



石油高等院校特色规划教材

石油工程流变学

张立娟 岳湘安 编



石油工业出版社
Petroleum Industry Press

石油教材出版基金资助项目

石油高等院校特色规划教材

石油工程流变学

张立娟 岳湘安 编

常州大学图书馆
藏书章

石油工业出版社

内 容 提 要

在油气开采中所涉及的流体,大多属于非牛顿流体,例如原油、钻井液、水泥浆、压裂液、聚合物溶液、多元复合驱油体系等。了解和研究这些流体的流变性,对于改善油气田开采效果,具有十分重要的意义。本书主要介绍流变学的基本现象、基本概念,讲授石油开采中复杂流体的流变模型及流变性测试的基本方法,使学生建立起流变学的基本思想和分析问题的基本思路,奠定应用流变学基本理论分析石油开采中流变学问题的基础。

本书可作为石油工程专业本科生教材,也可作为研究生和现场工程人员的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

石油工程流变学/张立娟,岳湘安编.

北京:石油工业出版社,2015.12

(石油高等院校特色规划教材)

ISBN 978-7-5183-0876-7

I. 石…

II. ①张…②岳…

III. 石油工程-流变学-高等学校-教材

IV. ①TE②037

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 212654 号

出版发行:石油工业出版社

(北京市朝阳区安华里 2 区 1 号楼 100011)

网 址:www.petropub.com

编辑部:(010)64523579 图书营销中心:(010)64523633

经 销:全国新华书店

排 版:北京苏冀博达科技有限公司

印 刷:北京中石油彩色印刷有限责任公司

2015 年 12 月第 1 版 2015 年 12 月第 1 次印刷

787 毫米×1092 毫米 开本:1/16 印张:11.75

字数:294 千字

定价:24.00 元

(如发现印装质量问题,我社图书营销中心负责调换)

版权所有,翻印必究

前 言

随着石油工业的迅速发展,不断暴露出新问题。许多涉及油藏和地下多孔介质中的问题因为原油和驱油介质及相关工作液的流变性而变得复杂化,解决这些问题需要流变学的基础知识。一些石油用的驱油剂(如聚合物溶液等)具有特殊的流变现象,这些流变现象尤其在地层孔隙中的流变行为等待着人们去认识、去探索。因此,作为石油工程专业的学生学习这门课程有着十分重要的意义。

本教材与国内现有同类教材比较,具有鲜明的特色及创新之处:

(1)在框架结构上,体现使学生建立起流变学的基本思想和分析问题的基本思路。以流变学在石油工程中的应用为背景,从基本现象、基本概念出发,阐明石油开采中复杂流体的流变模型及流变性测试的基本方法,以应用实例为对象,分析石油工程中流变学的具体应用特点。

(2)在编写内容上,体现应用型人才的培养需求。结合我国石油工业的发展和国际上油气田开发工程人才培养趋势,注重将流变学基础理论与石油工程应用衔接起来,奠定学生应用流变学理论分析石油开采中流变学问题的基础。

(3)反映前沿领域的最新研究成果。石油工程流变学是一个综合性很强的边缘学科,不仅涉及的理论十分广,而且流体种类繁多,新技术不断出现。在教材中也将体现石油工程流变学领域内的新理论、新观点和新技术成果。

本教材是为石油高校编写的,经过了近十年的课堂教学、试用、修改和补充。它可作为油藏工程、采油工程、钻井工程、石油地质及油田应用化学专业的教科书,以及相近专业的教学参考书,并可供矿场和有关科研技术人员参考。

由于学科发展很快,很多方面都在推陈出新,由于笔者水平有限,有些内容难以完全反映到本书内,若有不当之处,希望同行及读者批评和指正。

编 者

2015年6月

目 录

第1章 绪论	1
1.1 流变学概述	1
1.2 牛顿流体和非牛顿流体	6
1.3 典型的流变现象	9
复习思考题	14
第2章 张量代数与分析基础	15
2.1 基本概念	15
2.2 张量代数	19
2.3 度规张量和共轭度规张量	20
2.4 张量的大小和张量不变量	22
复习思考题	23
第3章 连续介质力学基础	25
3.1 连续介质力学基本概念	25
3.2 连续介质流动的描述	29
3.3 连续介质中的应力	34
3.4 流体动力学基本方程	38
复习思考题	42
第4章 流体的本构方程	44
4.1 概述	44
4.2 纯黏性流体本构方程	47
4.3 触变性本构方程	63
4.4 黏弹性本构方程	67
4.5 开发本构方程的方法	74
复习思考题	75
第5章 流变性测量方法	77
5.1 概述	77
5.2 牛顿流体测黏流	79
5.3 黏度计	86
5.4 流变仪	95
复习思考题	101

