

GAOFENZI CAILIAO CHENGXING
JIAGONG XINJISHU

高分子材料成型 加工新技术

温变英 主编



化学工业出版社

GAOFENZI CAILIAO CHENG
JIAGONG XINJISHU

高分子材料成型 加工新技术

温变英 主编



化学工业出版社

本教材从混合混炼、成型加工、计算机辅助控制、高分子材料循环利用等角度全面系统地介绍了涉及多种高分子材料成型加工技术的新进展。全书共分为十章，第1章绪论简单介绍了成型加工对高分子材料和制品的重要性以及高分子材料成型加工技术的发展状况、第2章介绍了混合混炼技术和装备的新进展，第3章到第7章分别介绍了挤出、注射、中空成型、发泡、纺丝等成型加工技术的最新方法，第8章介绍了微波加工、辐射加工和表面涂层等方面的技术进展，第9章主要介绍了计算机辅助技术在塑料成型装备控制、过程模拟和模具设计方面的应用和发展，第10章从环境保护的角度介绍了高分子材料循环利用方面的发展状况。

该书既可作为材料科学与工程学科高分子方向研究生的专业课教材，也可作为其他材料专业的选修课教材。同时，还可以供高分子材料专业本科生和广大专业技术人员作为参考书使用。



图书在版编目 (CIP) 数据

高分子材料成型加工新技术 / 温彦英主编. — 北京: 化学工业出版社, 2014. 6

ISBN 978-7-122-20443-1

I. ①高… II. ①温… III. ①高分子材料-成型-工艺-教材 IV. ①TQ316

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 077316 号

责任编辑: 王苏平 贾 婷

文字编辑: 孙凤英

责任校对: 蒋 宇

装帧设计: 张 辉

出版发行: 化学工业出版社 (北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 装: 三河市延风印装厂

787mm×1092mm 1/16 印张 20 $\frac{3}{4}$ 字数 595 千字 2014 年 8 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询: 010-64518888 (传真: 010-64519686) 售后服务: 010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书, 如有缺损质量问题, 本社销售中心负责调换。

定 价: 58.00 元

版权所有 违者必究



前言 FOREWORD

高分子材料在尖端科学、国防建设和国民经济中所发挥的作用越来越大，已成为现代社会生活中不可或缺的材料。近年来，随着材料制备技术、成型加工理论研究、机械加工技术、计算机自动控制技术等进一步发展，高分子材料成型加工进入了创新时期，涌现出了一批新的加工技术，推动了行业的发展。为了使本专业的学生较为全面地了解高分子材料成型加工技术的发展状况，系统地掌握这些技术所包含的原理、方法和知识，我们组织编写了这本《高分子材料成型加工新技术》研究生教材。本教材从混合混炼、成型加工、计算机辅助控制、高分子材料循环利用等角度全面系统地介绍了涉及其中的成型技术的进展。此外，考虑到教师和学生用书的方便，使学生的新旧专业知识连贯起来，在每章的开头部分还对高分子材料基本的成型方法进行了简要总结和回顾。

本书第1章由温变英编写，第2章、第3章及第6章的微孔发泡挤出成型的部分内容由陈士宏编写，第4章由周洪福编写，第5章由张玉霞编写，第6章的其他节由王向东编写，第7章由陈雅君编写，第8章由张扬编写，第9章由胡晶编写，第10章由张敏编写，全书由温变英教授统稿。在章末列出了主要参考文献，在此对所有作者表示感谢。由于我们编写教材的经验不足及水平有限，书中难免有疏漏、不妥之处，敬请读者指正。

该书既可作为材料科学与工程学科高分子方向研究生的专业课教材，也可作为其他材料专业的选修课教材。同时，还可以供广大专业技术人员作为参考书使用。

本教材得到北京工商大学研究生优秀教材建设基金的资助，谨此致谢。

编者

2014年1月

目 录 CONTENTS

第1章 绪论

- 1.1 成型加工对高分子材料和制品的重要性 1
- 1.2 高分子材料成型加工技术的发展 2
 - 1.2.1 合成-复合-成型一体化技术 2
 - 1.2.2 塑化和混炼技术 3
 - 1.2.3 成型加工技术 4
 - 1.2.4 辅助成型加工技术 5

第2章 混炼新技术

- 2.1 常用挤出成型加工设备 7
 - 2.1.1 挤出成型机组 7
 - 2.1.2 单螺杆挤出机 8
 - 2.1.3 双螺杆挤出机 9
- 2.2 混炼新技术 15
 - 2.2.1 多螺杆挤出机 15
 - 2.2.2 无螺杆挤出机 22
 - 2.2.3 往复式销钉螺杆混炼挤出机 29
 - 2.2.4 振动挤出机 34
- 参考文献 39

