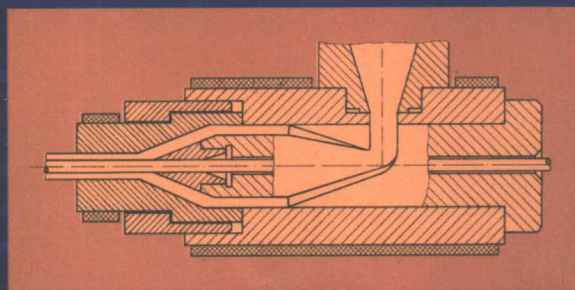


第 二 版



塑料橡胶 挤出模头设计

德IW 迈切里 李吉 王淑香 译 吴百敏 方鸣钲 校

Extrusion Dies FOR PLASTICS AND RUBBER

2nd edition



中国轻工业出版社

第二版

塑料橡胶挤出模头设计

Extrusion Dies For Plastics and Rubber

中国轻工业出版社

4-2

TX 115
J=2

塑料橡胶挤出模头设计

(第2版)

[德]W.迈切里

李吉 王淑香 译

吴百敏 方鸣钰 校

 中国轻工业出版社

图书在版编目(CIP)数据

塑料橡胶挤出模头设计/[德]W.迈切里;李吉,王淑香译.—2版
—北京:中国轻工业出版社,2000.5

ISBN 7-5019-2771-5

I.塑... II.①迈...②李...③王... III.①塑料^{成型}—挤出机—模具—
基本知识②橡胶机械—挤出机—模具—基本知识 IV.①TQ320.5
②TQ330.4

中国版本图书馆CIP数据核字(1999)第57420号

Walter Michaeli

Extrusion Dies for Plastics and Rubber

Copyright ©1992

Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

All Rights reserved.

Authorized translation from the original German language edition

Published by Carl Hanser Verlag, Munich/FRG

责任编辑:赵红玉 责任终审:滕炎福 封面设计:张歌明
版式设计:赵益东 责任校对:方敏 责任监印:胡兵

*

出版发行:中国轻工业出版社 (北京东长安街6号,邮编:100740)

网 址: <http://www.chlip.com.cn>

印 刷:中国人民警官大学印刷厂印刷

经 销:各地新华书店

版 次:2000年5月第2版 2000年5月第1次印刷

开 本:787×1092 1/16 印张:14.75

字 数:346千字 印数:1—4000

书 号:ISBN 7-5019-2771-5/TQ·201 定价:46.00元

著作权合同登记 图字:01-1999-3046

• 如发现图书残缺请直接与我社发行部联系调换 •

译者序言

挤出成型是最主要的塑料成型方法之一,而在挤出成型中,模头设计又是整个挤出生产线设计的关键所在。

我国塑料机械发展40年来,对于挤出设计理论掌握的还不够全面和深入,使好多挤出设备主动设计含量偏低。为了提高我国对高聚物挤出应用理论的研究和应用水平,提高挤出设备的设计和生产水平,我们翻译了WALTER MICHAELI原著的《塑料橡胶挤出模头设计》(Extrusion Dies for Plastics and Rubber Design and Engineering Computation.按字面,书名应译为“塑料橡胶挤出模头的设计和工程计算”,但为了使国内读者更直观地了解本书和更快捷地传递信息,故特将书名意译为“塑料橡胶挤出模头设计”。)一书,该书从应用的角度出发,囊括了聚合物熔体——非牛顿流体的流变理论;挤出模头中熔体的速度和温度分布以及应用篇——热塑性塑料的单挤模头和共挤模头;各种模头的设计、加热、维护保养以及各种制品的定型和优化设计的数字模型建立等内容。该书深入浅出,系统全面,不失为迄今为止塑料挤出模头设计方面的一本好书,尤其适用于塑料机械设计专业和塑料加工专业的工程师们学习和参考之用,也可作为高等院校的专业技术教材。

该书能与广大读者见面,应非常感谢大连冰山橡塑股份有限公司的鼎力支持。

原书中有几处印刷错误,由译者修正。

该书由大连塑料机械研究所牵头,委托有关人员翻译,除封面署名者以外,大连塑料机械研究所的蔡静、盖作有、苏国芝、李振军、梁兴忠等同志参加了校阅工作。

限于专业及语言水平有限,译述不当之处恳请批评指正。

译者

1999年9月 大连

一 版 前 言

本书旨在为从业者及学生提供广泛的关于塑料挤出模头的知识,为达到这一目的,本书讨论了各种模头及其特点,给出了它们的设计原则,并介绍了工程计算的基本方法以及它们的适用范围。考虑到近期工程界和学术界为建立挤出模头中的传输现象(流动和热传递)的数学模型所做的努力不断增加,这些内容显得尤其重要。这些重要的研究项目主要是为了满足对生产效率和挤出半成品质量(尺寸精度和表面精度)的高要求,出于经济上的考虑,用纯经验的方法来设计挤出模头正越来越难以接受。

