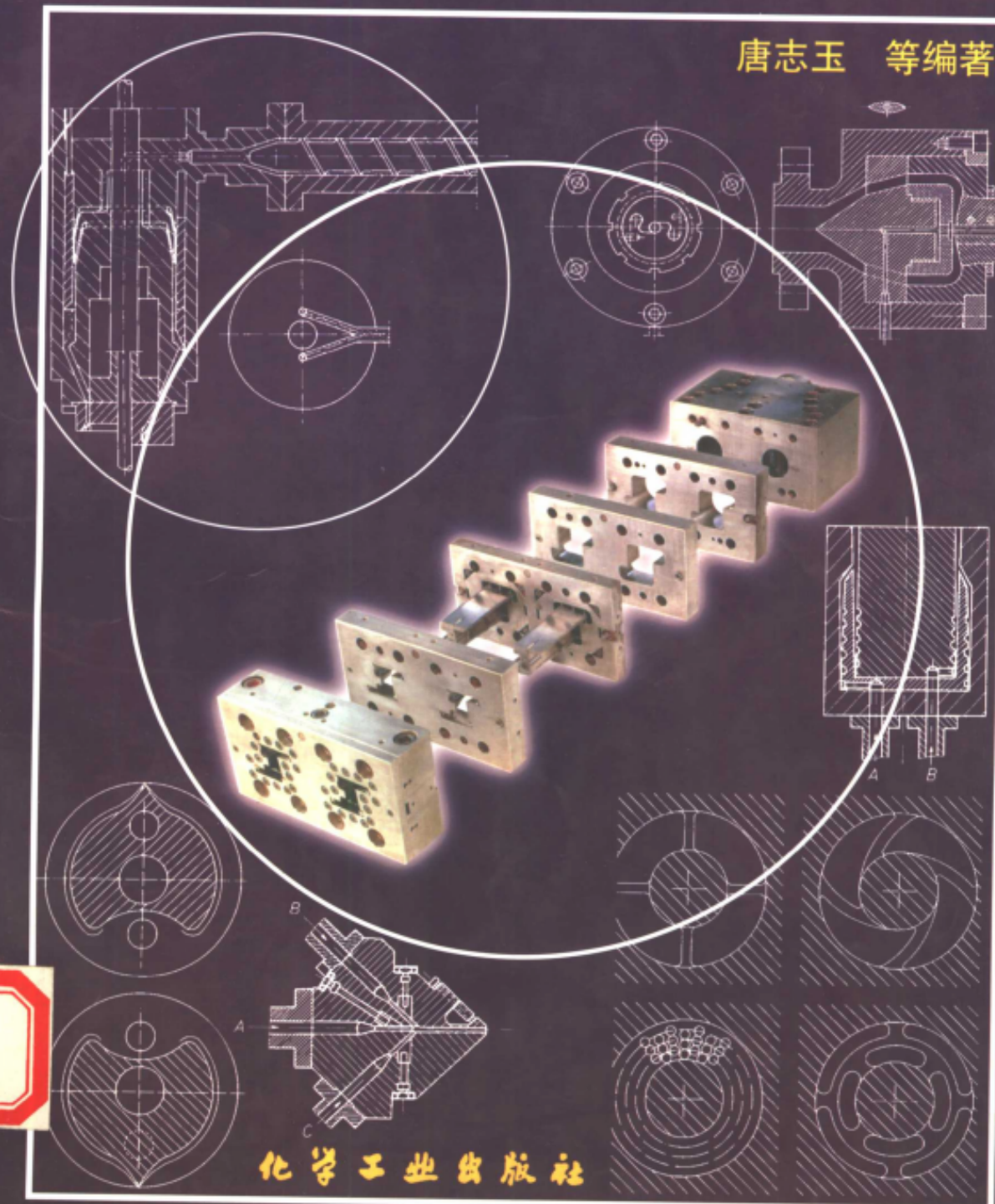


挤塑模设计

唐志玉 等编著



化学工业出版社

挤塑模设计

化学工业出版社

0320.66
9

挤 塑 模 设 计

唐志玉 等编著

化 学 工 业 出 版 社
· 北 京 ·

FB18/6

(京)新登字 039 号

图书在版编目 (CIP) 数据

挤塑模设计/唐志玉等编著. —北京:化学工业出版社,
1997.6
ISBN 7-5025-1807-X

I. 挤… II. 唐… III. 挤出成型-塑料模-设计 IV.
TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (96) 第 22082 号

挤 塑 模 设 计

唐志玉 等编著

责任编辑:龚浏澄 白艳云

责任校对:马燕珠

封面设计:郑小红

化学工业出版社出版发行
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码 100029)

新华书店北京发行所经销

北京五洲印刷厂印刷

天津市延风装订厂装订

开本 787×1092 毫米 1/16 印张 16 字数 409 千字

1997 年 6 月第 1 版 1997 年 6 月北京第 1 次印刷

印 数: 1—5000

ISBN7-5025-1807-X/TQ·948

定 价: 25.00 元

版权所有 盗印必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责调换。

目 录

第一章 绪 论

1.1 挤塑模的功能与作用	1
1.2 设计挤塑模须考虑的问题	2
1.3 挤塑模设计程序	4
参考文献	5

第二章 材料数据

2.1 材料流变学	6
2.1.1 材料的粘性行为	6
2.1.2 影响粘性流动的因素	10
2.1.3 幂律模型	19
2.1.4 状态方程	20
2.1.5 材料的弹性表现	21
2.2 材料热力学性质	28
2.2.1 密度和比容	28
2.2.2 热导率	29
2.2.3 比热容	29
2.2.4 热扩散系数	29
2.2.5 比焓	29
习题	30
参考文献	31

第三章 流体流动与基本方程

3.1 流体流动	32
3.2 连续性方程	32
3.3 理想流体的动量方程	33
3.4 奈维-斯托克斯流动方程	35
3.5 能量方程	37
3.6 应变速率张量及流变方程	38
参考文献	39

