

李克文 沈平平 著

原油与浆体流变学

原油与浆体流变学

石

学(北京)

24

24

社

石油工业出版社

登录号	127245
分类号	TE254
种次号	024

原油与浆体流变学

李克文 沈平平 著



S2162/01



石油0120965

石油工业出版社

(京) 新登字 082 号

内 容 提 要

本书比较系统地叙述了原油与浆体流变学的基本理论及其主要应用。对石油工业中常见的流体以及浆体的粘度测量与计算方法作了比较详尽的论述,并介绍了部分先进的粘度测量仪器。同时,讨论了原油、压裂液、钻井液等流体的流变特征、变化规律及其影响因素。

本书可作为有关工程技术人员的实用参考资料,也可作为高等院校有关专业的参考教材。

图书在版编目 (CIP) 数据

原油与浆体流变学/李克文编著. —北京:石油工业出版社, 1994. 6

ISBN 7-5021-1246-1

I. 原…

I. 李…

Ⅰ. ①原油-流变学②油基泥浆-流变学

N. TE254

石油工业出版社出版

(100011 北京安定门外安华里 2 区 1 号楼)

石油物探局制图印刷厂排版印刷

新华书店北京发行所发行

787×1092 毫米 32 开 5 $\frac{7}{8}$ 印张 127 千字 印 1—1000

1994 年 6 月北京第 1 版 1994 年 6 月北京第 1 次印刷

定价: 5.80 元

目 录

前 言	(1)
第一章 牛顿流体	(3)
1.1 粘度	(3)
1.2 各种流体的流动曲线与粘度曲线	(15)
1.3 牛顿流体在管道中的流动	(18)
1.4 牛顿流体在环空中的旋转运动	(26)
第二章 非牛顿流体	(33)
2.1 引言	(33)
2.2 表观粘度与真实粘度	(34)
2.3 宾汉型流体	(36)
2.4 假塑性流体	(37)
2.5 胀塑性流体	(42)
2.6 触变性与反触变性流体	(44)
2.7 粘弹性流体	(47)
第三章 流变模型	(49)
3.1 简介	(49)
3.2 基本概念	(50)
3.3 Maxwell 模型	(52)
3.4 Kelvin 模型	(56)
3.5 多元模型	(59)
第四章 粘度的测量	(68)
4.1 简介	(68)

4.2	实验数据的处理	(70)
4.3	普通毛细管粘度计	(77)
4.4	给压毛细管粘度计	(90)
4.5	旋转粘度计	(98)
4.6	毛细管粘度计与旋转粘度计	(114)
4.7	粘弹性的测量	(115)
第五章	原油的流变特性	(118)
5.1	概述	(118)
5.2	原油的组份及其对流变特性的影响	(119)
5.3	原油的流变曲线特征	(125)
5.4	计算原油粘度的一些经验公式	(129)
5.5	非牛顿特性原油在多孔介质中的渗流特性	(132)
5.6	原油多相体系的流变特征	(136)
第六章	泥浆的流变特征	(140)
6.1	概述	(140)
6.2	常见泥浆的流变模式	(142)
6.3	影响泥浆流变性的主要因素	(145)
6.4	泥浆的流变性	(146)
第七章	压裂液的流变特征	(153)
7.1	概述	(153)
7.2	压裂液的流变性对水力压裂的影响	(154)
7.3	压裂液流变性的测量与流变模式	(161)
7.4	压裂液的流变特性	(163)
7.5	粘度计的影响	(173)
	参考文献	(175)

前 言

流变学是力学的一个重要分支。它是研究物体在外力作用下流动与形变规律的学科。近年来,流变学的发展十分迅速,它与许多学科相互交叉,相互渗透从而形成新的边缘学科。流变学主要由两大部分组成,即理论流变学与实验流变学。理论流变学特点是在运用数学的基本概念和基本规律来描述物体的流变现象,而实验流变学的特点是在理论流变学的基础上运用各种先进的实验仪器与实验方法来测定物体的流变现象。

随着现代化工业的不断发展,各种浆体、悬浮液在各种行业中的应用越来越广泛,例如,煤炭工业中的水煤浆、石油工业中的钻井泥浆等等。这些浆体或悬浮液的流变性十分复杂,大部分属于非牛顿特性,其特性的描述和测定还存在许多问题有待研究和探讨。^{[1]~[8]}

