



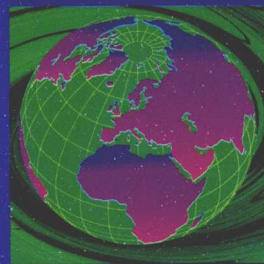
国际机械工程先进技术译丛

微孔塑料 注射成型技术

Microcellular
Injection Molding

[美] Jingyi Xu 编著

张玉霞 王向东 译



 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



013042343

TQ320.66
183

国际机械工程先进技术译丛

微孔塑料注射成型技术

Microcellular Injection Molding

[美] Jingyi Xu 编著
张玉霞 王向东 译



机械工业出版社



北航

C1651247

TQ320.66
183

848840810

本书系统地介绍了微孔塑料注射成型技术及其应用，其主要内容包括微孔注射成型基础理论、微孔材料的形态结构、微孔注射成型用材料、微孔注射成型设计、微孔注射成型工艺、微孔注射成型装置、特殊工艺、微孔注射成型的模拟、微孔注射成型注塑件的后加工与性能测试、微孔注射成型制品的市场与应用、微孔注射成型的成本节省。通过阅读本书，读者可以了解到利用微孔注射成型技术改善产品设计、提高加工效率、降低产品成本的有关知识。

本书可供从事微孔塑料注射成型设计、研究和专业培训的人员使用，也可以作为相关专业在校师生的参考书。

Copyright © 2010 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. This translation published under license. Authorized translation from the English language edition, entitled Microcellular Injection Molding, ISBN 978-0-470-46612-4, by Jingyi Xu., Published by John Wiley & Sons. No part of this book may be reproduced in any form without the written permission of the original copyrights holder.

版权所有，侵权必究。

版权登记号：图字 01-2011-0349

图书在版编目 (CIP) 数据

微孔塑料注射成型技术 / (美) 徐 (Xu, J.) 编著; 张玉霞, 王向东译. —北京: 机械工业出版社, 2013. 2

(国际机械工程先进技术译丛)

ISBN 978-7-111-41112-3

I. ①微… II. ①徐…②张…③王… III. ①注塑-塑料成型
IV. ①TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 008175 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 陈保华 责任编辑: 陈保华 吕芳

版式设计: 霍永明 责任校对: 申春香

封面设计: 鞠杨 责任印制: 张楠

北京振兴源印务有限公司印刷

2013 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm × 239mm · 27.5 印张 · 614 千字

0001 - 3000 册

标准书号: ISBN 978-7-111-41112-3

定价: 99.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

电话服务

网络服务

社服务中心: (010) 88361066 教材网: <http://www.cmpedu.com>

销售一部: (010) 68326294 机工官网: <http://www.cmpbook.com>

销售二部: (010) 88379649 机工官博: <http://weibo.com/cmp1952>

读者购书热线: (010) 88379203 封面无防伪标均为盗版

译 从 序

一、机械工程高速发展

机械工程是以自然科学和技术科学为理论基础,结合在生产实践中积累的技术经验,研究和解决机械产品开发、设计、制造、安装、运用、修理及再制造等方面的全部理论和实际应用的学科。机械工程的学科内容包括:机械工程基础理论研究,机械产品开发、设计,机械产品的制造、装备、检验,机械产品的应用与维护,机械制造企业的经营和管理,机械产品的绿色生命周期等问题及技术措施。机械工程先进技术涉及设计、制造、应用、管理等相关环节的机械、电子、信息、材料、能源和管理科学等领域的先进技术。

20世纪后期,特别是进入21世纪,计算机、信息技术在机械工程领域的广泛、深入应用,使机械工程技术高速发展。机械工程技术由线性到非线性、由静态到动态、由二维到三维的研究发展,为现代机械设计方法的研究、应用奠定了工程理论基础;虚拟技术、创新设计、绿色设计、并行工程等,为现代机械设计提供了技术基础;机床数控技术、工业机器人、柔性制造技术、传感技术、集成制造技术、自动检测及信号识别技术等,为机械制造工艺自动化提供了支撑技术;ERP(企业资源计划)、MES(制造管理信息系统)、CIMS(计算机集成制造系统)等,为机械制造企业的经营和管理提供了现代化的支撑平台;PLM(产品全生命周期管理)、IWM(废物管理一体化)、EMS(环境管理体系)等理念、技术的发展,已成为机械工程先进技术的重要组成部分。

