



097
2
普通高等教育
“十二五”规划教材



Polymer Processing Technology

双语教材

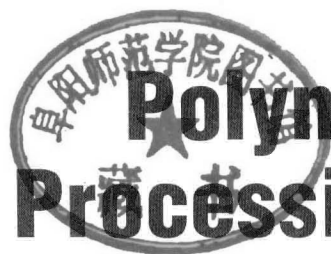
高分子材料 加工工艺学

雷文 张曙 陈泳 编著

中国林业出版社



普通高等教育
“十二五”规划教材



**Polymer
Processing
Technology**

双语教材

高分子材料 加工工艺学

雷文 张曙 陈泳 编著

中国林业出版社

内容简介

本书采用中英文双语写作,共分6章。第1章阐述了聚合物流变学基础,介绍了聚合物熔体的流动类型、影响聚合物熔体黏度的因素及聚合物流变学与加工成型之间的关系等方面的知识;第2~6章分别介绍了挤出、注塑、模压、吹塑及压延等几种常见的高分子材料加工工艺,并对每种工艺的设备构成、工艺过程、优缺点及应用等都作了详细的介绍。

本书既可作为高分子材料与工程类专业的专业教材,也可作为此类专业的专业英语教材。同时,也可以作为从事高分子材料工艺研究及加工人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

高分子材料加工工艺学:汉英对照/雷文,张曙,陈泳编著. —北京:中国林业出版社,2013.8

普通高等教育“十二五”规划教材

ISBN 978-7-5038-7186-3

I. ①高… II. ①雷… ②张… ③陈… III. ①高分子材料-生产工艺-高等学校-教材-汉、英
IV. ①TQ316

中国版本图书馆CIP数据核字(2013)第210709号

中国林业出版社·教材出版中心

责任编辑:张东晓 高红岩

电话:83221489 83220109

传真:83220109

出版发行 中国林业出版社(100009 北京市西城区德内大街刘海胡同7号)

E-mail:jiaocaipublic@163.com 电话:(010)83224477

http://lycb.forestry.gov.cn

经 销 新华书店

印 刷 中国农业出版社印刷厂

版 次 2013年8月第1版

印 次 2013年8月第1次印刷

开 本 850mm×1168mm 1/16

印 张 16

字 数 418千字

定 价 32.00元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有 侵权必究

前言

高分子材料与工程专业主要培养具备高分子材料与工程等方面的专业知识,能在高分子材料的合成改性和加工成型等领域从事科学研究、技术开发、工艺和设备设计、生产及经营管理等方面工作的高级工程技术人才。

作为一本高分子材料与工程专业的双语教科书,本书在编写过程中,首先介绍了与高分子加工成型过程有关的基础理论知识,涉及高分子物理学、流变学等课程的内容;然后着重阐述了几种常见而又十分重要的高分子材料成型加工工艺。

本书由南京林业大学雷文、张曙、陈泳编写。其中第1章、第5章、第6章由雷文编写;第2章由雷文、张曙编写;第3章、第4章由陈泳编写;全书由雷文校核。本书英文翻译全部由雷文完成,并得到了加拿大 RECO-CHEM 公司 Wang Shayne 博士的指导和修改。

本书为南京林业大学编写的“高分子材料与工程专业系列教材”之一,采用了中英文双语写作,供高等院校高分子材料与工程专业高年级学生学习专业课使用,也可供从事高分子材料研究、开发和应用的研究生和工程技术人员参考,另外还可以作为高分子材料与工程专业本科生专业英语教材使用。

我们在编写过程中力求通用性和新颖性兼顾,尽管如此,由于篇幅限制,并没有介绍所有的成型方法。鉴于编者经验和水平有限,加之时间紧张,本书在内容、编排、文字、英文表达等方面难免有不妥之处,衷心希望读者给予指正。

