

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

高分子材料流变学

(第二版)

Polymer Rheology

(Second Edition)

吴其晔 巫静安

高等教育出版社

研究生教学用书

教育部学位管理与研究生教育司推荐

高分子材料流变学

GAOFENZI CAILIAO LIUBIANXUE

(第二版)

Polymer Rheology

(Second Edition)

吴其晔 巫静安

高等教育出版社·北京

内容提要

本书共十章, 涵盖高分子结构流变学、高分子加工流变学、流变测量学三方面内容。具体有: 奇异流变现象、基本物理量与基本流变函数、非线性黏弹流体的本构方程、高分子流变本构方程的分子理论、重要流变测量仪器原理、高分子典型加工过程流变分析、注塑模具计算机辅助设计的流变学问题、熔体流动不稳定性及壁滑现象、高分子基多相体系的流变行为等。

本书可供高分子化学与物理学、材料学、材料加工工程、材料化学与物理、化工过程机械、机械设计与理论等专业研究生使用。部分章节也可供高分子专业本科生使用, 同时可供从事高分子科学与工程的研究人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高分子材料流变学 / 吴其晔, 巫静安主编. -- 2版.
-- 北京: 高等教育出版社, 2014.8
ISBN 978-7-04-040156-1

I. ①高… II. ①吴… ②巫… III. ①高分子材料—流变学—高等学校—教材 IV. ①TB324

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第136802号

策划编辑 付春江 责任编辑 付春江 封面设计 姜磊 版式设计 余杨
责任校对 殷然 责任印制 张泽业

出版发行	高等教育出版社	网 址	http://www.hep.edu.cn
社 址	北京市西城区德外大街4号		http://www.hep.com.cn
邮政编码	100120	网上订购	http://www.landaco.com
印 刷	潮河印业有限公司		http://www.landaco.com.cn
开 本	787mm×960mm 1/16	版 次	2002年10月第1版
印 张	27.25		2014年8月第2版
字 数	500千字	印 次	2014年8月第1次印刷
购书热线	010-58581118	定 价	42.20元
咨询电话	400-810-0598		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换
版权所有 侵权必究
物 料 号 40156-00

序言

高分子流变学作为高聚物加工工艺的基础科学其重要性自不待言。但这门与高分子工业有着密切关系的学科,对许多从事高分子工业和科学研究的人员而言却存在一定的距离。很多人不清楚流变学的研究范畴和内容,或认为测量黏度就是流变学,或仅知道流变学大概与聚合物的加工有关。很多人也曾想学习流变学,但许多从化学、化工学科出身的工作人员在遇到书中推出的一大堆数学公式时往往就易于迟疑而停顿不前。这就联想到需要有一本适合于人们阅读的、系统介绍高分子流变学的专著。很早之前我就阅读过吴其晔教授撰写的《高分子材料流变学导论》,可以说该书在国内外众多介绍高分子流变学的著作中有其鲜明的特色。

本书的特点之一是尽管篇幅不大,但却清晰而系统地介绍了高分子材料尤其是高分子液体众多的流变现象,例如,各种非线性黏弹性质及诸多流变本构模型和方程;流变测量法,流变方法在理论研究和工程计算分析中的应用;多相高分子体系的流变性质等。使人们可用不多的时间迅速了解高分子流变学研究的基本内容和方法的全貌。特点之二是作者充分运用其坚实的物理学知识,对高分子流变学中众多难以理解的现象和概念,诸如液体为何具有弹性?固体与液体的区别和联系,高分子液体非线性黏弹性的本质,牛顿流体与非牛顿流体的差别,以及流变本构方程分子模型的构思及构造特色等,作者均以清晰和流畅的语言给予简明而深刻的论述。其中关于数学公式的运用和陈述也是清晰、透彻的。特点之三是作者在系统介绍流变学基本内容的同时,也介绍了作者本人多年来的研究工作及其成果。我们看到,这种理论与实践相结合的著述方式有利于读者深刻领会流变学知识的精髓和鼓舞读者运用流变学的知识来解决科研和工程中的实际问题。还要指出的是,本书对于已进入研究生学习阶段的读者而言,不失为一本既有理论深度,又具实践意义的优秀教材和参考书。