机械工程先进技术是实现工业技术现代化重要的技术支撑之一。但是,机械工程先进技术的发展要受到自然条件、经济条件、社会条件、技术基础等的限制,我国作为发展中国家,在机械工程先进技术方面同工业发达国家还有很大差距。为了加快我国机械工程先进技术的发展进程,通过各种方式引进外国机械工程先进技术,是一条切实可行的发展之路。

二、图书交流传播知识

图书资料是一种传统、永恒、有效的学术、技术交流方式。早在20世纪初期,我国清代学者严复就翻译了英国学者赫胥黎所著的《天演论》,其后学者周建人翻译了英国学者达尔文所著的《物种起源》,对我国自然科学的发展起到了很大的推动作用。

图书是一种信息载体,图书是一个海洋,虽然现在已有网络通信、计算机等信

息传输和储存手段，但图书仍将以严谨性、系统性、广泛性、适应性、持久性和经济性而长期存在。纸质图书有更好的阅读优势，可满足不同层次读者的阅读习惯，同时它具有长期的参考价值和收藏价值。

近年来，国际间的交流与合作对机械工程技术领域的发展、技术进步及重大关键技术的突破起到了积极的促进作用，对机械工程技术领域科技人员及时了解国外相关技术领域的最新发展状况、取得的最新成果及应用情况等，发挥了积极作用。

机械工业出版社希望通过引进、翻译国外机械工程技术领域的先进技术图书，传播国外机械工程领域的先进技术，推动国内学者和技术人员对国外机械工程先进技术的引进、消化、吸收和创新。从而提升我国机械工程技术的自主创新能力，提高我国装备制造业的技术水平，加速实现我国工业的现代化。

三、精挑细选精雕细刻

为真正实现翻译国外机械工程技术领域先进技术图书、推动我国机械工程技术发展的战略目标，机械工业出版社将认真执行：

(1) 精挑细选 坚持从机械工程技术比较发达的国家、国外优秀出版社引进优秀技术图书，组成一套“国际机械工程先进技术译丛”。本套译丛将涵盖机械工程的基础理论研究，产品开发、设计、制造、运用、维修、再制造和资源、环保、信息、管理等相关学科。

(2) 精雕细刻 本套丛书的选书、翻译工作均由国内相关专业的专家、教授、工程技术人员把关，以充分保证图书内容的先进性、适用性和翻译质量。内容翻译力争达到信、达、雅，真正实现传播国际机械工程先进技术，服务于国内机械工程技术的发展。

(3) 精益求精 本套丛书作为我社的精品重点书，将统一封面装帧设计，在版式编排、内容编校、图书印制等方面追求高质量，把“精品”体现到书的整体中去，力求为读者奉献一套高品质的“国际机械工程先进技术译丛”。

四、衷心感谢不吝指教

首先要感谢广大积极热心支持出版“国际机械工程先进技术译丛”的专家学者，积极推荐国外相关优秀图书，仔细评审外文原版书，推荐翻译的知名专家；特别要感谢承担翻译工作的译者所付出的辛勤劳动；同时要感谢从事图书版权贸易的工作人员辛勤工作。

