

石油工程 非牛顿流体力学

韩洪升 魏兆胜 编著
崔海青 李昌连

哈尔滨工业大学出版社

0232713
0373
004

石油工程 非牛顿流体力学

韩洪升 魏兆胜 编著
崔海青 李昌连

赠书
姓名: 许震芳
时间: 2008.3
石油大学图书馆章



石油大学 0250062

哈尔滨工业大学出版社

2175880
5150

(黑)新登字第4号

内 容 摘 要

本书是为满足石油院校钻井、采油工程专业的教学和油田有关科技人员的工作需要而编写的。内容包括：牛顿流体和非牛顿流体的基本概念，连续介质力学基础知识，非牛顿流体在圆管和环形空间中的轴向流动、螺旋流动，岩屑—钻井液两相流动，非牛顿流体流变性及其测量和回归计算，同时还介绍了钻井、采油工程中常遇到的几种非牛顿流体及其流动特性。

本书可做为石油院校有关专业本科生和研究生的教材，也可供有关教师和工程技术人员参考。

石 油 工 程 非 牛 顿 流 体 力 学

韩洪升 魏兆胜 崔海青 李昌连 编著

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行

大庆石油学院印刷厂印刷

*

开本787×1092 1/32 印张10.75 字数241千字

1993年4月第1版 1993年4月第1次印刷

印数1—2000

ISBN 7-5603-0602-0 /TE·4 定价 4.90元

前 言

随着石油工业的不断发展,非牛顿流体流动问题日益引起人们的广泛注意。在钻井、采油、油气集输过程中经常遇到这种复杂混合物的流动问题急待解决。因此非牛顿流体力学正在成为流体力学领域中一个活跃的分支。近年来国内外有关专家学者对这方面的问题给予高度重视,并取得了许多研究成果。

本书结合在石油院校有关专业教学过程中,涉及非牛顿流体力学的内容不断增多的特点,组织编写了这本教材。其内容包括:牛顿流体和非牛顿流体的基本概念,连续介质力学基础知识,非牛顿流体在圆管和环形空间中的轴向和螺旋流动规律,钻井液携屑原理,非牛顿流体流变性和流变参数的测定、回归计算以及非牛顿流体力学在钻井、采油和油气集输过程中的实际应用。为使本书同工程流体力学教学内容衔接和满足部分师生和科技人员继续提高的要求,在编写过程中注意阐明基本物理概念,尽量采用较简单的数学推导,同时也采用了张量分析方法描述非牛顿流体的复杂流动问题。为帮助读者对这方面内容的理解,在书末附有张量初步知识。

本书是在大庆石油学院教学和科研实践的基础上编写的。全部内容经编者共同讨论,分工执笔,第一章由李昌连编写;第二、四章由崔海青编写;第三、六章由韩洪升编写;第五章由孙锦华编写;第七章由魏兆胜编写。

目前,这方面的教科书和参考书还不多,编者希望本书能对有关专业的本科生和研究生及工程技术人员有所裨益。

由于编者水平有限,难免有疏漏谬误之处,敬请读者批评指正。

编者

1992年10月

目 录

第一章 牛顿流体和非牛顿流体	(1)
§ 1—1 牛顿流体和非牛顿流体的流变特性.....	(1)
§ 1—2 非时变性非牛顿流体.....	(8)
§ 1—3 时变性非牛顿流体.....	(12)
§ 1—4 本构方程.....	(14)
第二章 连续介质力学基础	(20)
§ 2—1 连续介质.....	(20)
§ 2—2 应力张量.....	(20)
§ 2—3 连续方程和动力学方程.....	(27)
§ 2—4 变形速率张量.....	(38)
§ 2—5 边界条件.....	(42)
§ 2—6 粘性流体的本构方程.....	(43)
第三章 非牛顿流体在圆管和环形空间中的轴向流动 ...	(55)
§ 3—1 均匀流动方程式.....	(55)
§ 3—2 圆管和环形空间中牛顿流体的层流.....	(57)
§ 3—3 圆管中粘性流体层流的基本方程.....	(62)
§ 3—4 环形空间中粘性流体层流的基本方程.....	(65)
§ 3—5 圆管和环形空间中幂律流体的层流.....	(67)
§ 3—6 圆管和环形空间中宾汉流体的结构流.....	(74)
§ 3—7 罗宾诺维奇——莫纳方程.....	(84)
§ 3—8 非牛顿流体广义雷诺数的计算.....	(87)
§ 3—9 非牛顿流体的粘度.....	(91)
§ 3—10 非牛顿流体的圆管湍流压降计算.....	(99)
§ 3—11 非牛顿流体流态判别准则.....	(102)

