



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

4

材料技术

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

孙慧玉 周储伟 周光明 古兴瑾 宋豪鹏 等◎译



*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 4
Materials Technology*



国家出版基金项目

“十二五”国家重点出版物出版规划项目

航空航天科技出版工程

4

材料技术

[英]理查德·布洛克利 (Richard Blockley) [美]史维 (Wei Shyy) ©主编

孙慧玉 周储伟 周光明 古兴瑾 宋豪鹏 等◎译

*ENCYCLOPEDIA OF
AEROSPACE ENGINEERING 4
Materials Technology*

图书在版编目 (CIP) 数据

航空航天科技出版工程. 4, 材料技术 / (英) 理查德·布洛克利 (Richard Blockley), (美) 史维 (Wei Shyy) 主编; 孙慧玉等译. —北京: 北京理工大学出版社, 2016. 6

书名原文: Encyclopedia of Aerospace Engineering

国家出版基金项目 “十二五” 国家重点出版物出版规划项目

ISBN 978-7-5682-2401-7

I. ①航… II. ①理… ②史… ③孙… III. ①航空材料②航天材料 IV. ①V

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 120111 号

北京市版权局著作权合同登记号 图字: 01-2013-1965 号

All Rights Reserved. Authorised translation from the English language edition published by John Wiley & Sons Limited. Responsibility for the accuracy of the translation rests solely with Beijing Institute of Technology Press Co., LTD and is not the responsibility of John Wiley & Sons Limited. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyright holder, John Wiley & Sons Limited.

封面图片来源:



源自 ONERA, France



源自 Shutterstock



源自 Shutterstock



源自 EADS Astrium

出版发行 / 北京理工大学出版社有限责任公司

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010) 68914775 (总编室)

(010) 82562903 (教材售后服务热线)

(010) 68948351 (其他图书服务热线)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 889 毫米×1194 毫米 1/16

印 张 / 31

字 数 / 898 千字

版 次 / 2016 年 6 月第 1 版 2016 年 6 月第 1 次印刷

定 价 / 188.00 元

责任编辑 / 孟雯雯

文案编辑 / 多海鹏

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

航空航天科技出版工程

译审委员会

主任 杜善义
副主任 李椿萱 余梦伦 黄瑞松 叶培建 唐长红 甘晓华
委员 (按姓氏笔画排序)
才满瑞 刘 莉 杨 超 昂海松 周志成 唐胜景 熊 克

翻译委员会

主任 刘 莉
副主任 朱春玲 赵 宁 江 驹
委员 (按姓氏笔画排序)
万志强 马东立 王晓芳 王焕瑾 王锁柱 毛军远 古兴瑾
龙 腾 朱程香 向彩霞 刘东旭 齐艳丽 孙康文 孙慧玉
杜 骞 杜小菁 李 书 李 响 李世鹏 杨春信 肖天航
吴小胜 吴志刚 宋 晨 宋豪鹏 张景瑞 陈永亮 武志文
林 海 昂海松 周光明 周建江 周思达 周储伟 郑祥明
徐 军 徐 明 郭 杰 唐胜景 黄晓鹏 龚 正 韩 潮
韩启祥 谢 侃 谢长川 雷娟棉 谭慧俊 熊 克 冀四梅

审校委员会

主任 林 杰
副主任 樊红亮 李炳泉
委员 (按姓氏笔画排序)
于 勇 王佳蕾 王玲玲 王美丽 尹 晷 白照广 多海鹏
祁载康 杜春英 李秀梅 杨 侧 张云飞 张海丽 张鑫星
陈 竑 季路成 周瑞红 孟雯雯 封 雪 钟 博 梁铜华

推荐序

航空航天是国家的战略产业，其科技水平直接决定着综合国力和国家安全。近年来，我国航空航天科技水平得到显著提升，在若干领域取得了举世瞩目的成就。在建设航空航天强国的进程中，广大科技人员需要学习和借鉴世界航空航天科技的最新成就。《航空航天科技出版工程》是综合反映当今世界范围内航空航天科技发展现状和研究前沿的一套丛书，具有系统性、学术性、前沿性等特点。该丛书的翻译和出版，为我国科技工作者学习和借鉴世界航空航天科技提供了一个良好平台。