第3章 挤出加工新技术

- 3.1 概述 41
 - 3.1.1 挤出加工技术的现状 41
 - 3.1.2 挤出加工技术的应用 42
 - 3.1.3 挤出加工技术的发展趋势 44
- 3.2 反应挤出技术 44
 - 3.2.1 概述 45
 - 3.2.2 反应挤出技术的特点 45
 - 3.2.3 反应挤出技术的设备 46
 - 3.2.4 反应挤出技术的应用 48
- 3.3 精密挤出成型技术 51
 - 3.3.1 概述 51

3.3.2	影响挤出成型制品精度的主要因素	53
3.3.3	技术措施与装置	56
3.3.4	应用前景	59
3.4	气辅挤出成型技术	60
3.4.1	概述	60
3.4.2	气辅挤出成型的机理及系统组成	61
3.4.3	气辅挤出成型的模具设计	62
3.4.4	气辅挤出成型的技术特点	63
3.4.5	气辅挤出成型的关键	64
3.5	固态挤出成型技术	66
3.5.1	概述	66
3.5.2	固态聚合物在静水压下的力学行为	66
3.5.3	固态挤出温度区间	68
3.5.4	固态挤出工艺	70
3.5.5	影响固态挤出的因素	71
3.5.6	固态挤出的应用	72
3.5.7	典型材料的固态挤出成型	72
3.6	共挤出技术	73
3.6.1	概述	73
3.6.2	共挤出技术的应用	75
3.6.3	共挤出设备	83
3.6.4	微层共挤出技术	92
	参考文献	98

第4章 注射成型新技术

4.1	流体辅助注射成型	101
4.1.1	气体辅助注射成型概述	102
4.1.2	气体辅助注射成型工艺要点	102
4.1.3	气体辅助注射成型设备	105
4.1.4	气体辅助注射成型方法	107
4.1.5	气体辅助注射成型优缺点	111
4.1.6	气体辅助注射成型新发展	111
4.1.7	水辅注射成型技术	114
4.1.8	其他液辅注射成型技术	114
4.1.9	应用领域	114
4.2	可熔芯注射成型	115
4.2.1	概述	115
4.2.2	工艺要点	116
4.2.3	型芯材料及设计	116
4.2.4	型芯的熔出和制件的干燥	118
4.2.5	优缺点	118
4.2.6	应用领域	119

4.3	受控低压注射成型	120
4.3.1	概述	120
4.3.2	设备	120
4.3.3	工艺要点	121
4.3.4	材料	122
4.3.5	过程控制	123
4.3.6	低压注射成型过程中的聚合物迁移	124
4.3.7	应用领域	124
4.4	共注射成型	125
4.4.1	概述	125
4.4.2	双色注射成型	125
4.4.3	双层注射成型	126
4.4.4	夹芯注射成型	126
4.4.5	工艺要点	127
4.4.6	新发展	127
4.5	反应注射成型	128
4.5.1	概述	128
4.5.2	设备	129
4.5.3	工艺要点	130
4.5.4	应用领域	130
4.5.5	新发展	130
4.6	热固性塑料注射成型	131
4.6.1	概述	131
4.6.2	设备	131
4.6.3	工艺要点	132
4.7	粉末注射成型	133
4.7.1	概述	133
4.7.2	工艺要点	133
4.7.3	优缺点	135
4.7.4	应用领域	135
4.8	精密注射成型	136
4.8.1	概述	136
4.8.2	精密注射机	136
4.8.3	精密注射模具的设计及制造	137
4.8.4	精密注射成型的工艺研究	138
4.8.5	精密注射材料(制品)的性能研究	138
	参考文献	139

第5章 中空吹塑成型新技术

5.1	概述	142
5.2	中空成型用原料	143
5.2.1	中空成型对原料性能的基本要求	143

5.2.2	中空吹塑成型用原料的发展	144
5.3	挤出吹塑成型	146
5.3.1	机头结构发展	147
5.3.2	挤出浸蘸吹塑成型	153
5.3.3	三维管件挤出吹塑成型	154
5.3.4	三维负压挤出吹塑成型	157
5.3.5	中空夹层塑件成型	158
5.3.6	双壁容器吹塑模塑技术	159
5.3.7	Culus 双层挤出吹塑	159
5.3.8	整机的发展	161
5.4	注射吹塑成型	162
5.4.1	二工位注射吹塑成型	162
5.4.2	三工位注射吹塑成型	163
5.4.3	四工位注射吹塑成型	163
5.4.4	异型件的注射吹塑成型	164
5.4.5	注射吹塑整机的发展	164
5.5	拉伸吹塑成型	165
5.5.1	挤出拉伸吹塑成型	165
5.5.2	注射拉伸吹塑成型	167
5.5.3	拉伸吹塑整机的发展	170
	参考文献	171

