

粘弹性聚合物溶液的渗流 理论及其应用

夏惠芬 著 王德民 审

石油工业出版社

粘弹性聚合物溶液的 渗流理论及其应用

夏惠芬 著
王德民 审

石油工业出版社

内 容 提 要

本书对聚合物驱油基础理论、粘弹性流体模型、多孔介质模型以及粘弹性流体提高微观驱油效率的机理的研究现状进行了较为全面、系统的调研。主要阐述了粘弹性聚合物溶液的流变性及其在渗流过程中的流变特性,阐述了粘弹性聚合物溶液驱油过程中的油井流入动态和粘弹性聚合物溶液提高驱油效率的机理等问题。

本书可作为石油院校有关专业的学生和研究生参考用书,对于从事提高采收率技术科研工作的有关技术人员也有参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

粘弹性聚合物溶液的渗流理论及其应用/

夏惠芬著. —北京:石油工业出版社, 2002.7

ISBN 7-5021-3825-0

I. 粘…

II. 夏…

III. 粘弹性-高聚物-化学驱油-研究

IV. TE357.46

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 045846 号

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里二区一号楼)

河北省地勘局测绘院印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

*

850×1168 毫米 32 开本 5.375 印张 141 千字 印 1—800

2002 年 7 月北京第 1 版 2002 年 7 月河北第 1 次印刷

ISBN 7-5021-3825-0/TE·2784

定价: 20.00 元

前 言

聚合物驱微观驱油机理是当前提高原油采收率学术与技术领域内研究的热点问题。虽然近年来的一些实验结果表明粘弹性聚合物可以提高微观驱油效率，但对其物理本质的研究还需深入，在聚合物驱油过程中的许多未知现象与规律还有待进一步探索。这既是制约聚合物驱技术发展的关键性问题，同时也是石油工程领域的前沿课题，具有重要的理论价值。

本著作在查阅大量中外文资料基础上，对聚合物驱油基础理论、粘弹性流体模型、多孔介质模型以及粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率机理的研究现状进行了综合评述与分析，对粘弹性聚合物溶液的流变性及其渗流过程中的流变特性进行了详细论述，并将其应用于提高采收率技术中的油井流入动态预测及微观驱油机理的研究中，使基础理论研究及其与应用技术研究得到了有机的结合。

本著作得到了王德民院士的悉心指导及最终审阅，在此，向王德民院士表示由衷的敬意和感谢！作者非常感谢岳湘安教授等人为本书实验所提供的大量帮助；感谢石油工业出版社对本书出版给予的大力支持，感谢所有为本书出版付出辛勤劳动的人。

书中难免还有疏忽、遗漏以及不完善之处，期待读者批评指正。

作 者

2002 年于大庆

目 录

第一章 绪论	(1)
第一节 聚合物驱油基础理论的发展现状.....	(1)
第二节 粘弹流体本构关系的发展历史.....	(4)
第三节 粘弹性聚合物溶液流动中的流变现象.....	(10)
参考文献.....	(18)
第二章 聚合物溶液的粘弹特性	(21)
第一节 引言.....	(21)
第二节 牛顿与非牛顿流体.....	(22)
第三节 聚合物溶液的非线性粘性.....	(23)
第四节 聚合物溶液的粘弹性模型.....	(29)
第五节 粘弹性聚合物溶液的实验研究.....	(40)
参考文献.....	(48)
第三章 聚合物溶液在渗流过程中的流变特性	(50)
第一节 引言.....	(50)
第二节 聚合物溶液通过岩心后的视粘度变化.....	(56)
第三节 聚合物溶液在多孔介质中的渗流特性.....	(58)
第四节 聚合物溶液在渗流过程中的流变特性.....	(67)
第五节 HPAM 水溶液在渗流过程中的粘弹性效应 ...	(92)
第六节 非线性变参数粘弹流体一维渗流模型.....	(104)
参考文献.....	(107)
第四章 聚合物溶液在油藏中的流动	(109)
第一节 基本问题.....	(109)
第二节 聚合物溶液的单相渗流模型.....	(112)
第三节 油—聚合物溶液的两相渗流模型.....	(123)
第四节 聚合物驱油井流入动态预测软件的研制.....	(129)

参考文献.....	(132)
第五章 粘弹性聚合物溶液提高微观驱油效率的机理.....	(133)
第一节 聚合物溶液微观仿真驱油实验.....	(133)
第二节 聚合物溶液的粘弹性对各类残余油的驱替 机理.....	(135)
第三节 聚合物溶液的粘弹性使残余油形成稳定的 “油丝”通道的机理	(147)
第四节 不同粘弹特性的聚合物溶液驱油时的岩心驱 油效率.....	(151)
第五节 聚合物驱油的相对渗透率曲线.....	(153)
参考文献.....	(162)

