

# 螺杆设计及其理论基础

北京化工学院 朱复华 编著

轻工业出版社

## 前 言

挤出机是塑料加工的主要机台之一，螺杆是挤出机的主要部件。生产中的大量实际例子表明：螺杆设计得好坏对挤出制品的产量和质量有极大的影响。

由于挤出过程的复杂性，人们比较清楚地了解螺杆上发生的物理过程也只是最近十来年的事。挤出过程牵涉到固体力学、流体力学、传热学、高分子物理和流变学等等各方面的问题。大量的工艺参数以及多变的挤出条件，使我们难以得到准确的定量公式来进行挤出机及其螺杆设计。因此，虽然在二十年代初期便已开始了对挤出理论的研究，但是长期以来，挤出机及其螺杆设计仍然停留在依靠生产或实验测试的数据进行类比设计的阶段。人们往往根据一些在生产实践中表现得性能较好的螺杆，定性地分析其性能之所以较好的理由，然后根据新的工作条件，按照一定的规律进行相似放大，设计出新的螺杆。将此螺杆在实验装置上测试各方面的性能后，再经过适当地修改，最后才用于生产实际。显然，这便加重了实验装置及相应的实验技能在螺杆设计中的重要性，加重了测试仪表、研究方法和评定指标的重要性，这便是作者编写本书的第一个出发点。

第二个出发点是强调理论对实践、即挤出理论对螺杆设计的指导作用。虽然我们承认挤出理论目前仍不完善，建立理论的若干假定使得理论公式带有一定的局限性，计算过程比较繁复，其结果和实验数值难以一一对应，有时甚至有较大的误差。但不管怎么说，人类的认识总是要从感性上升到理性，从实践上升到理论。

实验研究是螺杆设计的基础，而螺杆设计必须要在挤出理论的指导下进行。实验研究、挤出理论和螺杆设计三者有密切的不可分割的关系——本书力求能按这个观点来编写。但由于作者实践经验和理论水平不足、思想方法难免有片面性，因此本书必然存在着各方面的欠缺和错误，欢迎读者批评指正。

在结束前言时还有几个技术性的问题需要说明：本书虽然侧重在分析螺杆设计的一些理论与实践问题，但在讨论某些问题时实际上不能不涉及到机筒。例如在设计螺杆加料段时必然与机筒结构有关；在讨论螺杆材质的耐磨性时必然与构成摩擦付的另一零件——机筒的材质有关……为此在本书中实际上是将机筒的某些问题也列入了讨论的范围。

考虑到本书读者可能会来自不同的工作部门，其数理基础可能会有一定的差距。因此除了在写法上力求深入浅出之外，对那些近代的更为严密的提法、进一步引伸性的说明和概念，以及数学基础较深的内容，本书采用小字排印以备有关读者阅读参考，阅读时跳过这些内容也并不影响正文的系统性和完整性。

本书各物理量和几何量的符号一律采用英文、希腊文书写以使篇幅简捷，仅对那些罕见的或为人们所不习惯的符号才用中文书写。对某些经常出现的符号的单位和名称在本书附录中列有一览表以备查阅。在正文中一般仅列出一次而不再反复叙述。通过各有关章节后面的例题来提请读者注意计算单位与量纲的统一。根据我国标准计量局办公室

1977年12月15日的规定，本书采用了国际单位制。但为使读者方便，我们仍将国外文献和国内习惯上采用的单位（如压力用 $\text{kgf}/\text{cm}^2$ 等等）一并列出。

由于国内尚未发表过有关挤出理论和螺杆设计方面的专门著作，大量的文献资料来自国外有关杂志和专著，对若干名词的称呼目前没有统一的译法。为避免造成概念上的混乱，作者以日本塑料工学研究所所长材上健吉先生主编的《挤出成形》一书中提供的资料为主，将挤出工程和螺杆设计上的专业术语 422 条，以英、日、中对照的形式作了整理，并列入附录三中供读者参考。

最后需要指出，在本书编著过程中承蒙中国塑料工程学会学术委员会主席张承琦教授以及其它同志认真审阅并提出不少宝贵意见，承民联和王乃仪两位研究生在文字的整理上也对我作了不少帮助，作者在此一并表示感谢。

**朱复华**

# 目 录

## 前 言

第一章 概论 .....	( 1 )
第一节 概述 .....	( 1 )
第二节 螺杆的几何参数 .....	( 2 )
第三节 挤出过程 .....	( 4 )
第二章 热塑性塑料的几项基本属性 .....	( 7 )
第一节 热塑性塑料的物理状态 .....	( 8 )
第二节 热塑性塑料的流变性 .....	( 10 )
第三节 热塑性塑料的热性能 .....	( 17 )
第三章 固体输送理论 .....	( 21 )
第一节 塑料和金属的摩擦 .....	( 21 )
第二节 固体摩擦理论 .....	( 25 )
一、固体摩擦理论的基本方程 .....	( 25 )
二、能量消耗及其分配 .....	( 33 )
三、螺槽中固相的温升 .....	( 38 )
四、延迟段机理 .....	( 41 )
第三节 粘性牵附理论 .....	( 42 )
第四节 能量平衡理论 .....	( 49 )
第五节 三个理论比较及计算举例 .....	( 51 )
第四章 熔融理论 .....	( 56 )
第一节 熔融过程的定性分析 .....	( 56 )
第二节 熔融理论的牛顿模型 .....	( 59 )
一、固相在距离 $dz$ 上的质量平衡 .....	( 59 )
二、熔膜在距离 $dz$ 上的质量平衡 .....	( 60 )
三、分界面单位面积上的热量平衡 .....	( 61 )
四、求解固相分布函数 .....	( 67 )
第三节 牛顿模型的发展 .....	( 74 )
一、对分界面单位面积上热量平衡的修正 .....	( 74 )
二、非牛顿模型——对粘度的修正 .....	( 75 )
三、非牛顿模型详解 .....	( 78 )
四、对螺槽截面形状的修正 .....	( 83 )
五、对固相温度分布的修正 .....	( 84 )

