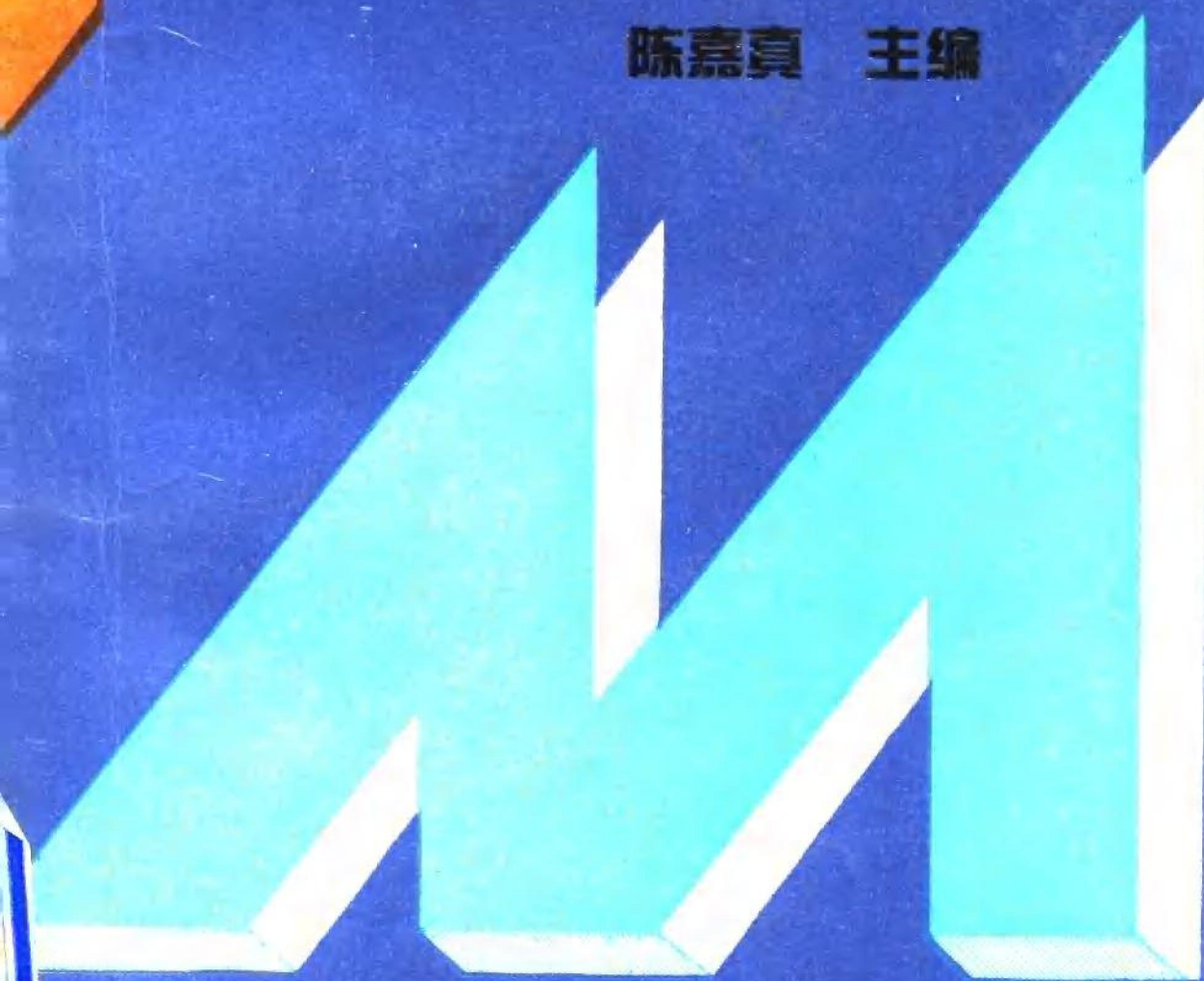


高等学校教材

塑料成型工艺 及模具设计

陈嘉真 主编



机械工业出版社

11-2-112
高等学校教材

塑料成型工艺及模具设计

主 编 陈嘉真

副主编 曾湘云 王海才

参 编 李子明 李学军

主 审 刘永熙



机械工业出版社

前 言

本书是根据1993年12月第三次全国高等学校锻压专业教学指导委员会模具专门化协作组召开的教材编写研讨会所拟定的教学大纲编写的。

全书包括塑料成型模具和塑料成型工艺两部分内容，主要介绍塑料成型的理论基础、成型工艺、模具设计原理和设计方法等知识。编写时力求理论联系实际，深入浅出，既结合国内外中小型企业实际，又反映国内外的先进水平。

本书可作为高等学校模具专业教材，也可供从事塑料制品生产和模具设计的工程技术人员参考。

全书共十五章，第一、二章由天津轻工业学院李子明编写；第三、十一、十二章由广东机械学院曾湘云编写；第四、六、八章由江苏理工大学陈嘉真编写；第五、七、九、十章由江苏理工大学李学军编写；第十三、十四、十五章由南昌大学王海才编写。全书由陈嘉真主编，曾湘云、王海才副主编。合肥工业大学刘永熙主审。

