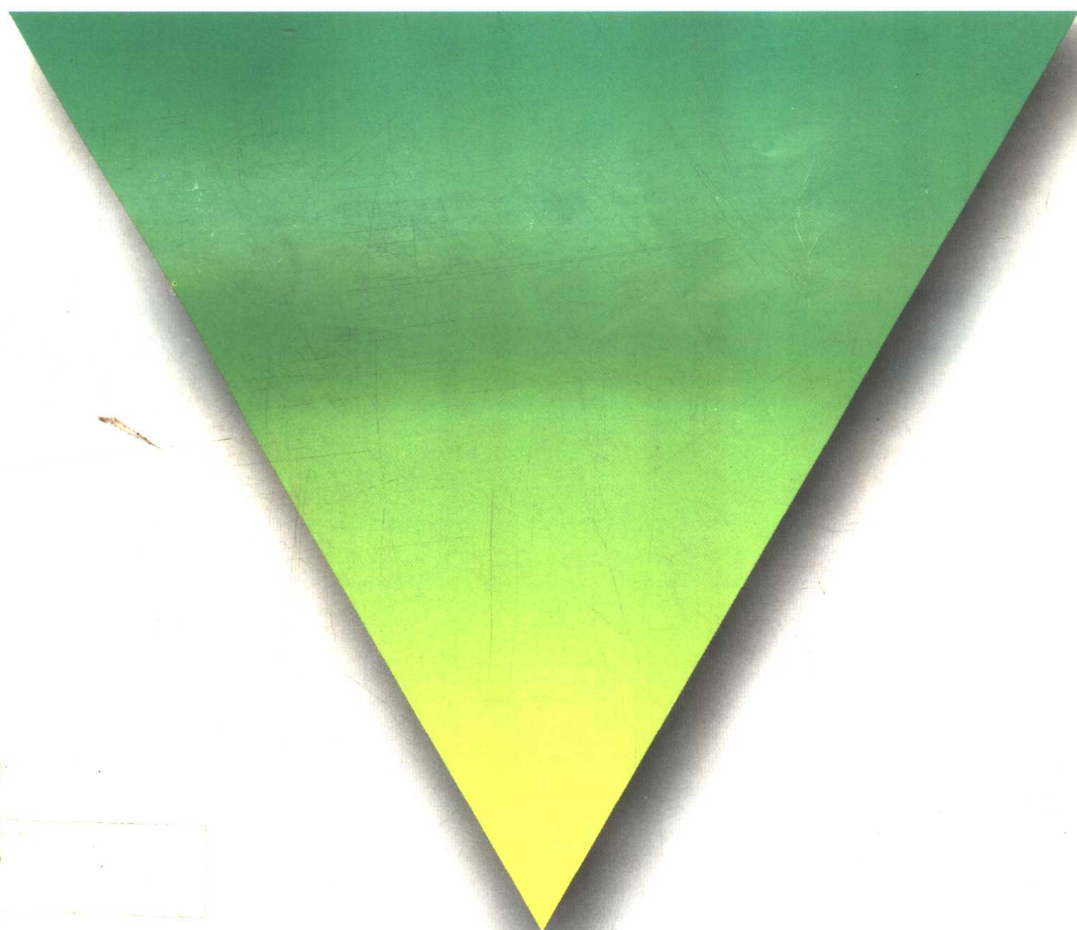


· 高等学校轻工专业教材 ·

# 塑料成型工艺学

(第二版)

黄 锐 主 编 · 曾 邦 禄 副 主 编



中国轻工业出版社

66

高等学校轻工专业教材

# 塑料成型工艺学

(第二版)

黄 锐 主编 曾邦禄 副主编

中国轻工业出版社

### 图书在版编目(CIP)数据

塑料成型工艺学/黄锐主编. — 2版. — 北京: 中国轻工业出版社, 1997

高等学校轻工专业教材

ISBN 7-5019-1982-8

I. 塑… II. 黄… III. 塑料成型—生产工艺—高等学校—教材 IV. TQ320.66

中国版本图书馆CIP数据核字(97)第01211号

### 中国轻工业出版社出版发行

(100740北京市东长安街6号)

责任编辑: 王 淳

北京市卫顺印刷厂印刷 新华书店经销

1997年5月第1版 1997年5月第1次印刷

开本: 787×1092毫米 1/16 印张: 28.5

字数: 690千字 印数: 1—4000册

定价: 45.00元

## 第二版编写说明

本教材根据全国高校塑料工程专业教材委员会讨论制定的编写大纲,对1983年第一版的《塑料成型工艺学》本科教材进行了修订。此次修订,除对第一版教材中所有各章内容,针对近年来的发展、变化进行了修改、充实外,还在原有部分内容的基础上,增写了中空吹塑和涂层两章。

本书第二版共分十四章。第一章绪论,介绍塑料成型工艺及塑料成型加工工业的一般情况。第二章讨论各种成型工艺共同的基本理论。第三章介绍各种塑料的配制方法并简单讨论各种助剂的作用和工艺性能。第四至第十三章介绍各种塑料成型方法和成型过程的分析。第十四章为塑料制品的机械加工、修饰和装配。

本书除作为高等学校塑料工程及相关专业的教材外,也可供从事塑料制品生产及高分子材料研究开发的科技人员阅读参考。

第二版修订分工如下:第一、三、十、十四章及第六章中少量内容,由四川联合大学(成都科技大学)黄锐编写;第二章由四川联合大学杨鸣波编写;第四、十三章由四川联合大学曾邦禄编写;第五章由四川联合大学林师沛、刘忠仁编写;第六、七、九章由天津轻工业学院张明善编写;第八章由大连轻工业学院肖作顺编写;第十一、十二章由天津轻工业学院许健南编写。全书由主编黄锐、副主编曾邦禄负责统稿。