第一章 绪论

第一节 聚合物驱油基础理论的发展现状

在石油工程领域，在世界范围内通过油井依靠天然能量开采和人工补充能量开采后的油藏，原油采出量平均不到原始石油地质储量的 50%，即有一半左右的石油储量残留在地下。在未发现既经济又丰富的石油替代物之前，要保持石油稳定供给，不仅需要勘探上作出更大的努力，同时还需努力提高现有油藏的生产能力。

近年来，随着油井含水的增加，原油开采的经济效益越来越差，人们试图寻找新的开采方式，诸如化学驱、热力采油、微生物采油等开采方式将其开采出来，聚合物驱油是当前一种日趋成熟的提高水驱油田采收率的方法，已由先导性试验步入工业化应用阶段。

目前，人们对聚合物驱油基础理论的研究主要从以下几方面入手。

一、宏观波及效率

使用高粘性水提高采收率的作法由来已久。早在 1944 年 Detling 就发表了一项关于粘性水驱油可使用添加剂的专利，随后其他专利也相继介绍了具体的水溶性聚合物及粘性水驱所适合的油藏条件。在众多的添加剂中，如甘油、糖、黄原胶、乙二醇、聚丙烯酰胺等，Sandiford (1964) 指出水解聚丙烯酰胺 (HPAM) 的效果好于其他水溶性聚合物，因为即使 HPAM 在极低的浓度下，也会使水驱采收率获得较大的提高。对于聚合物驱油方法来说，早期的研究观点是聚合物驱并不增加油藏的微观扫

油效率，在驱替足够高的孔隙体积倍数之后，残余油饱和度对所有粘度比都是相同的，即认为聚合物驱之后残留于孔隙介质中的油的体积与水驱之后相同 [Dyes, Caudle 和 Ericson (1954) 及 Tunn (1974 年)]。后来，经过人们大量的研究表明，聚合物驱提高采收率主要是改善流度比，调整吸水剖面，从而扩大波及体积，提高波及系数 (Stiles, 1949; Dykstra & Parson, 1950; Barnes, 1962; Pye, 1964)。

显然，在 20 世纪 40~60 年代人们对聚合物驱油机理的研究多从经济效益的角度出发选择水溶性高分子聚合物，围绕聚合物溶液提高油藏的宏观波及系数及聚合物驱所适合的油藏条件及驱油效果等问题进行研究的。在证实了聚合物溶液的驱油效果之后，人们对聚合物溶液在地层中的流变性和渗流特性进行了广泛而深入的研究，以期更加细致、准确地解释聚合物的驱油机理。

二、聚合物溶液在油藏孔隙介质中的粘弹性

在众多聚合物驱油的模拟工作中，都假设聚合物溶液是牛顿或假塑性流体。Dauben & Menzie (1967) 用聚环氧乙烷研究聚合物溶液在多孔介质中的流变性质时发现：聚合物溶液在多孔介质中的表观粘度在流量很小时 ($0 \sim 2 \text{ ft/d}$) 接近于溶液的粘度，当流量增加时，表观粘度随之增加，表现为剪切增稠的流变行为，而且聚环氧乙烷流过多孔介质时的压降大幅度增加。此外，在 HPAM 的岩心流动实验也发现了类似的现象。进一步的研究结果表明：出现粘弹效应的临界流量与 HPAM 的浓度、分子量、水解度、岩心的渗透率、矿化度、温度等诸多因素有关 (Heemskerk et al, Mohammad et al, 1992)。

针对聚合物溶液在多孔介质中粘弹兼具的流变特征，Mashall & Metzner (1967) 建议使用无量纲因子 N_{De} ——德博拉数表征流体的粘弹效应，并给出了均匀粒子充填床 N_{De} 与床层结构及流体参数之间的关系式。此后的一些研究者 Hass、Durst 等人 (1981) 也相继给出了确定 N_{De} 的半经验公式，对于这些公式的适用范围有待于进一步研究。Hester 分析认为聚合物溶液在均