第6章 发泡成型加工新技术 ○

6.1	聚合物发泡成型过程	174
6.2	聚合物树脂的熔体强度和熔体弹性	174
6.2.1	长链支化对于聚合物熔体弹性（熔体强度）的影响	175
6.2.2	长链支化聚合物的特性	176
6.3	发泡剂替代	178
6.3.1	泡沫塑料行业 HCFCs 替代原则	180
6.3.2	HCFCs 替代品	180
6.4	挤出发泡成型装备新进展	183
6.4.1	挤出机	183
6.4.2	发泡机头	184
6.4.3	发泡剂的注入和计量	185
6.4.4	双螺杆挤出机/单螺杆挤出机串联发泡成型机组	185
6.5	微孔发泡新技术	186
6.5.1	概述	186
6.5.2	微孔发泡成型原理	187
6.5.3	微孔发泡成型设备	188
6.5.4	微孔发泡成型工艺过程控制	192
6.5.5	MuCell™ 微孔成型发泡工艺	195
6.5.6	几种典型聚合物的微孔发泡	196

6.6 高压釜发泡成型新技术	198
6.6.1 片材挤出	199
6.6.2 高压釜发泡	199
6.6.3 低压釜发泡	200
参考文献	200

第7章 纤维加工成型新技术

7.1 绪论	202
7.1.1 纤维的概念及分类	202
7.1.2 纤维的主要生产方法	202
7.2 传统纺丝方法简介	203
7.2.1 熔体纺丝	203
7.2.2 溶液纺丝	205
7.3 凝胶纺丝	207
7.4 静电纺丝	209
7.4.1 静电纺丝的基本原理	210
7.4.2 静电纺丝过程简述	210
7.4.3 静电纺丝的分类和特点	211
7.4.4 静电纺丝装置	212
7.4.5 静电纺丝参数对超细纤维的影响	215
7.5 碳纤维	215
7.5.1 聚丙烯腈原丝	215
7.5.2 预氧化	216
7.5.3 碳化	218
7.5.4 PAN原丝预氧化、碳化新工艺	218
7.6 中空纤维	221
7.6.1 熔融纺丝方法	221
7.6.2 湿法纺丝方法	224
7.6.3 复合纺丝	224
7.7 非织造材料	224
7.7.1 非织造的基本原理和结构特点	225
7.7.2 非织造材料的生产工艺	225
7.8 其他纺丝方法简介	231
7.8.1 复合纤维纺丝法	231
7.8.2 模板合成法	232
7.8.3 牵伸法	232
7.8.4 相分离法	232
7.8.5 电化学合成法	232
7.8.6 膜裂法	232
参考文献	233

第8章 其他成型加工新技术

8.1 辐射加工	234
----------------	-----

8.1.1	辐射加工原理及特点	234
8.1.2	高分子材料的辐射交联	235
8.1.3	高分子材料的辐射接枝改性	240
8.1.4	高分子材料的辐射固化	242
8.2	微波加工	253
8.2.1	微波加工原理及特点	253
8.2.2	微波加工技术的应用	254
8.3	表面涂层新技术	255
8.3.1	热喷涂	256
8.3.2	化学镀	266
8.4	焊接成型与固相成型	270
8.4.1	焊接成型	270
8.4.2	固相成型	272
	参考文献	273

第9章 高分子材料成型加工中的计算机辅助技术

9.1	装备控制	275
9.1.1	塑料机械控制系统现状及发展趋势	275
9.1.2	闭环控制与开环控制	276
9.1.3	计算机在注射机上的应用	277
9.2	塑料加工过程控制与模拟	279
9.2.1	计算流体力学分析理论基础	279
9.2.2	常用塑料加工过程模拟软件	282
9.2.3	POLYFLOW 在塑料挤出成型中的应用	284
9.2.4	POLYFLOW 在聚合物共混过程中的应用	285
9.3	计算机辅助注射模具设计	286
9.3.1	塑料模具在塑料成型中的重要性	286
9.3.2	注塑模具结构设计的一般步骤	287
9.3.3	常用设计软件	288
9.3.4	PRO/E 在注射模具设计中的应用	289
9.4	快速原型技术在高分子材料加工中的应用	292
9.4.1	光固化成型工艺	293
9.4.2	选择性激光烧结快速成型工艺	293
9.4.3	熔融沉积成型工艺	294
9.4.4	三维打印快速成型	295
	参考文献	297

第10章 高分子材料循环利用技术进展

10.1	高分子材料与环境	298
10.2	不同国家高分子材料的回收与再循环	302
10.2.1	亚洲	303
10.2.2	欧洲	303
10.2.3	北美洲	305

10.3	高分子废弃物的前期处理	306
10.3.1	高分子废弃物的收集	306
10.3.2	高分子废弃物的分离技术	306
10.3.3	高分子废弃物的粉碎技术	311
10.3.4	高分子废弃物的清洗和干燥	314
10.4	高分子废弃物的循环利用	315
10.4.1	高分子废弃物的物理循环	315
10.4.2	高分子废弃物的化学循环	317
10.4.3	高分子废弃物的能量循环	319
10.5	生物降解高分子材料	320
	参考文献	322



