

〔联邦德国〕W.米歇利 著

挤塑模头

设计及

工程计算



轻工业出版社

挤塑模头设计及工程计算

〔联邦德国〕 W.米歇利 著

黄振华 译

陈文璞 校

烃 加 工 出 版 社

内 容 提 要

本书汇集了大量有关挤塑模头的技术资料,内容包括挤塑模头的设计原理及计算方法。具体介绍了各类单层及多层挤塑模头及特性,同时涉及到模头的温度控制、机械设计,模头的制造、装卸、清理与维护等方面,最后讨论了挤出管材与型材的定型装置。本书可供从事塑料加工的技术人员阅读,也可供大专院校有关专业的师生参考。

Extrusion Dies: Design and Engineering Computations

Walter Michaeli

Macmillan Publishing Co., Inc., New York, 1984

挤塑模头设计及工程计算

〔联邦德国〕W.米歇利 著

黄振华 译

陈文瑛 校

轻工业出版社出版

北方印刷厂排版

北方印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092毫米 16开本 17¹/₄印张 441千字 印1—5000

1989年4月北京第1版 1989年5月北京第1次印刷

ISBN 7-80043-018-9/TQ·015 定价:5.70元

译 者 前 言

本书原系1979年联邦德国亚琛技术大学讲师Walter Michaeli工学博士所著，在美国塑料工程师协会主持下由 Herzberg 博士译成英文，于1984年出版，英译本书名为《Extrusion Dies: Design and Engineering Computations》。本书根据英译本翻译。

书中汇集了大量有关挤塑模头的技术资料，在目前技术发展水平及研究成果的基础上，全面而系统地叙述了挤塑模头设计及计算原理。也详细讨论了各种类型的挤塑模头及其特性、模头的加热、模头材料的选择、制造、模头的装卸、清理和维护以及管材和型材的定型装置。

本书可作为塑料加工工艺及机械专业高年级生和研究生的教材，并可供有关科学研究、工程技术人员参考。

本书除第十、十一两章由陈文瑛翻译外，其余均由黄振华翻译。全书由陈文瑛校阅。在译校过程中，对发现的错误均已更正，但限于译校者水平，不当之处在所难免，尚希读者指正。

译 者

1986年5月

序

聚合物加工中有些业务范围尚未详尽地包括于一本专著之中，虽然打算将许多不同来源的复杂知识综合于一本教科书中，以供实际工作人员和学生之需，但有时仍出现上述这种情况，挤塑模头的工程与设计就是这样的领域。

我以前的同事Walter Michaeli博士曾试图编写这方面的书籍，并因此经允可在亚琛工业大学讲授“挤塑模头设计”。

现在出版的本书英译本是聚合物加工中很重要的课题的首次独特而广博的专著。特别考虑到，在以原料吨数表示的塑料加工中，挤出成型仍是首屈一指；不管怎样，全部热塑性塑料的50%以上均由挤塑加工，并且决没有挤塑将失去这种地位的迹象。

对于这一复杂的课题，本书使学生得到一种启发指导性的引导，本书使第一线专业人员得以补充知识，并使其经验能与所述理论性及过程分析性方法相比较，以及日益增长地将其应用于将来的工作中。

探讨“挤塑模头”这个课题可能有不同的途径：通过挤塑模头理论，或借研究模头的设计和工程。

读者会了解到，计算机应用于挤塑模头设计正日益增长。甚至目前我们即可预见，型材模头中很复杂的三向流动场的计算和诸如熔体膨胀的弹性现象的描述，借采用处理简易的数据输入程序与有限元法(FEM)相结合，在可接受的计算时间内求得即可使用的因而也是实用的信息。这一领域将在不断的发展之中。

然而，有时有必要划分收集当前发展水平和将其载入书中的界限，本书中已照此处理。也许本书能成为挤塑模头设计的专著。

无论如何，这本书理应得到这种声誉。

教授、工程博士 G. 门格斯
1983年12月于亚琛，联邦德国

前 言

本书试图给实际工作者及大学生描述各种塑料挤塑模具的主要情况。为此,将讨论各种类型的模头及其特征,列举其设计指导原则,以及论证工程计算分析方法及其局限性。更重要的是,鉴于工业界和研究院在前一时期所作的并现在仍继续不断作出的努力,将挤塑模头中输送现象(流动和传热)数学模型化。这些重要课题主要是高质量的挤塑半成品(如尺寸精度、表面质量)的高生产率的要求所推动的。由于经济上的考虑,日益提高的速度已使纯粹经验的挤塑模头工艺方法无法接受。

流道的设计在挤塑模头的工艺过程中占有核心地位。本书以认识和解释设计流道所需的材料数据为起点。

基本方程式的推导可以用来估计在流道中的压力损失、作用于流道壁上的力、速度分布及平均速度等等。各种实用的简单方程式都已汇总于各表中。对大多数挤塑模头,用这些方程式足以完成以流变学为基础的现实设计。

由于采用有限差分法及有限元法(FEM)来计算速度和温度场的方法在模头设计中的重要性日益增长,所以本书也加以讨论。

第五和第六章详细叙述了各种类型的单层及多层挤塑模头及其特征。随后是加热及机械设计问题的评述,有关挤塑模头材料选择及其制造的意见,最后讨论了挤塑模头的装卸、清理和维护以及管材和型材的定型装置。书末列出了较多的参考文献。

