

材料科学丛书

丁 浩 主 编

塑料加工基础

上海科学技术出版社

材料科学丛书

塑料加工基础

丁 浩 主编

上海科学技术出版社

塑料加工基础

丁 浩 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海商务印刷厂印刷

开本 850×1156 1/32 印张 11.5 字数 300,000

1981 年 8 月第 1 版 1981 年 8 月第 1 次印刷

印数 1—35,000

书号: 15119·2120 定价: (科四) 1.30 元

内 容 提 要

本书系统地介绍了塑料加工的基本原理、热塑性塑料的三大加工方法和国产塑料的流变性能。以上三部分组成了塑料加工的理论与实践基础。

全书共分七章。第一章为绪论；第二、三章为加工理论，介绍塑料流变学、塑料的热性能、热力学与传热学；第四、五、六章分别介绍热塑性塑料的三大加工方法——挤出、注压和压延；第七章介绍国产热塑性塑料的流变性能与物理化学性能。

本书可供从事塑料加工行业、模具制造行业、塑料机械行业、塑料测试行业以及使用部门的工程技术人员和工人同志在生产、设计、研究时参考使用。也可供大专院校和业余专科学校有关塑料成型加工、塑料机械等专业师生教学参考。

《材料科学丛书》编辑委员会

金属材料方面 · 无机非金属材料方面 高分子材料方面

主任委员 周志宏 主任委员 严东生 主任委员 钱宝钧

委 员(以姓氏笔划为序) 委 员(以姓氏笔划为序) 委 员(以姓氏笔划为序)

马龙翔 王之玺
王启东 田庚锡
师昌绪 孙珍宝
孙德和 许顺生
李 薰 李恒德
汪 显 沈华生
吴自良 杨尚灼
陈新民 杜鹤桂
张文奇 张沛霖
邹元炳 邵象华
周行健 周宗祥
周惠久 郁国城
林栋梁 柯 俊
胡为柏 钱临照
徐采栋 徐祖耀
郭可信 顾翼东
黄培云 傅元庆
蒋导江 童光照
葛庭燧 谭庆麟
魏寿昆

丁子上
干福熹
江作昭
苏 锵
吴中伟
张绶庆
袁润章
盛绪敏
黄蕴元
程继健

于 翹
王孟钟
方柏容
孙书棋
吴人洁
吴祥龙
李世璿
范 棠
张承琦
姚锡福
徐 僖
钱人元
郭钟福
姜书城

《材料科学丛书》序

无论在发展农业、工业、国防和科学技术方面，还是在人民生活方面，材料都是不可缺少的物质基础。材料的品种、数量和质量无疑是国家现代化程度的标志之一。随着材料的广泛生产和研究工作的不断深入，以及与材料有关的基础学科的日益发展，对材料的内在规律有了进一步了解，对各类材料的共性初步得到了科学的抽象，从而诞生了“材料科学”这个新的学科领域。

材料科学主要研究材料的组分、结构与性能之间的相互关系和变化规律，它是介于基础科学与应用科学之间的一门应用基础科学，与物理、化学、化工、电子、冶金、陶瓷等学科相互交叉、彼此渗透。热力学、动力学、固体物理、固体化学、化学物理等基础学科为材料科学提供理论基础，而材料科学又为应用科学提供发展新材料、新工艺和新技术的途径。

从当前来看，材料科学的发展大致有下列几方面的趋势：

(1) 高分子材料原料丰富、性能优良，在结构材料中所占的位置日益重要。塑料、合成橡胶和合成纤维比其他传统材料将有更大的发展。

(2) 功能材料显示广阔的发展前景。半导体的广泛应用，集成电路的发展，红外、激光和超导材料的发现和应用，使功能材料犹如异军突起，建立奇功。

(3) 在新能源材料方面，随着太阳能的利用，磁流体发电等的进展，出现了各种换能和储能材料，并已普遍受到重视。

(4) 对结构材料和耐磨、耐蚀等材料提出更高的要求，包括严酷的使用条件、更长的使用寿命等。

(5) 复合材料、定向结晶材料、初化陶瓷、定向石墨以及各种类型的表面处理与涂层的利用，使材料的效能进一步得到发挥。

(6) 探索材料在极端条件下的性能,例如玻璃态金属、超低温下的金属及金属氢都具有优越的性能。

(7) 改进制备工艺,提高质量,改进设计,更有效地使用材料。

(8) 对材料科学的基础研究趋向于更加深入和细致。尤其在表面,非晶态,原子象,固态中的杂质与缺陷,一维与二维结构,非平衡态,相变的微观机制,变形、断裂和磨损等的宏观规律和微观过程以及点阵结构的稳定性等领域,探索性研究正日益活跃。

