣

副主任：谭瑞松 顾惠忠 吴献东 张新国

委员：(按姓氏笔画排列)

王坚	王之林	王向阳	王英杰	王润孝	卢广山	曲景文
华俊	刘选民	刘春晖	杨圣军	李晓红	吴松	汪亚卫
陈元先	陈灌军	庞为	郭恩明	都本正	彭卫东	葛子干
蔡毅	魏金钟					

《AIAA 航空航天技术丛书》编委会

主任：张新国

副主任：王英杰 魏金钟

委员：(按姓氏笔画排列)

丁文强	丁全心	王永庆	王永明	王明皓	王聪梅	车宏
牛文生	邓景辉	尹红顺	艾俊强	帅朝林	田泽	白晓东
冯子明	巩水利	朱知寿	朱荣刚	刘永泉	江和甫	孙聪
杨伟	杨旭	杨超	杨朝旭	苏炳君	李文正	李东杰
李孝堂	李宏新	李周复	严成忠	吴希明	吴良斌	吴学仁
何胜强	沈锡钢	宋笔锋	张弘	张波	张明习	张继高
陆志东	陆虎敏	陈聪慧	范彦铭	欧阳绍修	罗安阳	周自全
赵霞	侯敏杰	姚华	袁立	聂海涛	徐华胜	郭德伦
益小苏	陶春虎	桑建华	黄佑	黄传跃	曹奇凯	章怡宁
梁相文	梁晓庚	董建鸿	强宝平	童明波	曾军	曾元松
蒲小勃	褚林塘	臧军	廖志忠	樊会涛		

编委会办公室

主任：刘鑫

副主任：史晋蕾 李苏楠

成员：(按姓氏笔画排列)

安玉彦 李金梅 郭玮 郭倩旒

丛书序（一）

中国航空工业要融入世界航空产业链，进行国际化开拓，参与国际合作和竞争，与世界航空航天企业共谋发展，需要的是强大的技术支撑。构建先进的技术研发平台，加速推进前沿科学技术的研究，加速推进航空发动机技术和航空先进材料技术领域的基础及应用技术研究、新产品研发与技术创新，关键是要有一批具有高水平、高素质的航空航天专业人才。而人才的培养离不开知识的传承，这套《AIAA 航空航天技术丛书》就为我们提供了一个很好的资源。

习人之长，补己之短，正视不足，奋发崛起，社会发展规律普遍如此。从这套书中，我们不仅能读到长久以来人类在探索天空的过程中积跬步而形成的基础的、科学的、先进的专业知识和技术，以及崭新的思维方式和解决问题的技巧及方法，更重要的是能在学习这些成功经验的同时，多注意看看前车之鉴，避开陷阱。在这里我想要与大家共勉的是，即使是在百科全书中也不能找到所有问题的答案，科学发展永无止境，航空航天业的进步带动着社会高精尖技术的发展，其中还有很多领域及问题需要我们去探索 and 解决，因此，我们要抱着虚心的态度去学习，勇于探索的态度去思考，用好这些书，读好这些书。

科技的进步是整个社会的进步。愿我们的科技工作者、科研管理人员和广大的院校师生，既能够从中学习到知识、寻找到答案，更能够汲取精华，并能积极探索，与自身的知识、技术和经验相结合，在中国航空工业整翼飞升之时，迸发出更加绚丽的思想火花。



中国航空工业集团公司董事长

丛书序（二）

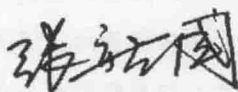
航空航天业是关系国家安全和国民经济命脉的战略性新兴产业，是高投入、高附加值的技术密集型产业。由于其技术含量高、产业链长、带动性强，其发展对我国经济结构调整、实现产业优化升级、提高综合国力具有重要意义。金融危机之后，全球对于实体经济的认识回归到正确的轨道上来，重振制造业已成大家共识。而依靠高新技术和高产品附加值的高端制造业，被认为是推进工业转型升级的突破口。航空航天业作为高端制造业的重中之重，如何发挥其“火车头”作用引领制造业拥有强大竞争优势，成为当务之急。而解决这一问题的关键，就是突破核心技术，加强自主创新。