本套丛书希望能对广大读者的工作提供切实的帮助，欢迎广大读者不吝指教，提出宝贵意见和建议。

机械工业出版社“国际机械工程先进技术译丛”编委会

序

本书详尽、深入地阐述了微孔注射成型技术，能为本书作序，我深感荣幸。注射成型技术是大批量生产复杂塑料件最为通用、最为重要的聚合物加工方法之一。除了热塑性塑料和热固性塑料外，还扩展了注射成型技术的应用领域，使其能够用于注射成型纤维、陶瓷和金属粉末等材料。按质量计算的话，在各种聚合物加工技术中注射成型的聚合物材料占总量的 1/3。传统注射成型技术的改进技术以及不断涌现的创新技术推动了这种通用、大批量生产工艺不断发展，进一步扩大了其适用范围，提高了生产力、加工灵活性、生产率和利润率。此外，这些特殊的新型注射成型工艺还提高了产品设计的灵活性，增加了新的应用领域，赋予了产品独特的几何形状，提高了注塑件的强度，改善了材料性能和注塑件的质量，经济优势持久。这些优点都是传统注射成型工艺无法实现的。在这些独特的新型注射成型技术中，微孔注射成型技术前景广阔，其不但提高了工艺的经济性，还增强了注塑件的性能和功能。

微孔注射成型技术源于 20 世纪 80 年代初 Suh 博士及其同事在麻省理工学院的研究工作。本书作者 Jingyi Xu 从一开始就持续地参与了这一新工艺的研究，是世界著名的微孔注射成型专家。微孔注射成型工艺不仅具有节省材料、降低能耗、缩短成型周期这些既明显又诱人的优点，还大大提高了注塑件的尺寸稳定性，促进了注塑件的固化和创新。微孔注射成型可以加工非结晶性塑料、半结晶性塑料、热固性树脂、热塑性弹性体和生物塑料等通用塑料和工程塑料。

尽管已有许多关于微孔成型技术新的研究成果和应用的出版物和专利，但工艺基础和实际应用之间仍然存在着很大的空白。本书以易于理解和应用的方式进行了全面阐述，填补了这一空白，涉及的问题广泛，包括研发历程、基本原理、适用材料、设计原则、工艺比较、设备设计、模拟、材料性能和商业化应用等。我非常钦佩 Jingyi Xu 先生为完成本书所付出的艰辛努力，他对工艺知识和指导原则的阐释和传授在今后多年都将适用。

毫无疑问，本书将有助于各种背景的读者和不同水平的专业人士更好地理解、利用这一创新性、有发展前景的技术，并从中受益。

威斯康星大学麦迪逊分校聚合物工程中心

Lih Sheng (Tom) Turng

前 言

微孔聚合物可以代替未发泡聚合物，节省材料 5% 以上，而且并不牺牲材料性能。不仅如此，微孔注射成型技术制备的微孔泡沫还具有许多优点，如尺寸稳定、成型周期短、凹痕和翘曲轻、注塑件无残留应力等。因此，微孔注射成型技术为节省材料、保护环境提供了一种革命性的方法。此外，微孔注射成型技术是所有微孔工艺中发展最快的技术。然而，已出版的发泡方面的大多数论文和书籍都没有涉及这一技术的实际应用。本书旨在填补这些空白，为每位从事设计、研究和专业培训的人员提供一本综合阐述微孔加工技术设计和生产的参考书。

本书参考了现有的相关文献和世界各地广泛的研究和开发工作的实际结果，目的就是进行充分而详细的讨论，为正在或即将把微孔加工领域作为事业的学生提供详细的论述。

最应该感谢的是努力开发微孔注射成型技术的每个人。感谢 Lih Sheng Turng 教授审阅本书的一部分并为本书作序。还要特别感谢 Chul B. Park 教授提供宝贵的资料，感谢 Levi Kishbaugh 提供了 Trexel 公司有价值的资料，感谢 Peter Kennedy、Sejin Han 和 Xi-aoshi Jin 提供了模拟资料，我的同事 Ben Keur 阅读了书稿并提出了宝贵意见。同时感谢所有其他提供专业知识的人。

衷心感谢 John Wiley & Sons 公司的 Jonathan T. Rose 编辑，特别是他提出编辑本书的想法以及在本书出版遇到困难时所付出的艰辛努力。