人们期望,对材料基本规律的掌握将有助于按预定性能设计材料的原子或分子组成以及结构形态等。

我国在 1978~1985 年科学技术发展规划中把材料科学列为重点之一。我们必须十分重视和大力发展材料科学。

为了及时传播材料科学的基础理论,总结研究成果并扩大其工程应用,以有助于更快、更广泛地提高我国材料科学技术的水平,我们成立了《材料科学丛书》编辑委员会,由上海科学技术出版社出版这套丛书。

本丛书分为金属材料、无机非金属材料和高分子材料三个方面,选题包括材料科学的基础理论,研究方法和测试技术,研究成果,以及实际应用等方面。热忱地期望我国广大科学工作者,共同策进本丛书的编辑、出版工作,努力为我国早日实现四个现代化贡献力量。

《材料科学丛书》编辑委员会

一九七九年十二月

前 言

塑料是三大合成材料之一，在短短几十年中获得了迅速的发展。随着我国石油化学工业的高速发展，塑料工业将会屹立于工业之林，越来越显示出它的重要性。

塑料的成型加工是塑料工业中的重要环节，塑料加工厂是合成树脂厂与使用单位的桥梁。为了提高加工水平，无论是产品设计、模具设计、塑料机械设计，还是制品生产都不能仅凭经验办事，必须用理论知识特别是用高聚物流变学来定性或定量地分析问题和解决问题，否则很难举一反三用之于实践。

全书共分七章。第一章为绪论；第二、三章为加工理论，介绍塑料流变学、塑料的热性能、热力学与传热学；第四、五、六章分别介绍热塑性塑料的三大加工方法——挤出、注压和压延；第七章为塑料测试性能，介绍国产热塑性塑料的流变性能与物理化学性能；各章章末还列出了若干参考文献供查阅；最后附录中列出了塑料名词缩写、特殊单位换算、以及塑料的收缩率等，供使用时参考。

本书第四、五、六章中有关工艺部分以及第七章第二、三节由陆玉本编写，第七章第一节的流动曲线以及其他流变数据由吴德珍、朱复华等通过实地测试计算绘制和整理。

由于我们水平有限，编写时间比较匆促，本书只能作为抛砖引玉，希望和同志们共同学习，使我们的塑料加工水平向前迈进一步，为我国早日实现四个现代化添砖加瓦。书中难免有不少缺点和错误，请同志们批评指正。

在本书编写过程中，始终得到上海胜德塑料厂、北京塑料研究所党组织和各级领导的关怀和支持，以及同志们热情鼓励和帮助；上海塑料研究所郭锺福总工程师为本书两次技术审阅，提出了宝贵的修改和补充意见；成都科技大学徐信教授对全书结构提出

了珍贵的意见;蔡家洪、陶国源、崔经国、蔡家和等工程师,以及大连橡胶塑料机械厂等单位予以热情支持,提供了许多资料;蔡秀文同志为本书绘制了插图,我们衷心感激,深厚致谢。

编 者
一九八〇年十月

目 录

第一章 绪论	1
第二章 塑料流变学	4
第一节 流变学概述	4
第二节 流体流动的基本方程式	8
第三节 非牛顿型流体	19
第四节 塑料的粘弹性行为	29
第五节 温度和压力对流体流变性能的影响	34
第六节 流体在简单几何形状导管内的流动	40
第七节 流变行为的测量	53
第八节 例题	60
第三章 塑料的热性能与传热学	79
第一节 塑料的热性能	79
第二节 热力学	82
第三节 热传导	101
第四节 对流传热	110
第五节 热辐射	114
第六节 加热	117
第七节 例题	121
第四章 挤出成型	131
第一节 概述	131
第二节 挤出理论	134
第三节 螺杆设计	144
第四节 单螺杆挤出的新理论	148
第五节 双螺杆挤出机	152
第六节 机头模子设计	161
第七节 挤出工艺	176
第八节 例题	176

