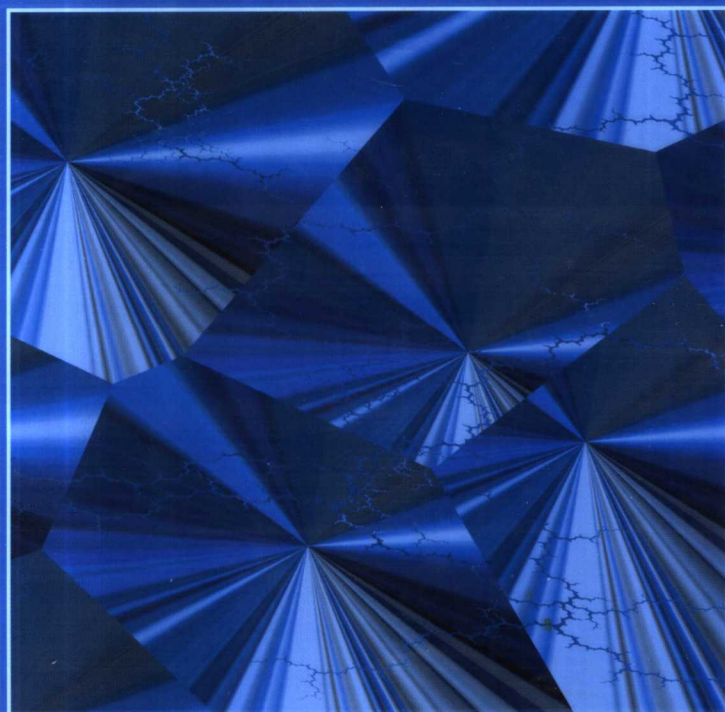


先进复合材料 制造技术

[美] T. G. 古托夫斯基 主编
李宏运 等译



化学工业出版社

材料科学与工程出版中心

TB33

G449

先进复合材料制造技术

[美] T. G. 古托夫斯基 主编

李宏运 等译



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

·北京·

(京)新登字 039 号

图书在版编目(CIP)数据

先进复合材料制造技术/[美]古托夫斯基(Gutowski, T. G.)主编;李宏运等译. —北京:化学工业出版社, 2004. 3

书名原文: Advanced Composites Manufacturing
ISBN 7-5025-5300-2

I. 先… II. ①古…②李… III. 复合材料-制造
IV. TB33

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第020647号

Advanced Composites Manufacturing/Edited by Timothy G. Gutowski
ISBN 0-471-15301-X

Copyrights ©1997 by John Wiley & Sons, Inc. All rights reserved.

Authorized translation from the English language edition published by John Wiley & Sons, Inc.
本书中文简体字版由 John Wiley & Sons 出版公司授权化学工业出版社出版发行。
未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号: 01-2003-2852

先进复合材料制造技术

[美] T. G. 古托夫斯基 主编

李宏运 等译

责任编辑: 苏平

责任校对: 陶燕华

封面设计: 潘峰

化学工业出版社 出版发行
材料科学与工程出版中心

(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

发行电话: (010) 64982530

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

聚鑫印刷有限责任公司印刷

三河市延风装订厂装订

开本 720mm×1000mm 1/16 印张 29¼ 字数 539 千字

2004年5月第1版 2004年5月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-5300-2/TQ·1945

定 价: 60.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

献给蔡钟（译音，下同，Zhong Cai）博士

此书谨献给蔡钟先生——我以前的学生、同事和朋友。蔡钟先生是本书所阐述的许多基本原理的主要贡献者，特别是在复合材料压实固化、纤维变形行为以及纤维束的渗透性等基础领域做出了突出贡献。书中的许多章节都参考了他的工作。在他短暂的一生中，蔡钟先生完成了大量的工作，谨以此序表达我们对他优异工作和巨大贡献的感激之情。