《航空航天科技出版工程》英文版由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版。全世界 34 位来自航空航天领域的顶级专家组成丛书顾问团，负责对丛书进行规划指导，来自美国、英国、德国、法国等国家的 600 多位著名专家参与丛书撰写。该丛书是当今世界上最为系统和权威的航空航天科技丛书，共有 9 卷、近 5000 页，涵盖航空航天科技的 43 个领域主题，442 个章节。该丛书对航空航天科技所涉及的重要概念、理论、计算、实验等进行了系统阐述，并配有大量工程实践案例，主要内容包括：流体动力学与空气热力学、推进与动力、结构技术、材料技术、动力学与控制、环境影响与制造、飞行器设计、系统工程等。最难能可贵的是，该丛书对航空航天工程的战略决策、实施路径、技术应用、实践验证和评价等方面进行了系统阐释，对未来二十年面临的挑战和机遇进行了深入分析。

该丛书中有些专题研究在我国尚属起步阶段，不少内容是国内紧缺的文献资料。例如，丛书对高超声速稀薄气体动力学、扑翼空气动力学、高超声速气动热弹性、多运动体协调控制、多种飞行器融合、深空探测、航天系统设计认证等领域的介绍颇有参考价值。丛书内容不仅适用于国防领域，而且适用于民用领域，对我国航空航天科技发展具有指导意义。

北京理工大学是我国首批设立火箭、导弹等专业的高校，曾为我国航天事业的创立和发展做出重要贡献，近年来又在深空探测、制导武器、空间信息处理等领域取得重要进展。该丛书英文版问世不久，北京理工大学出版社敏锐地预判到该丛书对我国航空航天科技发展具有重要借鉴作用，提出翻译这套巨著的设想。北京理工大学航空航天学科的教授们积极投身于翻译丛书的策划中，他们联合我国高校、研究机构中一



批长期从事航空航天科技工作的教师和工程技术人员组成团队，仅用一年多时间就将这套巨著译为中文。我帮助他们邀请到丛书英文版顾问、著名航天结构力学家杜善义院士担任译审委员会主任，邀请到我国航空航天科技领域的多位领军科学家、总设计师共同负责丛书译审，进而确保中文版的科学性、准确性、权威性。

作为长期从事航空航天科技工作的学者，看到这套丛书即将问世由衷高兴。我认为，该丛书将为我国航空航天科技工作者提供一套不可多得的工具书，有利于提升我国航空航天科技水平，有利于促进我国航空航天科技与世界航空航天科技的有效对接，有利于推动我国建设航空航天强国。因此，我郑重向航空航天科技界的同行们推荐这套丛书。

中国科学院院士
北京理工大学校长

译者序

航空航天的发展水平体现了一个国家的综合实力。我国高度重视航空航天技术的创新发展，将航空航天产业列入国家战略性新兴产业和优先发展的高技术产业。近年来，国家科技重大专项（如大型飞机、载人航天与探月工程、高分辨率对地观测、航空发动机与燃气轮机等）的实施带动了我国航空航天技术的迅猛发展。

航空航天技术的发展日新月异并呈现出跨学科化和国际化的特征，国内学者需要一套系统全面的丛书，来巩固现有的知识、了解国际前沿发展动态、紧盯航空航天科技前沿。《航空航天科技出版工程》正是这样的一套技术研究丛书。北京理工大学出版社在组织专家对英文版《航空航天科技出版工程》的章节标题及主要内容进行翻译和评审后，发现该丛书内容翔实、信息丰富、学科体系完整，具有较高的前瞻性、探索性、系统性和实用性，是一套对中国航空航天领域有较强学习与借鉴作用的专著。因此，出版社决定引进、出版本套丛书的中文版。

英文版《航空航天科技出版工程》由美国 WILEY 出版公司和 AIAA（美国航空航天学会）联合出版，主编为 Richard Blockley（英国克兰菲尔德大学航空航天顾问、英国 BAE 系统公司前技术总监）和 Wei Shyy（原美国密歇根大学航空航天工程系教授兼系主任），历经多年，完成了 9 卷的出版。各章均由活跃在全球航空航天各专业领域研究一线的专家执笔，集成了编写团队在航空航天科技领域的重要科学研究成果和宝贵的科学试验数据。