目前关于流变学的参考书籍比较少,而关于石油工业流体及浆体流变学的书籍就更少。对石油工业流体及浆体或悬浮液流变特性的研究具有十分重要的意义,以钻井液为例,其流变性是进行钻井设计必不可少的基础数据、是影响钻速、钻井成本及钻井效率的重要因素。本书将对石油流体及浆体流变学的理论基础、实验方法与实验仪器作比较系统的论述,也将对近几年来国内外学者对石油工业流体及浆体流变特性的一些研究成果进行简单的介绍。

在本书的编写过程中,李军、徐薇在资料整理等方面给予

了大力协助，编者在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限和出版任务时间紧迫等原因，本书中错误和疏漏之处，在所难免。诚恳希望同行专家、学者和广大读者能够给以批评和指正，编者不胜感激。

编 者

1994年1月

第一章 牛顿流体

1.1 粘 度

一、基本概念

自然界中流体的种类很多，其性质也千变万化，有的容易流动，有的很难流动；有的是单相物质，而另外一些则是两相或多相混合物，但一个共同的特点就是都可以流动，并且流体在外力作用下流动时将产生变形，只是在一般情况下观察不到。固体和液体的差别尽管很大，但是，在变形方面两者遵循类似的规律。由于流体的变形不容易观察，我们首先考察一下固体在外力作用下的变形情况。

如图 1—1 所示，长方形固体的高度为 y ，长度为 L ，其宽为 b ；设其力 F 作用在该长方形固体的顶部，作用面积的大小为 $A (=b \times L)$ ，力的方向水平向右；该长方形固体的底部固定在一平板上。在这里首先定义一个重要的基本概念——剪切应力，即在力的作用方向上单位面积所受力的的大小。剪切应力一般用符号 τ 表示。

变形之前的情况如图 1—1 中的实线所示，在剪切应力作用下固体变形后的情况如图 1—1 中的虚线所示。根据前述剪切应力的定义，剪切应力 τ 可用如下公式表示，

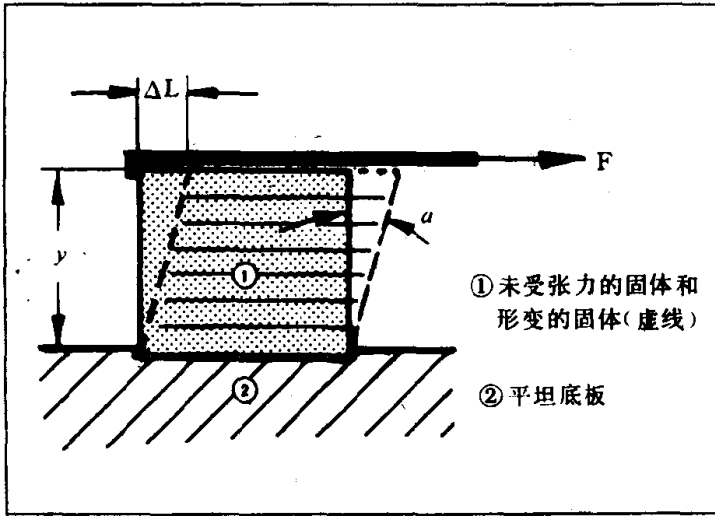


图 1-1 在剪切应力作用下固体的变形

$$\tau = \frac{F}{A} \quad (1-1)$$

材料力学实验表明，剪切应力所引起的固体形变 ΔL 与剪切应力的大小成正比，一般可用下列方程来描述这一规律，

$$\tau = G \cdot \frac{\Delta L}{y} = G \cdot \text{tg}\alpha \quad (1-2)$$

式中 G 称为杨氏弹性模量，它是一主要与固体的物理化学性质有关的相关系数， G 值越大表明固体抵抗形变的能力越大。

流体的变形也具有与固体变形相类似的规律。如图 1-2 所示：设流体存在于相距一定距离的两平行板之间，底板固定，给上板施加一定的剪切应力并使上板以一定的速度水平运动，这样，存在于两板之间的流体也将以一定的速度运动，并产生一定的变形。

对于理想流体，由于底板固定不发生移动，因此，最靠近

底板的那些液体的流动速度 V_{\min} 为零，而最靠近上板的那层流体的流动速度最大，即 V_{\max} 。另外，如果我们把两板之间的流体看成由许多薄层组成，则每一薄层的速度 V 都将不相同，也就是说薄层流体之间存在一定的速度差 ΔV 。这里又可以定义另外一个重要的基本概念——剪切速率，一般用符号 $\dot{\gamma}$ 表示。