由于编者实际经验及理论水平有限，加之时间仓促，书中难免有不当和错误之处，敬请使用本书的教师和广大读者批评指正。

编 者

1994年9月

目 录

前言

绪论	1
一、塑料制件生产	1
二、塑料成型模具	1
三、塑料成型技术发展趋势	2
四、本课程的学习目的和要求	3
第一篇 塑料成型工艺	5
第一章 塑料成型的基础知识	5
第一节 塑料概述	5
一、塑料的组成	5
二、塑料的分类	6
第二节 塑料成型过程中的物理和化学 行为	7
一、聚合物的流动与流变行为	7
二、聚合物熔体的弹性	11
三、聚合物在简单导管内的流动	12
四、聚合物的加热和冷却	15
五、聚合物的结晶	16
六、聚合物的取向	18
七、聚合物的降解	20
八、聚合物的交联	21
第三节 塑料成型工艺性能	22
一、热固性塑料的工艺性能	22
二、热塑性塑料的工艺性能	24
第二章 塑料成型工艺	
第一节 注射成型	27
一、注射成型原理及工艺过程	27
二、注射成型工艺参数的确定	31
三、热固性塑料注射成型	34
四、精密注射成型	36
第二节 压缩成型	37
一、压缩成型原理及其适应范围	37
二、压缩物料的预处理	38
三、压缩过程及其控制因素	39
第三节 压注成型	41
一、压注成型原理及其特点	41

二、压注成型的主要工艺参数	43
第四节 挤出成型	44
一、挤出成型原理、工艺过程及挤出 设备	44
二、挤出成型工艺参数的控制	45
第五节 其它塑料成型工艺	46
一、吹塑成型	46
二、板、片材成型	50
三、层压成型	54
四、泡沫塑料成型	55
五、压延与涂层	57
六、旋转成型	58
七、缠绕成型与喷射成型	58
第三章 塑料制件设计	60
一、塑料制件的尺寸和精度	60
二、塑料制件的表面质量	62
三、塑料制件的结构设计	62
第二篇 塑料注射成型模具	3
第四章 注射模概述	
第一节 注射模的基本结构	73
一、注射模的结构组成	73
二、注射模的分类	74
第二节 注射模与注射机的关系	76
一、注射量的校核	77
二、锁模力的校核	77
三、最大注射压力的校核	77
四、注射机安装模具部分的尺寸校核	77
五、开模行程的校核	78
六、顶出装置的校核	80
第五章 注射模浇注系统设计	82
第一节 普通浇注系统	82
一、浇注系统的组成及设计要求	82
二、普通浇注系统设计	83
第二节 无流道浇注系统	96
一、无流道浇注系统的特点及分类	96
二、无流道浇注系统的结构	97

第六章 注射模成型零部件设计105	三、斜导柱侧向分型与抽芯机构结构 设计要点.....167
第一节 型腔总体布置、分型面选择105	第三节 弯销侧向分型与抽芯机构173
一、型腔数目的确定.....105	第四节 斜滑块侧向分型与抽芯机构174
二、分型面的设计.....106	一、斜滑块侧向分型与抽芯机构的 结构型式.....174
第二节 成型零部件的结构设计112	二、斜滑块侧向分型与抽芯机构设 计要点.....174
一、凹模.....112	第五节 齿轮齿条侧向分型与抽芯机 构178
二、凸模(型芯).....112	第九章 注射模温度调节系统179
三、螺纹型芯与螺纹型环.....114	第一节 温度调节的重要性179
第三节 成型零件的工作尺寸计算118	一、对塑件质量的影响.....179
一、影响塑件尺寸精度的因素.....118	二、对生产率的影响.....179
二、成型零部件工作尺寸计算.....119	第二节 模具温度调节系统的设计180
三、螺纹型芯与螺纹型环.....126	一、冷却管道的设计原则.....180
第四节 成型腔壁厚度的计算131	二、冷却管道传热面积及管道数目 的确定.....182
一、型腔侧壁厚度计算.....132	三、冷却回路的形式.....184
二、型腔底板厚度计算.....135	第十章 热固性塑料、低发泡与精 密注射模187
三、经验数据.....137	第一节 热固性塑料注射模187
第五节 排气结构设计138	一、普通热固性塑料注射模.....187
一、排气方式.....139	二、热固性塑料的冷流道模.....189
二、排气槽设计要点.....139	第二节 低发泡注射模191
三、引气系统.....139	一、低发泡注射成型对模具的要求.....191
第七章 注射模的导向及脱模机构 设计141	二、低发泡注射模的典型结构.....192
第一节 导向机构设计141	三、低发泡注射模的设计要点.....192
一、导柱导向机构.....141	第三节 精密注射成型模194
二、锥面和合模销定位机构.....143	第三篇 压缩、压注、挤出及其它塑 料成型模具197
第二节 脱模机构设计145	第十一章 塑料压缩成型模具197
一、脱模机构的分类及设计原则.....145	第一节 概述197
二、一次推出脱模机构.....146	一、压缩模的结构组成.....197
三、二次推出脱模机构.....151	二、压缩模分类.....198
四、浇注系统凝料的脱出和自动脱 落机构.....154	三、压缩模与压力机的关系.....202
五、塑件螺纹的脱模机构.....155	第二节 压缩模成型零部件设计204
第八章 侧向分型与抽芯机构设计160	一、塑件加压方向的确定.....204
第一节 侧向分型与抽芯机构的分类160	二、凸、凹模的结构设计.....206
一、手动侧向分型与抽芯机构.....160	三、成型零部件设计.....208
二、机动侧向分型与抽芯机构.....161	四、加料腔设计及计算.....209
三、液压或气动侧向分型与抽芯机 构.....161	第三节 压缩模结构零部件设计212
第二节 斜导柱侧向分型与抽芯机构161	
一、工作原理.....161	
二、斜导柱侧向分型与抽芯机构主 要参数的确定.....162	

