

普通高等教育规划教材

杨鸣波 黄锐 主编

塑料成型工艺学

SU LIAO CHENG XING GONG YI XUE



第三版



中国轻工业出版社 | 全国百佳图书出版单位

普通高等教育规划教材

塑料成型工艺学

(第三版)

杨鸣波 黄锐 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/杨鸣波, 黄锐主编. —3 版. —北京: 中国轻工业出版社, 2014. 6

普通高等教育规划教材

ISBN 978-7-5019-9716-9

I. ①塑… II. ①杨… ②黄… III. ①塑料成型—工艺学—高等学校—教材 IV. ①TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 066366 号



责任编辑: 王 淳 责任终审: 孟寿萱 封面设计: 锋尚设计
版式设计: 宋振全 责任校对: 燕 杰 责任监印: 张 可

出版发行: 中国轻工业出版社 (北京东长安街 6 号, 邮编: 100740)

印 刷: 三河市万龙印装有限公司

经 销: 各地新华书店

版 次: 2014 年 6 月第 3 版第 1 次印刷

开 本: 787 × 1092 1/16 印张: 34

字 数: 790 千字

书 号: ISBN 978-7-5019-9716-9 定价: 62.00 元

邮购电话: 010-65241695 传真: 65128352

发行电话: 010-85119835 85119793 传真: 85113293

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

Email: club@chlip.com.cn

如发现图书残缺请直接与我社邮购联系调换

140307J1X301ZBW

第三版编写说明

鉴于《塑料成型工艺学》的第二版受到广大读者的好评，并重印了16次，因此根据原全国高校塑料工程专业教材委员会（即后来的教学指导委员会）讨论制定的编写大纲进行本书的第三版编写。本次编写时除对1996年第二版的《塑料成型工艺学》本科教材中所有各章内容针对近年来本领域的发展、变化进行了增补修改，以及对一些错误修正外，还在原有内容的基础上增写了反应性挤出和静电纺丝内容。本书第三版共分14章，第1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2章讨论各种成型工艺共同的基本理论。第3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4章~第13章介绍各种塑料成型方法和成型过程的分析。第14章为塑料制品的机械加工、修饰和装配。

第三版修订分工如下：第1章由四川大学黄锐编写，第2章由四川大学刘正英、杨鸣波编写，第3章由四川大学杨其、黄锐编写，第4章、第10章和第14章由四川大学杨伟、黄锐、曾邦禄编写，第5章由四川大学杨鸣波、尹波、林师沛、刘忠仁编写，第6章由天津科技大学赵梓年、尹波、张明善编写，第7章由天津科技大学揣成智、张明善编写，第8章由大连工业大学冯钠、肖作顺编写，第9章由天津科技大学邬素华、张明善编写，第11章由天津科技大学沈慧玲、许健南编写，第12章由天津科技大学卢秀萍、许健南编写，第13章由四川大学任显诚、曾邦禄编写，附录由四川大学杨伟、杨鸣波整理。全书由主编杨鸣波、黄锐负责审定统稿。

改革开放三十多年以来，高分子科学与工程得到了飞速的发展，加工工艺技术也得到较大提升，为满足不同领域的需要，新工艺、新技术不断涌现，电子技术、计算机技术以及CAD/CAE技术在塑料工程领域应用越来越广泛。但是，我们认为无论如何变化，塑料加工方法和工艺的一些基本内容没有根本改变。所以，本次修订仍然保留了原来的框架结构，力图详细完整地介绍各种加工方法、工艺和技术，并辅以尽可能多的信息和工业经验予以说明，以使读者认识塑料加工领域的全貌，为进入该领域进一步学习和实践奠定基础。因此，希望本书能够成为高等学校塑料工程、高分子材料科学与工程等相关专业学生的入门教材，并可供从事塑料制品生产和高分子材料研究开发的科技人员作为手册阅读参考。

在编写过程中，得到中国轻工业联合会人教部、中国轻工业出版社、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。本书在编写和出版过程中得到学术界和工业界很多前辈的指导和意见，对他们所付出的辛勤劳动和做出的成绩，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，诚恳希望使用本书的读者批评指正。