蔡钟先生于1951年生于中国上海。“文革”使他失去了在高中学习的机会。在工厂工作期间，他自学了高中和大学的课程，通过了千里挑一的高等教育升学考试，就读于华东纺织学院，并于1982年以优异的成绩毕业。那年，他在四百多人的激烈竞争中力拔头筹，获得中国国家奖学金，随后到美国麻省理工学院(MIT)继续深造，在这里他获得机械工程硕士和博士学位。在此期间他协助发展了很多现在正在应用的关于复合材料成型的基本思想和理论。从MIT毕业之后，蔡钟先生在工业界(Lord公司)和学术界(Drexel大学)都担任过许多职位，这使他进一步将研究兴趣扩展到诸如树脂传递模塑技术和织物制备技术领域并做出了杰出贡献，与此同时，他还继续进行纤维束渗透性能方面的研究。在他突然去世之前，他刚刚到佐治亚州亚特兰大造纸科学技术学院任职，然而不幸的是，他的日益蓬勃的事业就此中断。对于我们这些和他一起工作的人而言，那些快乐时光永远不会被忘记，因为他不仅聪明能干，而且为人诚恳友善。现在，我们谨以此序作为对蔡钟先生的怀念，略表寸心。

本书编写人员

Avraham Benatar, Department of Industrial, Welding, and Systems Engineering, The Ohio State University, 190 West 19th Avenue, Columbus, OH 43210-1182

Jonathan S. Colton, Composites Manufacturing Research Program, School of Chemical and Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332-0405

Greg Dillon, Northrop Grumman, Bethpage, NY 11714

Guang -Wu Du, Department of Materials Engineering, Fibrous Materials Research Laboratory, Drexel University, 31 Market St., Philadelphia, PA 19104

Jerome Paul Fanucci, KaZaK Composites, Inc., 423 Bunker Hill St., Burlington, MA 02129

John Gillespie, Jr., Center for Composite Materials and Materials Science Program, University of Delaware, 207 Spencer Laboratory, Newark, DE 19716

Timothy G. Gutowski, Department of Mechanical Engineering, Laboratory for Manufacturing and Productivity, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Building 35-235, Cambridge, MA 02139

David E. Hardt, Department of Mechanical Engineering, Laboratory for Manufacturing and Productivity, Massachusetts Institute of Technology, 77 Massachusetts Ave., Building 35-132, Cambridge, MA 02139

John L. Kardos, Department of Chemical Engineering, Materials Research Laboratory, Washington University, Campus Box 1198, One Brookings Dr., Saint Louis, MO 63130-4899

Keith Kedward, Department of Mechanical Engineering, University of California at Santa Barbara, Santa Barbara, CA 93106

Frank K. Ko, Department of Materials Engineering, Fibrous Materials Research Laboratory, 31 Market St., Drexel University, Philadelphia, PA 19104

L. James Lee, Department of Chemical Engineering, The Ohio State University, 140 West 19th Ave., Columbus, OH 43210-1182

Pat Mallon, Department of Mechanical and Aeronautical Engineering, University of Limerick, Plassey Technological Park, Castletroy, Limerick, Ireland

Stephen McCarthy, Plastics Engineering Department, University of Lowell, 1 University Ave., Lowell, MA 01854

Martin Monaghan, Baxter Laboratories, Chicago, IL 60073

John D. Muzzy, Composites Manufacturing Research Program, School of Chemical and Mechanical Engineering, Georgia Institute of Technology, Atlanta, GA 30332

Stephen Nolet, Fiberspar, Inc., 2380 Cranberry Highway, West Wareham, MA 02576

George S. Springer, Department of Aeronautics and Astronautics, Stanford University, Stanford, CA 94305

Charles L. Tucker III, Department of Mechanical and Industrial Engineering, University of Illinois, 144 Mechanical Engineering Bldg., Rm. 332C, 1206 West Green St., Urbana, IL 61801