六、对固相速度的修正及计算举例 .....	( 86 )
第四节 熔融模型的发展 .....	( 91 )
<b>第五章 流体动力学理论</b> .....	( 96 )
第一节 计量段螺槽中的速度分布 .....	( 96 )
第二节 生产率公式、压力分布、剪应力分布和功率消耗 .....	( 103 )
一、生产率公式 .....	( 103 )
二、压力分布 .....	( 106 )
三、剪应力分布 .....	( 107 )
四、功率消耗及计算举例 .....	( 108 )
第三节 生产率公式的讨论 .....	( 114 )
一、螺杆特性线、口模特性线和挤出机的工作点 .....	( 114 )
二、对螺槽深度 $H_3$ 和螺旋升角 $\phi$ 的分析 .....	( 117 )
三、计量段沿轴线方向的平均粘度和剪应力 .....	( 119 )
第四节 生产率公式的修正 .....	( 120 )
一、螺纹侧壁影响的修正 .....	( 120 )
二、螺槽深度方向粘度变化的修正 .....	( 121 )
三、机筒内表面曲率影响的修正 .....	( 124 )
四、熔料非牛顿性的修正 .....	( 124 )
<b>第六章 混炼理论</b> .....	( 125 )
第一节 概述 .....	( 125 )
第二节 混炼过程的基本规律 .....	( 128 )
一、混合指标、分类、条纹厚度和界面面积变化 .....	( 128 )
二、分离相粘度的影响 .....	( 131 )
三、固相填料的分散作用 .....	( 132 )
四、混炼过程中的力化学效应 .....	( 134 )
五、应变分布函数和停留时间分布函数 .....	( 135 )
第三节 螺槽中的层流混合 .....	( 138 )
一、停留时间分析 .....	( 138 )
二、剪切总变形量(剪切强度)分析 .....	( 140 )
三、加权平均总变形量分析 .....	( 143 )
第四节 静态混合器 .....	( 145 )
<b>第七章 评价螺杆性能的标准</b> .....	( 149 )
第一节 产量 .....	( 149 )
第二节 能量消耗 .....	( 151 )
第三节 料温 .....	( 153 )
第四节 波动 .....	( 153 )
第五节 质量 .....	( 154 )
第六节 螺杆设计的经济性 .....	( 156 )

<b>第八章 普通螺杆设计</b> .....	(158)
第一节 螺杆直径 $D$ 的确定 .....	(158)
第二节 螺杆长径比 $L/D$ 的确定和螺杆的分段 .....	(161)
第三节 螺槽深度 $H$ 和压缩比 $\epsilon$ 的确定 .....	(165)
第四节 其它螺杆参数的确定 .....	(169)
第五节 螺杆和机筒的间隙 .....	(173)
第六节 螺杆设计的结构要素 .....	(175)
一、螺杆头部形状 .....	(175)
二、螺杆冷却系统 .....	(175)
三、螺杆尾部的密封 .....	(177)
四、表面光洁度和形状位置的偏差 .....	(177)
<b>第九章 普通螺杆存在的问题</b> .....	(179)
第一节 高速挤出时的塑化不良现象 .....	(179)
第二节 挤出时的波动现象 .....	(180)
第三节 各种因素对波动的影响 .....	(182)
<b>第十章 新型螺杆设计</b> .....	(186)
第一节 分流型螺杆设计 .....	(186)
第二节 屏障型螺杆设计 .....	(193)
第三节 分离型螺杆设计 .....	(198)
第四节 变流道型螺杆设计 .....	(207)
第五节 强制输送的IKV系统 .....	(210)
一、IKV系统的工作原理和结构特点 .....	(210)
二、IKV系统的缺陷和应用范围 .....	(214)
三、强制输送的其它途径 .....	(214)
第六节 其它新型螺杆 .....	(216)
第七节 新型螺杆设计原理小结 .....	(217)
一、基本概念与定义 .....	(217)
二、保证塑化质量的主要方法 .....	(218)
三、塑化能力必须与输送效率相匹配 .....	(218)
<b>第十一章 排气理论与排气螺杆设计</b> .....	(221)
第一节 排气螺杆的功能 .....	(221)
第二节 排气螺杆的工作原理 .....	(222)
第三节 排气理论 .....	(223)
第四节 排气螺杆设计 .....	(227)
一、螺槽深度 $H$ 、 $H$ 和泵比 $\Omega$ 的确定 .....	(227)
二、排气段参数的确定 .....	(228)
三、其它参数的确定 .....	(229)
<b>第十二章 螺杆、机筒的磨损机理, 选材和强度计算</b> .....	(231)