第五章 注射成型	195
第一节 概述	195
第二节 流变学与注塑过程的关系	204
第三节 注压机的发展	211
第四节 注塑模的设计	213
第五节 残余应力与分子取向	222
第六节 注塑工艺	225
第七节 例题	244
第六章 压延成型	251
第一节 概述	251
第二节 压延机设计探讨	257
第三节 横压力或滚筒分离力	262
第四节 压延工艺	269
第五节 例题	271
第七章 塑料测试性能	277
第一节 国产塑料熔体的流变性能	277
第二节 各种热塑性塑料的物理化学性能	305
第三节 合成树脂的分子结构	336
附录	349
I. 塑料及树脂缩写代号	349
II. 常用塑料的收缩留量和收缩率	352
III. 特殊单位换算表	354

第一章 绪 论

1-1 塑料工业 从本世纪初到现在为合成高分子材料迅速发展时期。1979 年世界塑料产量已超过 6300 万吨。在美国,塑料在四大材料(混凝土、钢材、塑料、木材)中,按体积计算已列为第三位,而且预计到 1980 年底将超过钢材而跃升到第二位,仅低于混凝土。在塑料生产发展中,尤以热塑性塑料更为迅速。表 1-1 为国外塑料产量一览表。

表 1-1 国外塑料产量一览表

国 别	产 量 (万 吨)					
	1960 年	1965 年	1970 年	1975 年	1978 年	1979 年
美 国	285	530	815	1033	1640	1880
日 本	74	161	512	562	653	820.9
西 德	98	200	433	510	668	723.5
苏 联	33	80	167	280	360	380
意 大 利	34.6	93.1	180.9	218.7	266	279
法 国	23	67.7	151.5	203	278	293
英 国	56	94	145.8	165	278	240
国外总计	677	1436	3000	3800	5400	6324

我国解放三十年来,塑料工业的发展突飞猛进。以热塑性塑料来说,聚氯乙烯、低密度聚乙烯、聚丙烯这三种塑料发展尤为迅速;高密度聚乙烯在最近七、八年内有猛增的趋势;在工程塑料中,聚酰胺类(尼龙 1010、尼龙 610、尼龙 66 等)、含氟塑料(聚四氟乙烯、聚全氟乙丙烯、聚三氟氯乙烯等)、聚碳酸酯、聚对苯二甲酸乙二醇酯、聚砜、聚甲醛、聚苯醚、聚氯醚等都有不同规模的生产。在热固性塑料中,聚氨酯、脲醛、三聚氰胺、不饱和聚酯、环氧树脂等发展也快。我国的塑料品种将同国外一样,基本上齐全。

由于塑料质轻(聚 4-甲基戊烯-1 的比重只有 0.83), 电气绝缘性优越(聚四氟乙烯的体积比电阻可高达 10^{20} 欧姆·厘米, 聚酰亚胺的击穿电压可达 270 千伏/毫米), 耐化学腐蚀性强(聚四氟乙烯即使在高温下, 也不受强酸强碱有机溶剂、强氧化剂的浸蚀, 甚至在沸腾的王水中也不起反应), 并具有若干优越的物理机械性能(聚砒的高温抗蠕变性特别好, 在 93°C , 210 公斤/厘米² 应力负荷下一年后蠕变仅小于 2%, 30% 玻璃纤维增强尼龙 66 抗拉强度高达 1968 公斤/厘米², 聚苯醚可在 190°C 长期使用, 聚苯并咪唑耐温可高达 320°C , 聚苯乙烯和玻璃纤维酚醛塑料耐辐射性优良, 有机玻璃和聚碳酸酯透光率高)。又由于塑料成型加工方便, 塑料价格随着石油化学工业的发展不断在下降, 所以塑料在各个领域里得到广泛的应用。无论在人民群众日常生活中, 还是在农业、轻工业和重工业中, 都得到了普遍的应用。塑料在国民经济中已成为不可缺少的材料。在我国实现四个现代化中, 塑料将显示出强大的生命力。

