



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

塑料注射成型工艺 及模具设计

第2版

华中科技大学 李德群 黄志高 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分14章，内容包括绪论、塑料成型理论、注射机与注射成型工艺、注射模设计概述、注射模浇注系统、注射模成型部分的设计、注射模导向与推出机构、注射模侧向分型与抽芯机构、注射模温度调节系统、无流道凝料注射模设计、热固性塑料注射成型工艺及模具、注射模设计实例、其他注射成型技术以及塑料制品的常见缺陷与解决办法。

本书可作为普通高等院校材料成形及控制工程专业教材，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参考。

图书在版编目 (CIP) 数据

塑料注射成型工艺及模具设计/李德群, 黄志高主编. —2版. —北京: 机械工业出版社, 2009.5

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-26570-2

I. 塑… II. ①李…②黄… III. ①塑料成型—高等学校—教材②塑料模具—设计—高等学校—教材 IV. TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 037039 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑: 冯春生 版式设计: 霍永明 责任校对: 陈延翔

封面设计: 王伟光 责任印制: 乔宇

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

2009年6月第2版第1次印刷

184mm × 260mm · 14.75 印张 · 359 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-26570-2

定 价: 28.00元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

销售服务热线电话: (010) 68326294

购书热线电话: (010) 88379639 88379641 88379643

编辑热线电话: (010) 88379715

封面防伪标均为盗版

前 言

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。它是在普通高等教育机电类规划教材《塑料成型工艺及模具设计》的基础上经过扩充和改进完成的，兼顾到塑料注射成型工艺和模具设计，力求理论联系实际，突出了计算机辅助设计和辅助分析在成型工艺和模具设计上的应用，增加了塑料制品成型的常见缺陷与解决办法部分，并对塑料注射成型的新工艺和新方法作了概括性的介绍。

本书由华中科技大学李德群教授和黄志高博士主编，黄志高博士负责编写第一、二、三、四章，曾盛渠博士负责编写第五、六、七、八章，崔树标博士负责编写第九章，张云博士负责编写第十、十一章，李庆博士负责编写第十二章，李健辉博士负责编写第十三章，赵朋博士负责编写第十四章。本书由周华民、张宜生教授主审。

本书可作为普通高等院校材料成形及控制工程专业教材，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参考。

由于编者水平有限，错误和欠妥之处在所难免，恳请读者指正。

编 者

于华中科技大学

目 录

前言		
第一章 绪论	1	
第一节 塑料材料及其应用	1	
第二节 塑料的可加工性	5	
第三节 塑料的主要成型方法	8	
第二章 塑料成型理论	10	
第一节 塑料的粘弹性	10	
第二节 塑料的流变性	12	
第三节 塑料加工过程的物理和化学变化	17	
第三章 注射机与注射成型工艺	24	
第一节 注射机基本结构与技术参数	24	
第二节 热塑性塑料的工艺性能	27	
第三节 注射工艺过程	30	
第四节 注射工艺的影响因素	32	
第五节 常用塑料及其注射工艺	35	
第四章 注射模设计概述	39	
第一节 注射模设计内容及步骤	39	
第二节 制品成型工艺性	41	
第三节 注射模的基本结构	46	
第四节 注射模与注射机的关系	51	
第五节 注射模标准件	55	
第六节 注射模 CAD/CAM/CAE	56	
第五章 注射模浇注系统	60	
第一节 浇注系统的流变学概论	60	
第二节 普通流道浇注系统	62	
第三节 浇注系统的平衡进料	74	
第六章 注射模成型部分的设计	78	
第一节 型腔布置	78	
第二节 分型面的确定	80	
第三节 排气槽的设计	82	
第四节 成型零件的结构设计	84	
第五节 模具零件材料的选用及处理	86	
第六节 成型零件工作尺寸的计算	88	
第七节 凹模壁厚及底板厚度的计算	92	
第七章 注射模导向与推出机构	97	
第一节 导向机构的设计	97	
第二节 推出机构的结构	99	
第三节 脱模力计算及推出零件尺寸确定	104	
第四节 主要推出零件的设计	107	
第五节 主流道及流道凝料的推出	112	
第八章 注射模侧向分型与抽芯机构	115	
第一节 抽芯机构的分类与结构	115	
第二节 斜销的设计与计算	124	
第三节 滑块与楔紧块的设计	128	
第九章 注射模温度调节系统	131	
第一节 温度调节的必要性	131	
第二节 冷却系统的设计原则	134	
第三节 冷却回路的形式	137	
第四节 冷却管道的工艺计算	141	
第十章 无流道凝料注射模设计	156	
第一节 无流道凝料注射模	156	
第二节 热流道注射模设计	160	
第十一章 热固性塑料注射成型工艺及模具	167	
第一节 热固性塑料注射成型工艺过程	167	
第二节 热固性塑料注射成型的工艺特点	168	
第三节 热固性塑料注射模设计要点	169	
第十二章 注射模设计实例	172	
第一节 注射模设计过程	172	
第二节 MoldWizard 注射模设计过程	179	
第三节 注射模结构实例	193	
第十三章 其他注射成型技术	197	
第一节 气体辅助注射成型	197	
第二节 共注射成型	202	
第三节 低发泡塑料注射成型	203	
第四节 新型注射成型技术	206	
第十四章 塑料制品的常见缺陷与解决		