相比欧美等发达国家，我国并没有系统地经历科学革命和工业革命的洗礼。科学技术和工业基础落后，是导致我们高端制造业发展缓慢的原因之一。科学技术的进步非一朝一夕之力。通常来讲，一个产业发展所依托的先进技术至少需要10~20年的储备周期。以前的飞机材料都是单一金属的，现在随着材料技术、制造技术的进步，发展到铝合金、铝镁合金、钛合金以及碳纤维材料。这种科学技术的进步改进了飞机的性能和功能，包括后期出现的预警机、加油机、空天飞机等，其背后凭借的也是飞机的电子设备、任务系统、功能系统等的不断升级，依靠的是一系列科学技术的积累。

夯实技术基础并谋求创新，除了依靠自身积极探索、不断积累技术成果，还要吸纳国外先进的技术成果和经验，建立开放式的科学技术发展架构。

着眼于此，中航出版传媒有限责任公司（航空工业出版社）从美国航空航天学会（AIAA）的专业出版物中选择优秀图书引进翻译出版为中文版，推出了这套《AIAA 航空航天技术丛书》。熟悉AIAA的同行们都知道，AIAA的出版物专注于航空航天领域，包括专业图书、期刊、会议论文和标准等，是为航空航天业提供信息服务的重要组成部分。AIAA的图书工作委员会及其严格的审查制度保证了其图书具有较高的学术水平和技术含量。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》涵盖飞行器的结构技术、材料技术、制造技术、气动技术、推进技术、试验技术、控制技术、航电系统和武器系统等方面,是对国内有关专业领域的有益补充。这次引进翻译出版工作所涉及的专业领域较多,工作繁杂,难度很大,需要协调的事情也很多,衷心希望最终能够达到预期目的,真正为促进国际化的交流与合作、为培养高素质的航空航天专业人才、为前沿科学技术的探索和创新起到应有的作用。



中国航空工业集团公司副总经理

给 AIAA 中文版丛书的序言

美国航空航天学会 (AIAA) 由成立于 1930 年的美国火箭协会和成立于 1932 年的美国航空科学学会于 1963 年合并而成。自此, AIAA 就作为最早的平台服务于美国及全球航空航天技术的创新者、卓越者和引领人。广为人们所熟悉的奥维尔·莱特, 尼尔·阿姆斯特朗, 弗兰克·惠特爾, 凯利·约翰逊, 西奥多·冯·卡门和沃纳·冯·布朗都是 AIAA 的会员, 而每 6 名 AIAA 的会员中就有超过 1 名会员来自美国以外的国家或地区。

这套中文版的《AIAA 航空航天技术丛书》是 AIAA 和中航出版传媒有限责任公司 (航空工业出版社) 良好合作的硕果。这种合作关系使得 AIAA 与中国航空学会之间以及 AIAA 与中国宇航学会之间的合作相得益彰。作为世界上最大的服务于航空航天业的技术学会, 由我们来推进 AIAA 图书中文版及双语版的出版和促成我们会员之间的交流是极为恰当之事。

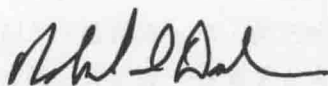
我们的合作最早是由中航出版传媒有限责任公司所提出的, 最初主要关注在对 AIAA 技术图书的翻译上, 采用译注的形式使得英文技术词汇有限的学生能够掌握图书阐述的概念。正如你们所看到的这套丛书, 现在它已不仅限于最初的目的和形式。我们不会忘记我们的宗旨, 而当我们展望未来时, 我们感到非常高兴的是这套 AIAA 中文版图书包含了 AIAA 所出版的所有类别的图书: 教育系列 (大学教材)、航空航天进展系列 (科技) 以及飞行图书馆系列 (大众爱好)。

另外, 最近几年里, AIAA 的所有图书、期刊文章和技术会议论文都已进行电子版存档, 我们也希望我们的国际会员和合作伙伴能够很方便地访问这个强大的航空航天信息图书馆。

由最初在出版上的合作开始, AIAA 已增强了其与中国的合作关系, 包括代表团互访和交流等活动。这些互惠活动使美国和中国的航空航天团体之间的联系纽带更加牢固, 也使双方收获了重要的友谊。各种开拓性的互动将使我们的国家间拥有更好的相互理解与合作关系。AIAA 非常感谢中国航空工业集团公司的张新国副总经理、中航工业经济技术研究院王英杰院长、中航出版传媒有限责任公司的刘鑫总经理和李苏楠主任为此次合作所做出的努力。

