

普通高等教育机电类规划教材

塑料成型工艺 及模具设计

华中理工大学 李德群 主编

机械工业出版社

普通高等教育机电类规划教材

塑料成型工艺及模具设计

主编 李德群

协编 陈 兴 袁中双

主审 赵仲治

江苏工业学院图书馆
藏书章



机械工业出版社

(京)新登字054号

本书全面讲述了塑料成型的基本原理、工艺基础、塑料制品的设计原则、塑料模具的基本结构及设计过程。在重点讲述热塑性塑料注射工艺及模具的基础上,扼要地讲述了塑料的压缩成型、压注成型、挤出成型、中空成型、真空成型以及压缩空气成型的工艺及模具,使读者对塑料成型的各种方法有一个全面的了解。此外,书中还介绍了近20年来应用越来越广泛的注射模新工艺和新技术,包括热固性塑料注射成型、无流道成型、新型冷却系统、气体辅助成型以及注射模CAD/CAE/CAM。

本书为高等学校、塑性成形工艺及设备专业教材,亦可供从事塑料成型工艺及模具设计、制造和使用的工程技术人员及工人参考。

图书在版编目(CIP)数据

塑料成型工艺及模具设计/李德群主编.-北京:机械工业出版社,1994.11

普通高等教育机电类规划教材

ISBN 7-111-04090-2

I. 塑...

II. 李...

III. ①塑料成型-工艺-高等学校-教材②塑料模具-设计-高等学校-教材

IV. TQ320.66-43

出版人:马九荣(北京市百万庄南街1号 邮政编码100037)

责任编辑:杨燕 版式设计:王颖 责任校对:肖新民

封面设计:郭景云 责任印制:路琳

济南新华印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行

1994年10月第1版·1994年10月第1次印刷

787mm×1092mm^{1/16}·14.25印张·346千字

0 001—6 200册

定价:8.65元

前 言

塑料工业是一门新兴工业，自塑料问世后的几十年以来，塑料工业得到了日新月异的发展。由于塑料来源丰富、制作方便和成本低廉，金属零件塑料化的发展速度很快。金属热加工专业的学生以及从事金属模具设计的工程技术人员面临着新的挑战，他们需要拓宽视野，学习必要的塑料基本理论及其成型工艺，掌握塑料模具的设计方法。本书经全国锻压专业教学指导委员会的审定，列为“八五”教材规划，用作普通高等院校机电类有关专业本科教材。

全书共分三篇，第一篇论述了塑料成型的理论基础和塑料制品的设计原则，第二篇详细讲解了注射成型工艺及模具，第三篇扼要介绍了其它主要的塑料成型方法及模具。本课程的重点放在应用最广泛的热塑性塑料注射成型上面，突破一点，带动全面。此外，本书对塑料成型及模具的最新成就作了概括性的介绍，以反映国内外的先进水平和发展动向。

本书由华中理工大学李德群教授主编，由李德群、陈兴、袁中双三人通力合作，共同完成本书十五章的编写任务。本书由武汉工学院赵仲治教授主审。

本书在编写过程中得到华中理工大学塑性成型模拟及模具技术国家重点实验室肖景容、叶显高、湖北工学院酆华兴、航天部贵阳华阳电工厂梁际谊、翁志江、河南鹤壁汽车电器厂任付生、蒋三庆、航天部四川燎原无线电厂刘祥林等同仁的帮助，他们对教材内容及编写方式提出了许多宝贵意见和建议，在此一并表示衷心感谢。

本书虽是普通高等工业学校塑性成形工艺及设备专业用教材，亦可供从事塑料成型工艺及模具设计、制造和使用的工程技术人员及工人参考。

由于编者水平有限，错误和欠妥之处在所难免，恳希读者指正。

编 者

1993年6月

于华中理工大学

目 录

前言

第一篇 塑料成型基础

第一章 绪论	1	第三节 塑料加工过程的物理和化学变化	16
第一节 塑料材料及其应用	1	思考与练习题	22
第二节 塑料的可加工性	5	第三章 塑料制品的设计原则	23
第三节 塑料的主要成型方法	8	第一节 制品的材料和几何形状	23
思考与练习题	9	第二节 螺纹与齿轮设计	30
第二章 塑料成型理论概述	10	第三节 金属嵌件的设计	32
第一节 塑料的粘弹性	10	第四节 尺寸精度与表面粗糙度	34
第二节 塑料的流变性	12	思考与练习题	37

第二篇 注射成型工艺及模具

第四章 注射成型工艺	39	第五节 凹模壁厚及底板厚度的计算	91
第一节 热塑性塑料的工艺性能	39	思考与练习题	95
第二节 注射工艺过程	42	第八章 注射模导向与推出机构	96
第三节 注射工艺的影响因素	44	第一节 导向机构的设计	96
第四节 常用塑料及其注射工艺	46	第二节 推出机构的结构	98
思考与练习题	49	第三节 脱模力计算及推出零件尺寸确定	103
第五章 注射模具与注射成型机基本 结构及关系	50	第四节 主要推出零件的设计	106
第一节 注射模具的基本结构	50	第五节 主流道及分流道凝料的推出	110
第二节 注射机的基本结构及规格	54	思考与练习题	112
第三节 注射模与注射机的关系	58	第九章 注射模侧向分型与抽芯机构	113
第四节 标准模架的选用	62	第一节 抽芯机构的分类与结构	113
思考与练习题	63	第二节 斜销的设计与计算	122
第六章 注射模浇注系统	64	第三节 滑块与楔紧块的设计	125
第一节 浇注系统的流变学概念	64	思考与练习题	127
第二节 普通流道浇注系统	65	第十章 注射模温度调节系统	128
第三节 浇注系统的平衡进料	76	第一节 温度调节的必要性	128
思考与练习题	80	第二节 冷却管道的工艺计算	130
第七章 注射模成型部分的设计	81	第三节 冷却系统的设计原则	144
第一节 型腔布置	81	第四节 冷却回路的形式	146
第二节 成型零件的结构设计	84	思考与练习题	149
第三节 模具零件材料的选用及处理	86	第十一章 注射模的设计步骤及实例	150
第四节 成型零件工作尺寸的计算	87	第一节 注射模的设计步骤	150
		第二节 注射模设计实例	152