第一节 概述 .....	(231)
第二节 螺杆和机筒的磨损机理 .....	(232)
一、粘连磨损 .....	(232)
二、磨料磨损 .....	(233)
三、分层磨损和扩散磨损 .....	(234)
四、腐蚀 .....	(234)
第三节 螺杆、机筒的材料选择和表面处理 .....	(234)
第四节 螺杆的强度计算 .....	(239)
一、螺杆强度计算的原始数据 .....	(239)
二、受力和强度计算 .....	(242)
<b>第十三章 螺杆设计方法上的发展</b> .....	(246)
第一节 正交设计在螺杆设计上的应用 .....	(246)
第二节 相似理论在螺杆设计上的应用 .....	(249)
第三节 统计理论在螺杆设计上的应用 .....	(255)
第四节 用电子计算机挤出理论进行螺杆的最佳化设计 .....	(262)
一、用电子计算机进行螺杆设计的一般过程 .....	(263)
二、用电子计算机挤出理论对螺杆进行最佳化优选 .....	(266)
<b>第十四章 研究方法和测试仪器</b> .....	(272)
第一节 螺杆的实验研究方法 .....	(272)
一、静态观测法 .....	(272)
二、动态观察法 .....	(272)
三、模拟试验法 .....	(273)
四、普通螺杆试验机 .....	(274)
第二节 压力的测定及其相应仪器 .....	(275)
一、机头压力和沿程压力分布的测定 .....	(275)
二、轴向力的测定 .....	(279)
第三节 料温的测定及其相应仪器 .....	(281)
第四节 扭矩和功率的测定及其相应仪器 .....	(283)
一、扭矩的测量 .....	(284)
二、功率的测量 .....	(286)
第五节 自动记录装置 .....	(287)
一、光线示波仪 .....	(287)
二、长图记录仪 .....	(288)
三、自动平衡记录仪 .....	(288)
四、X-Y记录仪和磁带记录仪 .....	(290)
五、各种记录仪性能比较 .....	(290)
第六节 误差分析和数据处理 .....	(291)
一、误差的分类 .....	(292)

二、测试数据的数学处理 .....	(292)
三、偶然误差的正态分布 .....	(294)
四、记录曲线的整理分析 .....	(295)
五、数据系统 .....	(295)

## 附 录

一、本书主要符号一览表 .....	(298)
二、单位换算表 .....	(301)
三、常用塑料代号与中、英、日名称对照表 .....	(303)
四、国产热塑性塑料的流动曲线 .....	(305)
LDPE (F101, G201, F702) , PP (J300, F401, F600, S701) , PS, SPVC, ABS, PA1010, PMMA, PET, PC, PSF	
五、参考文献 .....	(321)



# 第一章 概 论

## 第一节 概 述

塑料是一种高分子材料，它具有比重小、弹性大、耐蚀、隔音、绝缘性好、化学稳定性高等一系列优异的性能。在加入各种添加剂和填料后，它还具有良好的耐热性、耐磨性和较高的机械强度。塑料具有很好的加工性，除了在热状态下采用挤出、注射、压制、真空成型等一系列压力加工的方法在模具中直接成型外，还可以用切削、焊接和粘合等方法得到所需的形状和尺寸。塑料的原料来源十分丰富，随着石油化学工业的发展，在国民经济和国防尖端各部门中将得到越来越广泛的应用。

挤出成型加工是塑料加工的主要方法之一，比起其他加工方法它具有一系列突出的优点。

由于挤出过程具有连续性，因此用挤出机来进行成型加工具有较高的生产率。一般来说，各国用挤出法加工的塑料大约占该国塑料产量的40~60%。由于生产过程有连续性，因此实现生产过程自动化也比较容易。

相应其他成型加工机械来比，挤出机构造比较简单，操作比较容易，因此投资少，收效快，制品的价格比较低廉。

挤出加工的应用范围很广，既能加工常用的聚乙烯、聚丙烯、软硬聚氯乙烯等民用塑料，也能加工聚砜、聚碳酸酯、尼龙、ABS、聚甲醛等工程塑料。既能生产薄膜、管材、棒材、型材、单丝、电缆、金属与纸张的涂层等任意长度的制品，又能加工中空容器等单件制品。当然，由于这种成型方法工艺上的局限性，目前还不能成型那些结构比较复杂的单件制品。

从最近几年的发展趋势来看，挤出机不仅用来成型塑料制品，而且在整个塑料工业中也越来越广泛地应用于混合、塑化、脱水、喂料和造粒等准备工序，开始取代了一部分两辊开炼机和密炼机的工作。

一台挤出设备通常是由主机、机头、辅机及其相应的控制系统组成的（图1-1）。主机的主要作用是将粒状、粉状或其他形状的塑料原料在热和压力的作用下塑化，然后定压定量地挤入机头。机头具有形状不同的口模，当塑化好的塑料通过时便得到不同的形状与尺寸。进入辅机后，通过定型、冷却、牵引、切割等一系列工序最后得到合乎要求的制品。

为了确保机器的正常运转和挤出质量，挤出机都具有自动化程度不同的控制系统。它通过各种电器设备控制挤出机主辅机的电动机按所需要的转速和扭矩旋转，保证主辅机运行速度的同步与协调；通过加热、冷却和控温系统保证挤出机各段温度控制在工艺所规定的范围内。除此以外，近代的挤出机还能测量物料的温度和压力、制品的尺寸，