在阅读了本书的底稿后对我颇有启示的是:现代高分子科学的发展和深化,特别需要多学科的交叉融会,高分子界也特别需要其他学科的人才加入,共同切磋,取长补短,联合攻关。高分子科学是从化学学科中衍生出来并得到迅速成长的新科学,但高分子科学的发展和进步离不开其他学科科学家的贡献。在科

学研究迅猛发展的新世纪,在不断开拓新聚合方法、深化高分子凝聚态物理研究、开发新的功能高分子材料以及对新型的高分子组装材料和新的加工技术的研究中,如果有物理学、数学、生物学、力学,甚至工程界人士共同参与,可以相信,将大大促进高分子科学和工程的发展。吴其晔教授是物理学出身的,他进入高分子科学界不到二十年已取得了若多的研究成果和提出了许多值得进一步思考的科学问题,就是一个典型的例子。为此,我愿为本书作序。

中国科学院 理化技术研究所 吴世康

第二版前言

光阴荏苒。自《高分子材料流变学》面世以来,已有12个年头过去了。十几年来屡屡有高分子界同仁和好友告知,越来越多的学校、研究机构采用本书作为研究和教学参考书;也不断有学生从海内外来信来电咨询探讨流变学方面的各类问题。欣慰之余,作者更加感觉责任在肩,心存愧疚。一则受十几年前知识水平和研究水平之限,二则也因本人文字能力贫乏,因此书中瑕疵不少。为了对读者和学生负责,也为了对科学的尊重,此次我们字斟句酌地对原稿进行了更加缜密,更加严格的校对和撰写,以期提高质量,回馈读者。这是本书再版的缘由之一。

再版的另一缘由是十多年来高分子科学和高分子工业的飞速发展。如果说十几年前流变学对于许多高分子科学和工业从业人员来说还是“阳春白雪”,那么从现在的情况来看,几乎所有高分子领域,包括高分子合成、高分子材料、高分子改性、高分子加工、高分子成型设备和模具设计都离不开高分子流变学的知识。流变学设计已成为各项实验设计和工业设计的重要组成部分。在非线性、非平衡态性质研究方面,高分子液体在大变形、快速流动时呈现的奇异非线性黏弹性已成为研究热点和重点。据了解当前国内几乎所有开设高分子专业的大专院校都已开设或准备开设流变学课程。这种态势下,出版几本有参考价值的专业书籍是一项重要而有意义的工作,我们能为此尽菲薄之力深感荣幸。

再者,近年来我们在流变学领域也作了一些研究工作,主要兴趣集中在聚合物熔体高速挤出时的流动不稳定性和熔体破裂。在国家自然科学基金的支持下,对这类极其复杂,“无规律”和“难以理解掌控”的现象,从表象辨识、机理分析、辩证对策三方面开展系列研究,不仅获得大量感性和理性知识,而且形成一套系统的行之有效的研究思路和方法,建立了“聚合物熔体高速挤出不稳定流动指纹信息库”。相关内容此前已陆续发表,此番进一步综合撰写,形成本版第九章以飨读者。

虽则如此,由于作者学识浅显,文笔粗涩,书中不当和失误之处仍在所难免,恳请诸位师长及读者指正。书中引证国内外诸多专家的研究成果,有些不及面询允肯,敬请海涵。本书再版得益于国家自然科学基金委员会、高等教育出版

社、青岛科技大学的关心支持,作者谨此致以衷心谢意。青岛科技大学高分子物理教研室同仁及多年来我教授过的大量学生也对本书再版给予热情帮助,并付出了艰辛劳动,作者一并表示真诚感谢。

