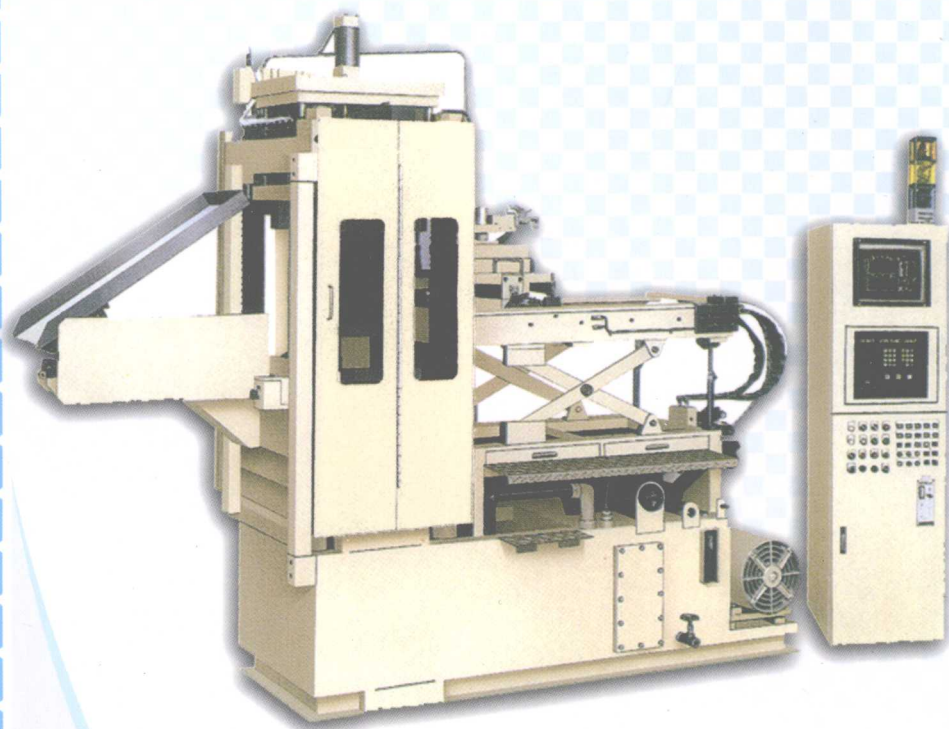




普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 塑料成型工艺及 模具设计

湖南大学 叶久新 王群 主编



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS





## 普通高等教育“十一五”国家级规划教材

### 本书特点:

- ◆ 全书在内容上注重对塑料成型工艺理论知识的提炼,着重模具设计的可操作性和实用性。
- ◆ 将各种塑料成型工艺与相应的模具结构、设计要点等内容融合为一体,以便于教学内容的连贯性和适应性。
- ◆ 针对各种成型特点所选编的大量典型模具结构图例,尽量按生产过程中的方位进行排列,以求直观性。
- ◆ 书中给出了一个典型结构塑件完整的注射模具设计实例,该实例中模具结构的确定、工艺计算,模架及标准件的选择等内容都非常详细,对于初学者具有很强的指导意义和参考价值。
- ◆ 为了便于教学和读者自学,本书配有供教师使用的授课型课件和供学生使用的自学型多媒体网络课件。在这两种课件中都加入了大量的图片、动画和视频等素材。
- ◆ 与本书配套的可供用户选购的还有典型的模具结构的二维和三维的教学挂图以及新型透明的教学模型。

地址:北京市百万庄大街22号 邮政编码:100037  
联系电话:(010)68326294 网址: <http://www.cmpedu.com>(机工教材网)  
(010)68993821 E-mail: [cmp@cmpedu.com](mailto:cmp@cmpedu.com)  
网址: <http://www.cmpbook.com>(机工门户网)  
E-mail: [cmp@cmpbook.com](mailto:cmp@cmpbook.com)

● ISBN 978-7-111-22823-3

● 策划:冯春生

定价:30.00元

ISBN 978-7-111-22823-3



9 787111 228233 >

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

# 塑料成型工艺及模具设计

主 编 叶久新 王 群

副主编 李落星 张世英 伍先明 张秀玲

主 审 陈明安 杨先泽



机械工业出版社

本书为普通高等教育“十一五”国家级规划教材。全书共分9章，第1、2章介绍塑料成型的理论基础知识和塑料制品的设计原则；第3、4章详细地讲述了塑料注射成型原理及工艺、注射模具的结构及设计，也是全书的重点；第5~8章扼要地介绍了其他几种主要的塑料成型工艺及模具设计要点；第9章是对近年来国内外不断发展的注射成型新技术作以简介。

本书体现了理论与实际相结合的特点，具有较强的针对性、实用性和可操作性。本书可作为本科院校“材料成形与控制”、“机械设计与自动化”、“高分子科学与工程”等专业，以及高职、高专院校的“模具设计与制造”专业的专业课教材，也可供从事模具设计与制造的工程技术人员参考。

### 图书在版编目 (CIP) 数据

塑料成型工艺及模具设计/叶久新, 王群主编. —北京: 机械工业出版社, 2007.11

普通高等教育“十一五”国家级规划教材

ISBN 978-7-111-22823-3

I. 塑… II. ①叶…②王… 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

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2007) 第 177658 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑: 冯春生 责任编辑: 董连仁 版式设计: 霍永明

责任校对: 申春香 责任印制: 洪汉军

北京振兴源印务有限公司印刷厂印刷

2008 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

184 mm × 260 mm · 20.25 印张 · 496 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-22823-3

定价: 30.00 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) 88379712

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

近年来,由于我国国民经济的高速、稳定的增长,促进了我国模具工业迅速发展壮大,因此,模具设计与制造专业或相关的材料成形与控制专业已成为国内具有优势的热门专业之一。为了适应对模具人才培养的需求,作者凭着几十年模具教学方面的经验,以及长期指导学生下厂实习的心得和体会,在参考国内外有关著作和论文的一些精华,并加以提炼、融会贯通的基础上,编写了《塑料成型工艺及模具设计》这本教材。