第四章 塑料熔体流动分析

4.1 几何单元与约束	40
4.2 熔体在圆形流道中的流动	40
4.2.1 牛顿流体模拟分析	40
4.2.2 幂律流体模拟分析	43

4.2.3 在圆形通道中的非等温流动分析	48
4.3 在矩形流道中的流动	53
4.3.1 等截面矩形流道	53
4.3.2 变截面矩形流道	54
4.3.3 矩形流道通解	56
4.3.4 在矩形流道中的非等温流动分析	58
4.4 塑料熔体在其他流道中的流动	60
4.4.1 正多边形截面流道	60
4.4.2 正三角形截面流道	62
4.4.3 椭圆形截面流道	63
4.4.4 圆环形截面流道	65
4.5 熔体在管腔中的拖曳流动	65
4.5.1 平行板拖曳流动	66
4.5.2 圆环腔空间的拖曳流动	68
4.5.3 圆环腔通道中的拖曳流动	69
4.6 有限元法 (F.E.M) 分析	70
习题	73
参考文献	74

第五章 工艺装置设计

5.1 挤塑机性能	76
5.1.1 螺杆特性	76
5.1.2 挤塑机产量	76
5.2 联接器设计	79
5.2.1 螺纹联接式	80
5.2.2 螺钉联接式	81
5.2.3 卡箍联接器	81
5.3 栅板与过滤器设计	83
5.3.1 栅板设计	83
5.3.2 滤网压降计算	83
5.3.3 过滤器设计	84
参考文献	85

第六章 实芯型材挤塑模设计

6.1 棒材模设计	87
6.1.1 棒材模结构设计	87
6.1.2 参数确定	88
6.2 棒材定型模设计	89

6.2.1 定型模结构设计	89
6.2.2 定型模设计要点	90
6.3 焊条机头设计	90
习题	91
参考文献	92

第七章 空芯型材挤塑模设计

7.1 管材模设计	93
7.1.1 管材挤塑模结构类型	94
7.1.2 成型段长度计算	97
7.1.3 机头结构参数确定	98
7.2 管材定型模设计	98
7.2.1 定径方法	99
7.2.2 定径套尺寸	100
7.3 吹膜机头设计	101
7.3.1 吹膜机头类型	101
7.3.2 结构与工艺参数	102
7.3.3 机头结构设计	103
7.4 型坯机头设计	106
7.4.1 设计要求	106
7.4.2 型坯机头主要参数	106
7.4.3 结构类型	107
7.4.4 储料缸设计	108
习题	110
参考文献	111

第八章 平缝形挤塑模设计

8.1 平缝模结构设计	112
8.2 平缝模流道设计	113
8.2.1 T形机头流道设计	113
8.2.2 鱼尾形机头流道设计	119
8.2.3 衣架式机头流道设计	124
8.2.4 螺杆分配机头流道设计	129
8.3 自动调节式平缝机头	130
8.3.1 热螺栓自动调节式平缝机头	130
8.3.2 微机控制平缝挤塑机头	131
习题	131
参考文献	132

第九章 线缆包覆挤塑模设计

9.1 线缆包覆模类型	133
9.1.1 挤压式包覆模	133
9.1.2 套管式包覆模	133
9.2 包覆模结构设计	134

9.2.1 芯模几何设计	134
9.2.2 流道锥角设计	135
9.2.3 导向锥间隙设计	135
9.2.4 口模对中设计	135
9.2.5 口模形状设计	135
9.3 芯模分配系统设计	135
9.3.1 圆柱形芯模分配系统尺寸	135
9.3.2 截锥形芯模分配系统尺寸	138
9.4 交联聚乙烯包覆模设计	140
参考文献	142

第十章 异型材挤塑模设计

10.1 异型材分类及设计原则	143
10.2 异型材挤塑模类型	144
10.2.1 孔板式挤塑模	144
10.2.2 多级式挤塑模	145
10.2.3 流线型挤塑模	145
10.3 异型材挤塑模结构设计	145
10.3.1 口模尺寸	145
10.3.2 挤塑模结构参数	147
10.4 异型材定型模设计	148
10.4.1 异型材定型方法	148
10.4.2 定型模结构设计	150
10.5 设计实例	154
参考文献	156

第十一章 低发泡型材挤塑模设计

11.1 低发泡型材的工艺方法	157
11.2 发泡型材挤塑模结构类型	157
11.2.1 纵向高阻力实芯型材挤塑模	157
11.2.2 分流锥孔板式挤塑模	157
11.2.3 发泡中空型材挤塑模	158
11.2.4 栅格分流梭挤塑模	158
11.3 模腔流道设计	158
参考文献	159

第十二章 其他挤塑模设计

12.1 喷丝机头设计	160
12.1.1 机头结构设计	160
12.1.2 喷丝板参数	160
12.2 造粒机头设计	161
12.2.1 造粒工艺与操作条件	161
12.2.2 口模板设计	162
12.3 挤网机头设计	162

12.3.1 塑料网的构成	162
12.3.2 挤网机头结构	163
参考文献	164

第十三章 共挤塑模设计

13.1 共挤特性与工艺原理	165
13.2 共挤塑模结构类型	165
13.2.1 模外复合共挤模	165
13.2.2 模内复合共挤模	166
13.2.3 多层复合共挤模	166
13.2.4 可控型坯共挤模	167
13.3 多层共挤流动模拟分析	167
13.3.1 对称多层流压降近似计算	168
13.3.2 共挤多层流动数值分析	169
13.3.3 共挤多层流道中的速度和温度场	172
13.3.4 多层流动的不稳定性	173
参考文献	175

第十四章 挤塑模加热与压力测量

14.1 加热功率计算	176
14.1.1 按挤塑模质量确定加热功率	176
14.1.2 按挤塑模散热面积确定加热功率	176
14.1.3 按热散失所需补充的热量计算	176
14.1.4 挤塑模升温所需时间	177
14.2 加热方式选择	177
14.2.1 电阻加热器	177
14.2.2 铸铝加热器	178
14.3 温度控制与调节	178
14.4 机头压力测量	178
参考文献	180

第十五章 挤塑模机械设计

15.1 机械设计基本原则	181
15.1.1 挤塑模结构设计原则	181
15.1.2 流道构型设计原则	181
15.2 圆形流道挤塑模机械设计	182
15.2.1 口模径向允许变形量	183
15.2.2 支架支撑强度校核	183
15.2.3 联接螺钉计算	183
15.3 平缝形流道挤塑模机械设计	185
15.3.1 口模厚度计算	185
15.3.2 联接螺钉计算	188