AIAA 致力于服务广大会员和航空航天业。如今, AIAA 有许多来自中国的会员, 随着更多的学生和专业人士通过这套丛书、AIAA 的其他出版物和直接的交流而对 AIAA 有更多的了解, 我们希望来自中国的会员数量将会不断增多。而对于如何改善我们的服务, 我们认为最好的想法是来自于我们的读者和会员。欢迎你们提出建议, 并且我相信中航出版传媒有限责任公司会将你们提出的建议转达给 AIAA。

我们期待着未来长期且富有成效的合作。



罗伯特·迪克曼
美国航空航天学会主席

第2版序言

由阿兰·贝克、期图尔特·达特恩和唐纳德·凯利编写的《飞机结构复合材料技术》的第2版是对在航空航天领域之中富有刺激性与挑战性并日益重要的复合材料技术主题的更新与综合处理。第1版已证明其在AIAA教育系列丛书中的重要价值，我们欣喜地欢迎这一新版加入到系列丛书之中。第1版的主编布莱恩·霍斯金（Brian Hoskin）已不幸去世，但新的编写组作出了令人赞赏的工作以保持前书的高质量。该书第2版是以相当可观的当前最新材料为特色，现有16章加一个附录。在前言里对新版的演变作了追溯。

AIAA教育系列丛书的目标在于覆盖通用航空航天领域之中的广泛主题，包括基础理论、应用与设计。这套系列丛书的理念是逐渐形成能用于专科学院或大学的专业教科书，用于深化继续教育和职业培训课程的指导材料，并能给航空航天领域专业人员的独立自学作基础的入门书。我们正不断努力扩大和提升丛书的范围与内容，所以我们欢迎您提供新题目的建议，也欢迎您成为丛书的作者。

约瑟 A. 谢茨

AIAA 教育系列丛书主编

第1版序言

由布莱恩·霍斯金和阿尔·贝克编写的《飞机结构复合材料技术》是最新加入到始于1984年的AIAA教育系列丛书之中的。这套系列丛书代表着AIAA对于高度专业化的航空航天学科需要教科书与专著这一事实的响应。《飞机结构复合材料技术》一书，正是与这种情况有关，应该会证明特别及时，因为航空航天领域中复合材料的应用已经汹涌澎湃。

《飞机结构复合材料技术》事实上对应用于飞机结构的复合材料技术的各个方面做了广泛介绍：纤维增强基本理论，常用纤维、树脂与复合材料体系的材料特性，零件成形与制造，复合材料层压板结构力学，复合材料连接，环境影响，耐久性与损伤容限，无损检测（NDI）与修理程序，飞机应用以及适航性考虑。

本书的正文是以在澳大利亚维多利亚州墨尔本市航空研究实验室（ARL）中进行的系列讲座所用的讲义为基础，经过扩展与修订而成的。讲师都是ARL的结构部或飞机材料部的官员。课程表给出了讲座名称及其主题。

讲座最初是ARL应澳大利亚航空部适航处的请求而开展的。澳大利亚国防部航空研究实验室主任已授权AIAA出版扩展和修订后的该文本。

J. S. 普尔米尼亚茨基
AIAA 教育系列丛书主编

前 言

本书是1986年由当时在澳大利亚墨尔本市航空研究实验室工作的布莱恩·霍斯金与阿兰·贝克编写的《飞机结构复合材料技术》的修订与扩展。1997年, AIAA教育系列丛书的主编邀请布莱恩·霍斯金和阿兰·贝克编写续篇, 但不幸的是布莱恩·霍斯金已经在几年前离世。幸运的是阿兰·贝克仍作为澳大利亚国防科学与技术组织(DSTO)航空航天复合材料结构的科研带头人在全日制工作, 同时, 还在积极参与成立于1991年的先进复合材料结构有限公司合作研究中心(CRC-ACS)的科研活动。阿兰·贝克能够从CRC-ACS及其成员单位的庞大专家团队中寻求到支持, 承担本书修订工作。

修订工作始于1998年, 作为CRC-ACS的一项教育计划任务由阿兰·贝克主持。后来得到了当时中心主任戈登·朗(Gordon Long)博士的支持。由于大多数参与修订的人员工作繁忙, 修订进展缓慢, 但他继续获得了CRC-ACS新任首席执行官伊恩·梅尔(Ian Mair)博士的支持。为了帮助阿兰完成看似越来越多的任务, 两位合作编者也加入进来。他们是: CRC-ACS副执行官斯图尔特·达特恩(Stuart Dutton)先生和南威尔士大学唐纳德·凯利(Don Kelly)教授。由于他们为先进复合材料结构设计与制造方面的进步所做出的贡献, 斯图尔特和唐纳德在澳大利亚复合材料研究界受到广泛尊敬。