序

在我从事先进复合材料制造技术研究的大约 15 年的时间里，我已经很有兴趣的看到基于“描述性技巧”的制造实践正在向基于科学和工程原理的制造技术转变。在“过去”，我们仅有少数人在这一领域工作，当然，George Springer 是这一领域的先驱，现在却有许多新的和老的工业界研究人员进入该领域。在此期间，我们不仅大大增进了对控制复合材料加工的物理和化学现象的认识，而且见证了许多新的令人鼓舞的加工技术的产生。例如，在我早期（1988）编辑的关于加工科学知识的文集中（复合材料制造科学，美国材料工程协会（ASME）会议论文集，MI'88），像自动丝束铺放、整体纺织/树脂传递模塑和热固性、热塑性复合材料变形加工这些新技术几乎没有出现，而现在，我们对这些方面进行了相当详尽的探讨。这些新加工方法为发展新理论及解决新的基础问题指明了方向。可以确信，仍有很多问题需要解决，但和“描述性技巧”时代相比，我们整体的进步是非常显著的。

这本书的目的就是要记录这些认识上的进步并介绍复合材料加工的基本原理。另外，本书还包括先进复合材料的各种制造技术，最后一章特别介绍了复合材料的经济前景，供思考先进复合材料未来发展的人士参考。

在完成本书过程中，我从与许多优秀作者的工作中获得了巨大的快乐，在我看来，正是这些人发展了许多科学和工程理论从而构成了我们现在的新知识。另外，我的许多同事和朋友帮助我审阅书稿并帮我深入了解这些既有挑战性又令人振奋的领域。尤其要感谢以下人员对各章的审阅，他们是：Branko Sarh, Hank Fenbert, Ed Bernardon, Sue Mantell, Sang Beom Shim, Haorong Li 和 Conchur O'Bradaigh。另外，我还要感谢其他许多

人在各个方面所付出的努力和贡献，他们是 Stan Wilcox, Archie Bice, Richard Okine, Duncan Laurie, Herb Lause, Gil Gilliland, Bob Allison, Jordan Olson, Gerry Mabson, Steve Metchan, Larry Ilcewicz, Nam Suh, Dave Hoult, Paul Lagace 和 Tom Freeman.

多年来，我的很多工作是通过我现在和以前的学生们的辛勤工作和智慧获得的，尽管我没有将每个人的名字列出，但我想告诉他们，他们每个人都是这一成就的贡献者。

我还要感谢我的秘书、行政助理和朋友 Karuna Mohindra，为这本书他给我巨大的帮助，经常周末和晚上工作，为完成这项工作任劳任怨。

最后，我以非常愉悦的心情对我的家庭，妻子 Jane，两个女儿 Laura 和 Ellie 的帮助表示感谢，用他们个人的话来说，他们一直支持和激励我完成这个项目。我想告诉他们，他们也做得非常好。

Timothy G. Gutowski
Cambridge, MA

译者前言

本书是美国麻省理工学院著名专家 Timothy G. Gutowski 教授主编的先进复合材料制造技术专著，参加本书各章节编写的作者都为目前美国本领域一流的专家。本书汇集了先进复合材料制造技术的最新研究成果，内容涉及先进复合材料加工科学基础、最新制造技术、加工模型、连接装配、成本分析和自动化生产技术等，并提出了未来复合材料制造的新理念、新技术和潜在应用，反映了先进复合材料制造技术的发展方向，在美国本书被广泛用于研究生教材。对我国从事复合材料的研究人员、工程技术人员和研究生都有重要的参考价值。

本书由先进复合材料国防科技重点实验室李宏运主持翻译，并对全书进行了校核。其中前言和第1章由李宏运翻译，第2章由安学峰翻译，第3章由王克俭翻译，第4章由唐邦铭翻译，第5章由梁子青翻译，第6章由李晔、包建文翻译，第7、13章由王克俭、李小刚翻译，第8章由安学峰、陈永刚翻译，第9、11章由陈永刚翻译，第10章由马宏毅翻译，第12章由张子龙翻译。另感谢陈绍杰对第13章的校核。