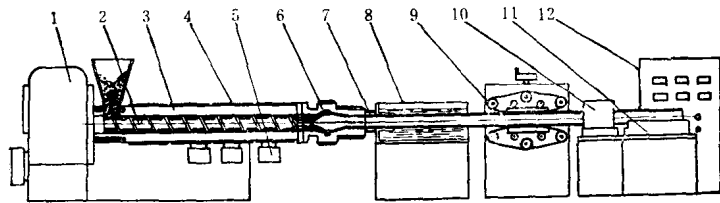


图1-1 挤出设备的组成

1—传动系统 2—螺杆 3—机筒 4—加热装置 5—冷却装置 6—机头  
7—定型套 8—冷却槽 9—牵引机构 10—切断机构 11—堆放机构 12—控制柜

甚至通过反馈系统自动调整制品的尺寸精度和控制其它的质量要素。

从以上的介绍可以看出：挤出机的各个组成部分是互相联系、互相制约的，每个部件的性能好坏都将直接影响制品的产量与质量。但是国内外的研究和生产实践都表明：在构成挤出机主机的各个环节中，螺杆设计的好坏往往是关键的一环。比起整个挤出机组来，一根螺杆的投资是有限的，但是螺杆参数和结构的适当更新往往有可能促使挤出机生产率有较大的提高，质量有较大的改善，或者是扩大了挤出机的使用范围（如发泡、混炼等等）。因此，研究挤出机螺杆及其相应理论在世界各国塑料加工工业中都成为一个主要的课题。

## 第二节 螺杆的几何参数

从外形上来看，螺杆的形状并不复杂，在一般情况下它是一个较长的圆柱形零件。图1-2表示了双头螺纹的螺杆的几何参数。螺杆的外径为 $D$ ，机筒的内径为 $D_1$ ，螺杆和机筒之间的单面间隙为 $\delta$ ，机筒内壁和螺杆根径之间的距离为 $H$ 。在研究挤出理论时，在大多数情况下，我们略去间隙 $\delta$ 不计，此时我们往往用机筒内径 $D_1$ 代替了螺杆外径 $D$ ，而 $H$ 便相当于螺槽深度。加料段的槽深 $H_1$ 与计量段的槽深 $H_3$ 是不同的。螺杆的有效长度用 $L$ 表示，在一般情况下它分为三段，加料段长度为 $L_1$ ，计量段长度为 $L_3$ ，当中一段，即螺槽深度由 $H_1$ 逐渐过渡到 $H_3$ 的压缩段用 $L_2$ 表示。当螺杆旋转一转时，螺棱上的任何一点沿轴向前进的距离为导程 $T$ ，显然导程 $T$ 等于螺纹头数 $M$ 和螺距 $S$ 之乘积。螺棱的轴向宽度为 $b$ ，法向宽度为 $e$ 。螺棱和螺棱之间的轴向距离为 $B$ ，法向距离为 $W$ 。螺旋升角为 $\phi$ 。

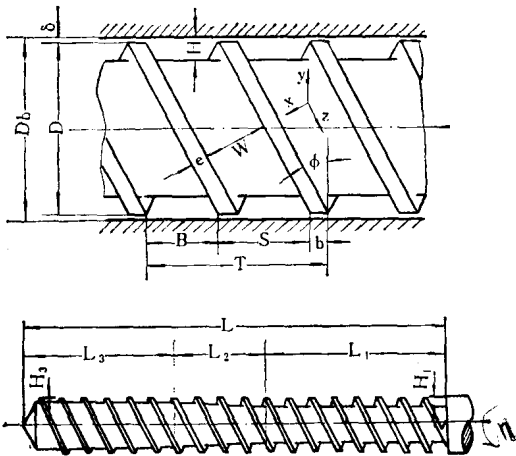


图1-2 双头螺纹螺杆的几何参数

为了对螺杆上物料的运动规律和熔融过程等进行准确的分析与计算，必须严格地建立螺杆几何参数之间的相互关系，这些关系在后面分析挤出理论和螺杆设计时将要反复地运用。

螺杆的几何参数可分为三大类。

1. 在螺杆全长上保持不变的参数：导程 $T$ 、螺距 $S$ 、法向棱宽 $e$ 、机筒内径 $D_1$ 和间隙

$\delta$ , 当 $D_s$ 和 $\delta$ 不变时螺杆外径 $D$ 当然也是不变的。在特殊的情况下,  $T$ 和 $S$ 可能在螺杆全长上发生变化, 例如变距螺杆便属于这种情况, 但是在塑料挤出机上这种情况已经很罕见了。此外对于某一已知的挤出机, 有可能由于螺杆机筒的磨损造成 $D_s$ 、 $D$ 和 $\delta$ 在各个位置上都不相同, 但是在进行理论分析时我们往往都不考虑这种情况。

从图 1-2 显然可以看出:

$$D_s = D + 2\delta \quad (1-1)$$

$$L = L_1 + L_2 + L_3 \quad (1-2)$$

$$T = MS = M(B+b) \quad (1-3)$$

2. 在螺杆轴向长度上发生变化的参数主要是螺纹深度 $H$ , 在斜度 $E$ 不变的情况下, 式(1-4)是成立的。

$$H_1 = H_3 + EL_2 \quad (1-4)$$

式中  $E$ ——斜度;  
 $H_3$ ——计量段螺槽深度;  
 $H_1$ ——加料段螺槽深度。

3. 在径向距离上变化的参数: 螺棱之间的法向距离 $W(r)$ , 螺棱轴向宽度 $b(r)$ 和螺旋升角 $\phi(r)$ , 括号中的 $r$ 表示了这三个数值都是径向距离 $r$ 的函数。由于导程 $T$ 不变, 螺棱之间的轴向距离 $B$ 实际上也是一个随 $r$ 而变化的量。