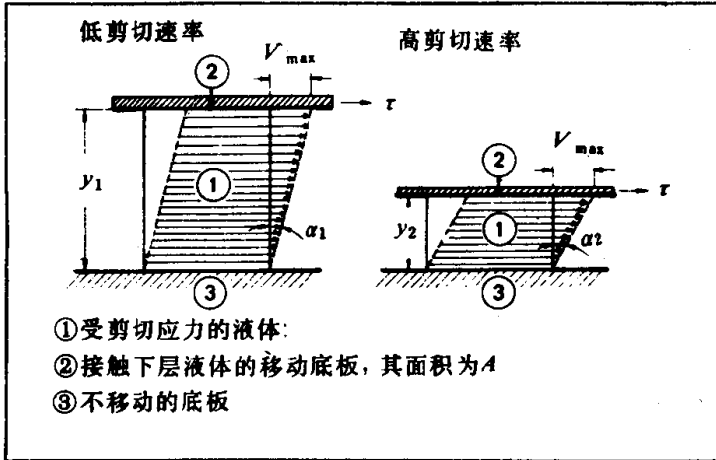


图 1-2 流体在两平行板之间流动时的变形

如图 1-2 所示，两板之间的高度为 y_1 (或 y_2)，而两板壁上流体的速度差为 V_{\max} ，即：

$$\dot{\gamma} = \frac{\Delta V}{\Delta y} = \frac{V_{\max} - V_{\min}}{y} = \frac{V_{\max}}{y} \quad (1-3)$$

对于一般的情况，剪切速率通常取极限条件，定义如下，

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dy} \quad (1-4)$$

显然，在液层高度与液层受力面积不变时，作用力 F 越大，则靠近上板壁面的液层速度也越大，也就是说剪切应力越大，流体的剪切速率也越大。具有不同物理化学性质的流体，其剪切

应力与剪切速率的相关系数是不相同的。牛顿通过大量的实验发现，相当一部分液体的流动可用下式描述，

$$\tau = \eta \cdot \dot{\gamma} \quad (1-5)$$

即液体的剪切应力与剪切速率成简单的线性正比关系，式中 η 是一比例系数，类似于固体变形中的杨氏弹性模量 G 。 η 越大，表明该液体抵抗变形速度的能力越大。在方程(1-5)中的 η 也被定义为“粘滞系数”。方程(1-5)称为牛顿内摩擦定律。

从物理意义的角度来看，粘度实质上反映了流体流动时其内摩擦力的大小。流体的这种性质也经常称为“粘性”。

从微观与宏观的关系来看，粘性是流体分子微观作用的宏观表现。产生粘性的主要原因有两种：即分子不规则运动所产生的动量交换和相邻分子间的附着力。

(1) 分子不规则运动的动量交换

流体的分子总是在作不规则运动，由于分子的这种不规则运动，速度较快的液层中的分子将迁移到速度较慢的液层中，此时，分子原有的较大的动量一部分传给了速度较慢的分子，从而使速度较慢的分子获得加速的内应力。类似地，速度较慢的分子也有可能迁移到速度较快的液层中，从而使速度较快的分子受到使其减速的内应力的作用，这些内应力在两个相邻的、速度不同的液层之间便表现为切应力。

(2) 分子间的附着力形成的切应力

分子间的附着力包括吸引力，也包括使分子脱离流体微团所需要的力。附着力试图使速度不同的相邻质点形成一个整体，当质点之间存在相对运动时，附着力便形成使速度较快的分子减速和使速度较慢的分子加速的切应力。

对于纯液体来说，其分子间的距离和分子的大小为同一数

量级，当液体缓慢运动时，其分子的不规则运动主要是在其平衡位置附近的振动，因此，由于分子不规则运动的动量交换所形成的切应力较小，液体内的切应力主要来自分子间的附着力。附着力的大小与液体的分子量，摩尔体积，分子的形状、极化能力和离子化能力等因素有关，也可以说这些因素将决定液体的粘度。

对于浆体来说，由于一般都是两相混合物，其中一相可能是固体颗粒，所以，浆体中产生切应力的情况要复杂得多。浆体粘度除上述常规的影响因素外还有固体颗粒的大小、分布、浓度等因素。另外，固体颗粒与液体分子之间的动量交换对浆体的粘度可能有较大的影响。

值得指出的是，并不是所有的流体都符合方程（1-5）所描述的规律，另外，某种流体在一定的条件下符合方程（1-5），但当条件变化时（例如剪切速率变化时），该流体也有可能不符合方程（1-5）。方程（1-5）一般要求流体的流动状态是层流，且稳定流动、无壁面滑脱效应以及流体不可压缩。