吴其晔

2013年11月于青岛石老人国家旅游度假区科大花园

E-mail: wuqiye@qust.edu.cn

<http://polymer.qust.edu.cn>

第一版前言

自从法国科学家 de Gennes 在诺贝尔奖颁奖典礼上发表关于“软物质”(soft matter)的讲演以来,高分子材料科学,特别是高分子凝聚态物理学的研究和探索上升到一个新高度和新境界。所谓“软物质”,指在人们熟知的固体和液体之间,尚存在着的一类特殊物质。它们最大的特点不只是“软”,而是相对于弱的外界刺激,能作出相当显著的响应和变化。流变学研究的主要对象正是这类“软物质”,尤其高分子溶液和熔体,它们会因微弱的外力扰动而改变其流动或变形状态,也会因微弱的结构异化而表现出完全不同的流变和其他功能特性。显然,关于高分子流变问题的研究直接涉足于当代高分子材料科学的研究前沿。

众所周知,高分子流变学研究成果对高分子凝聚态物理、乃至高分子科学基础理论发展具有重要价值;高分子材料在成型加工中流变状态的变化不仅决定制品外观形状和质量,而且对分子链结构、超分子结构和织态结构的形成和变化有极其重要影响,是决定高分子制品最终结构、性能的中心环节。然而多年来高分子流变学研究的深度和广度总体上滞后于高分子科学其他分支的发展。化学出身的研究者往往受阻于流变模型中的数学“壁垒”,数理出身的研究者又陌生于高分子材料多重复杂结构及千奇百怪的形态和性能。虽然国内外已出版多种介绍高分子材料及加工流变学的专著,然而就作者近二十年研究工作及为研究生、本科生讲授流变学课程的体验而言,至今尚缺乏结构严谨、深浅适度、循序渐进,适用于研究生、大学生教学及从事高分子科学与工程研究人员阅读的,系统介绍高分子流变学基础理论的著作。这或许是高分子流变研究步履艰难的背景之一,也正是作者成书出版的初衷。

1994年,作者曾出版《高分子材料流变学导论》。在论及著作目的及特色时,曾着重强调如下几点:

1. 希望尽早促进国内理工类大学高分子流变学教学形成科学完整的体系。这个体系应当包含高分子流变学基本概念、基础理论、基本公式和应用基础理论解决科研和生产实践问题的路线和方法。具体内容至少应包括:基本流变物理量及高分子液体基本流变性质、非线性黏弹液体本构方程、高分子流变学分子理论、流变测量原理及方法、高分子材料典型加工过程流变分析、高分子多相体

系流变行为等。

2. 强调物理思想讲解,突破高分子流变学课堂教学和个人自学中艰难的数学“壁垒”。尽可能以清晰的逻辑,简明的语言,最基本的数学知识,详细诠释关于流变学抽象概念和基本物理量的确切物理意义,帮助读者尽快领会高分子流变学真谛。例如,关于固体、液体的区别和联系,液体的弹性,材料变形的时间依赖性,有限形变简单、恰当的定义,牛顿流体与非牛顿流体应力状态的差别,流变本构方程推广原理及方法,各种分子模型的构思精华及构造特色,高分子液体奇异流变行为的实质等,均应给予简明深刻的论述。

3. 引导读者将流变学原理及方法应用于高分子科学研究与工程设计实践。理论上,高分子流变性和流变本构方程研究务必汇入流变学基本原理及高分子合成、高分子凝聚态物理研究的主流,融为其有机组成部分;实践中,鼓励结合具体问题迅速开展目的性明确的专题研究,将流变学方法运用于包括分子设计、材料设计、配方设计、工艺设计、模具及机械设计等高分子工程实践过程。