如果将螺杆的螺棱顶面涂上颜色, 并用白纸卷起螺杆, 然后再将纸展开, 这样便得到图 1-3 所示的实线, 它显示出螺杆参数之间的相互关系。这些关系可用下面几个方程式表示。

$$\operatorname{tg} \phi_s = \frac{T}{\pi D_s} \quad (1-5)$$

$$\begin{aligned} W_s &= B_s \cos \phi_s = \left( \frac{T}{M} - b_s \right) \cos \phi_s \\ &= \frac{T}{M} \cos \phi_s - b_s \cos \phi_s = \frac{T}{M} \cos \phi_s - e \end{aligned} \quad (1-6)$$

$$Z_s = \frac{T}{\sin \phi_s} \quad (1-7)$$

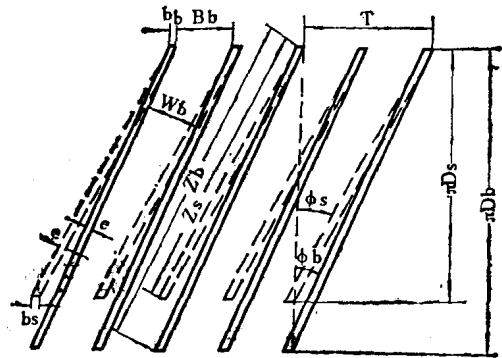


图1-3 螺纹展开图

上述三式中各符号下面的注脚 $b$ 表示了按机筒内表面计算的(在不计及间隙 $\delta$ 时实际上等于按螺杆外径计算的)各个参数。 $Z_s$ 表示在一个导程中的流道长度。

同理, 在螺杆根径上也可求出相应的螺旋升角 $\phi_s$ 、螺纹之间的法向距离 $W_s$ 和一个导程下的流道长度 $Z_s$ 。它们的关系如图 1-3 上的虚线所示:

$$\operatorname{tg} \phi_s = \frac{T}{\pi(D - 2H)} = \frac{T}{\pi D_s} \quad (1-8)$$

$$W_s = B_s \cos \phi_s = \left( \frac{T}{M} - b_s \right) \cos \phi_s$$

$$= \frac{T}{M} \cos \phi_1 - b_1 \cos \phi_1 = \frac{T}{M} \cos \phi_1 - e \quad (1-9)$$

$$Z_1 = \frac{T}{\sin \phi_1} \quad (1-10)$$

上述关系可以写成更普遍的公式:

$$\phi(r) = \operatorname{tg}^{-1} \left( \frac{T}{\pi D_r} \right) \quad (1-11)$$

$$W(r) = \frac{T}{M} \cos \phi(r) - e \quad (1-12)$$

$$Z(r) = \frac{T}{\sin \phi(r)} \quad (1-13)$$

式中  $D_r$  为任一点的螺杆直径。

可以用一组简单的数据来证明准确计算的必要性。例如当螺杆直径  $D = 45\text{mm}$ , 单头螺纹即  $M = 1$ , 螺距  $S = T = D$ , 法向棱宽  $e = 4.5\text{mm}$ , 槽深  $H = 8\text{mm}$  时, 按上面提供的公式可以计算此时的  $\phi_1 = 17^\circ 40'$ ,  $\phi_2 = 26^\circ 18'$ ,  $W_1 = 38.3\text{mm}$ ,  $W_2 = 34.9\text{mm}$ ,  $Z_1 = 148.5\text{mm}$ ,  $Z_2 = 101.5\text{mm}$ 。显然在螺棱的顶部与根部这些数据相差是比较大的。因此在设计螺杆或进行挤出理论的有关计算时, 常常用螺杆的平均直径来作为计算  $\phi$ 、 $W$  和  $Z$  的基准, 此时只要用螺杆的平均直径  $\bar{D}$  代入式 (1-11) 到 (1-13) 即可, 平均直径  $\bar{D}$  为:

$$\bar{D} = \frac{1}{2} (D_1 + D_2) = D_1 - H \quad (1-14)$$

以上分析是建立在图 1-2 所示的直角坐标系上的。在进行理论分析时, 有时还可采用螺旋坐标系和双极坐标系。关于这些坐标系的基本概念可以参看文献 [1], 此处不予多述。

### 第三节 挤出过程

螺杆的外形虽然并不复杂, 但是塑料在整个挤出过程中发生在螺杆上的变化却是相当复杂的过程。在正常情况下, 随着螺杆转速的不同, 物料在螺杆上停留只不过一分钟不到或者至多几分钟的时间。但就在这样短短的时间内, 除了具有一般螺杆泵应完成的输送作用外, 还有压力的产生、能量的传递与转换、塑料随着温度的升高而出现的从玻璃态变为高弹态最后变为粘流态的物态变化、气体的排出、各个组分的搅拌混合、熔料压力和温度的均匀化, 最后还要实现定压定量地挤出。在某些挤出机的螺杆上还存在着聚合物聚合反应的过程。因此, 虽然说挤出过程质量的高低和挤出机其他部件都有直接关系, 但螺杆设计质量的好坏却更大地影响着挤出生产率的高低和产品质量的好坏。人们称螺杆为挤出机的“心脏”, 这个比喻是并不过份的。因此, 在正式分析讨论挤出理论和螺杆设计之前, 有必要对发生在螺杆上的挤出过程有一初步的、比较全面的认识。