符合方程（1-5）且粘度为常数的流体一般称之为牛顿流体，而不符合方程（1-5）且粘度随剪切速率发生变化的流体则称之为非牛顿流体。

牛顿流体的剪切应力与剪切速率成线性关系，即牛顿流体的粘度不随剪切速率的变化而改变，这种性质为牛顿流体性质。

有些流体在低剪切速率时表现出牛顿流体性质，而在高剪切速率时表现出非牛顿流体性质。另外一些流体则可能呈现与此相反的特性。

对于如图 1-2 所示的情况，若流体在运动的上板的壁面上无滑脱现象，且上板都以相同的速度 V_{\max} 运动，当上下板之间的

高度不一样时，根据方程 (1-3) 或方程 (1-4) 可知，流体的剪切速率是不相同的。图 1.2 中高 y_1 大于 y_2 ，所以，相应的剪切速率 $\dot{\gamma}_1$ 小于 $\dot{\gamma}_2$ 。

二、动态粘度与运动粘度

在许多文献中，经常提到动态粘度与运动粘度这两个基本概念，实际上，前述方程 (1-5) 定义的粘度就是动态粘度。动态粘度的定义可由方程 (1-5) 表示为，

$$\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (1-6)$$

如果力的单位用 N 表示，面积 A 的单位用 m^2 表示，则剪切应力的单位定义为“帕斯卡”，常用符号 Pa 表示，即

$$\tau = \frac{F(\text{力})}{A(\text{面积})} = \frac{N(\text{牛顿})}{m^2(\text{米}^2)} = \text{Pa}(\text{帕斯卡}) \quad (1-7)$$

“N”单位的实际定义是“ $kg \cdot m/s^2$ ”，它与力的公制单位有如下转换关系：

$$1kg \text{ 力} = 9.8N \quad (1-8)$$

在以往的文献中，应力的单位常用“ dyn/cm^2 ”来表示，该单位与 Pa 的关系如下：

$$1Pa \approx 10dyn/cm^2 \quad (1-9)$$

单位之间的转换关系十分重要，如果在工程计算中不注意单位转换关系，往往容易产生严重错误的结果。

相对来说，剪切速率的单位比较简单，根据前述剪切速率的定义，可知其单位为 $1/s$ 。根据方程 (1-6)，动态粘度（往往简称粘度）的单位为，

$$[\eta] = \frac{N}{m^2} / \frac{1}{s} = Pa \cdot s \quad (1-10)$$

单位 $Pa \cdot s$ 一般情况下比较大，因此，常用其千分之一作为粘

度的单位，即 $\text{mPa} \cdot \text{s}$ ，这一单位也可定义为粘度常用的单位，即 cP 这些关系可用下式表示：

$$1\text{Pa} \cdot \text{s} = 1000\text{mPa} \cdot \text{s} \quad (1-11)$$

粘度的单位有时也用“泊”表示，与厘泊的关系为：

$$1\text{泊(P)} = 100\text{厘泊(cP)} \quad (1-12)$$

粘度所用单位之间的转换关系总结如下表 1-1 所示，其中 s 表示时间秒。

表 1-1 粘度单位之间的转换关系

$\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}^2$	$\text{Pa} \cdot \text{s}$	$\text{mPa} \cdot \text{s}$	P	cP	$\text{kgf} \cdot \text{s}/\text{m}^2$
1	1	1000	10	1000	0.10197
0.1	0.1	100	1	100	0.010197
0.001	0.001	1	0.01	1	0.0001097
9.807	9.807	9806.7	98.07	9806.7	1

运动粘度常用符号 μ 表示，它可由动态粘度推导出来：

$$\mu = \frac{\eta}{\rho} \quad (1-13)$$

式中 ρ 为流体的密度，其单位常用 g/cm^3 表示。

运动粘度的单位可由方程 (1-13) 推导出来，为此，首先看一下动态粘度的因次。剪切应力的因次为：

$$[\tau] = (M \cdot L/T^2)/L^2 \quad (1-14)$$

式中 M 为质量因次， L 为长度因次，而 T 为时间因次。

剪切速率的因次则为：

$$[\dot{\gamma}] = \frac{L/T}{L} = 1/T \quad (1-15)$$

所以，动态粘度的因次为：

$$[\eta] = \frac{M}{L \cdot T} \quad (1-16)$$

因为流体密度的因次为：

$$[\rho] = M/L^3 \quad (1-17)$$

所以运动粘度的因次为：

$$[\mu] = \frac{M}{L \cdot T} \bigg/ \frac{M}{L^3} = L^2/T \quad (1-18)$$

由方程(1-18)可知，若时间用s为单位，长度用m为单位，则运动粘度的单位为 m^2/s 。若长度用cm表示，时间仍用s表示，则运动粘度的单位为 cm^2/s 。这一单位定义为1斯(St，即Stokes的略写)，斯的1/100称为厘斯，符号为“cSt”。