流道设计是挤出机模头设计的关键,本书将首先以流道设计所需材料数据的确定和分析开始。

基本方程是基于对流道中压力损失、流道壁压力、速度分布、平均速度等参数的估算而导出的,这些简单公式列于表中,可用于实际设计中。对于多数挤出模头,这些公式的设计结果与基于流变学的精确设计结果接近。

由于有限差分 and 有限元法在挤出模头设计中越来越重要,本书还对用有限差分和有限元法计算速度和温度场的入门进行了讨论。

在第5章和第6章中,在对模头的热学设计、机械设计以及模头材料选择和制造的有关知识进行了回顾之后,重点介绍了各种单层和多层挤出模头及其特点。书中还介绍了挤出模头及管和型材定型装置的使用、清理和保养。

本书是我在担任西德Aachen技术大学塑料加工学院挤塑注塑部主管期间所写的,我曾接触过该院挤出模头工程领域的所有重要研究成果。在此向该院我过去和现在的同事,尤其向J.Wortberg、A.Dierkes、U.Masberg、B.Franzkoch、H.Bangert、L.Schmidt、W.Predoehl、P.B.Junk、H.cordes、R.Schulze-kadelbach、P.Geisbuesch、P.Thienel、E.Haberstroh、G.Wuebken、U.Thebing、K.Beiss和U.Vogt先生表示感谢。他们的研究工作对书稿的准备是非常重要的,同时还感谢所有其他有贡献的同事和学生,但最先要感谢的是G.Menges教授,是他鼓励我写这本书,并一直不停地给我帮助和支持,使我最终能够完成本书的撰写工作。

此外还要感谢一些塑料工业的代表们,本书中所参考的许多塑料加工学院的研究和开发项目能够完成离不开工业部门的合作。

本书在西德1979年首次出版,现在的这个版本是在1979年版的基础上作修订后翻译成英文的第一版。我们增加了字母索引,检查了参考文献表以确保重要的英文参考文献易于识别。

最后对所有为本书英文版的出版作出过贡献的人表示感谢。

Walter Michaeli

1983年8月于西德

再 版 前 言

本书第一版出版已10年,根据挤出模头设计和制造领域的新发展和应用对原版进行修订再版是必要的,这就是再版的目的。尽管关于挤出模头的基本原理没有变化,但随着对生产效率和产品质量要求的日益提高,以及新聚合物和新产品的出现,该领域内已有了许多发展和更新。例如,共挤出近期已显示出明显的重要性,以液晶为基础的聚合物代表了一类全新的材料,这无疑需要在挤出模头设计中引入新的概念,这意味着发展将会继续下去。在本书的第二版概括了当前的技术状态,重点强调理论工具,如有限元法,该方法在过去的十年中获得了很大的发展,可用来求解许多实际问题。

同本书第一版前言中所述一样,本书的根本目标是,为从业者日常工作提供帮助,将学生引入挤出模头这一复杂的领域,为他们提供一个宽阔的方向和系统的教育,这一点在任何情况下都不会改变。虽然本书第一版获得了良好的反映,然而和任何其它事物一样,它也可以进一步改进,这就是本书再版的目的。本书第二版增加了弹性体挤出的模头设计章节,共挤出模头有关内容有较大的扩充,其他章节也有较大的修改。

这里的“我们”,我指的是我在塑料加工学院的合作者,他们参与了本书的工作,奉献了许多业余时间,在此向他们表示特别的感谢。

在本书内出现的结果中,许多是该院的学生在学习和做毕业论文过程中所获得的,他们同样值得真诚的感谢。

在书的第二版还吸收了一些来自塑料和橡胶工业界的建议,因此还要感谢那些曾提出建议和提供帮助的人。

Walter Michaeli

1991年11月于德国

目 录

第1章 绪论	(1)
参考文献	(4)
第2章 聚合物熔体的性质	(5)
2.1 流变性能	(5)
2.1.1 熔体的粘性	(5)
2.1.1.1 粘度与流动函数	(5)
2.1.1.2 熔体假塑性特性的数学描述	(6)
2.1.1.3 温度和压力对流动特性的影响	(10)
2.1.2 粘性流动特性的确定	(13)
2.1.3 熔体的粘弹性	(17)
2.2 热力学性质	(20)
2.2.1 密度	(20)
2.2.2 热导率	(21)
2.2.3 比热容	(22)
2.2.4 热扩散系数	(22)
2.2.5 比焓	(22)
参考文献	(24)
第3章 简单流动的基本方程	(27)
3.1 管道中的流动	(27)
3.2 缝隙流动	(30)
3.3 环形缝隙流动	(32)
3.4 模头设计基本方程小结	(34)
3.5 壁上滑流现象	(39)
3.5.1 壁上滑流的相关模型	(39)
3.5.2 流动函数的不稳定性——熔体破裂	(41)
参考文献	(42)
第4章 挤出模头中速度和温度分布的计算	(45)
4.1 守恒方程	(45)
4.1.1 连续方程	(45)
4.1.2 动量方程	(46)
4.1.3 能量方程	(47)
4.2 限制假设与边界条件	(49)
4.3 守恒方程的解析解	(50)
4.4 守恒方程的数值解	(54)
4.4.1 有限差分法(FDM)	(54)

