

塑料成型基础理论

许建南 编著

河北省塑料工业科技情报站

塑料成型基础理论

许建南 编著



河北省塑料工业科技情报站

1982

内 容 简 介

本书比较系统地阐述了塑料成型的基础理论。全书共分七讲，前四讲为流变学与形态学理论，内容有塑料融体的流变性能与流体流动的基本方程，塑料成型过程中的结晶和取向，后三讲对塑料的挤出、注射、压延成型进行了理论分析。本书内容丰富，文字简练，既阐明基础理论，又有严密的数学推导，并附有联系生产实际的应用实例。

该书可作为塑料行业的工程技术人员、科研人员、技术管理干部和工人的基础理论学习材料，也可供大专院校有关专业师生参考。

前 言

河北省塑料工程学会和塑料工业科技情报站于80年和81年夏季，先后在承德和石家庄举办了关于塑料成型理论的培训班。应他们建议，现将这两期培训班的讲稿整理发表。编者水平有限，时间仓促，文中错误一定不少，敬请读者指正。

编者在对塑料挤出理论和压延流动理论作数学推导时，承蒙天津大学胡金生付教授热情指导，在此表示衷心感谢。河北省塑料工业科技情报站王祖玉、王正侠二位同志对编者的工作曾给予热情关怀和支持，马亚同志为本书描绘了插图，谨此致谢。

编者 一九八三年九月于天津

目 录

第一讲 塑料熔融体的流变性能	(1)
1—1 引言	(1)
1—2 塑料熔融体的粘性流动	(5)
一、基本概念	(5)
1、剪切应力	(5)
2、剪切速度梯度和剪切速率	(7)
3、剪切流动和拉伸流动	(8)
4、层流和湍流	(10)
5、牛顿流体和牛顿粘度	(11)
6、非牛顿流体和表观粘度	(12)
二、非牛顿流体的流动行为	(12)
1、塑性流体	(12)
2、假塑性流体	(13)
3、膨胀性流体 (或胀塑性流体)	(13)
三、高聚物溶液及熔融体的实际流动行为	(16)
四、影响塑料熔融体表观粘度的因素	(23)
1、材料因素	(24)
2、工艺因素	(32)
五、拉伸粘度	(41)
1—3 塑料熔融体在流动过程中的弹性效应	(46)

一、概述	(46)
二、剪切弹性	(48)
三、拉伸弹性	(50)
1—4 流体在简单截面形状的导管内作等温层状流动	(51)
一、在园形导管内的流动	(52)
二、在狭缝形导管(缝模)内的流动	(68)
1—5 端末效应	(72)
一、进口效应	(73)
二、出口膨胀	(75)
1—6 不稳定流动	(80)
一、熔体破裂和鲨鱼皮现象	(80)
二、不稳定流动的机理	(83)
1、弹性湍流	(83)
2、入口处的弹性记忆效应	(84)
3、管壁上的滑移	(84)
三、不稳定流动的控制和克服	(87)
第二讲 塑料成型过程中的结晶	(90)
2—1 高聚物的聚集态结构	(90)
一、低分子物质的聚集态	(92)
1、气态	(92)
2、液态	(92)
3、固态	(93)
二、高聚物的聚集态	(94)
1、晶态和非晶态	(94)

2、取向态和非取向态	(95)
3、织态结构	(95)
2—2 高聚物的结晶能力	(97)
2—3 高聚物的结晶形态	(100)
一、低分子物质的晶体结构	(100)
二、结晶高聚物的织态两相结构	(103)
三、折迭链结构	(104)
四、伸直链结构	(111)
2—4 高聚物的结晶过程及其影响因素	(113)
一、高聚物的结晶过程及最大结晶速率温度	(113)
二、等温结晶曲线的讨论	(116)
三、影响高聚物结晶过程的因素	(119)
1、材料因素	(119)
2、温度的影响	(120)
3、冷却速率的影响	(121)
4、压力、拉伸和剪切应力的作用	(121)
5、成核剂的作用	(123)
6、低分子液体的影响	(125)
7、其他添加剂的作用	(125)
2—5 晶态高聚物的主要特点	(126)
2—6 结晶对塑料制品性能的影响	(131)
第三讲 塑料成型过程中的取向作用	(136)
3—1 高聚物取向的机理	(136)
一、概述	(136)

