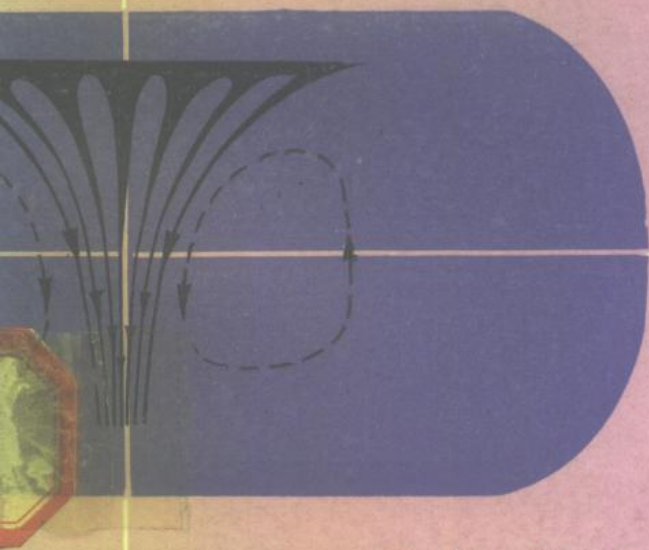


· 现代高分子科学丛书 ·

吴大诚 主编

高分子流体力学

古大治 著



四川教育出版社

现代高分子科学丛书

高分子流体动力学

古大治 著

四川教育出版社

一九八八年·成都

责任编辑 杨亚雄
特约编辑 尧汝英
封面设计 袁云松
版面设计 刘江

现代高分子科学丛书

吴大诚 主编

※ 高分子流体动力学

古大治 著

四川教育出版社出版
(成都盐道街三号)

兰州八一印刷厂排版

四川省新华书店发行

成都新硕印刷厂印刷

开本850×1168毫米1/32

印张11.5插页1字数297千

1988年3月第一版

1988年3月第一次印刷

印数:

1-790

册

ISBN7-5408-0031-3/G·32

定价: 3.95元

内容提要

本书系统地介绍了高分子流体动力学的基本概念。

全书共分十章。对连续介质流变学基础，实验流变学，粘弹流体本构方程，流体动力学问题求解和一些典型的高聚物加工流动问题等均作了介绍。书中对理论处理的沿革和比较抽象的数学形式都尽可能作了深入浅出的物理解释，适合于化工学科背景的读者阅读。

本书可供高分子材料科学和工程的作者及大专院校相应专业师生参考。

序

Herman Staudinger是本世纪最富有独创精神的化学家之一，由于他坚韧不拔的努力，高分子化学终于在二十年代后期作为一门独立学科而诞生了。尔后，愈来愈多的合成化学家、物理化学家和物理学家参加了高分子科学的研究工作，逐渐形成了包括高分子化学、物理化学和物理学的完整知识体系。在过去的半个多世纪中，出现了一代伟大的开拓者，除公认的奠基者Staudinger之外，其中的杰出代表还有Carothers、Natta、Kirkwood、Kramers、Kuhn、Debye和Flory。今天，十分遗憾，上面提及姓名的各位大师都已谢世，他们的同龄人中，健在者也已经停止研究工作。由这些先驱所建立的高分子科学已经发展到比较完善的程度，可以称之为经典高分子科学（Classial Polymer Science），其内容充分反映在国内外繁多的教材和专著中。

高分子材料工业自三十年代后期开始跃进，天然高分子在生命现象中的重要性，也是高分子科学发展的动力和源泉。目前，这些领域的研究并非山穷水尽；相

反 仍然有许多挑战性问题摆在科学界面前。这些问题中，有一些经典理论并不能很好解释，甚至完全不能解释。例如，高分子物理化学中最有影响、目前仍然流行的 Flory-Huggins 晶格模型就是一种“经典”的平均场理论。借鉴于固体物理学中对临界现象和相变研究的发展历史，可以肯定，“近代”理论的兴起并取代“经典”理论是一种必然的趋势。在分子科学的其他分支领域中，也有这种趋势，只是在近代与经典理论之间的界限很难如此明确划分。或许，唯一可以肯定的仅仅是：近代高分子科学 (Modern Polymer Science) 的大厦已经破土动工。