《航空航天科技出版工程》从力学、动力及推进技术、制导和控制技术、电子仪表技术、通信技术、计算机科学、系统工程、材料科学、加工和制造技术及空间物理学等多个相互支撑的学科技术领域，全面而系统地阐述航空航天领域所涉及的知识，综合体现了目前航空航天技术的国际水平。9 卷包括《流体动力学与空气热力学》《推进与动力》《结构技术》《材料技术》《动力学与控制》《环境影响与制造》《飞行器设计》《系统工程》《航空航天专业术语》。丛书中文版配有丰富的原版插图、表格以及大量的图片资料，最大程度地保留了原版书的编写风格。该丛书对于国内的科研和技术人员，以及承担着未来航空航天技术开发的年轻人和学生来说，都无疑是一套非常好的参考资料。



北京理工大学出版社依托北京理工大学、南京航空航天大学、北京航空航天大学、中国航天科工集团北京航天长征科技信息研究所、中国航天科技集团空间技术研究院等国内从事航空航天技术研究的高校和科研院所，组建了翻译团队和专家译审团队，对《航空航天科技出版工程》进行翻译。

《航空航天科技出版工程4 材料技术》包含结构材料、耐高温材料、活性材料、空间应用材料4个部分，由孙慧玉、周储伟、周光明、古兴瑾、宋豪鹏、邓健、宋坤、袁渊、陈紫薇、蔡登安、陈牡丹、方常青、黄天麟、涂金崇、顾建平、莫佳亮、于健、孙玉林、曹进翻译。特别感谢出版社引进本书，更感谢各位院士学者们对此书出版的大力支持。译、校者虽在译文、专业内容、名词术语等方面进行了反复斟酌，并向有关专业人员请教，但限于译、校者的水平与对新知识的理解程度，谬误和不当之处恳请读者批评、指正。

翻译委员会

英文版序

能够受邀介绍这部航空航天丛书，我们和各自代表的学会都感到非常的荣幸和愉快。

毫无疑问，这部丛书体现了英国皇家航空学会和美国航空航天学会最大的期望。我们这两个学会都在寻求推进航空航天知识体系进步的方法，同时也都认识到航空航天领域具有动态、多学科和跨国界的特性。

这部丛书是一个独特的工具。它提供了涉及很多方面的快照，包含：全球共享的知识体系、全球企业共享的观念、共享的技术展望和挑战、共享的发展节奏、新方法和新视野，尤其是共享的对教育和培训重要性的关注——所有这些都是关于一个工业领域和一组学科，是它们塑造了并将继续改变我们所生活的世界。

这个共享的知识体系超出了国家的、商业的、组织的和技术学科的界限。在这个界限中我们进行着日复一日的工作，虽然这些工作必然引起经常的竞争，但也总是激发创新性和建设性的尝试。因此，我们怀着无比激动的心情看到了一项完全专业性工作的开展，它尝试着将这个知识体系的精华以全新的形式整理和出版。

航空航天领域对我们世界的影响是巨大的。早期的空气动力学创立者，从 George Cayley 爵士到 Wright 兄弟，都难以想象航空工业、更不必说太空飞行是如何彻底改变了我们的文明世界：它使我们的星球变成了一个很小的区域、允许瞬时联系全球任何地方、提供大范围的人和物资运输以及可以从外太空独特的视角来观看我们的星球和人类自己。航空航天工程师不仅直接为我们收集的知识体系做出了贡献，还驱动了广大的相关领域的进步，从基础的数学、电子学和材料科学到生物学和人因工程。因此，说这部丛书捕捉到了该领域当下的精华是非常恰当的。

对于内容广泛的航空航天工程技术和研究领域，提取其关键要素形成一个相互关联的框架结构，并不具备明显的可能性，更不要说涉及诸多细节。然而这部丛书正是要雄心勃勃地尝试做到这些，甚至更多。从这点看，这部丛书是一个勇敢的、有远见的、有胆识的计划。

这部丛书勾画出了我们领域最好和最醒目的专门技术，其成果是对发起者和作者们最好的回报，这些人值得我们向他们对航空航天行业做出的贡献表示祝贺。



虽然这部丛书的目标是达到相当的深度，但从实用的角度，这部丛书被设计成非常容易阅读和理解。我们希望读者看到这部丛书并可以广泛地应用，包括作为权威的参考书目、作为学习和专业发展的重要工具，或许可以作为课程作业和技术模块设计跨国界、跨机构可信赖的测试基准。