全书共分9章,第1、2章介绍塑料成型的理论基础知识和塑料制品的设计原则;第3、4章详细地讲述注射成型工艺及注射模具的结构以及设计,也是全书的重点;第5~8章扼要地介绍了其他几种主要的塑料成型工艺及模具设计要点;第9章是对近年来国内外不断发展的注射成型新技术作以简介。

本书的特点是:

- ◆ 全书在内容上注重对塑料成型工艺理论知识的提炼,着重模具设计的可操作性和实用性。
- ◆ 将各种塑料成型工艺与相应的模具结构、设计要点等内容融合为一体,以利于教学内容的连贯性和适应性。
- ◆ 书中给出了一个典型结构塑件完整的注射模具设计实例,并对实例中的模具结构的确定、工艺计算、模架及标准件的选择等内容都论述得非常详细,这对于初学者具有很强的指导意义和参考价值。
- ◆ 为了便于教学和读者自学,本书配有供教师使用的授课型课件和供学生使用的自学型多媒体网络课件。在这两种课件中都加入了大量的图片、动画和视频等素材。
- ◆ 与本书配套且可供用户选购的,还有典型模具结构的二维和三维的教学挂图以及新型透明的教学模型。

本书可作为本科院校“材料成形与控制”、“机械设计与自动化”、“高分子科学与工程”等专业以及高职、高专院校的“模具设计与制造”专业的专业课教材,也可供从事模具设计与制造的工程技术人员参考。

本书由湖南省“模具设计与制造”学会理事长、湖南大学模具研究所所长叶久新教授和湖南大学材料学院王群博士共同主编。参加编写的人员还有:湖南大学李落星,湖南科技大学伍先明,湖南师范大学汤猷则,长沙大学张世英、庞佑霞,湘潭大学李应明,南华大学欧阳八生,湖南工业大学徐弘,长沙理工大学龙春光,湖南涉外经济学院陈健美,湖南生物机电职业技术学院张秀玲,湖南电子科技职业学院刘卫东等。中南大学陈明安教授和从事模具生产40多年的杨先泽教授级高工担任本书的主审,并提出了许多建设性的意见,在此一并表示感谢!

由于作者水平有限,书中如有错误,热诚希望读者批评指正。

编 者  
于长沙

# 目 录

## 前言

<b>第1章 塑料成型基础知识</b> .....	1	2.2.1 塑件的几何形状及结构设计	33
1.1 聚合物的结构和性能	1	2.2.2 塑件螺纹的设计	47
1.1.1 高分子聚合物的形成	1	2.2.3 齿轮的设计	49
1.1.2 高分子聚合物的结构	1	2.2.4 嵌件的设计	49
1.1.3 高分子聚合物的物理状态、力学 状态及加工适应性	2	2.2.5 铰链的设计	51
1.2 聚合物的流变性质	5	2.2.6 塑件表面文字、图案、纹理、 丝印和喷漆	52
1.2.1 聚合物的粘弹性质	5	<b>第3章 塑料注射成型原理及工艺</b> .....	53
1.2.2 聚合物的流动规律	5	3.1 注射成型原理及工艺	53
1.2.3 高分子聚合物的弹性	9	3.1.1 注射成型原理及注射机	53
1.2.4 聚合物熔体的充型流动	10	3.1.2 注射成型工艺过程	55
1.3 聚合物成型过程中的物理行为	11	3.1.3 注射成型工艺参数	60
1.3.1 聚合物的加热与冷却	11	3.1.4 几种常用塑料的注射成型 特点	63
1.3.2 聚合物的结晶	11	3.1.5 典型塑料制品注射成型工艺 参数	65
1.3.3 聚合物的取向	12	3.2 塑料成型工艺规程的制订	66
1.3.4 残余应力	14	3.2.1 塑件的分析	67
1.4 聚合物成型过程中的化学行为	14	3.2.2 塑件成型方法及工艺流程的 确定	67
1.4.1 聚合物降解	14	3.2.3 成型工艺条件的确定	67
1.4.2 聚合物的交联	15	3.2.4 设备和工具的选择	68
1.5 塑料组成、分类与用途	16	3.2.5 工艺文件的制订	68
1.5.1 塑料的组成	16	<b>第4章 注射模具设计</b> .....	69
1.5.2 塑料的分类	17	4.1 注射模具的基本结构与分类	69
1.5.3 塑料的性能与用途	19	4.1.1 注射模的结构组成	69
1.6 塑料成型工艺性能	19	4.1.2 注射模的分类	70
1.6.1 收缩性	20	4.2 注射模与注射机	73
1.6.2 流动性	22	4.2.1 注射机的公称注射量及注射量的 校核	73
1.6.3 塑料的其他工艺性能	23	4.2.2 注射压力的校核	74
<b>第2章 塑料制品设计</b> .....	25	4.2.3 锁模力的校核	74
2.1 塑料制品的工艺性	25	4.2.4 安装部分相关尺寸的校核	75
2.1.1 塑件的选材	25	4.2.5 模具的固定	76
2.1.2 塑件的尺寸和精度	25		
2.1.3 塑件的表面质量	29		
2.2 塑件结构设计及典型实例	33		