从方程(1-18)可以看出，运动粘度的因次(或量纲)中只包含有运动学中长度和时间的要素，这就是称 η/ρ 为运动粘度的缘故。运动粘度本身并没有十分明确的物理意义。

运动粘度的单位换算比较简单，如表1-2所示。

表 1-2 运动粘度单位的转换关系

m^2/s	St (斯)	cSt (厘斯)
1	1×10^4	1×10^6
1×10^{-4}	1	100
1×10^{-6}	1×10^{-2}	1

水是比较常见的一种牛顿流体，因此，这里我们将水的动态粘度、运动粘度、密度与温度的相互关系列于表1-3中。

表 1-3 蒸馏水在各种温度下的粘度、运动粘度和密度^[16]

温 度 °C	粘 度 cP	运动粘度 (厘斯) cSt	密 度 g/cm ³	温 度 °C	粘 度 cP	运动粘度 cSt	密 度 g/cm ³
0	1.792	1.792	0.99984	55	0.505	0.512	0.98570
5	1.520	1.520	0.99996	60	0.467	0.475	0.98321
10	1.307	1.307	0.99970	65	0.434	0.443	0.98057
15	1.188	1.139	0.99910	70	0.404	0.413	0.97778
20	1.002	1.0089	0.99820	75	0.378	0.386	0.97486
25	0.890	0.893	0.99705	80	0.355	0.365	0.97180
30	0.797	0.801	0.99565	85	0.334	0.345	0.96862
35	0.719	0.724	0.99403	90	0.315	0.326	0.96532
40	0.653	0.658	0.99221	95	0.298	0.310	0.96189
45	0.598	0.604	0.99022	100	0.282	0.295	0.95835
50	0.548	0.554	0.98805				

三、相对粘度和条件粘度

相对粘度 η_r 的定义如下

$$\eta_r = \frac{\text{被测试样的粘度}}{\text{某种标准液在某温度下的粘度}} \quad (1-19)$$

蒸馏水是一种常用的标准液。相对粘度的基本概念一般不常用，通常只用于比较流体流动性能の場合，相对粘度是无因次的。

所谓条件粘度是使用特定的粘度计在规定条件下测得的粘度。其单位与前述粘度单位不同，种类也多，常用的有恩氏度、恩氏秒、国际赛氏秒等。测定浆体粘度时一般不采用条件粘度这一概念，因此，这里只作简单的介绍。

四、流体粘度的主要影响因素

1. 温度

流体包括液体和气体，温度对它们的影响是不相同的。液体的粘度对温度十分敏感，当温度升高时，液体的体积膨胀，分子间的距离增大，附着力减少，因而粘度下降。对于气体来说，温度的作用正好相反，即温度增加时气体的粘度也增加，这可能是由于温度增加时，气体分子的附着力虽然有所减少，但气体分子的无规则运动形成的切应力急剧增加，并且占有优势。

温度对浆体的粘度也有一定的影响，不过，其影响没有对纯液体的影响大，当然也不排除有例外的情况。

流体粘度与温度的关系曲线称为粘温曲线，相应的图幅称为粘温图。

液体随温度增加其粘度下降的关系常用安德雷德 (Andrade) 公式表示：^[17]

$$\eta = A \exp \frac{B}{KT} \quad (1-20)$$

式中 A 、 B 、 K 为常数 (K 为波耳兹曼常数)， T 为绝对温度。当温度变化范围较大时，可用下式表示液体粘度与温度的关系：

$$\eta = \frac{AT^{1/2}}{1 + C/T^{1/2}} \quad (1-21)$$

$$A \text{ 和 } C = \text{常数。} \quad (1-22)$$

有关流体粘度与温度的经验关系式还有许多，但目前还没有能适用于大范围温度变化的完善公式。

2. 压强的影响

在常压范围内，压强对液体粘度的作用远不如温度显著。一般来说，当压强增加时，液体受到压缩，其体积变小，分子间