匀球形充填的多孔介质中的拉伸应变与孔隙介质颗粒的大小和流量无关。Lehrstuhl für strömungsmechanik 等人（1994 年）研究了聚合物溶液在多孔介质中的流动，所考虑的流体是 Maxwell 流体，主要认为聚合物溶液在多孔介质中的粘度增加是由聚合物分子的拉伸造成的，用阻力系数描述其在多孔介质中的阻力增加。D. M. Jones 和 K. Walter（1989）定义 Trouton 比描述流体的弹性，认为对无弹性流体，在所有的拉伸速率下 $TR = 3$ ，偏离该值的所有流体均认为是粘弹流体。韩显卿（1988）等人定义了滞留在孔隙中的聚合物分子的粘弹性效应系数，用慢速降压和升压过程对其进行了分析。

三、聚合物溶液在多孔介质中的渗流模型

自 70 年代以来，人们对聚合物溶液在多孔介质中渗流问题的研究已取得了许多重大的进步。国内外不少研究人员从流变学基础理论出发，采用了一系列的流变模型修正达西定律。目前，比较成熟的渗流模型是修正的 Blake - Kozeny 模型。该模型在很大程度上能描述无弹性非牛顿流体的流动阻力特性，但是当用来计算粘弹性流体在多孔介质中的渗流阻力特性时，却出现了较大的偏差。为此，一些研究学者引入了粘弹性流体的流变模型，如 Kelven 模型（1989）、Rouse - Bueche 模型（1993）等等。这些模型结合地层中的一些参数较好地解释了聚合物溶液流过多孔介质时的阻力特性。

四、聚合物驱油机理研究

自从人们对聚合物驱可以提高采收率进行研究以来，就开始了对其驱油机理的研究，早期的关于聚合物驱油机理的研究主要是以毛管数和分流方程为基础，用物理模拟和数值模拟方法进一步认识到聚合物驱油机理是降低油水流动度比，抑制注入液突进，扩大波及效率。总之，在此期间，人们主要研究的是聚合物溶液对宏观驱替效率的影响。

关于聚合物驱油机理，人们的认识还不一致。有人认为，注粘性水与常规注水的最终残余油饱和度是相同的；也有人认为，

聚合物驱不能在波及面积内使残余油饱和度有很大降低，目前国内一种普遍的观点是：聚合物驱只能提高波及效率，而不能提高微观驱油效率。实际上，人们对聚合物溶液在地下驱油过程中的渗流特征的认识还不够完善，特别是其微观物理化学渗流规律，还有待进一步深入。

郭尚平等（1990）、黄延章利用微观渗流模型，在1990年就进行了聚合物驱油微观机理的研究，认为聚合物提高驱油效率的机理是由于聚合物溶液与油的剪切应力大于水与油的剪切应力。近几年来，王德民等（2000）初步探索聚合物溶液的粘弹性对微观驱油效率影响。从一些微观驱油实验中发现，粘弹性流体和粘性流体在同样条件下驱替水驱后残余油，前者的驱油量大大超过了后者的驱油量。所有这些研究成果，无疑对聚合物驱油理论的研究有了新的认识，产生了质的飞跃。

第二节 粘弹流体本构关系的发展历史

研究流体流动和变形的问题属于流变学的范畴，主要用本构方程来描述。西文“流变学”——Rheology 一字的语源就颇有“古趣”，它取意于公元前5世纪希腊著名唯物论哲学家赫拉克利特（Heraclitus, BC530—470）的名言“万物皆流”，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17世纪的牛顿和胡克，乃至16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，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。

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子也说过类似于“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地记载着她的一首颂歌，其中唱道：“山在上帝的面前流动了”。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，像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，粘度极高和松弛时间极长（ 10^3 年）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 19 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）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。牛顿关于流体内部摩擦的概念，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）一书中，将流体中运动物体的阻力分成两部分，一部分是与密度有关的惯性阻力，另一部分是与流体内部摩擦（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，在当时并未形成像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。18 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、达朗贝尔（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。严格意义的材料力学响应的理论，决定性的一步是由柯西完成的。他在 1823~1841 年间写成的一系列论文里，详尽地阐明了连续介质、应力、应变等弹性理论的重要概念，提出了有关无穷小应变、有限应变、局部旋转和应力的完整而严密的理论，发现并论证了应力张量的存在，奠定了向量代数、张量代数和连续介质力学的基础；本构关系就是在柯西那里才开始得到严格的定义和表述的，他将本构关系用张量的形式表示为：连续介质中某空间位酌上某时刻的应力，是应变或应变速率张量的函数。柯西的贡献，使连续介质力学的研究满意地受用了一百多年。

柯西的建树尚不止于连续介质理论，他还修正并发展了纳维埃的分子力学方法，发展了单原子晶体的弹性理论。这一工作导致了弹性理论的另一种逼近。1839 年，乔治·格林 (G.Green) 系统地发展了弹性的贮能函数理论。柯西的处理还揭示了广义胡克定律 (用柯西的方法表述胡克定律的结果) 中弹性常数数目与材料微观结构对称性之间的关系。