在编写过程中,得到中国轻工总会人教部、中国轻工业出版社及有关兄弟院校领导和教师们的帮助与支持,在此谨致以衷心的感谢。本书第一版主编张承琦教授由于年事和身体原因,不再参与第二版的工作,对他在以往工作中所付出的辛勤劳动和作出的成绩,编者谨表示深切的感谢。

由于水平所限,难免有不足和错误之处,我们诚恳希望使用本书的读者批评指正。

编者

1996年5月

2A05/101

# 目 录

<b>第一章 绪论</b> .....	(1)
1.1 塑料成型加工及其重要性.....	(1)
1.2 塑料成型工业的过去和未来.....	(2)
1.3 塑料制品的生产工序和组织.....	(3)
1.4 本课程的主要内容和要求.....	(4)
<b>第二章 塑料成型的理论基础</b> .....	(6)
2.1 概述.....	(6)
2.2 聚合物的流变行为.....	(6)
2.3 聚合物的加热与冷却.....	(24)
2.4 聚合物的结晶.....	(26)
2.5 成型过程中的定向作用.....	(34)
2.6 聚合物的降解.....	(39)
2.7 热固性塑料的交联作用.....	(42)
<b>第三章 成型用的物料及其配制</b> .....	(44)
3.1 概述.....	(44)
3.2 粉料及粒料.....	(44)
3.3 溶液.....	(76)
3.4 分散体.....	(79)
<b>第四章 压缩模塑</b> .....	(86)
4.1 概述.....	(86)
4.2 预压.....	(86)
4.3 预热.....	(89)
4.4 压缩模塑用的设备.....	(93)
4.5 模压过程和操作方法.....	(95)
4.6 模压成型的控制因素.....	(98)
4.7 模压成型中容易产生废品的类型、原因及其处理方法.....	(102)
4.8 冷压烧结成型.....	(102)
<b>第五章 挤出成型</b> .....	(105)
5.1 概述.....	(105)
5.2 挤出设备.....	(105)
5.3 单螺杆挤出原理.....	(116)
5.4 单螺杆结构设计的改进.....	(125)
5.5 双螺杆挤出原理.....	(130)

5.6	挤出所需的机械功与热量	(135)
5.7	几种制品的挤出工艺	(135)
<b>第六章</b>	<b>注射模塑</b>	(145)
6.1	概述	(145)
6.2	注射模塑设备	(147)
6.3	注射模塑工艺过程及控制因素	(154)
6.4	注射模塑工艺条件的分析讨论	(161)
6.5	几种常用塑料的注射模塑特点	(165)
6.6	热固性塑料的传递模塑和注射模塑	(171)
6.7	反应注射模塑	(176)
6.8	注射模塑的发展	(185)
<b>第七章</b>	<b>中空吹塑</b>	(197)
7.1	概述	(197)
7.2	中空吹塑设备	(197)
7.3	挤出吹塑工艺过程及控制因素	(205)
7.4	注射吹塑	(209)
7.5	拉伸吹塑	(211)
7.6	多层吹塑	(216)
7.7	大型中空吹塑	(218)
7.8	中空吹塑的一些新技术	(220)
7.9	中空吹塑的发展	(221)
<b>第八章</b>	<b>层压塑料和增强塑料的成型</b>	(222)
8.1	概述	(222)
8.2	增强作用和胶接作用	(223)
8.3	树脂	(225)
8.4	增强物及其表面处理	(227)
8.5	高压成型	(241)
8.6	低压成型	(245)
8.7	缠绕成型	(252)
8.8	其它成型	(257)
8.9	热塑性增强塑料	(262)
<b>第九章</b>	<b>泡沫塑料的成型</b>	(267)
9.1	概述	(267)
9.2	机械发泡法	(268)
9.3	物理发泡法	(271)
9.4	化学发泡法	(275)
<b>第十章</b>	<b>浇铸</b>	(295)
10.1	概述	(295)

10.2	静态浇铸	(295)
10.3	嵌铸	(308)
10.4	离心浇铸	(311)
10.5	流延铸塑	(314)
10.6	搪塑	(317)
10.7	滚塑	(320)
<b>第十一章</b>	<b>压延成型</b>	<b>(322)</b>
11.1	概述	(322)
11.2	压延设备	(322)
11.3	压延过程中的流动分析	(327)
11.4	压延工艺	(335)
11.5	压延成型的进展	(343)
<b>第十二章</b>	<b>涂层</b>	<b>(347)</b>
12.1	概述	(347)
12.2	压延法人造革的生产工艺	(347)
12.3	涂覆法人造革的生产工艺	(349)
12.4	层合法人造革的生产工艺	(358)
12.5	人造革的表面修饰	(359)
12.6	聚氨酯人造革的生产	(360)
12.7	金属制件的塑料涂覆	(364)
<b>第十三章</b>	<b>热成型</b>	<b>(369)</b>
13.1	概述	(369)
13.2	热成型的基本方法	(370)
13.3	热成型的设备	(375)
13.4	模具	(378)
13.5	工艺因素分析	(379)
13.6	热成型常用的塑料	(382)
<b>第十四章</b>	<b>塑料的机械加工、修饰和装配</b>	<b>(385)</b>
14.1	概述	(385)
14.2	机械加工	(385)
14.3	修饰	(398)
14.4	装配	(409)
<b>附录</b>		<b>(423)</b>
<b>主要参考文献</b>		<b>(446)</b>

