

瞿金平 著

聚合物 动态塑化成型加工 理论与技术

上 卷
理论篇



科学出版社
www.sciencep.com

聚合物动态塑化成型加工 理论与技术

上卷：理论篇

瞿金平 著

内 容 简 介

本书阐述了我国有自主知识产权的聚合物振动力场诱导塑化成型技术所涉及的新概念、新原理、新理论、新设备,包括聚合物动态流变特性与行为及本构方程、塑化加工中振动力场诱导传递过程、振动力场诱导塑化加工设备及其应用、振动塑化加工对制品结构性能的影响、动态塑化成型加工过程控制、动态成型加工过程综合测试及模拟等,并对新技术在聚合物动态成型加工方面的延伸研究开发成果作了介绍和展望。

本书可供从事高分子材料及其成型加工研究、开发、教学的专业人员与研究生以及相关产业部门的工程技术人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

聚合物动态塑化成型加工理论与技术(上、下卷)/瞿金平 著. —北京:科学出版社, 2005

ISBN 7-03-015040-6

I. 聚… II. 瞿… III. 高聚物-生产工艺 IV. TQ316

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第013651号

责任编辑:吕虹 黄海/责任校对:赵桂芬

责任印制:钱玉芬/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街16号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

新蕾印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2005年3月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2005年3月第一次印刷 印张: 37 1/2

印数: 1—3 000 字数: 690 000

定价: 88.00元(上、下卷)

(如有印装质量问题,我社负责调换(新欣))

序

高分子材料制品的质量取决于材料的选择和成型加工条件。高分子材料成型加工是一门科学与工程紧密结合的交叉学科，其任务是：了解材料的特性，确定最适宜加工条件，制取最佳性能产品；为合成具有预期性能的聚合物和助剂提供理论依据；提高制品性能，为高新技术的不断突破提供关键材料。尽管我国高分子材料工业已得到很大发展，但与国外先进国家相比，在高分子材料的研制、成型加工技术及设备、计算机模拟、工程优化及制品开发等方面始终存在明显差距，存在的主要问题之一是高分子成型加工技术及设备的研究长期未能得到足够重视。

瞿金平同志于20世纪90年代初率先提出并发明了相关的高分子材料动态塑化成型加工新方法及新技术：通过塑化成型加工全过程引入振动力场，改变传统的高分子材料纯剪切稳态塑化、输运机理为振动剪切动态塑化、输运机理，使成型加工过程及过程参数发生周期性的变化。高分子材料动态塑化成型加工不仅是一项技术发明，也是在高分子材料成型加工方面技术原理、概念上的更新，标志着该领域进入了一个新的发展阶段。瞿金平同志及他领导的科研群体10多年如一日地从事这种与传统的稳态成型加工有本质差别的动态成型加工方法和技术研究，取得了出色的科技成果。《聚合物动态塑化成型加工理论与技术》一书是他们多年来在聚合物动态塑化成型方法及设备的理论和技术方面取得的研究成果的系统总结，也是他们多年辛勤劳动的结晶，是一本很有价值、很有意义的学术著作。

瞿金平同志与我认识多年，他为人谦虚谨慎，勇于创新，求实求真，不计较个人得失，坚持在国内从事科技和教育事业，是一位热爱祖国、富有奉献精神、德才兼备的优秀中青年学者。希望瞿金平同志和他领导的群体百尺竿头、更进一步，为我国科学事业发展和经济建设做出更大的贡献。

中国科学院院士

徐匡

2004年12月28日

前 言

我并非出身于书香门第，而是从乡村小路走入科学殿堂的。

1977 年恢复高考制度，我才有机会考入华南工学院化工机械系塑料机械专业，从而获得了从未有过的深造机会。我很快就热爱上了这个专业，担任了学生科研组组长，参加“塑料挤出成型理论”研究，在科学研究的道路上迈开了第一步。1981 年 12 月大学毕业后留校任教，又于 1984 年考取本校轻工机械专业硕士研究生，一边从事教学工作，一边攻读学位。在以后的科学研究工作中有机会结识并师从徐僖院士，获得材料学博士学位。