书中翻译错误和不妥之处，欢迎读者批评指正。

译者

2004年2月

常用非法定计量单位与法定计量单位的换算关系

非法定单位	法定单位	换算关系
长 度		
in	m	1in=0.0254m
ft	m	1ft=0.3048m
mile	m	1mile=1609.344m
yd	m	1yd=0.9144m
渗 透 率		
darcy	m ²	1darcy=9.87×10 ⁻¹³ m ²
质 量、重 量		
lb	kg	1lb=0.45359237kg
功、能、热		
erg	J	1erg=10 ⁻⁷ J
cal	J	1cal=4.1868J
压 力、压 强、应 力		
psi	Pa	1psi=6894.76Pa
atm	Pa	1atm=101325Pa
功 率		
hp	W	1hp=745.700W
动 力 黏 度		
P	Pa·s	1P=10 ⁻¹ Pa·s
温 度		
°F	°C	x°F=5(x-32)/9°C

目 录

前 言

Timothy G. Gutowski	1
---------------------------	---

第 1 章 复合材料及其制造技术简介

Timothy G. Gutowski	3
1.1 材料的非均质性和各向异性	3
1.2 树脂	6
1.3 纤维	9
1.4 界面的形成	13
1.5 制造技术综述	16

第 2 章 反应性聚合物基复合材料的加工科学

John L. Kardos	32
2.1 引言	32
2.2 关键的科学问题	32
2.3 工艺模拟与优化	46
2.4 两个典型案例	48
2.5 结论	58

第 3 章 热塑性复合材料的加工科学

John D. Muzzy and Jonathan S. Colton	62
3.1 引言	62
3.2 纤维/树脂复合	63
3.3 片层制备	67
3.4 铺层	68
3.5 压实固化	69
3.6 变形成型	82
3.7 装配	83
3.8 结论	83

第 4 章 纤维束的弹性变形

Timothy G. Gutowski and Greg Dillon	87
---	----

4.1	概述	87
4.2	纤维束的弹性变形	90
4.3	实验	95
4.4	纤维束的“状态”	100
4.5	结论	103
	附录 4A 复合材料的压实	105
	附录 4B 微分柔量	118
第 5 章 纺织预成型体工艺		
	Frank K. Ko and Guang-Wu Du	121
5.1	介绍	121
5.2	纺织预成型体分类	122
5.3	纤维构架的重要地位	123
5.4	线性纤维集合体	127
5.5	平面纤维集合体	130
5.6	三维纤维集合体	140
5.7	概括和结论	155
5.8	致谢	157
第 6 章 复合材料热压罐成型工艺		
	Greg Dillon, Pat Mallon and Martin Monaghan	160
6.1	前言	160
6.2	热压罐成型工序	164
6.3	模具	169
6.4	工艺模拟	173
6.5	最新进展	180
	附录 6A 热塑性复合材料的试验热压罐工艺	188
第 7 章 复合材料拉挤成型		
	Jerome Paul Fanucci, Stephen Nolet and Stephen McCarthy	203
7.1	引言	203
7.2	拉挤成型概要	203
7.3	拉挤成型过程监控	206
7.4	热塑性复合材料的拉挤成型	207
7.5	影响拉挤成型的因素	207
7.6	小结	228

第 8 章 先进复合材料的变形成型

Charles L. Tucker III	231
8.1 引言	231
8.2 映射方法	237
8.3 连续介质力学模型	261
8.4 成型缺陷的预测	280
8.5 两种方法的比较以及对未来的展望	285
附录 8A 具有 $\pm 45^\circ$ 纤维的材料的平面变形	290