# 第一章 绪 论

## 1.1 塑料成型加工及其重要性

人类社会的进步是与材料的使用密切相关的。人类要生存、要发展就离不开材料的使用。从石器时代、铜器和铁器时代发展到今天,人类使用的材料主要有四大类,即木材、水泥、钢铁、塑料。其中塑料是20世纪才发展起来的一大类新材料。塑料是高分子材料中最大的一类材料,目前世界高分子材料的年产量中,塑料约1.08亿吨,合成纤维约0.2亿吨,合成橡胶约0.09亿吨,其余如粘合剂、涂料、离子交换树脂等产量较少。由于自然条件的限制,木材的产量不可能有大的增长;水泥有良好的用途,但使用范围有局限性;世界钢铁的产量近十几年来几乎处于停滞状态;由于塑料的品种多,性能各具特色,适应性广,生产塑料所消耗的能量较金属低,因此唯有塑料工业仍保持着继续发展的势头。到90年代塑料的体积年产量已赶上钢铁,塑料在国民经济中已成为不可缺的材料。

塑料工业包含塑料生产(包括树脂和半制品的生产)和塑料制品生产(也称为塑料成型工业)两个部分。没有塑料的生产,就没有塑料制品的生产。但是没有塑料制品的生产,塑料就不能成为生产或生活资料。所以两者是一个体系的两个连续部分,是相互依存的。

塑料制品的生产是一种复杂而又繁重的过程,其目的在根据各种塑料的固有性能,利用一切可以实施的方法,使其成为具有一定形状有使用价值的制件或型材。当然,除加工技术外,生产成本和制品质量也应重点考虑。

塑料制品生产主要由原料准备、成型、机械加工、修饰和装配等连续过程组成(见图1-1)。

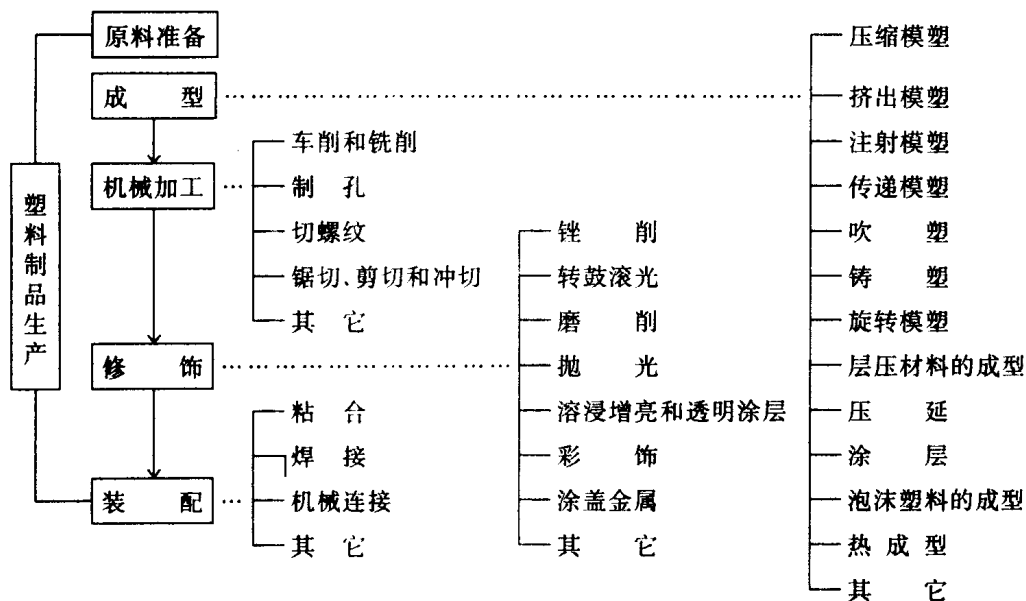


图 1-1 塑料制品生产的组成



成型是将各种形态的塑料(粉料、粒料、溶液或分散体)制成所需形样的制品或坯件的过程,在整个过程中最为重要,是一切塑料制品或型材生产的必经过程。成型的种类很多,如各种模塑、层压以及压延等。其它过程,通常都是根据制品的要求来取舍的,也就是说,不是每种制品都须完整地经过这些过程。机械加工是指在成型后的工件上钻眼、切螺纹、车削或铣削等,用来完成成型过程所不能完成或完成得不够准确的一些工作。修饰是为美化塑料制品的表面或外观,也有为其它目的,如为提高塑料制品的介电性能要求它具有高度光滑的表面。装配是将各个已经完成的部件连接或配套使其成为一个完整制品的过程。后三种过程有时统称为加工。对比来说,加工过程常居于次要地位。

## 1.2 塑料成型工业的过去和未来

就世界范围来说,塑料成型工业自1872年开始到现在已度过仿制和扩展并已转到了变革的时期。当塑料最初问世时,由于品种不多、对它们的本质理解不足,在塑料制品生产技术上,只能从塑料与某些材料有若干相似之处而进行仿制。作为借鉴的主要是橡胶、木材、金属和陶瓷等制品的生产。此后,塑料品种渐多,在其制品生产的不断实践和实验的基础上,对塑料和其各类制品的特征有了比较深入的认识,因此,不论在生产技术和方法上,都有显著的改进和扩展。这一时期的开始约在本世纪的20年代。50年代以来,由于各项尖端科学技术以及工业、农业等发展的需要,要求具有某些特种性能或性能特别优良的塑料制品,而且在制品数量、结构、尺寸和准确程度上也提出了更高的要求。基于此,并力求不使塑料固有性能在制品生产过程中下降。因而对许多原用的生产方法进行了更深入的研究和革新,对适合客观需要所设计的新型塑料和制品又根据具体的特点在生产上进行创新。革新和创新就是这里所说的变革。至今,不仅塑料制品的数量和应用种类都有了显著的增长,而且绝大多数的新旧生产方法也都逐渐形成合理的系统,使塑料制品的生产日益成为一个专业而又较大的生产部门。