正值载人动力飞行第二个百年开始，太空的前景似乎正在不断复苏，这部丛书的出版是航空航天工程和科学持续发展的里程碑和标志。

我们非常自豪地、共同地将这部丛书推荐给你们。

Dr. Mark J. Lewis

美国航空航天学会主席

马里兰大学帕克分校航空航天工程系主任、教授，马里兰州，美国

Dr. Mike Steeden

英国皇家航空学会主席，英国

英文版前言

航空航天工程的历史可以追溯到早期希腊的哲学家亚里士多德和阿基米德，经哥白尼、伽利略、达·芬奇、牛顿、伯努利和欧拉到 19 世纪伟大的机械师纳威、斯托克顿和雷诺以及许多其他研究者，一直到 1903 年由莱特兄弟第一次成功地起飞了一台比空气重的动力机器。从普朗特、冯·卡门、惠特尔、冯·奥西恩、屈西曼、冯·布劳恩和科罗廖夫（这里只给出了少数的名字）等人开创性的成就，仅仅过去一个世纪的时间，航空器和航天器就以一种让最有远见的现代飞行预见者都震惊的速度得到了发展。超音速飞行（具有代表性的协和号客机、SR71 黑鸟式侦察机）、人类在月球上行走以及航天器向太阳系的远端航行，这些都是顽强不屈的技术探索的见证。

几代哲学家、科学家和工程师的工作使航空航天工程形成一个确定的学科，而且需要持续对新的商业、环境和安全相关因素、科学技术领域其他学科的进展、之前未探索的飞行器设计概念、推进、结构与材料、控制、导航和动力学、通信、航空电子、天基系统与旅行中的技术挑战等做出响应。航空航天工程产品是科学与技术多学科综合的产物，当航空器和航天器中的系统集成变得越来越复杂的时候，前所未有的设计挑战出现了，一个部门就需要借鉴不同领域的专业知识。因此，工程师们不仅需要专注于专门知识，还需要将他们的知识扩展到更广泛的学科领域。

本套书的主要目的是：为本科生、研究生以及学术界、工业界、研究机构和政府部门中的专业人士提供一个随手可得的、涵盖航空航天工程主要学科的专用参考书。本套书阐述了基本科学概念及其在当前工程实践中的应用，并将读者引导到更专业的书籍中。

本套书包含 442 篇文章，划分为 43 个领域主题，围绕科学基础和当前的工业实践，贯穿了航空航天工程的全部。当本套书被确定在同类著作中最先出版时，编辑团队从支撑航空航天科学、工程与技术研究和开发的专家们那里得到了原作稿件的授权。这些稿件包括力学、推进、导航与控制、电子器件和测量仪表、通信、计算机科学、系统工程、材料科学、生产与制造以及物理学。此外，考虑到当前围绕航空的担忧，环境科学、噪声与排放中的一些特定学科也被包含在本套书中。



本套书由热心的、杰出的国际顾问委员会指导编写，委员会由 34 名来自学术界、工业界和研究中心的委员组成。在顾问委员会的指导下，我们确定了一个主要作者团队，由他们来确定每个主题覆盖的范围，并选择了有能力来贡献他们文章的合适的作者。

在本套书的引导章节中，包含了系统思想的概念和在可预见的未来航空航天工程师们将面临的挑战。在顾问委员会和主要作者团队的大力帮助下，我们试图包含有人、无人航空器和航天器领域中所有的主题，然而我们意识到还有一些重要的主题没有涉及，或是因为我们没有及时注意到它们，或是由于作者没能赶上最后的出版期限。我们打算将后续的投稿和最新的进展放在每年的在线更新中。

非常遗憾，我们的一位主题作者 Philip Pugh 于 2009 年 1 月去世了，他为第 37 部分的规划和前期实施做出了难以估量的贡献。我们也非常感谢 David Faddy 继续完成了这一部分的工作。

Richard Blockley

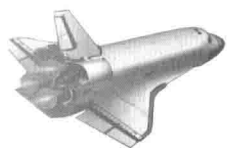
克兰菲尔德大学航空航天顾问，克兰菲尔德，英国

BAE 系统公司前技术总监，法恩伯勒，英国

Wei Shyy

密歇根大学航空航天工程系，安娜堡，密歇根州，美国

目 录



Contents



第18部分 结构材料

■ 第172章 未来飞机结构：从金属结构到 复合材料结构

1 引言	3
2 飞机结构：过去、现在和未来	5
2.1 现代飞机结构，更轻更省油	6
2.2 结构效率——几何与连续性	7
3 层合板结构：从金属材料到复合材料	10
4 复合材料和多学科飞机设计	11
4.1 多学科机身设计，力学与声学的集成	13
4.2 机身的隔音	14
5 安全低成本层合板	14
6 简单纤维铺层，安全和低成本	18
7 简单聚酯系统，安全和降低成本	20
8 制造、组装和控制：金属纤维的优点	23
9 结论	23
注释	24
参考文献	24
拓展阅读	25