4.4.2 有限元法(FEM)·····	(56)
4.4.3 有限差分法与有限元法的比较·····	(58)
4.4.4 有限差分法应用举例·····	(60)
4.4.5 有限元法应用举例·····	(64)
4.5 材料粘弹性行为分析·····	(66)
4.6 挤出物膨胀的计算·····	(68)
参考文献·····	(72)
第5章 热塑性材料的单挤出模头 ·····	(74)
5.1 圆形模头·····	(74)
5.1.1 设计与应用·····	(74)
5.1.2 设计·····	(77)
5.2 缝隙模头·····	(80)
5.2.1 设计与应用·····	(80)
5.2.2 设计·····	(84)
5.2.2.1 鱼尾形熔体分配器·····	(85)
5.2.2.2 衣架形熔体分配器·····	(86)
5.2.2.3 数值计算程序·····	(92)
5.2.2.4 蛤壳现象分析·····	(93)
5.2.2.5 非常规熔体分配器·····	(94)
5.2.2.6 宽缝模头的工作特性·····	(95)
5.3 环形模头·····	(97)
5.3.1 类型·····	(97)
5.3.1.1 中心进料模芯支撑模头·····	(97)
5.3.1.2 过滤器(过滤网组合件)模头·····	(99)
5.3.1.3 侧进料模芯模头·····	(100)
5.3.1.4 螺旋形模芯模头·····	(100)
5.3.2 应用·····	(101)
5.3.2.1 管材模头·····	(101)
5.3.2.2 吹塑薄膜模头·····	(102)
5.3.2.3 型坯吹塑模头·····	(102)
5.3.2.4 包覆模头·····	(106)
5.3.3 设计·····	(108)
5.3.3.1 中心进料模芯支撑模头和过滤器模头·····	(108)
5.3.3.2 侧进料模芯模头·····	(110)
5.3.3.3 螺旋模芯模头·····	(112)
5.3.3.4 包覆模头·····	(114)
5.4 除管形和缝隙流道外的其它流道内压力损失的计算公式·····	(116)
5.5 不规则几何形状模头(型材模头)·····	(119)
5.5.1 设计与应用·····	(119)
5.5.2 设计·····	(125)

5.6 发泡半成品模头	(129)
5.6.1 发泡薄膜模头	(130)
5.6.2 发泡型材模头	(130)
5.7 特殊模头	(131)
5.7.1 任意横截面型材的包覆模头	(131)
5.7.2 带增强嵌件的型材模头	(132)
5.7.3 挤网模头	(132)
5.7.4 用于厚片生产的螺杆驱动缝隙模头	(133)
参考文献	(134)
第6章 热塑性材料共挤出模头	(140)
6.1 设计	(140)
6.1.1 外汇合共挤出模头	(140)
6.1.2 接套模头	(141)
6.1.3 多熔体分配器模头	(143)
6.2 应用	(143)
6.2.1 薄膜和片材模头	(143)
6.2.2 吹塑薄膜模头	(143)
6.2.3 型坯吹塑模头	(144)
6.3 流动计算与设计	(144)
6.3.1 恒粘度普通多层流动的计算	(146)
6.3.2 用直接差分法计算共挤出流动	(148)
6.3.3 用有限差分法计算速度场和温度场	(150)
6.3.4 用有限元法计算共挤出流动的速度场	(152)
6.4 多层流的不稳定性	(153)
参考文献	(156)
第7章 弹性体挤出模头	(158)
7.1 弹性体挤出模头的设计	(158)
7.2 弹性体挤出模头设计基础	(159)
7.2.1 材料热力学数据	(159)
7.2.2 材料的流变数据	(159)
7.2.3 粘性压力损失的计算	(161)
7.2.3.1 等温计算公式	(161)
7.2.3.2 非等温计算入门	(162)
7.2.4 峰值温度估计	(163)
7.2.5 材料弹性分析	(163)
7.3 弹性体分配器模头设计	(163)
7.4 弹性体挤出模头的口模设计	(164)
7.4.1 压力损失的计算	(164)
7.4.2 挤出物膨胀	(166)
7.4.3 口模盘设计的简化方法	(168)