塑料加入料斗后, 依靠自重或者在加料器的推力作用下, 进入螺杆螺槽的空间。随

着螺杆的旋转，在塑料与螺杆的摩擦力、塑料与机筒的摩擦力，还有在螺杆推力等外力的联合作用下，塑料被强制地往前输送。这是一个机械输送的过程。输送量的大小与塑料形状及其颗粒的尺寸、加料段机筒及螺杆的结构、塑料和金属的摩擦系数、螺杆转速、塑料温度，以及建立的料压大小等有直接的关系。

在输送过程中，由于螺纹深度逐渐减小，再加上由于分流板、过滤网、机头阻力和摩擦力的存在，在塑料中形成了很高的压力，塑料由加入料斗时之松散状态压缩成密实的状态，这就改善了物料的传热性，有助于塑料的熔化。这个密实的固态料块在挤出理论的文献中被称为“固体栓”或“固体塞”。

根据实验测得的曲线，在螺杆全长上压力分布规律如图1-4所示。由于机头口模系统的阻力大小不同，压力峰值一般出现在压缩段后部或计量段前部。在特殊情况下，例如当采用了矩形纵向沟槽的机筒加料段结构时，压力峰值会提前到加料段末端，而且它的数值也较大（图1-4曲线之4），其详情在第十章另述。

在压力升高的同时，在螺槽中运动着的固体塞与加热了的机筒壁不断地接触与摩擦，筒壁的热量不断地传给塑料，这部分热量称为传导热。在这个热量的作用下，与筒壁相接触的料层首先开始熔化，产生了一层薄的熔膜。在这层熔膜中，由于各部分熔体间的运动速度不同，在塑料的大分子之间通过内摩擦也产生了大量的热量。这个过程称为熔料的剪切作用，由剪切产生的热量我们称为剪切热。

在传导热和剪切热的联合作用下，在压力升高的同时，塑料逐渐地一部分一部分地熔化。根据从各螺槽上拆下的试样断面的分析，认为在大多数情况下塑料的熔化是这样—个发展过程（图1-5）：与机筒壁相接触的那层熔膜逐渐加厚到超过螺杆与机筒间的间隙后，由于螺杆的转动，这层熔膜3被螺棱推进面1刮削集中于推进面的前端，形成了熔池2，熔池2愈来愈大，而固体塞4的宽度X便愈来愈小以至于完全消失。最后由固体状态变成流动着的熔体状态。熔融速度的快慢与塑料本身的特性（比热、导热系数、熔融潜热的大小等）、挤出工艺参数（压力、温度与转速）、螺杆几何尺寸等有直接关系。

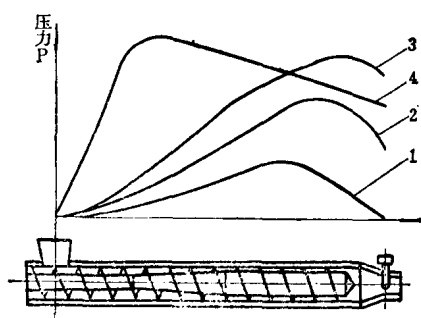


图1-4 压力分布曲线

1—低压机头 2—中压机头 3—高压机头  
4—机筒加料段开有矩形纵向沟槽并强力冷却

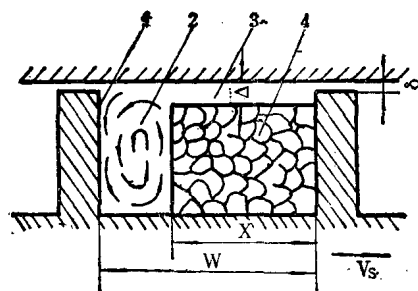


图1-5 塑料在螺槽中的熔化过程

1—螺棱推进面 2—熔池 3—熔膜 4—  
固体塞（即固相）

在正常情况下计量段开始处的塑料大部分都处于熔融状态。但是由于螺槽中各点塑料熔化时间先后不同，因此各点的温度也不同。构成塑料的各个组分（树脂、颜料、增

塑剂和其它各种填料)在螺槽各点的浓度也不一样,即它们的分散情况是很不均匀的。如果在此时便挤入机头口模,必然会由于各方面混合均匀度很差从而影响了制品的质量。为此,在螺杆上都有一段螺纹等深的计量段,在这一段中,熔料流动规律比较复杂(详见第六章)。这种复杂的运动使得温度、压力和各组分的均匀化得到了一定的保证。另一方面,由于计量段螺槽等深,这就有可能保证在螺杆每一转中输出一个恒定体积的熔料,基本上达到了定压定量地挤出。

除了上述的输送、压缩、熔化和均匀化等基本功能外,排除物料中的各种气体也是螺杆的一个重要的功能。在一般单螺杆挤出机上,由吸附水分而产生的水蒸汽和料粒之间的空气可在逐渐增高的压力作用下从料斗中逸出。但是当螺杆转速提高后,这些气体便来不及逸出,尤其在加工吸湿性较强的塑料和料粒内部产生气体较多的塑料时,为了能比较彻底地排出气体,在螺杆上往往设计有减压段和排气段,关于排气螺杆的详细机理可见第十一章。

