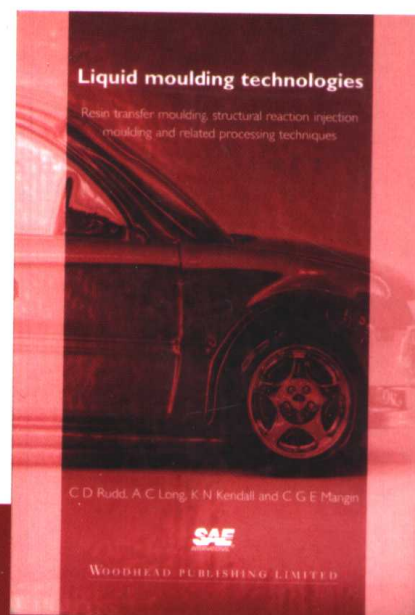


复合材料液体模塑成型技术

——树脂传递模塑、结构反应注射
和相关的成型技术

[英] C. D. 拉德
[英] A. C. 朗
[美] K. N. 肯德尔 著
[美] C. G. E. 迈根
王继辉 李新华 译



Chemical Industry Press



化学工业出版社
材料科学与工程出版中心

(京) 新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

复合材料液体模塑成型技术/ [英] 拉德 (Rudd, C. D.) 等著; 王继辉, 李新华译. —北京: 化学工业出版社, 2004. 3
书名原文: Liquid Moulding Technologies
ISBN 7-5025-5285-5

I. 复… II. ①拉…②王…③李… III. 复合材料-塑料成型-模压 IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2004) 第 020646 号

Liquid Moulding Technologies/by C. D. Rudd, A. C. Long, K. N. Kendall and C. G. E. Mangin

ISBN 1-85573-242-4

Copyright © 1997 Woodhead Publishing Ltd. All rights reserved.

Authorized translation from the English Language edition published by Woodhead Publishing Ltd

本书中文简体字版由 Woodhead 出版公司授权化学工业出版社发行。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 01-2003-2323

复合材料液体模塑成型技术

——树脂传递模塑、结构反应注射和相关的成型技术

[英] C. D. 拉德 [英] A. C. 朗 著
[美] K. N. 肯德尔 [美] C. G. E. 迈根

王继辉 李新华 译

责任编辑: 王苏平

责任校对: 李林

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 720 毫米×1000 毫米 1/16 印张 22½ 字数 406 千字

2004 年 5 月第 1 版 2004 年 5 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-5285-5/TQ·1940

定 价: 50.00 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

作者简介

C. D. Rudd 教授是英国 Nottingham 大学工学院院长，领导一由 40 人组成的实力强大的科研课题组，主要从事聚合物基复合材料的研究，其研究工作主要包括工艺制备、数值模拟以及聚合物基复合材料在汽车和生物医学领域的应用。他不仅是材料工程协会的一名资深会员，同时还兼任多个国家级和国际级委员会的委员，曾在世界各地发表演讲和进行考察。1999 年，他获得了英国皇家学会颁发的享誉极高的工程前瞻奖；2003 年他因复合材料研究的成就获得了材料协会的 Leslie 假日奖。他在 Nottingham 大学获得理学博士学位，兼任机械工程协会和材料、矿产及开采协会（简称 IoMMM）的会员。

Andrew Long 是英国 Nottingham 大学材料力学教授，他领导织物复合材料及成型工艺和数值模拟的研究。自 1990 年以来，他一直致力于研究聚合物基复合材料的成型加工和模拟，于 1994 年以“预成型体制造过程中的织物铺敷”的相关工作获得 Nottingham 大学博士学位。此前，他在 Warwick 大学获得应用数学学士学位，在 Loughborough 大学获得计算机综合工程硕士学位。在液体模塑和织物复合材料领域，他开展了多项科研工作，获得了一系列工业资助，目前的项目包括多层预成型体的成型和流动模拟、热固性和热塑性预浸料的工艺优化以及织物复合材料的单胞模拟。Long 教授兼任机械工程协会和材料、矿产及开采协会（简称 IoMMM）的会员。他曾多次获得荣誉奖励，如两次荣获 IoMMM 复合材料奖；有关材料成型的研究获得 ESAFORM 科学奖。他发表和出版了大约 130 篇论文和著作；目前，一部将于 2004 年由 Woodhead 出版公司出版的新专著《织物复合材料的设计和制造》正在编撰。