我国的塑料工业, 从高分子合成工业到塑料加工工业、塑料机械工业、塑料模具工业都先后相继形成, 并不断扩大, 成为一个初具规模的、完整的体系。

随着塑料工业发展的需要, 科研单位也先后成立了高分子研究室、合成树脂研究所、塑料制品研究所、塑料机械研究所、塑料材料研究室、塑料老化研究所等。教育部门也陆续设立了高分子理科专业、高分子合成专业、塑料成型加工专业、塑料机械专业等。

我国的塑料工业呈现出一片欣欣向荣的景象。

1-2 塑料加工 要把合成树脂变成有用的塑料制品用到农业、工业、国防和科学技术各个领域中去, 必须通过成型加工这个手段。因此, 塑料加工厂是合成树脂厂与使用单位的桥梁。由于塑料的应用领域不断迅猛发展, 对塑料制品的品种、数量和质量提出愈来愈高的要求。为此, 要求“材料”、“机械”、“加工”三方面进行大协作, 密切配合, 相互促进。

现代塑料加工知识包括: 高分子化学、高分子物理学、助剂化

学、物理化学、化工原理、化工热力学、[√]传热学、[√]高聚物流变学、塑料工艺学、计算技术等。自 1959 年以来逐渐形成了一门新的学科，即塑料加工单元操作。

塑料加工单元操作相似于化工单元操作，它涉及高分子材料的动量、能量和质量的传递。迄今已有五十多种高聚物加工方法。某些代表性的塑料加工单元操作为：挤出、注压、压延、吹塑、热成型、发泡成型等。但是，由于塑料的不平常性能（例如粘弹性），因而塑料加工单元操作同化工单元操作比较起来就显得非常复杂。要很好地理解塑料加工单元操作就需要掌握上述科学和工程多方面的知识。塑料加工要涉及原料和设备。高分子材料的分子量、分子量分布、结构的多分散性等直接与流动性能（粘度、弹性）相关，也直接与制品的力学性能（抗拉强度、冲击强度等）相关；设备和模具的结构又直接与材料的流动性能相关；工艺操作条件（温度、压力、流速、拉伸速率等）又影响材料的流动性能，影响制品的力学性能。总之，加工高分子材料要比加工低分子材料复杂得多。

塑料加工涉及的科学和工程知识象高分子化学、高分子物理学、物理化学、化工原理等已有专书可资学习，而高聚物流变学国内尚处于初兴阶段。所以本书的内容以塑料的流动和变形以及塑料的热性能为基础，结合设备、模具以及加工条件来探讨三种普遍的塑料加工方法——挤出、注压、压延。

第二章 塑料流变学

第一节 流变学概述

我们在接触高聚物这种材料时, 往往发现它有许多不平常的现象与性能。例如将聚乙烯加热熔化通过小孔挤出时, 挤出物的直径大于小孔直径, 而且离开小孔愈远挤出物直径愈大, 过了一定时间后膨胀才稳定; 水就无此现象。又如硬聚氯乙烯在一定温度下施加一定载荷, 它的变形随时间增长而增大, 这种现象我们称为蠕变; 钢材蠕变就很缓慢, 肉眼往往不易察觉。又如某些聚碳酸酯注塑制品未经退火, 存放一定时间就会开裂, 其中存有残余应力。又如将聚异丁烯溶液在容器中用棒高速搅拌, 发现溶液沿棒上升, 产生正应力效应; 而换了机油就不上升。凡此种不平常的现象是怎样发生的? 又怎样去驾驭它? 人们付出了辛勤的劳动。人们对高聚物的极为重要的流动和变形行为的认识逐步深化, 从感性阶段逐步发展到理性阶段, 从表象上升到理论, 从定性到定量, 遂形成了“流变学”这门科学。

流变学确切地说, 乃是研究物质的流动和变形与造成物质流变的各种因素之间的关系的一门科学^[35]。在合成高分子材料工业中, 对迅速成长的流变学科学引起了极大的注意。特别是塑料成型加工, 通过“流动”这一途径是极为普遍的成型方式; 近年来又出现通过“变形”另一途径新的成型方式^{[36]~[38]}。这种新的成型方式称之为固相成型或冷成型。因此, 塑料流变学已成为塑料成型加工的理论基础之一。塑料流变学因不涉及气体, 所以它只是研究塑料呈液态、半固态和固态的流变行为。在此领域中, 已积累了大量的知识和技术资料。