第 6 章 原油的流变性	102
6.1 原油的组成	102
6.2 温度对原油流变性的影响	106
6.3 原油中的溶解气对流变性的影响	108
6.4 含水率对原油流变性的影响	110
6.5 热处理对原油流变性的影响	111
6.6 原油的触变性	112
6.7 原油的黏弹性	117
6.8 原油减阻输送	118
复习思考题.....	121
第 7 章 钻井液的流变性	122
7.1 钻井液的作用、组成和分类.....	122
7.2 钻井液常用的流变模型	124
7.3 钻井液流变性的影响因素	127
7.4 钻井工艺对钻井液流变性的要求和调整方法	129
7.5 流变理论在钻井和水力参数设计中的应用	130
复习思考题.....	132
第 8 章 压裂液的流变性	133
8.1 油层压裂	133
8.2 压裂液的组成和类型	134
8.3 基液和压裂液的流变模型	138
8.4 压裂液流变性的影响因素	140
8.5 压裂液的流变性在水力压裂设计中的应用	144
复习思考题.....	147
第 9 章 聚合物的流变性	148
9.1 聚合物及其特点	148
9.2 聚合物驱常用的聚合物	154
9.3 聚合物溶液的主要流变模型	166
9.4 影响聚合物溶液流变性的主要因素	167
9.5 聚合物溶液在多孔介质中的流变性	172
9.6 聚合物溶液流变性在矿场方案设计中的应用	178
复习思考题.....	181
参考文献	181

第1章 绪论

DIYIZHANG



什么是流变学呢？简单地说，流变学(Rheology)是研究物质在外力作用下流动与形变规律的科学，Rheo 在希腊语中就是流动的意思。流变学具有多科学交叉性，基础学科领域是力学、物理学和数学，涉及的其他学科领域包括材料科学、化学等。流变性是物质的动力学特性，而不是单纯的物理特性，一般要从理论和实验两个方面去研究。

1.1 流变学概述

1.1.1 流变学的概念

1.1.1.1 典型的流变现象

1) 挤出胀大

当甘油等小分子水溶液(牛顿流体)和聚丙烯酰胺溶液(黏弹性流体)分别从一个大容器通过小直径短圆管流出时，将会出现如图 1.1 所示的现象。牛顿流体的流动直径 D_e 与圆管直径 D 几乎相等；而黏弹性流体的流动直径 D_e 却大于 D ，呈胀大形状。

在聚合物加工中大量应用流变学，聚合物加工中也存在挤出胀大现象，其中一个典型的例子是口模设计。聚合物熔体从一个矩形截面的口模中流出来时，长边胀大比短边更加显著，长边中央最甚，如图 1.2(a)所示。因此，要想产品为矩形截面，口模不能为矩形，而必须是如图 1.2(b)所示的形状(狗骨状)。聚合物在挤出过程中，对挤出速度有要求。如果挤出速度超过某一数值，挤出物表面就会出现竹节状、鲨鱼皮状或扭曲等，而且影响产品的质量。

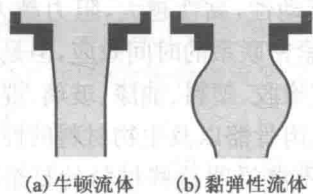


图 1.1 挤出胀大

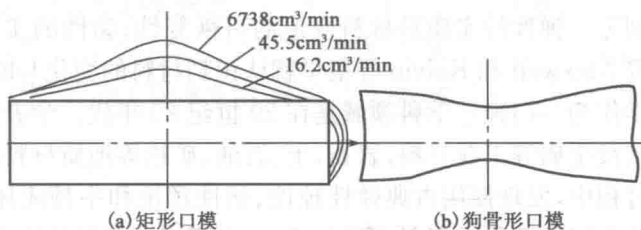


图 1.2 聚合物加工口模设计

2) 爬杆现象

爬杆现象常见于一些高分子溶液配制和制备过程中。取两个烧杯，一个用来配制甘油类

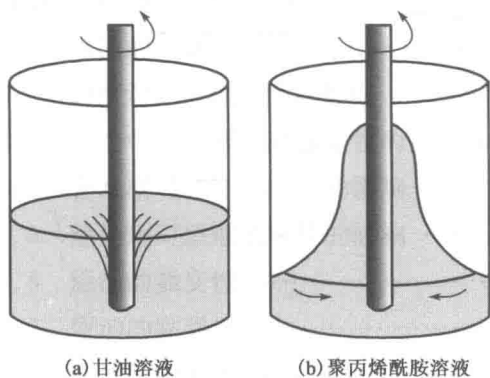


图 1.3 爬杆现象

小分子水溶液,另一个用来配制聚丙烯酰胺溶液。配制溶液过程中,通常需要用搅拌器搅拌。使用搅拌器对这两种溶液同时进行搅拌,两者现象不同,甘油溶液液面的中央呈向下凹形,而聚丙烯酰胺溶液液面沿着搅拌棒向上爬升,如图 1.3 所示。旋转速度越快,聚丙烯酰胺溶液浓度越高,流体爬升高度越大。此现象称为 Weissenberg 效应。

以上两种现象说明,从外观上难以分辨的两种溶液,在外力条件下它们的流动行为会有较大的差异性。通过对材料流变性的研究,能够更加充分地展现出材料本身的多样化和个性化的特点。

1.1.1.2 流变学的定义

作用于物体上的力会使物体产生变形。对于固体,当施加一定的外力时,固体也要发生变形;但是当变形量达到一定程度时,其内部的变形阻力就会阻止固体继续变形。固体不呈现流动性。如为弹性固体,在外力作用下会产生形变,当力移去后,物体恢复原状,所发生的变形属弹性变形(如橡皮筋的拉伸)。对于流体,当对它施加剪切外力时,不论此外力如何小,它都会发生变形,并且将不断地变形下去。这种不断的变形运动,就称为流动。

流变学作为研究物质流动和变形的科学,是力学的一个分支,具有交叉学科的特点。流变学同物理学关系密切,就流变学所研究的物质来说,它又与化学,特别是胶体化学、高分子化学有密切关系。流变学是一门研究方法的科学,不限定其研究对象。例如,土壤流变学除了涉及土木工程外,还涉及农业科学。地球内部的流变学与地球物理学有关,还与地震、火山预报等有关。