第1章 绪 论

自 1868 年以樟脑为增塑剂用硝基纤维素酯制备赛璐珞的技术诞生以来，合成高分子材料已经为人类服务了 140 余年。在这一百多年的发展中，高分子材料经历了一个由慢到快的发展过程。1920 年以前，人们对高分子材料的认识不清，发展较慢；直到 1920 年，H. Staudinger “论聚合”的发表正式确立了高分子的概念，才使高分子材料走上了快速发展的道路。20 世纪 50 年代是高分子合成大发展时期，1950 年，全世界塑料的产量为 200 万吨。20 世纪 60 年代之后，高分子物理的研究逐渐深入，高分子结构与性质关系的阐明为高分子的理论研究和实际应用架起了桥梁，促进了以工程塑料为代表的新型高分子材料的发展。随着高分子工程技术的进步，高分子材料的品种和应用范围不断被扩展，产量也迅速上升。到 2000 年，世界塑料产量达到 1.81 亿吨，2010 年这个数字变成了 2.45 亿吨，塑料因产量的年均增长率超过了金属等传统材料而成为了发展最快的材料。如今，以塑料为代表的高分子材料制品已经深入到国民经济和日常生活的各个领域，成为了应用最广且不可替代的材料。

1.1 成型加工对高分子材料和制品的重要性

高分子材料成型加工就是利用一切可以实施的技术和手段使聚合物原料成为具有一定外形又有使用价值的物件或定型材料的工艺过程。由于高分子材料分子量巨大以及结构差异，导致其流变性能特异，产品最终的性能将强烈依赖于原材料采用的成型加工技术和经历的加工工艺过程。因此，国际上已不再将高分子材料加工视为单纯的物理成型过程，而是把它看作控制制品结构和性能的中心环节，加工成型已经从一项实用技术变成一门应用科学。高分子材料最终是以制品的形式来实现其使用价值的，成型加工是聚合物从材料走向制品的必经环节，因此，从应用角度来讲，赋予高分子材料最终形状和使用方式的成型加工技术有着重要的意义。

在 高分子材料的成型加工中，聚合物的结构和分子量对成型方法和成型工艺条件的选择起着决定性作用，这些成型方法反过来又对所成型制品的内部微观结构和最终宏观性能产生影响。例如，橡胶分子柔顺，而且分子链上含有双键，一般需要塑炼、压型、硫化等几道工序来完成从原材料到制品的转变；而一般塑料的分子量宽广，可塑性更强，可以采用多种加工技术和手段而使同一材料转变成成为不同的制品，例如聚乙烯可以被吹成膜、拉成丝，也可以注射成多种制品。但超高分子量聚乙烯由于熔融黏度太大已经不能用普通的塑料成型方法进行加工，不得不开发专用技术。定向聚合、可控聚合、分子自组装等大分子制备技术的发展可实现从分子水平对材料进行结构控制，从而使得聚合物制品的性能更加优越。

温度和力场对高分子的形态发展和相态结构的形成具有重要影响。根据聚合物所表现的力学性质和分子热运动特征，其聚集态可划分为玻璃态、高弹态和黏流态，在聚合物及其组成一定时，聚集态的转变主要与温度有关。不同聚集态的高分子，由于主价键与次价键共同作用构成的

内聚能不同而表现出一系列独特的性质，这些性质在很大程度上决定了高分子材料对加工技术的适应性，并使高分子在加工过程中表现出不同的行为。高分子在加工过程中都要经历聚集态的转变，了解这些转变的本质和规律就能选择适当的加工方法和确定合理的加工工艺，在保持高分子原有性能的前提下，能以最少的能量消耗，高效率地制备性能良好的产品。聚合物在玻璃态下表现为坚硬的固体，不宜进行引起大变形的加工，但可通过车、铣、削、刨等进行加工。玻璃化温度 (T_g) 既是塑料的熔融加工温度下限，也是无定形塑料制品的使用温度上限。玻璃化温度与黏流温度 (T_f) 形成的温度区间被视为聚合物的加工窗口，这个区间越大，聚合物的加工性越好。在 T_g 以上的高弹态，高分子的模量降低，表现出类橡胶流动行为，形变能力显著加大，此时辅以一定的应力，材料将产生较大变形，从而可进行拉伸、吹塑等一系列加工行为。例如，拉伸倍率不同，聚合物的取向度不同，材料的力学性能也将不同，通过控制拉伸方向及拉伸比就可得到不同结构的双向拉伸薄膜、单向拉伸打包条等制品。此外，更为精密的拉伸制孔技术已经使聚合物作为锂离子电池隔膜获得了应用。在黏流温度以上，聚合物转变为熔体，其流动性大大增加，从而可进行挤出、注射、纺丝等加工行为，同一种材料经不同方式的加工可以得到不同性能、不同外形结构和不同用途的产品。