这套丛书不可能对近代高分子科学作完整介绍，仅约请中国科学院化学研究所、生物学部、复旦大学、中国科学技术大学和成都科技大学数位中年科学家和教授，执笔撰写，介绍近代高分子科学的部分主要内容，涉及到高分子流体的动力学和分子理论、高分子的断裂、天然大分子的晶体结构、高分子合金、聚合物中的孤子、高分子的分离、开环聚合与体积膨胀、高分子液晶以及高分子科学中的计算机模拟。本丛书仍然涉及到众多不同领域，作者的专业背景不尽相同，写作风格也因人而异。每位作者在各自专门领域中显然有更大的发言权，他们对于选材的取舍拥有

充分的自由，主编者对此不作过多限制。值得提出的是，本丛书作者中有些自1979年开始陆续在国外进修并学成归国，有些目前仍在外国工作，各书中介绍的基础理论和最近发展，就是他们多年来潜心研究的心得，包括一部分他们自己的最新成果。本丛书适于高分子专业及相邻学科的大学高年级学生、研究生、教师以及科学工作者和工程技术人员学习参考。

在本丛书即将陆续发排付印之际，主编者愿借此机会，向具有精深学术造诣并表现友好合作精神的各位作者，向为出版丛书而付出辛勤劳动的四川教育出版社的同志，表示衷心的感谢。

当然，与其他任何书籍一样，这套丛书中的各本著作，其缺点和错误也绝不能幸免，尤其当论及一些最新结果时，论点的正确与否还有待时间的考验。但是，阅读手稿的经验使我深信，本丛书的读者从这里肯定可以更快了解到近代高分子科学中一些飞速发展的前沿。

吴 大 诚

1985年9月23日

目 录

序

第一章 引论	(1)
1.1 研究非牛顿本构关系的历史.....	(2)
1.2 高分子流体的流变现象.....	(9)
1.3 连续介质假设.....	(15)
1.4 形变、流动和应力.....	(19)
1.4.1 形变和流动.....	(19)
1.4.2 应力的概念.....	(21)
参考文献.....	(24)
第二章 流体动力学问题的数学表述	(25)
2.1 运动和形变.....	(25)
2.1.1 坐标系和形变体运动的描写.....	(25)
2.1.2 速度、加速度和流线.....	(23)
2.1.3 速度梯度、形变速率和旋转.....	(30)
2.1.4 形变梯度和应变张量.....	(39)
2.1.5 无穷小应变张量及各分量的意义.....	(44)
2.1.6 应变变化率, Rivlin—Ericksen张量.....	(52)
2.2 应力张量.....	(62)
2.2.1 应力张量.....	(62)
2.2.2 应力张量的性质.....	(69)
2.3 流体动力学问题的基本方程式.....	(76)
2.3.1 质量守恒和连续性方程式.....	(77)
2.3.2 广义输运方程式.....	(79)
2.3.3 线动量守恒原理.....	(83)

2.3.4 能量守恒原理.....	(84)
2.3.5 边界条件.....	(86)
2.3.6 示例	(90)
参考文献.....	(91)
第三章 本构理论与材料的流变学分类.....	(93)
3.1 本构方程的一般法则.....	(94)
3.2 材料的流变学分类.....	(102)
参考文献.....	(107)
第四章 牛顿流体与广义牛顿流体.....	(108)
4.1 牛顿流体.....	(109)
4.2 非牛顿粘度模型.....	(111)
4.3 广义牛顿流体.....	(116)
参考文献.....	(122)
第五章 弹性体.....	(123)
5.1 广义胡克定律.....	(124)
5.2 大弹性形变的应力—应变关系.....	(129)
第六章 线性粘弹体.....	(135)
6.1 应力松弛和蠕变.....	(136)
6.2 线性粘弹性行为的力学模型.....	(140)
6.3 波尔兹曼迭加原理.....	(146)
6.4 力学模型方法与唯象方法的联系.....	(149)
6.5 线性粘弹性的算符状态方程式.....	(150)
第七章 流体非线性粘弹行为的本构方程.....	(154)
7.1 Reiner—Rivlin流体和早期非线性理论...	(154)
7.1.1 非线性逼近中“阶”的概念.....	(154)
7.1.2 Reiner—Rivlin 流体.....	(155)
7.1.3 Weissenberg 效应.....	(157)
7.2 Oldroyd 速率型本构方程	(159)