写作此书,正当我担任亚琛工业大学塑料加工研究所(IKV)(所长是教授、工程博士G.门格斯)挤塑及注塑室主任期间。我曾涉猎该所在挤塑模头工艺领域中的所有重要研究成果。我应向该所的我以前及现在的同事们深表谢意(具体人名从略),他们的研究工作是本书编写的实质部分。我也向对本书有贡献的所有其它同事们及该所的大学生、研究生致谢。而最重要的,我应感谢教授、工程博士G.门格斯,他对我编写本书的鼓励以及他不断的帮助、促进与支持,使我有完成本书的编写工作。

塑料加工研究所的许多研究与开发项目都在本书中引用了,并且成为本书中叙述的某些事实的基础。而这些研究与开发项目之所以成为可能,在经费上只是由于工业界与该研究所之间的联合研究和工业研究协会工作委员会(AIF)、德国研究委员会(DFG)和研究及工艺部(BMFT)的支持。

本书首先以德文于1979年出版。读者手中的这本书是根据稍加修订的1979年版本第一次译成英文的。

我们增加了按字母为序的索引,并核对了参考文献表,以保证便于识别大多数重要的英文参考文献。

事物在发展,挤塑模头也不例外,参考文献目录对1979年后的出版物也作了补充。

瓦尔特·米歇利

1983年8月于黑彭海姆,联邦德国

目 录

第一章 绪论	(1)
第二章 挤塑模头设计所需材料数据	(5)
2.1 材料流变学	(5)
2.1.1 材料的粘性	(5)
2.1.1.1 剪切粘度——流变本构方程	(5)
2.1.1.2 测定方法	(7)
2.1.1.3 粘度函数的压力与温度不变量表示法	(9)
2.1.1.4 基于熔流指数的粘度函数近似值求法	(12)
2.1.2 弹性材料的性能	(16)
2.2 材料的热力学性质	(20)
2.2.1 密度和比容	(20)
2.2.2 导热系数	(20)
2.2.3 比热容	(20)
2.2.4 热扩散系数	(20)
2.2.5 比焓	(21)
第三章 描述挤塑模头中流动的简单基本方程式	(22)
3.1 稳态及等温流动基本方程式推导示例	(23)
3.1.1 圆管中的流动	(23)
3.1.2 圆环中的流动	(26)
3.2 假设粘附壁时用于挤塑模头的简单方程式的总结	(27)
3.2.1 用于牛顿和非牛顿(幂律)流体挤塑模头的简单方程式	(27)
3.2.2 基于特征数据(特征粘度)的挤塑模头简单方程式	(29)
3.3 壁上滑移问题	(34)
3.3.1 考虑壁上滑移的模型	(34)
3.3.2 不稳定流动——熔体破裂	(36)
第四章 计算挤塑模头中速度和温度分布的通用方法	(38)
4.1 连续性方程	(38)
4.2 运动方程(动量方程)	(39)
4.3 能量方程	(40)
4.4 守恒方程的应用	(42)
4.5 计算温度和速度分布的假设和边界条件	(46)
4.6 速度和温度分布的结合	(47)
4.7 温度和速度分布方程的解法	(49)
4.7.1 能量方程的离散化	(50)
4.7.2 速度方程的离散化	(51)
4.7.3 有限差分方程求解的隐式法和显式法	(52)
4.7.4 稳定性和收敛性	(52)
4.7.5 高度可变的流道	(53)

4.7.6 实际计算和结果	(53)
4.8 模头中流动引起的可逆形变(弹性形变)的计算	(56)
4.8.1 挤出物料的膨胀、变宽	(57)
4.8.2 可逆形变的计算结果	(57)
4.9 采用有限元法(F.E.M.)计算流道中的温度和形变	(60)
4.9.1 解法	(61)
4.9.2 有限元法计算程序详述	(62)
4.9.3 结果	(63)
第五章 挤出单一熔体的挤塑模头	(68)
5.1 具有圆形出口横截面的模头	(68)
5.1.1 造粒机模板	(68)
5.1.2 纺丝板	(71)
5.2 具有环形出口横截面的模头 I	(71)
5.2.1 具有环形出口横截面的模头 I 的一般讨论	(72)
5.2.1.1 中央供料模芯支架模头	(72)
5.2.1.2 滤网迭模头	(75)
5.2.1.3 侧向供料模芯模头	(75)
5.2.1.4 螺旋模芯模头	(76)
5.2.2 具有环形出口横截面的模头的专门讨论	(79)
5.2.2.1 吹膜模头	(79)
5.2.2.2 管模头	(82)
5.2.2.3 吹塑型坯挤塑模头	(83)
5.3 具有平缝形出口横截面的模头	(88)
5.3.1 缝口模头的一般讨论	(88)
5.3.2 缝口模头流道的设计	(91)
5.3.2.1 采用双曲正弦函数定律的缝口模头设计	(92)
5.3.2.2 利用特征数据的缝口模头设计	(94)
5.3.3 挤塑模头的操作特性——对于缝口模头情况的论证	(100)
5.3.3.1 调节排和模唇面对可逆形变的影响	(100)
5.3.3.2 开车时的条件	(101)
5.3.3.3 局部模头温度对局部流速的影响	(103)
5.3.4 自动调节式模头	(104)
5.4 具有环形出口横截面的模头 II	(106)
5.4.1 关于线缆包覆模头的概述	(106)
5.4.2 模芯上分配系统的设计	(109)
5.4.2.1 计算圆柱模芯上分配系统的尺寸	(110)
5.4.2.2 计算锥形模芯上分配系统的尺寸	(112)
5.4.3 线缆包覆模头的操作特性	(114)
5.4.4 用于可交联聚乙烯的具有剪切缝的线缆包覆模头	(115)
5.5 具有任何出料口的模头	(118)
5.5.1 型材的各种类型及型材的设计	(118)
5.5.2 型材模头	(120)
5.5.3 型材模头的设计	(125)
5.6 发泡半成品模头	(129)