一、脱模机构	212	第十四章 塑料中空吹塑成型与气	
二、侧向分型与抽芯机构	215	压成型模具	261
三、压缩模的加热系统	218	第一节 中空吹塑成型模具	261
第十二章 塑料压注成型模具	221	一、中空吹塑模的结构	261
第一节 概述	221	二、中空吹塑模的设计要点	261
一、压注模的结构组成	221	第二节 气压成型模具	263
二、压注模的分类	222	第十五章 塑料模设计方法和程序	265
三、压注模与压力机的关系	223	第一节 塑料模设计程序	265
第二节 压注模结构设计	224	一、热塑性塑料注射成型模设计程	
一、加料腔设计	224	序	265
二、浇注系统设计	227	二、热固性塑料压缩模设计程序	266
第十三章 热塑性塑料挤出成型机		第二节 塑料模设计举例	267
头	3	一、注射模设计举例	267
第一节 概述	231	二、压缩模设计实例	270
一、机头的作用	231	第三节 塑料模标准化和CAD技术	272
二、机头的分类	231	一、塑料模标准化	272
三、挤出成型机头设计原则	231	二、塑料注射模CAD简介	273
第二节 管材挤出成型机头设计	232	附录	276
一、机头的结构形式	232	附录 A 塑料及树脂缩写代号(GB1844	
二、管材机头主要零件设计	233	—80)	276
三、定径套设计	239	附录 B 热塑性塑料注射机型号和主	
四、管材成型机头的典型结构	241	要技术规格	278
第三节 棒材挤出成型机头设计	243	附录 C 热塑性塑料注射机锁模机构	
一、棒材挤出成型机头结构	243	与装模尺寸	279
二、棒材挤出成型定型套设计	244	附录 D 部分国产液压机的主要技术	
第四节 异型材成型机头设计	245	参数	286
一、概述	245	附录 E 国产塑料挤出机的主要技术	
二、异型材挤出成型机头设计	247	参数	286
三、异型材定型模设计	250	附录 F 热塑性塑料注射成型制品缺	
第五节 其它挤出成型机头设计	252	陷及产生原因	286
一、板材、片材挤出成型机头	252	附录 G 热固性塑料制品容易产生的	
二、线缆敷层挤出成型机头	255	成型缺陷及其解决方法	289
三、薄膜挤出吹塑成型机头	257	参考文献	291

绪 论

塑料工业是一个新兴的工业领域，又是一个发展迅速的领域。塑料已进入一切工业部门以及人们的日常生活中，塑料因其材料本身易得、性能优越、加工方便，而广泛应用于包装、日用消费品农业、交通运输、电子、电讯、机械化工、建筑材料等各个领域，并显示出其巨大的优越性和发展潜力。当今世界把一个国家的塑料消耗量和塑料工业水平，作为衡量一个国家工业发展水平的重要标志之一。

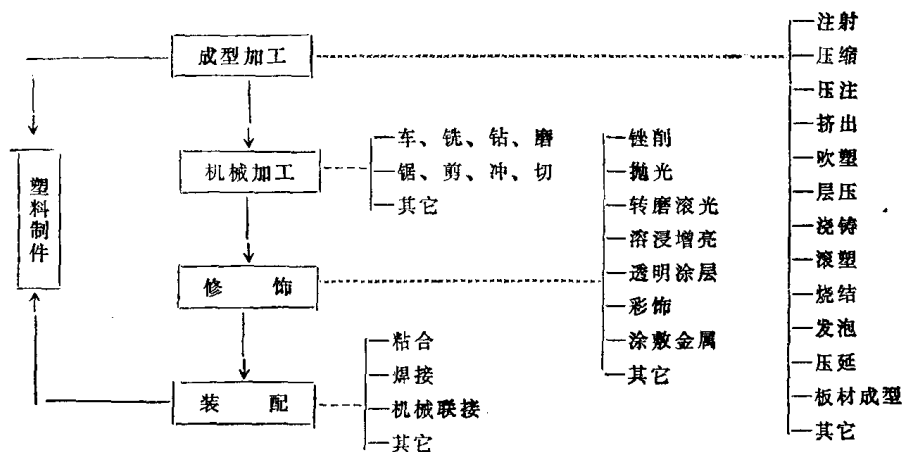
随着机械、电子、家电、日用五金等工业产品塑料化趋势的不断增强及塑料制件（塑件）的广泛应用与不断发展，更新换代迅速，对塑料成型技术的发展与塑料模具在数量、质量、精度和复杂程度等方面都提出了更高的要求，这就要求从事塑料成型和模具设计的人员更多地掌握塑料成型工艺及塑料模具设计方面的知识。

一、塑料制件生产

塑料工业含塑料生产和塑料制件生产两大部分。塑料生产是指树脂或塑料制件原材料的生产，通常由树脂厂来完成。塑料制件生产（即塑料成型加工）是根据塑料性能，利用各种成型加工手段，使其成为具有一定形状和使用价值的物件或定型材料。

塑料制件生产主要包括成型、机械加工、修饰和装配等四个生产过程。成型是将各种形态的塑料，制成所需形状的制件或型坯的过程。它是塑料制件生产中最重要且必不可少的过程，其它三个过程视制件要求而取舍。

塑料制件生产过程与成型方法如下：



由此可见塑料成型方法的种类繁多，其中主要有注射成型、压缩成型、压注成型、挤出成型、中空吹塑成型等。

二、塑料成型模具

塑料成型模具是成型塑料制件的主要工艺装备之一。它使塑料获得一定的形状和所需性能，对达到塑料加工工艺要求、塑料制件使用要求和造型设计要求起着重要作用。在塑料加工行业中约有95%的产品靠模具生产，产品的更新都是以工艺的改进和模具的更新为前提。塑料模具可分为下列几类：

1. 注射模 由注射机的螺杆或柱塞，使料筒内塑化熔融的塑料，经喷嘴和模具的浇注系统注入型腔，塑料在型腔内保压冷却固化成型。这种成型方法称注射成型，其所使用的模具称注射成型模具或注射模。注射模主要用于热塑性塑料制件成型，近几年来也越来越多地用于热固性塑料制件成型。注射成型以能成型形状复杂的制件及生产率高等特点，使其在塑料制件生产中占有很大的比重，据统计，注射制件约占所有塑料制件总产量的30%，注射模产量约占世界塑料成型模具产量的半数之多。

