



普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 塑料成型 工艺学

SULIAO CHENGXING GONGYIXUE

主 编 白剑臣 姚志光 郭俊峰

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

普通高等教育“十二五”创新型规划教材

# 塑料成型工艺学

主编 白剑臣 姚志光 郭俊峰

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本教材包括十个模块：模块一绪论；模块二塑料成型的理论基础；模块三塑料成型用的物料及其配制；模块四压缩模塑；模块五挤出成型；模块六注射成型；模块七中空吹塑成型；模块八泡沫塑料成型；模块九其他成型；模块十塑料的机械加工、装饰和装配。

本教材为高等院校高分子材料应用技术及相关专业的专业课教材，也可供从事高分子材料生产的技术人员和管理人员培训用书及参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目 (CIP) 数据

塑料成型工艺学 / 白剑臣, 姚志光, 郭俊峰主编. —北京: 北京理工大学出版社, 2012. 12

ISBN 978 - 7 - 5640 - 7134 - 9

I. ①塑… II. ①白… ②姚… ③郭… III. ①塑料成型 - 工艺 - 高等学校 - 教材 IV. ①TQ320.66

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2012) 第 310818 号

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / <http://www.bitpress.com.cn>

经 销 / 全国各地新华书店

印 刷 / 北京通州皇家印刷厂

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 271 千字

责任编辑 / 廖宏欢

版 次 / 2012 年 12 月第 1 版 2012 年 12 月第 1 次印刷

责任校对 / 周瑞红

定 价 / 39.00 元

责任印制 / 王美丽

---

图书出现印装质量问题, 本社负责调换



# 前 言

塑料制品涉及国民经济和人民生活的各个方面，如汽车、家用电器、化工、建材、医疗卫生、农业、军事、航天工业等。为满足社会对塑料成型加工人才的迫切需要，培养更多和更优秀的工程技术人员，我们在总结多年教学实践经验的基础上特编写本教材。

本教材在编写过程中遵循以下两个原则：

## 1. 理论知识够用及专业针对性原则

高分子材料涉及的内容较多，如聚合物的合成工艺，高分子材料的性能及测试，成型加工工艺等，由于课时所限，不可能面面俱到。在理论安排上，区别于传统的“理论系统、全面”，以“理论适度、够用”为原则，删除了大量、冗杂的公式及其推导过程，在内容安排上突出了理论知识的应用性。

## 2. 理论联系实际的原则

本教材在内容编排上，尽可能在理论讲解之后，安排适当的实践操作环节。通过各种应用实例，使学生能够在做中学，在学中做，学做结合，力求满足高分子专业学生在工作岗位上对高分子材料知识及技能的需求。

本教材由白剑臣、姚志光、郭俊峰主编。全书共十个模块，其中模块一、模块二和模块三由白剑臣编写；模块四、模块五和模块六由姚志光编写；模块七、模块八、模块九和模块十由郭俊峰编写。

本教材在编写过程中参考了大量的文献、教材，在此作者深表感谢。

限于编者水平有限，书中难免有不妥和疏漏之处，恳请同行和读者批评指正。

编 者  
2012 年 12 月



# 目 录

模块一 绪论 .....	1
课后任务 .....	5
模块二 塑料成型的理论基础 .....	6
项目一 聚合物的加热与冷却 .....	6
项目二 聚合物的流变特性 .....	9
单元一 黏性流动和黏度 .....	9
单元二 温度和压力对黏度的影响 .....	12
单元三 聚合物的弹性和流动缺陷 .....	14
项目三 聚合物在成型中的物理和化学变化 .....	17
单元一 聚合物的结晶 .....	17
单元二 聚合物的取向 .....	21
单元三 聚合物的降解 .....	27
单元四 聚合物(热固性塑料)的交联 .....	28
课后任务 .....	29
模块三 塑料成型用的物料及其配制 .....	31
项目一 塑料成型用物料的组成及其特性 .....	31
单元一 聚合物树脂及其特性 .....	31
单元二 助剂及其主要特性 .....	36
项目二 塑料成型用物料的配制 .....	43
单元一 粉料的配制 .....	43
单元二 粒料的配制 .....	47
单元三 溶液的配制 .....	53
单元四 分散体的配制 .....	55
课后任务 .....	57