办法	209	附录 E 常用渗碳钢、调质钢牌号、热处理 及力学性能	224
附录	221	附录 F 常用塑料的连续耐热温度和热变形 温度	225
附录 A 常用热塑性塑料的成型条件	221	参考文献	226
附录 B 模具零件常用材料及热处理	222		
附录 C 热塑性塑料的某些性能	222		
附录 D 部分优质碳素钢牌号及力学性能 ...	223		

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像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 万~14 万等。

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需要而增添的添加剂所组成。

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，20 世纪 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%(质量分数)。

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。填充剂的用量通常占塑料组成的40%(质量分数)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容,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)。在生产聚氯乙烯塑料时,若加入较多的增塑剂便可得到软质聚氯乙烯塑料,若不加或少加增塑剂[用量<10%(质量分数)],则得到硬质聚氯乙烯塑料。

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%(质量分数)。

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他的添加剂。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。

塑料还可以像金属那样制成“合金”,即把不同品种、不同性能的塑料用机械的方法均匀掺和在一起(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。可以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,但是一旦固化成型后就不会再软化。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,有的像长链,有的像树枝,还有的呈网状。这些结构使得塑料具有热塑或热固的特性。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型塑料两类。属于结晶型的常用塑料如聚乙烯、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。

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 为常用的塑料名称及英文代号。

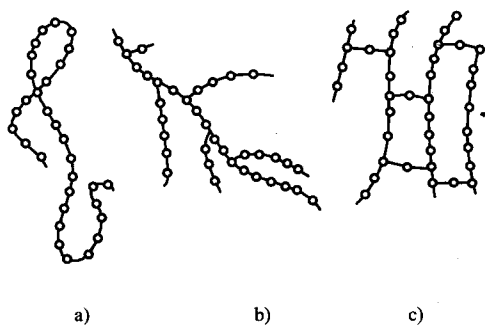


图 1-1 高分子物质的结构示意图

a) 链状结构 b) 树枝状结构 c) 网状结构

表 1-1 常用的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
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, 它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, 主要有丙烯腈-丁二烯-苯乙烯共聚物 (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) 重量轻 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。这对于需要减轻自重的车辆、船舶和飞机有着特别重要的意义。由于重量轻, 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。随着科技的进步, 塑料零件在运输工具中所占的比例越来越大。

(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声吸声材料。塑料优越的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。

(6) 多种防护性能 上述塑料的耐蚀性、绝缘性等，皆体现出塑料对其他物质的防护性，塑料还具有防水、防潮、防辐射、防振等多种防护性能，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塑料的一般使用温度在 100℃ 以下，在低温中易开裂。塑料的热导率只有金属的 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。由于此时的变形是可逆的，为了得到符合形状尺寸要求的制品，在加

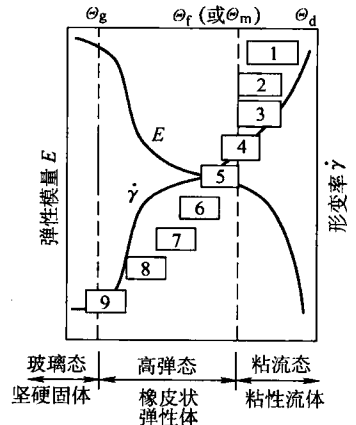


图 1-2 热塑性塑料的状态与加工的关系

1—熔融纺丝 2—注射 3—薄膜吹塑
4—挤出成型 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

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。对于结晶型塑料，当外力大于材料的屈服强度时，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。

熔融指数仪测定在一定温度和压力下，热塑性塑料熔体在10min内通过标准毛细管的重量值，以(g/10min)来表示，称为熔体流动指数或熔融指数，简称为[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