本书得到南京林业大学精品教材专项资金的资助,谨此致谢。

本书编写过程中参考了众多相关的书籍,囿于篇幅,未列出全部参考文献,在此对相关引用文献的作者致谢并请谅解。

编者
2013年5月

前 言

第 1 章 聚合物流变学基础	(1)
1.1 流变学	(1)
1.1.1 概述	(1)
1.1.2 聚合物流变学	(3)
1.2 聚合物熔体的流动类型	(5)
1.2.1 层流和湍流	(5)
1.2.2 稳定流动和不稳定流动	(5)
1.2.3 等温流动和不等温流动	(6)
1.2.4 剪切流动和拉伸流动	(6)
1.2.5 一维、二维、三维流动	(7)
1.3 牛顿流体和非牛顿流体	(7)
1.3.1 牛顿流体	(7)
1.3.2 非牛顿流体	(8)
1.4 影响聚合物熔体黏度的因素	(11)
1.5 聚合物流变学与加工成型之间的关系	(14)
1.5.1 流动性	(14)
1.5.2 弹性	(15)
1.5.3 断裂特性	(16)
第 2 章 挤出成型	(18)
2.1 概述	(18)
2.2 挤出设备	(18)
2.2.1 挤出机分类	(18)
2.2.2 挤出生产线的构成	(19)
2.3 螺杆的几个重要几何参数	(26)
2.3.1 螺杆直径	(27)

2.3.2	长径比	(27)
2.3.3	螺槽深度	(28)
2.3.4	螺距、螺旋升角	(28)
2.3.5	螺棱宽度	(29)
2.3.6	压缩比	(29)
2.3.7	螺杆外径与料筒间的间隙	(30)
2.3.8	螺杆的转速范围	(30)
2.3.9	螺杆头部形状	(30)
2.3.10	导程	(30)
2.3.11	螺杆轴向推力	(30)
2.3.12	螺杆承受的扭矩	(31)
2.4	螺杆的结构	(31)
2.4.1	加料段	(31)
2.4.2	压缩段	(31)
2.4.3	计量段	(32)
2.5	挤出成型理论	(32)
2.5.1	单螺杆挤出机的挤出理论	(32)
2.5.2	双螺杆挤出机的挤出成型理论	(37)
2.5.3	挤出机产量的影响因素	(38)
2.6	双螺杆挤出机	(38)
2.6.1	双螺杆挤出机的分类	(39)
2.6.2	双螺杆挤出机的生产能力	(40)
2.6.3	双螺杆挤出机的工作特性	(40)
2.7	挤出成型工艺	(41)
2.7.1	挤出成型的工艺过程	(42)
2.7.2	挤出成型的工艺参数	(43)
2.8	挤出成型工艺的特点	(44)
2.8.1	挤出成型工艺的优点	(44)
2.8.2	挤出成型工艺的缺点	(45)
2.9	挤出成型的应用	(45)
2.9.1	造粒	(45)
2.9.2	管材	(45)
2.9.3	薄膜和中空制品	(46)
2.9.4	片材和板材	(46)
2.9.5	电线电缆	(47)
2.9.6	熔体纺丝	(47)
2.9.7	异型材	(47)

第3章 注塑成型	(49)
3.1 概述	(49)
3.2 注塑成型设备	(50)
3.2.1 注塑机分类	(50)
3.2.2 注塑机的结构	(52)
3.3 注塑成型工艺过程	(59)
3.3.1 成型前的准备	(59)
3.3.2 注塑成型的过程	(60)
3.3.3 注塑成型的制品后处理	(60)
3.4 注塑成型工艺的特点	(61)
3.4.1 注塑成型工艺的优点	(61)
3.4.2 注塑成型工艺的缺点	(61)
 第4章 模压成型	(63)
4.1 概述	(63)
4.2 模压成型设备	(64)
4.2.1 压机	(64)
4.2.2 模具	(66)
4.3 模压成型工艺过程	(68)
4.3.1 模塑料性能参数	(68)
4.3.2 模压成型原理	(70)
4.3.3 模压成型工艺流程	(71)
4.4 模压成型工艺的特点	(73)
4.4.1 模压成型工艺的优点	(73)
4.4.2 模压成型工艺的缺点	(73)
4.5 模压成型工艺的应用	(74)
4.5.1 酚醛树脂的模压成型	(74)
4.5.2 聚四氟乙烯的模压成型	(77)
 第5章 吹塑成型	(79)
5.1 概述	(79)
5.2 分类	(80)
5.3 挤出吹塑	(80)
5.3.1 挤出吹塑成型工艺过程	(81)
5.3.2 挤出吹塑成型设备	(81)
5.3.3 影响挤出吹塑成型工艺和制品质量的因素	(83)
5.4 注射吹塑	(86)
5.4.1 注射吹塑成型工艺过程	(86)