最后，我要感谢我的女儿 Jiayun Xu 作为第一位普通读者对本书的可读性提出了许多中肯的建议。我妻子 Jufen Guan 也给予了我一如既往的无私支持。

Jingyi Xu

宾夕法尼亚州约克市恩格尔机械公司

目 录

译丛序

序

前言

第1章 简介	1
1.1 微孔塑料的发展历史	1
1.2 微孔塑料的优点和应用	3
1.3 与微孔注射成型技术有关的专利和出版物	6
1.4 本书提纲	7
参考文献	7
第2章 微孔注射成型基础理论	9
2.1 微孔注射成型的基本步骤	9
2.2 超临界流体 (SCF)	10
2.3 气体在聚合物熔体中的溶解度和扩散能力	12
2.3.1 气体在聚合物熔体中的溶解度	12
2.3.2 气体在聚合物熔体中的扩散速率	28
2.3.3 气体-聚合物混合物的物理性能	30
2.4 泡孔成核	31
2.4.1 成核理论	31
2.4.2 实验得到的成核结果	35
2.5 泡孔长大	41
2.5.1 泡孔长大模型	41
2.5.2 泡孔尺寸分布	44
2.5.3 压力对泡孔尺寸的影响	44
2.5.4 拉伸黏度对泡孔长大的影响	45
2.6 在模具内成型	45
参考文献	45
第3章 微孔材料的形态结构	48
3.1 批处理和注射成型所得试样形态结构的差异	49

3.2 不同材料微孔注塑件的形态结构	51
3.2.1 非结晶性材料	51
3.2.2 结晶性材料	52
3.2.3 共混物和配混材料	54
3.2.4 增强材料和填充材料	55
3.2.5 生物聚合物	58
3.3 泡孔结构表征	59
3.3.1 微孔注射成型注塑件横截面的表层-芯层结构	59
3.3.2 芯层处的泡孔结构	60
3.3.3 界面处的泡孔结构	63
3.3.4 表层处的泡孔结构	63
3.4 泡孔结构对微孔质量的影响	64
3.4.1 泡孔尺寸和密度	64
3.4.2 表层厚度	69
3.4.3 纤维取向	70
3.5 其他特殊泡孔结构	71
3.5.1 超微孔形态结构	71
3.5.2 双峰泡孔结构	71
3.5.3 开孔结构	72
3.5.4 不同气体制备的泡孔结构	73
3.6 结论	73
参考文献	74
第4章 微孔注射成型用材料	76
4.1 聚合物的结构和特征	77
4.1.1 聚合物的种类	77
4.1.2 聚合物的结构	77
4.2 结晶性材料	79
4.2.1 微孔成型用结晶性材料的共性	80
4.2.2 聚丙烯 (PP) 的微孔成型	81
4.2.3 聚对苯二甲酸丁二酯 (PBT) 的微孔成型	83
4.2.4 聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 的微孔成型	85
4.2.5 聚酰胺 (PA, 尼龙) 的微孔成型	86
4.2.6 聚甲醛 (POM) 的微孔成型	86
4.2.7 聚苯硫醚 (PPS) 的微孔成型	87
4.2.8 其他重要半结晶性材料的微孔成型	88
4.3 非结晶性材料	89

4.3.1	非结晶性材料微孔泡沫的一般性能	90
4.3.2	GPPS 的微孔成型	90
4.3.3	PC 的微孔成型	90
4.3.4	其他重要非结晶性材料的微孔成型	92
4.4	填料填充的材料	94
4.4.1	有机填料	94
4.4.2	无机填料	95
4.4.3	填料对微孔成型和注塑件性能的影响	96
4.4.4	PP 中的成核剂	99
4.4.5	PP 中的透明剂	99
4.5	纤维增强材料	100
4.5.1	有机纤维	100
4.5.2	无机纤维	101
4.6	纳米材料增强复合材料	102
4.6.1	纳米粘土填充的 PE-HD	103
4.6.2	纳米粘土填充的 PA6	103
4.6.3	纳米粘土填充的 PP	104
4.6.4	纳米粘土填充的 GPPS	104
4.6.5	纳米粘土填充的 PE-LD	104
4.6.6	纳米粘土填充的 PBT	105
4.7	共混物和配混材料	105
4.7.1	Noryl [®] 的微孔成型	106
4.7.2	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯 (ABS) 的微孔成型	108
4.7.3	PC/ABS 合金	109
4.7.4	PC/PBT 合金	110
4.7.5	交联 EVAC 的微孔成型	111
4.7.6	Kraton G-7722 的微孔成型	111
4.7.7	不相容共混物的微孔成型	111
4.8	金属粉末	112
4.9	生物聚合物	113
4.9.1	加工参数对 PCL 可发泡性的影响	115
4.9.2	发泡剂对 PCL 可发泡性的影响	115
4.9.3	分子结构改性对 PLA 可发泡性的影响	116
4.9.4	填料对 PLA 可发泡性的影响	116
4.9.5	植物蛋白质泡沫	116
4.9.6	生物聚合物共混物	117
	参考文献	117