Ken Kendall 博士于 1978 年作为一名机械制图员在 Vickers 船舶制造及工程有限公司（VSEL）开始自己的职业生涯。1983 年获得 Liverpool 工艺学校的机械工程学士学位后，返回 VSEL 任职机械设计工程师。1985 年加入 GKN 技术公司，参加了该公司的复合材料板簧项目。1988 年，他在 Nottingham 大学开始了复合材料制造的研究，并于 1991 年获得博士学位。后来他就职于福特汽车公司，在美国密西根州 Dearborn 的科学研究实验室工作，领导复合材料制造的研究工作。1999 年推出 Aston Martin Vanquish 时，他仅仅次于 Aston Martin 领导复合材料制造方面的工作。2001 年他终身投身 Aston Martin，就任现代技术公司经理一职，积极推广复合材料在 Aston Martin 产品中的应用。Kendall 博士拥有 5 项专利，发表了 30 多篇论文，是机械工程协会会员。

Christophe Mangin 博士于 1993 年获得麻省理工学院的材料科学与工程及工程经济的博士学位。在研究中，Mangin 博士通过确定工艺过程中的关键成本因子和不确定风险因素，为研究新材料的经济适用性开发了工具，即技术成本模型及多属性效应分析。他曾在日本的 Kawasaki 钢材公司从事先进结构陶瓷应用的工作。1994 年，他加入福特汽车公司，为福特科学研究实验室工作，领导材料科学部门的技术建模小组。通过对聚合物基复合材料、铝和钢在汽车车身构造中应用的比较，他进行了大量的成本模型分析。在取得商业建模研究的成效后，他将研究结果应用于汽车产品策略部门，目前他为福特汽车公司工作，就任公司商业策略部门经理一职。

译者的话

聚合物基复合材料是一类极为重要的新材料。然而，由于成本过高等原因，其应用受到了很大的限制。因此，如何发展新的制造技术、降低高品质复合材料的制造成本，是一个亟待解决的高技术问题。复合材料液体模塑成型技术 (Liquid Composite Moulding, 简称 LCM) 是指将液态聚合物注入铺有纤维预成型体的闭合模腔中，或加热熔化预先放入模腔内的树脂膜，液态聚合物在流动充模的同时完成树脂/纤维的浸润并经固化成型为制品的一类制备技术。RTM (Resin Transfer Moulding)、VIMP (Vacuum Infusion Moulding Process)、RFI (Resin Film Infusion) 和 SRIM (Structural Reaction Injection Molding) 是最常见的先进 LCM 工艺技术。LCM 工艺技术可一步浸渗成型带有夹芯、加筋、预埋件的大型构件，具有固有的高性能低成本制造优势，是先进复合材料低成本制备技术的主要发展方向。据报道，欧美等先进工业国家在该领域开展了大量的研究工作，其研究开发耗资巨大。我国“863”计划“九五”期间在 RTM 成型技术取得重要研究进展的基础上，部署了应用 LCM 技术制备车用大型结构件以降低高品质复合材料制造成本的研究计划。目前，我们研究课题组在 LCM 的制备技术、材料研制和工艺过程的数值模拟仿真等方面取得了重要进展，部分技术已成功应用于指导 STEYR 重型卡车构件的生产。

在项目进行期间，北京玻璃钢研究设计院李新华院长将参加国际学术会议期间得到的 C. D. Rudd 等的专著“Liquid Moulding Technologies”供课题组参考，课题组成员阅读后感觉此书对从事复合材料液体模塑技术的从业人员很有帮助和启发，遂决定由武汉理工大学材料科学与工程学院王继辉教授与 C. D. Rudd 教授和 Woodhead Publishing Limited 出版社联系，将该书全文翻译出来由化学工业出版社出版，供大家参考。

本书由王继辉、李新华翻译，倪爱清校对，在本书的翻译过程中，得到了 863 项目“车用树脂基复合材料大型结构件制造关键技术”(2001AA335020) 课题组的支持和帮助，在此对祝颖丹、高国强等同事表示衷心的感谢。