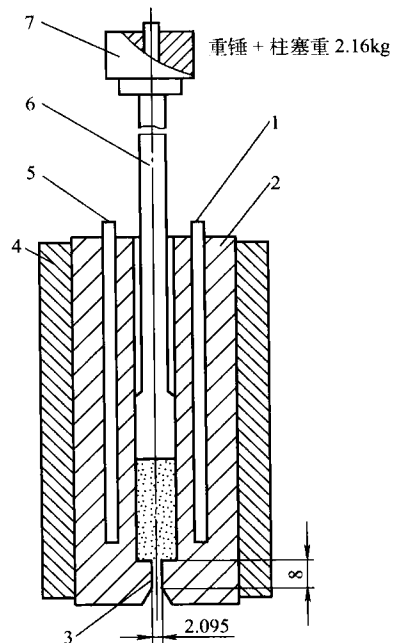


图1-3 熔融指数仪结构示意图

1—热偶 2—料筒 3—出料孔 4—保温层
5—加热棒 6—柱塞 7—重锤

能。但用 $[MI]$ 能方便地表示塑料流动性的高低。表 1-2 为常用的成型方法与熔融指数的关系。

表 1-2 常用的成型方法与熔融指数的关系

成型方法	产 品	所需材料的 $[MI]$ 值 /(g/10min)	成型方法	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、热性质和其他物理力学性质等，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 1-4 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。该试验是通过一个加工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。螺旋线的长度（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， $\theta - \theta_0$ 值越大，冷却和硬化越快。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。螺旋线越长，表明该塑料熔体的流动性越好。螺旋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。

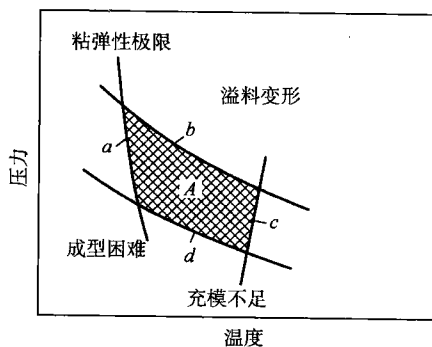


图 1-4 模塑窗口

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

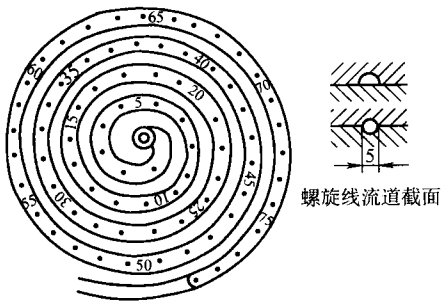


图 1-5 螺旋流动试验模具示意图

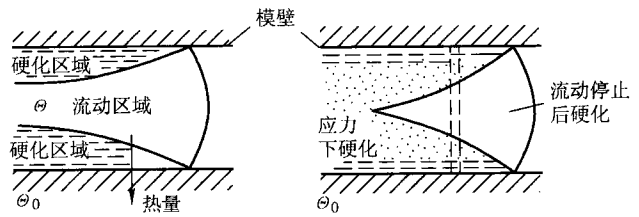


图 1-6 模具的热传导对螺旋线长度的影响

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型腔中，熔体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。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

压缩成型又称为压制成型。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、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成型。

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。该法适合于成型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。其中，在汽车、家电、电子等行业中应用最为广泛的是注射成型。本书专门讲述塑料注射成型工艺及其模具设计的基本知识。

第二章 塑料成型理论

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他刚性材料类似，力与应变的关系符合胡克定律；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），这种弹性与粘性的综合被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

符合胡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，弹簧受到拉力不能立即消除，而是逐渐减小，这就是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剩余形变。当解除应力后弹簧与粘壶又慢慢回复原状，不会产生剩余变形。

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，但是并不像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模型。图 2-2 所