5.7 其它模头	(132)
5.7.1 分流板和滤料网	(132)
5.7.2 具有用于物料分配的驱动螺杆的缝口模头	(132)
5.7.3 涂布任何型材的模头	(132)
5.7.4 制造增强型材的模头	(133)
5.7.5 挤网模头	(133)
第六章 多层材料的挤塑模头 (共挤)	(135)
6.1 共挤模头	(135)
6.2 共挤模头中的多层流动	(139)
6.2.1 对称多层流动中压力降的近似计算	(140)
6.2.2 共挤流动的数值计算	(142)
6.2.3 共挤模头中的速度和温度场	(145)
6.2.4 多层流动的不稳定性	(147)
第七章 挤塑模头的温度控制	(148)
7.1 挤塑模头的热设计	(148)
7.1.1 模头的热平衡	(148)
7.1.2 确定加热装置的位置	(150)
7.2 挤塑模头的温度控制	(154)
第八章 挤塑模头的机械设计	(156)
8.1 计算轴向对称流道的模头尺寸	(156)
8.2 缝口模头尺寸计算	(162)
8.3 一般设计规则	(164)
8.4 挤塑模头的材料	(165)
第九章 挤塑模头的制造	(169)
第十章 挤塑模头的装卸、清理与维护	(172)
第十一章 挤出管材及型材的定型	(174)
11.1 定型设备的各种型式	(174)
11.1.1 摩擦定型	(174)
11.1.2 压缩空气外定型	(175)
11.1.3 真空外定型	(176)
11.1.4 内定型	(179)
11.1.5 精密挤拉成型 (Technoform法)	(179)
11.1.6 瓦楞管材的制造	(180)
11.2 定型设备的工程设计	(180)
11.3 实心棒材制造	(183)
第十二章 符号表	(185)
第十三章 参考文献	(189)
13.1 参考文献目录	(189)
13.2 补充参考文献目录	(233)
第十四章 索引	(257)

第一章 绪 论

赋予熔体形状的挤塑模具（亦称挤塑模头或挤塑机头）以及通常毗连的用以引导熔融态的半成品而且保持所要求的尺寸并同时达到规定冷却程度的定型器，在热塑性塑料挤塑成半成品中占有重要的地位（图 1-1 及 1-2）。

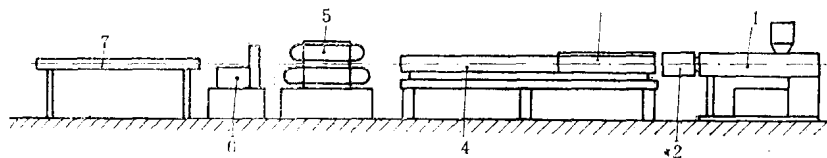


图 1-1 型材挤塑装置原理

1—挤塑机；2—模头；3—定型器；4—冷却段；5—牵引辊；6—锯；7—倾卸槽（储存）

熔体流由挤塑机供给，希望它有充足的流量、没有波动、重现性好、并且热和力学性能均一^{〔1〕}，另一方面，半成品的尺寸则由挤塑模头和定型器决定。在这方面，必须考虑模头和定型器中的流变学及热力学过程，以及可能存在于模头和定型之间或与两者有关的任何拉伸过程对挤塑半成品质量具有决定性影响（如表面，力学特征值）。为使设计的挤塑模头和定型器从加工工艺观点看恰如其分，因而有必要考虑生产线中这两部件中的流动、形变及温度关系。如选用分析法描述这一物理过程，则可减少模头和定型段设计的经验部分，因为就挤塑半成品的成型及冷却而言，诸如模头流道几何形状、操作条件或所加工的塑料的流变以及热力学性能方面的变化，都可直接估计。这样，设计的挤塑模头和定型器就更为可靠。

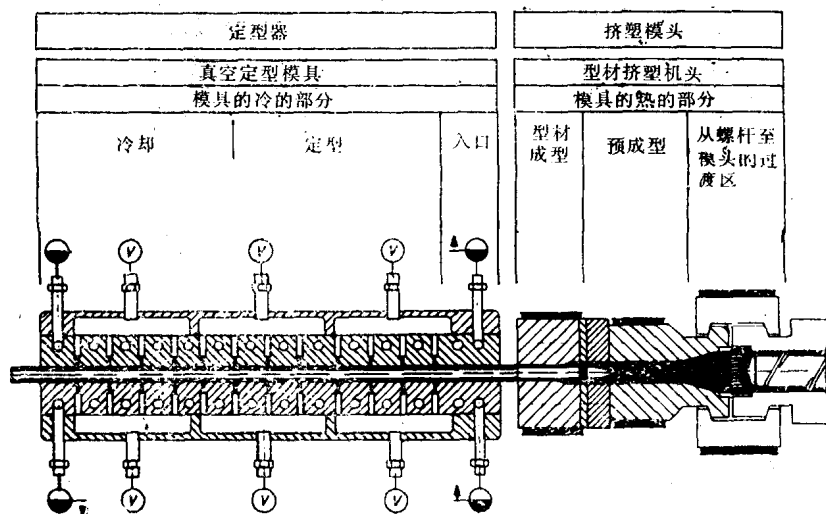


图 1-2 模具剖视（根据Reifenhäuser KG, Troisdorf）

因此，本书目的在于全面叙述挤塑模头和定型段中的加工工艺过程，着重叙述挤塑模头。从这种叙述中引伸出用于其设计的各项法则并列举了符合实践要求的简单的数学辅助方

法。此外，也涉及不同的模头和定型器设计的特点。

在挤塑模头和定型器的结构与设计中，出现了流变学、热力学、制造以及操作的见解⁽²⁾。

操作方面包括例如挤塑模头的适宜机械劲度以保持因熔体压力作用而产生的出口横截面变化最小，模头及定型器能易于装拆，模头容易清理以及模头中尽量少的良好密封表面和挤塑机与模头间的可拆卸及密封的连接⁽²⁾。