2. 压缩模 借助加热和加压，使直接放入型腔内的塑料熔融并固化成型，这种成型方法称压缩成型，其所使用的模具称压缩成型模具或压缩模。压缩模多用于成型热固性塑料制件，也有成型热塑性塑料制件的。另外还有不加热的冷压缩模，它主要用于成型聚四氟乙烯坯件。

3. 压注模 通过柱塞使在加料腔内受热塑化熔融的热固性塑料，经浇注系统压入被加热的闭合型腔并固化成型，这种成型方法称压注成型，其所使用的模具称压注成型模具或压注模。压注模多用于成型热固塑料制件。

4. 挤出模 利用挤出机的加热加压装置，使处于粘流状态的塑料在高温高压下通过具有特定断面形状的机头口模，并经冷却定型装置硬化定型，以获得具有所需断面形状连续型材，这种成型方法称挤出成型，其所使用的模具称挤出成型模具或挤出模，也称挤出机头。

5. 中空塑件吹塑成型模具 将挤出或注射出来的熔融状态的管状坯料置于模具型腔内，借助压缩空气使管坯膨胀贴紧于模具型腔壁上，冷硬后获得中空塑件，这种成型方法称中空吹塑成型，其所使用的模具称中空塑件吹塑模或吹塑模。

6. 气压（真空或压缩空气）成型模具 此类模具为一单独的阴模或阳模。借助真空泵或压缩空气，使固定在模具上并被加热软化的塑料板材、片材紧贴在模具型腔，冷却定型即得塑件。这种成型方法称气压成型，其所使用的模具称气压成型模具。

除上述几类模具外，尚有泡沫塑料成型模具、玻璃纤维增强低压成型模具等多种类型，恕不一一列举。

三、塑料成型技术发展趋势

随着工业产品塑料化趋势的不断增强，塑料制件应用范围的不断扩大，对塑料制件在数量、质量、精度等方面均提出了越来越高的要求，并促使塑料成型技术不断向前发展。目前塑料成型技术正朝着精密化、微型化、超大型化和自动化成型生产的方向发展，现就塑料成型技术的发展趋势简述如下。

1. 成型理论研究 深入研究掌握塑料成型原理和工艺，加深对塑料成型过程中所发生的物理、化学变化和力学行为的认识，借以改进生产技术、方法和设备。

2. 改革创新成型工艺 为适应新型塑料制件的要求及提高塑件质量和生产率需要，新的塑料成型工艺不断涌现，如多种塑料共注射成型、多种工艺复合模塑成型、无流道注射成型、低发泡注射成型、反应注射成型和气辅注射成型等等。

3. 发展模具新结构、新材料和新工艺 重点开发精密、复杂、大型、微型、高效、长寿命模具，以满足塑料制件精密化、微型化和大型化的要求；发展多腔、多层、多工位模具，发展多功能模具、组合模具。

随着注射机注射速度与压力的提高，以及增强塑料的广泛应用和添加量的不断增多，模

具寿命成为一个突出问题，必须从模具材料及表面处理技术方面入手发展长寿命模具。

为了提高模具制造精度、缩短制造周期，在模具型腔加工中广泛应用高精度、高效率、自动化机床，如仿形、数控、电加工机床和三坐标测量仪等精密测量设备。此外，采用精密铸造、冷挤压、超塑成形、电铸等工艺，使型腔加工工艺获得重大进展。

4. 积极发展电子计算机在模具设计制造中的应用（模具CAD/CAE/CAM） 塑料流变学、几何造型技术、数控加工以及计算机技术突飞猛进，为塑料模具CAD/CAE/CAM系统的开发创造了条件。目前国内外广泛进行塑料模具CAD/CAE/CAM的技术研究开发工作，陆续推出一些相应的软件系统并在生产中获得应用，从注射产品造型、模具设计、绘图到数控加工数据的生成，并预测成型工艺及模具结构等有关参数的正确性。例如采用熔体流动模拟软件来考察塑料熔体在模具型腔内的流动过程，以此改进流道系统的设计，提高一次试模的成功率。采用应力分析软件可以预测塑件出模后的变形或翘曲程度。尽管注射模CAD/CAE/CAM技术在近十年内从理论研究到实际应用都取得飞速进步，但其商品化软件无论在功能和精度上均有待进一步发展和完善，仍属当今重要的研究课题，需大力研究、发展、完善与提高。

5. 加速模具零部件标准化和专业化 实践证明，标准化和专业化是缩短模具设计制造周期，降低模具成本行之有效的途径，同时也可作为计算机辅助设计与制造创造有利条件。各工业化国家对模具标准化和专业化生产均十分重视，美国和日本模具标准化程度已达70%~80%，而我国仅20%；模具专业化生产程度美国和日本分别达90%和70%，而我国仅为10%。因此，必须加速进行这方面的工作。

四、本课程的学习目的和要求

本课程包括塑料成型工艺与塑料成型模具设计两大主题。根据专业的特点，侧重于模具设计方面。通过本课程的学习，要求了解塑料成型理论知识、各种常用塑料成型基本原理及工艺特点；并在此基础上，掌握各种成型模具的结构特点、设计计算方法，达到能独立设计一般的塑料成型模具。此外还要求能分析各种制品缺陷的原因及其解决办法。

本课程中的主要内容是在生产实践中逐步总结和丰富起来的，因此学习本课程除重视其中必要的工艺原理和力学原理外，应特别注意理论联系实际，配合必要的现场教学、实验、实习和课程设计等教学环节。