在不断的学习、教学、科研实践中，我发现传统聚合物成型加工技术及设备存在许多问题，如能量利用低、能耗大、工作噪声大、对物料适应性窄、塑化混炼效果及制品质量不能调控等，对此国内外一直未能很好解决。在科学研究方面我不喜欢走前人走过的路，宁愿探索新的途径。经过艰苦的努力，于 1989 年提出聚合物电磁动态塑化成型加工方法的设想。将电磁场引起的机械振动力场引入聚合物塑化成型加工全过程，使聚合物固体输运、熔融塑化、熔体输运在周期性振动状态下进行，达到减小聚合物成型加工所需要的热机械历程、降低熔融塑化温度、提高能量利用率的目的，实现利用振动力场调控物料塑化混炼效果、控制制品的结构性能。另外将机械、电子、电磁技术有机融合，实现设备结构的集成化。

1990 年 9 月，我和同事们研制成功世界上第一台塑料电磁动态塑化挤出设备。新型挤出机与传统设备相比较，能耗降低 30%~50%，体积、质量均减少 70% 左右，噪声小，成型制品质量高。在国家级火炬计划预备项目的资助下，经过几年的修改与完善工作，新技术与新设备于 1993 年 11 月通过了国家有关部门组织的技术鉴定。包括两位中国科学院院士在内的鉴定委员会一致认为该项技术是“国内外的新发明”，是“塑料加工工业中挤出成型方法及设备的一次重大突破”，“该技术处于国际领先水平”。我作为发明人由此获得中国发明专利权，并先后获得了美国、日本、欧洲等七个国家和地区的发明专利权。1995 年 12 月“八五”国家重点科技项目、同属世界首创的电磁动态塑料混炼设备和注射成型设备通过了有两位中国科学院院士参加的技术鉴定，获得了非常高的评价。电磁式聚合物动态注射成型方法及设备先后获得了美国、欧盟(奥地利、德国、法国、英国、意大利)、澳大利亚、俄罗斯、中国香港等 11 个国家和地区的发明专利权。

随后的日子里，我和同事们克服重重困难，扎实地开展科技成果产业化工作。

经过几年的艰苦努力,将三大类新技术、10多个新设备品种许可给多家塑料机械制造厂商开发、生产,并在国内近30个省、市、自治区的高分子材料及制品生产厂家推广应用,部分新设备出口到国外。

在新技术研究开发的同时,我和同事们在理论基础与应用基础研究方面也进行了艰苦的探索。振动力场被引入聚合物塑化成型加工全过程,使传统的纯剪切稳态塑化、输运机理变为振动剪切动态塑化、输运机理,使成型加工过程及过程参数发生周期性的变化。动态成型加工不仅仅是一项技术发明,更是高分子材料成型加工领域技术原理、概念上的更新,其中有很多学术和理论问题需要解决,并且新技术开发和应用也需要相应的理论作指导。我们先后承担和出色完成了国家杰出青年科学基金、国家自然科学基金“九五”重点项目和国家自然科学基金重大科学仪器专项等10多项基础研究课题,深入系统地研究了振动力场对聚合物加工过程的作用机制,逐步建立了聚合物动态成型加工传递过程动力学理论。

聚合物动态塑化成型方法及设备引起了学术界及制造业的普遍关注,我于1995年获得由诺贝尔化学奖获得者李远哲博士等著名专家主持评审的、被誉为“世界制造业诺贝尔奖”的香港蒋氏科技成就奖。也是在1995年,我和同事们获得广东省科技进步特等奖。随后,1997年获得国家发明二等奖和中国专利发明创造金奖,2001年获得中国高校科学技术进步一等奖、“九五”国家重点科技攻关计划优秀科技成果奖,2002年被教育部提名国家科学技术奖技术发明一等奖;2003年获中国专利发明创造优秀奖、广东省专利发明创造金奖。

本书是我和同事们在聚合物动态塑化成型方法及设备方面10多年理论和技术研究心得的总结整理,也是阶段成果的系统介绍,其中部分成果曾在各种学术刊物上发表过,有些成果还没有公开发表。我想通过这本书把自己和同事们多年的研究成果从科学意义上比较系统地连贯起来,以展示我国在聚合物成型加工理论与技术研究方面的最新进展,也可满足新技术及新设备的使用和生产部门的工程技术人员、对新技术感兴趣的研究单位和大专院校的相关研究人员与教师及本科生、研究生的需要。也希望这本书能为提高我国在国际聚合物成型加工领域的学术影响尽微薄之力。