在制造方面，应以最低制造成本出发考虑各个模头和定型器部件的设计，例如采用便于机加工、磨光及必要时退火的模具材料（见第8.4节）以及应使用常用的制造方法。

在流变学方面，问题必然在于⁽²⁾应如何选择模头的流道尺寸，以便：

1. 在一定的挤塑压力下达达到一定的体积产量（这个问题也可以反过来问）；
2. 熔体在相同的平均速率下，从整个出口横截面挤出；
3. 对于没有旋转对称性的半成品，达到所需的理想挤出料尺寸形状〔首先这是基于粘弹效应（见第2.12和4.8节）〕；
4. 甚至在高的体积产量时，挤出物表面仍保持光滑（高剪切速率下能发生熔体破裂）；
5. 避免挤出料停滞以及部分和停滞有关的挤出料分解（这是模头中物料停留时间以及此处现有温度的问题）。

在热力学问题方面，密切地和流变学方面有关系，必须取得关于以现有热传递及耗散关系为基础的模头内熔体流中出现的最高温度的信息，特别是考虑到热敏性模塑材料。这个课题也包括在模头及定型器中实现均匀可控的温度。

通常，在设计挤塑模头以及定型器时，不是这里所述的所有主题都能同时同样有效地实现，因此必须确定重点。例如，在造粒机口模（造粒口模板）的设计中，尽一切努力来得到尽可能高的产量；而在电缆包覆模头中，主要重点是表面的光滑⁽²⁾。

然而，在这些考虑中，必须注意挤塑机和挤塑模头在其操作特性上通常是相互有关的事实。在采用具有平滑机筒和三段螺杆的常用单螺杆挤塑机时尤其如此。如由图1-3可见，在螺杆转速 n_1 恒定下增长挤塑模头阻力 k_1 ，在这种挤塑机概念的情况下可使体积产量 $\dot{u}$ 明显下降。因此，在模体及将模头固定在一起的螺栓的机械设计中，以及为了能达到的产量，挤塑模头中的压力降 ΔP 很重要（注：在很多情况下，限制挤塑装置产量的不是模头或所选的挤塑机，而是定型和冷却段区域内可能达到的冷却速率。例如第11.3节中所述的厚壁棒材是用螺杆直径小的挤塑机制造的）。此外，在绝热条件下，由于熔体内摩擦（耗散）造成的挤塑模头内温度增高，根据下列著名方程式与此压力降相互关联（符号说明见第十二章）：