限于译者水平，错漏之处难免，望各界读者指正。

基础项目：国家 863 项目 (2001AA35020)，国家自然科学基金项目 (19872051)。

作者的中文版序言

1997年，我们复合材料研究组在获得树脂传递模塑工艺及衍生工艺大量的数据和完成一系列成型工艺模拟的基础上，出版了《复合材料液体模塑成型技术》的第一版。对于承担技术风险的我们来说，面临的一个最主要问题是：科学技术的巨大进步是否能够成为新的产业增长点？同时，投身其中的科研人员试图了解这类工艺技术的下一步挑战是什么？不管是在这一研究计划之内还是计划之外，从那以来发生了许多变化，其中有些甚至影响到我们的个人生活和职业生涯。然而令人高兴的是，一些采用RTM工艺制备大型汽车构件的项目和低成本浸渍工艺制备航空构件的项目取得了成功；同时结合纳米增强材料，集中建模和智能化控制成型工艺也是我们研究工作的拓展。很明显，目前轻质高强、环境友好和低成本成型工艺备受青睐，使其在变化迅速、受传统基础工业束缚影响较小的新兴产业中，相得益彰。

我很高兴王继辉教授等人能够投入巨大的精力将本书介绍给中国朋友，并希望读者能从中获益。

Chris Rudd
Dean of Engineering
University of Nottingham
University Park
Nottingham NG7 2RD
UK

Author's Preface for Chinese Edition

The first edition of "Liquid Moulding Technologies" was published in 1997 when the research community that associates with the processing of composite materials appeared to have accrued a huge body of data and a proliferation of models to support processing by resin transfer moulding and its variants. The major question facing those of us who held stakes in this technology was whether the major advances in science and technology would translate to new business for the supply base? Research intensive groups may have also wondered where the next exciting challenge lay, with respect to the processing of such materials. Much has happened, outside, as well as inside our technological bubble since those days and some of these events have touched our personal and professional lives. Nevertheless, several new vehicle programmes with RTM-intensive bodies structures and lower-cost infusion aero-structures have now been successful. Equally exciting new challenges such as the incorporation of nano-scale reinforcements, so-called intelligent processing, with integrated modeling and control means that our research horizons are equally extended. What is clear is that the climate for fresh applications of lightweight materials and, environmentally responsible, cost effective processing has never been more favourable. This resonates especially, within emerging economies where the pace of change is rapid and less constrained by the inertia of existing infrastructure. I am delighted to endorse the tremendous efforts of Professor Wang in bringing this work to a Chinese audience and hope that these new readers will find value within its covers.

Chris Rudd
Dean of Engineering
University of Nottingham
University Park
Nottingham NG7 2RD
UK

致 谢

本书的大部分工作围绕 Nottingham 大学开展的一科研项目展开。该项目由福特汽车公司发起和资助，以及一系列的材料供应商提供大量的支持。作者感谢福特员工为开发和推动这一工作所做的巨大贡献，尤其感谢 Alan Harrison 和已故的 Mervyn Rowbotham。本书内容得益于大学研究者、欧洲和北美的福特工程师、模具制造商、材料供应商和模具设计师的通力合作。书中主要的工作由发表的科研论文，系列讲座、Nottingham 大学的教学和短期课程所采用的讲义构成。书中有些材料经复制而来，其中应特别提及的是同事 Mike Owen 和 Vic Middleton。部分研究者和支持者的名单如下：

Keith Hutcheon
Dick Harrison
Brian Foste
Roger Smith
Andrew Kingham
Geoff Tomlinson
Fiona Scott
Steve Pickering
Ian Revill
John Hill
Eddie Rice
Julian Lowe
Pat Blanchard
Mike Johnson
Kevin Lindsey
Barbara Sandford
Sally Braud
John Chick

Linda Bulmer
Pete McGeehin
Matthew Turner
Dan Morris
Simon Gardner
Ali Al-Hamdan
Chris Duffy
Mark Blagdan
Paul smith
Fabio Cucinella
Gibert Lebrun
Andrew Clough
Joel Clark
David Hayden
Carl Johnson
Richard Jeryan
Stephen Scarborough
Pete Beardmore

前 言

在过去十多年来，复合材料液体模塑成型技术已引起许多工业部门、原材料厂和学者的广泛关注。汽车工业对这一技术最感兴趣，其原因是采用这一技术可进一步减轻车辆的重量、降低制造成本和改善车辆的性能。如果说，经济利益刺激了工业领域内的广泛兴趣；那么，学术界对该技术兴趣浓厚的原因就不尽为人知，其原因应包括液体模塑制品的市场前景良好、研究与生产密切相关以及世界范围内对低成本制造技术需求迫切。然而，上述所及仅为部分原因。实际上，液体模塑成型工艺中的物理和化学过程涉及到许多耦合和瞬态现象，包括大量的科学问题，这才是其引起学术界广泛关注的真正原因。