作者至今初衷不改,并始终认为抓准这几点是普及、提高流变学知识,并促其广为应用的正确途径。为此在本书中,作者一方面关注研究生教材应有的理论性、系统性、严谨性和可讲授性,期望本书能适于用作高分子化学与物理、高分子材料学、高分子材料成型加工、高分子加工机械和模具设计及其他相关专业研究生学分课程的主要参考书,而其选读章节(*),可供大学本科高分子材料专业教学之需。另一方面注意科研专著与科研、生产实践的紧密结合,通过精心选题,融会贯通,既介绍流变学应用于工程实际的原理和方法,又简捷地介绍几十年来诸位流变学大师的研究精华和当代高分子流变学研究最新成果及研究前沿,以满足不同层次读者的要求。

书中也选择性介绍了作者十几年来研究和教学心得,包括三项国家自然科学基金项目,国家“九五”重点科技攻关项目,国际合作项目的研究成果。其中对高分子亚浓溶液流变状态方程理论的优化,Cox-Merz关系式的意义和应用,高分子材料松弛时间谱的实验测定和计算,弯毛细管流变仪的测量原理,零长毛细管测量硬PVC凝胶度,异径辊筒压延机流场分析,关于壁滑、挤出畸变、熔体破裂等熔体流动不稳定性的认识,共混型热塑性弹性体的流变性质,聚合填充法改善超高分子量聚乙烯困难的挤出流动性等,都是以流变学原理为指导,结合不同领域生长出新的研究点。不仅显现出理论研究的指导价值,有些已应用于生产,创造出经济效益。

高分子流变学自诞生以来就是一门实践性强、理论深邃的实验科学,又是一门涉及多学科交叉的边缘科学。正因为其理论和实践高度结合,常使人产生“高处不胜寒”之叹。但也正因为其处于多学科交叉的边缘,所以也最引人入胜并为

攀援者提供展现身手的广阔天地。事物最活跃的部分大多在其边缘,科学往往在各学科交叉处展现最强劲发展势头。愿本书为选择高分子科学为终生事业的青年学子提供一架攀援阶梯,涉足边缘探求未知,为我国高分子科学和工业的蓬勃发展不断开拓创新。

本书第七、八章由巫静安教授执笔,其余章节由吴其晔教授执笔,并由后者统一审阅、定稿。书中引证国内外诸多专家学者的研究成果,有些不及面询允肯,敬请海涵。由于作者学识浅陋,文笔粗涩,书中缺漏之处在所难免,恳请诸位师长及读者朋友不吝指正。

本书成稿之时,本人愿再次向引导自己迈过流变学门槛的联邦德国 Stuttgart 大学 H. G. Fritz 教授和 Aachen 理工大学 P. Schümmer 教授致以衷心谢意,书中介绍的部分研究工作就是与两位教授合作的结果。我还要感谢中国科学院感光化学研究所吴世康教授,二十年前是他将我引向高分子科学的殿堂。感谢联邦德国 Aachen 理工大学 W. Michaeli 教授,及 Hengstler 公司 H. Müller 教授,中国科学院化学研究所漆宗能教授,他们在不同方面指导研究工作和鼓励我的研究热情。感谢中国国家自然科学基金委员会、国家计委及原化学工业部“九五”重点科技攻关项目领导机构、世界大学欧洲联络部(World University Service in Wiesbaden)、联邦德国 Carl Duisberg 基金会(C. D. G.)、中国石油化学工业总公司、齐鲁石油化学工业公司等单位,十多年来正是他们的项目支持和愉快合作,才使今日有著书的可能。感谢青岛科技大学(原青岛化工学院)教务处、研究生处,北京科技大学材料科学与工程学院所给予的精神和物质上的鼓励帮助。青岛科技大学高分子结构与性能研究室的同仁及多年来我所教授过的王新博士、阎业海博士,以及博士研究生高卫平、吴俊涛、方鲲和硕士生肖源、李守平、崔陇兰、李勇、肖建彬、王维等人都是本书的合作者和支持者,他们在课题选项研究、材料组织打印诸方面付出艰辛劳动,作者谨此一并表示真诚的谢意。