$$\Delta T = \frac{\Delta P}{\rho c_p} \quad (1.1)$$

就挤塑模头设计而言，压力降应属头等重要是很明显的。

所述挤塑模头设计中应考虑各方面，示于模头设计图解中（图1-4）。设计挤塑模头的输入数据提出了下述有关问题（图1-4，第I步）：

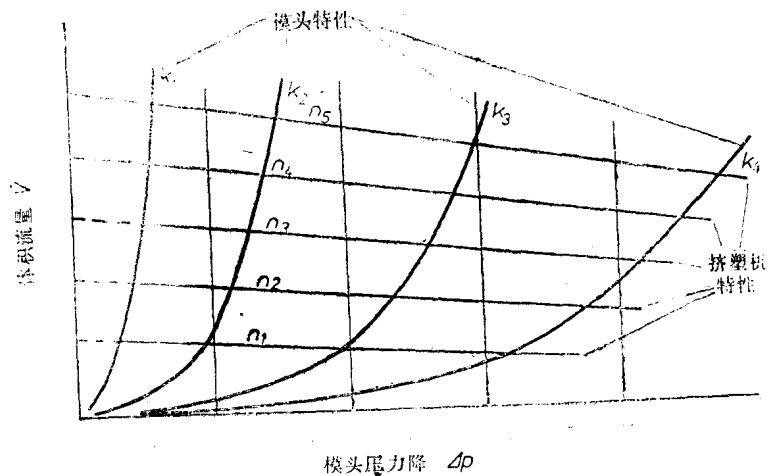


图 1-3 常用挤塑机工作图

n : 螺杆转速, $n_1 < n_2 < n_3 < n_4 < n_5$ k : 模头阻力, $k_1 < k_2 < k_3 < k_4$

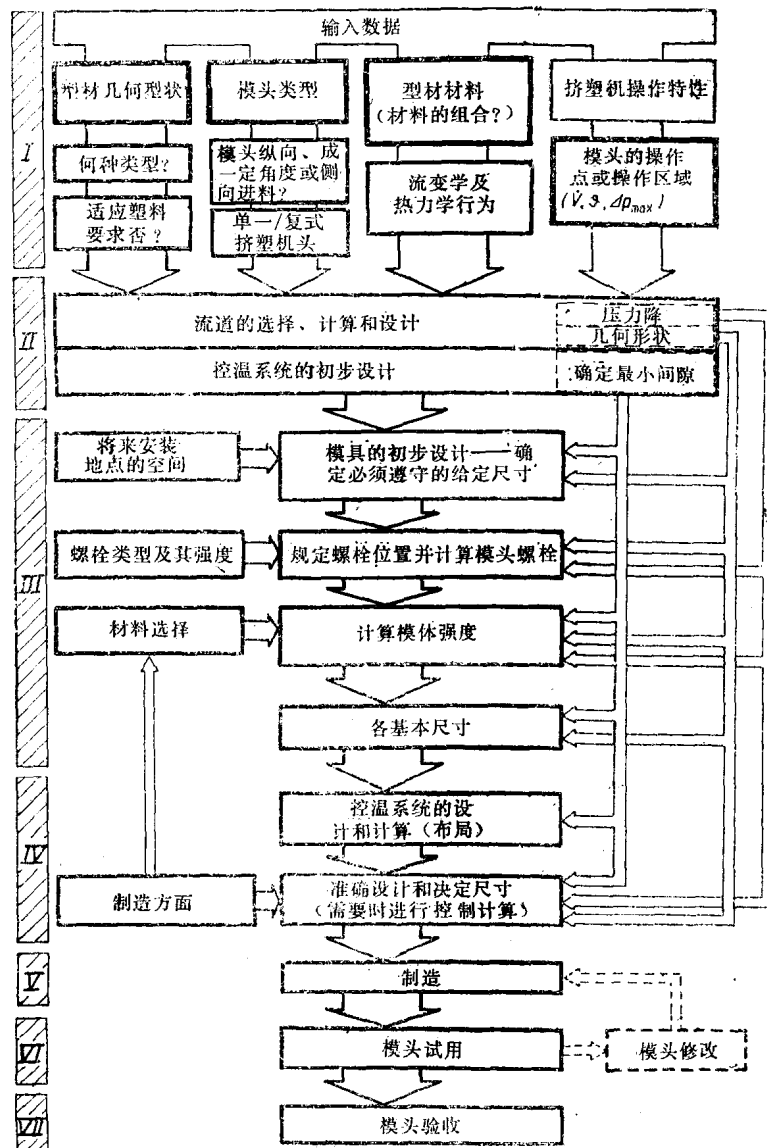


图 1-4 挤塑模头的设计

1. 要挤塑的半成品的几何形状（如管、平膜、任何型材）及其设计是否符合所加工的塑料材料的需要（见第5.5.1节）。

2. 模头进料方式以及是否同时制造几种半成品（图1-5）。

3. 要加工的材料或在共挤出情况下则是要加工的材料组合（见第六章）。

4. 挤塑模头的操作点（或操作范围）（操作点可理解为产量及模头中的温度水平）。

第Ⅰ步则是在第Ⅰ步提供的信息的基础上进行流道选型和设计以及计算压力降。此外，可以给出相对于流道的加热器的位置，应考虑间隙为最小（见第7.1.2节）。

第Ⅱ步，确定模头的基本尺寸。然而，考虑的步骤的次序可以改变。

在第Ⅳ步才进行模头的准确设计。如有需要，对于结构细节可进行控制计算。

制造（第Ⅴ步）之后，是用设计时选定的材料（材料组合）以及在针对日后操作条件（见第Ⅰ步）之下进行试模（第Ⅵ步）。这种情况下，一些修改也会是必要的。

如果结果满意，则模头可最终验收（第Ⅶ步）。

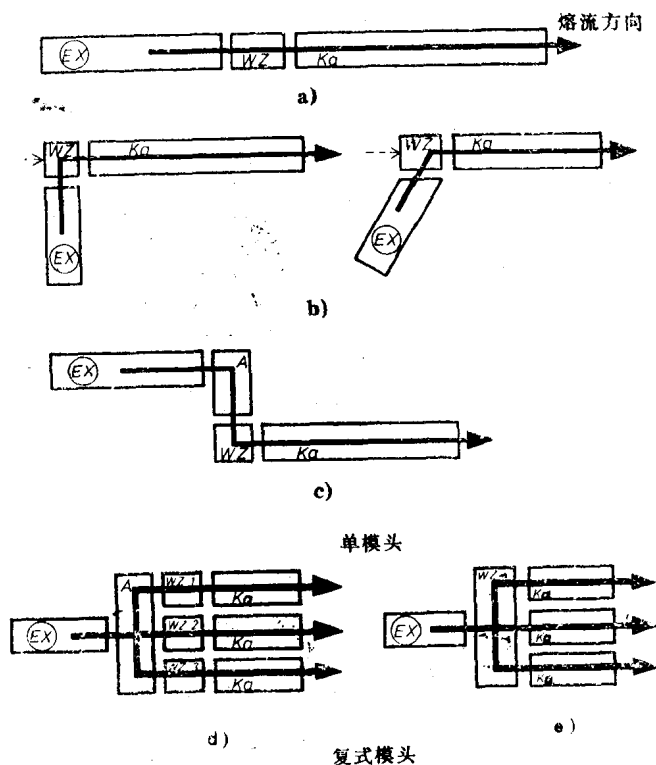


图 1-5 模头的类型

a) — 纵向进料；b) — 成一定角度进料；c) — 侧向进料模头；

d) — 用单模头；e) — 用若干模头

EX — 挤塑机；WZ — 挤塑模头；A — 模头接套；Ka — 定型

第二章 挤塑模头设计所需材料数据

如果要从理论上描述挤塑模头与成型的各种过程关系以便确切阐明此体系,则必须特别注意下述两点(1,3):

1. 物理模型中所作的简化和边界条件,必须总是根据所考察的问题进行严格的分析(参阅第4.5节)。

2. 模型中所用加工材料的材料数据占有关键性的地位。这些就是表征流动、形变和松弛过程以及传热的数据;这些数据都是材料的流变学和热力学数值。

2.1 材料流变学

为了表示热塑性材料熔体象液体一样粘滞,并且也象弹性固体或橡胶一样有弹性这一事实,在其流变行为上,热塑性材料熔体被认为是粘弹性的(4)。此外,这些性能表现出显著的时间依赖性(3,5)。所以,当从流变学表征它们时,材料数据分为描述纯粘性行为的部分和描述弹性行为的部分。