5.4.2	注射吹塑成型工艺的特点	(87)
5.4.3	注射吹塑过程的影响因素	(88)
5.4.4	注射吹塑设备	(89)
5.5	拉伸吹塑	(90)
5.5.1	挤出拉伸吹塑工艺	(90)
5.5.2	注射拉伸吹塑工艺	(91)
5.5.3	拉伸吹塑过程的影响因素	(92)
第6章 压延成型		(94)
6.1	概述	(94)
6.2	压延成型用主要原料	(94)
6.3	压延成型主要设备	(95)
6.3.1	压延设备的构成与分类	(95)
6.3.2	常用的几种压延机	(97)
6.3.3	压延机的辊筒	(98)
6.3.4	辊筒轴承及润滑系统	(99)
6.3.5	辊距调节装置及传动系统	(100)
6.3.6	辅机	(100)
6.4	压延机的技术参数	(103)
6.4.1	辊筒的数量与排列方式	(103)
6.4.2	辊筒的长度、工作面直径及长径比	(103)
6.4.3	辊筒线速度与调速范围	(103)
6.4.4	传动功率	(104)
6.4.5	横压力	(104)
6.4.6	辊筒的速比	(104)
6.5	压延成型过程	(105)
6.6	压延成型的特点	(106)
6.6.1	压延成型的优点	(106)
6.6.2	压延成型的缺点	(106)
6.7	压延产品的应用	(107)
6.8	压延成型的发展趋势	(107)
参考文献		(109)

Contents

Chapter 1	Basis of Polymer Rheology	(111)
1.1	Rheology	(111)
1.1.1	Introduction	(111)
1.1.2	Polymer Rheology	(113)
1.2	Melt Flow	(115)
1.2.1	Laminar Flow and Turbulent Flow	(115)
1.2.2	Steady-state Flow and Unsteady-state Flow	(116)
1.2.3	Isothermal Flow and Non-isothermal Flow	(116)
1.2.4	Extensional Flow and Shear Flow	(116)
1.2.5	One-dimensional, Two-dimensional, or Three-dimensional Flow	(117)
1.3	Newtonian Fluid and Non-Newtonian Fluid	(118)
1.3.1	Newtonian Fluid	(118)
1.3.2	Non-Newtonian Fluid	(119)
1.4	The Factors Which Have Effects on The Viscosity of The Melt	(123)
1.5	The Relationship Between The Rheology of Polymer Melt and Its Processing	(127)
1.5.1	Flow Ability	(127)
1.5.2	Elasticity	(128)
1.5.3	Fracture Property	(130)
Chapter 2	Extrusion Process	(131)
2.1	Introduction	(131)
2.2	Extrusion Equipment	(132)
2.2.1	Classification of Extruders	(132)
2.2.2	Extrusion Production Line	(132)
2.3	The Important Geometric Parameters for a Screw	(139)
2.3.1	Diameter of The Screw	(140)
2.3.2	The Ratio of Length to Diameter	(140)