第一篇 塑料成型工艺

第一章 塑料成型的基础知识

塑料成型是将塑料原材料转变为所需形状和性能的塑件的一门工程技术。为了获得合格的成型塑件，必须对塑料的成型工艺特性及其在成型过程中表现的物理化学行为有足够的认识。

第一节 塑料概述

塑料是以高分子合成树脂为主要成分，在一定的温度和压力下，可塑制成一定形状，且在一定条件下保持不变的材料。

一、塑料的组成

工业上用作成型的塑料有粉状、粒状、溶液和分散体（糊状）等，无论是哪种形态的材料都不单纯是聚合物（树脂），或多或少都有添加剂（或称助剂），加入添加剂的目的是改善成型工艺性能，提高塑件性能和降低成本等。由此可见塑料一般是由树脂和添加剂组成，合成树脂是其主要成分，因此塑料的基本性能主要取决于树脂的性质，但也不能忽视添加剂的重要影响。塑料按其成分不同可分为简单组分和多组分的塑料。

简单组分的塑料基本上由合成树脂组成，加入少量辅助材料，如着色剂、润滑剂和增塑剂等。这类材料主要有聚乙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯等，也有的除树脂外不加任何添加剂，如聚四氟乙烯等。

复杂组分的塑料由多种组分组成，除树脂外，还加入填料、增塑剂、染料、稳定剂、润滑剂等添加剂，因此也称多组分材料。这类材料主要有聚氯乙烯、酚醛塑料等。

一般说来，多组分塑料成分如下：

（一）树脂

塑料主要使用人工合成树脂，并由树脂特性来决定塑料的类型（热固性或热塑性）和主要性能。塑料中树脂含量约为40%~100%。

（二）填充剂

添加填充剂（填料）的主要目的是改善塑料成型性能和降低成本。常用的填料有木粉、纸浆、云母、石棉、炭黑、玻璃纤维等。填料在很大程度上决定着塑料的物理力学性能、工艺性能，例如加入纤维状填料可以提高塑料的机械强度，而加入石棉填料则可以提高塑料的耐热性。大多数填料还可减少塑料在成型时的收缩率，并降低塑料成本。填料在塑料中的用量约占10%~50%。

（三）增塑剂

为了使塑料增加柔韧性能，改善流动性，常在聚合物中加入液态或低熔点固态的增塑剂。常用的增塑剂有邻苯二甲酸二丁酯、邻苯二甲酸二辛酯等。

(四) 着色剂

为了获得塑件所需的色彩，在塑料组分中加入着色剂。着色剂品种很多，要求着色容易，与塑料中其它组分不起化学作用，成型过程中不因温度、压力变化而分解变色，而且在塑件使用中长期保持稳定。着色剂用量一般为0.01%~0.02%。

(五) 润滑剂

添加润滑剂的目的是改善成型塑料的流动性，并减小和防止塑料熔体对设备和模具的粘附与摩擦。常用的润滑剂有烃类、酯类、金属皂类、脂肪酸类和脂肪酸酰胺类等，一般用量为0.05%~0.15%。

(六) 稳定剂

为了防止或抑制塑料在成型、储存和使用过程中，因受外界因素（如热、光、氧、射线等）作用所引起的性能变化，即所谓“老化”，需加入稳定剂。稳定剂可分为热稳定剂、光稳定剂、抗氧化剂等。常用的稳定剂为硬脂酸盐类、铅的化合物、环氧化合物等。稳定剂用量一般大于2%，少数高达5%。

(七) 硬化剂

又称固化剂、交联剂。在热固性塑料成型时，线型分子结构的合成树脂需转变成体型分子结构（称交联反应或称硬化、固化）。添加硬化剂的目的是促进交联反应。例如在环氧树脂中加入乙二胺、三乙醇胺、咪唑等。

(八) 发泡剂

制作泡沫塑料制品时，需要预先将发泡剂加入塑料中，以便在成型时放出气体，形成具有一定孔形的泡沫塑料制品。常用的发泡剂有氯二乙丁腈、石油醚、碳酸胺等。

此外还有阻燃剂、防静电剂、防霉剂等。

二、塑料的分类

塑料的品种很多，可以从不同角度对塑料进行分类。

(一) 根据塑料中树脂的分子结构及热性能不同分类

1. 热塑性塑料 这种塑料中树脂的分子是线型或支链型结构。它在加热时软化并熔融，成为可流动的粘稠液体（即聚合物熔体），可成型为一定形状，冷却后保持已成型的形状。如果再次加热，又可以软化并熔融，可再次成型为一定形状的塑件，如此可反复多次。在上述过程中，一般只有物理变化而无化学变化。

由于热塑性塑料具有上述特性，因此，在塑料成型加工过程中产生的边角料及废品可以回收掺入原料中使用。

属于热塑性塑料的有聚乙烯、聚丙烯、聚氯乙烯、聚苯乙烯、ABS、有机玻璃、尼龙、聚甲醛、聚碳酸酯、聚砜、聚苯醚、聚四氟乙烯、聚三氟乙烯、聚全氟乙烯、氯化聚醚等。

2. 热固性塑料 这类塑料中树脂的分子最终呈体型结构。它在受热之初，因分子呈线型结构，故具有可塑性和可溶性，可成型为一定形状。当继续加热时，线型高聚物分子主链间形成化学键结合（即交联），分子呈网型结构，当温度达到一定值后，交联反应进一步发展，分子变为体型结构，树脂变得既不熔融，也不溶解，形状固定下来不再变化，称为固化。如果再加热，不再软化，不再具有可塑性。在上述成型过程中，既有物理变化又有化学

变化。

由于热固性塑料具有上述特性，因此塑件一旦损坏便不能回收再用。

属于热固性塑料的有酚醛塑料、氨基塑料、环氧塑料、聚邻苯二甲酸二烯丙酯、有机硅塑料、硅酮塑料等。

(二) 按塑料性能及用途分类

1. 通用塑料 指产量大、用途广、价格低的塑料。酚醛塑料、氨基塑料、PVC、PS、PE、PP 等六大品种在目前塑料总产量中占大部分，属通用塑料。

2. 工程塑料 指在工程技术中作结构材料的塑料。其力学性能、耐磨性、耐腐蚀性、尺寸稳定性均较高。由于它既具有一定的金属特性又具有塑料的优良性能，所以在机器制造、轻工、电子、日用、导弹、原子能等部门得到广泛应用。