本书撰写过程中自始至终得到了何和智、周南桥、晋刚、曹贤武、吴宏武、冯彦洪、何光建等老师的支持和帮助,没有他们的辛勤劳动,本书将很难成文。彭响方、刘斌、廖琴、麻向军、文劲松、赵艳志、谢小莉、任鸿烈等老师也给予了热情的帮助。许多博士、硕士研究生也参加了理论、实验、数据整理等工作,特别是蔡永洪、曾广胜、石宝山、王权、殷小春、罗卫华、朱文利、秦雪梅、杜遥雪博士对本书作出了很大贡献,陈达、向华、兰庆贵、张琳、潘映雪硕士也对本书给予了帮助。许多已毕业的研究生,如张娟、刘跃军、徐百平等博士及许多硕

士都曾参加了我的研究工作，当然对本书的理论与实验研究起了重要作用。我在此一并向为本书的撰写和成文给予了帮助的同事、老师、学生表示衷心的感谢！我还要感谢徐信院士 10 多年来对我的成长和我的研究工作的关心和支持，这次又非常热情地为本书作序，在此我向他表示崇高的敬意！我感谢所有支持和关心过我的人们！

当然本书中的一切差错和不足都应归咎于我自己，恳请诸位师长及读者朋友不吝指正。

瞿金平

2004 年 12 月于华南理工大学

目 录

序

前言

第一章 绪论	1
1.1 聚合物成型加工技术简史	1
1.2 挤出成型加工技术及螺杆挤出机	2
1.3 注射成型技术及螺杆注射机	3
1.4 聚合物动态塑化成型加工新方法及设备	4
1.4.1 聚合物动态塑化成型加工新概念提出背景及意义	4
1.4.2 聚合物动态塑化成型加工新原理及新技术	6
1.5 本书范围	10
第二章 聚合物熔体振动剪切流动特性与行为	11
2.1 概述	11
2.2 毛细管脉动挤出黏弹特性测量与表征	12
2.2.1 毛细管动态流变仪中脉动挤出过程动态黏度的测量	12
2.2.2 毛细管脉动挤出过程中第一法向应力差的测量与表征	19
2.3 脉动注射充模过程流变特性测量与表征	24
2.3.1 脉动注射充模过程的物理模型	24
2.3.2 脉动注射充模过程的数学模型	25
2.3.3 脉动注射充模过程熔体黏性测量的理论分析	28
2.4 狭缝流道脉动挤出过程的测量与表征	34
2.4.1 物理模型的建立	34
2.4.2 数学模型的建立及求解	35
2.5 聚合物熔体脉动挤出过程的光散射测量与表征	38
2.5.1 光散射理论	38
2.5.2 通过圆截面模头流道应力条纹分析	40
2.5.3 散射光光强散射矩阵与聚合物熔体	43
2.6 振动剪切流变行为及混沌动力学	45
2.6.1 振动剪切流场下聚物流变行为的表征	46

2.6.2 振动剪切流场下聚物流变行为混沌特征的提取	50
2.6.3 振动剪切流场下聚物流变行为混沌特征的识别与分析	59
2.6.4 基于小波去噪的动态表观黏度功率谱分析	66
2.6.5 振动剪切流场下聚合物挤出过程流变行为的黏弹行为预测	71
参考文献	77
第三章 振动力场作用下聚合物熔体本构方程	78
3.1 概述	78
3.2 振动剪切流场中聚合物熔体动态速率方程	78
3.2.1 基于高分子链缠结动力学的瞬态网络结构理论	78
3.2.2 纯振动剪切流场中聚合物熔体的动态速率方程	80
3.2.3 正弦脉动流场中聚合物熔体动态速率方程	83
3.3 振动剪切流场中的聚合物熔体瞬态网络结构模型	84
3.3.1 纯振动剪切流场中熔体的非仿射瞬态网络结构模型	85
3.3.2 正弦脉动流场中熔体的非仿射瞬态网络结构模型	89
3.4 正弦脉动流场中熔体非仿射本构方程适应性的实验验证	93
3.4.1 柱坐标系下聚合物熔体的非仿射瞬态网络结构模型	94
3.4.2 毛细管壁处熔体剪切应力的实验值与理论值的比较	95
3.4.3 毛细管壁处熔体第一法向应力差的实验值与理论值的比较	97
3.5 基于非仿射瞬态网络结构模型的聚合物熔体流变行为分析	100
3.5.1 振动剪切流场中聚合物熔体剪切应力的响应	100
3.5.2 振动剪切流场中聚合物熔体缠结密度响应	101
3.5.3 振动剪切流场中聚合物熔体表观黏度的响应	104
3.5.4 振动剪切流场中聚合物熔体法向应力差的响应	105
3.6 动态成型加工中幂律定理的修正	109
参考文献	117
第四章 聚合物散体单螺杆振动强化输运过程	119
4.1 概述	119
4.2 散体振动强化输运过程简化模型	120
4.3 数学模型线性化近似处理及解析	121
4.3.1 连续方程	121
4.3.2 运动方程	123