2.3.3	The Depth of The Channel	(141)
2.3.4	Screw-pitch and Helix Angle	(142)
2.3.5	The Width of The Flight	(142)
2.3.6	Compression Ratio	(142)
2.3.7	The Gap Between the Outside Diameter of The Screw and The Internal Surface of The Barrel	(143)
2.3.8	Rotating Speed Range of The Screw	(143)
2.3.9	The Head Shape of The Screw	(144)
2.3.10	Lead of The Screw	(144)
2.3.11	Longitudinal Pushing Force	(144)
2.3.12	Torque	(144)
2.4	Geometry of a Screw	(144)
2.4.1	Feeding Section	(144)
2.4.2	Compression Section	(145)
2.4.3	Metering Section	(145)
2.5	Theories of Extrusion	(146)
2.5.1	Theory for Single-screw Extrusion	(146)
2.5.2	Theory for Twin-screw Extrusion	(153)
2.5.3	Factors Affecting the Output of The Extruder	(154)
2.6	Twin-screw Extruder	(155)
2.6.1	Classifications	(155)
2.6.2	Production Capacity of a Twin-screw Extruder	(157)
2.6.3	Working Properties of The Twin-screw Extruder	(157)
2.7	Extrusion Process	(158)
2.7.1	Extrusion Processes	(159)
2.7.2	Extrusion Parameters	(161)
2.8	Advantages and Disadvantages of Extrusion Process	(162)
2.8.1	Advantages	(162)
2.8.2	Disadvantages	(163)
2.9	Applications of Extrusion Process	(163)
2.9.1	Pelletizing	(163)
2.9.2	Pipe	(164)
2.9.3	Film Hollow Item	(164)
2.9.4	Sheet and Plate	(165)
2.9.5	Wire and Cable	(165)
2.9.6	Melt Spinning	(165)
2.9.7	Profile	(166)

Chapter 3 Injection Molding	(167)
3.1 Introduction	(167)
3.2 Injection Equipment	(168)
3.2.1 Classification of Injectors	(168)
3.2.2 Structure of an Injector	(171)
3.3 Injection Process	(179)
3.3.1 Preparation Before Production	(180)
3.3.2 Injection Procedure	(180)
3.3.3 Post Treatment	(181)
3.4 Advantages and Disadvantages	(182)
3.4.1 Advantages	(182)
3.4.2 Disadvantages	(183)
Chapter 4 Compression Molding	(184)
4.1 Introduction	(184)
4.2 Compression Equipment	(186)
4.2.1 Press	(186)
4.2.2 The Mold	(188)
4.3 Procedures of Compression Molding Process	(192)
4.3.1 The Technical Parameters of The Die Plastic	(192)
4.3.2 Principle of Compression Molding Process	(194)
4.3.3 Procedures of Compression Molding Process	(195)
4.4 Advantages and Disadvantages of Compression Molding Process	(198)
4.4.1 Advantages	(198)
4.4.2 Disadvantages	(199)
4.5 Examples	(199)
4.5.1 Compression Molding of Phenolic Plastic	(199)
4.5.2 Compression Molding of PTFE	(203)
Chapter 5 Blow Molding Process	(205)
5.1 Introduction	(205)
5.2 Classification	(206)
5.3 Extrusion Blow Molding Process	(206)
5.3.1 Procedures of Extrusion Blow Molding Process	(207)
5.3.2 Equipment for Extrusion Blow Molding	(208)
5.3.3 Factors That Have Effects on The Extrusion Blow Molding Process and The End Item Quality	(210)

5.4	Injection Blow Molding Process	(214)
5.4.1	Direct Injection Blow Molding Process	(215)
5.4.2	Advantages and Disadvantages of Injection Blow Molding Process	(216)
5.4.3	Factors Affecting The Injection Blow Molding Process	(217)
5.4.4	Equipment for Injection Blow Molding Process	(219)
5.5	Stretch Blow Molding Process	(219)
5.5.1	Extrusion Stretch Blow Molding Process	(220)
5.5.2	Injection-stretch-blow Molding Process	(221)
5.5.3	Factors Affecting The Stretch Procedure	(223)