参考文献	(171)
第8章 挤出模头的加热	(174)
8.1 分类与应用	(174)
8.1.1 用流体加热的模头	(174)
8.1.2 电加热挤出模头	(175)
8.1.3 挤出模头的温度控制	(175)
8.2 热学设计	(176)
8.2.1 热学设计的标准与约束	(176)
8.2.2 挤出模头的热平衡	(177)
8.2.3 模型建立的限定条件	(180)
8.2.4 热学设计的模拟方法	(180)
参考文献	(185)
第9章 挤出模头的机械设计	(187)
9.1 分流板的机械设计	(187)
9.2 轴对称流道模头的机械设计	(190)
9.3 缝隙模头的机械设计	(194)
9.4 设计总则	(196)
9.5 挤出模头材料	(197)
参考文献	(200)
第10章 挤出模头的操作、清洗与保养	(202)
参考文献	(203)
第11章 管材和型材的定型	(204)
11.1 类型与应用	(205)
11.1.1 摩擦定型	(205)
11.1.2 用压缩空气外定型	(205)
11.1.3 真空外定型	(206)
11.1.4 内定型	(208)
11.1.5 精密挤出拉伸成型(技术成型)	(209)
11.1.6 带移动定型套的特殊工艺	(209)
11.2 定型装置的热学设计	(210)
11.2.1 分析计算模型	(210)
11.2.2 数值计算模型	(212)
11.2.3 模拟模型	(216)
11.2.4 热边界条件和材料数据	(217)
11.3 冷却对挤出物质量的影响	(217)
11.4 定型装置的机械设计	(218)
11.5 冷却模、实心棒料的生产过程	(218)
参考文献	(220)

第1章 绪 论

在将热塑性材料挤出成半成品的过程中,有两个装置占主导地位,一是挤出模头,又称挤出机头,其作用是使熔体成型;二是定型装置,通常安装在靠近挤塑模头的位置,其作用是引导熔融的半成品,使之保持所要求的尺寸,并提供特定的冷却温度(图1.1和图1.2)。

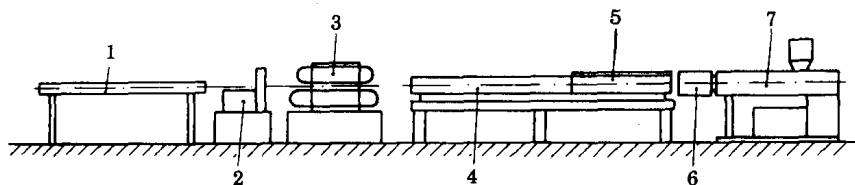


图 1.1 型材挤塑生产线

- 1—翻卸溜槽(储料) 2—切断机 3—引出装置
4—冷却段 5—定型 6—模头 7—挤出机

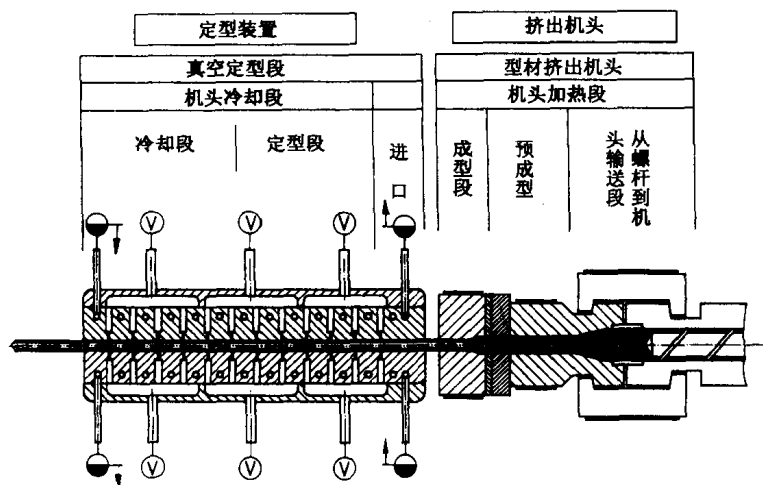


图 1.2 模头及定型装置剖面图

相对而言,当挤出弹体材料时,产品的尺寸基本上是由挤出模头的几何尺寸决定的。只有当挤出后进行硫化时才产生几何尺寸的变化,这主要是由材料的交联所引起的,尤其是当允许挤出物自由收缩时。

一方面,人们希望从挤出机得到的是足够大的、无脉动的、可再生的、热学及机械性能均匀的熔体流;另一方面,半成品的尺寸不取决于挤出模头和定型装置,这就必须考虑模头和定型装置中的流变和热力学过程以及在二者中或二者之间可能出现的拉伸过程对挤出的半成品质量(即表面质量、机械性能)的决定性作用。为了设计出从使用的角度来看是合理的挤出模头的定型装置,有必要考虑在生产线的这两部分中熔体的流动、变形及温度的关系。如果对加工的物理过程进行分析,由于模头流道几何尺寸的变化,操作条件的变化或被加工聚合物热力学及流变值的变化,可以直接与被挤出半成品的成型和冷却过程建立联系,因此可以减少经验设计在模头及定型装置设计中的比例,使设计结果更加可靠。

本书将全面介绍挤出模头和定型装置设计的工程方法,重点介绍挤出模头,得出了一些设计原则,并给出了简单适用的相关数学知识,进而还考虑到不同挤塑模头和定型装置的设计特点,特别指出了用于弹性材料和热塑性材料挤出模头之间的区别。