二、无定形高聚物的取向机理·····	(133)
三、晶态高聚物的取向机理·····	(141)
3—2 取向对塑料制品性能的影响·····	(143)
一、取向高聚物的各向异性·····	(143)
1、力学性质的各向异性·····	(143)
2、光学性质的各向异性·····	(144)
3、热传导的各向异性·····	(145)
二、取向对高聚物机械强度的影响·····	(146)
三、内应力和热收缩性能·····	(149)
四、拉伸取向对晶态高聚物光学性能的影响··	(150)
3—3 注射成型过程中的取向作用·····	(151)
一、热固性塑料中纤维状填料的取向·····	(151)
二、热塑性塑料在注射成型时的取向·····	(153)
1、热塑性塑料在模腔内流动时的取向特点··	(153)
2、影响取向的因素·····	(157)
3—4 拉伸取向·····	(163)
一、固体高聚物拉伸时的屈服行为和细颈现象 ·····	(164)
1、高聚物拉伸的应力—应变曲线·····	(164)
2、高聚物拉伸屈服时的细颈现象·····	(166)
3、无定形高聚物的拉伸与屈服·····	(169)
4、晶态高聚物的拉伸与屈服·····	(173)
5、影响高聚物拉伸屈服行为的因素·····	(175)
二、拉伸取向的生产工艺控制·····	(179)
1、影响拉伸取向的工艺条件·····	(179)
2、无定形高聚物的拉伸工艺·····	(182)

3、结晶高聚物的拉伸工艺·····	(183)
三、超拉伸·····	(187)
第四讲 流体流动的基本方程式·····	(191)
4—1 连续性方程·····	(191)
4—2 动量方程·····	(197)
4—3 能量方程·····	(206)
一、体系内能的变化·····	(206)
二、体系吸收的热量·····	(207)
三、外力对体系作功·····	(209)
4—4 方程的应用举例·····	(212)
第五讲 塑料螺杆挤出理论·····	(217)
5—1 概述·····	(217)
5—2 均化段的熔体输送理论·····	(219)
一、螺槽中熔体流动速度分布·····	(219)
二、均化段的生产率·····	(235)
1、漏流对生产率的影响·····	(235)
2、挤出机的工作点·····	(238)
3、对生产率公式的讨论·····	(243)
三、均化段流动理论对功率消耗的分析·····	(245)
四、熔体输送理论的应用·····	(249)
5—3 压缩段的熔化理论(相迁移理论)·····	(256)
一、实验观察·····	(257)
二、数学分析·····	(260)
1、 Δz 距离上固相物料的质量平衡·····	(261)

2、熔膜内 z 向单位距离(长度)上的质量平衡	(262)
3、分界面上的热量平衡	(263)
三、应用举例	(269)
四、Tadmor熔化理论中存在的问题	(282)
5—4 加料段的固体输送理论	(284)
一、加料段的组成	(285)
1、料斗段	(285)
2、固体输送段	(286)
3、迟滞段	(287)
二、达内尔和莫尔的固体摩擦理论	(288)
1、固体摩擦理论的基本方程	(288)
2、对方程的分析讨论	(293)
3、计算举例	(300)
三、关于加料段的其他几种理论	(305)
1、对固体摩擦理论的修正	(305)
2、粘性剪切理论	(306)
3、自由质点在螺旋中的运动	(308)
5—5 挤出理论对螺杆设计的指导作用	(309)
第六讲 塑料注射成型过程分析	(312)
6—1 概述	(312)
6—2 注射成型周期的各阶段分析	(316)
一、充模阶段	(318)
二、保压阶段	(320)
三、倒流阶段	(322)

四、浇口冻结后的冷却阶段·····	(222)
6—3 注射成型工艺条件分析·····	(324)
一、注射物料的加热塑化·····	(324)
1、加热效率·····	(324)
2、塑化量·····	(330)
3、注射温度对制品力学性能的影响·····	(332)
二、注射压力·····	(335)
1、在机筒中注射压力的损失·····	(336)
2、模具内的压力分析·····	(341)
三、充模速度·····	(344)
四、模具温度·····	(346)
6—4 热塑性塑料注射的可模性·····	(349)
一、可模性的评定·····	(349)
二、可模性的测定·····	(350)
1、成型图·····	(350)
2、最短注射周期·····	(352)
3、测定可模性用模的选择·····	(353)
4、螺旋流动试验·····	(354)
6—5 注射制品的热收缩、内应力和熔接缝·····	(355)
一、收缩问题·····	(356)
1、塑料注射制品热收缩的特点·····	(356)
2、平均收缩率的计算·····	(358)
3、影响注射制品收缩的因素·····	(360)
二、内应力问题·····	(364)
三、熔接缝对注射制品力学性能的影响·····	(368)