吴其晔^①

2001年12月于青岛石老人国家旅游度假区科大花园

^① E-mail: qywu@public.qd.sd.cn

* 第一章 绪论	1
1. 流变学概念	1
2. 高分子材料流变学研究的内容和意义	3
3. 高分子液体的奇异流变现象	5
3.1 高黏度与“剪切变稀”行为	5
3.2 Weissenberg 效应	7
3.3 挤出胀大现象	7
3.4 不稳定流动和熔体破裂现象	8
3.5 无管虹吸, 拉伸流动和可纺性	8
3.6 各种次级流动	9
3.7 孔压误差和弯流压差	10
3.8 湍流减阻效应	10
3.9 触变性和震凝性	10
4. 高分子材料黏流态特征及流动机理	12
第二章 基本物理量和高分子液体的基本流变性质	15
1. 引言	15
2. 基本物理量	16
2.1 应力与偏应力张量	16
2.2 形变和形变梯度张量	21
2.3 速度梯度和形变率张量	27
*3. 黏度与法向应力差函数	31
3.1 表观剪切黏度函数	31
3.2 第一、第二法向应力差函数	32
3.3 拉伸黏度函数	33
*4. 非牛顿流体的分类	35

* 本章或节可供大学高分子材料专业本科生教学用, 余目录同。

4.1	Bingham 塑性体	35
4.2	假塑性流体	36
4.3	胀流性流体	42
5.	关于剪切黏度的深入讨论	43
* 5.1	温度的影响	44
* 5.2	剪切速率和剪切应力的影响	49
5.3	“时温等效原理”在流动曲线上的应用	51
5.4	压力的影响	54
* 5.5	配合剂的影响	55
* 6.	关于“剪切变稀”行为的说明	57
6.1	高分子构象改变说	58
6.2	类橡胶液体理论	59
* 7.	高分子液体弹性效应的描述	60
7.1	可恢复形变量 S_r	60
7.2	挤出胀大比	62
7.3	口模入口压力降和出口压力降	63
7.4	第一、第二法向应力差函数	64
8.	高分子液体的动态黏弹性	65
8.1	小振幅振荡剪切流场的数学分析	66
8.2	动态黏弹性与稳态流变性的关系	67
第三章	非线性黏弹流体的本构方程	72
1.	本构方程概念	72
2.	速率型本构方程	74
2.1	经典的线性黏弹性模型——Maxwell 模型	74
2.2	空间描述法和物质描述法	76
2.3	广义 Maxwell 模型	78
2.4	Rivlin-Ericksen 二阶流体模型	87
3.	积分型本构方程	88
3.1	Boltzmann 叠加原理	88
3.2	Maxwell 模型的积分形式	89
3.3	Lodge 网络理论——类橡胶液体理论	91
3.4	Meister 模型和 Bird-Carreau 模型	93
4.	流变模型对高分子科学和高分子工程问题的意义	96
第四章	高分子流变本构方程的分子理论	99

1. 高分子稀溶液和浓厚体系	100
2. 涨落-耗散定理	103
3. 孤立分子链的黏弹性理论	105
3.1 Debye 珠-链模型的主要观点	106
3.2 Rouse-Zimm 珠-簧模型的主要假定及处理方法	108
3.3 Rouse 模型的松弛时间	111
3.4 流体动力学相互作用, Zimm 的修正	113
3.5 Rouse-Zimm 模型的显式本构方程	116
3.6 非仿射变形假定和带滑动函数的 Rouse-Zimm 模型	118
4. 高分子浓厚体系的流变模型和本构方程	125
4.1 高分子浓厚体系的性质	125
4.2 分子链缠结本质和缠结图像	126
4.3 熔体中分子链的缠结和扩散	132
4.4 高分子浓厚体系的流变本构方程, Doi-Edwards 模型	136
*5. 分子结构参数对流变性质的影响	141
5.1 平均分子量的影响	142
5.2 分子量分布的影响	148
5.3 支化结构的影响	152
5.4 讨论分子结构参数对流变性影响的意义	155
6. 松弛时间谱及其与材料黏弹性函数间的关系	157
6.1 松弛时间谱的定义	157
6.2 松弛时间谱与材料黏弹性函数的关系	158
6.3 由实验数据直接求取材料松弛时间谱的方法	160
6.4 影响流变松弛时间谱的因素	165
*第五章 输运过程的基本方程及基本流动形式	169
1. 连续性方程——质量守恒律	169
2. 运动方程——动量守恒律	172
3. 能量方程——能量守恒律	175
4. 平行板间的等温拖曳流和管道中的压力流	178
4.1 平行板间的等温拖曳流	178
4.2 圆形管道中的压力流	180
5. 输运过程基本方程在三种坐标系的显式	183