15.3.3 衣架式机头结构尺寸	189
15.4 挤塑模用材料	190
15.4.1 材料须满足的条件	190
15.4.2 选材须考虑的问题	190
15.4.3 符合挤塑模用钢材类型	190
参考文献	191

第十六章 挤塑模装卸、清理与维护

16.1 操作人员素质	192
16.2 拆卸与清理	192
16.3 装配与维护	193
参考文献	193

第十七章 挤塑模结构设计实例

【例1】RPVC 管材及真空定型模设计	194
【例2】可调压力管材挤塑模设计	194
【例3】自增强复合管材挤塑模设计	194
【例4】波纹管挤塑模设计	195
【例5】双型坯挤塑模设计	196
【例6】衣架式流道挤塑模结构设计	196
【例7】窗用异型材及其定型模设计	196
【例8】双色板材挤塑模结构设计	196
【例9】中空异型材定型模设计	196
【例10】芯层发泡棒材挤塑模设计	200
【例11】菱形网挤塑模设计	200
【例12】3层内复合吹膜机头设计	201
参考文献	201

第十八章 挤出机头计算机辅助设计概要

18.1 CAD 概述	202
18.1.1 引言	202
18.1.2 CAD 系统的组成	202
18.1.3 CAD 系统的功能	203
18.1.4 CAD 技术的优点	203
18.2 CAD 在挤出模绘制中的应用	203
18.3 CAD 在挤出模工程计算中的应用	206
18.4 介绍几种用于挤出模设计仿真模拟分析的软件	214
18.4.1 POLYCAD	214
18.4.2 FLATCAD	215
18.4.3 SPIRALCAD	216
18.4.4 COEXCAD	217
参考文献	218

第十九章 数据表与附录

19.1 材料与基本数据	219	19.4 挤塑模设计相关数据	234
19.2 塑料型材加工工艺参数	227	19.5 挤塑模用钢材性能	236
19.3 塑料管材标准	230	19.6 冷却管件与密封	240
		19.7 挤塑辅机基本参数	248
		参考文献	248

第一章 绪 论

1.1 挤塑模的功能与作用

挤塑成型亦称挤出成型。它在热塑性塑料加工领域中是一种变化多、用途广、占比重颇大的加工方法。挤塑成型是将塑料在旋转的螺杆与料筒之间进行输送、压缩、熔融塑化、定量地通过处于挤塑机头部的口模和定型装置、生产出连续型材的加工工艺过程，如图 1-1 所示。

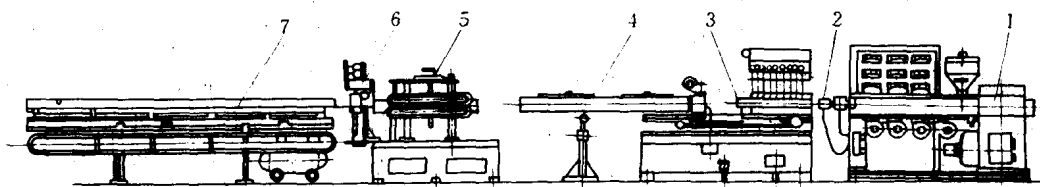


图 1-1 型材挤塑成型过程

1—挤塑机；2—机头；3—定型器；4—冷却段；5—牵引辊；6—锯切；7—倾卸槽

在挤塑机头部配以各种不同类型的机头（故有挤塑模头或挤出机头之称）及其相应的定型装置与辅机，便可生产出棒材、管材、各种异型材、板材、片材、薄膜、单丝、纸及金属片的涂层、电线电缆覆层、发泡材料及中空制品等等，诸多型材和制品。由此可知，挤塑模及其定型装置设计，在挤塑成型加工过程中占有特别重要的位置，图 1-2 展示了其各自不同的功能与作用原理。

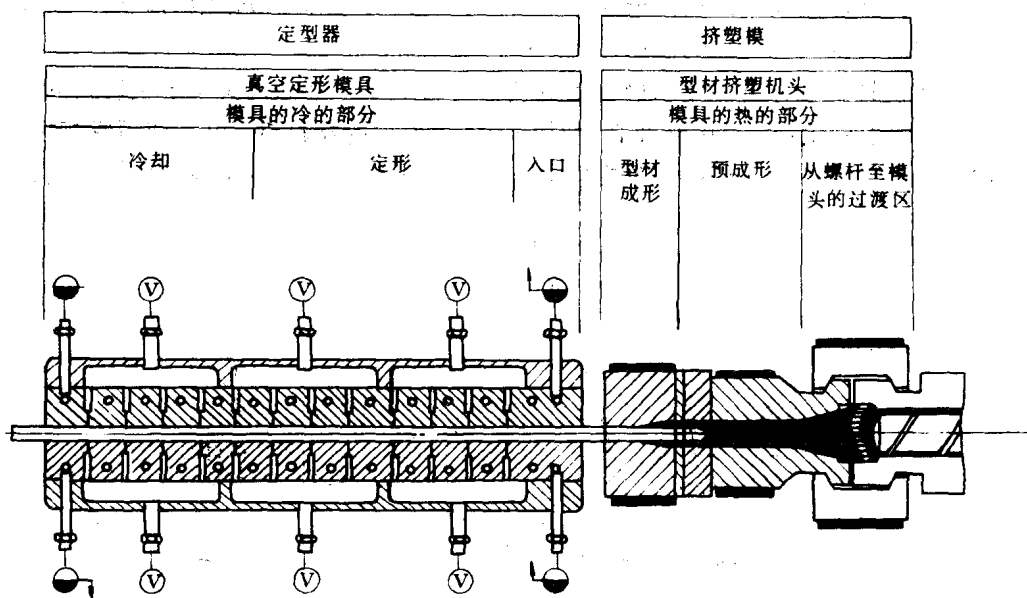


图 1-2 挤塑模与定型装置的作用原理

无论何种类型挤塑模，在生产过程中均起着以下四种不可替代的功能作用：

- (1) 使来自挤塑机的塑料熔体，由螺旋运动变为直线运动；
- (2) 通过模腔内的剪切流动，使塑料熔体进一步塑化均匀；
- (3) 通过模腔内流道几何形状与尺寸的变化，产生必要的成型压力，确保型材致密；
- (4) 通过机头成型段及模唇的调节作用，获得所需断面形状连续型材。