应用塑料流变学可以探索和指导下列三方面工作:

(1) 认识和鉴定聚合物的结构特征和结构改变: 用流变行为

来鉴定聚合物的结构较之其他物理和化学方法更为灵敏和有效；鉴定添加剂的合理性；在生产中作为质量控制的标尺之一。

(2) 成型加工：研究和测定聚合物熔体、溶液以及分散体的流变特性、聚合物固体的“冷流”等特性，从而选择合理的成型方法，确定合理的成型工艺；据此设计成型设备和模具。

(3) 产品设计：研究和测定塑料的各种模量、屈服应力、极限强度、复原、疲劳限度等等，以及这些参数同时间与温度的依赖性，包括松弛、蠕变、 $P-V-T$ 关系、老化等等，从而设计出价廉物美的塑料制品来。

虽然上面谈了流变学的定义以及流变学的用处，可是塑料流变学究竟是什么？这里试图用下面几段话作一简略介绍：

1. 塑料流变学是研究塑料的流动和变形与造成塑料流变的各种因素之间的关系的一门科学。

2. 只有当外力(或能量)施于塑料时才发生流动和变形行为，我们把单位面积上的力称为“应力”。对拉伸和压缩应力来说，面积是指作用力的垂直平面；对剪切应力来说，面积是指作用力的平行平面，见图 2-1。

3. 塑料的变形通常以“应变”来表示，应变通常以塑料的实际变形量除以原有尺寸而得。对拉伸和压缩应变来说，实际变形量与原有尺寸是平行的；对剪切应变来说，两者是垂直的。

4. 符合虎克定律的弹性固体，其拉伸应力与拉伸应变成正比，比例常数称为弹性模量。用下式表示：

$$\frac{F}{A} = \text{常数} \times \frac{\Delta L}{L_0}$$

或

$$\tau_T = E\gamma_T$$

式中： τ_T ——拉伸应力(公斤/厘米²)；

γ_T ——拉伸应变(厘米/厘米)；

E ——弹性模量(公斤/厘米²)。

同样，弹性固体受剪切时，其剪切应力与剪切应变成正比，比例常数称为剪切模量。用下式表示：

$$\frac{F}{A} = \text{常数} \times \frac{\Delta L}{L_0}$$

或

$$\tau_s = G \gamma_s$$

式中: τ_s ——剪切应力;

γ_s ——剪切应变;

G ——剪切模量。

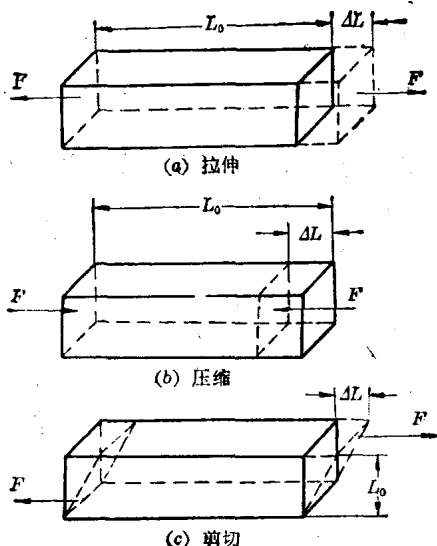


图 2-1 物质受拉伸、压缩、剪切形变图

5. 符合牛顿粘性定律的牛顿型液体其剪切应力与速度梯度(也即剪切速率,在第二节 2-2-4 中有推导)成正比(线性关系)。比例常数称为牛顿型液体的绝对粘度(简称粘度)。用下式表示:

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

式中: τ ——剪切应力(公斤/厘米²);

$\dot{\gamma}$ ——剪切速率(秒⁻¹);

μ ——粘度(公斤·秒/厘米²),它与时间无关,也与液体的剪切应力和剪切速率无关。

弹性固体和牛顿型液体是两种最简单的物质。

6 非牛顿型流体:但是大多数聚合物熔体、溶液、分散体的流