4.2.6	开模行程校核	77	4.10	注射模侧向抽芯机构设计	173
4.2.7	推出机构的校核	79	4.10.1	侧向分型与侧向抽芯机构	
4.3	分型面的选择	79	·    ·    ·	分类	173
4.3.1	分型面的形式	79	4.10.2	斜导柱侧向分型与抽芯机构	176
4.3.2	分型面的选择原则	79	4.10.3	弯销侧向抽芯机构	189
4.3.3	分型面选择实例分析	82	4.10.4	斜导槽侧向抽芯机构	191
4.3.4	分型面宽度的确定	84	4.10.5	斜滑块侧向抽芯机构	191
4.4	型腔数目的确定与排列形式	84	4.10.6	斜推杆侧向抽芯机构	194
4.4.1	型腔数目的确定	84	4.10.7	摆杆机构侧向抽芯机构	196
4.4.2	多型腔的排列	85	4.10.8	齿轮齿条侧向抽芯机构	196
4.5	注射模具浇注系统设计	87	4.10.9	弹性元件侧向抽芯机构	197
4.5.1	浇注系统的组成	87	4.11	注射模温度调节系统设计	198
4.5.2	浇注系统各部件设计	87	4.11.1	温度调节的必要性	198
4.5.3	分流道设计	92	4.11.2	冷却系统设计原则及注意事项	200
4.5.4	浇口的设计	99	4.11.3	冷却系统的结构形式	203
4.6	排气和引气系统设计	116	4.11.4	冷却系统的组成及连通方式	208
4.6.1	排气的几种方式	116	4.11.5	冷却系统的计算	209
4.6.2	排气结构的设计原则	117	4.11.6	加热系统设计	212
4.6.3	几种引气方式	117	4.12	模架设计	214
4.7	注射模具成型零件设计	118	4.12.1	注射模模架的结构	214
4.7.1	凹模的结构设计	118	4.12.2	标准模架的结构与形式	214
4.7.2	凸模的结构设计	120	4.12.3	中小型标准模架的规格	216
4.7.3	螺纹型芯和型环的结构设计	124	4.12.4	中小型标准模架的选择方法	220
4.7.4	成型零件工作尺寸计算	125	4.12.5	模架的装配要求	220
4.7.5	凹模、凸模以及动模垫板的力学计算	129	4.13	注射模材料的选用	221
4.7.6	成型零件的工艺性	132	4.13.1	模具零件的失效形式	221
4.8	注射模具导向机构设计	138	4.13.2	成型零件材料选用的要求	222
4.8.1	导柱导向机构	138	4.13.3	注射模材料的种类与选用	222
4.8.2	锥面和合模销精定位装置	141	4.14	注射模设计实例	225
4.9	脱模机构设计	142	4.14.1	塑件成型工艺性分析	225
4.9.1	脱模机构和设计原则	142	4.14.2	拟定模具的结构形式	226
4.9.2	脱模力的计算	142	4.14.3	浇注系统的设计	228
4.9.3	一次脱模机构	144	4.14.4	成型零件的结构设计及计算	231
4.9.4	二次脱模机构	156	4.14.5	模架的确定	236
4.9.5	双脱模机构	160			
4.9.6	顺序脱模机构	160			
4.9.7	浇注系统凝料的脱出机构	163			
4.9.8	螺纹塑件的脱模机构	166			



4.14.6 排气槽的设计	237	6.3.4 浇注系统的设计	263
4.14.7 脱模推出机构的设计	237	6.3.5 溢料槽与排气槽的设计	265
4.14.8 冷却系统的设计	238	6.4 压注模设计实例	265
4.14.9 导向与定位结构的设计	239	<b>第7章 塑料挤出成型工艺及模具设计</b>	
4.14.10 总装图和零件图的绘制	239	7 设计	267
<b>第5章 压缩成型工艺及模具设计</b>	241	7.1 挤出成型工艺	267
5.1 压缩成型工艺	241	7.1.1 挤出成型原理及特点	267
5.1.1 压缩成型原理及特点	241	7.1.2 挤出成型工艺过程	268
5.1.2 压缩成型工艺过程	242	7.1.3 挤出成型工艺参数	268
5.1.3 压缩成型工艺参数	243	7.2 挤出成型机头概述	270
5.2 压缩模的工作过程及结构组成	244	7.2.1 挤出机头的作用及分类	270
5.2.1 压缩模的工作过程	244	7.2.2 挤出机头的结构组成	271
5.2.2 压缩模结构组成	244	7.2.3 挤出机头的设计原则	272
5.3 压缩模分类及选用原则	245	7.2.4 机头与挤出机的关系	273
5.3.1 压缩模的分类	245	7.3 管材挤出机头的设计	274
5.3.2 压缩模选用原则	246	7.3.1 直通式挤管机头工艺参数的确定	274
5.4 压缩成型设备与参数校核	247	7.3.2 管材的定径和冷却	277
5.4.1 压缩成型设备	247	7.4 挤出模设计实例	279
5.4.2 压缩成型设备参数校核	247	<b>第8章 塑料的其他成型方法</b>	281
5.5 压缩模设计	248	8.1 中空吹塑成型	281
5.5.1 塑件在模具内加压方向的选择	248	8.1.1 中空吹塑成型工艺概述	281
5.5.2 凸凹模的配合形式及有关尺寸确定	250	8.1.2 中空吹塑成型的模具结构	283
5.5.3 凹模加料腔高度尺寸计算	252	8.1.3 中空吹塑成型的模具设计要点	284
5.6 压缩模设计结构实例	255	8.2 真空吸塑成型	285
<b>第6章 塑料压注成型工艺及模具设计</b>	256	8.2.1 真空吸塑成型概述	285
6.1 压注成型工艺	256	8.2.2 真空吸塑成型模具结构	286
6.1.1 压注成型原理及特点	256	8.2.3 真空吸塑成型模具设计要点	287
6.1.2 压注成型工艺过程	257	8.3 压缩空气成型	288
6.1.3 压注成型工艺参数	257	8.3.1 压缩空气成型概述	288
6.2 压注模的结构组成与分类	257	8.3.2 压缩空气成型模具结构	288
6.2.1 压注模的结构组成	257	8.3.3 压缩空气成型模具设计要点	288
6.2.2 压注模的分类	257	<b>第9章 注射成型新技术</b>	290
6.3 压注模设计要点	259	9.1 热流道系统成型	290
6.3.1 加料腔结构及其尺寸计算	259	9.1.1 热流道系统成型的特点	290
6.3.2 柱塞的设计	262	9.1.2 热流道系统的分类和结构	290
6.3.3 加料腔与柱塞的配合	262	9.1.3 热流道浇注系统对塑料的要求	293