塑料制品生产和塑料生产的增长几乎是同步的。世界塑料生产的年增长率在70年代以前平均为12%~15%;进入70年代以后,为4%~5%;80年代虽然基数已经较大,但仍然保持一定的增长,特别是在发展中国家增长较快。塑料在四大工业材料(钢铁、木材、水泥和塑料)中的年增长率总是居于首位。从我国的具体情况来看,塑料年产量的增长也较高。例如,1983年我国生产合成树脂1100kt,到1993年已增至5200kt。由世界各国的第12位升至第5位。就世界塑料发展的情况看,它的快速增长不完全是原有制品数量的单纯增加,而主要是应用范围的日益增大。这说明从事塑料工业者的任务比较繁重和与其它生产部门联系的重要性。现将塑料制品应用的主要部门和情况简述如下:

(1) 农牧、渔业 塑料薄膜和片材,在农业生产中的育苗、护理庄稼、塑料温室、畜舍和收割、蓄水、排水以及贮青等方面的积极作用都是十分显著的。因此,需求量的增长很快,迫切的要求是如何使这类制品耐用、价格便宜、易于回收和减少环境污染。其次,在农田排灌中还需要大量的管材和管件。在渔业方面,船支、鱼网、缆绳等也大量用到各种塑料。

(2) 包装 塑料在制造包装容器、货袋、货物护层和其它包卷用的材料方面已十分普遍,但如何迎合需要而兼具原用纸张、玻璃或金属包装的优点上,还需继续做大量的工作。

(3) 交通运输 汽车、火车、轮船等交通工具及相应的附属设施所用的塑料,按每辆或每艘计,逐年都在增加。

(4) 电气工业 电线、电缆、收录机、电视机等家用电器、计算机以及各种通讯设备所用的塑料数量,均与日俱增,而且要求产品性能在批量上一致和结构上的精致化和微型化。

(5) 化学工业 利用塑料轻盈和耐腐蚀等特性,力求改进或重建许多典型的化工设备。

(6) 仪表工业 将继续推广塑料在这方面的应用,主要用于制造主辅部件。

(7) 建筑业 原用的木材、灰泥和砖瓦已越来越多地改用了塑料。改用不完全是单纯的取代,更多的则是新技术和新结构的采用,这对整个建筑业都富有革命的意义。此外,在室内采光、给排水、顶板、地面、壁板及卫生设施等方面所用的塑料数量也越来越多。

(8) 航空工业 民用或军用飞机,采用塑料的数量和品种都在不断增加。用各种增强塑料作结构和覆面材料以及坐舱与卫生设施等的大量应用塑料,对减轻机体重量具有重要意义。

(9) 国防与尖端工业 由于塑料具有种种特殊性能,因此在国防与尖端工业中发挥了其它材料所不能代替的作用。目前在卫星、火箭、核工业及电子自动化技术等方面用的有各种烧蚀材料、耐腐蚀材料,增强塑料、工程塑料和各种功能性材料等。在常规武器中用作制造各种零部件等的塑料数量也相当可观。

(10) 家具 泡沫结构塑料能取代木材而做成多种家具,并使之兼备木质家具原来所没有的一些特性。其次,由模塑或热成型方法所制成的椅凳是颇为实用的。家具并不限于家用,机关、工厂、学校和一些公共场所也大量需要。

(11) 体育用具和日用百货 在这方面也有极快的发展,主要是提供新型和高性能化产品。

事实上,塑料的使用几乎进入了国民经济的一切领域,与工农业和人民生活密切相关,塑料已成为一种不可缺少的材料。

从目前情况看,塑料制品生产今后发展的方向是:简化生产流程、缩短生产周期;加深对塑料在成型过程中所发生的物理和化学变化的认识,以改进生产技术、方法和设备;实现全面机械化和自动化;设计更大更新的设备以适应对大型、微型、精密或新型塑料制品生产的要求。

### 1.3 塑料制品的生产工序和组织

从原料到塑料,又从塑料到塑料制品的简单流程见图1-2。该流程共分(1)、(2)、(3)三个连续部分。图中纵向长方形表示过程;横向长方形表示原料、中间产物或成品;实线箭头表示流程前进的方向;虚线箭头表示该段流程前进的另一种方式。根据1-1节所述,当知(1)和(3)两部分是分别属于塑料和塑料制品两个生产部门的,而生产也确实是这样分工的。至于第(2)部分,按理也应属于塑料部门,但一般较大的成型工厂为了方便,也有将这部分归入自己的生产范围。这样,除能满足自己对塑料在配制上的多样性要求外,还