总结上述,任何一根螺杆都必须完成输送、压缩、熔化、匀化和排气等五个基本功能。我们所指的塑料塑化质量的好坏,不仅仅指塑料熔融情况的好坏,而且还应包括熔料压缩得比较密实、均匀和没有气泡等概念。事实证明:塑化与输送是挤出过程中对立统一的两个方面,输送得太快有可能引起塑化不良,而过于强调塑化也有可能使挤出量减少从而螺杆的生产率下降。我们的目标是既要产量高即输送多又要质量好即塑化好。如同本书有关螺杆设计各章所叙述的那样,整个螺杆设计思路的发展都是围绕着正确处理这一矛盾而发展的。

## 第二章 热塑性塑料的几项基本属性

塑料的主要成分是高分子化合物，它们的分子量比一般低分子化合物要大几千倍以上。例如常用的聚乙烯其分子量在15000到80000之间，而最近发展的超高分子量聚乙烯的分子量甚至达到二百万之多。这些大分子都是由一个个单体分子经聚合或缩聚连接起来的，组成了所谓“链状结构”，其重复的结构单元称为“链节”，重复的次数称为“聚合度”。一般聚合物的聚合度由几百到几千，分子量由几万到几十万不等。这些大分子具有杂乱无章的线团结构，其分子链具有多种复杂的形式。一般有线型、支化和网状三种（图2-1）。线型和支化高分子的特点是可以受热熔化也可在溶剂作用下溶解，因此它可以反复地加工和应用，所谓热塑性塑料（如PVC、PE、PS等）都属于这类。相反网状聚合物却不具备上述特点，因此它只能在形成网状结构之前进行成型加工，而且一旦成型后便难以反复加工。但是，它们在尺寸稳定性、耐热、耐溶剂作用等方面却具有较好的性能，所谓热固性塑料（酚醛、脲醛等）就属于这一类，某些热塑性塑料如聚乙烯经交联处理后也属于这一类。

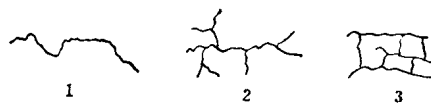


图2-1 三种大分子链的示意图  
1—线型 2—支化 3—网状

显然分子量的大小将直接影响聚合物的性能，例如强度、熔点、粘度等等。但是高分子聚合物却不象低分子物质那样有一个确切的分子量。一般来说，它们都是聚合度不等即链长不等、分子量不等的同系混合物，通常我们指的分子量便是指它的平均分子量。通过一些测定方法还能测出它的分子量分布。显然，由于分子量不同聚合物的性能便会有所不同，因此具有一定分子量分布的聚合物它的性能便不会是一个定值，而是一个分散值。例如熔点将不敏锐，而是一个较宽的温度范围，这对成型加工是有好处的。但是另一些性能却因分子量分布过宽而产生不良的影响，例如聚乙烯抵抗环境应力开裂的能力会因分子量分布过宽而下降。

由上可见：聚合物的结构直接影响着它的性能。但是，所谓结构决不仅仅是它本身的化学与物理结构（即上面简述的分子量大小及其分布、分子链的形式等），这仅是“结构”这个概念的第一层含义；第二层含义指的是聚合物分子的聚集状态，即结晶或非结晶等聚集方式；最后，所谓“结构”的第三层含义指的是这些微小的高分子聚集体如何和各种填料、增塑剂、颜料等堆砌成整个高分子材料的结构方式。

本书不可能也不应该述及高分子物理的众多问题，本章的目的也仅是为后继各章作必要的知识准备和数据准备。因此下面我们仅从聚合物的一种即从塑料的角度来分析问题，而将高分子物理中影响螺杆设计及其理论基础的三个主要问题（热塑性塑料的三态变化、热塑性塑料的流变性和热塑性塑料的热性能）分节叙述如后。

## 第一节 热塑性塑料的物理状态

热塑性塑料的聚集状态可分为两类，一类是结晶型的，另一类是无定型的。前者如聚乙烯、聚丙烯、聚酰胺（即尼龙）和聚甲醛等，后者如聚氯乙烯、聚苯乙烯、聚甲基丙烯酸甲酯（即有机玻璃）等。前者的分子排列整齐有序、后者杂乱无章，犹如一团乱丝\*<sup>1</sup>。二者的性能差异很大。例如从外观上看结晶型塑料多是乳白色的，而无定型塑料则比较透明；从机械性能上来比较，结晶以后一般强度、硬度与刚性要增大，而冲击韧性和伸长率要降低。表2-1很明显地看出这一点。

表2-1 聚乙烯结晶度不同时之不同性能

结 晶 度 (%)	65	75	85	95	100
熔 点 (°C)	105	120	125	130	(137)
刚 性 (相对值)	1	2	3	4	—
抗张强度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	140	180	250	400	—
伸 长 率 (%)	500	300	100	20	—
抗冲强度 (相对值)	10	5	4	3	—
球压硬度 (kgf/cm <sup>2</sup> )	130	230	380	700	—