牛顿粘性概念建立 150 年之后，泊松 (Poisson, 1831 年) 对线性粘性流体首次推出了本构方程 (Navier—Poisson 定律)。斯托克斯 (Stokes, 1845 年) 首先区分了流体运动中材料元旋转和伸缩的不同意义，指出应力张量对旋转无依赖性。他还求解了一些简单流动问题，阐明粘度对流体运动的效应。在斯托克斯的理论中，牛顿流体本构关系明确地出现于运动方程，这就是著名的 Navier—Stokes 方程式，成为经典流体力学理论的终极表述。

至此为止所成就的两个材料线性响应的力学理论，在继后的近百年间，在人们的心目中产生了极大的期望。小应变的弹性理

论, 对于大多数金属材料, 在屈服前经历千分之几应变情况下的实验结果是相当满意的, 在流体力学中的成功几乎是全面性的。等温条件下的 Navier - Stokes 方程, 对于均相低分子液体的流动问题具有高度的精确性。我们可以发现, 此前此后的大多数其他连续介质力学描述, 在形式的简洁和典雅上都不能与这两个线性理论比美。经典理论的成功是以用传统工程材料为基础的生产活动为背景的。“科学之有赖于生产, 更甚于生产之有赖于科学”, 近代工业生产和科学技术的发展, 需要大规模地生产和使用具有一定力学性质的新材料, 这些材料有些取材于自然, 有些是天然材料的再制品, 有些则是人造的新材料, 如天然高分子材料、生物流体、润滑剂、涂料, 以及后来的合成高分子材料等。当研究这些材料的力学性质时, 经典的材料理论面临着挑战。这些材料的突出特性是弹性与粘性兼备, 仔细研究发现, 甚至金属材料也并不严格遵从胡克定律。事实上, 早在弹性理论和粘性流体力学臻于完善的时期, 这些现象就引起了不少科学家的注意。如韦伯 (W. Weber) 对生丝蠕变行为的研究 (1835 年); 柯尔拉乌希父子 (R. Kohlrausch 和 F. Kohlrausch) 对玻璃丝和橡胶丝弹性后效现象的研究 (1847, 1863 年), 麦克斯韦尔 (J. C. Maxwell) 1868 年发现应力松弛现象, 并用胡克弹性和牛顿粘性的线性组合描写材料的粘弹兼备的行为, 建立了松弛时间的概念。1874 年, 玻尔兹曼 (L. E. Boltzmann) 提出了著名的叠加原理, 对线性粘弹理论作了总结。这一原理最重要的创见, 是提出力学响应对形变历史依赖性和退化记忆的观点。玻尔兹曼的贡献标志了本构理论从经典向现代过渡的阶段。

流变学的现代发展是从第二次世界大战结束后开始的。20 世纪 40 年代化学工业所提供的大量新材料, 尤其是合成高分子材料工业的兴起, 是这一发展的重要原因。材料科学面临着新材料的复杂力学响应, 需要新的本构关系, 19 世纪留下来的几个经典本构模型再也不能满足要求了。

现代连续介质流变学理论是从 M. Reiner 开始的。1945 年他

提出了流体的非线性粘性理论；1947 年 Weissenberg 收集并发表了复杂流体非线性力学响应的一些严格的实验结果。1948 年 Reiner 又发表了关于有限弹性应变的研究，但 Reiner 的理论是对非线性效应的一种级数形式的多项式逼近。差不多同时期（1947~1949 年），Rivlin 的工作开创了有限弹性应变的现代理论，直接针对橡胶这类高弹性物质的弹性形变问题作出了唯象处理，并系统地展开了不可压缩 Reiner 流体的动力学。50 年代，一般本构关系理论的研究，是流变学的现代连续介质力学理论发展的重要阶段，这一理论的大部分成果，都是在这个时期取得的。Oldroyd 1950 年的研究结果奠定了本构理论在方法论上的基础。50 年代中后期，以 Rivlin, Erickson 和 Green 为代表，和以 Trllesdell、No11 等为代表的两个学派，差不多同时独立地对现代连续介质流变学理论体系的形成作出了巨大贡献。他们的工作代表了这门学科的现状和前沿，继后至今的 20 多年所成就的一切，只是这一理论的进一步丰富。