思考与练习题	159	第四节 气体辅助成型	166
第十二章 注射模新技术的应用	160	第五节 注射模计算机辅助设计、辅助工 程与辅助制造	168
第一节 热固性塑料注射工艺及模具	160	思考与练习题	171
第二节 无流道成型	162		
第三节 新型冷却系统	164		
第三篇 其它塑料成型			
第十三章 热固性塑料压缩成型	173	思考与练习题	214
第一节 压缩成型工艺过程及模具	173	附录 A 常用热塑性塑料的成型条件	214
第二节 压缩模与压力机的关系	176	附录 B 模具零件常用材料及热处理	215
第三节 压缩模的结构设计要点	181	附录 C 热塑性塑料的某些性能	216
思考与练习题	190	附录 D 部分优质碳素钢牌号及力学性能	217
第十四章 热固性塑料压注成型	191	附录 E 常用渗碳钢、调质钢牌号、热处 理及力学性能	217
第一节 压注成型工艺过程及模具	191	附录 F 常用塑料的连续耐热温度和热变 形温度	218
第二节 压注模与压力机的关系	194	附录 G 热塑性塑料制品的缺陷及产生的 原因	218
第三节 压注模的结构设计要点	195	附录 H 热固性塑料制品的缺陷及产生的 原因	221
思考与练习题	200	参考文献	222
第十五章 塑料的其它成型方法	201		
第一节 挤出成型模具的设计	201		
第二节 中空成型模具的设计	205		
第三节 真空成型模具的设计	208		
第四节 压缩空气成型模具的设计	212		

第一篇 塑料成型基础

第一章 绪 论

第一节 塑料材料及其应用

一、塑料的概念

塑料是一种可塑成型的材料，它是以高分子聚合物为主要成分的混合物，在加热、加压等条件下具有可塑性，在常温下为柔韧的固体。所谓高分子聚合物，是指由许许多多结构相同的普通分子组成的大分子。它既存在于大自然中（称之为天然树脂），又能够用化学方法人工制取（称之为合成树脂）。合成树脂是塑料的主体。在合成树脂中加入某些添加剂，如填充剂、增塑剂、着色剂等，可以得到各种性能的塑料品种。由于添加剂所占比例较小，塑料的性能主要取决于合成树脂的性能。

塑料具有优良的成型和加工性能。在加热和加压下，利用不同的成型方法几乎可将塑料制成任何形状的制品。塑料的这种独特性能归根于高分子聚合物的巨大相对分子质量。一般的低分子物质的相对分子质量仅为几十至几百，例如一个水分子仅含一个氧原子和两个氢原子，水的相对分子质量为18，而一个高分子聚合物的分子含有成千上万个原子，相对分子质量可达到数万乃至几百万、几千万。原子之间具有很大的作用力，分子之间的长链会蜷曲缠绕。这些缠绕在一起的分子既可互相吸引又可互相排斥，使塑料产生了弹性。高分子聚合物在受热时不象一般低分子物质那样有明显的熔点，从长链的一端加热到另一端需要时间，即需要经历一段软化的过程，因此塑料便具有可塑性。高分子聚合物与低分子物质的重要区别还在于高分子聚合物没有精确、固定的相对分子质量。同一种高分子聚合物所含相对分子质量的大小并不一样，因此只能采用平均相对分子质量来描述。例如，低密度聚乙烯的平均相对分子质量为1.5万~3.5万，高密度聚乙烯的平均相对分子质量为8~14万等等。

高分子聚合物常用来制造合成树脂、合成橡胶和合成纤维，这三大合成材料成为了20世纪材料工业的一个重要支柱。其中，合成树脂的产量最大，应用也最广。

二、塑料的组成

塑料以合成树脂为主要成分，它由合成树脂和根据不同的需要而增添的不同添加剂所组成。

1. 合成树脂

在自然界中存在着一些来自植物或动物分泌的有机物质，如松香、虫胶和琥珀等，称之为天然树脂。它们在受热后没有明显的熔点，能够逐渐变软，并具有可塑性。这些高分子有机物质产量低、性能也不理想。为了寻找天然树脂的代用品，人们模仿它们的成分，用化学方法人工地制取各种树脂。这种以人工方法制取的树脂称为合成树脂。最初制造合成树脂的原料为农副产品，以后改用煤，60年代以后则主要来自于石油。

2. 稳定剂

塑料在受热及紫外线、氧气的作用下会逐渐老化。因此在大多数塑料中都要添加稳定剂，用以减缓或阻止塑料在加工和使用过程中的分解变质。根据稳定剂作用的不同，又分为热稳定剂、抗氧化剂及紫外线吸收剂等。各种塑料由于内部结构不同，老化机理不一样，所用的稳定剂也就不同。例如，有机锡化合物常用作聚氯乙烯的热稳定剂，酚类及胺类有机物常用作抗氧化剂，羟基类衍生物、苯甲酸酯类及炭黑等常用作紫外线吸收剂。稳定剂的用量一般为塑料的0.3%~0.5%。