7.2.1	Oldroyd的本构理论	(159)
7.2.2	Oldroyd速率型本构方程	(168)
7.3	Rivlin—Ericksen 流体	(177)
7.3.1	Rivlin—Ericksen 流体	(177)
7.3.2	二阶流体的稳态层流	(180)
7.4	Noll的简单流体理论	(186)
7.4.1	简单流体的本构关系	(187)
7.4.2	简单流体理论的慢流展开	(192)
7.5	K—BKZ及其它非线性粘弹模型	(197)
7.5.1	Kaye—Bernstein—Kearsley—Zapas 模 型	(197)
	参考文献	(199)
第八章	高分子流体实验流变学研究中的基本问题	(201)
8.1	大分子的力学响应与流场分类	(202)
8.2	测粘流与测粘流材料函数的测定	(206)
8.2.1	测粘流运动学	(206)
8.2.2	稳态测粘流中的应力张量	(210)
8.2.3	测粘函数的实验测定	(213)
8.3	非稳态剪切流	(225)
8.3.1	小幅值振荡剪切流	(228)
8.3.2	突加稳态剪切流	(234)
8.3.3	稳态剪切流的骤然终止	(235)
8.4	拉伸流	(235)
8.5	高分子流体的实验数据	(243)
8.6	工程问题中本构模型的选用	(253)
	参考文献	(257)
第九章	流动问题的求解	(259)
9.1	牛顿流体流动问题的解	(260)

9.1.1	控制方程的无量纲化.....	(261)
9.1.2	求解流动问题的简化处理.....	(265)
9.2	非牛顿流动问题的求解.....	(275)
9.2.1	非牛顿流体动力学问题的特殊性.....	(276)
9.2.2	非牛顿流动的类型.....	(281)
9.2.3	数值解问题.....	(283)
	参考文献.....	(295)
第十章	高聚物加工流变学中的几个典型流动问题.....	(297)
10.1	压延和涂覆.....	(297)
10.1.1	压延.....	(297)
10.1.2	辊涂.....	(303)
10.1.3	线缆包覆.....	(303)
10.2	模孔入口区的流动.....	(307)
10.2.1	牛顿流体的入口流动.....	(308)
10.2.2	切力变稀行为的作用.....	(312)
10.2.3	粘弹流体的入口流动.....	(316)
10.3	纺丝.....	(319)
10.3.1	理想纺丝流与纺丝粘度.....	(319)
10.3.2	纺丝动力学.....	(322)
10.4	挤出.....	(327)
10.4.1	挤出问题的求解.....	(327)
10.4.2	挤出胀大的机理.....	(334)
10.5	不稳定流动现象.....	(337)
10.5.1	流动不稳定性.....	(337)
10.5.2	熔体破坏现象.....	(339)
10.5.3	纺丝中的拉伸共振现象.....	(340)
10.6	温度、压力和分子参数的影响.....	(342)
10.6.1	温度和压力的影响.....	(342)

10.6.2 分子参数对高分子流体流变性的影响.....	(348)
参考文献.....	(350)

第一章 引 论

1929年，流变学这门学科的奠基，标志着人们从经典连续介质力学转向新领域。半个世纪以来，高分子材料一直是这门学科的核心，尤其是研究流体的分支——非牛顿流体力学，从五十年代中期开始，以高分子流体（包括溶液和熔体）的流动行为作为这门学科研究的主要对象，逐渐独立于经典流体力学颖脱而出，其发生和发展，在很大程度上是高分子材料商品化生产促成的。

高分子流体力学的特殊性，并不在于描写运动的变化方程式（连续性方程、运动方程、能量方程），无论在经典流体力学或这门新学科中，这些方程式都是一般性地被接受的，它区别于经典流体动力学的地方，在于运动方程式中在应力张量的表示。经典流体动力学中，表示应力张量的牛顿本构关系，被人们作为一种标准的流体模型来接受，已经有300多年的历史。然而，事实证明，高分子流体的力学响应完全与这种线性的粘性流动模式相背离。因此，非牛顿本构关系的引入是这门新学科对经典流体动力学最根本的突破，同时给这门学科规定了一个在经典学科中不存在的额外任务——流体本构关系的确定。可见，高分子流体动力学的研究课题是双重的，既要探求流动问题的解，又要针对不同的高分子流体寻求流变表征。后者是前者的前提，而且决定了问题的难度，它是解决高分子流体动力学问题的关键所在。