可以简化仓库的管理。

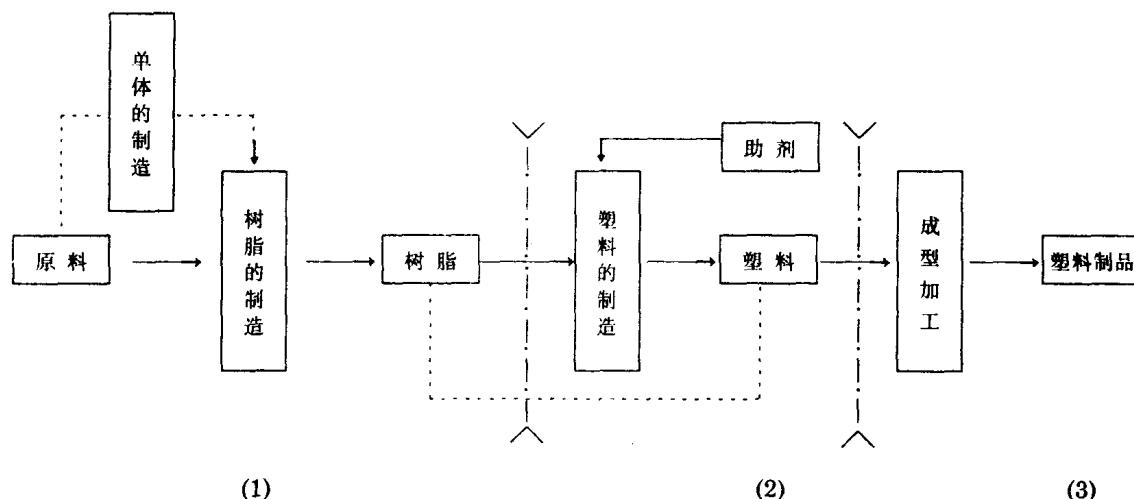


图 1-2 从原料到塑料制品的生产流程示意图

已如前说，塑料制品的生产由几个过程所组成。有些塑料在成型之前常需先进行塑料的制造(或配料)及预处理(包括预压、预热或干燥)等，可统称为原料准备。因此，生产塑料制品的完整工序共五个：①原料准备；②成型；③机械加工；④修饰；⑤装配。在任何制品的生产过程中，通常都应依上列次序进行，不容颠倒，否则在一定程度上会影响制品的质量或浪费劳动力和时间。如某些制品的生产不需完整地通过这五个工序，则在剔除某些工序后仍可按上列次序进行。

通常在生产一种新制品前，应先熟悉该种制品在物理、机械、热、电及化学性能等方面所应具备的指标，根据这些要求选定合适的塑料并从而决定成型加工方法，同时还应对成本进行估算以断定其是否合理。最后，再通过试制并确定生产工艺规程。在工艺规程中，对每个工序规定的步骤常非一个，必须先后分明。对每个工序的操作条件也须有明确的指标，并应规定所能允许的差值。有关防忌的事项也应列出，以保证生产的安全。当然，在实践的基础上工艺规程还须不断地完善。

成型工厂对生产设备的布置通常有两种体制：一种是过程集中制，就是将前列五种工序所用的各种生产设备分别集中起来进行生产。它的优点是宜于品种多、产量小而又变换快的制品生产；其缺点则在衔接生产工序时所需的运输设备多、费时费工和不易连续化。另一种是产品集中制，也就是按照一种产品所需生产过程实行配套成龙的生产。它宜于生产单一、量大和永久性强的制品。由于连续性很强，物料运输较方便，容易实现机械化和自动化，成本也因而得以降低。不管用那一种体制进行生产，均应在合理的段落进行技术检验站，以保证正常生产和制品质量。

## 1.4 本课程的主要内容和要求

本课程是在读者已具有热力学、化学、力学、质量与能量的传递、高分子化学及物理学和各种塑料性能的基本知识的基础上进行的，论及的内容主要是塑料成型工艺和有关

理论。

对工艺的叙述重在成型这一环节,共分十章(第四至第十三章)进行。至于机械加工、修饰和装配,所涉内容不多,所以合并为一章(第十四章)。论述工艺之前,有必要对所用各种塑料的配制进行论述,故放在第三章内进行。理论叙述,除在与工艺结合的情况下进行外,为了便于对一些共同的基本理论作系统的探讨和学习,集中并放在各种工艺的前面(第二章)。

学习时,要求在密切结合工艺过程的前提下尽可能地对每种工艺所依据的原理、生产控制因素以及在工艺过程中塑料所发生的物理与化学变化和它们对制品性能的影响具有清晰的概念,并进一步理解各种成型工艺所能适应的塑料品种及其优缺点。

对所用的设备和模具只概略地提出对它们的主要要求而不作详细的叙述,因还有与本门课程配合设立的两门独立课程。随着科学技术的进步,塑料制品生产中的计算机应用日趋成熟并继续有很快的发展,成为塑料成型加工工业改革与进步不可缺少的重要内容。由于已有专门的课程,本书中不作详细的介绍。

本书所介绍的内容,只是塑料成型加工中的基本原理、基本生产控制过程,限于时间和数学基础,对于一些理论问题,不作过多的繁复数学推导,而主要就其物理意义加以说明。对于不同的成型加工过程,由于塑料品种繁多,产品千变万化,不可能逐一进行仔细的介绍,只能就主要和典型的内容加以讨论。以此为基础,使学习者对一些新的改进和发展能较好地理解与掌握。

塑料成型工艺是一门实践性很强的课程,除了课堂教学外,还需在实验、实习中联系生产实际去理解和掌握,有些生产实际操作,还需在劳动实践中逐步去学会,这样学到的知识才是可以灵活运用的。