1.2 设计挤塑模须考虑的问题

显然，由挤塑机提供的塑料熔体，希望它有足够的流量、无波动、重现性好，且热性能与力学性能均一。为此须考虑挤塑模与定型装置中的流变学与热力学过程，以及可能存在于口模与定型模之间、或与两者有关的任何拉伸作用，对挤塑成型产品质量有决定性影响的因素。为使所设计的挤塑模及其定型装置，从加工工艺过程看恰如其分，因而有必要考虑熔体在这两个部件中的流动、形变及温度分布关系。如选用数学模型分析描述这一物理过程，则可有效减少机头及定型段设计中的经验成分。因为就挤塑成型及冷却而言，诸如模腔流道几何形状、操作条件、或所加工塑料的流变学及热力学性能方面的变化，均可由直接计算而得。这样设计的挤塑模与定型装置，就更为合理和可靠。具体说来，在设计挤塑模时应考虑以下诸方面的问题。

(1) 在流变学方面 问题必然在于如何选择模腔流道尺，以便：

- ① 在一定的挤塑压力下达到一定的体积产量；反之亦然；
- ② 熔体以相同的平均速率，从整个口模横截面挤出，而不致于在某个局部产生波动；
- ③ 对于非回转体、非轴对称性制品，须达理想挤出速度、形状和尺寸(熔体有膨胀效应)；
- ④ 当处于高体积流量时，挤出物表面仍保持光洁(高剪切速率下易引起“熔体破裂”)；
- ⑤ 避免熔体在模腔流道中滞留，以防止熔体分解、降低挤出产品性能。

(2) 热力学方面 十分重要的是与流变学密切相关。必须建立以热传递与热散失为基础的、在口模内熔体流动中出现的最高温度信息，尤其要考虑热敏性塑料。这个问题也包括在机头和定型装置及实现可靠的温度控制之中。

(3) 在模具制造方面 应以最低制造成本为出发点，考虑机头与定型装置的各零部件设计。如采用便于机械加工、抛光及必要时易于淬火处理的模具钢，以及使用常规制造方法等。

(4) 生产操作方面 包括挤塑模应具有适宜的刚度，以保持模腔在熔体压力作用下，其

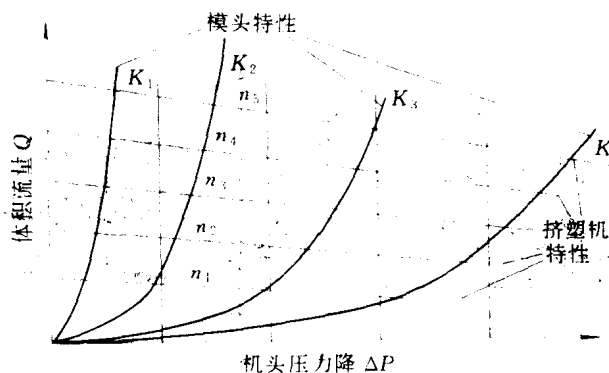


图 1-3 单螺杆挤塑机工作特性曲线

n —螺杆转速 $n_1 < n_2 < n_3 < n_4 < n_5$; K —机头阻力 $K_1 < K_2 < K_3 < K_4$

径向变形量在容许范围内。机头与定型装置易于装配与拆卸，模腔流道易于清理，以及机头易于与机塑机装卸、连接和密封等。

(5) 挤塑模与挤塑机相结合的操作特性 这是模具设计必须考虑的又一重要因素。当使用单螺杆挤塑机时，尤其如此。由图 1-3 可知，在螺杆转速 n 恒定不变时，增大挤塑模内腔