对于结晶型聚合物，通过控制加工过程中的冷却温度和冷却时间，使其结晶度发生变化，可以分别得到透明或非透明的制品。例如，聚对苯二甲酸乙二醇酯 (PET) 既可被加工成结晶度较高的纤维，也可被加工成结晶度较低的透明塑料瓶；而拉伸前后的聚乙烯的晶型也会发生从球晶到串晶的变化，从而影响其性能。添加助剂或其他功能性填料，既可改变材料的性能，同时对加工方法和加工工艺也提出了要求，促进了加工设备的进步。例如，不添加增塑剂的聚氯乙烯树脂几乎不可能进行注射成型，而高填充的母料对挤出机的塑化和混炼能力有较高要求。可见加工条件对聚合物制品最终的微观结构和宏观性能具有重要影响，制品最终的性能是材料组成和加工工艺综合效应的结果。通过成型加工方法控制高分子及其共混复合材料的凝聚态结构形态和性能，是获得高性能高分子材料制品的重要手段。了解和掌握这些知识对加工方式的选择和加工技术的开发都具有重要意义。

1.2 高分子材料成型加工技术的发展

高分子材料成型加工包含两方面的功用：一是赋予制品以外形（包括形状和尺寸）；二是通过控制组分、配比以及加工工艺条件，对制品内部的结构和形态进行控制，以保证制品获得最优化的性能。因此，高分子材料成型加工技术的发展也包括对应的两种：一是满足制品外形的需要，如为满足超大或超小制品的要求而开发的大型挤出机和微型注射机，为满足制品精细加工的需要而开发的精密挤出、精密注射等；二是通过改变物料在加工过程中的熔融状态、流变轨迹以及晶体结构和多相聚合物的相形态而实现在不同尺度上对高分子制品内部影响其性能的结构进行调控，如多层挤出、微孔发泡等技术。

不可否认，高分子材料成型加工技术更多地是通过成型装备实现的，所以，加工技术的进步更多地体现在加工设备的创新上。近年来，随着高分子工业的快速发展，成型加工技术不断创新，涌现出了一批极有价值的新型加工方法和加工设备，使高分子材料成型加工方法更加多样化、更加先进、更加完善并更易于应用。具体体现在：

1.2.1 合成-复合-成型一体化技术

在过去相当长的一段时间里，高分子工业分为两大部分，即合成工业和加工工业。高分子在上游的树脂厂被合成后需经冷却和粒化工艺，以颗粒或粉体的形式提供给下游的加工企业，然后再被加工成制品。如此，从原材料到制品的整个生产过程中，高分子树脂至少要经历两次加热与冷却，不仅生产周期长，而且造成了能源浪费。合成-复合和反应-成型一体化技术成功地解决了

这一问题。

(1) **反应成型技术** 反应成型技术将聚合物的合成和加工成型融为一体,赋予传统的加工设备(如螺杆挤出机等)以反应器的功能。如反应挤出是将单体、催化剂及其他助剂或需要进行化学改性的聚合物由挤出机的加料口加入,在挤出机中进行化学反应形成聚合物或经化学改性的新型聚合物。同时,通过在挤出机头安装适当的口模,可直接得到相应的制品。反应注射成型则是指将两种或两种以上的低分子、低黏度的单体或低聚物分别在压力下压入一个混合室发生瞬间碰撞混合,并迅速注入模腔,具有高度化学活性的单体或低聚物经碰撞后能在模腔内发生快速化学反应成为聚合物,并最终通过交联或相分离形成固体塑料制品的方法。反应注射具有物料黏度低和成型温度低两大突出优点,在成型薄壁长流程制件、复杂形状制件、有加强筋或插入件的制件以及纤维增强材料的制件方面具有优势,且产品不容易产生内应力。反应加工具有反应周期短、生产连续、工艺流程短、节约能源和资源、环境污染小等诸多优点,是未来加工成型技术的发展趋势。

(2) **釜内合金技术** 传统的聚合物共混复合技术需要将两种树脂进行初混合后再二次熔融,受材料相容性和流变性能的制约,共混物内部的相畴尺寸难以控制。釜内合金技术是基于反应器颗粒的概念而开发的一种新型合金技术。它通过控制烯烃单体在多孔球形载体催化剂上聚合增长,得到完全复制催化剂形态、具有球形多孔结构的聚合物粒子;再以该粒子作为微反应器,引入多种烯烃单体与之共聚,生成聚烯烃合金,从而使聚合物合金一次制成。该技术目前已成功完成聚丙烯合金的生产,该合金粒子具有形态好、粒径分布窄、堆密度大、传输流动性好、内部组成和形态可调、抗冲击性能好和机械强度大的特点,为聚丙烯的扩展应用开辟了广阔的市场。反应器颗粒技术是催化剂和聚合过程的突破性进步,不仅实现了合成-复合的一体化,使聚合工艺过程大为简化,而且成为聚合物合金制备的最佳途径。