模块四 压缩模塑 .....	58
项目一 概述 .....	58
项目二 成型前准备 .....	59
单元一 预压 .....	59
单元二 预热 .....	61
单元三 成型设备 .....	65
项目三 模压工艺 .....	69
单元一 模压过程和操作方法 .....	69
单元二 模压成型的控制因素 .....	71
项目四 冷压烧结成型 .....	74
单元一 冷压成型 .....	74
单元二 烧结 .....	74
项目五 塑料模压成型实例 .....	77
单元一 热塑性塑料模压成型实验 .....	77
单元二 热固性塑料的模压成型 .....	81
课后任务 .....	85
模块五 挤出成型 .....	86
项目一 概述 .....	86
项目二 挤出设备 .....	87
单元一 螺杆挤出机 .....	88
单元二 机头和口模 .....	94
单元三 辅机 .....	99
项目三 挤出机的操作 .....	99
单元一 单螺杆挤出原理 .....	99
单元二 挤出机的一般操作方法 .....	99
项目四 单螺杆结构设计 .....	100
项目五 双螺杆挤出原理 .....	105
单元一 分类 .....	105
单元二 反向啮合型双螺杆挤出机 .....	106
单元三 同向啮合型双螺杆挤出机 .....	106
单元四 非啮合型双螺杆挤出机 .....	108
项目六 几种制品的挤出工艺 .....	108
单元一 管材的挤出 .....	108

单元二 吹塑薄膜的挤出 .....	111
单元三 双向拉伸薄膜的平挤 .....	115
课后任务 .....	119
<b>模块六 注射成型</b> .....	120
项目一 概述 .....	120
项目二 注射模塑的设备 .....	122
单元一 注射系统 .....	123
单元二 锁模系统 .....	128
单元三 注塑模具 .....	130
项目三 注塑工艺 .....	133
单元一 成型前的准备 .....	133
单元二 注射过程 .....	135
单元三 制件的后处理 .....	137
单元四 注射模塑工艺条件的分析讨论 .....	138
项目四 几种常用塑料的注射模塑特点 .....	143
单元一 聚苯乙烯塑料 .....	143
单元二 聚丙烯塑料 .....	144
单元三 聚酰胺塑料 .....	145
单元四 聚碳酸酯塑料 .....	146
项目五 热固性塑料的传递模塑和注射模塑 .....	148
单元一 传递模塑 .....	148
单元二 热固性塑料注射模塑 .....	150
项目六 反应注射模塑 .....	151
项目七 注射模塑的发展 .....	152
单元一 排气式注塑 .....	153
单元二 结构发泡注塑 .....	153
单元三 夹心注塑 .....	153
单元四 流动注射模塑 .....	155
单元五 无分流道赘物的注射成型 .....	155
单元六 共注射成型 .....	156
单元七 气辅注塑 .....	156
课后任务 .....	158

<b>模块七 中空吹塑成型</b> .....	159
项目一 挤出吹塑 .....	160
单元一 挤出吹塑设备 .....	160
单元二 吹塑成型技术 .....	163
单元三 挤出类型 .....	164
单元四 制品质量和壁厚调整 .....	167
单元五 吹塑过程中的影响因素 .....	169
项目二 注射吹塑 .....	170
单元一 注射吹塑概述 .....	170
单元二 注射吹塑影响因素 .....	172
项目三 拉伸吹塑 .....	172
单元一 拉伸吹塑工艺 .....	173
单元二 拉伸吹塑工艺控制 .....	174
项目四 多层吹塑 .....	176
项目五 大型中空吹塑 .....	177
课后任务 .....	178
<b>模块八 泡沫塑料成型</b> .....	179
项目一 概述 .....	179
项目二 泡沫塑料的发泡方法及原理 .....	179
单元一 物理发泡法 .....	180
单元二 化学发泡法 .....	180
单元三 机械发泡法 .....	181
单元四 泡沫塑料的发泡原理 .....	182
项目三 泡沫塑料的成型工艺 .....	183
单元一 聚苯乙烯泡沫塑料 .....	183
单元二 聚乙烯泡沫塑料 .....	186
单元三 聚氨酯泡沫塑料 .....	188
课后任务 .....	189
<b>模块九 其他成型</b> .....	190
项目一 压延成型 .....	190
单元一 压延设备 .....	191
单元二 压延工艺 .....	194