目前，在工程上使用较多的塑料有 PA、PC、POM、ABS、PSF、PPO、氯化聚醚等。

3. 增强塑料 在塑料中加入玻璃纤维等填料作为增强材料，以进一步改善塑料的力学性能和电性能，这种新型的复合材料通常称为增强塑料。增强塑料具有优良的力学性能，比强度和比刚度高。增强塑料分为热塑性增强塑料和热固性增强塑料。热固性增强塑料又称为玻璃钢。

4. 特殊用途的塑料 指塑料具有特殊用途，如环氧塑料等。

第二节 塑料成型过程中的物理和化学行为

塑料在成型过程中，将表现出各种物理和化学行为，这些基本的物理和化学行为包括：聚合物的流动与流变、加热与冷却、结晶、取向、降解以及热固性塑料的交联等等，下面将分别予以讨论。

一、聚合物的流动与流变行为

在大多数加工过程中，聚合物都要产生流动和形变。研究物质流动与形变的科学称为流变学。聚合物流变学的主要研究问题是了解在应力作用下，高分子材料产生弹性、塑性和粘性形变以及这些行为与各种因素（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最基本的工艺特征，所以，流变学研究对聚合物加工有非常重要的现实意义。

(一) 非牛顿液体

由于分子结构及运动特点，高聚物在物理聚集态上常呈结晶态、玻璃态、高弹态和粘流态。在正常应用时通常为玻璃态或结晶态，而在成型加工过程中，除极少数几种工艺外，均要求聚合物处于粘流态，这是因为在这种状态下，聚合物在外力作用下易产生流动和变形，为其输送和造形带来方便。在成型过程中所使用的原材料包括粘流态的聚合物（聚合物熔体）和聚合物的分散体（包括溶液），它们均属液体范畴。

液体的流动与变形都是在受有应力的情况下实现的。应力有切应力、拉应力和压应力三种，其中切应力对塑料的成型最为重要，因为成型过程中聚合物熔体或分散体在设备和模具中流动的状态及成型后制品质量等均受其影响。拉应力常与切应力同时出现，例如在吹塑成型中型坯的拉长，吹塑薄膜时泡管的膨胀等均存在拉应力的影响。压应力不很重要，一般均忽略不计，但它对聚合物的其它性能却有一定的影响，例如熔体的粘度，所以，在某些情况

下也应予以考虑。

1. 牛顿液体及其流动规律 关于聚合物的流变学性质，可以对比流体力学理论进行研究。在流体力学中，液体在圆管中的流动分为层流和紊流（湍流）两种形式，两者以液体的雷诺准数 Re 区分。层流时 Re 值小于2100。由于聚合物熔体及分散体在成型中流动的 Re 值均小于2100，故可将其流动视为液体层流。

描述液体层流的最简单规律是牛顿流动定律，其内容为：在一定温度下，在相对移动速度为 dv ，相对距离为 dr 的两液体平行层面施加切应力 τ 时（图1-1），则切应力 τ 与剪切速率 dv/dr （亦称应变速率、流变速率或速度梯度）之间呈下列直线关系：

$$\tau = \eta (dv/dr) = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

式中 η ——比例常数，通称为牛顿粘度（Pa·s）；

τ ——切应力（Pa）；

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率（ s^{-1} ）。

牛顿粘度是物料的一种基本特性，依赖于物料的结构和温度，而不依赖于切应力和剪切速率。凡液体层流时符合式（1-1）所示关系的通称牛顿液体。

2. 非牛顿液体及其剪切粘度 事实上，真正属于牛顿液体的只有低分子化合物的液体或溶液。由于大分子的长链结构和缠结，聚合物熔体或分散体的流动行为远比低分子液体复杂。在宽广的剪切速率范围内，这类液体流动时切应力和剪切速率不再成比例关系，液体的粘度也不是一个常数，因而聚合物液体的流变行为不服从式（1-1）的牛顿流动规律。通常把这类液体的流动称为非牛顿流动，具有这种流动行为的液体称为非牛顿液体。

非牛顿液体的粘度也称为表观粘度（ η_a ），它是测定非牛顿液体流动时所施加的切应力和所产生的剪切速率的比值，与牛顿液体一样，都是剪切粘度。两者之间的区别在于牛顿粘度在一定温度下是一个常数，而非牛顿液体粘度即表观粘度在一定温度下是随所施加的切应力的变化而变化的。实践证明，这种变化是多种多样的，如果不考虑聚合物熔体的弹性，则将其分为两个系统。

（1）粘性系统 粘性系统在受力流动时的特性是其剪切速率只依赖于所施切应力的大小，但按其所表现的切应力-剪切速率的关系，又可分为宾哈液体、假塑性液体和膨胀性液体三种。

1) 宾哈液体：这种液体与牛顿液体相同的是，它在切应力-剪切速率关系上也表现为直线，不同的是它的流动只有当切应力达到一定程度后才开始（图1-2中的直线1），使液体产生流动的最小切应力 τ_y ，称为屈服应力，其流动方程可用下式表示：

$$\tau - \tau_y = \eta_p (dv/dr) = \eta_p \dot{\gamma} \quad (1-2)$$

式中 η_p ——刚度系数，等于流动曲线的斜率。

在实际中，几乎所有聚合物在其良性溶剂中的浓溶液和凝胶性糊塑料的流动行为都与这种液体很接近。

2) 假塑性液体：这种液体是非牛顿液体中最普遍的一种，它所表现的流动曲线是非直

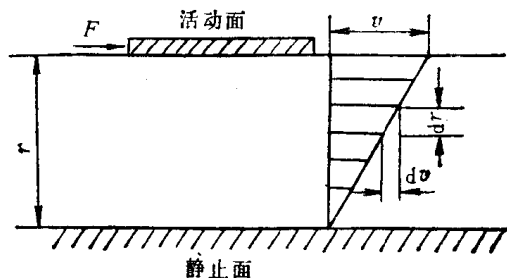


图1-1 切应力与剪切速率关系图

线的（图1-2中的曲线2），但并不存在屈服应力。液体的表观粘度是随切应力的增加而下降的。大多数聚合物熔体以及所有聚合物在其良性溶剂中的溶液，其流动行为均倾向于假塑性液体。