第七讲 塑料压延过程中的流动分析	(371)
7—1 压延过程中的动量方程处理	(372)
7—2 钳住区的压力分布	(374)
一、压力分布方程的推导.....	(374)
二、始钳住点和终钳住点的关系.....	(379)
三、压力分布曲线讨论.....	(380)
7—3 辊筒的分离力	(383)
7—4 钳住区的速度分布	(387)
7—5 压延过程中的剪切作用	(389)
一、剪切速率和剪切应力.....	(389)
二、用于剪切所消耗的功率和产生的热量.....	(392)
7—6 应用举例	(394)
7—7 非牛顿流体的压延流动分析	(399)

第一讲 塑料熔融体的流变性能

1—1 引言

“流变学”是研究材料流动和变形的专门学科，它作为物理学的一个分支，是在弹性力学、塑性力学和流体力学等基础上发展起来的。“流变学”的希腊文原意为“流动学”，在日本也称为“流动学”。其实流动和流变在本质上并无区别，流动的结果必然要导致形变。中文称为“流变学”似乎更形象、更确切一些。

固体材料的流动往往不易被觉察，其实只要有足够的观察时间，还是可以发现它在变形。古人早有“万物皆流”之说，只是不同材料流动难易和变化大小的程度不同而已。这种流动的难易往往表现为流动时的粘度大小，例如：气体的粘度小于 10^{-4} 泊，它们随时随地都在流动；熔点附近的低分子液体，粘度约 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 泊，流动也很容易；结晶材料的粘度可大于 10^{18} 泊，流动就不易发现了。通常认为在较小应力作用下，把粘度 10^{18} 泊数量级当作为固体与液体的分界线，在这种粘度条件下，对一立方时的物体施加相当于一个人体的重力时，一年内大约产生0.1时的流动形变。

虽然自然界中从浩瀚的宇宙到微小的生物细胞，甚至剧烈的热核反应系统，都与流动有关，然而流变学作为一门独

立的学科出现，还只不过五十余年的历史。当前，这门学科已渗透到机械、建筑、水利、运输、冶金、化工和宇宙飞行等各个领域。近年来，流变学方法已用于研究宇宙飞船喷射推进过程，也用来研究地球大板块的漂移以及气象、地震、乃至人体新陈代谢的流变过程。可见在当代科学发展中，流变学已成为一门非常重要的学科。

高分子材料的使用和加工与高聚物的流动和变形有着密切的关系。随着高分子材料工业的发展，逐渐出现了现代流变学的重要分支——高聚物流变学。高聚物流变学主要研究液态高聚物（包括高聚物熔融体、溶液、溶胶等）和固态高聚物的流变性能，前者对高分子材料的成型有很大实际意义，后者则对固体高聚物的使用和加工非常重要。

高分子材料的分子置远远超过低分子材料，因而在流动过程中就会表现出异乎寻常的特点。例如：

（1）高分子材料的流动机理与低分子不同

从分子形状来看，小分子通常都看作球形对称状态，分子的流动是通过分子之间的“空洞”，从一个位置跃迁到另一个位置实现的。可是高聚物分子呈长链形不对称形状，分子直径约5埃（1埃 = 10^{-8} 厘米），长度为1,000~10,000埃或更大。以分子量为 5.6×10^6 的聚异丁烯为例，如果将分子拉直，长约25微米，等于其粗细的5万倍。要是把这样的分子放大到直径为1毫米的话，其长度可达50米。从经验得知，这样形状分子根本不可能象任何小分子那样灵活地一下穿越过某个“空洞”，更何况分子之间还互相缠结呢！因而高聚物分子的移动只能通过大分子分段运动来实现，也就是先有若干链段变形，然后再另外一些链段变形，逐渐导致大分子重

心改变，于是大分子改变位置，这就产生了流动。

(2) 高聚物熔融体流动时粘度很大

普通低分子液体在常温时的粘度约为0.01泊，极粘的约 10^5 泊。塑料熔融体的粘度一般在 $10^2 \sim 10^8$ 泊之间，有的甚至达 10^{12} 泊，粘度大小是流体流动阻力的反映。从高聚物的流动机理可以推知，分子量越大，流动时阻力也越大，表现出的粘度也一定越大。粘度大，流动时就必须有较大的推动力，也就是需要足够的压力。