■ 第173章 结构材料：铝及其合金——属性

1 引言	26
2 历史	28
3 加工处理	28
4 铝合金的强化机制	29
5 合金牌号和特性	31
6 结论	35
参考文献	35

■ 第174章 结构材料：铝及其合金的制造 技术

1 引言	37
------------	----

2 铝结构的制造	37
3 整体加筋板	37
4 铝结构的连接	38
5 铜焊	39
6 熔焊	39
7 弧焊	39
8 气状钨弧焊 (GTAW)-TIG	39
9 气状金属弧焊 (GMAW)-MIG	40
10 变极性等离子弧焊接过程 (VPPAW)	40
11 束焊	41
12 电阻焊	41
13 固态过程	41
14 线性及旋转摩擦焊接	42
15 摩擦搅拌焊接 (FSW)	42
16 铝结构的近网成型过程	43
17 精密铸造	43
18 精密锻造	43
19 夹层结构	44
20 多层成型	44
21 结论	45
致谢	45
参考文献	45

■ 第175章 钛及其合金：冶金、热处理及 合金特性

1 引言	47
2 为什么选用钛	47
3 钛冶金	49
3.1 合金种类	49
3.2 钛的热处理	50
3.3 一般合金特性	53
3.4 新兴合金	56
4 结论	56



参考文献	56	参考文献	78
■ 第 176 章 金属钛及其合金：处理、加工及力学性能	58	拓展阅读	78
1 处理	58	■ 第 178 章 负载层压复合材料结构	79
1.1 熔化	58	1 引言	79
1.2 锭的转化	58	2 复合材料层合板的基本术语	79
1.3 坏锭	59	薄板、层合板和层合板编码	79
1.4 薄板产品	59	3 薄板的应力应变关系	80
1.5 杆、锻块	59	4 薄板的本构方程（薄板理论）	81
1.6 模锻	59	5 薄板应力分析	81
1.7 挤压型材	60	6 薄板失效准则	82
1.8 铸件	60	6.1 薄板面内失效准则	82
1.9 粉末冶金	61	6.2 薄板面外失效准则	82
2 制造	61	7 自由边应力	82
2.1 焊接	61	8 复合材料层合板结构特点	83
2.2 超塑成型和扩散结合（SPFDB）	63	9 层合板增强设计方法	83
2.3 添加层制造	64	10 结论	84
2.4 机械加工	65	参考文献	84
2.5 表面处理	65	■ 第 179 章 纤维增强聚合物基复合材料：压力容器在航空航天中的应用	85
3 机械性能	66	1 引言	85
3.1 拉伸强度	67	1.1 什么是压力容器（PV）	85
3.2 延展性	67	1.2 什么是航天系统	85
3.3 断裂韧性	67	1.3 压力容器在航天系统中的应用	86
3.4 疲劳	68	1.4 国际压力硬件标准	87
3.5 蠕变	70	2 复合材料缠绕压力容器（COPV）的制造工艺	87
4 结论	70	3 复合材料缠绕压力容器应用于航空航天的主要问题	88
参考文献	70	3.1 撞击破坏	88
拓展阅读	71	3.2 LBB 失效模式	88
■ 第 177 章 纤维增强聚合物复合材料：制造和认证问题	72	3.3 应力破坏寿命	88
1 引言	72	4 复合材料缠绕压力容器（COPV）设计和检验的关键要求	89
2 认证问题	73	4.1 设计要求	89
2.1 材料和工艺发展	73	4.2 材料要求	90
2.2 生产和质量评估	73	4.3 质量保证要求	91
2.3 构件测试	74	5 结论	91
2.4 分析	75	参考文献	91
2.5 结构测试	76	■ 第 180 章 纺织复合材料：聚合物基复合材料	92
2.6 可支持性	76	1 引言：什么是纺织复合材料？	92
3 制造选择	76	2 纺织预成型的类型	92
3.1 材料选取	76		
3.2 工艺选择	77		
3.3 连接	77		
4 结论	77		