在挤出模头和定型装置的设计中需要从流变、热力学,制造及操作不同角度进行考虑。例如,从操作方面看,要使挤出模头具有足够的刚度以使由熔体压力引起的出口横截面的变形最小;使模头和定型装置装卸方便,模头易于清理。此外模头密封良好,挤出机与模头之间既配合紧密又可分离也是很重要的。在制造方面必须使模头和定型装置部件获得最低加工成本,就是要采用易于加工、抛光和热处理的材料,并适于现有的制造方法。

当考虑流变问题时,一定会遇到这样的问题,如何选择模头中流道的尺寸,以便能使:

- 以给定的挤出压力实现所要求的生产能力(反之也一样)。
- 熔体在整个出口断面上获得相同的平均速率。
- 对于非轴对称的半成品获得所要求的挤出物几何尺寸。
- 即使在高速生产条件下挤出物表面或不同熔体层的结合面也能保持平滑。
- 挤出物料的滞留与降解现象可以避免。

热力学方面的问题与流变问题有着密切的关系,考虑这一方面必须根据热传导和扩散关系获得模头内熔流最高温度信息,这对于热敏性聚合物尤其重要。这方面的问题还包括使模头和定型装置中的温度实现一致和可以控制。

通常在挤出模头和定型装置设计中,前面提到的那些问题并非都能成功地实现,因此必须确定优先原则,例如,当设计造粒机模头时应优先考虑获得尽可能高的生产能力,而在线材包覆设计中应以表面质量优先。

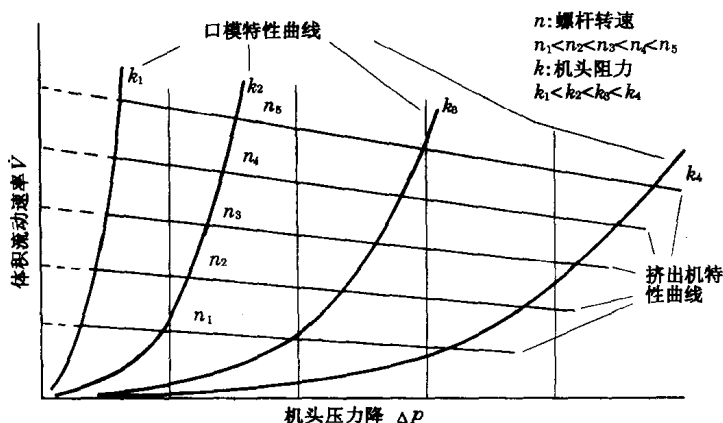


图 1.3 常规挤出机性能图

下,挤出生产线的生产能力并不是由所选定的挤出机或模头来控制的,而是受定型和冷却阶段的冷却速度的限制)此外,在绝热条件下,由熔体内摩擦所引起的模头温度的升高也与压力降有关,二者关系由下式确定:

$$\Delta T = \frac{\Delta p}{\rho c_p}$$

式中 ΔT ——温差
 Δp ——压力降
 ρ ——密度

然而,在做上述考虑时必须注意这样一个事实,即挤出机和模头的性能是相互影响的,特别在使用传统的单螺杆挤出机时情况更是这样。由图1.3可见,螺杆速度恒定时,模头阻力增大将导致生产能力的明显下降。因而挤出模头中的压力降在模头体和紧固螺栓的机械设计中是非常重要的。(许多情况

c_p ——比热容

所以就挤出模头设计来说,压力降是最重要的。

在挤出模头设计中必须考虑的上面所述的几个方面列于框图1.4中,设计中需输入的数据(图1.4中的第一步)有:

——半成品的几何尺寸及是否还要与所加工的聚合物的要求一致;

——进料方式及是否要同时加工几种半成品;

——被加工材料或在共挤出中的材料组合;