1.2.2 塑化和混炼技术

开炼、密炼和双螺杆混炼一直是聚合物前期加工的基础,而且仍然是当下聚合物混炼设备的主流。随着纳米填料和各种功能性填料在聚合物中的广泛应用,对混炼设备的要求也越来越高,促进了混炼设备的革新和进步。典型代表有以下几个。

(1) **FMVX (farrel mixing, venting and extruding) 混炼机组** 该设计将密炼机和单螺杆挤出机集成在一起,混炼的主要功能由密炼机完成,单螺杆挤出机的作用是进一步补充混炼和稳定挤出。其特点是克服了密炼机间歇式工作的缺点,虽然没有在加工原理上有更多的创新,但实用效果优良,这种集成化的思路非常有价值,在其他成型新技术中也多有体现。

(2) **多螺杆混炼挤出** 主要包括三螺杆挤出和行星螺杆挤出。三螺杆挤出中三根螺杆排列形式的变化增加了物料混炼、均化和剪切的次数,其混炼、熔融和分散混合的能力更强,特别适合于多相多体系物料的共混改性和连续挤出成型。其典型代表是华南理工大学聚合物新型成型装备国家工程研究中心瞿金平院士及其研发团队开发的新型聚合物动态三螺杆挤出机,该挤出机在物料输送过程中引入振动力场以强化物料塑化、混炼效果,是一种先进的多螺杆挤出设备。行星螺杆挤出机是一种真正意义上的多螺杆挤出设备。行星螺杆挤出机的总啮合次数非常高,物料被捏合、挤压、剪切和搅拌的次数也相应增多;加工过程中物料被挤压成薄膜,热交换面积大,传热和排气效果好,并且其流道呈流线型,无死角,具有良好的自洁作用。所以,行星螺杆挤出机具有塑化和混炼效果好、停留时间短、产量高、能耗低、助剂分散效果好等优点,可用于生产质量要求较高的制品,尤其适合热敏性树脂的加工。

(3) **无螺杆混炼挤出** 包括磨盘挤出、叶片挤出等。磨盘挤出机的设计基础是基于 Weissenberg 效应,其主要混炼部件是具有特殊结构的旋转磨盘和固定磨盘。磨盘间的混炼与增压效应源于聚合物熔体的法向应力,物料经过数对旋转盘和固定盘的剪切、破碎作用,使物料熔融、混炼并向前输送,正是这种特殊的流动改善了设备的混炼效果,该机型尤其适合于高填充母料和纳

米填料的分散。叶片式挤出机改变了传统的螺杆加工机械剪切形变起支配作用的拖曳输送机理，是一种由拉伸形变支配的具有正位移效应的输送机理。其核心部件是由具有圆柱内腔的空心定子、置于定子内腔中并与定子偏心的圆柱形转子、沿转子圆周方向均匀分布的叶片以及布置在转子两侧的挡料板等组成的叶片塑化输运单元。旋转中由于流道收敛的作用，会产生和流动方向一致的拉伸速度梯度场，给物料施加拉伸混合的作用，通过空间容积变化实现了物料的正位移输送。

1.2.3 成型加工技术

(1) **精密成型技术** 以光导纤维、医用导管、音像片基、光盘等为代表的一系列高精密制品的市场需求，对塑料制品的加工精度提出了更高的要求，此外，特种材料，特别是一些危险和有毒物料的加工也需要精密控制，这促进了挤出和注射成型向精密化发展。精密挤出成型主要包括精密塑化、精密控制、精密成型等三方面的技术，其主要特征是挤出过程中工艺参数波动很小，挤出设备工作状态非常稳定，为了达到这些要求，从螺杆结构、熔体泵的配置、使用在线检测系统到挤出机头的设计和调控都要实现准确控制和联动。对精密注塑成型而言，除了对注射机的要求外，模具设计的合理性以及模具的制造精度都是影响制品尺寸精度的重要因素。在精密成型技术中广泛使用了闭环电路以求实现加工工艺参数的可控，数字滤波技术的应用进一步提高了外界因素对流量、温度、压力等的干扰，加上计量系统的精密控制和成型零部件加工精度的提高，使塑料制品的加工精度不断提高。不仅如此，通过加工手段对流动场进行精密控制，还使材料内部的结晶、分散、微纤等精细结构得到调控，从而提高了产品的整体性能。

超微小精密注射成型是精密注射成型中极具挑战的发展方向。在微注射成型中，浇注和流道系统占注射总量的75%以上，注射压力在280MPa左右（比一般的注射成型高50%以上），注射速率达到800mm/s以上（普通注射成型机的注射速度为200mm/s），零件的质量仅以毫克计，因此微型注射机至少要具备高注射速率、精密注射量计量、快速反应等3个方面的能力，这对进行控制的微机电系统和用于成型的微机械系统提出了严格的要求，微注射成型的发展推动了包括微电子学、微机械学、微动力学、微流体学、微热力学等微纳科学的研究。此外，高精尖的加工技术，如光刻技术，如微细电火花加工、微车、磨和铣削加工等加工技术已经应用在微型模具的加工上，促进了材料、设计、制造、控制、测试等技术领域的科技进步。