3. 填充剂

为了降低塑料成本，有时在合成树脂中掺入一些廉价的填料。但是在更多情况下，添加填充剂是为了改进塑料的性能。塑料的硬度、刚度、冲击强度、电绝缘性、耐热性、成型收缩率等皆可通过添加相应的填充剂而得到改善。例如在酚醛树脂中加入木屑等填料，可以获得机械强度高的胶木，加入云母、石英和石棉可提高塑料的耐热性和绝缘性。常用的填充剂的形态有粉状、纤维状和片状三种。粉状填充剂如木粉、石棉粉、滑石粉、陶土、云母粉、石墨粉等，纤维状填充剂有石棉、玻璃纤维等，片状填充剂有纸、棉布、玻璃布等。填充剂的用量通常为塑料组成的40%以下。

4. 增塑剂

增塑剂用来提高塑料的可塑性和柔软性。常用的增塑剂是一些高沸点的液态有机化合物或低熔点的固态有机化合物。理想的增塑剂必须在一定范围内能与合成树脂很好相溶，并具有良好的耐热、耐光、不燃及无毒等性能。增塑剂的加入会降低塑料的稳定性、介电性能和机械强度。塑料制品的老化现象（塑料的硬度随时间的变化而增大），就是由增塑剂中的某些挥发物质逐渐从制品中逸出而产生的。因此在塑料中应尽可能地减少增塑剂的含量。大多数塑料一般不添加增塑剂，唯有软质聚氯乙烯含有大量的增塑剂（邻苯二甲酸二丁酯等），其增塑剂的含量可高达100%。

5. 润滑剂

润滑剂对塑料的表面起润滑作用，防止熔融的塑料在成型过程中粘附在成型设备或模具上。添加润滑剂还可改进塑料熔体的流动性能，同时也可以提高制品表面的光亮度。常用的润滑剂如硬脂酸及其盐类等。润滑剂的用量通常小于1%。

6. 着色剂

合成树脂的本色大都是白色半透明或无色透明的。在工业生产中常利用着色剂来增加塑料制品的色彩。一般要求着色剂的着色力强、色泽鲜艳、耐热、耐光。常用的着色剂有有机颜料和矿物颜料两类。有机颜料如颜色钠猩红、黄光硫靛红棕、颜料蓝、炭黑等，矿物颜料如铬黄、绛红镉、氧化铬、铝粉末等。

7. 固化剂

在热固性塑料成型时，有时要加入一种可以使合成树脂完成交联反应而固化的物质。如在酚醛树脂中加入六次甲基四胺、在环氧树脂中加入乙二胺或顺丁烯二酸酐等。这类添加剂称之为固化剂或交联剂。

根据不同的用途，在塑料中还可增添一些其它的添加剂。例如，阻燃剂可降低塑料的燃烧性，发泡剂可制成泡沫塑料等。

塑料还可以象金属那样制成“合金”，即把不同品种、不同性能的塑料用机械的方法均匀

掺合在一起(共混改性),或者将不同单体的塑料经过化学处理得到新性能的塑料(聚合改性)。例如ABS塑料就是由丙烯腈、丁二烯、苯乙烯三种组分制成的三元共聚物。

三、塑料的分类

目前,塑料品种已达300多种,常见的约30多种。我们可根据塑料的制造方法、成型工艺及其用途将它们进行分类。

1. 按制造方法分类

合成树脂的制造方法主要是根据有机化学中的两种反应:聚合反应和缩聚反应。

聚合反应是将许多低分子单体(如从煤和石油中得到的乙烯、苯乙烯、甲醛等的分子)化合成高分子聚合物的化学反应。在此反应过程中没有低分子物质析出。这种反应既可在同一种物质的分子间进行(其反应产物称为聚合体),也可以在不同物质的分子间进行(其反应产物称为共聚体)。

缩聚反应也是将相同的或不相同的低分子单体化合成高分子聚合物的化学反应,但是在此反应过程中有低分子物质(如水、氨、氯化氢等)析出。

因此,可将塑料划分为聚合树脂和缩聚树脂两类。

2. 按成型性能分类

根据成型工艺性能,塑料可分为热塑性塑料和热固性塑料两类。热塑性塑料主要由聚合树脂制成,热固性塑料大多数是以缩聚树脂为主、加入各种添加剂制成的。

热塑性塑料的特点是受热后软化或熔融,此时可成型加工,冷却后固化,再加热仍可软化。热固性塑料在开始受热时也可以软化或熔融,但是一旦固化成型就不会再软化。此时,即使加热到接近分解的温度也无法软化,而且也不会溶解在溶剂中。

塑料的这种热塑或热固的特性,可以从分子的结构特征来解释。一般低分子物质的分子呈球状,而高分子物质的结构,有的象长链,有的象树枝,还有的呈网状。这些结构使得塑料具有热塑或热固的特性。如图1-1所示为高分子物质的结构示意图。

热塑性塑料的分子结构呈链状或树枝状,常称为线型聚合物。这些分子通常互相缠绕但并不连结在一起,受热后具有可塑性。热塑性塑料又可分为无定形塑料和结晶形塑料两类。属于结晶形的常用塑料如聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺(尼龙)等;属于无定形的常用塑料如聚苯乙烯、聚氯乙烯、ABS等。

热固性塑料在加热开始时也具有链状或树枝状结构。但在受热后这些链状或树枝状分子逐渐结合成网状结构(称之为交联反应),成为既不熔化又不溶解的物质,常称为体型聚合物。由于分子的链与链之间产生了化合反应,所以当再次加热时这类塑料便不能软化。由此可见,热固性塑料的耐热变形性能比热塑性塑料好。常见的热固性塑料有酚醛、脲醛、三聚氰胺甲醛、不饱和聚酯等。