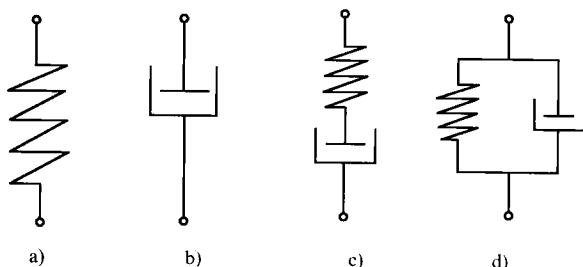


图 2-1 四种基本力学模型

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

示为粘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。

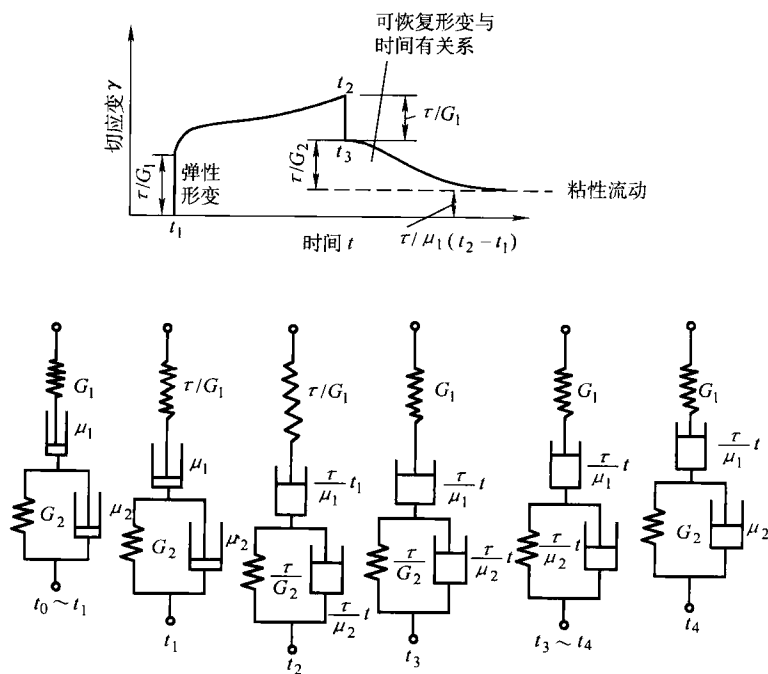


图 2-2 粘弹性模型

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 [$(\tau/\mu_1)t$]。应力作用时间越长，粘性形变越大，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。

描述上述粘弹性模型的数学表达式为

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

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，同时可以定性地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，材料会产生蠕变。这主要是式中第二项粘流效应所表现出的对时间的依赖性。式中第三项所表示的

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 、 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，弹性响应为非胡克性而不是胡克性，蠕变曲线也不只依赖时间这一个因素。但是，该模型能帮助人们定性地理解塑料在加工过程中的力学行为，指导人们合理地制订和控制塑料的成型工艺条件。

第二节 塑料的流变性

研究物质形变与流动的科学称为流变学。形变与流动是塑料成型加工中最基本的工艺特征。聚合物的流变行为十分复杂，粘性流动不仅具有弹性效应，而且伴随有热效应。目前关于聚物流变行为的解释仍有很多是定性的或者是经验性的，聚物流变学依然是一门半经验的物理科学。但是学习一些有关流变学的概念对塑料材料的选择、成型工艺条件确定、模具和成型设备的设计以及提高塑料制品的质量都有着很重要的指导作用。

聚合物流体既可以是处于粘流温度 Θ_f 或熔点 Θ_m 以上的熔体，也可以是在不高温下仍保持流动状态的溶液。这里仅讨论熔体的流动行为。

一、牛顿型流体

塑料熔体在加工过程中的流动基本上属于层流。可以将层流流动看成是一层层彼此相邻且平行的薄层流体沿外力作用方向进行的相对滑移。图 2-3 为流体在圆管中的层流滑移示意图。

图中， F 为外部作用于整个流体上的恒定剪切力、 A 为流体液层面积。假定液层面积足够大，以致可以忽略四周边界的影响，液层上的切应力为

$$\tau = F/A \quad (2-2)$$

在恒定应力的作用下流体的应变表现为液层以匀速 v 沿着切应力作用方向移动。但液层间的粘性阻力和管壁的摩擦力使相邻液层在移动方向上存在着速度差，圆管中心阻力最小，液层移动速度最大，管壁附近液层移动速度最小，假定在管壁上液层不产生滑移，则管壁上液层的移动速度为零。如果液层间的径向距离为 dr ，相邻两液层的移动速度分别为 v 和 $(v + dv)$ ，则液层间单位距离内的速度差（称之为速度梯度）为 dv/dr ，记液层移动速度为 dx/dt ，则

$$\frac{dv}{dr} = \frac{d(dx/dt)}{dr} = \frac{d(dx/dr)}{dt} \quad (2-3)$$

dx/dt 是一个液层相对另一个相邻液层移动的距离，即为该流体在切应力的作用下产生的切应变，记为 $\gamma = dx/dr$ 。式 (2-3) 可改写为

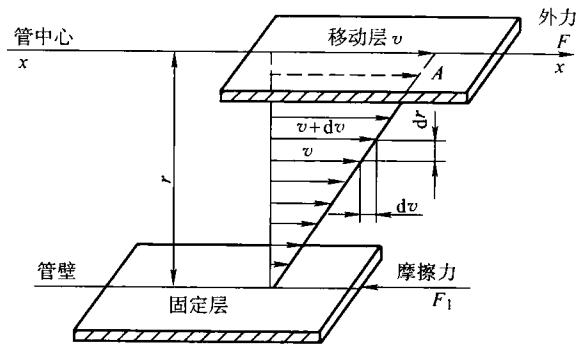


图 2-3 流体在圆管中的层流滑移示意图