4.3.3 边界条件	125
4.3.4 无量纲化及线性化处理	126
4.3.5 模型求解	128
4.4 螺杆轴向振动对散体输运过程的影响	132
4.4.1 沿螺槽方向上的压力分布	133
4.4.2 沿螺槽方向上的速度分布	138
4.4.3 固体输送流率	141
4.4.4 固体输送段长度	142
4.4.5 固体输送角	144
4.5 散体振动强化输运功率分析	145
4.6 散体振动强化输运理论算例	148
参考文献	149
第五章 聚合物振动诱导单螺杆熔融塑化过程	150
5.1 实验观察	150
5.2 振动诱导单螺杆熔融塑化过程简化模型	154
5.3 动态熔融塑化过程近似数学解析	156
5.3.1 熔融速率	156
5.3.2 固体床分布及熔融段长度	166
5.3.3 能耗分析	167
5.4 螺杆轴向振动对熔融塑化过程的影响	169
5.5 动态熔融塑化理论算例及实验验证	174
5.5.1 实例计算	174
5.5.2 实验验证	179
参考文献	182
第六章 聚合物熔体单螺杆振动诱导输运过程	183
6.1 概述	183
6.2 流场描述及物理模型	183
6.3 流场动力学方程与熔体本构模型	184
6.3.1 基本假设	184
6.3.2 流场动力学方程与熔体本构模型	185
6.4 振动诱导熔体输运流场解析	190

6.4.1 第一种 Tanner 修正模型输运流场分析·····	190
6.4.2 第二种 Tanner 修正模型输运流场分析·····	202
6.5 振动诱导熔体输运功率分析·····	210
6.5.1 螺槽内熔体输运功率分析·····	211
6.5.2 螺棱间隙处功率耗散·····	215
6.5.3 螺杆计量段的功率消耗·····	217
6.6 平行平板模型的修正·····	218
6.6.1 螺纹侧壁影响的修正·····	218
6.6.2 料筒内表面曲率影响的修正·····	218
参考文献·····	219
第七章 聚合物熔体振动剪切混合过程·····	220
7.1 概述·····	220
7.2 熔体振动剪切分布混合过程表征·····	221
7.2.1 界面面积、条纹厚度的概念·····	221
7.2.2 动态剪切流场中界面面积的增长·····	222
7.3 圆截面口模脉动剪切层流混合·····	224
7.4 单螺杆螺槽中振动强化层流混合·····	225
7.4.1 螺槽中熔体的停留时间分布·····	226
7.4.2 脉动剪切总形变量(剪切强度)分析·····	234
7.5 熔体振动强化分散混合过程表征·····	241
7.5.1 固体粒子颗粒团聚体的破裂·····	241
7.5.2 液滴的破裂·····	244
7.5.3 分散混合效果的衡量标准·····	245
7.6 毛细管脉动挤出分散混合·····	246
7.6.1 脉动剪切应力对分散相破裂过程的影响·····	246
7.6.2 脉动流场强化分散过程的应用实例·····	248
7.7 聚合物多组分混炼效果的光散射测量与表征·····	249
7.7.1 光散射理论·····	250
7.7.2 多组分体系混炼效果表征·····	252
7.8 振动强化聚合物多组分狭缝流场混炼效果的光散射测量与表征·····	256
7.8.1 狭缝流场混炼效果光散射测量实验·····	256