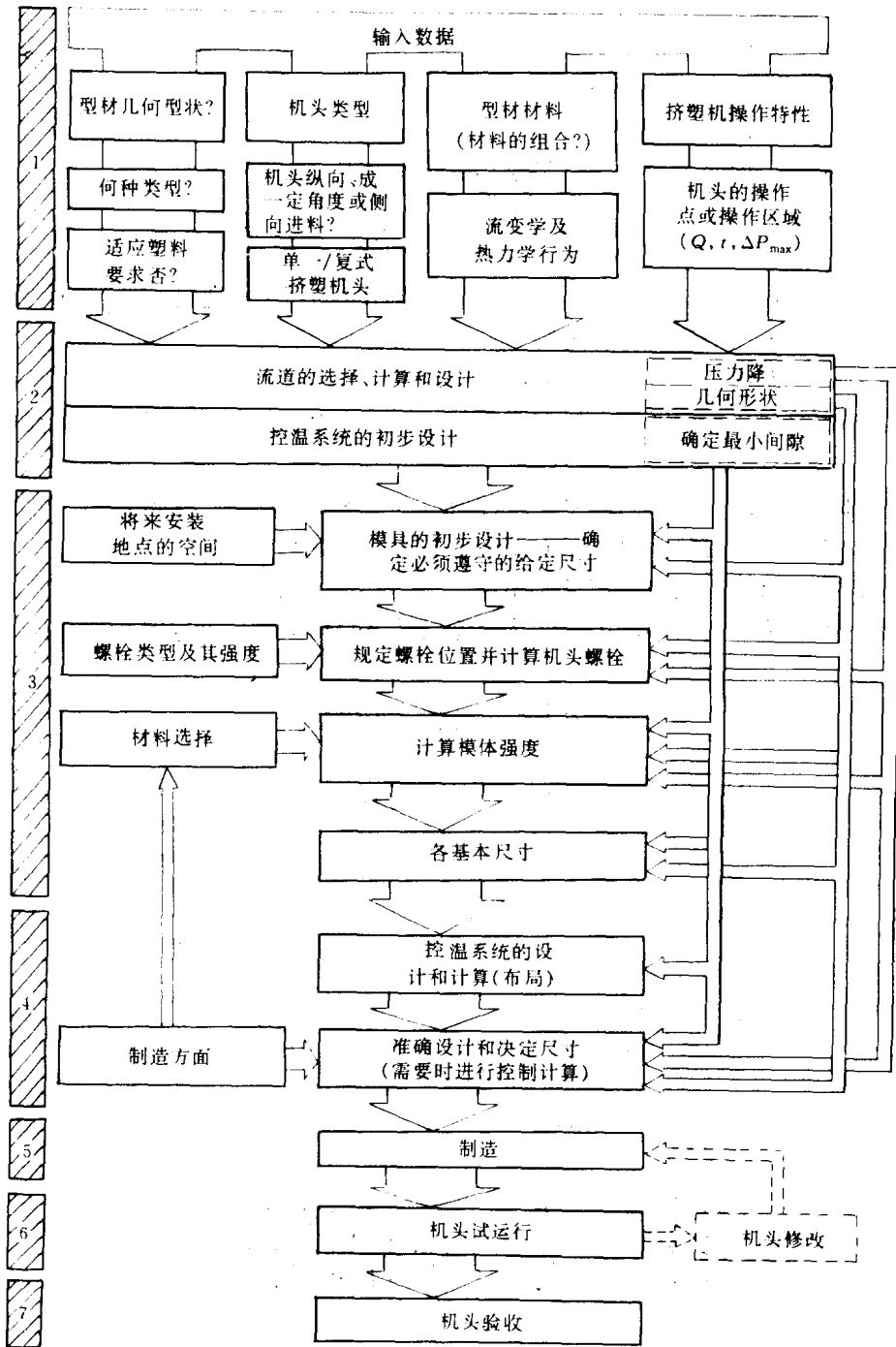


图 1-4 挤塑模设计程序

阻力 K_i ，其挤出物产量 Q 明显下降。因此，挤塑模中的压力降 ΔP 尤为重要。此外，在绝热操作条件下，由于熔体粘滞流动所造成挤塑模内熔体温度的升高 ΔT ，其与压降的定量关系，可表示为下列著名方程式

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho C_p} \quad (1-1)$$

式中 ρ ——熔体密度， kg/m^3 ；

C_p ——塑料的比热容， $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$ ；

ΔP ——压降， N/m^2 ， Pa 。

显然，就挤塑模设计而言，熔体压降是属头等重要考虑之列。

1.3 挤塑模设计程序

现将挤塑模设计所应考虑各个方面，示于挤塑模设计的图解（见图 1-4）之中。设计者可按照该图左侧序号及箭头走向分步骤进行。

第 1 步 设计者须明确回答以下 4 个问题：

①需挤塑型材的几何形状（如管、棒、膜或其他任何截面的型材）及其设计是否符合材料加工要求？

②熔体进入机头的方式及是否同时生产多种型材（如图 1-5 所示）或制品？

③需加工材料或共挤出材料组成及其流变学与热力学参数？

④挤塑机操作特性及挤塑模的操作点或操作区（ Q 、 T 、 $\Delta P_{\max}$ ）？

第 2 步 机头流道选型与设计、压降计算及控温系统的初步设计（方案）。

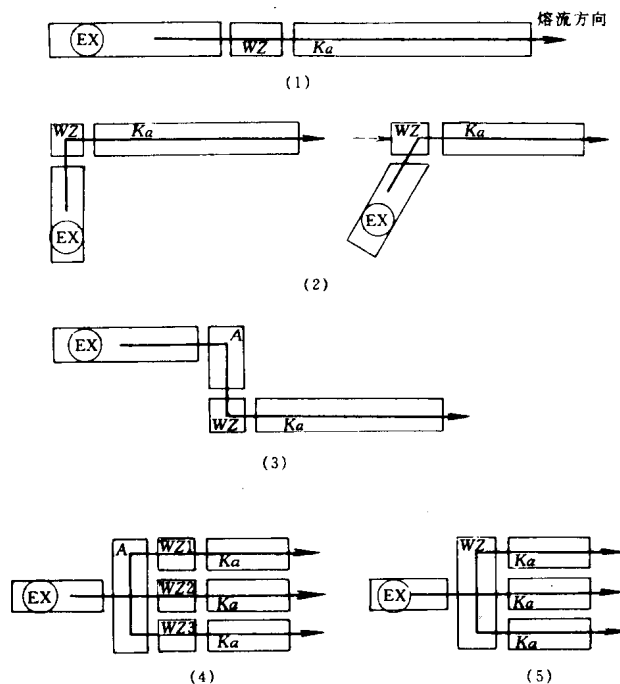


图 1-5 挤塑模类型

(1) 纵向进料；(2) 倾角进料；(3) 侧向进料；(4) 多头；(5) 单头

EX—挤塑机；WZ—挤塑模；A—联接器；Ka—定型模

- 第3步 确定挤塑模的基本尺寸（包括安装位置、联接螺栓强度和模腔刚度校核等）。
- 第4步 挤塑模工程设计，必要时应对各零件进行详细分析计算，并绘制施工图。
- 第5步 施工制造、总成。
- 第6步 试模、做些适当修改。
- 第7步 如若结果满意，则模具可最终验收。到此挤塑模设计工作宣告结束。

参 考 文 献

- [1] W. Michaeli, "Extrusion Dies; Design and Engineering Computations", Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1984.
- [2] 刁树森编著,《塑料挤出成型模具设计与制造》,哈尔滨,黑龙江科技出版社,1984年。
- [3] 邹立谦编著,《塑料制品设计》(上册),北京,机械工业出版社,1991年。
- [4] 吴崇周编著,《塑料成型加工原理》(上册),长春,吉林科技出版社,1986年。

第二章 材料数据

在挤塑模设计中,被加工的塑料材料数据占有关键性的地位。这些数据就是表征熔体流动、形变与松弛过程以及热传导过程。因此讨论材料流变学和材料热力学性质是本章的主要内容。

2.1 材料流变学

为了表征热塑性塑料熔体像液体一样粘滞,并且也像弹性固体或橡胶一样有弹性这一事实,在其流动行为上,热塑性塑料熔体被认为是粘弹性的。此外,这些性能表现出对时间有明显的依赖性。因此,当以流变学表征它们时,总是分成纯粘性流动和弹性表现两部分来讨论。