第 9 章 热固性复合材料的纤维缠绕工艺模型

George S. Springer	293
9.1 背景	293
9.2 问题描述	293
9.3 模型分析	295
9.4 热化学子模型	296
9.5 纤维运动学子模型	297
9.6 应力-应变子模型	298
9.7 孔隙生长子模型	304
9.8 求解方法	305
9.9 工艺条件选择	306

第 10 章 复合材料液态成型

L. James Lee	309
10.1 概述	310
10.2 材料问题和模型	313
10.3 工艺模拟	333
10.4 预制件分析	350
10.5 结果讨论	353

第 11 章 热固性复合材料加工的工艺过程控制

David E. Hardt	360
11.1 引言	360
11.2 控制概论	361
11.3 控制的工艺模型	362
11.4 工艺控制方式	365
11.5 串行和并行工艺过程	370

11.6	实时控制的必需条件	371
11.7	过程控制中的一个例子：热固性树脂的固化控制问题	376
11.8	结论	381

第 12 章 复合材料连接

	Avraham Benatar, John Gillespie, Jr. and Keith Kedward	384
12.1	简介	384
12.2	机械连接	385
12.3	胶接	391
12.4	焊接工艺	395
12.5	焊接方法	397
12.6	焊接设计	401
12.7	装配	402

第 13 章 成本、自动化和设计

	Timothy G. Gutowski	406
13.1	引言	406
13.2	先进复合材料的制造成本问题概要	407
13.3	降低成本的策略	414
13.4	复合材料的设计制造一体化	433
13.5	结论	449

索引	453
----------	-----

前 言

Timothy G. Gutowski
Laboratory for Manufacturing and Productivity
Massachusetts Institute of Technology
Cambridge, Massachusetts

先进复合材料是最终设计者的材料。通过高含量细长纤维的各种排布，我们可以在极大范围内设计材料性能，然而，通过改变纤维和/或基体、混杂各种组分、设计界面来设计选择复合材料的成本越来越高，几乎无法估量，其实，真正阻碍先进复合材料大量应用的原因在于它的制造过程，许许多多好的设计思想无法制造出来，或不能以合理的成本制造出来。制造中所遇到的许多问题来源于先进复合材料的本质特性，即高性能纤维在树脂基体中的复杂和准确的排列。高质量先进复合材料制品的制造要求对材料局部力学和化学环境进行控制，这些环境既可产生也可破坏所需要的微观结构。这方面的知识是进一步开展先进复合材料应用的关键。

本书叙述了先进复合材料制造的基本原理，并试图对先进复合材料制造技术发展所面临的关键问题进行深入探讨，因此，本书包括了严谨的技术材料、工程模型、试验结果和制造过程的一般知识。每章都由各专题的一流专家编写，一些章节的初稿曾在1992年麻省理工学院召开的“聚合物基复合材料的科学与创新”国际会议上作为论文发表，从那时起，所有的论文都经过了更新，一些论文进行了大量的修订，为了保证本书的篇幅和完整，又增加了一些章节。

本书结构大致可分为三个部分，第一部分（第1~5章）是一个概论，讲述一般情况下先进复合材料制造的基本原理。第1章是先进复合材料和制造技术的工程概论；第2章和第3章分别讲述热固性和热塑性复合材料的加工科学，这两章分别涵盖了这两类材料加工过程中的质量和热量传递、流动、黏附和固化；第4章和第5章讲述纤维的特性，第4章展开探讨复合材料加工过程中定向纤维的弹性行为，其附录包含复合材料压实过程理论；第5章综述增强纤维用于织物加工时的基本特性和局限性，如用于针织、纺织和编织等。

第二部分（第6~10章）讲述专项制造技术，并给出了详细论述和工程模型。第6章关于热固性和热塑性复合材料的热压罐成型技术，综述了基本工

艺、工装、固化和压实等问题；第7章详述了拉挤工艺及其关键模型和控制因素；第8章论述先进复合材料的变形加工，包括加工概论、非常详细的变形运动学及变形过程中缺陷形成的讨论；第9章给出了纤维缠绕成型的概论和详细的模型；第10章讲述了液态成型的关键问题（包括树脂传递模塑 RTM 和结构反应注射 SRIM），本章论述了化学和动力学模型、流变学模型以及流动、传热模型和深入的渗透率模型讨论。