7.8.2 狭缝流场混炼效果理论表征	256
7.8.3 狭缝流场混炼效果光散射测量与表征	259
参考文献	267
第八章 聚合物熔体典型脉动挤出和注射成型	268
8.1 概述	268
8.1.1 典型脉动挤出成型	268
8.1.2 典型脉动压力诱导注射成型	268
8.2 圆截面与窄平缝口模脉动挤出过程	269
8.2.1 圆截面口模脉动挤出过程	269
8.2.2 窄平缝口模脉动挤出过程	275
8.3 圆截面口模脉动挤出胀大	276
8.3.1 张量初步	276
8.3.2 圆截面口模脉动剪切流动的微元分析	278
8.3.3 记忆函数	280
8.3.4 应力张量	281
8.3.5 挤出胀大方程的推导	283
8.4 圆碟模腔脉动注射成型过程	286
8.4.1 熔体在浇道中的流动	287
8.4.2 熔体在模腔中的流动	294
8.4.3 浇道与模腔的接合	303
8.4.4 脉动压力诱导保压	303
参考文献	310
第九章 塑料单螺杆振动塑化挤出机及应用	311
9.1 概述	311
9.2 振动塑化挤出机的结构和工作原理	312
9.2.1 转动驱动系统的结构	313
9.2.2 塑化挤出系统的结构	314
9.2.3 激振器的结构和工作原理	315
9.3 振动塑化挤出机的设计	316
9.3.1 转动驱动系统的设计	316
9.3.2 挤压系统的设计	317

9.3.3 加热冷却系统的设计	322
9.3.4 轴向激振系统的设计	323
9.4 振动系统的幅频特性	326
9.4.1 力学模型的建立	326
9.4.2 数学模型中各参数的确定	327
9.4.3 模型求解与振动幅频特性分析	328
9.5 单螺杆振动塑化挤出综合工作特性	330
9.5.1 螺杆特性分析	331
9.5.2 挤出功率特性分析	333
9.6 mLLDPE 薄膜振动诱导塑化挤出成型	334
9.6.1 影响薄膜吹塑成型的主要因素	335
9.6.2 塑料电磁动态塑化挤出吹膜机组	335
9.6.3 茂金属线形低密度聚乙烯(mLLDPE)薄膜吹塑成型	336
9.7 微孔塑料振动诱导塑化挤出成型	340
9.7.1 微孔塑料及其挤出成型技术	340
9.7.2 微孔塑料振动诱导发泡过程模拟	343
9.7.3 微孔塑料振动诱导单螺杆塑化挤出设备	350
9.8 塑料管材、片材制品的振动诱导塑化挤出成型	352
9.8.1 管材挤出成型	352
9.8.2 片材挤出成型	354
参考文献	357
第十章 聚合物三螺杆动态混炼挤出机及应用	358
10.1 概述	358
10.2 三螺杆动态混炼挤出机结构形式	358
10.2.1 特殊电机驱动结构形式	359
10.2.2 标准电机驱动结构形式	362
10.3 三螺杆动态混炼挤出及原理	363
10.3.1 三螺杆动态混炼挤出过程	363
10.3.2 振动力场对分布混合的强化机理	369
10.4 振动系统的幅频特性	375
10.4.1 主螺杆轴向振动阻尼系数	375

10.4.2 激振力计算	378
10.4.3 幅频特性分析	379
10.5 聚合物/无机物复合材料振动强化制备	381
10.5.1 聚合物/无机物复合材料共混制备技术	381
10.5.2 聚合物/无机物填充体系三螺杆动态混炼挤出过程模拟	382
10.5.3 PP/ CaCO ₃ 复合材料三螺杆动态混炼挤出制备生产线	383
参考文献	385
第十一章 聚合物脉动压力诱导注射成型机及应用	386
11.1 概述	386
11.2 脉动压力诱导塑化注射装置	387
11.2.1 电磁激振式动态注射成型装置	387
11.2.2 液压激振式脉动压力诱导注射成型装置	388
11.3 螺杆轴向脉动特性	390
11.3.1 物理模型的建立	390
11.3.2 螺杆轴向振动空载固有频率	391
11.3.3 阻尼系数的确定	392
11.3.4 注射螺杆脉动响应及分析	394
11.4 脉动压力诱导注射功率特性	397
11.4.1 注射充模能耗的数学建模及求解	397
11.4.2 注射充模能耗的实例计算	406
11.5 淀粉塑料制品动态注射成型	407
11.5.1 淀粉塑料发展概况	407
11.5.2 淀粉塑料的加工特点及其注射成型	409
11.5.3 淀粉塑料制品动态注射成型设备	410
11.6 金属粉末脉动注射成型	413
11.6.1 粉末冶金及粉末注射成型技术	413
11.6.2 粉末喂料的动态流变特性	415
11.6.3 粉末脉动注射充模过程模拟	417
11.6.4 金属粉末脉动注射成型设备	420
11.6.5 金属粉末脉动注射成型技术特色	423