假塑性液体可用指数流动规律来描述，即：

$$\tau = K (dv/dr)^n = K \dot{\gamma}^n \quad (1-3)$$

式中 K ——常数，表征液体的稠度，液体粘稠性越大， K 值就越大；

n ——小于1的常数，用来判定液体与牛顿液体的差别程度，当 $n = 1$ 时，液体为牛顿液体；当 $n \neq 1$ 时，绝对值 $|1 - n|$ 越大，则液体的非牛顿性越强。

表示假塑性液体流动行为的指数函数还有另外一种形式，即：

$$dv/dr = \dot{\gamma} = k\tau^m \quad (1-4)$$

式中 k ——流动常数， k 值越小，液体越粘稠， k 和 K 的关系为：

$$(1/k)^m = K \quad (1-5)$$

m ——大于1的常数，其意义与 n 相同， m 与 n 的关系为：

$$m = 1/n \quad (1-6)$$

3) 膨胀性液体：这种液体的流动曲线也是非直线的（图1-2中的曲线3），而且也不存在屈服应力，但与假塑性液体不同的是，它的表观粘度随切应力的增加而上升。属于这一类型的液体大多数是固体含量高的悬浮液。

(2) 有时间依赖性的系统 属于这一系统的液体其剪切速率不仅与所施加的切应力的大小有关，而且还依赖于应力施加时间的长短。

必须指出，将非牛顿液体按以上方法分类只是为了便于研究，事实上，在塑料成型过程中，同一聚合物熔体或分散体在不同的条件下常常会分别具有前述几种类型的行为。

(二) 非牛顿液体的拉伸粘度

若引起聚合物熔体的流动不是切应力而是拉应力，那么根据式(1-1)，则可引出：

$$\lambda = \sigma / \dot{\epsilon} \quad (1-7)$$

式中 λ ——拉伸粘度；

σ ——拉应力；

$\dot{\epsilon}$ ——拉伸应变速率。

拉伸流动的概念可由图1-3表示，液体流动单元中两个质点A与B，由拉伸前（图1-3a）变至拉伸后（图1-3b）时的情况，

即距离AB因拉应力的作用而变至A'B'。若设AB原长为 l ，拉伸后变为A'B' = $l + dl$ ，那么式(1-7)中的 $\dot{\epsilon}$ 即如下式所示：

$$\dot{\epsilon} = (dl/dt) / l \quad (1-8)$$

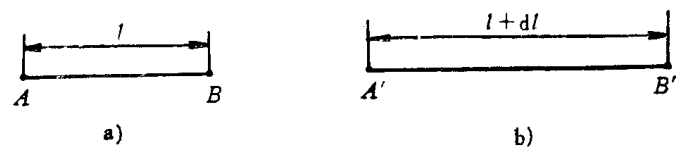


图1-3 拉伸流动示意图

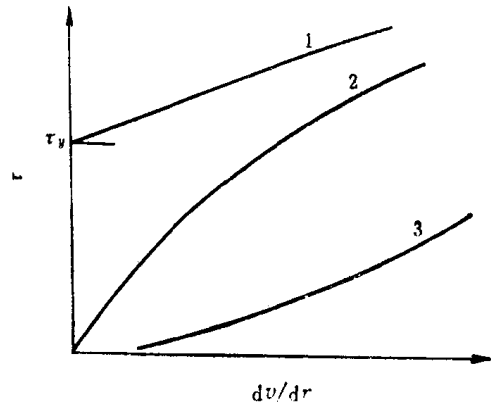


图1-2 非牛顿液体流动曲线图

1—宾哈液体 2—假塑性液体 3—膨胀性液体

由此可见，剪切流动与拉伸流动是有很大的区别的。前者是液体中一个平面对另一个平面的相对滑移，而后者则是一个平面上两个质点间的距离拉长。此外，拉伸粘度还随所施加的拉应力是单向、双向等而异，这是剪切粘度所没有的。

当所施加的拉应力不大时，聚合物熔体的拉伸粘度不随应力的大小而变化，若为单向拉伸，则拉伸粘度值约为剪切粘度值的3倍；若为双向等值拉伸，则为6倍。当拉应力增大时，塑料的拉伸粘度随拉应力的增大而出现上升或下降两种现象。了解这种现象并加以分析研究，对制定合理的成型工艺方案，设计合理的模具结构具有指导意义。如在吹塑薄膜时，若采用拉伸粘度随拉应力增大而上升的成型物料，则很少会使塑件出现应力集中现象；反之，则这种现象易于发生，甚至破裂。