Chapter 6	Calendaring Process	(225)
6.1	Introduction	(225)
6.2	Main Materials for Calendaring Process	(226)
6.3	Main Equipment for Calendaring Process	(226)
6.3.1	Components and Classification of Calendaring Equipment	(227)
6.3.2	Several Popular Calendars	(229)
6.3.3	Rolls for The Calendar	(230)
6.3.4	Bearing and Lubricating System	(232)
6.3.5	Space Adjusting Device and Driving System of The Rolls	(233)
6.3.6	Auxiliary Equipment	(233)
6.4	Technical Parameters	(236)
6.4.1	The Number and Arrangement Mode of The Rolls	(236)
6.4.2	Length and Diameter of Its Working Surface of The Roll and The Ratio of Its Length to Diameter	(236)
6.4.3	Linear Velocity and The Speed Range of The Roll	(237)
6.4.4	Pumping Horsepower	(237)
6.4.5	Transverse Pressure	(238)
6.4.6	The Speed Ratio of The Roll	(238)
6.5	The Calendaring Process	(239)
6.6	Advantages and Disadvantages	(240)
6.6.1	Advantages	(240)
6.6.2	Disadvantages	(241)
6.7	Applications of Calendared Items	(241)
6.8	Development Tendency of The Calendaring Process	(242)

第1章 聚物流变学基础

流变学是研究流体流动和变形的一门学科。聚物流变学是研究高分子液体，主要指高分子熔体、高分子溶液在流动状态下的非线性黏弹行为，以及这种行为与材料结构及其他物理、化学性质的关系的一门学科，是现代流变学的重要分支。聚物流变学与高分子材料成型加工间关系密切，高分子材料的流变性能不仅影响其成型工艺条件的控制，而且对制品的性能存在显著影响。

1.1 流变学

1.1.1 概述

当一个物体受到外力作用时，它的形状将会随之发生变化，即发生变形。而且当物体发生流动时，这种变形会随着时间的而发生连续的变化。流动与变形是两个紧密相关的概念。流动可视为广义的变形，而变形也可视为广义的流动，两者的差别主要在于外力作用时间的长短及观察者观察时间的不同。在时间长河中，万物皆流，万物皆变。按地质年代计算，坚硬的地壳也在流动，地质学中著名的“板块理论”揭示了亿万年来地球大陆板块的变化和运动。另外，如果以极快的速度瞬间打击某种液体时，甚至连水都表现了一定的“反弹性”。

流变学的概念就是在此类现象的基础上发展起来的，它主要研究材料在应力、应变、温度、湿度、辐射等条件下所发生的与时间因素有关的变形和流动的规律。它适用于泥浆、污泥、悬浮液、聚合物、食品、体液、血液等诸多具有复杂结构的物质。材料的多样性和流变现象的普遍性，使流变学在当代材料科学技术的发展中成为一门主要学科。

流变学概念的雏形早在公元前 1500 年就已诞生，当时古埃及人使用类似陶制漏斗的“水钟”测定容器内水层高度随时间的变化关系，并观察温度对流体流动性的影响。

1869 年，Maxwell 发现，材料可以同时表现出弹性和黏性的特征。后续研究发现，材料在使用过程中，在温度和形变保持不变的情况下，其应力会随时间逐渐减小，即发生应力松弛；在应力及温度保持不变的情况下，其形变会随时间而逐渐增大，即发生蠕变或流动。经过长期探索，人们终于得知，一切材料都具有时间效应，于是出现了流变学概念。

19 世纪，法国人 Poiseuille 建立了理想流体流动的能量衡算方程，即著名的 Poiseuille 方程，该方程反映了流体流速、流体高度及流体压强三者之间的关系。它具有的

物理意义表现在两个方面：①理想流体在导管中作稳定流动时，导管任一截面的总能量或总压头为一常数；②能量在不同形式之间可以相互转化，当某一形式的压头的数值因条件而发生变化时，相应地引起其他压头的数值变化。Poiseuille 方程的建立是流变学发展史上一个重要标志，为了纪念 Poiseuille 对流变学发展的贡献，流体的黏度单位曾经定义为“泊”。

20 世纪 20 年代，学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土、金属等工业材料，岩石、土、石油、矿物等地质材料，以及血液、肌肉、骨骼等生物材料的性质过程中，发现使用古典弹性理论、塑性理论和牛顿流体理论已不能说明这些材料的复杂特性，于是就产生了流变学的思想。