## 第二章 塑料成型的理论基础

### 2.1 概 述

塑料成型是一门工程技术,它所涉及的内容是将塑料转变为具有使用价值并能保持原有性能,甚至超过原有性能的材料和制品。

在所有的成型过程中,塑料都会发生物理和(或)化学变化,从而构成材料不同的形态结构,表现出不同的性能。因此,必须对这些变化有足够的认识,才能设计出合理的原料配方,确定出合理的成型工艺和对设备提出合理的要求。在此基础上进一步对材料进行结构和性能设计,构造出能满足不同场合需要的材料和制品。

本章将简要叙述塑料在成型过程中表现的一些共同的基本物理和化学行为——聚合物的流变、传热、结晶、定向和化学反应等现象。其它的一些内容,则将分散在以后各章中讨论。

### 2.2 聚合物的流变行为

#### 2.2.1 连续性、动量和能量方程

在聚合物加工中,大多数工程设计和工程分析都涉及到质量、动量和能量的传递。即人们常说的输运现象。连续性方程、动量方程和能量方程是描述这些输运现象的基本方程。但是,这些方程阐述的是物理学基本原理,单靠这些方程来评价流动问题是不够的,因为他们与液体的流变行为无关。而这些方程同具体的流变方程相联系,就可以分析和解决聚合物加工过程中的许多流变问题。

运动着的熔体的一个体积单元由密度 $\rho$ 、压力 $p$ 、温度 $T$ 的数值和速度向量 $V$ 确定。可以设想体积单元与运动着的整体是隔绝的,但却连续地跟随整体运动,而无任何力施加到体积单元上。体积单元的能量可穿过边界与整体进行交换,但质量不能变换。因为根据质量守恒原理,一个闭合系统的质量保持恒定,故体积单元内密度随时间的局部增减,必然完全反映在材料进入或离开该处的流动速率上,这样才能使体积单元的密度总变化为零。用连续性方程表示为:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} = - \left[ \frac{\partial(\rho v_x)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v_y)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho v_z)}{\partial z} \right]$$

同样考查体积单元的动量变化,根据牛顿第二运动定律,流体单元动量增加的速率等于作用于该流体单元上力的总和。动量增加的速率为 $\rho du/dt$ ,在直角坐标系中动量增加速率方程的各个分量的具体形式为:

$$\rho \left( \frac{\partial v_x}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_x}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_x}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial x} + \left( \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yx}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial z} \right) + \rho g_x$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_y}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_y}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_y}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial y} + \left( \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zy}}{\partial z} \right) + \rho g_y$$

$$\rho \left( \frac{\partial v_z}{\partial t} + v_x \frac{\partial v_z}{\partial x} + v_y \frac{\partial v_z}{\partial y} + v_z \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) = -\frac{\partial p}{\partial z} + \left( \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} \right) + \rho g_z$$

式中 $\tau$ 为应力。对于聚合物熔体而言， $\rho g$ 比作用在流体上的其它力小得多，可以忽略。以热力学第一定律中的能量守恒原理为基础，可导出流体单元的能量方程：

$$\rho c_v \left( \frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) = - \left[ \frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right]$$

$$- T \left( \frac{\partial p}{\partial T} \right)_p \left( \frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + \left\{ \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\}$$

$$+ \left\{ \tau_{xy} \left( \frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) + \tau_{xz} \left( \frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) + \tau_{yz} \left( \frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right\}$$

式中 $c_v$ 为比定容热容， $q$ 称为导热通量，即单位面积的传热速率。根据傅立叶的热传导定律可知： $q = -k \nabla T$ ， $k$ 为材料的导热系数。

要求解出这些方程几乎是不可能，但在处理具体的聚合物加工工程问题时可以作一些简化假设，使方程变得易于求解。这一点在后面的章节中，读者可以看到具体的例子。此外，为求解不同的工程问题，连续方程、能量方程和动量方程在不同的坐标系中还有不同的形式，都列在本章附录中供读者查阅。

## 2.2.2 剪切粘度和非牛顿流动

除极少数几种工艺外，在大多数成型过程中都要求聚合物处于粘流状态(塑化状态)，因为在这种状态下聚合物不仅易于流动，而且易于变形，这给它的输送和成型都带来极大方便。为使塑料在成型过程中易于流动和变形，并不限定用粘流态的聚合物(聚合物熔体)，采用聚合物的溶液或分散体(悬浮液)等也是可以的，熔体和分散体都属于液体的范畴。

液体的流动和变形都是在受有应力的情况下得以实现的。重要的应力有剪切、拉伸和压缩应力三种。三种应力中，剪切应力对塑料的成型最为重要，因为成型时聚合物熔体或分散体在设备和模具中流动的压力降、所需功率以及制品的质量等都受到它的制约。拉伸应力在塑料成型中也较重要，经常是与剪切应力共同出现的，例如吹塑中型坯的引伸，吹塑薄膜时泡管的膨胀，塑料熔体在锥形流道内的流动以及单丝的生产等等。压缩应力一般不是很重要，可以忽略不计。但这种应力对聚合物的其它性能却有一定的影响，例如熔体的粘度等，所以在某些情况下应给予考虑。