美国物理化学家 E.C.Bingham 在研究了各种胶体物质分散体系的流动之后，深感建立一门“总和各种不同物质的流动与形变的应用科学”的必要性和重要性，于 1929 年创立了流变学会。从此，流变学作为一门独立的学科领域而出现，并在以后的几十年间取得了惊人的发展。由于流变学是一门高度综合性的交叉学科，其种类繁多，很难进行严格分类。从研究方法来看，流变学可分为实验流变学和理论流变学两大类。实验流变学是通过现代实验技术来揭示物质的流变规律，其研究内容大致有 3 方面：建立物质的经验或半经验流变模型，用以直接解决工业生产中的流变学问题；揭示物质在不同的应力条件、变形历程、温度、辐射、湿度、压力等因素影响下其流变性的物理本质；研究测量原理和测试技术，用以研制或改进测试仪器和测试手段。理论流变学应用力学、数学等基本理论与方法，研究物质的流变现象。建立能够充分描述材料内部结构与物质力学特性之间关系的流变模型，揭示物质流动与形变的本质与规律性。

从研究物质流变性的不同层次上，流变学可分为宏观流变学与结构流变学两大类。宏观流变学将材料作为连续介质处理，用连续介质力学方法来研究物质的流变性，所以又被称之为连续介质流变学。由于这种研究方法的目的在于探索作为整体运动的流体或者包含大量分子的流体微团的统计平均流变特性，而不考虑物质的内部结构，因此又被称之为唯象流变学。结构流变学从分子、微观等不同层次出发，研究材料流变性与物质结构（包括化学结构、物理结构和形态结构）的关系。结构流变学还常被称为分子流变学或微观流变学。

从工程应用角度划分，流变学种类繁多。常见的有：聚合物流变学，其研究对象为聚合物材料（聚合物固体和溶液）；生物流变学，其研究对象为生物流体（如血液、粘液、关节液等）和生物物质（如肌肉、心脏、膀胱、其他软组织、软骨等）；石油流变学，其研究对象为原油、天然气、钻井液、完井液、压裂液、驱油剂、调剖剂等等；另外还有冶金流变学、地质流变学、土壤流变学等等。

无论按照什么原则分类，流变学总体的研究内容可概括为 3 个方面：对材料物性的研究，包括对物性的测量和建立描述物质非线性流变性本构方程；用实验、理论和数值模拟方法研究物质的复杂变形和流动规律；工程应用研究。在高分子材料加工以及高分子聚合物、悬浮体有关的工业技术中，无论是为了提高产品的质量和产量、降低成本，还是为了实现工艺的计算机辅助设计、加工及制造（CAD、CAM、CAE），都需要对生产过程中的流变学问题进行深入的研究。

第三节 粘弹性聚合物溶液流动中的流变现象

粘弹性流体具有粘性和弹性双重特性，在剪切流动中，不仅其粘度函数与剪切持续时间有关，而且还存在法向应力差。粘弹

性流体由于法向应力差的存在产生许多特殊的流动现象，下面列举一些典型的非牛顿流体流动实验，以期直观地说明粘弹性流体的流动现象，建立起对粘弹流体流变性及流动特性的感性认识。

一、稳态剪切流中的法向应力效应

在稳态剪切流及相关的简单流动中，高分子流体表现出许多与法向应力不相等相关的现象，如：爬杆现象——威森伯格效应；圆盘在杯中旋转时，流体的二次流谱的逆转；开渠流中液体表面略为凸起等。

下面分析爬杆现象——威森伯格效应。

取两个烧杯，一个盛放低分子流体，另一个盛放某种高分子流体。将转动的轴棒置于低分子流体中，则轴棒附近的流体因受离心力将被向外推，杯中心临近的液面下降（见图 1-1a）。若将转轴置于高分子流体中，则情况相反——流体趋向中心，攀轴

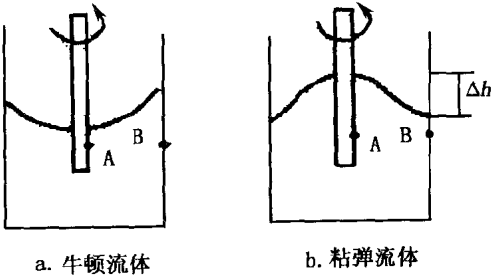


图 1-1 威森伯格效应

而上（见图 1-1b）。即使在很低的转速下，爬杆现象也十分显著。轴旋转越快，流体上爬越高。这一现象是 Weissenberg 于 1944 年在英国伦敦帝国学院发现，并于 1946 年首先解释的，所以这种现象被称为 Weissenberg 效应。

聚丙烯酰胺水溶液、聚异丁烯萘烷溶液，均可发生爬杆现象，而低分子量的聚丁烯则不能。以下的分析将证明爬杆现象是