美国物理化学家 E. C. Bingham 在流变学发展过程中作出了划时代的贡献，他不仅发现了一类所谓的“宾汉流体”的流动规律，而且把 20 世纪以前积累下来的有关流变学的零碎知识进行了系统归纳，并于 1928 年正式命名了“流变学(rheology)”，字头取自于两个希腊词根，意即万物皆流。在 Bingham 教授的倡议下，美国于 1929 年成立了流变学会，创办了流变学杂志 *Journal of Rheology*，自此，流变学逐渐被美国、英国、苏联等国承认，并在 20 世纪 30 年代得到蓬勃发展。

1934 年，门尼发明了门尼黏度计，提供了橡胶质量的控制手段；1939 年，荷兰皇家科学院成立了以伯格教授为首的流变学小组；1940 年，英国出现了流变学家学会；1945 年，国际性的流变学联合委员会成立；1948 年，K. Weissenberg 发现了“爬杆现象”(韦森堡效应或法向应力效应)，开拓了非线性黏弹行为的研究，而后不久，R. S. Rivlin 得到了著名历史难题——Poynting 效应(不可压缩弹性圆柱体扭转时会沿轴向伸长)的精确解。

1948 年，国际流变学会议在荷兰举行，法国、日本、瑞典、澳大利亚、奥地利、捷克斯洛伐克、意大利、比利时等国相继成立了流变学会，流变学科正式诞生。

20 世纪中叶以来，地质勘探、化学工业、食品加工、生物医学、国防航天、石油工业、大规模地上地下建筑工程、高分子材料合成和加工工业发展迅速，特别是高分子材料合成和加工工业的大规模发展，为流变学研究带来极其丰富的内容和素材，提供了广阔的研究领域，使流变学成为 20 世纪中叶以来发展最快的新科学之一，并且取得了丰厚的成果。

1991 年，诺贝尔物理学奖得主，法国科学家德热纳(P. G. de Gennes)提出了大分子链的蛇行蠕动模型，成功解释了分子链“缠结”对高分子浓厚体系黏弹性的影响。在颁奖仪式中，德热纳作了关于“软物质”的演讲，首次提出在人们熟知的固体和液体之间，尚存在着——类“软物质”，即相对于弱的外界影响，如施加给物质瞬间的或微弱的刺激，都能作出相当显著响应和变化的那类凝聚态物质。德热纳以天然橡胶树汁为例，揭示了高分子这类物质因弱外部作用而发生明显状态变化的软物质特性。从这个观点出发，作为流变学的一个重要分支，高分子流变学的研究必将发展到一个新的层次和高峰。

目前，国际流变学会议每四年举办一次，每次会议上报道的内容十分丰富，研究成果涉及一般理论问题、数值分析、流体力学、流变学测量、材料加工流变学、聚合物熔体、聚合物溶液、生物流变学、食品流变学、石油流变学等诸多领域。

我国从20世纪50年代起开始流变学的研究工作,研究起步相对较晚,但随着我国材料科学和工程技术的不断发展,为解决发展过程中遇到的形形色色的非牛顿流体的特性问题,人们对流变学的研究越来越重视。1978年,在北京制订全国力学规划时指出,流变学应被重视和加强,之后,各地纷纷成立了专门的流变学研究机构。1985年,我国成立了流变学专业委员会,同年11月在湖南长沙举办了我国第一届流变学学术会议,会上发表了100多篇评论报告和研究论文,之后每隔二三年举办一次。同时,我国在国际同行领域的影响也越来越大,于1988年成为国际流变学会成员国之一。

随着经济和工业化的发展,流变学将有广阔的发展领域,并已逐步渗透到许多学科而形成相应的分支,如聚合物流变学、生物流变学、食品流变学、悬浮流变学、润滑剂流变学、血液流变学、地球流变学、土流变学、岩石流变学、石油流变学、木材流变学、应用流变学等多个学科分支,此外还有与社会科学交叉的心理流变学。在理论研究上,已超出均匀连续介质的概念,开始探索离散介质、非均匀介质以及非相容弹性介质的流变特性。