目 录

第 1 章 绪论	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	4
1.4 本课程的主要内容和要求	5
第 2 章 塑料成型的理论基础	7
2.1 概述	7
2.2 聚合物的流变行为	7
2.3 聚合物的加热与冷却	27
2.4 聚合物的结晶	30
2.5 成型过程中的定向作用	38
2.6 聚合物的降解	43
2.7 热固性塑料的交联作用	46
第 3 章 成型用的物料及其配制	48
3.1 概述	48
3.2 粉料和粒料	48
3.3 溶液	84
3.4 分散体	88
第 4 章 压缩模塑	94
4.1 概述	94
4.2 预压	94
4.3 预热	97
4.4 压缩模塑用的设备	101
4.5 模压过程和操作方法	104
4.6 模压成型的控制因素	106
4.7 模压成型中容易产生废品的类型、原因及其处理方法	110
4.8 冷压烧结成型	111
第 5 章 挤出成型	114
5.1 概述	114

5.2	挤出设备	115
5.3	单螺杆挤出原理	125
5.4	单螺杆结构设计的改进	135
5.5	双螺杆挤出原理	140
5.6	挤出所需的机械功与热量	145
5.7	几种制品的挤出工艺	146
5.8	反应挤出技术	155
5.9	静电纺丝	159
第6章	注射模塑	170
6.1	概述	170
6.2	注射模塑设备	171
6.3	注射模塑工艺过程及控制因素	179
6.4	注射模塑工艺条件的分析讨论	186
6.5	几种常用塑料的注射模塑特点	191
6.6	热固性塑料的传递模塑和注射模塑	196
6.7	反应注射模塑	202
6.8	注射模塑的发展	211
第7章	中空吹塑	223
7.1	概述	223
7.2	吹塑用聚合物	225
7.3	中空吹塑设备	227
7.4	挤出吹塑成型工艺过程及控制因素	237
7.5	注塑吹塑	241
7.6	拉伸吹塑	246
7.7	多层吹塑	251
7.8	大型中空吹塑	253
7.9	中空吹塑新技术	255
第8章	层压塑料和增强塑料的成型	258
8.1	概述	258
8.2	增强作用和界面作用	259
8.3	树脂	262
8.4	增强物及其表面处理	264
8.5	高压成型	273
8.6	低压成型	276
8.7	缠绕成型	282

8.8	其他成型	287
8.9	热塑性增强塑料	292
第9章	泡沫塑料的成型	297
9.1	概述	297
9.2	泡沫塑料成型原理	301
9.3	机械发泡法	303
9.4	物理发泡法	307
9.5	化学发泡法	319
第10章	浇铸	352
10.1	概述	352
10.2	静态浇铸	352
10.3	嵌铸	367
10.4	离心浇铸	370
10.5	流延铸塑	373
10.6	搪塑	376
10.7	滚塑	379
第11章	压延成型	382
11.1	概述	382
11.2	压延设备	383
11.3	压延过程中的流动分析	388
11.4	压延工艺	396
11.5	压延成型的进展	405
第12章	涂层	409
12.1	概述	409
12.2	压延法人造革的生产工艺	410
12.3	涂覆法人造革的生产工艺	412
12.4	层合法人造革的生产工艺	426
12.5	人造革的表面修饰	427
12.6	超细纤维合成革生产工艺简介	428
12.7	金属制件的塑料涂覆	429
12.8	塑料涂装	437
第13章	热成型及固相成型	441
13.1	概述	441

13.2	热成型方法	442
13.3	热成型设备	452
13.4	模具	454
13.5	工艺因素分析	455
13.6	热成型及固相成型技术新进展	458
第 14 章	塑料的机械加工、修饰和装配	461
14.1	概述	461
14.2	机械加工	461
14.3	修饰	476
14.4	装配	487
附录	502
主要参考文献	533

第 1 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、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,2011 年世界塑料产量约 2.8 亿吨,比 2010 年(约 2.7 亿吨)增加了 4%。其中最主要的几种塑料——聚烯烃、聚氯乙烯(PVC)、聚苯乙烯(PS)、可发性聚苯乙烯泡沫塑料(EPS)和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)占据世界需求量的约 70%,即 2 亿吨。到 2016 年,世界塑料消费量将以大约 4% 的平均年增长率增加。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,其余如黏合剂、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。而塑料的品种多,性能各具特色,适应性广,生产塑料所消耗的能量较金属低,塑料的密度远低于金属,在许多按体积使用的制品上,其优势就更加突出了。因此,唯有塑料工业仍保持着继续发展的势头,到 20 世纪 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或缺的材料。塑料工业包括塑料生产(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。可以认为塑料产业是以合成树脂和塑料制品生产为中心,包括助剂生产、塑料配制(改性)、塑料成型机械及成型模具生产等组成一体的工业。