1.1.2 流变学的发展简史

流变学的发展可追溯到史前狩猎时代。由狩猎工具的弓箭和文物考古出土的新石器时代的陶器可推知,当时的人类已经认识并掌握了黏土和水混合物的可塑性。塑性的实质是发生形变的有条件性及形变后的不可恢复性,如陶器是土和水混合物在高温下烧制而成。

1.1.2.1 流变学的产生

英国物理学家 Maxwell 在 1869 年发现,材料可以是弹性的,又可以是黏性的。对于弹性材料,当形变量一定时,应力保持恒定;对于黏性材料,应力不能保持恒定,而是以某一速率减小到零。弹性的实质是材料变形的可恢复性;黏性的实质是抗流动性,黏性越大,阻力越大。尽管 Maxwell 和 Kelvin 等很早就认识到材料的变化与时间存在紧密联系的时间效应,但是流变学作为一门独立学科领域是在 20 世纪 20 年代。学者们在研究橡胶、塑料、油漆、玻璃、混凝土以及金属等工业材料,岩石、土、石油、矿物等地质材料,血液、肌肉骨骼以及生物材料的性质的过程中,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性。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。在接受了他的同事 Classics 教授的建议后,E. C. Bingham 提出“流变学”一词,意思就是研究物质的变形和流动。这个想法得到了许多学者的赞同,并于 1929 年创立了一个新的学会——流变学会(Society of

Rheology, SOR)。在第一次流变学会议上,报道了一些性质和行为各不相同的材料诸如沥青、润滑剂、塑料和橡胶等的文章,初步给出了研究对象所涉及的范围及众多学科领域。流变学会的成立,标志着流变学的产生。

1.1.2.2 流变学在近代的蓬勃发展

自1929年美国创建流变学会以来,1939年,荷兰皇家科学院成立了以Burgers教授为首的流变学小组;1940年,英国出现了流变学家学会。当时,荷兰的流变学研究工作处于领先地位,1948年国际流变学会议就是在荷兰举行的。法国、日本、瑞典、澳大利亚、奥地利、捷克斯洛伐克、意大利、比利时等国也先后成立了流变学会。后来,许多重要的流变模型和本构方程都以研究者名字进行命名,Maxwell模型和Kelvin模型是最简单的黏弹模型,Bingham模型是具有屈服应力的广义牛顿流体模型,Burgers模型是研究混凝土及沥青混合料时常用的模型。

1.1.2.3 流变学在现代的飞速发展

流变学的发展同世界经济发展和工业化进程密切相关。对比流变学在近代的发展,流变学在现代获得了飞速发展。随着科技的进步及冶金制造业、聚合物加工业、石油工业、医疗卫生事业的发展,流变学渗透到各行各业。

(1)在工业新产品的研制中,现代工业需要耐蠕变、耐高温的高质量的金属、合金、陶瓷,油田开发需要耐温、耐盐、稳定性好的聚合物等,因此,同固体蠕变和黏弹性有关的流变学迅速发展起来。

(2)在地球科学中,流变学为研究地壳中极有趣的地球物理现象提供了物理—数学工具,如冰川期以后的上升、层状岩层的褶皱、造山作用、地震成因以及成矿作用等。对于地球内部过程,如岩浆活动、地幔热对流等,可利用高温、高压岩石流变试验来模拟,从而发展了地球动力学。地球流变学是将流变学的基本原理与方法应用于地球的科学。按岩石圈不同层次的构造、不同尺度及不同构造体制下研究岩石的流变特征,分为岩石、地壳、上地幔、岩石圈、造山带、盆地流变学。

(3)蠕变断裂流变学发展起来。在土木工程中,建筑的土地基的变形可延续数十年之久。地下隧道竣工数十年后,仍可出现蠕变断裂、甚至坍塌。因此,土流变性能和岩石流变性能的研究日益受到重视。

1.1.3 流变学的分类

流变学是一门高度综合性的交叉学科,其种类繁多。从研究方法层面上,流变学可分为实验流变学和理论流变学;从研究尺度层面上,可分为宏观流变学和结构流变学;从工程应用角度上,可分为聚物流变学、生物流变学、石油工程流变学、冶金流变学、地质流变学、土壤流变学等。

1.1.3.1 实验流变学和理论流变学

实验流变学是通过现代实验技术来揭示物质的流变规律,其研究内容大致有三方面:(1)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;(2)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;(3)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。

1.1.3.2 宏观流变学和结构流变学

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,因此又被称为唯象流变学。结构流变学从分子、微观和细观等不同层次出发,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,常被称为分子流变学或微观流变学。