液体在平直管内受剪切应力而发生流动的形式有层流和湍流两种。层流时，液体主体

的流动是按许多彼此平行的流层进行的,同一流层之间的各点速度彼此相同,但各层之间的速度却不一定相等,而且各层之间也无可见的扰动。如果流动速度增大且超过临界值时,则流动转变为湍流。湍流时,液体各点速度的大小和方向都随时间而变化,此时流体内会出现扰动。层流和湍流的区分是以雷诺数( $Re$ )为依据。雷诺数由下式定义:

$$Re = \frac{D\bar{v}\rho}{\eta} \quad (2-1)$$

式中 $D$ 为管道直径, $\bar{v}$ 为液体流动的平均速度, $\rho$ 为流体的密度, $\eta$ 为流体的剪切粘度。对通常流体而言,凡 $Re < 2100 \sim 2300$ ,均为层流;当 $Re = 2300 \sim 4000$ 时,为过渡流;当 $Re > 4000$ 时则为湍流。由于聚物流体的粘度大,流速低,在成型中其 $Re < 10$ ,一般为层流。而聚合物分散体的雷诺数通常较大,但也不会大于2300,因此其流动也应为层流。但必须指出,在少数情况下有例外,因为有时由于切应力过大则可能出现弹性湍流,此时不仅要用雷诺数,而且要用弹性雷诺数来判断流动类型。

描述流体层流的最简单规律是牛顿流动定律。该定律称:当有剪切应力 $\tau$ (用 $N/m^2$ 或 $Pa$ 表示)于定温下施加到两个相距为 $dr$ 的流体平行层面并以相对速度 $dv$ 运动(见图2-1),则剪切应力与剪切速率 $dv/dr(s^{-1})$ 之间呈直线关系,可表示如式(2-2)。

$$\tau = \eta \frac{dv}{dr} = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2-2)$$

式中 $\eta$ 为比例常数,称为切变粘度系数或牛顿粘度,简称粘度,单位为 $Pa \cdot s$ ( $1 Pa \cdot s = 1 N \cdot s/m^2$ )。粘度是流体的一种基本特性,依赖于流体的分子结构和外界条件。以 $\tau$ 对 $\dot{\gamma}$ 作图得到流动曲线图,牛顿型流体的流动曲线是通过原点的直线,该直线与 $\dot{\gamma}$ 轴夹角 $\theta$ 的正切值是牛顿粘度值(图2-2)。

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \tan\theta$$

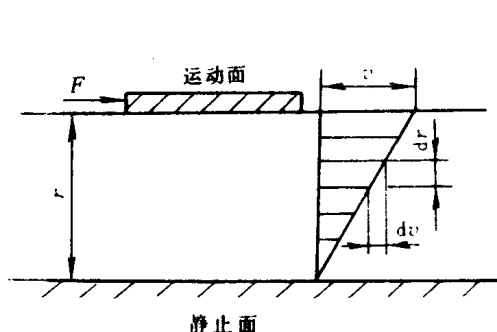


图 2-1 剪切流动示意图

$F$  = 剪力  $F/A = \tau$  = 剪切应力

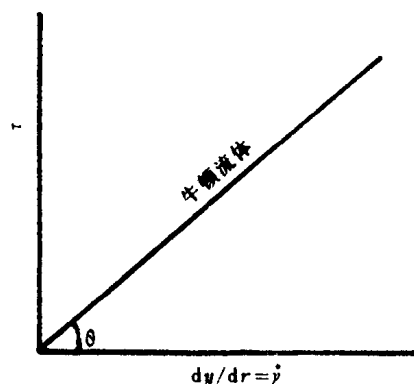


图 2-2 牛顿流体的流动曲线

事实上,真正属于牛顿流体的只是低分子化合物的液体或溶液。聚合物熔体除聚碳酸酯和偏二氯乙烯-氯乙烯共聚物等少数几种与牛顿流体相近似外,绝大多数都只能在剪切应力很小或很大时表现为牛顿流体。在成型过程中,通常对聚物流体所施加的剪切应力却不是很大或很小,所以它表现的流动行为与牛顿流体的流动行为不相符合。聚合物分散体在成型过程中的流动行为也不是牛顿流体。

凡流体的流动行为不遵从牛顿流动定律的,均称为非牛顿型流体。非牛顿型流体流动时剪切应力和剪切速率的比值不再称为粘度而称为表观粘度,用 $\eta_a$ 表示。表观粘度在一定温度下并不是一个常数,可随剪切应力、剪切速率而变化,甚至有些还随时间而变化。如果不考虑聚合物熔体的弹性(这将在以后讨论),可将非牛顿流体归为两个系统。

### 1. 粘性系统

这一系统在受到外力作用而发生流动时的特性是其剪切速率只依赖于所施加剪切应力的大小,根据其剪切应力和剪切速率的关系,又可分为宾哈流体、假塑性流体和膨胀性流体三种。

(1) 宾哈流体 这种流体与牛顿流体相同,其剪切应力和剪切速率的关系表现为直线。不同的是它的流动只有当剪切应力高至一定值 $\tau_y$ 后才发生塑性流动(图2-3)。使流体产生流动的最小应力 $\tau_y$ 称为屈服应力。宾哈流体的流动方程为:

$$\tau - \tau_y = \eta_p \frac{dv}{dr} = \eta_p \dot{\gamma} \quad (2-3)$$

式中 $\eta_p$ 称为刚度系数,等于流动曲线的斜率。应力小于 $\tau_y$ 时材料完全不流动, $\dot{\gamma}=0, \eta_p = \infty$ 。当 $\tau < \tau_y$ 时,实际上是固体材料,一旦 $\tau > \tau_y$ 立刻呈现流动行为,具有一定粘度。宾哈流体所以有这种行为,是因为流体在静止时形成了凝胶结构,外力超过 $\tau_y$ 时这种三维结构即受到破坏。牙膏、油漆、润滑脂、钻井用的泥浆、下水污泥、聚合物在良溶剂中的浓溶液和凝胶性糊塑料等属于或接近于宾哈流体。