流变学最初是作为一门实验基础学科发展起来的,自诞生以来就注重实践性和理论性,是一门涉及多学科交叉的边缘科学。随着实验原理、测试技术和测试设备的发展以及电子计算机的应用,流变学逐渐形成了相互促进的两个部分——理论流变学和实验流变学。其中,理论流变学的目标是可以通过数学计算描述流体运动,基本特点是运用数学的基本概念和规律来研究流变学,例如,可以用胡克定律来描述纯弹性物体的应力与应变之间的关系,可以用牛顿黏性定律来描述牛顿流体的应力与应变速率之间的关系等。而实验流变学则是通过实验数据提出符合此类物质的物理背景,将其与普适的数学模型相结合。在理论流变学基础上,利用各种先进仪器设备,如毛细管流变仪,来测量在不同剪切应力作用下,流体的流变性能,从中得出该物质的模量、相对分子质量等重要性质。

1.1.2 聚合物流变学

聚合物流变学是从研究水利、土建、金属材料等问题开始,逐渐扩展到高分子材料中而形成的。随着高分子物理学的发展及高分子材料合成、加工和应用的需要,20世纪50年代,人们将高分子物理学中的流动性、黏弹性等内容应用到高分子材料加工和聚合过程中,扩充发展成为聚合物流变学。它是一门研究聚合物流体(包括聚合物溶液和熔体)和固体在流动状态下所发生的剪切应力和剪切速率变化机制和变化机理,以及这种变化行为与材料结构及其他物理、化学性质之间关系的一门学科。它的研究内容与高分子物理学、高分子化学、高分子材料加工原理、高分子材料工程、连续体力学、非线性传热理论等联系密切。在聚合物的聚合阶段,流变学与化学结合在一起;而在以后的阶段,主要是与聚合物加工相结合。它来源于高分子化学工业,又反过来服务于高分子工业和聚合物加工工业,对聚合物的合成、加工、加工机械和模具的设计等均具有重要意义,是聚合物材料加工的基础。

聚合物流变学可粗略地分为聚合物微观流变学和聚合物宏观流变学两部分。微观流变学,又称结构流变学或分子流变学,是从分子运动的角度出发,对材料的力学行为和

分子运动过程进行相互关联,建立宏观流变行为与其微观结构(化学结构、物理结构和形态结构——分子链结构、聚集态结构)之间的联系,通过对聚合物流动模型的设计,获得可用于描述高分子材料流变性能的本构方程,据此反映材料宏观流变性质与微观结构参数之间的关系,深刻理解高分子材料流动的微观物理本质。宏观流变学,即加工流变学或唯象流变学,它采用经典的唯象研究方法,将聚合物看作由连续质点组成,材料性能是位置的连续函数,研究与高分子材料加工工程有关的理论与技术问题,研究材料的性能是从建立黏弹模型出发,进行应力-应变或应变速率分析。流变学从一开始就是作为一门实验基础学科发展起来的,因此实验是研究流变学的主要方法之一。微观流变学主要用于研究聚合物的微观结构与形态,而宏观流变学则可以解释诸多实验结果。微观流变学提供的流变模型将为材料、模具和设备的设计以及最佳加工工艺条件的确定提供理论基础,而宏观流变学研究的问题又为微观流变学的深化发展提供了丰富的素材和内容。所以,若能将微观流变学和宏观流变学结合起来研究,建立更加符合实际的流变学模型和反映应力-应变或应变速率之间关系的本构方程,将会取得更加理想的效果。

一般认为,影响聚合物加工性能的流变性质,主要包括黏度、弹性记忆效应和断裂过程的力学特性。研究聚合物的流变行为,揭示高聚物的微观结构和形态与宏观结构性能之间的内在联系,对聚合物材料的合成、加工和机械都具有十分重要的意义。具体表现在:

① 根据影响流变性的分子结构因素分析,指导聚合物的合成,制备所需要的聚合物材料。聚合物的流变性质与其分子结构、相对分子质量及其分布、支化、交联等都存在密切关系,如果通过对其流变学的研究,合成时控制聚合物的支化度、交联度等结构特性,并使其具有适当的相对分子质量,则可制造出具有优异物理力学性能的聚合产物。例如,合成顺丁橡胶时,通过控增加其长支链支化和提高相对分子质量,可以改善橡胶的抗冷流性能,避免生胶贮存与运输的麻烦。