第六章 流变测量学	187
1. 引言	187
*2. 毛细管流变仪的测量原理和方法	189
2.1 毛细管流变仪的基本构造	189
2.2 完全发展流动区内的流场分析	191
2.3 入口区附近的流场分析	197
2.4 双筒毛细管流变仪简介	201
2.5 出口区的流动情形	203
3. 锥-板型转子流变仪	207
3.1 锥-板型流变仪测量剪切黏度	208
3.2 锥-板型流变仪测量法向应力差函数	210
3.3 锥-板型流变仪测量动态黏弹性	212
*4. 落球式黏度计的测量原理	213
*5. 混炼机型转矩流变仪的原理和用途	214
5.1 转矩流变仪的结构和工作原理	214
5.2 应用举例	216
6. 弯毛细管流变仪原理简介	217
6.1 构造与测量原理	217
6.2 运动方程和弯管中的应力分析	218
6.3 弯管中的速度分布与剪切速率分布,黏度的求算	220
6.4 第一法向应力差系数的计算	221
6.5 与实验结果比较	223
第七章 高分子材料典型加工成型过程的流变分析	225
1. 混炼工艺与压延工艺(辊筒上的成型加工过程)	225
1.1 引言	225
*1.2 运动方程与润滑近似假定	226
*1.3 速度分布与压力分布公式	228
*1.4 关于辊筒间压力与速度分布的讨论	230
1.5 异径辊筒压延机简介	233
*2. 挤出成型过程	239
2.1 物料在匀化计量段螺槽中的流动	240
2.2 机头口模中物料的流动	244
2.3 理论的修正	246
2.4 实行稳定挤出的一些流变学考虑	248

3.	纤维纺丝成型过程	249
3.1	稳态单轴拉伸流动的数学解析	250
3.2	稳态单轴拉伸流动的本构模型描述	252
3.3	纤维纺丝成型原理简述	254
3.4	熔体纺丝中单轴拉伸黏度的实验测定	255
3.5	物料的可纺性及与分子参数的关系	259
4.	薄膜吹塑成型过程	261
4.1	管形薄膜吹塑成型过程简介	261
4.2	薄膜吹塑成型过程的流变分析	262
4.3	吹塑过程中双向拉伸黏度的实验测定	265
第八章	注塑成型过程及注塑模具计算机辅助设计中的流变学问题	270
1.	注塑成型过程的流变分析	270
1.1	注塑成型过程简介	270
1.2	圆盘形模具充模过程分析	272
1.3	充模压力分析	274
1.4	注塑制品中的残余应力,收缩与翘曲	276
2.	注塑模具计算机辅助设计的一般要求及步骤	280
2.1	引言	280
2.2	注塑模具的主要功能及一般设计要求	281
2.3	注塑模具 CAD 设计的一般步骤	283
3.	注塑模具流变学参数的 CAD 设计	286
3.1	流变参数 CAD 设计的基本方法	286
3.2	差分法计算的基本方程	290
3.3	方程的求解和程序编写	293
4.	有限元法绘制填充图像	295
4.1	图解法确定填充图像(L/H 法)	295
4.2	有限元法绘制填充图像的主要步骤	298
4.3	编制有限元程序的基本方程	299
4.4	有限元程序	300
4.5	应用举例	302
第九章	高分子液体流动不稳定性及挤出畸变	306
1.	引言	306
2.	高分子液体挤出畸变的指纹性特征	307
2.1	第 1 指纹特征——挤出物外观表象	308