柔性链高分子稀溶液的结构流变学理论是发展得最充分的。比较典型的结构模型是弹性哑铃分子模型和珠簧链(Rouse-Zimm)模型。柔性链高分子链如同无规行走链,在平衡态服从高斯分布。由于在形变时构象熵减小,产生回复到平衡态的熵弹性。可以证明,在分子构象变化不大时,弹性力与形变量成正比,类似于胡克弹性定律,因此,熵弹性就可以抽象为一个胡克弹簧。而大分子在溶剂中运动受到的黏滞力就好像刚性球在黏性介质中运动一样。这样综合弹性和黏性概念的结果就构成了由弹簧连接两球的力学模型。假定在单位体积中有 n 个这样构成的弹性哑铃悬浮在牛顿流体中,从物理角度看,哑铃模型的最大弱点是将柔性万千的高分子简化为一弹簧,也就是忽略了大量分子的自由度,而以单一松弛时间代替。为了尽可能反映高分子的物理结构和尽可能准确地描写各种实际的流变性质结构模型不断发展,由 Rouse 最初提出的珠簧链模型,再由 Zimm 推广到包括流体力学相互作用的一般场合,再由 Lodge 等导出显示流变学本构方程。珠簧链(Rouse-Zimm)模型是将高分子链更合理地视为一系列高斯弹簧单元串联成的。将每个弹簧单元运动时受到的黏滞力集中在一个球上,这样就形成了珠簧链。每一对珠簧称为一个统计链段或亚分子。该模型在定量描述柔性链高分子的稀溶液在低剪切速率下的流变性和线性黏弹性行为方面是相当成功的。当提高剪切速率和加以高频振动,就会发现该模型有一系列即使在定性上也不符合实验结果的特点:(1)高频振动时,模量或黏度偏低;(2)黏度是常数,即高分子的稀溶液应是牛顿液体,实际上极稀的高分子的稀溶液也会表现出剪切变稀的现象;(3)拉伸黏度升至无穷,实际上拉伸黏度一般都随拉伸速度提高到某一范围,拉伸黏度迅速增加,但趋于有限值;(4)高速下分子不现实的巨大拉伸也是模型的一个本质特点。

1.1.3.3 各种应用流变学

聚合物流变学,其研究对象为聚合物材料(聚合物熔体和溶液)。生物流变学,其研究对象为生物流体(如血液、黏液、关节液等)和生物物质(如肌肉、心脏、膀胱、其他软组织、软骨等)。石油工程流变学(Petroleum Engineering Rheology)是研究石油工程中流体的流动与变形的科学,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。由于牛顿流体的流动与变形问题已由牛顿流体力学解决,所以石油工程流变学研究的对象是石油工程中的非牛顿流体。此外,按照应用分类还有冶金流变学、地质流变学、土壤流变学等。

1.1.4 流变学的研究内容

流体在外力的作用下将发生连续不断的变形,即所谓流动。与此同时,在流体内部则产生抵抗这类变形的力为内摩擦力,内摩擦力的规律性即为流变性。流变学的研究内容可概括为三个方面:对流变现象的研究、对流变性量化规律的研究及工程中的应用研究。

1.1.4.1 对材料流变现象和物性的研究

流变现象是材料的流变性能的体现。流变学将实验中观察到的流变现象和流动行为概括成一些可测量的材料函数(如黏度、法向应力等),研究测量原理和测量技术,并对材料函数进行测量。材料函数是能够反映材料在力的作用下的流动行为并通过仪器可测定的时间和力的函数。

1.1.4.2 对材料的变形和流动规律研究

具体而言,就是要建立反映材料多样化和个性化的本构方程。本构方程是在不同物理条件下(如温度、压力、湿度、辐射、电磁场等),以应力、应变和时间的物理变量来定量描述材料的状态的方程。严格地说,本构方程泛指所有描述材料流变特性、热力学特性的数学模型。本书重点讨论非牛顿流体动力学特性,很少涉及热力学问题,因此,除特殊说明外,后面所谈到的本构方程均特指流体的流变本构方程。本构方程对流变学的研究有非常重要的意义,可以反映材料力学特性与结构之间的关系,可以预示尚未观察到的流动行为。

由于流变学具有交叉边缘学科的特点,因此它的应用范围相当广泛,而且在生产中发挥着越来越大的作用。

1.1.4.3 工程中的应用研究

1) 在聚合物科学与工程中的应用

众所周知,用黏度法测定黏度 η 可以确定聚合物的分子量 M , 因为对于聚合物浓溶液满足 $\eta \propto M^{3.5}$; 对于聚合物稀溶液满足 $\eta \propto M$ 。进一步的研究结果显示,分子量对第一法向应力差系数 ϕ_1 的变化比对黏度更为敏感。对于聚合物浓溶液,第一法向应力差系数与分子量的关系为 $\phi_1 \propto M^7$; 对于聚合物稀溶液, $\phi_1 \propto M^3$ 。所以,测量第一法向应力差系数以控制聚合物反应,即控制分子量大小更加有效。如果能知道 ϕ_1 与聚合物反应中的分子量分布或侧链支化的关系,则可制造出相应性质的聚合物产物。

在应用中值得注意的是,无论是通过测黏度或测第一法向应力差来确定分子量的方法只适合于纯聚合物溶液,而不适合于在聚合物溶液体系中存在交联剂等的凝胶溶液,因为聚合物分子间或分子内的交联反应会升高体系的黏度,从而得不到聚合物本身的真实分子量。

2) 在石油工程中的应用

流变学在石油工程中应用十分广泛,以下举几个典型的应用例子。

(1) 筛选和研制工作液。流变性能是配方筛选的一个重要指标。通过对各种钻井液、压裂液、驱油剂和调剖剂体系进行流变性测试,从而确定合适的工作液配方。

(2) 确定工程中维持正常操作的工艺条件或范围。在聚合物驱强化采油技术时,只有聚合物的分子量、聚合度、浓度达到一定值时才能有效保证其在油藏中具有较高的视黏度,聚驱中确定注入速度、注入段塞的大小等需要结合流变学知识。