热塑性塑料常采用注射、挤出或吹塑等方法成型。热固性塑料常采用压缩或压注方法成型,有的也可以采用注射成型。

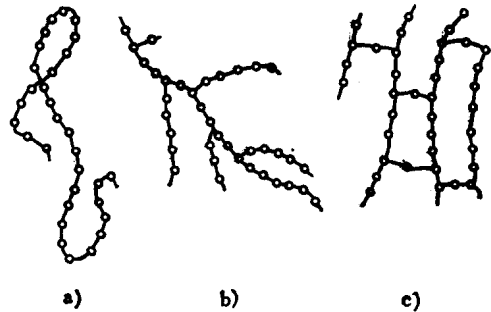


图1-1 高分子物质的结构示意图

a) 链状结构 b) 树枝状结构 c) 网状结构

由于塑料的名称大都冗长繁琐，说与写均不方便，所以常用国际通用的英文缩写字母来表示。表1-1示出常用的塑料名称及英文代号。

表1-1 常用塑料名称及英文代号

塑料种类	塑料名称	代号
热塑性塑料	聚乙烯	PE
	高密度聚乙烯	HDPE
	低密度聚乙烯	LDPE
	聚丙烯	PP
	聚苯乙烯	PS
	丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物	ABS
	聚甲基丙烯酸甲酯 (有机玻璃)	PMMA
	聚苯醚	PPO
	聚酰胺 (尼龙)	PA (N)
	聚砜	PSF
	聚氯乙烯	PVC
	聚甲醛	POM
	聚碳酸酯	PC
热固性塑料	酚醛	PF
	脲醛	UF
	三聚氰胺甲醛	MF
	环氧	EP
	不饱和聚酯	UP

3. 按用途分类

按照用途塑料又可分为通用塑料、工程塑料以及特殊用途的塑料等。通用塑料是指用途最广泛、产量最大、价格最低廉的塑料。现在世界上公认的通用塑料有聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚苯乙烯 (PS)、聚氯乙烯 (PVC)、酚醛 (PF) 和氨基塑料六大类，他们的产量约占世界塑料总产量的80%。工程塑料是指那些可用作工程材料的塑料，主要有ABS、聚酰胺 (PA)、聚甲醛 (POM)、聚碳酸酯 (PC)、聚苯醚 (PPO)、聚砜 (PSF) 及各种增强塑料。

随着塑料应用范围的不断扩大，工程塑料和通用塑料之间的界线越来越难划分。例如，聚氯乙烯 (PVC) 作为耐腐蚀材料已大量用于化工机械中，按用途分类，它又属于工程塑料。

四、塑料的性能和用途

不同品种的塑料具有不同的性能和用途。综合起来，塑料具有如下性能及用途。

1. 质量轻

一般塑料的密度与水相近，大约是钢密度的1/6。虽然塑料的密度小，但它的机械强度比木材、玻璃、陶瓷等要高得多。有些塑料在强度上甚至可与钢铁媲美。这对于要求减轻自重的车辆、船舶和飞机有着特别重要的意义。由于质量轻，塑料特别适合制造轻巧的日用品和家用电器零件。

2. 比强度高

如果按单位重量来计算材料的抗拉强度 (称之为比强度)，则塑料并不逊于金属，有些塑料，如工程塑料、碳纤维增强塑料等，还远远超过金属。所以一般塑料除制造日常用品外，

还可用于工程机械中。纤维增强塑料可用作负载较大的结构零件。塑料零件在运输工具中所占比例越来越大。目前，在小轿车中塑料的重量约占车重的1/10，而在宇宙飞船中塑料约占飞船总体积的一半。

3. 耐化学腐蚀能力强

塑料对酸、碱、盐等化学物质均有耐腐蚀能力。其中，聚四氟乙烯是化学性能最稳定的塑料，它的化学稳定性超过了所有的已知材料（包括金与铂）。最常用的耐腐蚀材料为硬聚氯乙烯。它可以耐浓度达90%的浓硫酸、各种浓度的盐酸及碱液，被广泛用来制造化工管道及容器。

4. 绝缘性能好

塑料对电、热、声都有良好的绝缘性能，被广泛地用来制造电绝缘材料、绝热保温材料以及隔音吸音材料。塑料的优越电气绝缘性能和极低的介电损耗性能，可以与陶瓷和橡胶媲美。除用作绝缘外，现又制造出半导体塑料、导电导磁塑料等，它们对电子工业的发展具有独特的意义。

5. 光学性能好

塑料的折光率较高，并且具有很好的光泽。不加填充剂的塑料大都可以制成透光性良好的制品，如有机玻璃、聚苯乙烯、聚碳酸酯等都可制成晶莹透明的制品。目前这些塑料已广泛地被用来制造玻璃窗、罩壳、透明薄膜以及光导纤维材料。

6. 多种防护性能

上述塑料的耐腐蚀性、绝缘性等，皆体现出塑料对其它物质的防护性，塑料还具有防水、防潮、防辐射、防震等多种防护性能，被广泛地用来制造食品、化工、航天、原子能工业的包装材料和防护材料。