2.1 机织预成型	93	参考文献	118
2.2 编织预成型	94	■ 第 182 章 三维贯穿层合 (Translaminar)	
2.3 多轴多层经编预成型 (无皱褶织物) ..	95	增强和三维纺织复合材料 ..	119
3 纺织预成型在复合材料制造中的特性 ..	96	1 引言	119
3.1 成型性	96	2 贯穿层合复合材料	120
3.2 渗透性	97	2.1 定义	120
4 纺织复合材料的内部结构	98	2.2 穿过层板厚度的缝合复合材料	121
4.1 皱褶	99	2.3 Z 向针刺成型复合材料	121
4.2 孔隙、富树脂区、嵌套	99	3 复合材料三维整体式纺织预制件	123
5 织物增强复合材料的刚度	99	3.1 三维整体式预制件的定义	123
6 织物增强复合材料的强度和损伤演化 ..	102	3.2 纺织增强相的不同类型	123
6.1 准静态拉伸强度和损伤	102	4 二维和三维纺织增强复合材料的设计 ..	124
6.2 压缩和面外加载	103	4.1 纺织复合材料的关键问题	124
6.3 复杂加载的失效准则	103	4.2 Z 向纱线尺寸的影响	125
7 纺织复合材料的建模工具	104	4.3 预制件纤维结构的影响	126
7.1 单胞的几何模型	104	5 力学性能的比较	129
7.2 增强材料变形性和悬垂的建模	105	6 结论	130
7.3 渗透性和充模的建模	105	致谢	131
7.4 纺织复合材料力学性能和结构分析的		参考文献	131
建模	106	■ 第 183 章 轻质夹芯结构	133
8 结论	106	1 夹芯结构	133
参考文献	106	2 夹芯板的制造	134
扩展阅读	107	3 面板的制造	134
■ 第 181 章 纺织复合材料: 陶瓷基复合		4 夹芯	135
材料	108	5 夹芯的制造	136
1 引言	108	6 夹芯板的装配	136
2 陶瓷基复合材料: 损伤容限型脆性		7 切割和折叠拼接	137
材料	108	8 夹芯结构边缘处理	137
3 材料选择和加工	110	9 连接夹芯板	138
3.1 航空航天应用材料选择	110	10 夹芯板应用	139
3.2 纤维	110	10.1 体育	139
3.3 界面涂层	110	10.2 民用基础设施	139
3.4 基体材料	111	10.3 内饰	139
3.5 加工方法	111	10.4 化学/电子	139
4 单向或层合二维增强陶瓷基复合材料的		10.5 航海应用	139
性能	112	10.6 汽车和铁轨	139
5 三维织物增强陶瓷基复合材料	112	10.7 航空领域	140
5.1 坚固的薄陶瓷基复合材料面板	113	11 结论	140
5.2 三维陶瓷基复合材料结构举例	113	相关章节	140
6 三维织物增强陶瓷基复合材料性能的		参考文献	140
建模	116	拓展阅读	140
7 结论	117	■ 第 184 章 激光在航空航天制造业中的	
相关章节	117	应用	141
		1 激光钻孔	141



1.1 钻孔	141
1.2 简介	141
1.3 激光钻孔原理	141
1.4 激光钻孔变量	142
1.5 航空航天工业不同材料钻孔	143
1.6 激光钻孔的数学模型	144
1.7 传感器	144
1.8 总结	144
2 焊接	144
2.1 简介	144
2.2 激光焊接原理	145
2.3 激光焊接变量	145
2.4 航空航天工业中不同材料焊接技术	146
2.5 热传递	147
2.6 传感器	147
2.7 总结	147
3 激光冲击喷丸	148
作用机理	148
4 激光熔覆和直接金属沉积技术	148
4.1 简介	148
4.2 激光熔覆建模	149
4.3 激光熔覆技术制造复合材料	150
4.4 固体自由成型	151
4.5 直接金属沉积技术	152
4.6 材料微观结构设计	153
5 结论	154
致谢	154
参考文献	154