2.1.1 材料的粘性

2.1.1.1 剪切粘度——流变本构方程

如果模头中的压力损失 Δp 要作为体积流量 $\dot{V}$ 和现有流道几何形状的函数来计算,则需要流变本构方程(亦称之为状态方程),这种方程联系现有的应力条件与形变条件。表示此方程的最简单的单因次形式为:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} = f(\tau) \quad (2.1)$$

这里, $\dot{\gamma}$ 为剪切速率, v 为流速, y 为剪切方向, τ 为剪切应力。这种关系也可用流动函数或流动曲线来描述。

理想粘性流体的线性流动曲线也可用牛顿摩擦定律来描述:

$$\dot{\gamma} = \phi \tau \quad \text{及} \quad \phi = \frac{1}{\eta} \quad (2.2)$$

式中比例系数 ϕ 称为流度,而剪切粘度 η 代表被剪切材料对流动的内阻。

在聚合物的情况下,剪切速率与剪切应力 τ 之间的这种线性关系(也解释为牛顿流动行为),在某些场合,仅在非常低的剪切速率下有效(6),并且可能在非常高的剪切速率下再次重现(图2-1)。所以,习惯上称为剪切粘度函数 $\eta(\dot{\gamma})$ 的上限和下限牛顿区(下限牛顿区的粘度称为下限牛顿粘度或零切粘度 η_0)。

在设计挤塑模具时,通常不考虑热塑性塑料熔体的

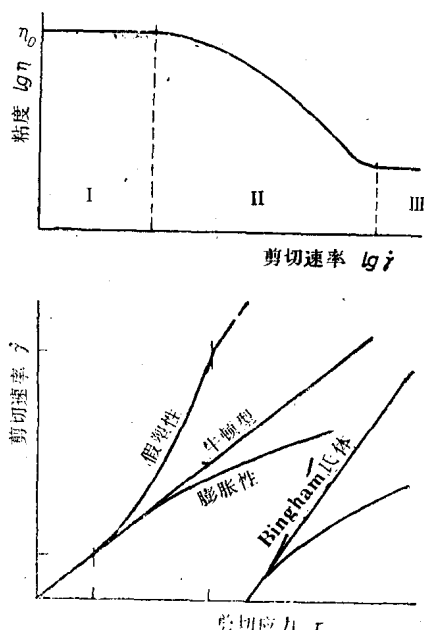


图 2-1 粘性材料的行为

— 牛顿型区(下限区); I — 假塑性区;
II — 牛顿型区(上限区)
 η_0 — 零态剪切粘度

剪切粘度对时间的依存性，而仅取稳态粘度值(7~9)。

正如图 2-1 所示，在流体中偏离牛顿流动行为极为常见。这表示流体具有所谓假塑性粘度、膨胀性或存在屈服应力 (Bingham 氏体) (3)。

塑料熔体通常表现假塑性行为(τ 的增长速率随 $\dot{\gamma}$ 的增大而递减地下降)而无屈服应力。对于描述经受中等程度剪切速率的塑料熔体，经验发现的所谓 Ostwald 和 de-Waele 幂定律(10,11)：

$$\dot{\gamma} = \phi \tau^m \quad (2.3)$$

经证明是有价值的(12)。此方程中，流动指数 m 表征材料的流动能力和偏离牛顿摩擦定律的程度。指数 m 用下式求得：

$$m = \frac{\Delta \lg \dot{\gamma}}{\Delta \lg \tau} = \frac{d \lg \dot{\gamma}}{d \lg \tau} \quad (2.4)$$

对于塑料熔体， m 值在 1 与 6 之间，并且在与挤塑模具设计有关的剪切速率范围大约 $10^2 \sim 10^4$ (10^4) s^{-1} 的情况下， m 值在 2 与 4 之间(4)。令 $m = 1$ ， $\phi = \frac{1}{\eta}$ ，即为牛顿摩擦定律 (方程 2.2)。

幂定律具有非常简单的数学形式，因而可用来分析处理几乎所有的用牛顿方程可求解的简单流动问题 (参阅第三章)。幂定律的缺点是当剪切速率趋于零时，粘度值变为无限大，并且流度的因次包括了流动指数 m [$\phi = |(\text{长度})^{2m} / (\text{力})^m \times (\text{时间})|$]。

如果要用幂定律来描述范围较宽的流动曲线，则可将曲线分为若干段，在这种情况下，必须测定每段的 ϕ 和 m 值(3,13,14) [参阅图 2-2 中 $m = f(\dot{\gamma})$ (26)]。