高分子流体动力学中的本构关系的问题，其情形远不如经典流体动力学那样方便，Navier—Stokes方程加上适当的边界条件，便构成了一个流体动力学问题的全部表述。这是经典流体动力学的研究对象所决定的，因为绝大多数均相低分子液体的力学

响应都精确服从这一本构关系。然而，高分子流体组成上的多样性，结构上的复杂性，以及力学响应对流场的依赖性，使得我们不可能象在经典流体力学中那样，用一种普适的流变状态方程来对待一切流动问题，而必须针对不同的高分子流体和不同的流动分别处理。因此，本构关系的研究在分子流体动力学中具有极重要的意义。

1.1 研究非牛顿本构关系的历史

高分子流体是非牛顿流体力学研究的主要对象，非牛顿流体力学是流变学研究流体的分支，追溯本书所论课题的历史联系，自然地应从属于流变学的历史发展。

人类认识物质世界的历史是相当悠久的，对物质——物质对光、声、热、力、电等作用的响应——的理解和利用是人类自身进步和社会发展的一个根本因素。其中，人们感知并运用得最早的无疑应当是力学性质了。人类的知识从点滴的感性认识到分门别类、自成体系的学科的建立，经历了漫长的道路，现代各种新学科以及跨学科的学科的繁衍，都可以追溯各自的历史进程，了解这个进程，有助于继往开来。

西文“流变学”——RHEOLOGY一字的语源就颇有“古趣”，它取意于公元前五世纪希腊著名唯物论哲学家赫拉克利特（Heraclitus, BC, 530—470）的名言“万物皆流”（“παντα ῥεει”），由这门学科的奠基人，美国物理学家E. C. Bingham杜撰出来的。尽管流变学一词作为一门学科的名称出现，只有半个世纪的历史，但流变学思想的起源却可追溯到十七世纪的牛顿和胡克，乃至纪元前十六世纪的希伯来人和上古埃及人的时代。

流动和形变是自然界最常见的现象，人类对这类现象的认识

和应用早在史前时期就开始了。弓箭的发明是人类认识和利用弹性形变的产物^⑧，保留到今天的新石器时代的陶器，可以推知当时的人类已经掌握了粘土与水混合物的可塑性。到公元前一千六百多年，埃及人水漏计时器的设计达到了完善的地步，或许可以说，第一个有文字可考的流变学家应该是公元前1540年前后在位的埃及十八王朝的法老阿门奈希特(Amenemhet)，象形文字记载着他发明过一架水钟^{〔1〕}，这件文物一直保持到现在，它是一个锥形的容器，水从底部的开孔流出来，通过器内水位降落的高度来计报时间。现代科学家曾对这架水钟的锥角进行过非难，以为它造成的水位降落与时间不成正比，但通过一件仿制品在埃及那种昼夜温差极大的气候条件下作实验后，证明了阿门奈希特的设计是正确的。由于昼夜水温变化对粘度的影响，这个锥形角正好对此作了修正，可见在那时人们就有了温度对液体流动阻力影响的知识。

对自然现象的观察和利用丰富了人类的知识，这些原始的、今天称之为流变学的概念，不论在东方和西方都经历过类似的进程，并在古代思想史上有所反应。与赫拉克利特同时期的中国儒家代表人物孔丘也说过类似于“万物皆流”的话。“逝者如斯乎，不舍昼夜！”这是一种看待事物运动变化的思想，它包含了流变学中关于材料性质的认识论。比这两位思想家早一千多年的希伯来女预言家德博拉(Deborah)，或许把这一流变学哲理说得更为深刻和全面^{〔2〕}。圣经的士师记(Judgges)里记载着她的一首颂歌，其中唱道：“山在上帝的面前流动了”，(英译为“The mountains flowed before the Lord”)。这句话不但包含了“万物皆流”的思想，而且隐含了对流动现象作观察的时间尺度的意义。现代的地球物理和地质学研究证明了这种观念的正确性，地壳板块的漂移，冰在冰川中的流动，沧海桑田的变迁，虽然在一个人的寿命时间内难以察觉，但从地质年代的时间尺度上