(3) 计算管路阻力。含蜡原油是一种典型的非牛顿流体,非牛顿流体输送管路的设计计算比牛顿流体复杂得多,需要准确计算管路的阻力才能经济合理设计。在计算之前首先判断流体属于哪种——是广义牛顿流体还是黏弹性流体? 比方说经过判断为幂律流体,幂律流体是广义牛顿流体的一种,对这种流体的流量推导后发现对高度拟塑性非牛顿流体,压降 Δp 与管半径倒数 $1/R$ 成正比,要想稍微降低压降,就需大大增加管径,而牛顿流体, $\Delta p \propto 1/R^4$, 即管径稍微增加,压降即可降低。对于牛顿流体,管流方程为 $\Delta p = \frac{8Q\eta L}{\pi R^4}$; 对于幂律型广义非牛顿

流体,管流方程为 $Q = \frac{n\pi R^3}{1+3n} \left(\frac{\Delta p R}{2KL} \right)^{1/n}$, 式中 n 为幂指数,无量纲; K 为稠度系数, $\text{Pa} \cdot \text{s}^n$ 。所以,对于非牛顿流体管路运输的设计计算不能套用牛顿流体的公式,而必须运用流变学的知识去寻找或建立新的公式。

3) 在化学工程中的应用

在化学工程中,对流传热和对流传质中所涉及的非牛顿流体的传递速率的计算均不能套用牛顿流体的公式。例如,黏弹性流体,弹性有时降低传质和传热速率,有时可以增加传质和传热的速率。由此可见,对于其他传递过程,如搅拌功率、泡沫精馏塔的计算等需要用流变学知识去研究。

1.1.5 流变学的研究方法

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。

(1) 宏观实验。通过它获得物理概念,发展新的宏观理论。例如,对流体材料一般用黏度计或流变仪进行实验,探求应力、应变与时间的关系,研究流体的黏性和黏弹性。

(2) 微观实验。通过它了解材料的微观结构性质,探讨流体流变的机制。理论方法是运用连续介质力学研究材料对应力和应变的响应;通过分子运动论,研究形变与结构的关系。

1.2 牛顿流体和非牛顿流体

1.2.1 剪切流动与牛顿内摩擦定律

1.2.1.1 稳态的简单剪切流动

考察如图 1.4 所示的剪切流场。该剪切流场可以发生在两块无限长的平行平板之间,上板运动,下板固定,也可以发生在圆管层流中管壁到管中心处,以第一种情况为例进行分析。所有流体沿平面(x 方向)作一维流动,在紧靠壁面的内法线(y 方向)上,不同流体层间具有不同的速度,且其速度随 y 的增大而增大。流体在作这种宏观运动的同时,其分子还存在着随机的热运动。当相邻流体层以不同速度运动时,由分子热运动引起的两流体层之间的动量交换,这是静止流体中所没有的特性。

考察如图 1.5 所示的界面 C—C 两侧彼此相邻、速度不同的两层流体。由图可知,A—A 层运动较快,B—B 层较慢。分子热运动使两层之间的大量流体分子相互交换位置。A—A 层流体的宏观运动速度较大,该层分子具有较大的动量,它们迁移到 B—B 层后使该层流体加速;而 B—B 层的分子动量较小,它们进入 A—A 层后,使该层流体减速。由于两层流体间的分子不断地运动、碰撞,导致了动量传递。按照动量定理,界面 C—C 与两侧相邻流体层之间必然存在着一个平行于该面的作用力,这一作用力在两个相邻的、速度不同的液层之间表现为剪切应力,或称为切应力。另外,两层相邻的流体分子之间还存在着附着力。附着力包括分子间引力和使分子脱离流体微团所需的附加力。当质点之间存在相对运动时,附着力便形成一个使速度较慢的分子加速的剪切应力。剪切应力产生的机理及在流体宏观流动中的两种效

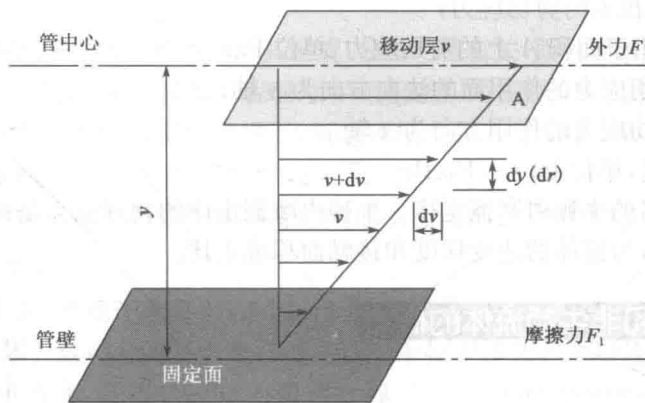


图 1.4 稳态的简单剪切流动

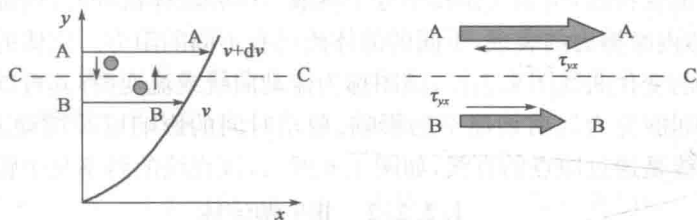


图 1.5 剪切流场和流体层间切应力

应——阻力效应和能量或动力传递效应,类似于车轮与地面的摩擦力。剪切应力对宏观流动的影响分为两方面:对较高速的层(分子、粒子)流动是阻力,阻滞高速层的流体;对低速分子为动力,使速度较低的流体层加速。