应该指出的是，塑料也存在着一一些缺点，在应用中受到一定的限制。一般塑料的刚性差，如尼龙的弹性模量约为钢铁的1/100。塑料的耐热性差，在长时间工作的条件下一般使用温度在100℃以下，在低温下易开裂。塑料的导热系数只有金属的1/200~1/600，这对散热而言是一个缺点。若长期受载荷作用，即使温度不高，塑料也会渐渐产生塑性流动，即产生“蠕变”现象。塑料易燃烧，在光和热的作用下性能容易变坏，发生老化现象。所以，在选择塑料时要注意扬长避短。

第二节 塑料的可加工性

一、塑料的加工适应性

温度对于塑料的加工有着重要的影响。随着加工温度的逐渐升高，塑料将经历玻璃态、高弹态、粘流态直至分解。处于不同状态下的塑料表现出不同的性能，这些性能在很大程度上决定了塑料对加工的适应性。下面以热塑性塑料为例说明在各种状态下塑料与加工方法的关系。

图1-2为热塑性塑料的弹性模量 E 、形变率 $\dot{\gamma}$ 与温度 θ 的曲线关系。从图中可见，处于玻璃化温度 θ_g 以下的塑料为坚硬的固体。由于弹性模量高、形变率小，故在玻璃态塑料不宜进行大变形的加工，但可进行车、铣、刨、钻等机械切削加工。在 θ_g 以下的某一温度，塑料受力易发生断裂破坏，这一温度称为脆化温度。它是材料使用的下限温度。

在 θ_g 以上的高弹态，塑料的弹性模量显著减小，形变能力大大增强。对于无定形塑料，在高弹态靠近聚合物流动或软化温度 θ_f 一侧的区域内，材料的粘性很大，某些塑料可进行真空成型、压力成型、压延和弯曲成型等。由于此时的形变是可逆的，为了得到符合形状尺寸要求的制品，在加工中把制品温度迅速冷却到 θ_g 以下的温度是这类加工过程的关键。对于结晶形塑料，当外力大于材料的屈服点时，可在 θ_g 至熔点温度 θ_m 的区域内进行薄膜或纤维的拉伸。此时 θ_g 是大多数塑料加工的最低温度。

高弹态的上限温度是 θ_f 。由 θ_f （或者 θ_m ）开始，塑料呈粘流态。通常将呈粘流态的塑料称为熔体。在 θ_f 以上不高的温度范围内常进行压延、挤出和吹塑成型等。在比 θ_f 更高的温度下，塑料的弹性模量降低到最低值，较小的外力就能引起熔体宏观流动。此时在形变中主要是不可逆的粘性形变。塑料在冷却后能够将形变永久保持下去。因此在这个温度范围内常进行熔融纺丝、注射、挤出和吹塑等加工。但是过高的温度容易引起制品产生溢料、翘曲等弊病，当温度高到分解温度 θ_d 时还会导致塑料分解，以致降低制品的物理、力学性能或者引起制品外观不良。因此， θ_f 与 θ_g 一样都是塑料进行加工的重要参考温度。

从以上讨论可知，在一定的加工温度下塑料具有可挤压性、可模塑性、可延性、可纺性、可机加工性等。限于本课程的教学内容，下面仅讨论塑料的可挤压性和可模塑性。

二、塑料的可挤压性

塑料在加工过程中常受到挤压作用，例如塑料在挤出机和注射机料筒中以及在模具中都受到挤压作用。塑料的可挤压性是指塑料在受到挤压作用时获得形状和保持这种形状的能力。

在通常条件下塑料在固体状态不能采用挤压成型，只有当塑料处于粘流态时才能借助于挤压获得宏观的形变。在挤压过程中，塑料熔体主要受到剪切作用，故塑料的可挤压性主要取决于熔体的剪切粘度。大多数塑料熔体的粘度随剪切力或剪切速率的增大而降低。

如果在挤压过程中塑料的粘度很低，虽然流动性很好，但保持形状的能力较差。反之，若塑料的粘度很高，就会造成流动性差、成型困难。有关切应力或剪切速率对塑料粘度的影响将在第二章讨论。

熔融指数是评价热塑性塑料可挤压性的一种简单而实用的指标。熔融指数采用如图 1-3 所示的专用仪器来测定。

熔融指数仪只测定在给定切应力下塑料的流动程度。在

恒温下测定塑料熔体在10min内从出料孔挤出的重量(g)。这个重量称为熔体流动指数或熔

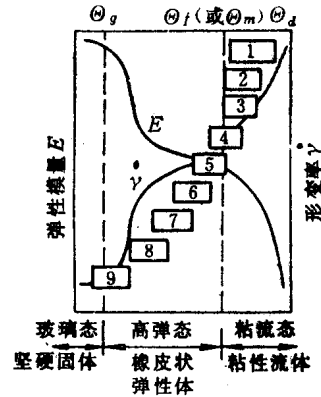


图1-2 热塑性塑料的状态与加工的关系

- 1—熔融纺丝 2—注射 3—薄膜吹塑 4—挤成型 5—压延成型 6—中空成型 7—真空和压力成型 8—薄膜和纤维热拉伸 9—薄膜和纤维冷拉伸

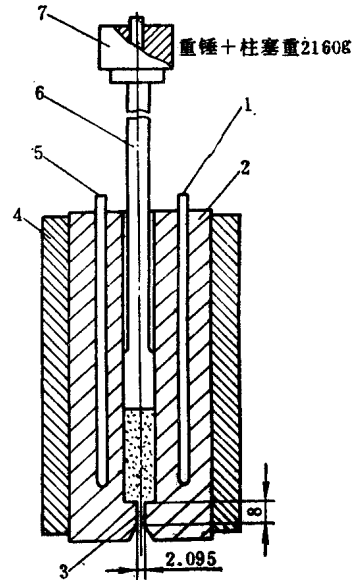


图1-3 熔融指数仪结构示意图

- 1—热电偶 2—料筒 3—出料孔 4—保温层 5—加热棒 6—柱塞 7—重锤

融指数，简写为〔MI〕或〔MFI〕。

熔融指数仪虽然具有结构简单、使用方法简便等优点，但在荷重2.16kg（重锤与柱塞的重量）和出料孔直径为2.095mm的条件下，熔体中的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 仅约为 $10^{-2} \sim 10s^{-1}$ 范围，属于低剪切速率下的流动，远比注射或挤出成型加工中通常的剪切速率（ $10^2 \sim 10^4 s^{-1}$ ）要低。因此，通常测定的〔MI〕并不能说明注射或挤出成型时塑料熔体的实际流动性能。但用〔MI〕能方便地表示塑料流动性的高低。