——挤出模头的工作点(指模头的生产能力和温度参数等)或工作区。

接下来的第二步是选择和设计流道以及利用第一步中所提供的信息计算压力降,进而确定加热器相对流道的位置。

在第三步中确定模头的基本尺寸,但各步顺序是可以改变的。

精确的计算在第四步进行,必要时可以采用控制计算方法。

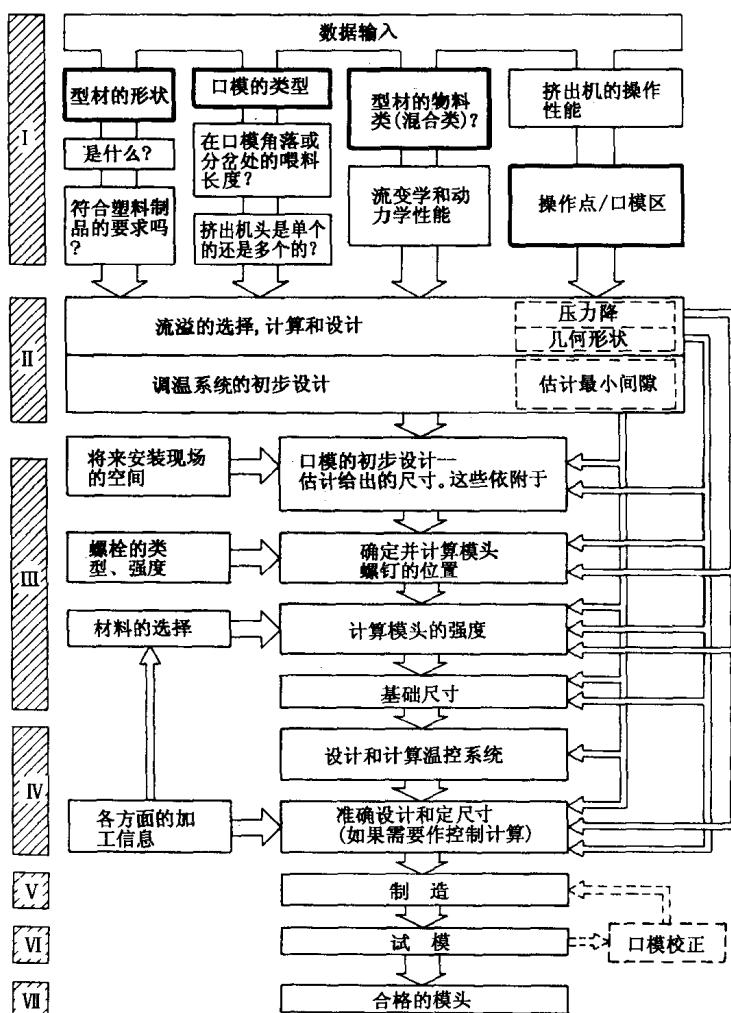


图 1.4 挤出模头从设计到验收流程图

制造(第五步)完成后,在正常工作条件下对模头的材料是否符合设计要求进行试运行(第六步),以便为今后的使用做准备,此时可对模头进行几次必要的调整。

如果结果令人满意,可进行最后验收(第七步)。

符号与缩写

T ——温度

ΔT ——温差

p ——压力

Δp ——压力差

c_p ——比热容

ρ ——密度

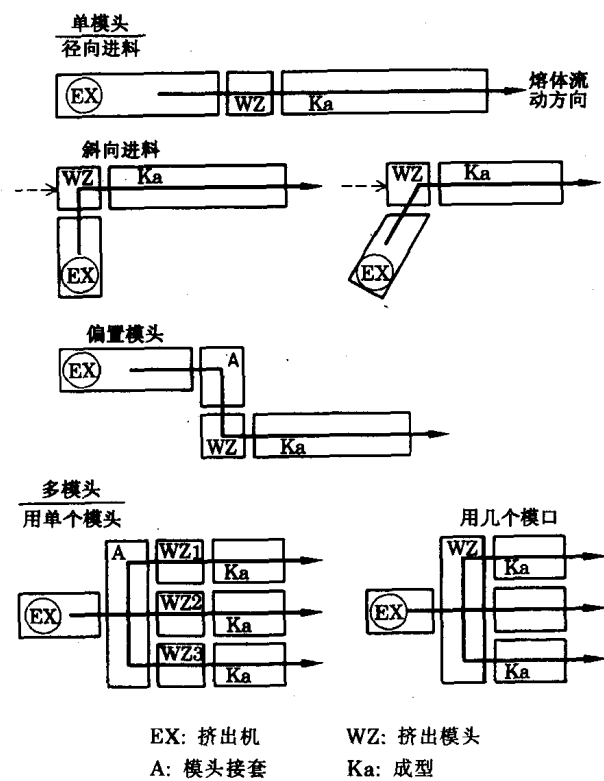


图 1.5 挤出模头类型

参考文献

- [1] Röthemeyer, F.: Bemessung von Extrusionswerkzeugen. Maschinenmarkt 76 (1970) 32, pp.679-685

第2章 聚合物熔体的性质

当我们为了获得可靠的设计而对挤出模头和定型装置进行理论研究时, 有两点需要特别考虑:

——对于物理模型的简化及边界条件的建立必须针对具体问题进行分析。

——被加工材料和有关模型数据是至关重要的, 这些数据决定着流动、变形、张弛及热传导等方面的性能, 又称流变和热力学数据。

2.1 流变性能

普通的流动完全可以用质量守恒、动量守恒、能量守恒定律以及流变和热力学方程来描述, 流变方程描述速度场与其相应的应力场之间的关系, 又称为材料定律, 该方程包含了给定材料的全部流动性能, 流动性能的描述, 解释和测定构成了流变学——关于变形与流动的科学的核心。

本章将介绍挤出模头设计所需的流变学知识。聚合物熔体不是纯粹的粘性液体, 也不是纯弹性体, 其性能介于理想的液体与理论的弹性体之间, 因此被称为粘弹性材料。在描述流变材料性能时, 要注意区分纯粘性和具有时间依赖的弹性能。

2.1.1 熔体的粘性

在挤出模头内的流动过程中, 熔体呈剪切变形, 这种剪切流是由于熔体与模头壁之间的附着作用引起的, 被称为斯托克粘力, 其作用的结果是引起流道横断面流速的变化, 该变化由下述方程来描述:

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

式中 v ——流速

y ——剪切方向

稳态流动时剪力发生在两层流体之间任一点, 对于最简单的牛顿流, 剪力与剪切速率成正比;

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (2.2)$$

比例系数 η 称动态剪切粘度或简称粘度, 其量纲是Pa·s, 粘度是在剪切流动状态下流体内阻的度量。

一般来说, 聚合物熔体不具备牛顿流的性质, 其粘度不是常量, 而是取决于剪切速率, 参照式(2.2)可将其表示为:

$$\tau = \eta(\dot{\gamma}) \cdot \dot{\gamma} \quad (2.3)$$

$$\text{或} \quad \eta(\dot{\gamma}) = \tau / \dot{\gamma} \neq \text{常数} \quad (2.4)$$

注: 许多聚合物的粘度或多或少有一定的时间依赖性, 在模头设计中一般不考虑这种时间依赖性, 因此在下面各章节中将忽略这一问题。

2.1.1.1 粘度与流动函数

在对数坐标系中绘制聚合物粘度 η 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 的关系图形时, 可得图2.1所示的曲线。由

图可见,当剪切速率降低时,粘度保持常量,但当剪切速率增大到某一值时,粘度在较度的剪切速率范围内呈线性变化。这种随着剪切速率的增大粘度减小的现象称假塑性行为,而在低剪切速率下保持常量的粘度称零剪切粘度 η_0 。

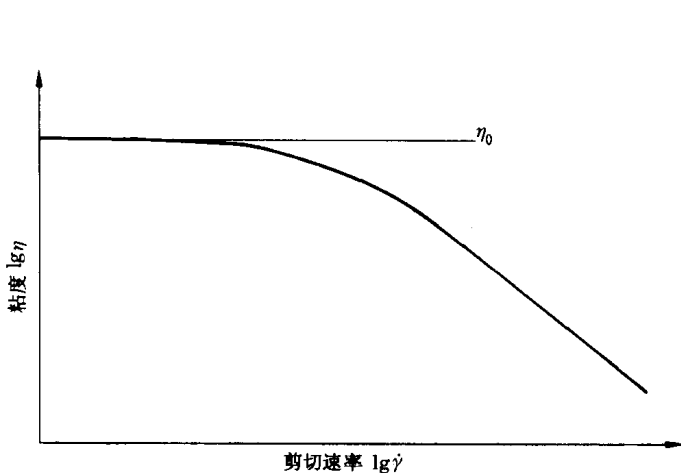


图 2.1 粘度与剪切速率的关系
(粘度曲线)

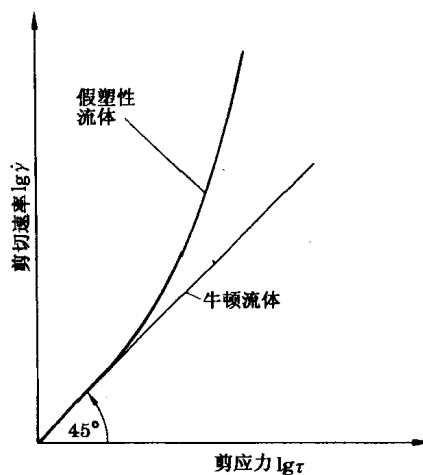


图 2.2 剪切速度与剪应力的关系
(流动曲线)

除了用图形表示粘度与剪切速率的关系,即所谓的粘度曲线之外,剪应力与剪切速率的关系(同样在对数坐标系中),被称为流动曲线(图2.2),对于牛顿流体,剪切速率正比于剪应力,因而其对数坐标曲线为一斜率为1的直线,这意味着横坐标与流动曲线的夹角为45°,偏离该直线说明具有非牛顿流体性质。

对于假塑性流体其流动曲线的斜率大于1,说明剪切速率的增长快于剪应力的增长,反过来说,剪应力的增大慢于剪切速率的增长(另见第3章)。

2.1.1.2 熔体假塑性特性的数学描述

有各种各样的描述粘度和流动曲线的数学模型,它们所用的数学方法和适用范围以及精度各有不同。文献^{[2][5]}给出了总体介绍和应用举例。最常用的热塑性模型和弹性体模型将在后续章节中讨论。

奥斯瓦尔德(Oswald和dewale)幂律

在对数坐标系中画不同聚合物的流动曲线图时,所得曲线由两段近似的直线和一个过渡段构成(图2.3),在许多情况下工作区为两段直线之一,所以可将两段用统一的数学形式表示为:

$$\dot{\gamma} = \phi \cdot \tau^m \quad (2.5)$$

方程(2.5)称为奥斯瓦尔德幂律。参数 m 为流动指数, ϕ 为流度。材料流动能力和偏离牛顿流体的特性由流动指数 m 表示,并由下式确定:

$$m = \frac{\Delta \lg \dot{\gamma}}{\Delta \lg \tau} \quad (2.6)$$

m 还代表对数坐标中流动曲线特定区段的斜率(图2.3)。

对于聚合物熔体, m 值在1到6之间,对于挤出模头设计中常用的剪切速率在 10^0 至 10^4 s^{-1} 的区段,相应的 m 值为2到4,当 $m=1$ 、 $\phi=1/\eta$ 时就得到牛顿流体。