(2) 假塑性流体 这种流体是非牛顿流体中最为普通的一种,它所表现的流动曲线是非直线的(图2-3),但并不存在屈服应力。流体的表观粘度随剪切应力的增加而降低。大多数聚合物的熔体,也是塑料成型中处理最多的一类物料,以及所有聚合物在良溶剂中的溶液,其流动行为都具有假塑性流体的特征。图2-4是在对数坐标上绘制的聚合物熔体的流动曲线。A与B是分别在温度 $T_1$ 和 $T_2$ 下所绘的曲线, $T_1 < T_2$ 。A与B两条曲线均接近于直线(图中的虚线是加画的直线,借以与A和B作比较)。从图中可以看出:如果将剪切应力或剪切速率的范围缩小,则A和B将更接近于直线。近似的直线在剪切应力轴上所跨越的范围约为一个数量级,而在剪切速率轴上则约为一个半到两个数量级。由此可以得知:在任何

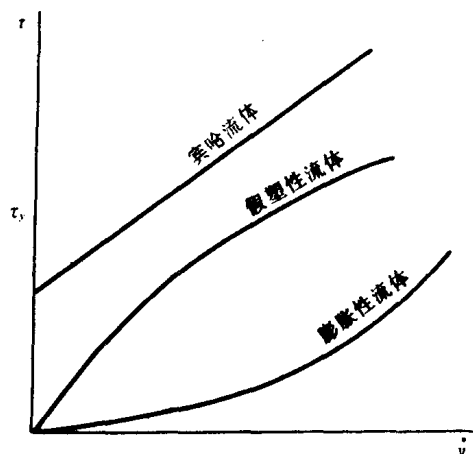


图 2-3 非牛顿流体的流动曲线

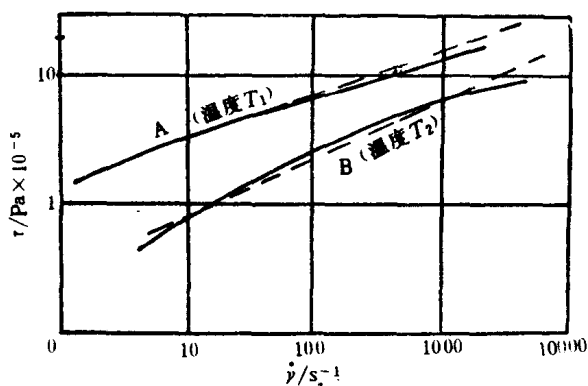


图 2-4 典型的聚合物熔体流动曲线



给定范围内,剪切应力和剪切速率的关系可用指数定律来描述,即:

$$\tau = K \left( \frac{dv}{dr} \right)^n = K \dot{\gamma}^n \quad (2-4)$$

式中 $K$ 与 $n$ 均为常数( $n < 1$ )。 $K$ 是这种流体稠度的一种量度,流体粘稠性越大时, $K$ 值就越高; $n$ 是判定流体与牛顿流体的差别程度的。 $n$ 值离整数1越远时,流体的非牛顿性就越强; $n$ 为1时,流体即为牛顿流体。

指数函数仅是描述假塑性流体流动行为的一种方式。描述这种行为且能使之适应剪切应力范围的公式多至十个以上,不论是理论上或经验上的为数均不少,但是这种较大范围的适应是通过比较复杂的数学关系而取得的。从工程角度讲,在解决具体问题时要求一个公式描述流体流动的剪切应力范围并不十分宽,所以多采用简单经验性的指数函数。但是随着计算机的普遍使用,求解复杂的流变方程已不是难事。

表示假塑性流体流动行为的指数函数,还可以用另一种形式表示:

$$\frac{dv}{dr} = \dot{\gamma} = k \tau^m \quad (2-5)$$

式中 $k$ 与 $m$ 也是常数( $m > 1$ )。 $k$ 称为流动度或流动常数, $k$ 值越小时表明流体越粘稠,也是越不易流动。 $k$ 和式2-4中 $K$ 的关系为:

$$K = \left( \frac{1}{k} \right)^{\frac{1}{n}} \quad (2-6)$$

$m$ 所指的意义和 $n$ 一样,但 $m$ 不等于 $n$ 而是等于 $1/n$ 。

按前述表观粘度的定义知:

$$\text{表观粘度 } \eta_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2-7)$$

则:

$$\eta_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2-8)$$

又:  $\dot{\gamma} = k \tau^m$ , 则有:

$$\eta_a = k^{-\frac{1}{m}} \dot{\gamma}^{\frac{1-m}{m}} \quad (2-9)$$

假塑性流体的粘度随剪切应力或剪切速率的增加而下降的原因与流体分子的结构有关。对聚合物溶液来说,当它承受应力时,原来由溶剂化作用而被封闭在粒子或大分子盘绕空穴内的小分子就会被挤出,这样,粒子或盘绕大分子的有效直径即随应力的增加而相应地缩小,从而使流体粘度下降。因为粘度大小与粒子或大分子的平均大小成正比,但不一定是线性关系。对聚合物熔体来说,造成粘度下降的原因在于其中大分子彼此之间的缠结。当缠结的大分子承受应力时,其缠结点就会被解开,同时还沿着流动的方向规则排列,因此就降低了粘度。缠结点被解开和大分子规则排列的程度是随应力的增加而加大的。显然,这种大分子缠结的学说,也可用以说明聚合物熔体粘度随剪切应力增加而降低的原因。

用指数函数式(2-5)描述聚合物熔体流动行为时,式中的 $m$ 值一般在1.5至4的范围内变化,但当剪切速率增高时,某些聚合物的 $m$ 值可达至5。图2-4中所示的流动曲线,其 $m$ 值约