■ 第 185 章 金属与金属和金属与复合材料黏接以及螺栓结构连接 158

1 引言	158
2 机械接头	159
3 黏接接头	159
4 经典接头分析	160
5 混合接头分析	162
6 设计展望	164
参考文献	165

■ 第 186 章 热防护系统 166

1 引言	166
2 航天飞机的遗产	167
2.1 隔热瓦和覆盖层	168
2.2 覆有增强碳-碳材料的机翼前缘、凸出部分	168

3 较新的隔热瓦和覆盖层概念	169
4 金属热防护系统	170
5 结构集成 TPS/陶瓷基复合材料 (CMC)	171
6 热结构	171
7 冷却概念	172
8 尖前缘和超高温陶瓷	172
9 示范试验飞行器	173
10 烧蚀材料	174
11 电弧试验	175
12 充气系统	175
13 结论	175
致谢	175
参考文献	176

■ 第 187 章 叠层 (Layer-by-Layer, LBL) 纳米材料制成的先进复合材料 178

1 引言	178
2 叠层黏土	178
2.1 黏土粒子的结构与特性	178
2.2 多层黏土的结构组织	179
2.3 作为高性能纳米复合材料的多层黏土	179
2.4 多层黏土在生物技术方面的应用	182
2.5 多层黏土的各向异性传输	182
2.6 多层黏土在光学与电子方面的应用	183
3 叠层碳纳米管	183
3.1 CNTs 结构与特性	183
3.2 多层碳纳米管的结构组织	183
3.3 电导体方面的应用	183
3.4 传感器方面的应用	184
3.5 燃料电池方面的应用	184
3.6 叠层纳米/微球涂层及生物医学方面的应用	185
4 结论	186
参考文献	186

■ 第 188 章 纳米材料的力学性能 189

1 聚合物基纳米材料的重要性	189
2 填料几何性质对纳米复合材料刚度的影响	190
3 纳米夹杂对聚合物的增强与增韧效应	192



4 纳米复合材料模型	194
5 结论	195
致谢	195
参考文献	195

第19部分 耐高温材料

第 189 章 钛合金：加工、性质及其应用

1 引言	199
2 钛的合金化	200
3 钛合金的加工	200
4 工艺与性能关系	202
4.1 钛合金微观结构的演变	202
4.2 拉伸性质	204
4.3 断裂韧性	204
4.4 疲劳特性	205
4.5 蠕变行为	205
4.6 应力腐蚀开裂 (Stress Corrosion Cracking, SCC)	206
5 钛合金的航空航天应用	206
6 结论	209
7 致谢	209
扩展阅读	209

第 190 章 TiAl 金属互化物

1 引言	210
2 组成和微观结构	210
3 热力学性质	212
4 变形特性、强度和韧性	212
5 裂纹扩展和断裂韧性	214
6 疲劳	215
7 蠕变	216
8 加工	217
8.1 铸造	217
8.2 粉末冶金	217
8.3 锻造加工	217
8.4 连接	218
9 表面处理	218
10 结论	219
致谢	219
相关章节	219
参考文献	219

第 191 章 高温应用下的金属基复合材料

1 引言	221
2 加工	223
2.1 搅拌铸造	223
2.2 熔体浸渗法/压挤铸造	223
2.3 原位反应 (In situ reaction)	223
2.4 粉末加工	223
2.5 纤维-箔铺层	223
2.6 基体纤维涂层的巩固	223
3 铝复材	224
4 钛基系统	224
4.1 静态拉伸性能	224
4.2 蠕变和疲劳	224
5 金属间化合物	225
5.1 钛铝合金复合材料	226
5.2 镍基系统	226
5.3 硅化系统	226
6 应用	227
6.1 整体叶片环和叶片环	227
6.2 轴	228
6.3 其他部件	228
7 结论	229
参考文献	229

第 192 章 多晶镍基高温合金：加工工艺、性能及应用

1 引言	231
2 航空燃气轮机工作环境	231
3 高温合金冶金学基础	233
3.1 γ 基体的固溶强化	233
3.2 析出强化	233
3.3 碳化物相	234
3.4 微量元素的影响	234
3.5 结构与性能间的关系	234
4 热处理的作用	235
5 多晶体加工锻造	235
6 铸锻工艺	236
6.1 真空感应熔炼 (Vacuum-Induction Melting, VIM)、真空电弧重熔 (Vacuum Arc Remelting, VAR) 和电渣重熔 (Electro-Slag Remelting, ESR)	236
6.2 粉末冶金加工	236