考虑了流动时分子的位置交换过程，Prandtl (15) 得出本构定律：

$$\dot{\gamma} = C \sinh \left(\frac{\tau}{A} \right) \quad (2.5)$$

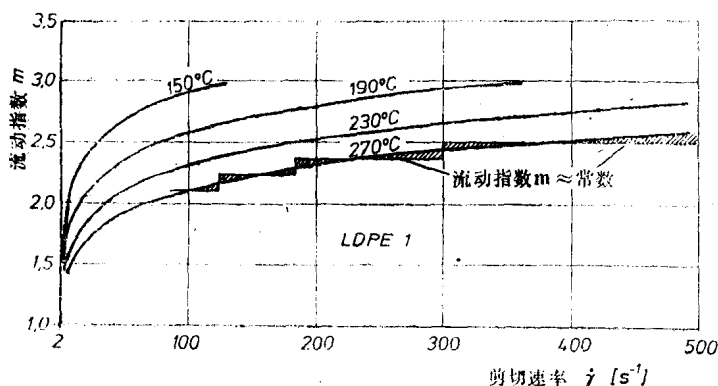


图 2-2 低密度聚乙烯的流动指数为剪切速率和温度的函数 (26)

nberg - Rabinowitsch 本构定律 (27)：

$$\dot{\gamma} = a\tau + c\tau^2 \quad (2.6)$$

正如方程 (2.5)，此关系式仅偶尔用于挤塑模具的设计。

如仅考虑一种基材 (例如聚苯乙烯或聚酯)，则熔体的流动行为决定于：剪切速率 $\dot{\gamma}$ 和剪切应力 τ 以及熔体温度 T 、熔体中的静液压力 p_{hydro} 、分子量及分子量分布，并且也决

Eyring(16) 提出了类似的模式。因此，方程 (2.5) 目前被称为 Prandtl-Eyring 本构定律。其优点在于能描述小剪切梯度时的有限的粘度 (趋近零切粘度)(3)，以及可在因次分析中易于应用 (15,16)。然而，由于其“繁复性”和需要用流变测定法分析地测定数值 C 和 A (12,17,18,85)，所以，其数学应用稍有困难。

将方程 (2.5) 作级数展开并取前两项，即得出 Weissen-

定于诸如填料、润滑剂等添加剂。对于被加工的一定的塑料（配方），仅 $\dot{\gamma}$ 或 τ 、 p_{hyd} 和 T 为自由变量。

图 2-3^[19] 提供了温度和压力对剪切粘度的影响的定量概念。在聚甲基丙烯酸甲酯的情况下，压力增至约 550 bar 致使粘度增大 10 倍。在这种情况下，若粘度保持不变，则温度必须提高约 23°C。

对塑料熔体流动的这种影响，本质上可归因于两个因素^[6,20,21]：

1. 热活化过程，此过程可归因于分子链中链段的活动性，亦即分子间的活动性。

2. 分子链之间存在足以进行分子链位置互换的大空间的可能性。

例如，由纯热活化过程导出的方程（Arrhenius 方程）：

$$\eta = \eta_{T_0} \exp(E/RT) \quad (2.7)$$

已证明对描述温度依存性的剪切粘度是有用的。然而，这仅能有成效地应用于 ΔT 约为 50 ~ 60 K 的温度范围内^[4,21,22]。

对于更窄的温度范围，有可能选用下述方程：

$$\eta = \eta_{T_0} \exp(-\alpha T) \quad (2.8)$$

此方程由方程 (2.7) 经线性化和变换得出。

为了描述松弛谱的温度依赖性并以后被转换为粘度，Williams, Landel 和 Ferry^[23] 以自由体积即位置交换的可能性为基础，提出了一种不同的途径。他们发现下列关系式（亦称 WLF 方程）：

$$\lg a_T = \lg \frac{\eta(T)}{\eta(T_s)} = \frac{C_1 (T - T_s)}{C_2 + (T - T_s)} \quad (2.9)$$

在恒定剪切应力条件下，此方程关联着所需温度 T 时的粘度 $\eta(T)$ 和标准温度 T_s 下的粘度。令 $T_s = T_g + 50^\circ\text{C}$ ^[23,27]，其中 T_g 为软化（玻璃转变）温度（参阅图 2-11），则 $C_1 = +8.86$ 和 $C_2 = 101.6$ 。

某些作者^[21,24] 已证明，与活化过程相比，自由体积的变化明显对流动行为有较大的影响，因而 WLF 方程仍能一般适用，甚至为了考虑活化过程，有时要加上一附加因子^[24] 时也是如此。

为了描述压力对粘度的影响，文献^[21] 中列举了下列方程：

$$\eta = \eta_{P_0} \exp(\beta p_{hyd}) \quad (2.10)$$

然而，系数 β 有轻微的温度依赖性^[25]，因而，此函数仅能适用于比较狭窄的温度范围。

WLF 方程能很容易地考虑压力对粘度的影响，如第 2.1.1.3 节所详述，令标准温度 T_s 等于 $T_s(P_{hyd})$ ：

$$T_s(P_{hyd}) = T_s(P_0 = 1 \text{ 巴}) + \xi P_{hyd} \quad (2.19)$$

2.1.1.2 测定方法

为了测定粘度函数 $\eta(\dot{\gamma}, T)$ 以及方程 (2.2) ~ (2.9) 的函数关系，在与设计挤塑模头有关的剪切速率 $10^0 \leq \dot{\gamma} \leq 10^3 (10^4) \text{ s}^{-1}$ 范围内，采用管型、缝口型或环型毛细管的毛细管流变仪^[8,13]。此方法中，在恒定的整体温度 T 下，将熔体以一定的体积流量 $\dot{V}$ 强制通过具有

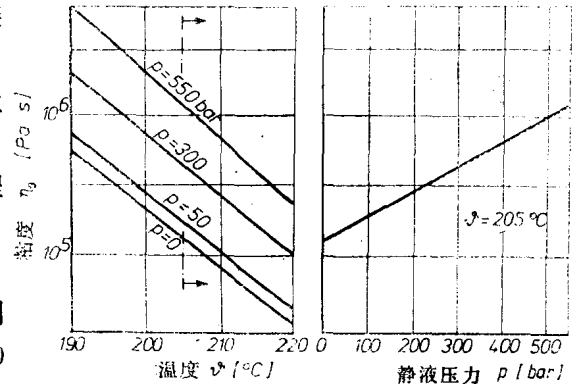


图 2-3 粘度为温度和静液压力的函数^[19]