2.1.1 材料的粘性行为

聚合物熔体若以“流动性”来量度是颇困难的,故常用“粘度”来描述。为确保塑料制品的质量,聚合物熔体在模具流道中的流动状态必须保持为层流。一般说来,塑料熔体在通常的加工过程中的流动基本上属于层流范畴,且其雷诺准数 $Re \ll 1$ 。

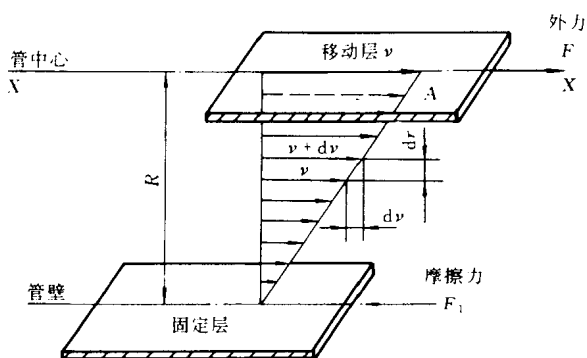


图 2-1 液体层流模型

为了研究流体的流动性质,可把这种层流流动看成是一层层彼此相邻的薄层液体沿外力作用方向进行相对滑移。液层有平直的平面,彼此完全平行。图 2-1 为其层流流动中的液层滑移的模拟示意图。 F 为外部作用于整个液体的恒定剪切力, A 为向两端延伸的液层面积。当流体流动时必然产生内部

摩擦力。这种内摩擦力通常以单位面积上的力来表示,在力学上称为剪切应力,即

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (\text{N/cm}^2 \text{ 或 } \text{N/m}^2 \text{①})$$

在恒定的应力作用下流体的应变表现为液层以均匀的速度 v 沿剪切力作用方向移动。但液层间的粘性阻力和管壁的摩擦力使相邻层间在移动方向上存在速度差。管中心阻力最小,液层流动速度最大。管壁附近液层同时受到流体粘性阻力(即内摩擦力)和管壁摩擦力(即外摩擦力)的双重作用,因此速度最小,在管壁上液层的移动速度为零(假定不产生滑移)。当液层间的径向距离为 dr 的两液层间的移动速度分别为 v 和 $(v+dv)$ 时,则液层间单位距离内的速度差就是速度梯度,即 dv/dr 。但由于液层移动速度 v 等于单位时间 dt 内液层沿管轴线 X-X 上移动的距离 dx , 即 $v=dx/dt$ 。故速度梯度可表示为

$$\frac{dv}{dr} = \frac{d(dx/dt)}{dr} = \frac{d(dx/dr)}{dt}$$

① N/m^2 为国际单位制(SI)的应力和压强单位,称帕斯卡(Pa), $1\text{N/cm}^2 = 10^4\text{N/m}^2$ 。

在上式中, (dx/dr) 表示一个液层相对于另一个液层移动的距离, 它是在剪切力作用下该层液体所产生的剪切应变, 即 $\gamma = dx/dr$ 。故上式又可改写为

$$\frac{dv}{dr} = \frac{d\gamma}{dt} = \dot{\gamma} \quad (\text{s}^{-1})$$

$\dot{\gamma}$ 表示单位时间内的剪切应变, 通常称之为剪切速率。这样就可由剪切速率代替速度梯度, 且在数值上两者相等。

牛顿 (Newton) 在研究低分子液体的流动时, 发现剪切应力和剪切速率间存在着一定的关系, 可表示为

$$\tau = \mu \left(\frac{dv}{dr} \right) = \mu \frac{d\gamma}{dt} = \mu \dot{\gamma} \quad (2-1)$$

式 (2-1) 说明液层单位表面上所加之剪切应力 τ 与液层间的速度梯度 (dv/dr) 成正比, 这就是著名的牛顿粘性定律。 μ 为比例常数, 称为牛顿粘度。它是液体本身所固有的性质, 其大小表征液体抵抗外力引起流动形变的能力。不同流体的 μ 值不同, 与流体的分子结构和流体所处的温度密切相关。其单位为 $\text{Pa} \cdot \text{s}$ (帕斯卡·秒)^① 或 $\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 。方程 (2-1) 亦称为牛顿流体的流变方程。凡液体层流时符合方程 (2-1) 所描述的关系者通称为牛顿型流体。以 τ 对 $\dot{\gamma}$ 或粘度 μ 对 $\dot{\gamma}$ 作图所得曲线称为流体的流动 (或流变) 曲线。经作图可知, 牛顿型流体的流动曲线具有:

① $\tau \sim \dot{\gamma}$ 曲线是一条通过直角坐标系原点的直线。直线的斜率就是液体的牛顿粘度 μ , 45° 的斜率说明该液体的粘度为一常数;

② $\mu \sim \dot{\gamma}$ 曲线是一条平行于剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的直线。表明牛顿粘度 μ 不随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 而变化, 始终是常数;

③ 牛顿流体的应变具有不可逆性, 其应力解除后应变以永久形式保持下去。这是纯粘性流动的特点。

实践表明, 真正属于牛顿流体的是气体、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-氯乙烯共聚物等几种少数与牛顿流体相近外, 绝大多数都只能在剪切应力很小或很大时, 才表现为牛顿流体 (如图 2-2 所示)。但聚合物熔体在流经模具流道 (包括口模) 的过程中, 其所受到的剪切应力却并非是很大或很小, 所以它们表现的流动行为与牛顿流体不符。凡流体受力流动时, 其剪切应力与剪切速率之间呈非线性关系, 即不服从式 (2-1) 规律者, 均称为非牛顿流体。