单元三 压延成型的进展 .....	198
项目二 浇铸成型 .....	198
单元一 静态浇铸 .....	198
单元二 嵌铸 .....	199
单元三 离心浇铸 .....	200
单元四 流延浇铸 .....	200
单元五 搪塑 .....	200
单元六 滚塑 .....	202
项目三 热成型 .....	202
单元一 热成型的设备 .....	204
单元二 热成型工艺 .....	205
单元三 热成型常用的塑料 .....	207
课后任务 .....	208
模块十 塑料的机械加工、装饰和装配 .....	209
项目一 机械加工 .....	209
单元一 车削 .....	211
单元二 铣削 .....	212
单元三 钻削 .....	212
单元四 切螺纹 .....	213
单元五 激光加工 .....	214
项目二 修饰 .....	215
单元一 机械整饰 .....	215
单元二 涂装 .....	217
单元三 箔压印 .....	217
单元四 植绒 .....	217
单元五 镀金属 .....	218
项目三 装配 .....	218
单元一 机械连接 .....	219
单元二 焊接 .....	220
课后任务 .....	221
参考文献 .....	222

(2) 包装业：编织袋、网眼袋、集装袋，包装薄膜、复合薄膜；各种中空容器、周转箱、集装箱、开口桶、瓦楞箱、捆扎绳、打包带和泡沫塑料等。

(3) 工业：在电器工业上已大量使用塑料制作绝缘材料和封装材料；在电子和仪表工业上，用塑料制作各种精密、绝缘、高强度的制件、制品及壳体；在机械工业中，用塑料做成传动齿轮、轴承、轴瓦及各种零部件；在化学工业中，用塑料做各种防腐的容器、管道、槽、罐等。

(4) 建筑业：塑料门、窗、楼梯扶手、天花板、隔热隔音板、地板砖、地板革、地毯、落水管道、上下水管道与管件、塑料壁纸、装饰板和卫生洁具、煤气和天然气管道等，又称为化学建筑材料。

(5) 医疗与器械工业：制造人工假肢、人工骨、人工肾、心脏起搏器、假牙及医疗用输血袋、输液袋，一次性使用的注射器等各种医疗器械与器具。

(6) 国防尖端工业：从常规武器、火箭、导弹、飞机、舰艇到人造卫星、宇宙飞船和原子能工业中所用的各种烧蚀材料、耐腐蚀材料和高强度、高模量的增强复合材料和工程塑料，都是其他材料所不能代替的。

(7) 交通运输：汽车、火车、船舶等交通工具及相应的附属设施所用的塑料，可减轻交通运输器和飞行器本身的重量，提高运行和飞行速度，增加载重量，降低能耗。

(8) 办公及家用电器工业：塑料已应用在各种办公用具如复印机、打字机、计算机，以及各种家用电器如电视机、电冰箱、洗衣机、电风扇、空调器、吸尘器的制造中，作为绝缘、保温、防腐、耐寒、防潮、阻燃的壳体，耐磨、精密的零部件成为不可或缺的材料。

(9) 日常用品和体育器材：如塑料雨衣、手提包、塑料凉鞋、塑料拖鞋、各种塑料玩具、牙刷、肥皂盒、热水瓶壳、塑料餐具（碗、杯、碟、盘、勺）等日用品。选用增强复合塑料制作各种体育器材，如撑杆、单双杠、赛艇等，还将不断开发新的体育器材。

事实上，塑料的使用几乎进入了国民经济的一切领域，与工农业和人民生活密切相关。塑料制品在今后的发展方向是：简化生产流程、缩短生产周期；加深对塑料成型过程中所发生的物理和化学变化的认识，以改进生产技术、方法和设备；实现全面机械化和自动化；设计更大、更新的设备以适应大型、微型、精密或新型塑料制品生产的要求。