(2) **振动加工技术** 将电磁振动技术引入聚合物的熔体加工，实现了塑料加工由“稳态”到“动态”的转变，是近年来塑料加工技术的一种创新。目前挤出成型有两种引入振动的方式：一是机头内引入振动；二是整个加工过程置于振动之中。在挤出成型中引入振动力场，侧重于通过改变挤出过程参数（压力、温度、功率）来改善挤出特性。譬如螺杆轴向振动可在对物料产生动态剪切的同时，通过塑化和输运空间随时间的周期性变化对物料产生附加拉压形变，而使物料塑化输运过程中传质传热效果被强化，从而提高塑化混炼效果。振动使得挤出熔体所需的压力降低，平均挤出流率增大，挤出功率降低，挤出质量提高。同样，将电磁式直线脉冲用于驱动注射机的螺杆，可使注射成型全过程均处于周期性振动状态。引入振动力场后，一方面，熔体的压力随螺杆脉动的周期性变化使熔体黏度及弹性降低，流动阻力减小，加速了充模过程，成型温度可以在一定程度上降低；另一方面，模腔充满熔体后，螺杆继续作轴向脉动，使冷却缩孔能得到快速补充熔料，缩短保压时间，提高成型效率。

(3) **异型工件成型技术** 在实际应用中难免遇到一些形状复杂的制件，它们不能用侧抽芯机构进行抽芯，所以无法用普通的注射成型方法进行加工。熔芯注射成型就是专为内部不规则无法用侧抽芯机构抽芯的异型制件注射成型而开发的技术。这种方法需要预先用低熔点金属合金铸造型芯，然后将型芯固定在注射模具中，再进行塑料熔料的注射，使其围绕芯件充模而形成制件，之后再将其熔去而获得制品。这种技术适合那些形状复杂、中空和不宜机械加工的复合材料制品的注射成型。例如水阀、汽车进气分配管等弯曲制品，过去都由金属铸造，如今改用碳纤维增

强尼龙树脂复合材料来替代,是“熔芯注射成型”技术成功实现了材料的转换。熔芯注射成型技术虽然实现了异型工件的注射成型,但它需要两套模具分别成型金属型芯和产品,装置也较庞大,因此,对小批量制品的生产来说是不合算的。

对于形状复杂而加工批量又小的异型工件,可以采用塑料激光成型技术进行成型。塑料的激光加工技术是利用激光束与有机高分子物质相互作用的特性对塑料进行切割、焊接、表面处理、打孔及微加工的一门新兴加工技术。其基本原理是用高度聚焦的激光束垂直照射待变形的塑料基板,使其局部吸收热量而产生变形,通过设计激光束的扫描路径,比如直线、平行直线、不平行直线等,就可以产生不同的三维变型,从而达到加工的目的。激光加工为非接触式加工,速度快、无噪声,不需要模具,可实现各种复杂形状的高精度加工,特别适合于单件小批量或大型工件的生产。激光和计算机控制技术相结合可使激光加工技术在工业生产上实现全自动化,其具有普通加工技术不可比拟的优势。基于上述特点,激光塑性成型技术在精密仪表、产品试制、航天等工业部门均有着广阔的应用前景。

(4) 非织造技术 在聚合物纤维成型技术方面,非织造技术发展较快。非织造材料与传统纺织品有很大的差异,前者是让纤维呈单丝无规状态,通过干法成网、湿法成网和聚合物成网等物理或化学的方法直接制成类似布料状的网状结构纤维制品,由于没有经过编织,也不具有编织结构,其产品也被称为无纺布;而后的成纤(这一工艺常被称为纺丝)与成网是两个独立的工艺过程,成网需要按一定的规则进行编织,织物中经纬纱线相互交织,因此其产品被称为纺织品。非织造技术被誉为纺织工业中的“新兴产业”,成型工艺有水刺、热黏、熔喷、针刺等,蒸汽喷射法等新技术也在不断开发之中。伴随着非织造材料和技术的进步,其产品的应用范围也日益扩展。除了卫生吸收性产品、医疗用品及劳保文体用品外,在土工布、过滤、防水、包装材料等领域的市场份额也在逐年增加,服装用无纺布的开发也展现出良好的前景。