第5章 微孔注射成型设计	120
5.1 注塑件设计	120
5.1.1 注塑件几何形状设计	120
5.1.2 注塑件的性能	126
5.1.3 微孔注塑件的组装	137
5.2 模具设计	137
5.2.1 模具材料	137
5.2.2 模具表面涂覆和结构化	139
5.2.3 模具排气	141
5.2.4 模具分流道和浇口	143
5.2.5 模具冷却系统	148
5.2.6 模具推出系统	149
5.3 材料性能与减重幅度	150
5.3.1 拉伸强度模型	151
5.3.2 弯曲强度模型	153
5.3.3 Izod 冲击强度模型	153
5.3.4 拉伸强度模型应用结果	154
5.3.5 弯曲强度模型应用结果	156
5.3.6 冲击强度模型应用结果	157
5.3.7 微孔注塑件力学性能的提高	157
5.3.8 力学性能建模和改进方法的有关结论	159
5.4 通过模具设计和注塑件设计提高表面质量	159
5.4.1 材料	160
5.4.2 通过注塑件设计解决表面质量问题	160
5.4.3 通过模具设计解决表面质量问题	161
参考文献	162
第6章 微孔泡沫注射成型工艺	164
6.1 气体计量	164
6.1.1 微孔泡沫用螺杆的塑化量	164
6.1.2 气体计量量	167
6.1.3 气体计量压力设定	173
6.1.4 气体计量时间	175
6.1.5 气体计量结论	175
6.2 气体混合和扩散	176

6.2.1	混合的影响	176
6.2.2	温度的影响	179
6.2.3	压力的影响	180
6.2.4	停留时间的影响	181
6.2.5	材料的影响	182
6.2.6	微孔成型第一阶段的实验结果	183
6.2.7	对空注射并确定单相溶液的质量	190
6.2.8	有关气体混合和分散的结论	193
6.3	成核和初始泡孔长大	193
6.3.1	注射过程中的成核理论	193
6.3.2	温度的影响	194
6.3.3	压力降速率的影响	194
6.3.4	注射速度的影响	197
6.3.5	成核位置的影响	198
6.3.6	材料的影响	198
6.3.7	气体用量的影响	200
6.4	充模分析	201
6.4.1	注射速度	202
6.4.2	注射速度曲线	205
6.4.3	模具温度	207
6.4.4	收缩和翘曲	208
6.4.5	脱模	208
6.4.6	通过加工来提高表面质量	208
6.4.7	优化微孔注射成型工艺	213
6.4.8	模具温度对微孔注射成型的影响	215
6.4.9	湿度对微孔注射成型的影响	216
6.4.10	微孔注射成型时熔体温度的影响	218
6.4.11	微孔注射成型过程中出现的问题及其解决方案	218
6.5	微孔注射成型与气体辅助注射成型的比较	220
6.5.1	气体和熔体相	220
6.5.2	气体压力	220
6.5.3	模具设计	221
6.5.4	模具冷却	221
6.6	微孔注射成型与结构发泡成型的比较	222
6.6.1	厚度和泡孔尺寸	222
6.6.2	第一阶段的压力	222
6.6.3	性能变化	222