闭合模腔中纤维的基本浸润过程，以及工业应用中涉及的诸多参数，为科学研究提供了大量的课题。目前，这一领域内的大部分研究工作集中于建立数学模型来描述浸渍过程的流体流动。作为高层次的研究，这些研究成果目前主要表现为一些计算模拟工具；工业界与学术界的有效合作，验证和完善这类模拟技术，具有相当好的市场前景。一般而言，这些课题的研究工作是连续的，随着流动模拟技术的应用，对输入数据，如预成型体渗透率的测试，业已完成大部分的工作。不同的预成型体渗透率测试技术、测试流体和标定材料的优缺点，近年来也引起了学术界的广泛关注。近来对测试数据的相关性及滞缓速率的工业相关性的争论，说明测试条件的重要性。预成型体和泡沫芯材的设计和制造、脱模以及技术成果的工程转化，相对而言不那么具有吸引力，但对工业应用具有同等的重要性，然而迄今为止对这些课题的研究尚显不足。

无疑，学术界对理解和模拟成型过程做出了突出贡献，但将实验室里得到的结果应用于实际生产常出现一些问题。在汽车工业中，由于实际的大规模生产，其工业生产率难以在实验室中重现。尽管在高层次的研究领域，如流动模拟中，已取得相当大的进步，但对这些新技术如何真正推动新的工业应用还值得研究。今后，通过将这一技术从大学、科研机构 and 软件商转移到生产企业，将很好的证实这一研究成果的有效性。

相对而言，科研人员在实验室条件下，通过数学模型来专门研究闭模过程中发生的物理和化学现象，然后再继续探索下一个新的问题，比较容易。然而本文作者由于与汽车工业界联系密切，可广泛接触到复合材料应用中的大量技术、经济和文化问题，所以获益颇丰。

本书不打算作为教科书，书中大部分内容以实用为主，没有对每一现象进

行详尽的数学描述，而这一点在其他著作中已阐述得很清楚。著者试图就工艺的各个方⾯，将重要的技术因素和经济因素综合考虑，希望能够对这类工艺技术的从业人员，如模塑成型行业的从业人员和研发领域中的学者均能有所帮助。对于初次接触复合材料成型工艺的人员，第一章给出了液体模塑工艺概述和应用领域。第二章描述了与液体模塑成型工艺相关的各种工艺特征；第三、四章描述了所采用材料，包括树脂体系、增强材料和芯材。除了一般性地描述了各种材料，还描述了这类商品的工艺和物理性能，但这不意味推荐使用任何这类商品。第五章介绍了工业应用中的树脂处理和成型工艺设备。第六章阐述了纤维预成型体的设计技术和制造技术。第七章涵盖了多种预成型体和树脂性能的测试技术，以帮助选择材料和进行工艺模拟。第八章介绍了液体模塑成型理论，综述了应用日趋广泛的成型过程模拟技术。第九章阐述了最为常见的液体模塑形式——非等温 RTM——并对工艺中的流动和固化现象进行了详尽描述。第十章是非等温和等温成型应用中工艺监控和控制技术综述。第十一章集中考虑了前述内容，为模具设计和模具材料的选择提供了系列原则。第十二章阐述了与液体模塑成型工厂运行相关的一些实际问题，如经济问题和环境问题。第十三章采用成本模型方法，对液体模塑成型工艺进行了详细的经济分析。最后，须指出，本文中所涉及的液体模塑技术和复合材料液体模塑成型技术，所指范围包括 RTM 及其衍生工艺，而单独的名称则指某一特定工艺。