熔融指数仪主要用于测定在给定温度下一些热塑性塑料的〔MI〕，如聚乙烯（190℃）、聚丙烯（230℃或250℃）等。表1-2列出了常用的一些成型方法与熔融指数的关系。

表1-2 某些成型方法适宜的熔融指数值

加工方法	产 品	所需材料的〔MI〕值 (g/10min)	加工方法	产 品	所需材料的〔MI〕值 (g/10min)
挤出成型	管材	<0.1	注射成型	一般制品	1~2
	片材	0.1~0.5		薄壁制品	3~6
	电线、电缆 瓶类	0.1~1 1~2	真空成型	制 品	0.2~0.5

三、塑料的可模塑性

可模塑性是指在一定的温度和压力作用下塑料在模具中模塑成型的能力。具有可模塑性的材料可通过注射、压缩和挤出等成型方法制得各种形状的模塑制品。

可模塑性主要取决于塑料的流变性、热性质和其它物理力学性质等，热固性塑料的可模塑性还与聚合物的化学反应性有关。

模塑条件对塑料可模塑性的影响可以用图1-4所示的模塑窗口来说明。

从模塑窗口图可见，成型温度过高虽然有利于成型，但会引起塑料分解，制品的收缩率也会增大。成型温度过低则熔体粘度大，流动困难，且因弹性发展，明显地使制品形状稳定性变差。适当地增大压力，能改善熔体的流动性，但过高的压力会引起模具溢料并增加制品的内应力。压力过低又会造成充模不足。图中a、b、c、d四条线组成的模塑窗口A才是模塑的最佳区域。除了模塑条件外，模具的结构尺寸也会影响塑料的可模塑性。模具结构尺寸不当甚至会导致成型失败。

除了测定熔体的流变数据外，在生产中广泛用来判断塑料可模塑性的方法是螺旋流动试验。该试验是通过一个刻有阿基米德螺旋槽的模具来实现的。模具结构如图1-5所示。

试验时，熔体在注射压力的推动下由螺旋中央注入到模具中。熔体在流动过程中逐渐冷却并硬化为螺旋线状固体。螺线的长度（如图1-5所示，单位为cm）反映出各类塑料熔体流动性的差异。

模具的热传导对螺旋线长度的影响可用图1-6说明。当熔体注入模具并与螺旋线槽壁接触时，由于模壁温度（ θ_0 ）低于熔体温度（ θ ），槽壁的热传导作用会使熔体很快冷却和硬化，

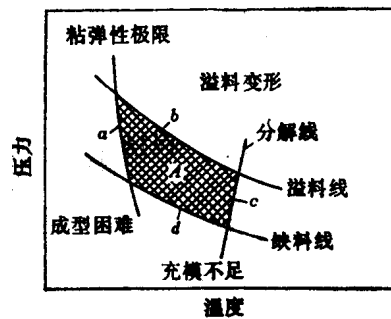


图1-4 模塑窗口图

- A—成型区域 a—表面不良线
b—溢料线 c—塑料分解线
d—缺料线

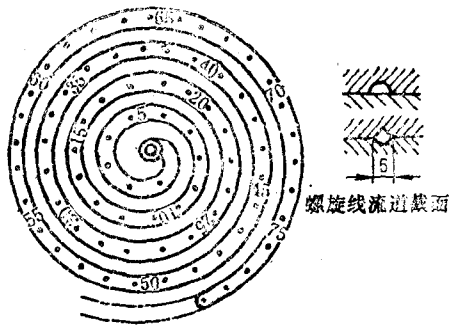


图1-5 螺旋流动试验模具示意图

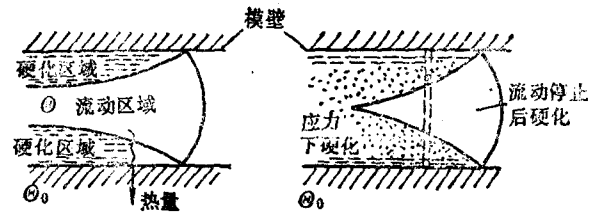


图1-6 螺旋槽中熔体的流动与硬化

$\theta - \theta_0$ 值愈大，冷却和硬化愈快。当槽壁周围硬化的熔体厚度增加到槽的中心部位时，熔体的流动被阻止并硬化形成表征流动难易的螺旋线状固体。螺线愈长，表明该塑料熔体的流动性愈好。螺线长度除与熔体与模壁的温差有关外，还与熔体流动压力、保压时间以及螺旋槽的几何尺寸有关。