根据非牛顿型流体的剪切应力与剪切速率之间呈现非线性关系的不同特征, 非牛顿型流体又可分为粘性系统、有时间依赖性系统和粘弹性系统三大类。其中与模具设计密切相关的是推粘性系统。这类系统的流体受力流动时, 其剪切速率只依赖于所施剪切应力的大小, 而与剪切应力施加的时间长短无关。它的普适流变方程可表示为:

$$\dot{\gamma} = f(\tau) \quad (2-2)$$

根据其函数关系式性质的不同, 又可分为: 宾哈流体、假塑性流体和膨胀性流体三种。这三种流体的流动曲线连同牛顿流体的流动曲线示于图 2-3 中。

(1) **宾哈流体** 这种流体与牛顿型流体相比, 相同之处为剪切应力与剪切速率之间呈线

① 帕斯卡秒为国际单位制 (SI) 中粘度的单位。与 CGS 制中粘度单位 (泊) 可按下式换算:

$1 \text{Pa} \cdot \text{s} (\text{帕斯卡秒}) = 1 \text{Ns}/\text{m}^2 (\text{牛顿秒}/\text{米}^2) = 10 \text{P} (\text{泊}) = 10^3 \text{cp} (\text{厘泊}) = 0.1020 \text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2 (\text{千克力} \cdot \text{秒}/\text{米}^2) = 10 \text{dyn} \cdot \text{s}/\text{cm}^2 (\text{达因} \cdot \text{秒}/\text{厘米}^2) = 10^{-4} \text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 。

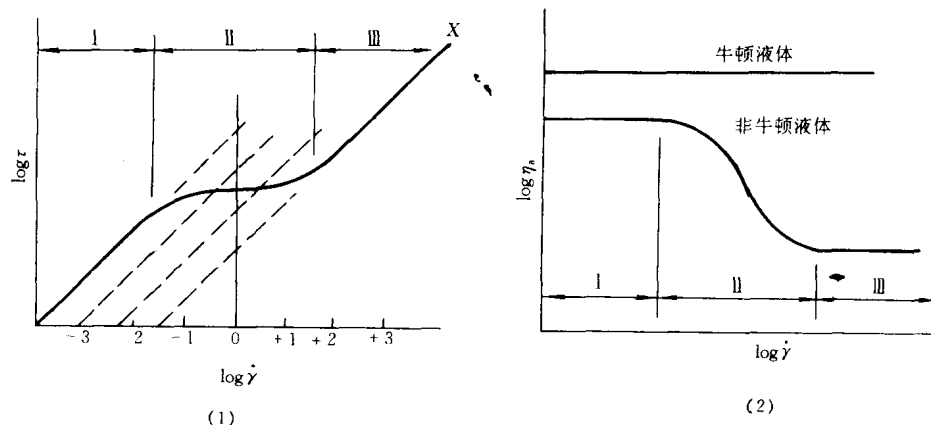


图 2-2 宽剪切速率范围聚合物熔体的 $\log \tau - \log \dot{\gamma}$ 曲线 (1) 和 $\log \eta_a - \log \dot{\gamma}$ 曲线 (2)

I 和 III—牛顿流动区；II—非牛顿流动区；X—表示熔体破裂

性关系，即它们的流动曲线为一直线；不同之处是只有当剪应力高至一定程度后流动才开始（见图 2-3）。使流体流动所需最小剪应力 τ_y ，被称之为屈服应力。宾哈流体的流变方程可表示为：

$$\tau - \tau_y = \eta_0 \dot{\gamma} (\tau > \tau_y) \quad (2-3)$$

式中， η_0 为流体的粘度或称刚性系数，等于流动曲线的斜率。宾哈流体所以有这种流变行为，原因是该种流体在静止时，内部存在有凝胶性结构。当外加应力超过 τ_y 时，这种凝胶性结构才全部崩溃，并开始流动。在塑料工业中，几乎所有聚合物的浓溶液和凝胶性糊塑料的流变行为，都与宾哈流体很接近。

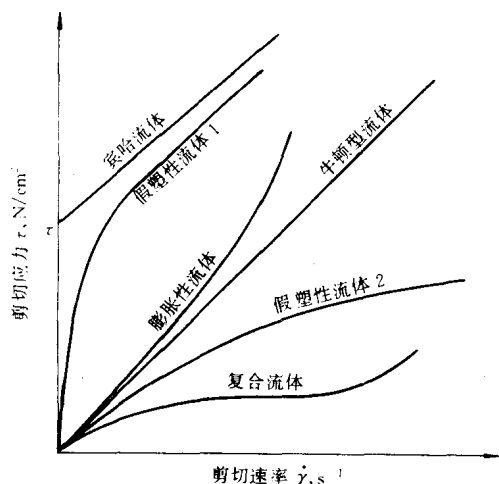


图 2-3 非牛顿型流体的流变曲线

(2) **假塑性流体** 这种流体是非牛顿型流体中最普通最常见的一种，它所表征的流动曲线是非线性的（见图 2-3），且是一条上升后又下降的曲线，并且不存在有屈服应力。这表明：剪切速率

的增加要比剪切应力的增加来得快。在非常高或非常低的剪切速率下，流动曲线才呈为直线。几乎绝大多数聚合物熔体以及聚合物溶液，其流动行为都接近于假塑性流体。描述假塑性流体的经验方程式中、具有实用价值的要推幂律函数方程式

$$\tau = K \left(\frac{d\nu}{dr} \right)^n = K \dot{\gamma}^n \quad (n < 1) \quad (2-4)$$

式中， K 与 n 均为常数。 K 称为流体的稠度，流体的粘稠性越大， K 值越高； n 为流体流动行为指数，是判断流体与牛顿型流体差别程度的参数。 n 值离整数 1 越远，则该流体的非牛顿性越强，故 n 常称为非牛顿流体流动行为指数。为了将方程 (2-4) 与方程 (2-1) 作比较，可将方程 (2-4) 化为

$$\tau = \left[K \left(\frac{d\nu}{dr} \right)^{n-1} \right] \frac{d\nu}{dr} = (K \dot{\gamma}^{n-1}) \dot{\gamma}$$

$$\eta_a = K \left(\frac{d\nu}{dr} \right)^{n-1} = K \dot{\gamma}^{n-1} \quad (n < 1) \quad (2-5A)$$