(3) 高聚物熔体流动通常呈现非牛顿性

低分子液体通常都是牛顿液体，流动时的粘度除了随温度变化而改变外，与剪切应力和剪切速率大小无关。而塑料熔融体的粘度除了与温度有关外，还随剪切应力和剪切速率的变化而改变，而且大多随剪切应力和剪切速率的增加而下降。由于这种非牛顿性，就引起塑料成型工艺的复杂化。

(4) 高聚物熔融体是一种粘弹性材料

在高聚物熔体流动过程中，除了出现不可恢复的粘性形变外，还包含着一部分可恢复的弹性形变，这在低分子液体的流动中是不存在的。就材料的形变特点而言，可分为弹性固体和粘性流体两类。前者的特征在于物体受外力作用时产生形变，外力除去后立即复原，形变完全消失。粘性流体的特点在于施加外力后它就流动，除去外力流动便停止，但不能恢复原来的形状。一般固体在弹性极限内属弹性体，气体和一般低分子液体都属流体。弹性固体和粘性流体的形变特性即弹性和粘性是物质流变性能的两个极端。如果材料的流变性能介于二者之间，则称此材料为粘弹性材料。塑料熔融体是典型的粘弹性材料，它在外力作用下流动，同时又出现弹

性形变（或称可恢复形变）；外力停止作用后，流动停止，弹性形变部分则恢复原状。象这样的粘弹性材料，是现代流变学所研究的主要对象。

流变学的主要任务之一是要研究材料在流动过程中应力、应变以及应变速率之间的关系，并用流变状态方程（或称本构方程）表示出来。显然，这样的关系式对塑料成型来说是非常重要的。因而高聚物流变学是从事塑料成型加工的科技人员必修科目之一。

流变学在研究方法上有两个方面：一是现象学（或称表象论），这是通过宏观的实验结果对流动现象描述，得到应力、应变与时间的关系式；另一是分子论，就是用分子结构的微观理论解释现象，它能把高聚物的流变过程与形态结构学联系起来，因而成为当前流变学研究的主要方向。但是从工程角度来看，表象论往往更能解决实际问题。

流体的流变学与流体力学研究的对象都是流体，涉及到同样一些可测定的物理量、基本定律和方程。但是，二者研究的目的不同。简单说来，流体力学的研究任务在于根据体系的运动方程和流体的流变性质，揭示出体系的压力降与流速的关系；而流变学的研究任务则是根据体系的运动方程和压力降与流速的关系，确定流体的流变性质。它们在解决实际问题时，显然是互相联系的。

塑料成型工业应用流变学的历史还才二、三十年，但已取得相当可观的成绩，发展是很快的。但是由于塑料成型过程的复杂性，例如高聚物大分子链结构的不均一性（如分子量分布和长支链支化），分散体系的不均一性（如颗粒大小分布和填料的不均一性），塑料熔融体的粘弹性，成型过程

中由热、力、氧等因素引起的高聚物降解以及形变过程的复杂性（例如包括剪切、拉伸、压缩形变）等等，使得目前的研究主要限于定性阶段。对于塑料成型的全面科学理论和定量描述，还有待于今后深入研究。

1—2 塑料熔融体的粘性流动

一、基本概念

剪切应力、剪切速率和粘度是流变学中应用最广泛的术语。流变学的主要研究内容，就是要确定流体流动过程中剪切应力和剪切速率之间关系。因此有必要先对这些名词的概念进行讨论。

1.1 剪切应力

当两个互相接触的物体有相对运动或运动趋势时，接触面上就会产生阻碍运动的力，这种力叫做摩擦力。流体在流动时，如果各层流体的流速不相等，那么在相邻两流体层之间也会形成一对阻碍运动的、等值而方向相反的摩擦力，这种摩擦力出现在流体内部，叫做内摩擦力。象这种内摩擦力的作用可以通过观察河道中的水流来说明：越靠近河岸，水流速度越小，离河岸远一些，则流速大一些，在河道中心处流速最大。这说明不但河岸对它邻近的水流有约束作用，而且流体内部相对运动时，也存在互相约束的力，这就是内摩擦力。内摩擦现象也叫粘滞现象。

通常用“应力”这个名词来表示物体单位面积上所受的作用力。在流体流动中，单位面积上的内摩擦力即为剪切应