通过螺旋流动试验可以了解到，在一定切应力和温度范围内的塑料流变性质、温度、压力、成型周期、塑料配方、模具浇口及型腔尺寸对流动性和模塑条件的影响。

第三节 塑料的主要成型方法

塑料的成型方法很多，下面列举其中六种主要的成型方法。

一、注射成型

塑料的注射成型又称注塑成型。该方法采用注射成型机将粒状的塑料连续输入到注射成型机料筒中受热并逐渐熔融，使其呈粘性流动状态，由料筒中的螺杆或柱塞推至料筒端部。通过料筒端部的喷嘴将熔体注入到闭合的模具中，充满后经过保压和冷却，使制品固化定型，然后开启模具取出制品。注射成型主要用于热塑性塑料，现在也用于热固性塑料。注射成型的生产是周期性的。根据产品的批量、结构、尺寸与精度，可采用一模一腔，也可采用一模多腔。

二、挤出成型

挤出成型又称挤塑成型。该方法与注射成型的原理类似，将粒状塑料在挤出机的料筒中完成加热和加压过程，熔体经过装在挤出机机头上的成型口模挤出，然后冷却定型，借助牵引装置拉出，成为具有一定横截面形状连续制品，如管、槽、板及异型材制品等等。挤出成型是热塑性塑料的主要成型方法之一。除了成型加工外，该法还用于塑料的混炼加工，如着色、填充、共混等皆可通过挤出造粒工序来完成。

三、中空成型

中空成型又称吹塑成型。它是制造中空制品和管筒形薄膜的方法。该法先用挤出机或注射机挤出或注出管筒状的熔融坯料，然后将此坯料放入吹塑模具内，向坯料内吹入压缩空气，使中空坯料均匀膨胀直至紧贴模具内壁，冷却定型后开启模具取出中空制品。在工业生产中如瓶、桶、球、壶、箱一类的热塑性塑料制品均可用此法制造。若将从挤出机中连续不断挤出的熔融塑料管筒内趁热通入压缩空气，把管筒胀大撑薄，然后冷却定型，可以得到管筒

形薄膜，将其截断可热封制袋，也可将其纵向剖开展为塑料薄膜。

四、压缩成型

压缩成型又称压制成型。该法把由上、下模（或凸、凹模）组成的模具安装在压力机的上、下模板之间，塑料粒料（或粉料、或预制坯料）在受热和受压的作用下充满闭合的模具型腔，固化定型后得到塑料制品。此法主要用于热固性塑料。

五、压注成型

压注成型又称传递成型。与压缩成型一样，压注成型也是热固性塑料的主要成型方法之一。该法将塑料粒料或坯料装入模具的加料室内，在受热与受压的作用下熔融的塑料通过模具加料室底部的浇注系统（流道与浇口）充满闭合的模具型腔，然后固化成型。该法适合于形状复杂或带有较多嵌件的热固性塑料制品。

六、固相成型

固相成型的特点是使得塑料在熔融温度以下成型，在成型过程中塑料没有明显的流动状态。该法多用于塑料板材的二次成型加工，例如真空成型、压缩空气成型和压力成型等。固相成型原来多用于薄壁制品的成型加工，现已能用于制造厚壁制品。

塑料的成型方法除了以上列举的六种外，还有压延成型、浇铸成型、滚塑成型、泡沫成型等。本书着重叙述在机械、电子、轻工工业中应用最广泛的注射成型工艺及模具，同时也扼要介绍塑料的其它主要成型方法，以期读者在掌握注射成型方法的基础上对塑料的主要成型方法有一个完整的概念。

思考与练习题

- 1-1 塑料的主要成分是什么？它们从何而来？
- 1-2 默写五种常用热塑性塑料的名称及代号。
- 1-3 从日常用品中举出两种聚乙烯、ABS、聚氯乙烯和尼龙的制品。
- 1-4 比较塑料可挤压性与可模塑性的异同点。
- 1-5 比较注射、压缩和压注成型的异同点。

第二章 塑料成型理论概述

第一节 塑料的粘弹性

一、塑料的基本力学模型

如前所述，塑料在加工过程中一般要经历玻璃态、高弹态和粘流态。在玻璃态下塑料与其它刚性材料类似，力与应变的关系符合虎克定律，在高弹态下则比较复杂，此时塑料既表现出固体的性质（弹性），又表现出流体的性质（粘性），我们将这种弹性与粘性的综合称之为塑料的粘弹性。

用于描述塑料在高弹态下粘弹性的最基本的力学模型如图2-1所示。

1. 弹性模型

符合虎克定律的弹性固体可用一个理想弹簧表示。

2. 粘性模型

符合牛顿粘性定律的牛顿型流体（详见下节）可用盛有粘性牛顿流体的粘壶来表示。粘壶可视为一个圆柱缸体，活塞受力后在缸内推动流体而移动。

3. 麦克斯威尔 (Maxwell) 模型

该模型由一个理想弹簧和一个粘壶串联而成。弹簧受力后产生瞬时弹性变形，并以等量应力传递给粘壶。粘壶中活塞将按均匀速度移动，此时表现为牛顿型流体的粘性流动。若将这种稳定流动或变形骤然制止，由于粘壶的粘性作用，弹簧受到的拉力不能立即消除，而是逐渐减小，这就类似粘弹体的应力松弛过程，故该模型又称为松弛模型。在该模型中粘壶产生了不可恢复的粘性流动。

4. 沃伊特—开尔文 (Voigt—Kelvin) 模型

该模型由弹簧和粘壶并联而成。由于弹簧与粘壶并在一起，受力后弹簧不会立即被拉开。此时该模型就像一块坚硬的物体，只能在应力作用下徐徐发生变形。当解除应力后弹簧与粘壶又慢慢回复原状，不会产生剩余形变。