塑料制品的生产是一种复杂而繁重的过程,其目的在于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(制品)或型材。在这一过程中,如何将优质的原料制造成性能优良的塑料制品成为过程的关键,这就涉及过程中塑料可能发生的变化。这些变化包括材料的结晶、取向、降解、交联等。由于制品的形状各异,各部位间塑料接触的外部条件(温度、压力等)不同,因而会有不同的物理化学变化。这样期望制品各部位中材料都达到预期的形态结构(即定构过程, Structuring),从而有预期的优良性能是成型过程中最应关注的方向。当然,除加工技术外,生产成本(性价比)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)。

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,在整个生产中最为重要,是一切塑料制品或型材生产的必经过程。成型的种类

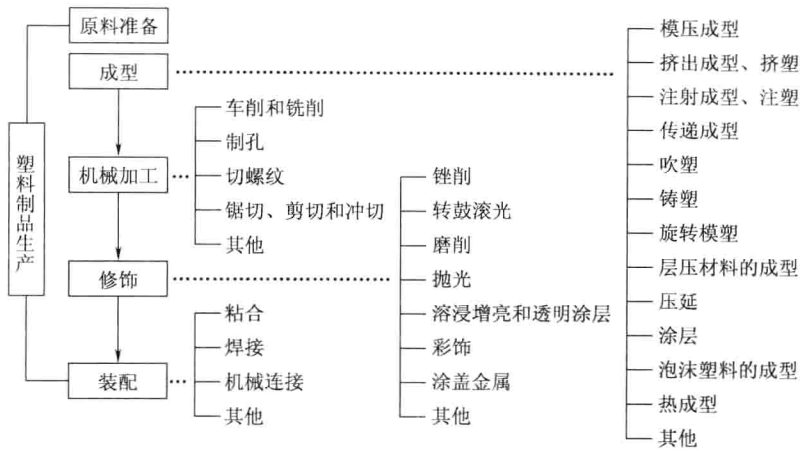


图 1-1 塑料制品生产的组成

很多,如各种模塑、层压以及压延等,其他过程通常都是根据制品的要求来取舍的。也就是说,不是每种制品都需完整地经过这些过程。机械加工是指在成型后的工件上钻孔、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,也有为其他目的,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。近年来,在习惯上有时也将整个塑料的成型加工简称为塑料加工(过程)。

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。作为借鉴的对象主要是橡胶、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,对塑料材料和其各类制品的本质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 20 世纪的 20 年代。此后,由于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加,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独立的专业和较大的生产部门。

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近 20

年以来一直保持稳定的增长态势,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。1950年中国仅生产了200吨塑料,但随后特别是改革开放以来一直保持快速发展,已成为世界上最大的塑料消费、生产、进口、出口大国,塑料消费总量已超过美国居世界首位,远超德国、日本。2011年我国塑料消费超过7000万吨,约占世界塑料消费量2.8亿吨的四分之一;人均消费约50千克/年,超过40千克/年的世界平均水平(美国约170千克/年,比利时高达200千克/年,其他发达国家也在120千克/年以上)。2006~2010年我国塑料消费年均增长达9.6%。

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。改善老产品,开发新产品,提高性能,降低成本,才能不断扩大市场。这说明从事塑料工业的工作者的任务比较繁重和与其他生产部门联系的重要性。

塑料制品应用的主要领域有:

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、排水以及储青等方面的积极作用都十分显著。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,船只、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、货物护层和真空包卷用的材料等方面已十分普遍,但如何满足不同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、飞机等交通工具及相应的附属设施所用的塑料,其单台(架)使用量,逐年都在增加,并不断取代金属材料,而扩大其应用。

4) 电气工业电线、电缆、各种家电;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,以及分别或同时具有导热导电特性等。

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

6) 仪器仪表工业塑料制件的轻量、精细、美观和特种性能(介电、导电、导磁、吸波等)导致塑料在这领域的应用不断增长,而且越来越多的仪器仪表主要采用塑料制作。

7) 建筑工业原用的木材、水泥和砖瓦已越来越多地改用了塑料。这不完全是单纯的取代,更多的是新材料、新技术和新结构的采用,对整个建筑工业都富有革命性的意义。此外,在室内采光、给排水、顶板、地面、壁板、室外护板、地板、围栏以及卫生洁具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用塑料的数量和品种都在不断增加。各种增强塑料作结构和覆面材料,以及坐舱与舱内部件和装饰材料等都已大量使用塑料,对提高使用性能、减轻机体重量减少能源消耗具有重要意义。