2.2	第2指纹特征——挤出压力稳定性	316
2.3	第3指纹特征——熔体流变曲线	322
3.	流场扰动的的原因和机理,扰动源位置和性质	327
3.1	扰动源位置分析	328
3.2	扰动性质和机理分析	329
3.3	扰动源与挤出畸变的对应关系	334
3.4	模壁滑移现象及 Uhland 模型	335
3.5	发生黏-滑转变的界面机理和分子机理	341
4.	克服、减轻挤出畸变和熔体破裂的相关措施	343
4.1	对口模内壁附近剪切流动不稳定性的改善措施	343
4.2	对口模入口区拉伸流动不稳定性的改善措施	346
第十章	高分子基多相体系的流变行为	351
1.	高分子共混体系的相容性	352
1.1	引言	352
*1.2	高分子-高分子共混准则	352
1.3	高分子-高分子共混的热力学相容性	354
1.4	结晶高分子-无定形高分子共混的相容性	359
*2.	高分子共混体系的形态及流变行为	361
2.1	高分子共混体系的形态	361
2.2	高分子共混体系的黏性行为	364
2.3	高分子共混体系的弹性行为	370
3.	高分子分散体系的流变行为	373
*3.1	高分子填充体系的流变行为	373
3.2	塑料溶胶的流变行为	384
3.3	聚合填充法制备聚烯烃基复合材料的流变行为	385
	主要参考文献	390
	附录 I 主题索引	404
	附录 II 主要物理量符号说明	412
	附录 III 单位换算和重要物理常数	416

1. 流变学概念

流变学是一门研究材料流动及变形规律的科学。高分子材料流变学则是研究高分子液体,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。

很久以来,流动与变形是属于两个范畴的概念,流动是液体材料的属性,而变形是固体(晶体)材料的属性。液体流动时表现出黏性行为,产生永久变形,形变不可恢复并耗散部分能量。而固体变形时表现出弹性行为,其产生的弹性形变在外力撤销时能够恢复,且产生形变时储存能量,形变恢复时还原能量,材料具有弹性记忆效应。通常液体流动时遵从牛顿流动定律——材料所受的剪切应力与剪切速率成正比($\sigma = \eta_0 \dot{\gamma}$),且流动过程总是一个时间过程,只有在一段有限时间内才能观察到材料的流动。而一般固体变形时遵从胡克定律——材料所受的应力与形变量成正比($\sigma = E\epsilon$),其应力、应变之间的响应为瞬时响应。

遵从牛顿流动定律的液体称牛顿流体,遵从胡克定律的固体称胡克弹性体。牛顿流体与胡克弹性体是两类性质被简化的理想物体,实际材料往往表现出远为复杂的力学性质。如沥青、黏土、橡胶、石油、蛋清、血浆、食品、化工原材料、泥石流、地壳,尤其是形形色色高分子材料和制品,它们既能流动,又能变形;既有黏性,又有弹性;变形中会发生黏性损耗,流动时又有弹性记忆效应,黏弹性结合,流变性并存。对于这类材料,仅用牛顿流动定律或胡克弹性定律已无法全面描述其复杂力学响应规律,必须发展一门新学科——流变学对其进行研究。由此可见,流变学是人类对自然界深化研究和认识的产物。图 1-1 的对比表明,所谓“流变性”实质就是“固-液两相性”同存,是一种“黏弹性”表现。但这种黏弹性

流动→液体→黏性→耗散能量→产生永久形变→无记忆效应→牛顿定律→时间过程

变形→固体→弹性→储存能量→形变可以恢复→有记忆效应→胡克定律→瞬时响应

图 1-1 液体流动与固体变形的一般性对比