静电纺丝技术是完全不同于传统熔融纺丝和溶液纺丝的一种非织造材料制备技术,也是纳米纤维最重要的制备方法之一。这一技术的核心是高分子流体经静电雾化,在静电场中产生流动与拉伸变形,最终得到超细纤维,纤维堆砌成为纤维毡后可在生物、医用、功能材料等领域获得应用。目前,溶液静电纺丝的研究相对成熟,但需要脱出溶剂,工艺步骤较为繁复;熔融静电纺丝工艺具有直接成型的优点,但因对设备要求高、易受环境因素影响和纤维直径较粗等特点研究进展相对缓慢,需要给予更多的关注。

1.2.4 辅助成型加工技术

辅助加工技术不仅扩大了原成型加工方法的使用范围,而且在节约能源、提高效率、保障制品质量等方面发挥了奇效,给传统的聚合物加工方法注入了新的活力。

(1) 流体辅助加工技术 流体辅助加工技术就是将流体引入到聚合物的加工过程中来,借助其压力流动和冷却作用,使制品的成型更为方便也更为高效。气体辅助注射成型是最先工业化的流体辅助技术。近年来,一些新技术,如振动气辅注射技术、多腔控制气辅注射技术、气辅共注射成型技术及气辅挤出成型技术的出现推动了气辅成型技术的进步。特别是气体辅助挤出成型技术,它通过将气体引入挤出过程,使其在聚合物熔体和口模壁之间形成了一层极薄但很稳定的气垫层,从根本上改变了传统的聚合物挤出加工中熔体和挤出口模壁之间大多是非滑移粘着的挤出方式,让聚合物熔体的流动由剪切流动变成塞流,使得由于剪切速率不同而造成的形状差异降到最低点,保障了挤出物形状同口模的断面基本一致,有效降低了传统挤出方法成型异型材过程中定型的难度。水辅助注射技术的成型原理与气体辅助注射基本相似,只是流体介质为介于 $10\sim 80^{\circ}\text{C}$ 的水。水辅注射的优点一方面在于水的传热速率快,使制件的成型周期大为缩短(与气辅注射技术相比,用这种技术成型的塑料制品的冷却时间可减少75%);另一方面在于水不可压缩,可保证制品外形美观,尺寸稳定,并且成本较低,可生产壁厚更薄、更均匀,内表面较光滑的制件。

以上两种流体辅助加工技术都是熔体和流体以先后进入模腔或流道的形式进行辅助成型。在新开发的可气化液体辅成型技术中,经预热可气化的液体从喷嘴注入塑料熔体中,与熔体一起进入模腔,液体在模腔中受到塑料熔体的加热而被气化并将熔体推向模腔表面,气体冷却后变为稳定状态存在于制件之中。这种成型方法对塑料的适应性更强,同时制件的性能也发生了变化,是流体辅助加工技术一种新的发展动向。

(2) 计算机辅助技术 计算机辅助技术主要包括计算机辅助设计技术 (computer aided design, 简称 CAD), 计算机辅助制造技术 (computer aided manufacturing, 简称 CAM) 以及计算机辅助工程分析技术 (computer aided engineering, 简称 CAE)。计算机辅助技术在高分子材料加工中的应用主要体现在装备控制、过程模拟以及模具设计上。塑料加工设备通过计算机控制实现了运行的自动化和在线反馈,不仅提高了生产效率,而且保障了制品质量。计算机模拟的最大优点是以并行设计的方式代替传统的按顺序决定方式,从而可以了解所有相关因素在设计阶段的相互作用,使影响产品质量和加工性的关键问题可以在产品开发周期中及早得到评估优化,从而可以节省大量的时间及资金。例如计算流体力学通过对包含有流体流动和热传导等相关物理现象进行系统分析,以数值计算和图像显示的方法对注塑成型加工中的压力分布、充模情况和熔接痕等进行预测和评估,从而避免了模具设计和工艺控制的盲目性。

快速成型制造技术 (rapid prototyping and manufacturing, RP&M) 借助计算机、激光、精密传动和控制等现代手段,将计算机辅助设计与计算机辅助制造集成于一体,能在无传统加工设备和模具的情况下直接制造产品,是计算机辅助塑料加工的应用典范。近年来兴起的三维打印快速成型 (three dimensional printing and gluing, 3DP) 技术,更是可以直接扫描待加工或模仿制件的外形,通过计算机识别进行程序设计,再控制工作台和喷头的相对运动,使从喷射头直接射出的液态工程塑料按设定的方式堆积固化 (熔丝沉积) 形成产品,因其材料较为广泛、设备成本较低且可小型化到办公室使用而引起了广泛关注,得到快速发展。

综上所述,成型加工对高分子材料的发展和具有决定性的作用。新型的加工技术使高分子材料制品无论从外形、尺寸、内部组成和结构还是制品的品种和应用范围上都获得了空前的进步,并使其在现代社会生活中取得了不同替代的地位。高分子材料的成型加工是集材料、机械、控制、制造等多学科为一体的综合化技术,深入研究高分子材料成型加工技术与装备,对最大限度地发挥聚合物的特性,实现对制品的精确加工,提高产品的使用性能具有重要意义。