9) 由于塑料的多种特殊性能,在国防与尖端工业中发挥了其他材料所不能代替的作用,在卫星、火箭、核工业、能源及电子自动化技术等方面应用的有各种烧蚀材料、耐腐蚀材料,增强材料、工程结构材料和各种功能性材料等,而且用量不断增加。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各种家具,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非常方便实用。而且,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在极快的发展,用量不断增加。主要是提供新型和高性能产品,用于替代原来金属制件,在健身和体育器材方面尤其如此。

事实上,塑料制品的使用几乎进入了国民经济的各个领域,与工农业、国防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理解,充分认识加工过程材料结构演变规律,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,可知(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,还可以简化仓储的管理。为了满足塑料制品使用中不断提高的各种要求,在以往塑料制造(通常加入各种助剂)的基础上,逐渐出现了一些合成树脂(塑料)进行改性的过程,如进行填充、共混、增强,加入成核剂等,这些对塑料的改性过程有些就在塑料制品生产企业完成,同时目前也有较多的独立企业专业从事改性塑料的制造。

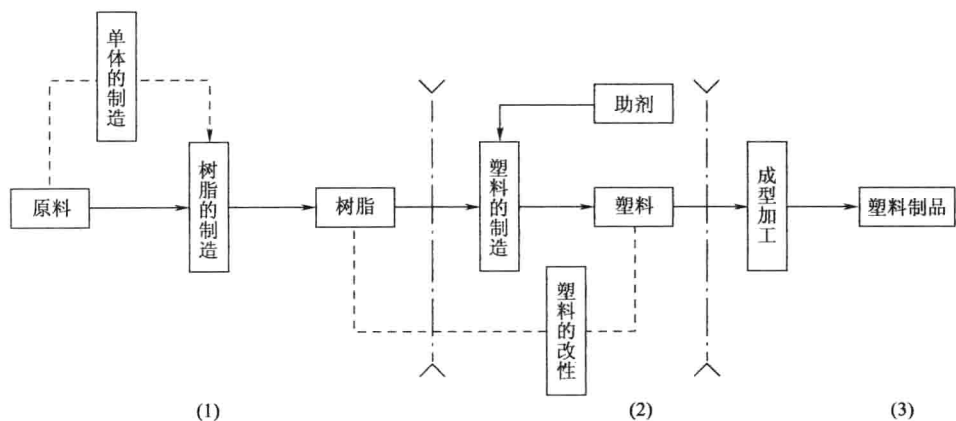


图 1-2 从原料到塑料制品的生产流程示意图

塑料制品的生产由几个过程所组成,塑料在成型前有的常需先进行塑料的制造(或配料)、预处理(包括预压、预热或干燥)及塑料的改性等,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力学、热、电和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决定成型加工方法,同时还应对成本进行估算,确定其是否合理;然后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。同时,有关防忌事项也应列出,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,其缺点是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,也就是按照某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,成本也得以降低。不管用哪一种体制进行生产,均应在合理的段落进行技术检验,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4章至第13章)进行。至于机械加工、修饰和装配,所涉内容不多,合并为一章(第14章)。论述工艺之前,有必要对所用各种塑料的配制进行论述,放在第3章。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,集中在各种工艺的前面(第2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提出对它们的主要要求而不作详细的叙述,因还有与本课程配合设立的两门独立课程(塑料成型机械、塑料成型模具)。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有很快的发展,成为塑料成型加工工业改革与进步的重要内容。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主要方法、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,不作过多的繁杂数学推导,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。希望以此为基础,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。

随着生产的发展,环境正成为人类共同瞩目的问题,2010年在有我国参加与制订的ISO 26000的发布,标志着企业(当然也包括塑料机械、塑料制品生产企业)将从质量管理为中心转变到社会责任管理为中心,企业的发展应该适应世界发展的潮流、国家的发展规划,造福人民造福社会。这就需要朝着构建起企业产品的环境友好、环境消纳的方向发展。当然,这需要有适当的过程。