XII 微孔塑料注射成型技术

6.6.4 设备	222
6.7 微孔注射成型与传统注射成型的比较	222
6.7.1 保压阶段	222
6.7.2 压力	222
6.7.3 冷却	223
6.7.4 脱模	223
6.7.5 设备	223
6.7.6 成型周期	223
6.8 微孔注射成型与微孔挤出成型的比较	224
6.8.1 连续过程(挤出成型)与非连续过程(注射成型)的比较	224
6.8.2 螺杆设计和性能	224
6.8.3 成核	224
6.8.4 定型过程	224
6.8.5 物料	225
6.8.6 压力	225
6.9 微孔注射成型与微孔中空成型的比较	225
6.9.1 连续型坯挤出	225
6.9.2 中间过渡型坯工艺	226
参考文献	226
第7章 微孔注射成型装置	228
7.1 微孔注射成型的两个阶段	228
7.2 往复式螺杆注射成型机	229
7.2.1 单向阀和阀浇口	230
7.2.2 微孔注射成型用螺杆和机筒	236
7.2.3 微孔注射螺杆头	252
7.2.4 锁紧装置	257
7.2.5 微孔注射成型装置的结构及参数	260
7.2.6 微孔注射成型的液压系统	266
7.2.7 微孔注射成型的控制系统	272
7.2.8 美国塑料工业协会气体计量过程的指导原则	273
7.3 挤出机与注射成型机的结合	274
7.3.1 挤出机上的SCF计量装置	275
7.3.2 注射柱塞装置	275
7.3.3 保持挤出机内压力的方法	275
7.3.4 螺杆-柱塞式注射成型机的发展	276
7.4 SCF输送系统设计	276

7.4.1	物理发泡剂	277
7.4.2	泵对发泡剂加压	277
7.4.3	气体注射器设计	278
7.4.4	气体计量控制系统	280
7.4.5	气体调节器	281
7.4.6	气体输送系统的安全	281
7.5	气体计量用的烧结金属环 (Optifoam [®])	282
7.6	气体计量用的动态混合器 (Ergocell [®])	283
7.7	气体计量时在密封的料斗中加气 (ProFoam [®])	283
7.8	微孔成型的设备改造	283
7.9	液体硅橡胶的气体计量混合器	284
7.10	微孔注射成型的配套装置	284
	参考文献	285
第8章	特殊工艺	287
8.1	共注射 (夹芯) 成型微孔注塑件	287
8.1.1	微孔共注射成型的充模分析	287
8.1.2	微孔共注射用材料	292
8.1.3	微孔共注射方法	292
8.1.4	微孔共注塑件和模具设计	294
8.1.5	微孔共注射成型结论	301
8.2	气体反压注射成型	302
8.2.1	气体反压注射成型工艺	302
8.2.2	模具和注塑件设计	304
8.2.3	气体反压模具的气体控制系统	305
8.2.4	气体反压注射成型微孔注塑件的结构和物理性能	306
8.3	叠塑	308
8.4	反向铸压	310
8.5	叠塑与反向铸压共用工艺	312
8.6	冷热模具工艺	313
8.7	不减重的超微孔结构	314
8.8	发泡最轻时的最低气体用量	315
8.9	微孔泡沫中所用的化学发泡剂	315
8.9.1	产生 N ₂ 的化学发泡剂	316
8.9.2	产生 CO ₂ 的化学发泡剂	316
8.9.3	化学发泡剂改善熔体充模流动性及缩短冷却时间	316
8.9.4	使用化学发泡剂时的设计建议	317