综上所述,流体在运动过程中所产生的内摩擦力是流体微观分子或质点间动量传递和附着力的宏观表现,它与流体的分子结构密切相关。

1.2.1.2 牛顿内摩擦定律

从对流体分子或质点间动量传递的分析可知,流体中任何微元面上的应力都是该面附近分子运动及相互作用的结果。如果该面邻近区域内流体速度是均匀的,则其剪切应力为零;反之,剪切应力不为零。在固体力学中,基本的本构方程是描述应力与应变关系的数学模型,在流体力学中,基本的本构方程是描述应力与流动关系的数学模型,对流动的特征是用流体层间的速度变化率。如图 1.4 所示的流体层间的速度变化可以用速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 来描述。 $\frac{dv}{dy}$ 的物理意义可解释为单位距离上速度的改变量。对于一维流动,速度梯度 $\frac{dv}{dy}$ 还可以理解为剪切形变速率(或剪切应变速率),简称切变率(或剪切速率),一般用 $\dot{\gamma}$ 来表示,单位 s^{-1} ,即:

$$\dot{\gamma} = \frac{dv}{dy} \quad (1.1)$$

1686 年,牛顿根据大量实验数据发现,许多流体在作平行直线运动时,相邻流体层之间的剪切应力 τ_{yx} 与该处的剪切速率 $\dot{\gamma}$ 呈线性关系,如下式所示:

$$\tau_{yx} = \eta \dot{\gamma} = \frac{F}{A} \quad (1.2)$$

式中 τ_{yx} ——单位面积上的剪切应力；

F ——外部作用于面积 A 上的剪切应力,单位 Pa；

下角 y ——剪切应力的作用面的法向方向为 y 轴；

下角 x ——剪切应力的作用方向为 x 轴；

η ——动力黏度,单位 $\text{Pa} \cdot \text{s}$, P , cP 。

式(1.2)即为著名的牛顿内摩擦定律。牛顿内摩擦定律的物理意义是:流体的内摩擦力的大小与流体性质有关,与流体的速度梯度和接触面积成正比。

1.2.2 牛顿流体和非牛顿流体的概念

1.2.2.1 牛顿流体

凡是流变性服从牛顿内摩擦定律的流体称为牛顿流体。大多数分子结构简单的单相体系表现为牛顿流体的流变特性,例如气体和小分子溶液。牛顿流体流动时,内部抵抗流动的阻力称为黏度,它是流体内摩擦力的表现,不同的流体流动有不同的阻力。流体的行为可以通过剪切应力随剪切速率的变化曲线图来表征,该图称为流动曲线或流变图,其可以提供以下直观的信息:流动的开始(屈服应力)、剪切速率的影响、剪切时间的影响以及搅动或运动后的恢复。牛顿流体的流动曲线是通过原点的直线,如图 1.6 所示,该直线的斜率是牛顿流体的黏度。

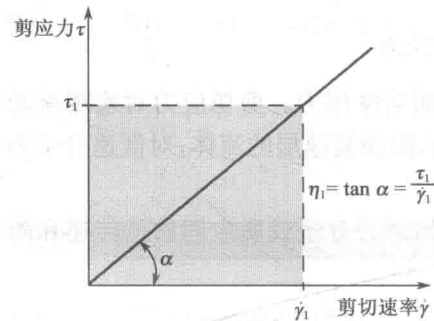


图 1.6 牛顿流体的流动曲线

1.2.2.2 非牛顿流体

凡是流变性不服从牛顿内摩擦的流体称为非牛顿流体。一般来说,分子结构比较复杂的单相体系和多相混合物在一定条件下都表现出明显的非牛顿流变性。例如,聚合物溶液和熔体、原油、油脂、泥浆、纸浆、凝胶、油漆、染料、血液,大多数食品原料和化妆品,熔化的玻璃和金属、岩浆等,均属此类。这些流体的流变性一般都不能用式(1.2)所表示的线性本构方程来描述,属于非牛顿流体。

应该特别指出,流体的流变性是流体的一种动力学特性,而不是单纯的物理特性。换言之,流体所表现出来的流变性不仅与其组成、分子结构有关,而且与该流体所处的动力学条件有关。所以,对于流体性质的认识,必须在某种特定的形变和流动条件下进行。某些高分子溶液在低剪切速率下表现为牛顿流变性,而在中等剪切速率下则表现为拟塑性。可见,即使是同一种介质,在不同的流动条件下,所表现出来的流变性也有可能不一样,需要用不同的流变本构方程来描述。本书所论及的牛顿流体与非牛顿流体并不是指物理意义上的某些特定介质,而是指某类介质在特定动力学条件下的流变行为。

非牛顿流体的流动称为非牛顿型流动。这些流体在一定温度下,其剪切应力与剪切速率不成正比线性关系,其黏度不是常数。类似于牛顿流体,把剪切应力和剪切速率之比定义为非牛顿流体的表观黏度,常称为视黏度或黏度函数。

1.2.3 流变性的意义和流体的分类

1.2.3.1 流变性的意义

流体的流变性是流体的一种动力学特性,而不是单纯的物理特性,可以从以下三个方面去

认识:

(1) 流体所表现出来的流变性不仅与其组成、分子结构有关,而且与该流体所处的动力学条件有关。某些高分子溶液在低剪切速率下表现为牛顿流变性,而在中等剪切速率下则表现为拟塑性。