② 根据影响流变性的加工工艺因数的分析,指导加工工艺条件的选择和配方的设计。聚合物的加工成型大多在溶液或熔融状态下进行的,黏度是其流变性的一个重要表征,通过研究聚合物溶液或熔体黏度的温度依赖性和剪切速率依赖性,可以正确选择加工工艺条件。另外,通过对高分子材料加工成型过程中流变性的研究,考察其热变形历史和加工历史,研究材料在此过程中的应力松弛、蠕变等低流动性,可据此测评高分子材料的可加工性及其加工性能进行改进。例如,聚丙烯单丝的不圆度与其生产过程中冷却定型、应力分布不均有关,通过控制冷却水温及其与喷丝孔之间的距离,可解决该问题;研究顺丁橡胶的流动性,发现它对温度比较敏感,故需严格地控制加工温度。

③ 根据影响聚合物流变性的设备因素分析,设计、合理使用加工机械和模具。聚合物熔体在不同的设备及模具中会表现出不同的流变学特征,进而影响熔体在加工成型设备中的流动及对模具的填充效果。通过流变学的研究,指导高分子材料加工成型设备及模具流道等的结构设计,确保聚合物熔体在其中能够发生平稳流动,并按预期目标完全充满模具,获得优质的高分子产品。例如,通过研究聚合物的流变性能,尤其是关于挤出胀大和破裂的研究,可以指导口模的合理设计,以便挤出光滑的制品和有效地控制制品的尺寸。

1.2 聚合物熔体的流动类型

高分子材料在加工成型过程中,其熔体将发生流动,但其流动方式会随物料性质、熔体流动速度、流动形状结构等的不同而不同,所以,成型加工过程中,流体的流动有多种方式。根据不同的分类方法,它分别表现出以下一些不同的类型。

1.2.1 层流和湍流

层流,又称为滞流,其特征是:当流体在管道当中流动时,其质点作一层滑过一层的位移,不同层的分子之间没有明显的干扰,各层分子间只因扩散而发生转移。流体流速沿断面呈抛物线分布,紧靠管壁处流体的流速最小,近似等于0,而在管道中央部位,流速最大,平均流速为管道中央流速(最大流速)的1/2。

如果流体在流动过程中除了靠近管壁处涡动骚扰较小,基本保持层流的形态外,其他部位,流体的质点有剧烈的骚扰涡动,上述一层滑过一层的分子运动情况基本消失,则这种流动叫作湍流。湍流时,靠近管壁一定范围内,流体流速逐渐增大,在靠近管道中央相当大的一定范围内流速最大,管内流体的平均流速约为其管道中央最大流速的0.8倍左右。

采用雷诺系数 Re 可以判断流体的流动形态:

$$Re = \frac{dv\rho}{\eta} \quad (1-1)$$

式中: d ——管道直径;

v ——流体流速;

ρ ——流体密度;

η ——流体黏度。

式(1-1)表明,流体流动时究竟呈层流状态,还是呈湍流状态,既受约于管道直径,更与流体流速及自身性质有关。

一般情况下,当 $Re < 2\,100$ 时,流体在平滑管道内的流动呈层流状态,当 $Re > 4\,000$ 时,流动呈湍流状态, $2\,100 < Re < 4\,000$ 时,流动状态由层流向湍流过渡状态。

对于聚合物熔体而言,由于其黏度高,大多数情况下,其在加工过程中, $Re \ll 1$, 因而常表现为层流流动,但对高分子稀溶液,则容易产生湍流。

1.2.2 稳定流动和不稳定流动

流动发生流动时,若在任何部位流体的性质(如密度、黏度等)和流动参数(如流速、流量、温度、压力等)及其影响因素均不随时间而变化,则这种流动为稳定流动,连续操作的化工生产中所遇到的大多数流体的流动都属于稳定流动;反之,若流体流动过程中任何部位上的这些物理量及其影响因素均随时间而呈规律性的变化,则这种流动为不稳定流动。