## 2. 塑料制品成型及其在塑料工业中的重要性

塑料工业包括塑料原料（树脂、助剂）的生产、塑料的配制和塑料制品的成型、塑料成型机械和模具的生产三个生产系统。后两个生产系统的结合又称为

塑料制品工业。如果没有塑料原料的生产并借助塑料成型机械及模具作为桥梁，就不可能实现塑料制品的生产。因此，上述三个生产系统是塑料工业体系不可分割的重要组成部分，三者又是互相依存、相互制约、相互促进、共同发展的。图 1-1 为塑料工业的生产示意图。

塑料制品的生产，是将塑料原料助剂通过高效、经济、巧妙地组合后成型为制品，可生产出绚丽多彩、千姿百态的产品。塑料制品生产的目的是充分发挥各种树脂和各种塑料的固有特性，利用多种成型方法，借助塑料成型机械和模具，使之成型为具有一定形状和内在性能的，能满足使用要求的制件、制品和型材。

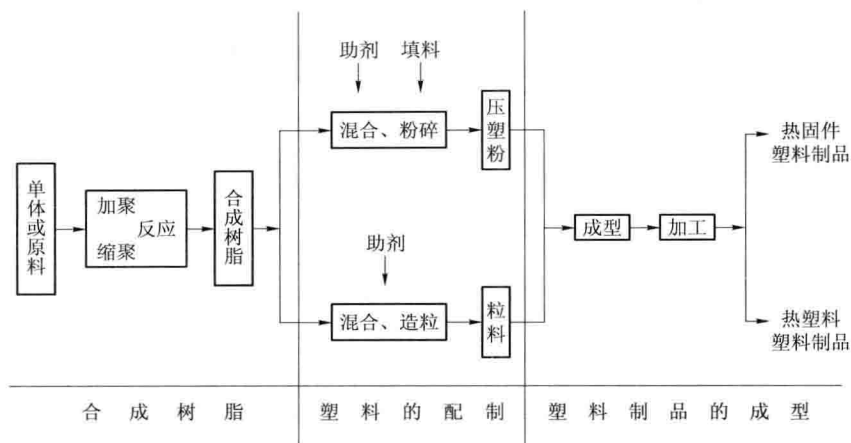


图 1-1 塑料工业的生产示意图

塑料制品生产系统是由成型、机械加工、修饰和装配四个连续的生产过程所组成的（如图 1-2 所示）。

成型是将各种形态的塑料（粒料、粉料、溶液或分散体）制成所需形状的制品或制件的过程，它是生产塑料制品必经的重要过程。成型的方法很多，包括模塑、挤出、注塑、层压、压延等。其他三个过程又称为制品的二次加工，通常是根据制品的要求而取舍。机械加工是指在成型后的制件上进行钻孔、切螺纹、车削或铣削等过程，它是为辅助成型过程不能完成或完成不准确而做的一些加工。修饰的目的是美化塑料制品的外观，对制品表面进行磨削、抛光、增亮、涂层和涂盖金属等。装配是将已成型的各个部件连接黏合或配套成为一个完整制品的过程。

在组织生产塑料制品之前，应充分了解这种制品在物理、力学、耐热、耐化学性、耐候性方面的技术指标，根据性能要求，选择合适的塑料原料及助剂，确定成型加工方法及成型机械设备，并对生产过程成本和经济效益进行估算，再通过试制确定生产工艺条件、生产工艺操作规程。在工艺操作规程中，对每个工序