虽然自本书第1版出版以来, 复合材料技术已经发生了巨大的变化, 但是在某些方面没有太大变化, 所以在本书中基本保持了原来的内容, 特别是布莱恩编写的结构分析部分。另外, 基本原理这一章, 虽然章名发生了变化, 但内容与第1版基本相同。除了一些图表被再次使用, 本书的其他部分与第1版明显不同。在这一版中共有16章及一个附录, 对飞机结构复合材料做出了高度概括, 并在许多重要领域进行了详尽的介绍。

在CRC-ACS的大力支持下, 本书得以顺利出版。在此, 衷心的感谢CRC-ACS及其成员单位, 如DSTO和豪客公司所付出的努力。最后, 我要向三位合作编者表示诚挚的祝贺, 因为他们在过去几年全身心的投入这项工作, 并成功地完成了这部有重要价值的教科书。

莫瑞 L. 斯科特

澳大利亚墨尔本市 先进复合材料结构有限公司
合作研究中心首席执行官

目 录

第 1 章 引言	(1)
1.1 概述	(1)
1.2 改进机体结构材料的动力	(2)
1.3 高性能纤维复合材料概念	(3)
1.4 纤维增强体	(5)
1.5 基体	(7)
1.5.1 聚合物	(7)
1.5.2 金属	(9)
1.5.3 陶瓷	(10)
1.6 聚合物基复合材料	(11)
1.7 非聚合物基复合材料体系	(12)
1.7.1 金属基复合材料	(12)
1.7.2 微粒 MMC	(14)
1.7.3 陶瓷基复合材料	(15)
1.8 混杂的金属/PMC 复合材料	(16)
参考文献	(18)
延伸阅读书目	(19)
第 2 章 纤维复合材料基本原理	(20)
2.1 纤维复合材料体系概论	(20)
2.2 复合材料的微观力学和宏观力学方面	(21)
2.3 微观力学	(21)
2.4 弹性常数	(22)
2.4.1 材料力学方法	(22)
2.4.2 E_1 和 E_2 材料力学方法的改进	(26)
2.4.3 确定弹性常数的弹性力学方法	(27)
2.4.4 膨胀系数 α_1 和 α_2	(28)
2.5 关于强度的微观力学方法	(30)
2.5.1 拉伸强度的简单估计	(30)

2.5.2 拉伸强度的统计分析	(31)
2.5.3 Rosen 的累积损伤模型	(34)
2.6 压缩强度的简单估计	(35)
2.7 偏轴拉伸强度	(36)
2.8 单向复合材料的断裂韧性	(37)
2.8.1 断裂表面能	(37)
2.8.2 断裂力学	(40)
参考文献	(42)
第3章 聚合物基复合材料使用的纤维	(44)
3.1 综述	(44)
3.2 玻璃纤维	(45)
3.2.1 制造	(45)
3.2.2 缺陷的影响	(48)
3.2.3 玻璃纤维的类型	(49)
3.2.4 玻璃纤维的涂层	(49)
3.3 碳纤维	(50)
3.3.1 制造	(50)
3.3.2 PAN 基的纤维	(51)
3.3.3 沥青基的纤维	(53)
3.4 硼纤维	(54)
3.5 碳化硅纤维	(55)
3.5.1 基于化学气相沉积的碳化硅纤维	(55)
3.5.2 基于聚合物前体的碳化硅纤维	(56)
3.6 芳族聚酰胺纤维	(57)
3.7 定向的聚乙烯纤维	(58)
3.8 干纤维的形式	(59)
3.8.1 粗纱与丝束	(61)
3.8.2 纱线	(61)
3.8.3 无纺布	(61)
3.8.4 机织织物	(61)
3.8.5 编织物	(62)
3.8.6 无波纹织物	(62)
3.8.7 带	(63)