9.1.4 热流道成型模具的装配及设计		特点 .....	303
原则 .....	293	9.9.2 注射模 CAD/CAE/CAM 的	
9.2 热固性塑料注射成型 .....	295	功能 .....	303
9.2.1 热固性塑料注射成型特点 .....	295	<b>附录</b> .....	306
9.2.2 热固性塑料注射模的设计		附录 A 常用塑料中英文名称对照 .....	306
要点 .....	296	附录 B 内地与台湾地区部分模具术语	
9.3 共注射成型 .....	296	名称对照 .....	307
9.3.1 双色注射成型 .....	297	附录 C 国内外塑料模具钢名称对照 .....	307
9.3.2 双层注射成型 .....	297	附录 D 注射模浇口套结构形式和推荐	
9.4 气体辅助注射成型 .....	298	尺寸 .....	308
9.5 发泡成型 .....	299	附录 E 注射模直通式推杆的结构和	
9.6 BMC 注射成型 .....	300	尺寸 .....	309
9.7 反应注射成型 .....	300	附录 F 斜导柱的结构形式和尺寸 .....	310
9.8 叠层式模具 .....	301	附录 G 部分国产注射成型机的型号	
9.9 注射模 CAD/CAE/CAM .....	302	和技术参数 .....	311
9.9.1 注射模 CAD/CAE/CAM 技术的		<b>参考文献</b> .....	313

# 第 1 章 塑料成型基础知识

塑料一词的英文“Plastic”原意为可任意捏成各种形状的材料或可塑材料。在塑料工程中“塑料”的定义为“以合成树脂（或化学改性的天然的高分子化合物）为基本成分，可在一定的条件下（主要是温度和压力）塑化成型，产品最后能保持形状不变的材料”。塑料在成型过程中表现出的各种性能的变化和变形流动行为，主要取决于塑料中的基本成分——高分子聚合物。因此，研究塑料成型理论，首先应该了解聚合物的结构和性能。

## 1.1 聚合物的结构和性能

### 1.1.1 高分子聚合物的形成

将低分子化合物单体转变成高分子物质的过程叫做聚合反应。单体经过这种化学反应之后，其原子便以共价键的方式相结合，形成高分子结构，相对分子质量很大。一般低分子物质的相对分子质量只有几十至几百，如一个水分子仅含有一个氧原子和两个氢原子，其相对分子质量为 18，而一个高分子聚合物的分子含有成千上万个原子，相对分子质量可达几万、几十万，甚至几百万。如尼龙分子的相对分子质量大约为 2.3 万，而高密度聚乙烯的相对分子质量大约在 7~30 万之间，天然橡胶的相对分子质量高达 40 万左右。

### 1.1.2 高分子聚合物的结构

#### 1. 聚合物的长链结构

组成聚合物的高分子呈链状结构，其链状结构有以下三种类型：

(1) 线型高分子 如果整条高分子像一根长长的链条，且在其主链上基本没有分支，则这种结构的高分子称为线型高分子，如图 1-1a 所示。由线型高分子构成的聚合物称为线型聚合物或热塑性聚合物。这种聚合物可以被反复地加热和冷却。

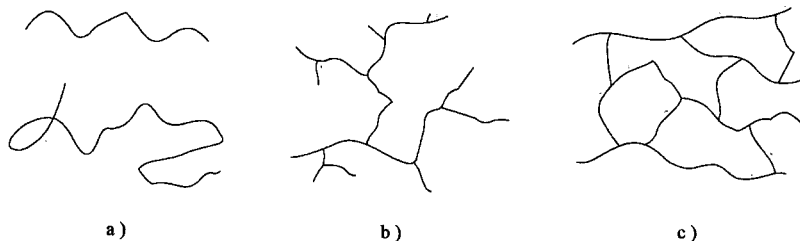


图 1-1 高分子链状结构类型

a) 线型高分子 b) 支链型高分子 c) 体型高分子

(2) 支链型高分子 如果整条高分子具有一个线型主链，主链上带有一些支链，则这种

结构的高分子称为支链型高分子，如图 1-1b 所示。由支链型高分子构成的聚合物称为支链型聚合物。这种聚合物一般也可以被反复的加热和冷却，进行循环利用。

(3) 体型高分子(网状高分子) 如果多个高分子之间发生交联化学反应，它们彼此相互连接，形成一种网状的高分子结构；则这种结构的高分子称为体型高分子或网状高分子，如图 1-1c 所示。由体型高分子构成的聚合物称为体型聚合物或热固性聚合物。它们一般都是由相对分子质量较小的预聚物经过交联化学反应之后形成的。这种聚合物只能在交联时进行一次加热，交联之后便会永远固化，即使再用高温也不会软化，直到在很高的温度下被烧焦、炭化为止。

## 2. 聚合物的聚集态结构

高分子聚合物的聚集态结构是指聚合物分子链之间的排列和堆砌结构，也称为超分子结构。高分子的长链结构是决定聚合物基本性质的主要因素，而聚集态结构是决定聚合物本体性质的主要因素。对于实际应用中的高分子材料或制品，其使用性能直接决定于其成型过程中形成的聚集态结构。

高分子材料的聚集状态有晶态（分子链在空间规则排列）、部分晶态（分子链在空间部分规则排列）和非晶态（分子链在空间无规则排列，亦称玻璃态）三种，如图 1-2 所示。

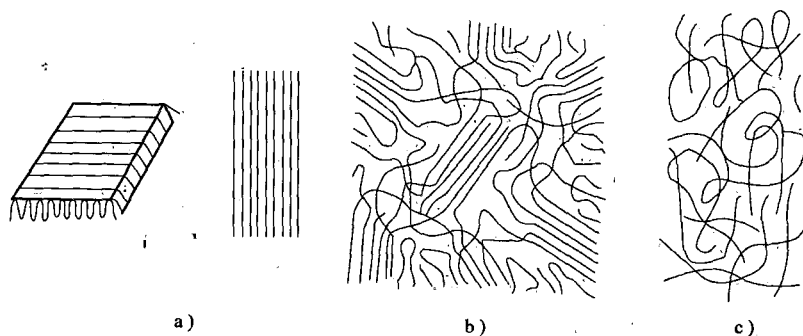


图 1-2 聚合物三种聚集态结构示意图

a) 晶态 b) 部分晶态 c) 非晶态

晶态聚合物由于分子链规则排列而紧密，分子间吸引力大，分子链运动困难，故其熔点、相对密度、强度、刚度、耐热性和抗熔性等性能好，其聚集态结构示意图如图 1-2a 所示；非晶态聚合物，由于分子链无规则排列，分子链的活动能力大，故其弹性、伸长率和韧性等性能好，其聚集态结构示意图如图 1-2c 所示；部分晶态聚合物性能介于上述二者之间，且随结晶度增加，熔点、相对密度、强度、刚度、耐热性和抗熔性均提高，而弹性、伸长率和韧性则降低，其聚集态结构示意图如图 1-2b 所示。在实际生产中控制上述影响结晶的诸因素，可以得到不同聚集态的聚合物，满足所需的性能要求。其实，获得完全晶态的聚合物是很困难的，大多数聚合物都是部分晶态或完全非晶态。通常用聚合物中结晶区域所占的百分数，即结晶度来表示聚合物的结晶程度。聚合物的结晶度变化范围很宽，为 30%~90%，特殊情况下可达 98%。