目 录

第 1 章 复合材料液体模塑成型技术绪论	1
1.1 工程背景	1
1.2 复合材料的制备技术	1
1.2.1 手糊或湿法铺覆工艺	2
1.2.2 真空袋压、真空成型和热压罐成型	2
1.2.3 模压成型	3
1.2.4 热压、冷压模塑成型	4
1.2.5 注射模塑成型	5
1.2.6 缠绕成型	5
1.2.7 拉挤成型	6
1.2.8 复合材料液体模塑成型 (LCM)	6
1.3 成型技术	8
1.4 历史回顾	8
1.5 汽车制造业的选择原则	9
1.6 LCM 在汽车工业中的应用	10
1.6.1 小批量生产应用	10
1.6.2 中等批量生产应用	12
1.6.3 大批量生产应用	13
1.6.4 液体模塑成型工艺的应用发展	13
1.6.5 成本	15
1.7 汽车实例研究	15
1.7.1 美国 Ford Escort 前端结构 (1986)	15
1.7.2 美国福特四轮驱动 Aerostar 横梁(1987)	17
1.7.3 福特 P100 皮卡后挡板	18
1.7.4 福特 Escort/Sierra Cosworth 挡泥板	19
1.7.5 福特全顺车高顶(1994)	20
1.7.6 福特 #3 横梁(1994)	21
1.8 液体模塑成型技术在航空工业的应用	23
1.8.1 飞机雷达罩	24
1.8.2 飞机螺旋桨叶片	25
1.8.3 RTM 机身构件	27

1.8.4 其他航空应用	27
1.9 运输工业应用	28
1.9.1 铁路运输业应用	29
参考文献	30
第2章 成型基本原理	32
2.1 引言	32
2.2 空气的排除	32
2.3 模具周边的连续排气	33
2.4 不连续排气	35
2.5 注射-压缩	35
2.6 模具密封	36
2.7 蒸发排气	37
2.8 真空辅助成型	37
2.9 振动辅助成型	39
2.10 真空浸渍方法	39
2.11 柔性模塑成型	40
2.12 半刚性模塑成型	41
2.13 树脂膜渗透(RFI)成型	42
2.14 实用性	43
2.15 孔隙形成机理	44
2.16 脱气	48
2.17 纤维的浸润	48
2.18 夹层结构	49
2.18.1 浸渍问题	49
2.18.2 芯材的运动	49
参考文献	52
第3章 树脂体系	55
3.1 简介	55
3.2 不饱和聚酯树脂	56
3.3 引发剂体系	58
3.3.1 固化剂	58
3.3.2 室温固化配方	58
3.3.3 高温固化	60
3.3.4 复合引发剂	61
3.3.5 阻聚剂	62
3.3.6 选择树脂体系配方的其他影响因素	63

3.3.7	模具温度的影响	64
3.3.8	引发的实用性	65
3.3.9	后固化处理的影响	66
3.4	填料和添加剂	67
3.4.1	矿物填料	67
3.4.2	低收缩添加剂	69
3.5	环氧树脂	70
3.6	双马来酰亚胺树脂	74
3.7	乙烯基酯树脂	75
3.8	聚氨酯和混杂复合材料	75
3.8.1	聚氨酯	75
3.8.2	聚氨酯混杂树脂	78
3.9	芯材	79
	参考文献	81
第4章	增强材料	83
4.1	引言	83
4.2	纤维	83
4.2.1	玻璃纤维	84
4.2.2	碳纤维	86
4.2.3	芳纶纤维	86
4.3	纤维表面处理	87
4.3.1	玻璃纤维	87
4.3.2	碳纤维	89
4.4	增强材料制品	90
4.4.1	短切纤维毡(CSM)	90
4.4.2	连续纤维随机毡(CFRM)	91
4.4.3	纤维织物	92
4.4.4	无波纹织物	94
4.4.5	流动增强型织物	94
4.4.6	组合织物	96
4.4.7	表面毡	96
4.5	胶黏剂	97
	参考文献	99
第5章	成型设备	101
5.1	简介	101
5.2	树脂注射设备	101

5.2.1	RTM 压力罐注射系统	101
5.2.2	RTM 往复式空气泵	103
5.2.3	齿轮泵	108
5.2.4	RTM 树脂液压输送系统	108
5.2.5	SRIM 液压输送系统	109
5.3	注射和混合设备	110
5.3.1	喷嘴	111
5.3.2	注射阀	111
5.3.3	静态混合器	111
5.3.4	冲击式混合头	114
5.3.5	混合质量的评估	115
5.4	模具操作和夹紧装置	116
5.4.1	吊车及外围夹具	117
5.4.2	模具操作装置	117
5.4.3	空气袋压机	118
5.4.4	翻转式压机	119
5.4.5	往复压机	119
5.4.6	多模套模具	119
5.4.7	SRIM 的模具操作	121
	参考文献	121
第 6 章	预成型体的设计和制备	122
6.1	引言	122
6.2	设计考虑因素	122
6.2.1	力学性能	122
6.2.2	工艺要求	125
6.3	制造技术	126
6.3.1	短切纤维喷射成型	127
6.3.2	泥浆法	129
6.3.3	对模成型	129
6.3.4	编织	131
6.3.5	三维机织	134
6.3.6	针织	136
6.3.7	连续纤维铺放	137
6.3.8	刺绣工艺	139
6.4	铺敷和变形	139
6.4.1	织物的变形机理	140