熔融塑料的结晶速率取决于结晶中心即晶核的生成速率和高分子链沿结晶中心的生长速率，只有在某一温度范围才具有最快的结晶速率，这个温度大约在（以绝对温度计算）熔点的十分之九处。事实上，绝大多数结晶型塑料在一般成型加工方法的冷却速度下冷却时，都只能得到部分结晶。而另一部分未来得及结晶的塑料冷却后仍保持着无定型态。图2-2形象地说明了这一点，即结晶区和无定型区共存的图象。\*<sup>2</sup>

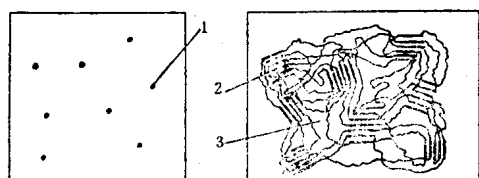


图2-2 结晶过程

1—晶核 2—结晶区 3—无定型区

这也是为什么从理论上来说，每一种结晶型塑料只有一个“不变的”熔点，在此温度下结晶型塑料应该突然地熔融。但在实际上由于晶体本身的缺陷，因此它们的熔融总是在一定温度范围内完成。结晶型塑料中存在着无定型部分这一事实更助长了这一趋势。一般说来，所谓结晶型塑料的熔点指的是晶体全部熔融时的那个温度。而无定型塑料

却不存在一个明确的“熔点”。当温度升高到大于它们的软化点时，它们总是在一个较大的温度范围内逐渐软化熔融。

和低分子化合物不一样，随着温度的升高，塑料一般有三种物理状态，即玻璃态、高弹态和粘流态。而低分子化合物则有固、液、气三种形态。塑料没有气态，因为当温度达到分解温度时，不待气化它已完全分解。无论是不能结晶的塑料，还是可以结晶而

\*1 严格地说来，只是在大距离范围内无序，而在小距离范围内却是排列有序的。即“远程无序，近程有序”。  
\*2 严格地说来，图2-2是不符合近代的结晶理论的，只是由于它比较形象，所以在这里仍然引用了这个图。



没有结晶的塑料（如聚碳酸酯），或是已结晶的塑料中的无定型部分（如聚乙烯），它们都具有上述三种物理状态。当然也有一些例外情况，例如聚丙烯腈，由于它的分解温度低于粘流温度，因此在不加溶剂的情况下就没有粘流态。

热塑性塑料的三态可以用图2-3来简略地说明：在常温下，确切地来说在塑料达到玻璃化温度  $T_g$  之前它是一块坚硬的尺寸稳定的玻璃状固体。当施加外力时产生的形变很小，外力去除后形变可以消失。从本质上来说，这种形变实际上是原子在其平均位置附近发生位移，和一般低分子化合物并无不同，这时的状态我们称为玻璃态。

当温度上升到玻璃化温度  $T_g$  时，塑料的许多性能发生了急剧的变化，如热膨胀系数、比热、热焓、粘度、折光系数，还有弹性模量等许多力学性能都发生了突变。当温度大于玻璃化温度  $T_g$  时，无定型塑料便具有一定的弹性，在较小的外力作用下便可产生较大的形变，外力去除后又恢复原状，但是其形变和恢复都不是瞬时产生的，它需要一定的时间，这是塑料区别于低分子化合物的一个重要特征，这时的状态我们称为高弹态。高弹形变的产生是由于大分子链的链段发生了位移，这是低分子化合物所不可能具有的。

当塑料温度继续上升到粘流温度  $T_f$  时，塑料得到更多的热能，分子运动的速度大大加快，这便有可能实现整个大分子链的位移，熔融了的塑料便能产生流动。这时的状态我们称为粘流态。塑料在粘流态下具有的流动性是进行成型加工的内因，而加压和升温等措施都是挤出成型的外因。

对一个挤出机螺杆设计和研究工作者来说，掌握粘流态下塑料的运动规律、分析塑料流动时主要参数即粘度对螺杆产量、能量消耗状况、热量的产生数值和塑料温升情况的影响、还有粘度对成型加工难易程度以及挤出质量等等问题的影响是具有非常重要的意义。我们将在下一节着重阐述有关塑料的流变性能和粘度方面的知识。

当塑料上升到分解温度  $T_d$  时便开始分解，显然在加工过程中这是不允许的。

上述过程可以用温度-形变曲线明确地概括出来(图2-4)。由图可以看出：无定型塑料的三态变化非常明显，而结晶型塑料的高弹态却很不明显，当温度高于  $T_f$  时它便很快地熔化。

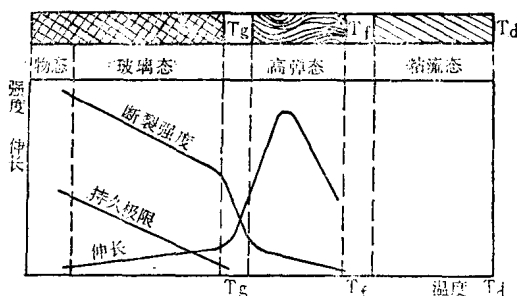


图2-3 热塑性塑料在三种物理状态下的物性变化

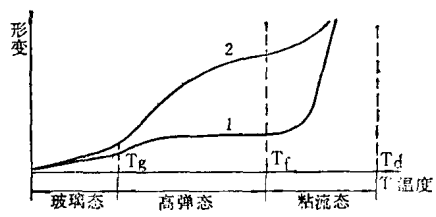


图2-4 热塑性塑料的温度-形变图  
1-结晶型塑料 2-无定型塑料

表2-2对上述内容作了一个概括地小结。