3.8.8 三维纺织的预成形坯	(63)
参考文献	(63)
第4章 聚合物的基体材料	(65)
4.1 引言	(65)
4.1.1 聚合物材料的基础知识	(65)
4.1.2 结构与力学性能	(67)
4.2 热固性和热塑性聚合物基体材料	(69)
4.3 热固性树脂体系	(71)
4.3.1 环氧树脂	(74)
4.3.2 聚酯树脂	(80)
4.3.3 乙烯基酯树脂	(82)
4.3.4 酚醛树脂	(83)
4.3.5 双马来酰亚胺树脂	(85)
4.3.6 聚酰亚胺树脂	(86)
4.3.7 氰酸盐树脂	(87)
4.4 热塑性树脂体系	(88)
4.4.1 无定形热塑性材料	(89)
4.4.2 半结晶的热塑性材料	(89)
4.4.3 聚酮树脂	(89)
4.4.4 聚苯硫醚聚合物	(90)
4.4.5 聚砒树脂	(90)
4.4.6 聚醚酰亚胺	(90)
参考文献	(92)
第5章 构件的成形与制造	(93)
5.1 引言	(93)
5.2 一般层压方法概述	(95)
5.2.1 敞口硬模成形	(95)
5.2.2 压力成形法	(96)
5.2.3 缠裹	(97)
5.3 飞机级复合材料构件的层压方法	(97)
5.3.1 预浸料的生产	(97)
5.3.2 预浸料的运输与存储	(98)

5.3.3	切割与配套	(98)
5.3.4	铺贴	(99)
5.3.5	预浸料叠层的自动成形	(100)
5.3.6	自动化铺贴	(101)
5.3.7	装袋	(102)
5.3.8	固化	(103)
5.3.9	复杂构件的共固化	(105)
5.3.10	工艺过程问题	(106)
5.3.11	解包、修饰和涂漆	(108)
5.3.12	修整和钻孔	(108)
5.4	液态树脂模塑技术	(109)
5.4.1	树脂传递模塑	(109)
5.4.2	材料体系	(110)
5.4.3	模具系统	(111)
5.4.4	应用	(112)
5.4.5	树脂膜渗透 (RFI)	(113)
5.4.6	真空辅助的树脂传递模塑	(114)
5.5	长丝缠绕	(116)
5.5.1	概述	(116)
5.5.2	缠绕过程	(116)
5.5.3	缠绕式样	(117)
5.5.4	材料	(117)
5.5.5	设计与性能	(118)
5.5.6	应用	(119)
5.6	拉挤成形	(120)
5.6.1	增强材料	(120)
5.6.2	树脂	(120)
5.6.3	拉挤过程	(121)
5.6.4	纤维给进系统	(121)
5.6.5	模具系统	(122)
5.6.6	牵引系统与台站系统	(122)
5.6.7	航空航天应用	(122)
5.7	过程模拟	(123)
5.7.1	增强体叠层的成形	(123)

5.7.2	热传递与树脂固化	(125)
5.7.3	树脂通过纤维增强体的流动	(126)
5.7.4	增强体的压实	(127)
5.7.5	过程所致的变形及残余应力	(128)
5.7.6	试验验证	(129)
5.8	模具	(129)
5.8.1	金属模具	(130)
5.8.2	复合材料模具	(131)
5.8.3	芯模	(132)
5.9	特殊的热塑性技术	(133)
5.9.1	中间形式	(133)
5.9.2	热塑性复合材料制造技术	(134)
	参考文献	(138)
第6章	结构分析	(140)
6.1	概述	(140)
6.2	层压板理论	(140)
6.2.1	在材料轴上的单层应力—应变关系式: 单向层压板	(141)
6.2.2	在层压板轴上的单层应力—应变关系式: 偏轴层压板	(142)
6.2.3	对称层压板的平面应力问题	(144)
6.2.4	承受平面应力和弯曲载荷的一般层压板	(152)
6.3	应力集中与边缘效应	(156)
6.3.1	正交各向异性层压板的孔边应力集中	(156)
6.3.2	边缘效应	(157)
6.4	破坏理论	(158)
6.4.1	概述——基体开裂、首层破坏与极限载荷	(158)
6.4.2	基于应力的破坏理论	(159)
6.4.3	基于应变的破坏理论	(163)
6.4.4	基体破坏包线	(165)
6.4.5	破坏预计模型的比较	(166)
6.5	断裂力学	(166)
6.6	靠近应力集中处的破坏预计及损伤容限	(167)
6.7	屈曲	(169)
6.7.1	层压板屈曲	(169)