沃伊特—开尔文模型所描述的变形接近弹性体，当应力解除后形变能够复原，但是并不象弹性体那样马上复原，而是需要一段时间。麦克斯威尔模型则接近于流体，其粘滞流动是不可逆转的。如果将这两个力学模型结合起来，便能较好地描述线型聚合物在高弹态下的粘弹性质。

二、粘弹性模型

粘弹性模型是将麦克斯威尔模型与沃伊特—开尔文模型串联起来分析的。图2-2示出粘

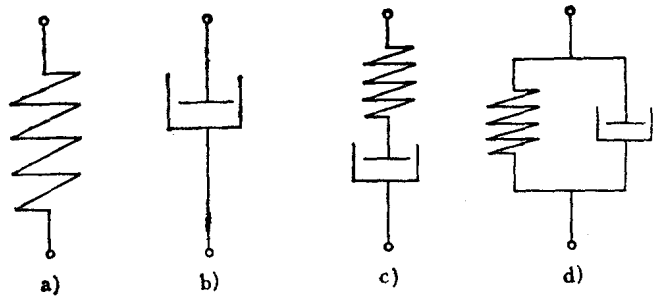


图2-1 四种基本力学模型

a) 弹性模型 b) 粘性模型 c) 麦克斯威尔模型
d) 沃伊特—开尔文模型

弹性模型的受力图以及应变-时间曲线。图中， G 表示线型聚合物的弹性切变模量、 μ 表示粘度、 τ 表示切应力、 t 表示时间、 γ 表示切应变。

在时间 t_1 以前， G_1 、 μ_1 、 G_2 、 μ_2 均处于原始状态。到时间 t_1 时聚合物的分子链犹如弹簧一样，产生瞬时弹性形变 (τ/G_1)。

若受力时间很短，聚合物仅产生瞬时弹性形变，并不影响塑料制品的应用性。但若继续施加应力 τ ，将使粘壶 μ_1 移动，即聚合物的分子链产生粘性流动位移 $[(\tau/\mu_1)t]$ 。应力作用时间愈长，粘性形变愈大，并且粘壶 μ_2 也随之移动。然而粘壶 μ_2 是与弹簧 G_2 并联的，当应力解除后，在弹簧 G_2 的弹性作用下粘壶 μ_2 最终将回复到其原始位置。 t_2 时刻为应力即将解除前材料的最大形变。在应力解除后的 t_3 时刻，弹簧 G_1 的弹性形变立即恢复，而粘壶 μ_1 和弹簧 G_2 、粘壶 μ_2 仍保持形变和位移。在 $t_3 \sim t_4$ 时刻，弹簧 G_2 回缩，但其运动被粘壶 μ_2 所延迟， G_2 的应变 (τ/G_2) 将在 t_4 时刻恢复。材料的最终总应变将仅是粘壶 μ_1 的粘滞流动。

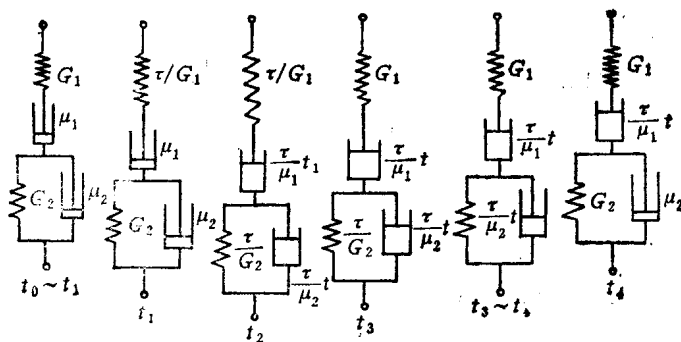
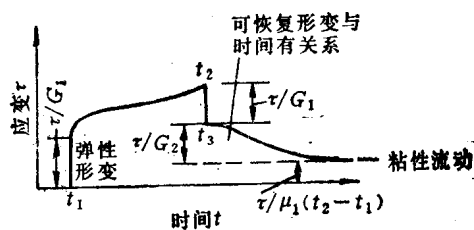


图2-2 粘弹性模型

描述上述粘弹性模型的数学表达式为：

$$\gamma = \frac{\tau}{G_1} + \frac{\tau}{\mu_1} t + \frac{\tau}{G_2} \left[1 - e^{-\left(\frac{G_2}{\mu_2}\right) t} \right] \quad (2-1)$$

式中，等号右边的第一项为材料的弹性形变、第二项是基于麦克斯威尔模型的粘性流动、第三项是基于沃伊特-开尔文模型的延迟弹性。该式不仅反映了粘弹性材料对时间的依赖性，同时可以定性分析温度对聚合物力学性能的影响。

低温时，由于粘度 μ_1 、 μ_2 很高，式中等号右边第二、第三项均很小，材料表现为切变模量为 G_1 的理想弹性体。但是，低温时若在低于弹性极限连续、长期地施加应力，材料会发生蠕变。这主要是式中等号右边第二项粘流效应所表现出的对时间的依赖性。式中等号右边第三项所表示的流动是可恢复的。这种可恢复的延迟流动与总形变相比是很小的一部分。

高温时， μ_1 与 μ_2 都很低，式中等号右边第一、三项与第二项相比显得很小，材料处于粘流态，总形变主要表现为粘度 μ_1 的流动。

应该指出的是，上述粘弹性模型只是一个理想化的模型。聚合物在粘流态时一般具有非牛顿性而不是牛顿性，弹性响应为非虎克性而不是虎克性，蠕变曲线也不只依赖时间这一个因素。但是，该模型能帮助我们定性理解塑料在加工过程中的力学行为，指导我们合理地制定和控制塑料的成型工艺条件。