8.9.5	使用化学发泡剂时的加工建议	317
8.9.6	吸热/放热混合型发泡剂	318
8.9.7	化学发泡剂成型时出现的问题及其解决方案	318
8.9.8	化学发泡剂方面未来的工作	319
8.10	水作发泡剂	320
8.11	应力发泡	321
8.12	微孔金属注塑件	322
8.13	局部微孔泡沫	324
8.14	薄壁微孔泡沫	325
	参考文献	327
第9章	微孔注射成型的模拟	329
9.1	裹气材料的流变性能数据和 pVT 数据	329
9.1.1	超临界流体和塑料熔体混合物的流变性能	330
9.1.2	超临界流体和塑料熔体混合物的 pVT 数据库	338
9.2	微孔注射成型的 Moldflow 模拟	339
9.2.1	理论	340
9.2.2	实验与模拟	344
9.3	微孔注射成型的简单模拟	357
9.3.1	黏度模型	358
9.3.2	气体溶解度和浓度的计算	361
9.3.3	气体扩散的计算	361
9.3.4	泡孔长大的计算	362
9.4	MuCell®工艺充模模拟的指导原则	363
	参考文献	364
第10章	微孔注射成型注塑件的后加工与性能测试	366
10.1	微孔注塑件的焊接	366
10.1.1	技术原理	367
10.1.2	焊接方法	367
10.1.3	PA6 和 PA66 的实验结果	370
10.1.4	超声波焊接其他材料的实验结果	375
10.2	表面抛光和喷涂	376
10.2.1	表面抛光	376
10.2.2	喷涂	376
10.3	后冷却	377

10.4 脱气过程	377
10.5 微孔注塑件的性能测试	377
10.5.1 冲击性能测试	378
10.5.2 拉伸性能测试	378
10.5.3 弯曲性能测试	378
10.5.4 动态力学性能分析	378
10.5.5 低剪切流变性能测试	378
10.5.6 热性能测试	378
10.5.7 收缩率测试	378
10.5.8 燃烧性能测试	378
10.5.9 声学性能测试	379
10.5.10 密度测试	379
参考文献	379
第 11 章 微孔注射成型制品的市场与应用	380
11.1 微孔注射成型制品的市场分析	380
11.1.1 低成本产品	380
11.1.2 高质量产品	381
11.1.3 微孔结构的独特性能	382
11.1.4 绿色产品	382
11.1.5 其他	382
11.2 典型应用案例研究	383
11.2.1 薄壁注塑件	383
11.2.2 汽车件	385
11.2.3 五金件	391
11.2.4 电气部件	392
11.2.5 精密成型件	394
11.2.6 医疗器件	394
11.2.7 金属和陶瓷粉末注塑件	395
11.2.8 高性能工程材料	395
11.2.9 特殊微孔结构	395
11.2.10 微孔发泡瓶	395
11.3 未来的研究课题及潜在应用	396
11.3.1 超微孔注塑件	396
11.3.2 特殊功能注塑件	396
11.3.3 采用超临界流体的特殊加工	397
参考文献	398

第 12 章 微孔注射成型的成本节省	399
12.1 材料节省	400
12.1.1 基材	400
12.1.2 发泡剂	401
12.1.3 添加剂	401
12.2 模具	402
12.3 设备	403
12.4 成型过程	406
12.4.1 冷却过程	406
12.4.2 保压	407
12.4.3 注射时间	407
12.4.4 螺杆回位时间	407
12.4.5 脱模时间	407
12.4.6 特殊微孔加工技术——海豚皮技术	408
12.4.7 薄壁成型的微小泡孔	408
12.4.8 低黏度熔体	408
12.4.9 其他	408
12.4.10 成型周期缩短的经验总结	408
12.5 尺寸稳定性	409
12.5.1 保持尺寸公差夹具	409
12.5.2 后热处理	409
12.5.3 后机械加工	409
12.5.4 根据组装尺寸分组	409
12.6 微孔泡沫的性能提高	410
12.6.1 隔热性能	410
12.6.2 减振性能	410
12.6.3 隔声性能	410
12.6.4 质轻	410
12.6.5 无应力注塑件	410
12.6.6 通过将不同材料组合实现特定性能	411
12.6.7 可回收的废旧材料	411
12.7 投资回报分析 (ROI)	411
12.8 不同成型工艺的成本比较	411
12.9 节能案例分析	412
参考文献	416