参考文献	425
第十二章 振动塑化加工对聚合物制品结构性能的影响	426
12.1 概述	426
12.2 振动塑化挤出成型制品的力学性能	427
12.2.1 振动塑化挤出吹膜制品的力学性能	427
12.2.2 振动塑化挤出片材的力学性能	429
12.2.3 振动塑化挤出过程中熔体大分子二维取向定性描述	430
12.3 脉动压力诱导注射成型制品的力学性能	431
12.4 振动力场对聚合物共混/复合材料性能的影响	435
12.5 结晶聚合物的晶态结构对振动力场的响应	436
12.5.1 高密度聚乙烯(HDPE)	436
12.5.2 低密度聚乙烯(LDPE)	439
12.5.3 聚丙烯(PP)	441
12.6 振动力场对结晶聚合物的结晶行为的影响	443
12.6.1 振动力场对 PET 冷结晶行为的影响	443
12.6.2 振动力场作用对 PET 冷结晶动力学参数的影响分析	445
12.7 振动力场对聚合物熔体微观形态的影响	449
12.7.1 振动力场作用对干涉条纹的影响	450
12.7.2 振动力场作用对光强矩阵的影响	454
12.8 聚合物复合体系相结构对振动塑化的响应	458
参考文献	460
第十三章 聚合物动态塑化成型加工过程控制	461
13.1 概述	461
13.2 振动诱导塑化成型过程控制特性	461
13.2.1 振动诱导塑化挤出过程动态特性	461
13.2.2 脉动注射过程模腔压力动态行为	466
13.3 螺杆驱动系统	469
13.3.1 螺杆轴向振动驱动器	469
13.3.2 螺杆转速调节系统	472
13.3.3 动态注射成型过程伺服驱动系统	476

13.4 过程参量智能控制算法	479
13.4.1 动态挤出过程熔体温度与压力模糊解耦控制算法	479
13.4.2 脉动压力诱导注射速度小脑模型神经网络复合控制算法	489
13.5 控制系统设计与实现	494
13.5.1 控制系统总体结构	494
13.5.2 控制系统硬件设计	495
13.5.3 控制系统软件设计	502
13.5.4 控制系统在线运行	505
参考文献	512
第十四章 聚合物动态成型加工过程综合测试及模拟	513
14.1 概述	513
14.2 动态成型加工典型操作单元模块化	513
14.2.1 主驱动激振模块	514
14.2.2 单螺杆挤出模块	515
14.2.3 三螺杆混炼模块	516
14.2.4 注射模块	517
14.2.5 辅助模块	517
14.2.6 测控模块	518
14.2.7 试验模具	519
14.3 聚合物及其复合材料广义流变性能测量	520
14.4 聚合物动态共混改性过程及其特性测量表征	523
14.4.1 工艺条件的优化研究	523
14.4.2 配方与加工特性的研究	524
14.4.3 PP/CaCO ₃ 共混体系动态与稳态加工对比	525
14.5 动态成型加工典型操作过程模拟实验	526
14.5.1 薄膜、片材动态挤出成型过程模拟实验	527
14.5.2 螺线槽模具动态注射填充模拟实验	529
第十五章 动态成型加工技术延伸及进一步创新	533
—— 聚合物动态反应加工技术及设备	
15.1 概述	533
15.2 工程塑料动态缩聚反应技术及连续反应器	534

15.2.1 聚碳酸酯动态多螺杆连续缩聚反应器	535
15.2.2 尼龙 11 动态多螺杆缩聚反应器	536
15.2.3 动态多螺杆缩聚反应器技术特点	537
15.3 高分子材料动态共混增容反应挤出	538
15.3.1 改性塑料二级三螺杆动态反应挤出机结构原理	538
15.3.2 二级三螺杆动态反应挤出机技术特点	539
15.4 反应挤出动态全硫化 TPV 制备	540
15.4.1 TPV 及其动态全硫化制备技术	540
15.4.2 振动力场强化动态全硫化制备 TPV 的研究	542
15.4.3 反应挤出动态全硫化生产设备及其 TPV 制品的性能	548
参考文献	551
主要符号表	552