取

则方程 (2-4) 可改写为

$$\tau = \eta_a \dot{\gamma} \quad (2-6)$$

式中, η_a 称为非牛顿型流体的表观粘度, $\text{N} \cdot \text{s}/\text{cm}^2$ 。

由此可知, 在给定的温度与压强条件下, 如果 η_a 为常量, 则式 (2-6) 与式 (2-1) 是相同的, 成为牛顿型流体的流变方程式, 且 η_a 成为牛顿型流体的绝对粘度 μ 。如果 η_a 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 有关, 则该流体就称为非牛顿型流体, 而 η_a 称之为非牛顿型流体的表观粘度。

描述假塑性流体流动行为的幂律函数, 还有另一种表达式。这就是

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dr} = k(\tau)^m \quad (m > 1) \quad (2-7)$$

式中, k 与 m 也是常数。 k 称为流动度或流动常数。 k 值越小表明流体越粘稠, 也即流动越困难。 m 和 k 与方程 (2-4) 中的 n 与 K 的关系分别为:

$$m = \frac{1}{n} \quad (2-8)$$

$$\left(\frac{1}{k}\right)^n = K \quad (2-9)$$

k 和 K 都是温度的函数。由方程 (2-9) 可知, 如果因为温度的变化而引起 K 或 k 的变化, 则 k 的变化幅度恒大于 K 。因而在很多场合都使用方程 (2-7) 来描述聚合物熔体的流变行为。

将方程 (2-8) 和方程 (2-9) 代入方程 (2-5A) 中, 则可获得表观粘度的另一描述式:

$$\eta_a = k^{-\frac{1}{m}} \dot{\gamma}^{\frac{1-m}{m}} \quad (2-10)$$

当 $m=n=1$, 即为牛顿流体时, 显然有:

$$\eta_a = K = \frac{1}{k}$$

这里须着重指出的是, 在上述描述假塑性流体的流变方程中, 在多数情况下在较广范围内, n 和 m 近似地为一常量。但是, 对于实际非牛顿型流体来说, n 和 m 均不为常量。尽管如此, 这在塑料模流变学设计的实际应用中并无甚大影响。因为塑料熔体流动的范围, 只取流变曲线上某一段线段, 因而 n 和 m 都可近似地视为常量。故用幂律函数方程来描述聚合物熔体的流动行为, 既简便而又准确。表 2-1 为若干聚合物熔体的非牛顿指数 n 值 (取其倒数便为 m 值)。

表 2-1A 若干聚合物的非牛顿指数

聚 合 物		非牛顿指数 n 值 ($\dot{\gamma}=10^1 \sim 10^2 \text{s}^{-1}$)								
代 号	生 产 厂	温 度 $^{\circ}\text{C}$								
		170	190	210	230	250	270	290	310	330
LDPE (F702)	北京燕山石油化工公司化工一厂	0.57	0.58	0.59	0.60	0.64				
LDPE (G201)	北京燕山石油化工公司化工一厂	0.50	0.52	0.54	0.56	0.60				
PP (J300)	北京燕山石油化工公司化工二厂		0.43	0.44	0.45	0.46	0.47	0.53		
PS	北京燕山石油化工公司化工二厂		0.42	0.53						
PMMA	苏州树脂厂			0.33	0.44					
ABS	兰州化学工业公司合成橡胶厂			0.25	0.24	0.23				
PA1010	靖江大众塑料厂				0.72	0.66				

续表

聚 合 物		非牛顿指数 n 值 ($\dot{\gamma}=10^1\sim10^2\text{s}^{-1}$)									
代 号	生 产 厂	温 度 $^{\circ}\text{C}$									
		170	190	210	230	250	270	290	310	330	
PA6	南京塑料二厂				0.82	1.00					
PC	清华大学实验厂					0.78	0.79	0.78			
PETP	北京市化工研究院						1.00	1.00			
PSU	上海天山塑料厂								0.60	0.63	

表 2-1B 若干聚合物的非牛顿指数 n 值

聚 合 物		非牛顿指数 n 值 ($\dot{\gamma}=10^2\sim 10^3\text{s}^{-1}$)									
代 号	生 产 厂	温 度 $^{\circ}\text{C}$									
		170	190	210	230	250	270	290	310	330	
LDPE (F702)	北京燕山石油化工公司化工一厂	0.43	0.49	0.54	0.58	0.60					
LDPE (G201)	北京燕山石油化工公司化工一厂	0.41	0.44	0.48	0.52	0.56					
PP (J300)	北京燕山石油化工公司化工二厂		0.30	0.30	0.30	0.32	0.35	0.38			
PS	北京燕山石油化工公司化工二厂		0.30	0.38							
PMMA	苏州树脂厂			0.23	0.36						
ABS	兰州化学工业公司合成橡胶厂			0.22	0.23	0.25					
PA1010	靖江大众塑料厂				0.54	0.48					
PA6	南京塑料二厂				0.56	0.78					
PC	清华大学实验厂					0.48	0.50	0.52			
PETP	北京市化工研究院						0.86	0.91			
PSU	上海天山塑料厂								0.46	0.48	

(3) **膨胀性流体** 这种流体与假塑性流体相类似,也不存在有屈服应力。但它所表现的流变曲线是一条向上翘(见图 2-3)的曲线。这说明,剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增加要比剪切应力 τ 的增加来得慢。也即表观粘度 η_a 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的增大而升高(正好与假塑性流体相反)。膨胀性流体的流变行为,也可用幂律函数方程式来描述,但 $n>1$ 。即

$$\tau = K\dot{\gamma}^n \quad (n > 1) \tag{2-4}'$$

或 $\dot{\gamma} = k(\tau)^m \quad (m < 1) \tag{2-7}'$

和 $\eta_a = K\left(\frac{dv}{dr}\right)^{n-1} = K\dot{\gamma}^{n-1} \quad (n > 1) \tag{2-5A}'$

及 $\eta_a = k^{-\frac{1}{m}} \dot{\gamma}^{\frac{1-m}{m}} \quad (m < 1) \tag{2-10}'$

故亦有方程(2-1)和(2-6)的描述形式

$$\tau = \eta_a \dot{\gamma} \quad (n > 1) \tag{2-6}'$$

若干固体含量高的悬浮液属于此种流体;在较高剪切速率下的聚氯乙烯糊的流动行为也与此种流体近似。这在模具设计中难以遇到。

2.1.2 影响粘性流动的因素