第三部分（第11~13章）讲述所有工艺的共有问题和先进复合材料未来发展的关键问题。第11章就现有和潜在先进复合材料制造过程控制技术的一般要求进行了综述和讨论；第12章讲述了先进复合材料制件的连接、粘接和装配的重要问题；第13章讲述了成本问题和降低成本的策略。本章首先就当前制造工艺成本的主要根源进行了综述，对主要的自动制造技术和织物加工技术进行了讨论，并和金属制造技术进行了比较，然后对包括制件整体性和成本估算等在内的重新设计问题进行了讨论，并概括论述了新的先进复合材料成本估算方法。

若仅想对先进复合材料制造技术和成功开发所面临的主要问题快速了解，可仅阅读第1章和第13章；若想进一步了解这些题目的详细的内容，可阅读第2、3、5、6章和第12章；织物复合材料加工主要在第5章讨论，但第7、8、10章和第13章也涉及这些内容；新型自动化技术，如自动丝束铺放设备，主要在第13章讨论，第1章也对此有所评述；先进复合材料的变形成型主要在第8章讨论，但第5、6章和第13章也有介绍；复合材料的压实和固化在许多章中进行了讨论，其中第2、4、6章讨论热固性材料，第3章讨论热塑性材料。第4章的附录（附录4A）对压实理论进行一些详细综述，除第4章以外，第2、3、6、7章也对纤维的变形行为给予了极大关注；除第12章外，复合材料的装配和连接问题也在第1、6章和第13章中进行了讨论。

第 1 章 复合材料及其制造技术简介

Timothy G. Gutowski

Laboratory for Manufacturing and Productivity

Massachusetts Institute of Technology Cambridge, Massachusetts

本章的目的是提供一个复合材料制造技术基本问题的概论，并为以后章节提供指南。本章是为具有该领域初步知识的工程和科技人员准备的，但大部分内容对初学者来讲应当也是容易理解的。对复合材料初学者来说，我们着力推荐找一本很好的固体力学书复习一下^[1-5,11-14]。

1.1 材料的非均质性和各向异性

先进复合材料由高体积分数的高强纤维和中高温树脂体系复合而成，通常平均纤维体积含量在 0.5 至 0.7 之间，航空航天应用的典型目标是 0.62。要求如此高体积分数的原因很简单，一般来讲，纤维是增加刚度和强度的组分，纤维含量越高，结构的刚度和强度越大[●]。为了获得高的纤维体积分数，纤维必须像木柴捆或火柴一样整齐排列在火柴盒中，这本质上导致了结构的各向异性，如图 1.1 所示的材料坐标系。对先进复合材料，绝大多数（张量）物理性

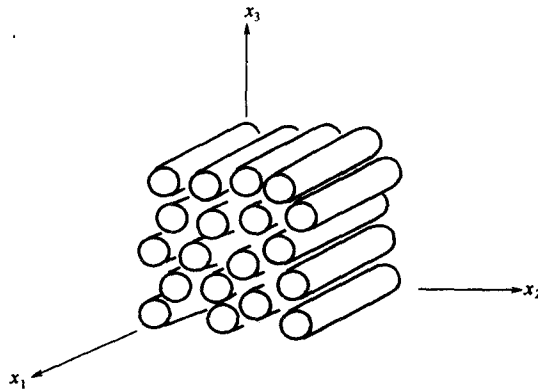


图 1.1 丝束排列单元示意图

● 这一原理对正轴方向的性能是正确的，但对偏轴方向则不正确，读者可从参考文献复合材料固体力学中获得更好的讨论。