①环境友好 逐步实现所有生产过程和产品的无毒、无害化的环境友好过程。

②环境消纳 第一步在实现环境友好的基础上,逐步实现废次品的减少和自我消纳,实现零废次品。第二步实现本企业的产品在用户使用失效后(可能10年或50年后)的全部回收利用,实现真正意义上的环境消纳。

自然界在没有人类干预前就具有环境自我消纳和可持续发展的循环,具有自我修复的能力。一切动植物在完成诞生、成长、消亡的过程中都使大地变得更加肥沃,为后来的生物提供良好的环境。

这正是企业发展的社会责任,也是社会科学、可持续、和谐发展的前提。

随着我国塑料产业的发展,从塑料和塑料制品生产大国走向强国,依靠的是制度、组织、管理、科技、产品等方面的提高和创新,优化产业和产品结构,这些需要大量的高素质、创新型的人才,本书作为工科高校专业教材,希望能在这方面起到微薄的作用。

第 2 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。其他的一些内容,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,因为它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 ρ 、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:

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

同样考察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 $\rho dv/dt$,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:

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

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

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

式中： τ 为应力。对于聚合物熔体而言， ρg 比作用在流体上的其他力小得多，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：

$$\rho C_v \left(\frac{\partial T}{\partial t} + v_x \frac{\partial T}{\partial x} + v_y \frac{\partial T}{\partial y} + v_z \frac{\partial T}{\partial z} \right)$$

$$= - \left[\frac{\partial q_x}{\partial x} + \frac{\partial q_y}{\partial y} + \frac{\partial q_z}{\partial z} \right] - T \left(\frac{\partial P}{\partial T} \right)_\rho \left(\frac{\partial v_x}{\partial x} + \frac{\partial v_y}{\partial y} + \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \left\{ \tau_{xx} \frac{\partial v_x}{\partial x} + \tau_{yy} \frac{\partial v_y}{\partial y} + \tau_{zz} \frac{\partial v_z}{\partial z} \right\} -$$

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

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，都列在本书附录表 5 中供读者查阅。

2.2.2 剪切黏度和非牛顿流动

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黏流状态（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，并不限定用黏流态的聚合物（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。

为了正确有效地进行加工成型，了解和掌握聚合物的黏性流动规律是很重要的。由于聚合物的流动性表现出非理想的行为，增加了成型制品的质量控制的复杂性。这就需要我们充分了解在应力作用下，高分子材料产生弹性、塑性和黏性形变以及这些行为的各种因素（聚合物结构与性质、温度、力的大小和作用方式、作用时间以及聚合物体系的组成等）之间的相互关系。由于流动与形变是聚合物加工过程中最基本的工艺特征，所以聚合物加工过程中流变学的研究具有非常重要的现实意义。

液体的流动和变形都是在受到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。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他性能却有一定的影响。例如熔体的黏度等，所以在某些情况下应给予考虑。

流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,但各层之间的速度均不一定相等,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, ρ 为流体的密度, η 为流体的剪切黏度。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。由于聚物流体的黏度大,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。该定律描述为:当有剪切应力 τ (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)。

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

式中: η 为比例常数,称为切变黏度系数或牛顿黏度,简称黏度,单位为 $Pa \cdot s$ 。黏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 τ 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 θ 的正切值是牛顿黏度值(图2-2)。

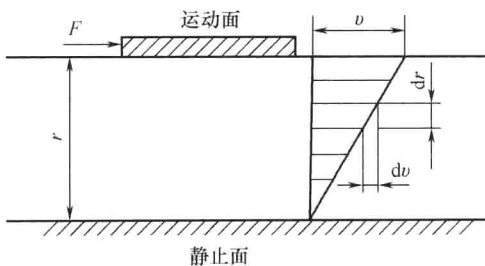


图 2-1 剪切流动示意图

F = 剪切力 $F/A = \tau$ = 剪切应力

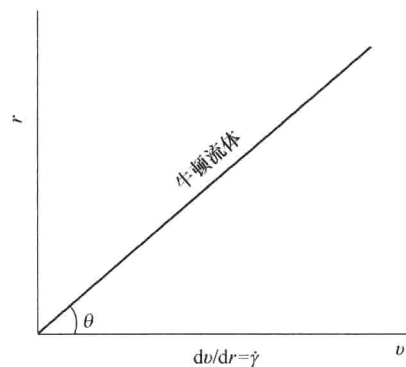


图 2-2 牛顿流体的流动曲线

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,通常对聚合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。