### 1.1.3 高分子聚合物的物理状态、力学状态及加工适应性

在自然界对于一般低分子化合物而言，在常温下其聚集状态可呈三态，即气态、液态和

固态。然而，由于聚合物的相对分子质量巨大且分子结构的连续性，所以它们的聚集状态是在不同的热力条件下呈现出独特的三态。例如对于非晶态线型高聚物而言，分别是玻璃态、高弹态和粘流态；对于晶态线型高聚物而言，分别是结晶态、高弹态和粘流态（具体与结晶程度有关）。下面分别加以讨论。

### 1. 线型非晶态高聚物的温度与力学状态及成型加工的关系

线型非晶态高聚物在受热过程中有几个重要的温度点，分别是脆化温度  $T_x$ 、玻璃化温度  $T_g$ 、粘流温度  $T_f$ （对于线型结晶态高聚物称为熔点  $T_m$ ）以及分解温度  $T_d$ 。

(1) 玻璃态 如图 1-3 所示，当  $T < T_g$  时，高聚物所有的分子链间的运动和链段的运动都被“冻结”，分子所具有的能量小于链段转动所需要的能量；且分子内聚力大，弹性模量高，整个物质表现为非结晶相的固体，像玻璃那样，即称为玻璃态。处于此状态的高聚物，在外力作用下，只能通过高分子主链键长、键角的微小改变来发生变形，故变形很小，断后伸长率一般在  $0.01\% \sim 0.1\%$  范围内。同时在极限应力范围内形变具有可逆性，当外力除去后立即恢复原状。

上述力学特点决定了在玻璃态下聚合物不能进行大变形的成型，只适于进行机械加工，如车削、铣削、钻孔、车螺纹等，所以  $T_g$  是大多数高聚物成型加工的最低温度。

如果将温度降低到  $T_g$  以下某一温度  $T_x$  时，即使是分子振动也几乎被冻结，所以材料的韧性会显著降低，在受到外力作用时极易脆断，故将  $T_x$  称为脆化温度，它是所有高聚物性能的终止点，即高聚物使用的下限温度。

(2) 高弹态 当受热温度超过  $T_g$  时，由于分子动能逐渐增加，链段开始运动，此时高聚物在外力作用下会产生变形，当除去外力后又会缓慢地回复原状，类似橡胶状态的弹性体，即称为高弹态。聚合物表现出这种现象的原因如下：当温度升高时，分子动能增大，足以使大分子链段运动，但还不能使整个分子链运动，但分子链的柔性已大大增加，此时分子链呈卷曲状态，这就是高弹态，它是高聚物所独有的状态。高弹态高聚物受力时，卷曲链沿外力方向逐渐舒展拉直，产生很大的弹性变形，其宏观弹性变形量可达  $100\% \sim 1000\%$ 。外力去除后分子链又逐渐地回缩到原来的卷曲状态，弹性变形逐渐消失。由于大分子链的舒展和卷曲需要时间，所以这种高弹性变形的产生和回复不是瞬时完成的，而是随时间逐渐变化。

在这种高弹态下，对于非晶态高聚物可进行压力（压延、冲压、弯曲等）成型、真空成型、中空成型等。值得注意的是，进行上述成型加工时，为得到所需形状和尺寸的塑件，必须在成型后快速地冷却到  $T_g$  温度以下。

(3) 粘流态 当高聚物受热温度超过一定温度范围时，分子动能增加到使链段与整个高分子链都可移动的程度，这时即成为能流动的粘稠状液体，称为粘流态，也称熔体。此时的温度称为粘流温度  $T_f$ 。

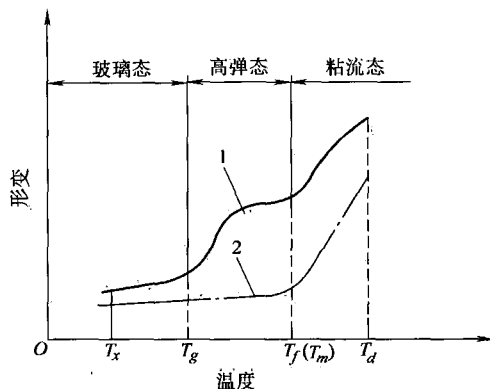


图 1-3 聚合物物理状态与温度的关系  
1—线型非晶态聚合物 2—线型晶态聚合物

在粘流态下，可依次进行挤出、吹膜、注射、贴合及熔融纺丝等成型加工。当温度继续升高时，聚合物的粘度将大大降低，流动性大大增加，容易引起诸如注射成型中的溢料、挤出塑件的形状扭曲、收缩和纺丝过程中纤维的毛细断裂等现象。当高聚物再升高到分解温度  $T_d$  附近时，聚合物开始分解变色，以致降低制品的物理、化学性能，或引起制品外观不良现象。

## 2. 线型晶态聚合物的物理状态、力学性能及加工状态

线型晶态聚合物和线型非晶态聚合物的温度-形变曲线有两处不同：一是  $T_f$  对应的温度叫熔点  $T_m$ ，是线型晶态聚合物熔融与凝固之间的临界温度；二是完全结晶的聚合物在  $T_g$  与  $T_m$  之间基本不呈现高弹态（应变量基本保持不变），这对扩大聚合物的使用温度范围非常重要。