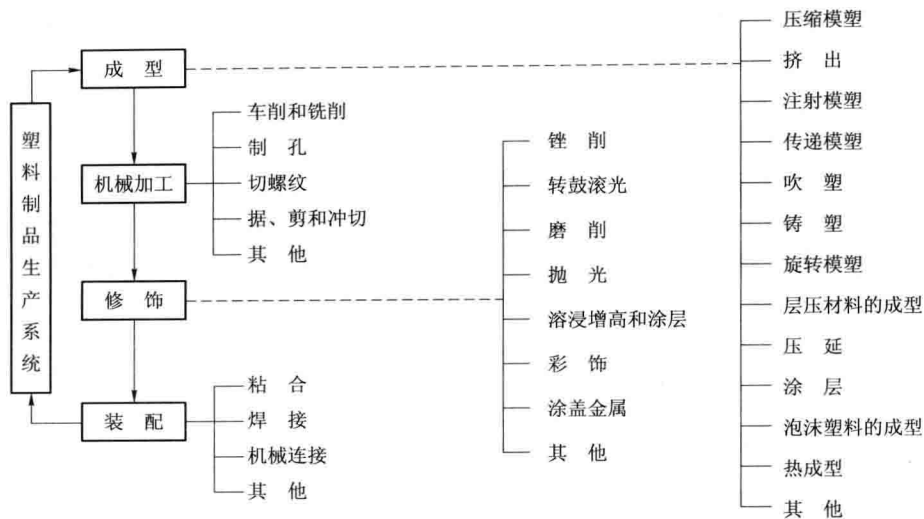


图 1-2 塑料制品的生产系统

的操作条件提出明确的指标，并规定所允许的差值，以保证安全生产和产品的质量，在实践的基础上不断完善工艺操作规程。

现代工业的发展，新型塑料的产生和对塑件多样化的需求，促进了塑料成型技术的不断发展与创新。近年来，出现了许多新的塑料成型工艺，如注射成型技术方面的无流道凝料注射成型、热固性塑料注射成型、排气注射成型、反应注射成型以及多品种塑料的共注射成型；生产复合多层容器、片材和型材的多台挤出机，将不同塑料送入共挤出模的共挤出成型，发泡塑料制品的注射和挤出技术等。

目前，塑料成型技术正朝着精密化、微型化和超大型化方向发展。精密注射成型可将成型制品的尺寸公差控制在  $1 \sim 10 \mu\text{m}$ ，其制品主要用于电子、仪器仪表等工业。在成型微型制件方向，德国已研制出注射量只有  $0.1 \text{ g}$  的微型注射机，可以生产  $0.05 \text{ g}$  左右的微型塑件（如表铀等）。超大型注射机可以成型超大型塑件，目前，法国已拥有注射量为  $170 \text{ kg}$  的超大型注射机，合模力为  $150 \text{ MN}$ ，美国和日本已分别生产出注射量为  $100 \text{ kg}$  和  $96 \text{ kg}$  的超大型注射机。

### 3. 本课程的主要内容和要求

本课程是在学生已具有化学、力学、质量和能量传递、化工原理及过程、机械设备基础、高分子化学及物理学和塑料性能基本知识的基础上，讲授塑料成型工艺和设备的专业课程，是高分子专业的核心课程之一。本书的主要内容是阐述塑料制品重要成型方法的原理、特点、工艺过程、主要工艺参数的选定及对塑料

制品性能的影响；主要设备的结构特性、工作原理、技术参数及设备的选型，结合设备特点及工艺条件对塑料制品性能的影响及关系。目的是使学生初步建立塑料制品生产的完整概念。根据塑料制品的使用特性，学会选择原料、成型方法、成型设备、确定工艺方案、制定工艺条件及操作规程，组织生产出合格产品。

学习时，要求掌握各种成型方法的原理、特点、塑料在成型过程中所发生的物理与化学变化、各控制因素对制品性能的影响；掌握各种成型机械设备的工作原理、结构特点，学会正确选型及在生产中的调试；学会全面分析生产中出现的各种故障产生的原因及排除方法。

塑料成型工艺是一门实践性很强的课程，除了课堂教学外，还需在实验、学习中联系生产实际去理解和掌握，有些生产实际操作，还需在劳动实践中逐步学习，这样学到的知识才可以灵活运用。

## 课后任务

1. 何谓成型加工？塑料成型加工的基本任务是什么？
2. 简述塑料成型加工时的关键步骤。
3. 简述塑料工业生产的生产历程。
4. 塑料成型加工方法是如何分类的？简要分为哪几类？
5. 简述成型加工的基本工序。
6. 简述塑料的优缺点。
7. 举实例说明塑料在汽车、机械、日用品、化工、航天航空工业等领域的应用。
8. 简述学习塑料加工成型工艺的目的、意义。