(2) 同一种介质,在不同的流动条件下,所表现出来的流变性也有可能不一样,需要用不同的流变本构方程来描述。

(3) 对于流变性的认识,必须在某种特定的形变和流动条件下进行。

1.2.3.2 流体的分类

流体的种类繁多,性质千差万别,难以对其进行严格的分类。根据流体在简单剪切流条件下的流变行为,流体大致可分为三大类:无黏流体、牛顿流体和非牛顿流体,如图 1.7 所示。无黏流体也称为理想流体,其流动满足伯努利方程,即单位质量流体的总机械能在流动的过程中保持不变。牛顿流体流动满足黏性流体力学理论。非牛顿流体又可进一步细分为三类:

(1) 黏性非牛顿流体(广义牛顿流体)。这类流体的剪切应力仅与剪切速率有关,而且是剪切速率的单值函数。

(2) 时变非牛顿流体。这类流体的流变行为依赖于时间,其剪切应力不仅与剪切速率有关,而且与承受剪切的时间长短有关。在一定剪切速率下,剪切应力随时间增长而减小的流体称为触变流体,如油漆等;剪切应力随时间增长而增大的流体称为震凝流体,如石膏水溶液等。

(3) 黏弹性流体。这类流体即具有黏性,又具有弹性,变形后表现出部分弹性恢复。其应力不仅与剪切速率有关,而且与形变大小有关。本构方程中的流变参数除了黏度外,还有第一、第二法向应力系数等。

非牛顿流体的力学性质比牛顿流体复杂得多,这是由于其内部组成及结构的复杂性而引起的。例如,在聚合物溶液中,聚合物分子链在溶剂中形成复杂的空间结构;在悬浮液中,固体颗粒带有不同的静电,在静电作用下,这些颗粒形成一定的空间结构;纸浆中的纤维、血液中的血球、原油中的结晶蜡等,都会形成不同的空间结构。介质内部结构不同,抵抗变形的能力与规律就不同,在流动时必然产生复杂的力学响应,表现出比牛顿流体更为复杂的流变性。有关非牛顿流体的流变性及其本构方程,将在后面有关章节中详细讨论。

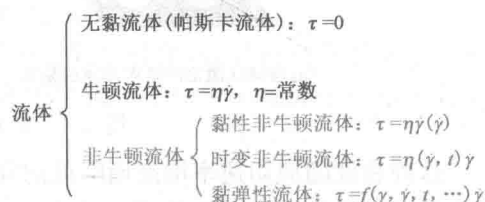


图 1.7 流体分类图

τ —应力; $\dot{\gamma}$ —剪切速率; γ —应变; t —时间

1.3 典型的流变现象

1.3.1 剪切稀释与剪切增稠

1.3.1.1 剪切稀释

剪切稀释也称为剪切变稀(剪切稀化),定义为非牛顿流体视黏度随剪切速率的增加而降低。

设有两个相同直径与长度的两端敞口的玻璃圆管,把它们垂直置于平板上。两管均充入相同高度、相同黏度的两种流体,一种低分子溶液(如甘油的水溶液)为牛顿流体,一种高分子聚合物溶液(如羧甲基纤维素,即 CMC 的水溶液)为非牛顿流体。取两个相同的小球使之在管中降落,通过调整溶液的浓度使两者具有相同的速度,如图 1.8(a)所示,这两种溶液便具有

相同的低剪切速率下黏度。当抽去两管底部平板时,管中流体因重力作用而流出,且非牛顿流体最先流完。这时可以发现高分子流体的流出速率比低分子流体快得多,如图 1.8(b)所示。根据黏性流体力学原理,在一定压降下,流体在圆管中的流量与其黏度成反比。可见,当剪切速率增大时,聚合物溶液的黏度减小,这说明黏度不是一个常数,而是剪切速率的函数。

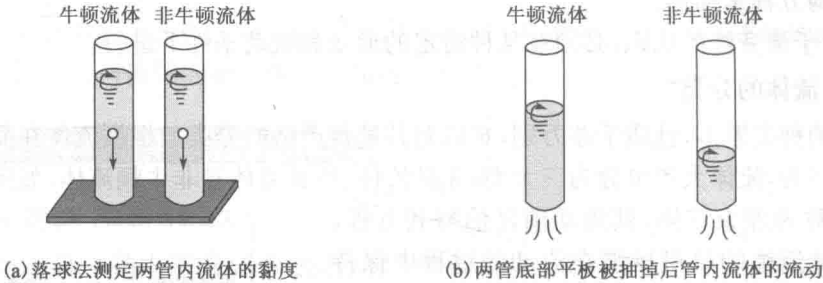


图 1.8 非牛顿流体的剪切稀释特性

这种黏度随剪切速率增高而降低的现象,称为剪切稀化。这类具有剪切稀化性质的流体称为拟(假)塑性流体。几乎所有的高分子溶液或熔体都属于这一类,如聚乙烯、聚丙烯的熔体,聚丙烯酰胺的水溶液等。这类流体的黏度变化范围一般很大,有时达 $10^3 \sim 10^4 \text{ mPa} \cdot \text{s}$ 。图 1.9 为部分水解聚丙烯酰胺 HPAM[相对分子质量为 $(950 \sim 1200) \times 10^4$]溶液的视黏度 η 随剪切速率 $\dot{\gamma}$ 变化的情况。由图 1.9 可见,HPAM 具有显著的剪切稀化特征,不同浓度和不同相对分子质量的 HPAM 均表现出视黏度随着剪切速率的增加而减小。