观察，这种流动过程就显而易见了，象岩石这样在普通概念里毋庸置疑地认为是固体的东西，也是能形变和流动的物质了，只不过它的刚度极大（ 10^{11} 达因/厘米²量级），粘度极高（ 10^{22} — 10^{23} 泊量级）和松弛时间极长（ 10^8 年量级）罢了。德博拉的话启示我们打破了传统的力学响应观念，固体和流体响应之间的界限沟通了。古代圣哲们的名言固然不是给后世流变学家的遗训，但作为人类思想史对流变学提供的借鉴，它反应了流变学的材料观。

当然，流变学的目的不单是探索一种正确的认识论，更重要的是要寻求一套完善的方法，以对材料的力学响应作严谨的数学描写。流变学在材料观上对经典理论有两个方面的突破，一是打破了固体响应和流体响应之间的死硬限；二是打破了力学响应的线性模式。但建立在这种材料观上的本构理论及基于其上的整个动力学理论的发展，与材料的经典力学理论的发展史有着密切的关系。

正确表征材料的力学响应的方法是逐渐发展完善的，今天我们用应力张量与流变运动学张量之间的函数关系表示力学响应的本构方程，是到十九世纪经柯西（Cauchy）之手才形成的。本构关系最早的概念只是对物性所作的某些约束，如弹性理论和流体力学形成体系之前的刚体，不可压缩流体等。胡克（Hooke）关于弹簧的定律（1678年），经过J. 伯努利（James Bernoulli, 1705年）和欧拉（Euler, 1727, 1782年）的研究，引入弹性模量，在弹性力学中建立起了材料常数的概念。胡克定律所规定的线性弹性力学响应模式，是经典弹性理论赖以建立的基石。牛顿关于流体内摩擦的概念，导致了流体粘性这个材料常数的产生，有趣的是，经典流体力学的理论体系是粘性概念之后一百多年才形成的。牛顿在《原理》（《Principia》，1687年）一书中，将流体中运动物体的阻力分成两部份，一部份是与密度有关的惯性阻力，另一部份是与流体内摩擦（相对运动）有关的粘性阻

力。后来的流体力学理论就是沿着这两种思路展开的，一为只考虑惯性阻力的无粘流体力学，二为考虑粘性阻力而忽略惯性力的慢层流粘性流动。牛顿内摩擦定律，今天被叙述为“流体粘性所产生的切应力与速度梯度成正比”，这是牛顿流体本构关系的雏形。在当时，牛顿的叙述与其说是一条定律，毋宁说是一种假说，它与胡克定律不同，不是从实验的定量关系得出，而是从观察现象推测而来的，这个结论是牛顿研究的“副产物”，牛顿观察圆柱体在水池中的旋转运动，其本来目的并不在于研究流体的流动性质，而是为了建立一种涡旋运动模型，以研究行星围绕太阳运动的规律。

胡克弹性体和牛顿流体这两种在经典连续介质力学中占统治地位的本构模型，在当时并未形成象今天这样严谨的数学表述，因为本构关系作为一种力学响应的数学模型，其概念上的准确和形式上的完善程度，还取决于当时的数学水平和人们对物理量解析特性的认识。材料的受力状态应如何表征，流动和形变该如何度量，作为物理量，它在数学上的性质如何，在当时还不十分清楚。十八世纪初，常微分方程的概念才刚刚出现，其中少数问题求得了解，偏微分在当时还是一门深奥的学问，直到1760年，全世界还只有欧拉，达朗伯尔（Dalembert），兰伯特（Lambert）和拉格朗日（Lagrange）几个人懂得偏微分的技巧。向量和笛卡尔坐标的应用首推J、伯努利（1742年），欧拉立即意识到了它的重要意义，1750年他发展了刚体力学的三维理论，为了流体力学和振动理论，欧拉推进了微积分，偏微分和光滑映射，在他的晚年奠定了一般动力学的理论基础。但是，至此为止，张量的概念才刚刚萌芽。

1820年法国工程师纳维埃（Navier）从分子力学的观点，首先对各向同性弹性体和不可压缩粘性流体的运动提出了偏微分方程式，但在他的理论中仍看不见本构关系的明确定义。严格意