因

$$\eta = \tau / \dot{\gamma}$$

由式(2.5)可得:

$$\eta = \phi^{-1} \cdot \tau^{1-m} = \phi^{-\frac{1}{m}} \cdot \dot{\gamma}^{\frac{1}{m}-1} \quad (2.7)$$

令 $k = \phi^{-\frac{1}{m}}$ 和 $n = \frac{1}{m}$ 代入可得粘性方程的常见形式:

$$\eta = k \cdot \dot{\gamma}^{n-1} \quad (2.8)$$

式中 k 称为稠度系数, 表示 $\dot{\gamma} = 1/\text{s}$ 时的粘度。对于牛顿流体, 粘度指数 n 等于 1, 对于大多数聚合物, 其值在 0.7 到 0.2 之间, 代表粘度曲线上所观察区段的斜率(图 2.3)。

幂律在数学上很简单, 用它可以分析处理几乎所有的牛顿流体的简单流体问题(见第三章)。其缺点之一是, 当剪切速率降到零时, 粘度趋于无穷大, 因此不能用于与剪切速率无关的牛顿区, 幂律的另一个缺点是流动指数的具有流度量纲。

总之, 幂律用来表示流动曲线或粘度曲线, 仅在一定剪切速率区域内满足精度要求, 在给定的精度下该区域的大小取决于曲线的曲率。

如果要在大的范围内用幂律表示曲线, 必须将曲线分段, 各段 ϕ 值和 m 值待定。因而在标准流变材料的数据表中对应不同的剪切速率区段有不同的 ϕ 、 m 值。

Prandtl-Eyring 本构方程

该模型是 Prandtl 和 Eyring 观察流动中分子的位置交换过程时所建立的, 其形式如下:

$$\dot{\gamma} = C \cdot \sinh\left(\frac{\tau}{A}\right) \quad (2.9)$$

材料常数 C 和 A 的量纲为:

$$[C] = \text{s}^{-1}, [A] = \text{N/m}^2$$

该模型的优点是在小剪切速率下可获得有限的粘度值, 并且可用于量纲分析中。然而, 由于其形式复杂, 应用上比较困难。

Carreau 本构方程

该模型在挤出模头设计中正在获得越来越重要的地位, 其方程形式为:

$$\eta(\dot{\gamma}) = \frac{A}{(1 + B \cdot \dot{\gamma})^c} \quad (2.10)$$

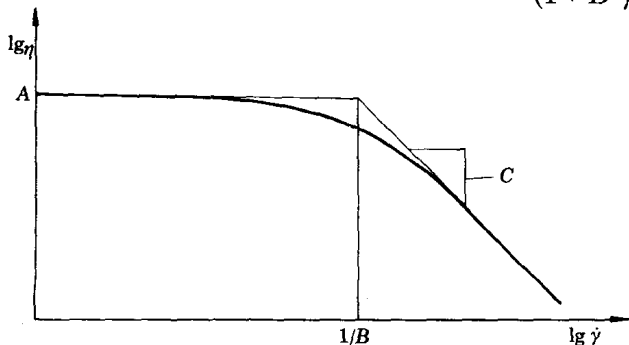


图 2.4 由 Carreau 本构方程表示的近似粘度曲线

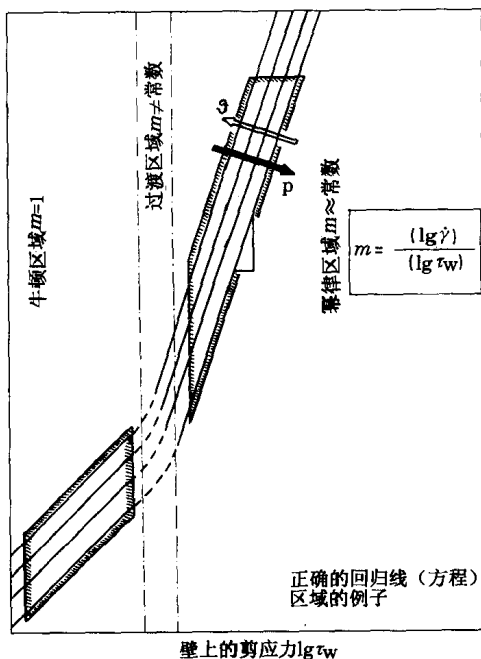


图 2.3 幂律所描述的流动曲线

式中参数的量纲为:

$[A] = \text{Pa} \cdot \text{s}$, $[B] = \text{s}$, $[C]$ 无量纲

A 表示零剪切粘度, B 为所谓的逆过渡剪切速率, C 为 $\dot{\gamma} \rightarrow \infty$ 时假塑区的粘度曲线斜率(见图 2.4)。

Carreau 模型的优点是它与幂律相比, 表示材料性能的剪切速率范围宽得多, 并能给出 $\dot{\gamma} \rightarrow 0$ 时