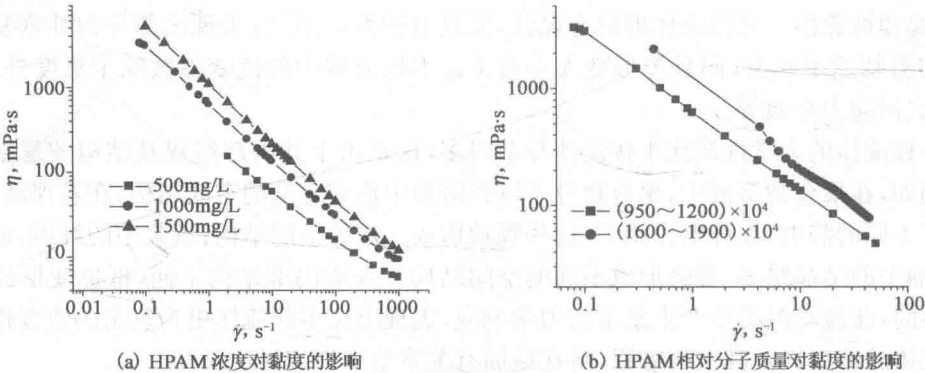


图 1.9 部分水解聚丙烯酰胺溶液的视黏度随剪切速率变化情况

1.3.1.2 剪切增稠

剪切增稠(剪切稠化)定义为非牛顿流体视黏度随剪切速率的增加而增加。剪切增稠流体在工程上较少遇到,一般为高浓度的含有不规则形状固体的悬浮液,如淀粉糊、芝麻酱等。

非牛顿流体中黏弹性流体在流动中的弹性效应,往往会引起一些与纯黏流体不同的特殊流动现象。

1.3.2 Weissenberg 效应

如图 1.10 所示,分别用搅拌器搅拌水、聚丁烯液体和 HPAM 溶液,我们会发现聚丁烯液体和水一样,由于受离心力的作用,中央液面呈凹形。而 HPAM 溶液则正好相反,中央液面

沿杆上爬,受离心力作用越大,爬杆越高。此现象就是爬杆现象,通称为 Weissenberg 效应,是 Weissenberg 于 1944 年在英国伦敦帝国学院首先公开演示的,并于 1946 年首先解释的。

为了进一步理解这种现象,可进行另一种测量。在 A、B 两处设置测压孔,两孔位于同一水平面。选择位置时,注意使自由面与底部对于 A、B 的读数均无影响。内圆柱和外圆柱是垂直同轴的,内圆柱以等角速度旋转。压力测定的结果表明:对于牛顿流体,B 处的压力由于离心力的缘故大于 A 处;而在高分子溶液中,A 处的压力则大于 B 处。用这一压差可确定高分子溶液中与离心力相对抗的力。

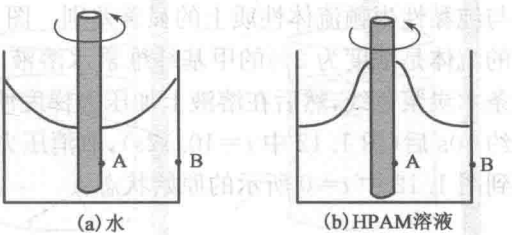


图 1.10 爬杆现象

水解聚丙烯酰胺溶液、聚异丁烯的苯烷溶液,均可发生爬杆现象,而低相对分子质量的聚丁烯溶液则不能。实验和理论研究表明,产生这种现象的原因在于高分子流体中存在法向应力差。法向应力差是由流体的弹性所造成的。

1.3.3 同心环空轴向流

如图 1.11 所示,当牛顿流体沿套管垂直流动时,其壁压 $p_A = p_B$; 而高分子聚合物溶液沿套管垂直流动时,由于法向应力差所致,其壁压 $p_A > p_B$ 。

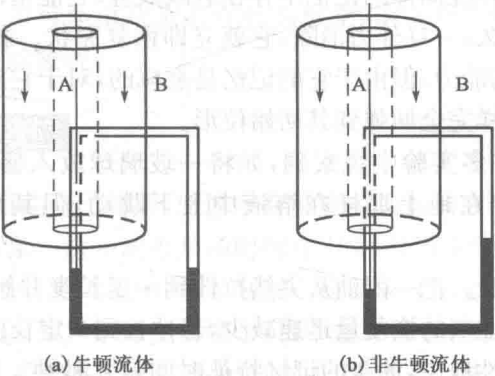


图 1.11 非牛顿流体同心环空轴向流

1.3.4 挤出胀大现象

当牛顿流体和具有黏弹性的非牛顿流体分别从一个大容器通过圆管流出时,将会出现如图 1.1 和图 1.2 所示的现象。这种挤出胀大现象可以用黏弹性非牛顿流体所具有的记忆性加以解释。黏弹性流体在进入圆管之前是盛在一个大容器里,当它被迫流经较细的圆管之后,将趋于恢复它的原始状态,从而出现胀大。这类流体的记忆性随时间的增大而逐渐衰减,即是具有一个衰退的记忆特性。因此,圆管越长,流体在管中的时间越长,它对其原始状态的记忆就越模糊,胀大程度也就越小。

1.3.5 回弹现象

当我们将拉长的弹簧突然放松,它就会立刻缩回到原始状态,这就是回弹现象。产生这一