一般来说，线型晶态高聚物的结晶过程不可能很彻底，总有非结晶的部分。由于非晶区的存在，因此非晶部分在不同温度下，也一样要发生玻璃态与高弹态、高弹态与粘流态之间的转变。然而，随着结晶度的不同，结晶聚合物的宏观表现是不同的，在轻度结晶的聚合物中，微晶体起着类似交联点的作用，这种聚合物仍然存在明显的玻璃化转变；随着结晶度的增加，非晶部分处在高弹态的结晶聚合物的硬度将逐渐增加。当结晶度大于 40% 后，微晶体彼此衔接，形成贯穿整个材料的连续结晶相，此时结晶相承受的应力要比非结晶相大得多，使材料变得坚硬，宏观上将觉察不到它有明显的玻璃化转变，其温度-形变曲线如图 1-4 所示，在熔点以前不出现明显的转折。晶态聚合物的晶区熔融后，是不是进入粘流态，将视其相对分子质量而定。

如果相对分子质量不太大，非晶区的粘流温度  $T_f$  低于晶区的熔点  $T_m$ ，则晶区熔融后整个聚合物便成为粘性液体；如果相对分子质量足够大，以至于  $T_f > T_m$ ，则晶区熔融后将出现高弹态，直到温度进一步升高到  $T_f$  以上才进入粘流态。从成型加工的角度来看，后一种情况通常是不希望的，因为这样的聚合物需要提高加工温度，而且在高温下出现高弹态，将会给加工带来困难。正是这个原因，晶态聚合物的相对分子质量通常应控制得低一些，下限一般以满足力学性能的要求为度。

另外，线型晶态聚合物的加工性还与其结晶度有关。结晶程度高时加热过程中没有明显的高弹态；结晶程度较低时加热过程中也呈现出高弹态，这是与线型非晶态聚合物的加工性类似。其实，一般情况下，晶态高聚物的结晶过程不可能很彻底，总有非结晶的部分。随着结晶度的不同，结晶聚合物的宏观表现在此阶段仍能产生一定程度的变形，可进行薄膜、纤维的冷、热拉深成型。

综上所述，对于线型结构聚合物而言，玻璃态是材料的使用状态， $T_g$  是衡量材料使用范围的重要标志之一。 $T_g$  越高其对环境温度的适应性越强。 $T_f$  ( $T_m$ ) 和  $T_d$  可用来衡量聚合物的成型性能， $T_f$  ( $T_m$ ) 低时，有利于熔融，生产时热能消耗小； $T_f$  ( $T_m$ )  $\sim T_d$  温度区间大时，聚合物熔体的热稳定性好，可在较宽的温度范围内变形和流动，而不易分解，即

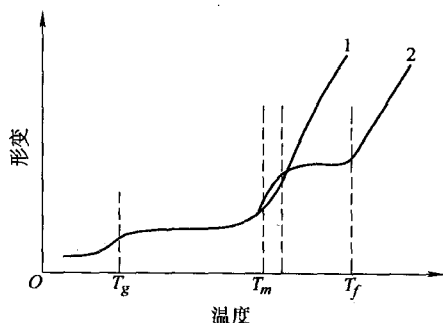


图 1-4 晶态聚合物的温度-变形曲线

1—相对分子质量较低， $T_m > T_f$

2—相对分子质量较高， $T_m < T_f$

$T_f \sim T_d$  的范围越宽，聚合物成型加工就越容易进行。

## 1.2 聚合物的流变性质

流动和变形是塑料成型加工中最基本的工艺特征。聚合物流变学主要是研究聚合物在外力作用下产生的应力、应变和应变速率等力学现象与自身粘度之间的关系，以及影响这些关系的温度、压力以及分子结构等因素。研究这些内容对于塑料的选择、成型工艺条件的确定、模具和成型设备的设计和选择，以及提高塑件质量都有着重要的指导意义。

### 1.2.1 聚合物的粘弹性质

#### 1. 成型过程中的应力和应变

塑料在成型过程中的变形和流动，都是成型设备对其施加外力的结果。塑料受力后会产生与外力相平衡的内力，单位面积上的内力称为应力。按照受力的方式不同，可以将应力分为切应力  $\tau$ 、拉应力和压应力  $\sigma$ 。塑料在应力作用下产生的形状和尺寸的变化称为应变。与三种应力相对应的应变分别为：反映形状变化的切应变  $\gamma$ 、反映尺寸变化的拉应变和压应变  $\epsilon$ 。实际上，塑料在成型过程中受到的应力是复杂的，往往是两种或三种应力的叠加，从而发生相应的形状和尺寸的变化。

#### 2. 聚合物变形流动时的粘弹性质

聚合物在不同的物理状态下受力变形都是由于聚合物高分子链运动的结果。通常情况下，聚合物从微小链段运动（或振动）开始发生弹性变形，至整个高分子链内的解缠、伸直和滑移引起的粘性变形为止，总是一个循序渐进的发展过程，因此，聚合物从粘流态下受力流动，其高分子变形必须经过一个弹性阶段才能过渡到粘性阶段。由此可见，塑料熔体在成型过程中的变形和流动同时具有弹性和粘性性质，一般统称为塑料变形时的粘弹性质，或称为塑料在成型过程中的粘弹性行为。

#### 3. 塑料变形的滞后效应与松弛

塑料熔体的高弹变形和粘性变形都与时间有关，即聚合物熔体从开始变形到变形与应力相适应的平衡状态必须要经过一定的时间过程。这种变形对应力的滞后响应称为滞后效应，而变形与应力之间的平衡过程称为松弛。

在实际生产中为了提高生产效率，充型后的塑料在保压压力作用下，以较快的速度冷却固化时，高分子没有足够的时间进行紧密的排列，所以变形量与注射压力和保压压力的作用不相适应，塑件脱模后内部存在较大的残余应力。在后来的使用过程中，塑件内部残余应力将通过聚合物中的分子的变形与重排而逐步释放，这种与松弛有关的现象称为时效变形。时效变形持续的时间可达数年之久。有时为了防止残余应力过大或时效变形过大而影响使用性能，常常还要采取一些措施对脱模后的塑件进行后处理，如退火处理。

### 1.2.2 聚合物的流动规律

#### 1. 牛顿型流体

流体在平直圆管内受切应力而发生的流动形式有层流和湍流两种。层流被看成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，而且各层之间无相互影响。湍流