材料——聚甲基丙烯酸甲酯

精确规定几何形状的毛细管,并测定产生的压力损失 Δp (图2-4)。在常用的计算方法中,第一步首先假设为牛顿流动行为,因而求得所研究的假塑性材料的表观量(表观剪切速率 $\dot{\gamma}^*$ 和表观粘度 η^*);然后采用繁复的所谓Rabinowitsch校正将这些表观量换算为真实量 $\dot{\gamma}$ 和 τ ^[27]。

Chmiel, Schümmer 和Worthoff^[28, 40]提出了一种简单化的计算方法^[33, 5]并经Worrtberg进行了讨论^[4]。这种方法考虑的出发点是,存在于流变仪流道或挤塑模头中的层状等温流动中(参阅第3.2节)(假定熔体粘附于壁上并忽略弹性影响),如果体积流量 $\dot{V}$ 相同,则在流道中有一部位,其牛顿流体和假塑性流体的剪切速率相同。如果能求得此处的牛顿流体的剪切应力和剪切速率,则可求得存在于该处的“特征”(representative)剪切速率或剪切应力的真实粘度(图2-5)。交点位置亦即管中的特征半径原则上取决于材料的流动行为^[29];然而,对于塑料熔体,可假定为常数而无显著的精度损失。文献[28]中列举了圆管中离流道中心的这些特征距离 e 为:

$$e_p = \frac{r_s}{R} = \frac{\pi}{4} \quad \text{并且, 对于平缝口, 则 } e_r = h_s / \frac{H}{2} = \frac{\pi \sqrt{1.5}}{6} \approx 0.64$$

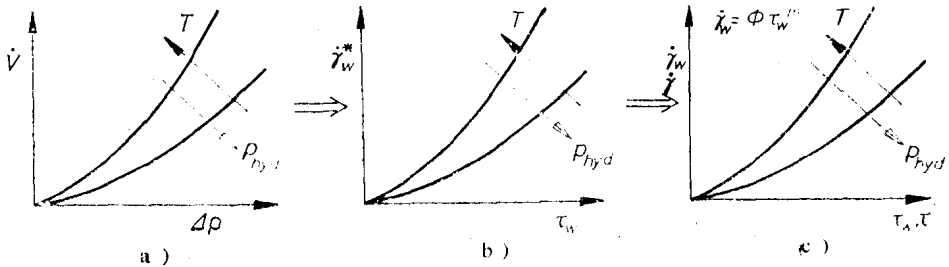


图 2-4 确定缝口型毛细管流变仪的流动定律 $\dot{\gamma} = \phi \cdot \tau^m$ ($\dot{\gamma}_w = \phi \cdot \tau_w^m$)的步骤

a—测试曲线,挤出体积 $\dot{V}$ 为沿流道长度 l 的压力降 Δp 的函数, $\dot{V}$ 和 Δp 为用缝口型毛细管流变仪(流道缝口高度 H ,流道宽度 B)测定的因次;b—表观流动曲线,表观剪切速率 $\dot{\gamma}_w^*$ 为壁上剪切应力 τ_w 的函数, $\dot{\gamma}_w^* = \frac{6\dot{V}}{BH^2}$, $\tau_w = \frac{\Delta p \cdot H}{2L}$;

c—真实流动曲线,剪切速率 $\dot{\gamma}_w$ 为壁上剪切应力 τ_w 的函数,Rabinowitsch校正: $\dot{\gamma}_w = \frac{2}{3} \dot{\gamma}_w^* + \frac{1}{3} \tau_w^m$, $m = \frac{\partial \dot{\gamma}_w^*}{\partial \tau_w}$

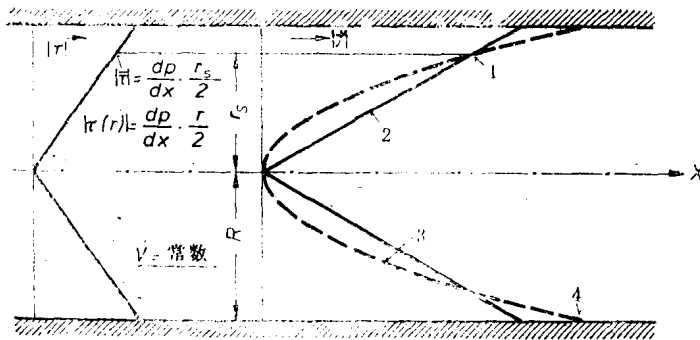


图 2-5 由毛细管流变仪(管)中的“特征”剪切速率和剪切应力测定粘度^[4]

$$1-\dot{\gamma} = \frac{4\dot{V}}{R^4\pi} r_s; 2-\dot{\gamma}_{\text{牛顿}}(r) = \frac{4\dot{V}}{R^4\pi} r; 3-\dot{\gamma}(r) \text{ 非牛顿}$$

4— $\dot{\gamma}_{\text{牛顿}} < \dot{\gamma}_{\text{非牛顿}}$; $r_s \approx R \cdot e_p$ —毛细管中的特征半径; $\dot{\gamma}$ —特征剪切速率; $\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma}$ —特征剪切应力
如果Ostwald-de Waele幂方程(图2-6)适用,文献[29]中列出了特征中心距。

正如Worrtberg^[4]指出,对具有实际意义的流动指数值范围—— $2 \leq m \leq 4$ 而言,如果设定存在恒定的特征中心距 $\bar{e}_p$ 及 $\bar{e}_r$,则显然可以预计误差非常之小(对于管状流,误差 $< 1.8\%$;