## 模块二

# 塑料成型的理论基础

塑料成型是将塑料（聚合物及所需助剂）转变为具有实际使用价值的实用材料或塑料制品的一门工程技术。

在成型加工过程中，塑料将呈现出各种物理和化学变化行为，从而构成材料不同的形态结构，表现出不同的性能。因此，充分认识塑料在各种外在条件下所表现出的物理、化学行为，对合理设计配方、发展工艺以及对成型设备提出技术要求，都是非常重要的。

## 项目一 聚合物的加热与冷却

在成型加工过程中要使聚合物流动和成型，进行加热与冷却是必需的。材料加热与冷却的难易程度是由热量传递的速率所决定的。众所周知，热传递有热传导、对流和辐射三种形式。实际上，包括聚合物在内的一切工程上的传热过程大多是不稳定的，即温度场是随时间变化的。因为在非稳定体系中的加热与冷却，热量既通过材料传递，同时又改变着材料的温度。引入热扩散率  $\alpha$  这一概念，就是把导热系数与定压比热容两者都包括在内：

$$\alpha = \lambda / (C_p \rho) \quad (2-1)$$

式中  $\lambda$ ——导热系数；

$C_p$ ——定压比热容；

$\rho$ ——密度。

### 1. 导热系数（热导率）

固体材料的导热性变化很广，导热系数值覆盖四个数量级。这种导热系数的差异，与材料的分子结构及所在的环境有关。对聚合物来说，扩散速率强烈地依赖于邻近原子的振动和结合的基团。因此，强烈共价键构成的结晶结构，比极度无序结构的无定形物的导热系数高得多，表 2-1 列出了常见高分子材料的热性能数据。

见表 2-1 的数据可以得出结论：① 固态聚合物的导热系数范围是很窄的，均在  $0.22 \text{ W}/(\text{m} \cdot \text{k})$  的两倍以内；② 结晶聚合物比无定形聚合物的导热系数偏高；③ 多数结晶聚合物的导热系数随着密度和结晶度的增大而增大；④ 无定形聚合物的导热系数随着链长的增加而增大；⑤ 某些聚合物的导热系数随着温度的升高而增大，另一些聚合物则相反，由于聚合物的拉伸取向，会引起导热系数的各向异性。

表 2-1 常见高分子材料的热性能数据（常温）

材 料	$C_p/(\text{J}/\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$	$k/(\text{W}/\text{m}^2 \cdot ^\circ\text{C})$	$\alpha/(10^{-8} \text{ m}^2/\text{s})$
聚酰胺	1 700	2 300	12
聚乙烯（高密度）	2 300	46	18.5
聚乙烯（低密度）	2 300	33	16
聚丙烯	1 900	14	8
聚苯乙烯	1 300	13	10
聚氯乙烯（硬）	1 000	21	15
聚氯乙烯（软）	1 300 ~ 2 100	13 ~ 17	8.5 ~ 6.0
ABS 树脂	1 600	21	11
聚甲基丙烯酸甲酯	1 500	19	11
聚甲醛	1 500	23	11
聚碳酸酯	1 300	19	13
聚砜	1 300	26	16
酚甲醛塑料（木粉填充）	1 500	23	11
酚甲醛塑料（矿物填充）	1 300	50	22
脲甲醛塑料	1 700	36	14
密胺塑料	1 700	19	8
醋酸纤维素	1 700	25	12
玻璃	840	80	37
钢材	500	4 600	950
铜	400	41 800	1 200

## 2. 温度对热扩散率的影响

热扩散系数又称导温系数，它表征物体在加热或冷却过程时各部分温度趋向

一致的能力。表 2-1 中所列举的热扩散率为常温下的数值，当温度变化时，式 (2-1) 等号右边的几个因素都随温度变化而变化，计算颇为繁杂。但从实验数据进行分析，在较大温度范围内各种聚合物的热扩散率变化幅度通常都不足两倍。总的趋势是随着温度的升高，聚合物在由玻璃态向熔态转变过程中，其热扩散率是逐渐下降的，在熔态下的较大温度范围内却几乎保持不变，原因可解释为，在熔态下比热随温度上升而增大的趋势恰被密度随温度上升而下降的趋势所抵消。