(三) 温度和压力对粘度的影响

聚合物熔体或分散体的粘度除受自身因素、施加的应力和应变速率影响外，还与温度、压力等环境因素有关。

1. 温度对剪切粘度的影响 温度与液体剪切粘度（包括表观粘度，下同）的关系可用下式表示：

$$\eta = \eta_0 e^{a(\theta_0 - \theta)} \quad (1-9)$$

式中 η ——液体在 $\theta^\circ\text{C}$ 时的剪切粘度；

η_0 ——某一基准温度 $\theta_0^\circ\text{C}$ 时的剪切粘度；

a ——系数，对大多数液体而言，当温度范围小于 50°C 时， a 是常数。

由此可见，表观粘度对温度具有敏感性，这在成型过程中是非常有意义的。在塑料成型加工过程中，对于一种表观粘度随温度变化不大的聚合物来讲，如果仅仅依靠升高温度来增加其流动性，以便易于成型是不正确的，因为温度升高的幅度很大，而聚合物的表观粘度却降低有限（如聚丙烯等）。除此之外，这样大幅度地升高温度很可能使聚合物发生高温降解，从而降低塑件质量，再者成型设备等的损耗也较大，工作条件也将恶化。相反，对于聚甲基丙烯酸甲酯这类聚合物，其表观粘度对温度非常敏感，成型时，温度稍有升高就可大大降低其表观粘度，使其流动性得到改善。

2. 压力对剪切粘度的影响 由于液体的剪切粘度依赖于分子间的作用力，而分子间的作用力又与分子间距有关，因此，当液体受有压力时，其分子间距离减小，分子间的作用力增大，以致液体的剪切粘度总是趋于增大。

高分子聚合物熔体与低分子物的液体相比，其压缩性很大，故当聚合物熔体受有压力时，其粘度定会有所增高。因此，在塑料成型加工过程中，不能随意增大其成型压力，否则将使在寻常压力范围内可以成型的物料造成不易成型或生产率下降，甚至塑料变得如固体般地不能流动，当然也就不能成型。此外，值得提及的是，即使在同一压力下的同一种聚合物熔体，若在成型时所用设备的大小不同，则其流动行为也有差别，因为尽管所受压力相同，但受切应力依然可以不同。

压力对聚合物分散体剪切粘度的影响与前面所述对聚合物熔体的影响相似，但由于分散体中低分子物的存在，故对其影响程度较小。另外，分散体在成型时所用的压力都不很高，因此很少考虑这种影响。

3. 温度和压力对拉伸粘度的影响 温度和压力对液体拉伸粘度的影响与对剪切粘度的影响相同，故不再叙述。

二、聚合物熔体的弹性

聚合物熔体不仅具有非牛顿性，而且还具有如固体般的弹性。换言之，聚合物熔体是一种粘弹性材料，具有弹性固体和粘性液体的双重性质。当聚合物熔体受有外加应力时，一部分能量消耗于粘性变形，即熔体流动，这部分变形在应力消除后不能恢复；而另一部分变形的能量被储存起来，当外加应力消除后，将得到恢复。一个明显的实例就是塑料在挤出时的出模膨胀（图1-4），这种现象是低分子液体所没有的。

（一）聚合物熔体的弹性类型

根据所受应力的不同，聚合物熔体所表现的弹性分为剪切弹性和拉伸弹性两种。

1. 剪切弹性 成型物料所受切应力为 τ ，其与发生的剪切弹性变形 γ_R 的比通称为剪切弹性模量（切变模量），以符号 G 表示。由上述定义得：

$$G = \tau / \gamma_R \quad (1-10)$$

绝大多数聚合物熔体的切变模量在恒温下都是随切应力的增大而上升的。

影响聚合物熔体切变模量的因素有温度、压力、相对分子质量及其分布，其中前二者影响很小，相对分子质量分布影响较显著。相对分子质量分布宽的具有较小的切变模量和大而缓的弹性恢复；相反，相对分子质量分布窄的则具有较大的切变模量。

2. 拉伸弹性 成型物料所受拉应力为 σ ，其与发生的拉伸弹性变形 ε_R 的比通称为拉伸弹性模量，以符号 E 表示。 E 可由下式表示：

$$E = \sigma / \varepsilon_R \quad (1-11)$$

聚合物熔体的拉伸弹性模量在单向拉应力不大于1MPa时等于切变模量的3倍。

应该注意，拉伸变形是和剪切变形同时发生的，因此其效果应是叠加性质的。

（二）聚合物液体流动过程中的弹性行为

聚合物流动过程中最常见的弹性行为是端末效应和不稳定流动。

1. 端末效应 聚合物液体在导管中流动时要消耗一部分压力，表现为沿流动方向所出现的压力降；同时液体在进入导管入口端一定区域内的收敛流动中也会产生压力降，这两项压力降除消耗于粘性液体流动时的摩擦外，还消耗于聚合物流动过程的高弹形变。在聚合物流出导管出口端时，高弹形变的恢复又引起液流出现膨胀。在导管入口端与出口端出现的这种与聚合物液体弹性行为有紧密联系的现象称为端末效应，亦分别称为入口效应和离模膨胀效应。

产生入口效应的原因首先在于，聚合物液体以收敛流动方式进入导管入口时，它必须变形以适应它在新的且有适当压缩性的流道内流动，但聚合物熔体具有弹性，也就是对变形具有抵抗力，因此，就必须消耗适当的能量，即消耗相当的压力降，来完成在这段管内的变形。其次，熔体各点的速度在进入导管前后是不同的，为调整速度，也要消耗一定的压力降。

对于离模膨胀效应，有很多解释，但简单来讲可理解为：聚合物熔体从导管中流出后，周围压力大大减小，甚至完全消失，这意味着聚合物内的大分子突然变得自由了，因此，前段流动中储存于大分子中的弹性变形能量被释放出来，致使在流动变形中已经伸展开的大分

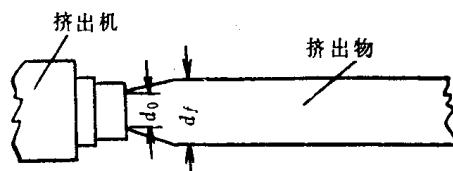


图1-4 挤出塑料时的出模膨胀现象
 d_0 —出口部分口模的内径 d_f —挤出物
膨胀后的直径 d_f/d_0 —出模膨胀比