则是流体各点的速度大小与方向都随时间而变化,且流体内部相互干扰严重。层流与湍流的区分以雷诺数 ( $Re$ ) 为准,  $Re = Dv\rho/\eta$ , 其中,  $D$  是管道直径;  $v$  是流体的平均速度;  $\rho$  是流体的密度;  $\eta$  是流体剪切粘度。

通常称  $Re < 2100$  时为层流,  $Re > 4000$  时为湍流。在塑料成型中,其熔体流动时的  $Re < 10$ , 聚合物分散体也不会大于 2100, 所以塑料在成型加工过程中的流动基本上属于层流。

描述流体层流的最简单规律是牛顿流动定律,是牛顿于 1687 年提出来的,其内容为:在一定温度下,当切应力  $\tau$  作用于两个相距为  $dr$  的液体平行层面并以相对速度  $dv$  移动时(图 1-5),则切应力  $\tau$  与剪切速率  $dv/dr$  (也称速度梯度)之间呈下列直线关系:

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

式中,  $\eta$  是比例常数, 通称为牛顿粘度 ( $\text{Pa} \cdot \text{s}$  或  $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$ );  $\tau$  是切应力 ( $\text{Pa}$ ),  $\dot{\gamma}$  是剪切速率 ( $\text{s}^{-1}$ );

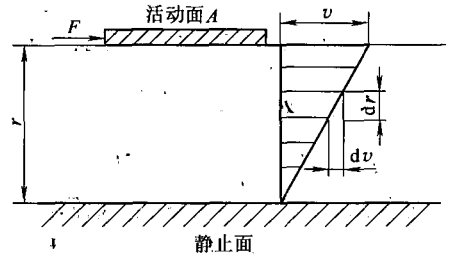


图 1-5 切应力 ( $F/A$ ) 与剪切速率的关系

凡是切应力与剪切速率符合式 (1-1) 的流体都称为牛顿型流体。

## 2. 非牛顿型流体

如上所述,凡液体流动时不服从式 (1-1) 的均称为非牛顿型流体。大多数聚合物熔体都是非牛顿型流体,并且,它们中的大多数又都服从 stwald-De Waele 提出的指数流动规律,即有

$$\tau = K \dot{\gamma}^n = K \left( \frac{dv}{dr} \right)^n \quad (1-2)$$

式中,  $K$  是稠度系数,与聚合物种类和温度有关的常数,可反映聚合物熔体的粘稠性;  $n$  是非牛顿指数,与聚合物温度有关的常数,可反映聚合物熔体偏离牛顿型流体性质的程度。令:

$$\eta_a = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (1-3)$$

则式 (1-2) 可以改写为与牛顿流动流变方程式 (1-1) 相类似的形式,即

$$\tau = \eta_a \dot{\gamma} \quad (1-4)$$

式中,  $\eta_a$  称为非牛顿型流体聚合物熔体的表观粘度 (或非牛顿粘度)。

在指数流动规律中,非牛顿指数  $n$  和稠度系数  $K$  均可由试验测定。其中,当  $n = 1$  时,则有  $\eta_a = K = \eta$ , 此时该非牛顿型流体转变为牛顿型流体。

由此可见,  $n$  的值反映了非牛顿型流体偏离牛顿型流体的程度。当  $n \neq 1$  时,绝对值  $|n - 1|$  的值越大,流体的非牛顿性越强,剪切速率对表观粘度的影响越强。显然,由式 (1-3) 可以看出,在其他条件一定时,  $K$  值越大,非牛顿型流体聚合物熔体的表观粘度,即流体的粘稠性也越大,则流体的切变形和流动越困难。

非牛顿型流体原则上包括粘性流体、粘弹性流体及时间依赖性流体。但在常用塑料中,仅只有少数聚合物的熔体呈时间依赖性,而对塑料的粘弹性研究也不充分,所以通常将非牛顿型流体当作粘性流体看待。



以切应力  $\tau$  对  $dv/dr$  (或  $\dot{\gamma}$ ) 所作的图线称为流动曲线图, 如图 1-6 所示。根据  $\tau-\dot{\gamma}$  曲线图, 可将塑料熔体分为牛顿型流体、宾哈流体、假塑性流体、膨胀性流体和复合流体。

(1) 牛顿型流体 非牛顿指数  $n=1$ , 且流体的  $\tau-\dot{\gamma}$  曲线是一条通过坐标原点的直线, 表观粘度与剪切速率无关, 其直线的斜率即为牛顿粘度  $\eta_0$ 。

(2) 宾哈流体 非牛顿指数  $n=1$ , 且切应力达到或超过一定的值后流体才能流动的称为宾哈流体, 需要使流体产生流动的最小切应力  $\tau_y$ , 称为屈服应力。一般具有凝胶结构的聚合物属于这种类型。

(3) 假塑性流体 非牛顿指数  $n < 1$  时, 流体的表观粘度是随剪切速率的增加非线性下降的, 称为剪切变稀现象。除了热固性的聚合物和少数热塑性的聚合物外, 大多数聚合物熔体的流动行为均属于这类假塑性流体。

(4) 膨胀性流体 非牛顿指数  $n > 1$  时, 流体的切应力随剪切速率的增高呈非线性增大的趋势, 称为膨胀性流体。其表观粘度也随剪切速率的增加而升高, 称为剪切增稠现象。

(5) 复合流体 复合流体的剪切速率在一定范围内, 表现出假塑性流体的“剪切变稀”的特性; 剪切速率超过一定的值, 又表现出膨胀性流体的“剪切增稠”的特性。

根据上面的描述, 也可以作出表观粘度  $\eta_a$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  的关系如图 1-7 所示。