6.4.2	运动学铺敷模拟	141
6.4.3	铺敷模型应用实例	147
6.4.4	铺敷模型的有效性	149
6.4.5	变形对工艺和性能的影响	154
6.4.6	其他变形模拟方法	159
6.5	术语	160
	参考文献	161
第7章	材料表征	165
7.1	引言	165
7.2	增强材料渗透率测量	165
7.2.1	简介	165
7.2.2	单向流动测试	168
7.2.3	恒压式径向流动测量	170
7.2.4	恒流速径向流动测量	171
7.2.5	测试方法的比较	175
7.2.6	小结	179
7.3	增强材料的可成型性	180
7.3.1	纯剪切测试	180
7.3.2	单轴拉伸测试	183
7.3.3	半球体成型	185
7.3.4	压缩测试	186
7.3.5	弯曲测试	190
7.4	树脂的性能	191
7.4.1	流变学	192
7.4.2	热力学浸渍	193
7.4.3	固化动力学和热容	195
7.4.4	热传导测试	198
	参考文献	200
	附录——根据恒流速浸渍试验确定面内主渗透率	203
第8章	成型过程模拟	205
8.1	引言	205
8.2	流动模拟基本原理	206
8.3	一维流动	207
8.3.1	单向流动	207
8.3.2	径向流动	208
8.3.3	一维等温流动模拟实例	209

8.4	二维和三维流动	213
8.4.1	等温充模一般方程	213
8.4.2	渗透率张量的确定	215
8.4.3	确定压力场的数值方法	216
8.4.4	确定流动前锋扩展的方法	217
8.4.5	等温流动模拟实例	220
8.4.6	非等温流动模拟	226
8.5	讨论	233
8.6	术语	234
	参考文献	235
第9章	非等温 RTM 工艺	238
9.1	引言	238
9.2	热循环	238
9.2.1	基本形式和加工窗口	238
9.2.2	厚度方向上的温度场	242
9.3	压力循环	244
9.4	等温浸渍过程中的压力	244
9.5	非等温浸渍过程中的压力	245
9.6	浸渍后的压力周期	246
9.6.1	浸渍后压力的控制	248
9.6.2	浸渍后的压力和构件厚度	248
9.6.3	放热前压力	249
9.6.4	树脂注射温度的影响	250
9.7	缩短非等温 RTM 周期	250
9.8	缩短浸渍时间	251
9.8.1	树脂的预热方法	251
9.9	凝胶和固化时间的缩短——分阶段引发 RTM	255
9.10	总结	256
	参考文献	257
第10章	成型过程监测与控制	259
10.1	简介	259
10.2	热监控技术	259
10.3	浸渍过程中的热监控	262
10.4	凝胶和固化过程中的热监控	263
10.5	压力监控技术	264
10.6	浸渍过程的压力监控	265

10.7	凝胶和固化过程的压力监控	267
10.8	介电监控	268
10.9	其他方法	271
10.9.1	电化学监控	271
10.9.2	热敏电阻	272
10.9.3	损耗波传感	273
10.9.4	声发射技术	274
10.10	模内工艺控制(IPC)的数据采集	274
10.11	模内工艺控制(IPC)方法	276
10.11.1	充模和固化的监测	276
10.11.2	工艺过程中的质量控制	277
10.11.3	成型过程监控	277
	参考文献	278
第 11 章	模具设计	280
11.1	简介	280
11.2	影响模具结构的因素	280
11.3	模具的选择	281
11.4	模具材料	282
11.4.1	柔性模具	282
11.4.2	聚合物基复合材料模具	283
11.4.3	锌合金模具	285
11.4.4	金属喷涂模具	285
11.4.5	陶瓷模具	286
11.4.6	整体石墨模具	287
11.4.7	镍壳模具	288
11.4.8	整体金属模具	290
11.4.9	装配式金属模具	292
11.5	模具设计过程	292
11.5.1	热设计	292
11.5.2	流道设计	297
11.5.3	模具维护	302
11.6	壳模	306
11.6.1	壳模设计	307
11.6.2	镍壳制造设计的考虑因素	307
11.6.3	支撑框架	308
	参考文献	309