由于聚合物的导热系数小，冷却和加热都不容易；同时聚合物处于黏流态时的黏度都很高，对流传热速度也是很小的。聚合物的这一低传热属性不仅影响成型效率，而且给受热均匀性带来了困难。加大温差固然可以提高传热效率，但又受到局部高温易引起聚合物降解变质的限制。在冷却过程中，冷却介质与熔体之间的温差太大，又会因内应力的产生而使制品的物理力学性能变劣。

### 3. 聚合物的摩擦热对流动的影响

在塑料成型过程中，由于聚合物熔体的黏度都很大，在发生熔体流动时会因内部分子的摩擦而产生显著的热量。这种摩擦热在单位体积的熔体中产生的速率  $q_v$  为

$$q_v = \frac{1}{J} \tau \dot{\gamma} = \frac{1}{J} \eta_a \dot{\gamma}^2 \quad (2-2)$$

式中  $\tau$ ——剪切应力；

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率；

$\eta_a$ ——表观黏度；

$J$ ——热功当量。

从式中可以看出，摩擦热与剪切速率的平方成正比，而剪切速率的分布又以管中心处最低、管壁处最大，这就使得在导管中流动的熔体由于摩擦生热而在径向呈现温度梯度。另一方面，由于聚合物的黏度大，沿导管内流动方向上存在着较大的压力降，因而熔体在沿流动方向上表观黏度减小，体积逐渐膨胀。膨胀消耗热能，使液体的温度降低。由于受到管壁的限制和管壁处存在着较大的摩擦力，液体的膨胀率必然是中心最大而管壁处最小，所以中心部分的冷却效应比管壁附近的要大。

用摩擦热加热塑料是通过挤出机或注射机的螺杆与料筒的相对旋转运动等途径来实现的。由于聚合物的表观黏度随摩擦升温而降低，使物料熔体烧焦的可能性不大，而且塑化效率高，塑化均匀。



## 项目二 聚合物的流变特性

聚合物在成型过程中，一般都要发生流动和形变，即在外力作用下表现出黏性、弹性和塑性（塑性也可看作为黏性和弹性的组合）。流变学是研究物质流动同时发生形变规律的一门学科。聚合物的流动与形变强烈地依赖于聚合物的结构和外在条件。因此，研究聚物流变行为与温度、压力、时间、作用力等外在条件之间的依赖关系，就成为聚合物成型的重要课题。

### 单元一 黏性流动和黏度

在塑料成型过程中，液体的流动和变形都是在受到应力的情况下实现的。这些应力有剪切应力、拉伸应力和压缩应力三种。其中，对塑料成型影响最大的是剪切应力。因为成型时液态聚合物在设备或模具中流动的压力降、所需功率以及制品质量等都要受到它的制约。其次是拉伸应力，它经常与剪切应力同时出现，如用吹塑法或拉幅法生产薄膜，熔体在变截面导管中的流动以及单丝的生产等。在成型时压缩应力对流体性质影响相对较小，一般可忽略不计，但它对黏度有一定影响。

#### 1. 牛顿液体及其黏度

液体在平直管内受剪切应力而发生流动的形式有层流和湍流两种。层流是指雷诺准数小于 2 000 时的流型，其流体的流动是按许多彼此平行的流层进行，流体在同一层内流速相同，且各层之间无可见的扰动，如雷诺准数大于 4 000，则流型变为湍流。湍流时，流体内各点速度的大小和方向都随时间变化而变化，出现扰动。

层流可以用牛顿流体流动定律来描述：在一定温度下，施加于相距  $dr$  液层上的剪切应力  $\tau$  与层流间的剪切速率  $dv/dr$ （又称速度梯度）成正比，其表达式为

$$\tau = \eta (dv/dr) \quad (2-3)$$

式中  $\eta$ ——比例常数，称为牛顿黏度，简称黏度，单位为  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ 。

牛顿黏度  $\eta$  是液体本身所固有的属性，仅依赖于液体的分子结构和液体所处的温度，而与剪切应力和剪切速率无关。凡属层流的液体，且符合式（2-3）所示的关系，通称为牛顿液体。

#### 2. 剪切流动及其表观黏度

牛顿液体流动定律是研究低分子液体的流动行为时得出的结论，对于聚合物