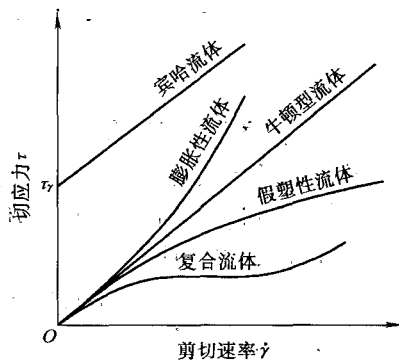


图 1-6 不同类型流体的流动曲线

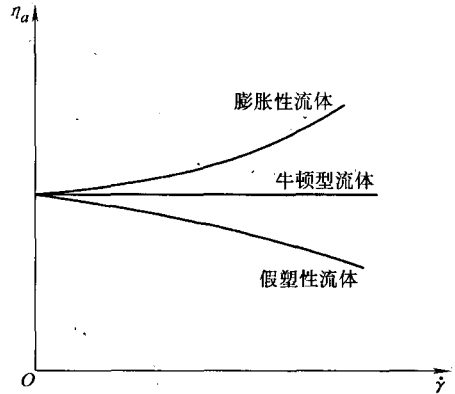


图 1-7 不同类型流体表观粘度  $\eta_a$  与剪切速率  $\dot{\gamma}$  的关系

### 3. 影响高分子聚合物粘度的因素

粘度是描述塑料熔体流变行为最重要的量度。从前面的叙述可知, 假塑性流体的表观粘度  $\eta_a$  与流体的稠度系数  $K$ 、非牛顿指数  $n$  以及剪切速率  $\dot{\gamma}$  有关, 此外还与聚合物结构、温度以及压力有关。

#### (1) 聚合物的分子结构和相对分子质量对粘度的影响

1) 分子结构。聚合物的分子结构对粘度的影响比较复杂, 大分子链柔顺性较大的聚合物, 链间的缠结点多, 链间的解缠、伸长和滑移都困难, 熔体流动时的非牛顿性(熔体的粘度和粘度对剪切速率的敏感性)就强; 而对于链的刚性高且分子间的吸引力较大的聚合物, 熔体的粘度对温度的敏感性增加, 非牛顿性减弱, 提高成型温度有利于改善流动性能(如 PC, PS, PA 等)。

2) 相对分子质量。聚合物相对分子质量比较大时, 大分子链会有所加长, 大分子链重心移动减慢, 链段间相对位移被抵消的机会增多, 链的柔顺性增大, 缠结点增多, 解缠、伸

长和滑移困难，一般都需要较大的剪切速率和较长的剪切时间，所以，熔体的非牛顿性会增大。通常塑料熔体在注射成型时都要求有较好的流动性，对于相对分子质量较大而造成的流动性不好的聚合物通常要添加一些低分子物质（如增塑剂），以减小相对分子质量并降低其熔体粘度，改善塑料熔体的流动性。

3) 相对分子质量分布。聚合物内大分子链之间相对分子质量的差异叫相对分子质量分布，差异越大分布越宽，反之分布越窄。在聚合物平均相对分子质量相同时，当相对分子质量分布较宽时，聚合物熔体的粘度较小，非牛顿性较强。虽然这种低的粘度易于注射成型，但是成型出的制品的性能却比较差。所以，要选用相对分子质量分布较窄的聚合物并通过其他途径改善其粘度，从而得到性能较好的塑料制品。

(2) 温度对黏度的影响 由于温度影响聚合物大分子链的热运动，所以聚合物的粘度也受温度的影响。通常随着聚合物温度的升高，其体积也会膨胀，大分子链之间的体积也会膨胀，大分子链之间的自由空间也会随之增大，分子间的范德华力减小，有利于大分子的变形和流动，从而降低了熔体的粘度。不同熔体的粘度对温度的敏感程度并不相同，一般与聚合物相对分子质量和分布范围有关。由图 1-8 可知，聚合物聚甲基丙烯酸甲酯 (PMMA)、聚碳酸酯 (PC) 及聚酰胺 66 (PA66)，在成型过程中表现出对温度极为敏感，而聚合物聚乙烯 (PE)、聚丙烯 (PP)、聚甲醛 (POM) 表现出对温度的敏感性要小一些。

(3) 压力对粘度的影响 由于聚合物大分子长链的结构非常复杂，自由状态下堆砌密度低，分子间有较大的自由空间。当压力增大时意味着使分子间空间的缩小，也就使得分子链间的移动变得困难，从而使得熔体的粘度增大。

(4) 助剂对粘度的影响 为了保证使用性能和加工需要，多数高分子聚合物都要添加一些助剂才能使用。这些助剂包括各种填充剂、增塑剂、润滑剂、稀释剂、着色剂、稳定剂和改性剂等。助剂不同对高聚物熔体的粘度影响也不同。如增塑剂和润滑剂能明显地降低熔体的粘度；而一些很细的填充剂如亚硫酸钙和二氧化硅等则会降低熔体的粘度。

以假塑性流体为例，当以上各种因素增加时，熔体粘度的变化趋势可以用图 1-9 进行粗略地表示，其中向上的箭头表示使熔体粘度增大，向下的箭头表示使熔体粘度减小。

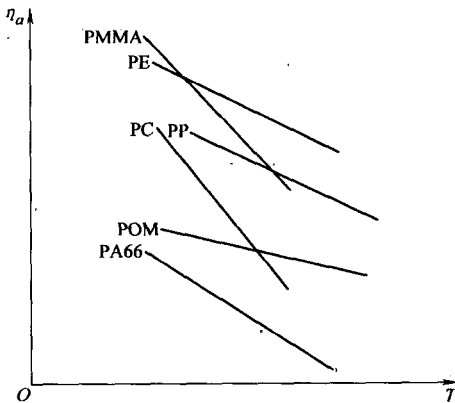


图 1-8 温度对材料表观粘度的影响

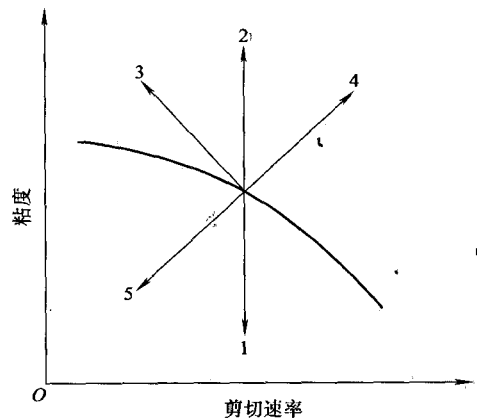


图 1-9 各种因素对聚合物熔体粘度的影响

1—温度 2—压力 3—相对分子质量

4—填充剂 5—增塑剂或溶剂