第四章 非牛顿流体在圆管和环形空间中的螺旋流动	(116)
§ 4—1 螺旋流的基本概念	(116)
§ 4—2 螺旋流的速度微分方程	(117)
§ 4—3 广义稳定性参数	(124)
§ 4—4 牛顿流体在圆管和环形空间中的螺旋流动	(126)
§ 4—5 幂律流体在圆管和环形空间中的螺旋流动	(135)
§ 5—6 宾汉流体在圆管和环形空间中的螺旋流动	(145)
第五章 岩屑—钻井液二相流动	(155)
§ 5—1 极慢速圆球绕流—斯托克斯圆球阻力解	(158)
§ 5—2 静止液体中钻屑滑落速度的计算	(164)
§ 5—3 与钻屑极限滑落速度有关的钻屑基本物理性质和几何性质	(172)
§ 5—4 环空内钻屑运移的计算	(174)
§ 5—5 环空中钻屑运移的分析与预测	(188)
§ 5—6 倾斜环空内的钻屑运移	(192)
第六章 流变施量	(199)
§ 6—1 概述	(199)
§ 6—2 细管式流变仪	(200)
§ 6—3 旋转圆筒粘度计	(211)
§ 6—4 流变参数的回归计算	(231)
第七章 油田非牛顿流体及其特性	(240)
§ 7—1 含水原油及其流变特性	(240)
§ 7—2 压裂液及其流变特性	(255)
§ 7—3 泥浆及其流变特性	(264)

§7—4 水泥浆及其流变特性·····	(208)
附录A 粘性流体在圆管和环形空间中轴向流计算公式··	(292)
附录B 粘性流体在圆管和环形空间中螺旋流计算公式··	(306)
附录C 张量初步·····	(326)
参考文献·····	(334)

第一章 牛顿流体和非牛顿流体

接着流体流动时的切应力与切应变之间的关系，可以将流体分为牛顿流体和非牛顿流体两种。非牛顿流体力学就是以非牛顿流体为研究对象的流体力学分支。

§ 1-1 牛顿流体和非牛顿流体的流变特性

在科学研究和生产实践中，对材料性质的认识，总是在特定的形变和流动条件下进行的。因此需要首先讨论一种最简单的流动——简单剪切流，然后进一步研究不同流体在简单剪切流中不同的力学性质。这就是区分牛顿流体和非牛顿流体以及对非牛顿流体进行分类的主要依据。

一、简单剪切流动

有一间距为 h 的两平行平板，下平板固定不动，上平板受恒力 F 作用，以速度 u_0 沿 x 正方向运动，如图 1-1 所示。两平板间充满流体。由于流体是粘附于平板表面的，因此在 $y=0$ 外处流体是静止的； $y=h$ 处，流体以平板速度 u_0 随平板一起运动。

流体任一点速度 u 与其纵坐标 y 成正比，即

$$u = \dot{\gamma} y \quad (1-1)$$

式中： $\dot{\gamma}$ 为比例常数

$$\dot{\gamma} = \frac{u}{y} = \frac{u_0}{h} = \operatorname{tg} \theta$$

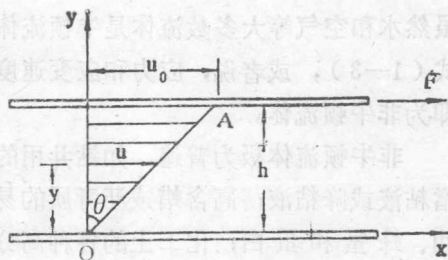


图1-1 简单剪切流动

$\dot{\gamma}$ 为速度梯度，或称为应变速度， OA 为速度分布线，满足式 (1-1) 速度分布的流动称简单剪切流。

若平板的面积为 A ，则平板作用在流体上的切应力为 $\tau = \frac{F}{A}$ 。根据力的平衡关系可知，在简单剪切流中，切应力在流体内部是均匀分布的，而切应力的均匀分布必导致速度梯度 $\dot{\gamma}$ 在流体内的均匀分布，这就是简单剪切流的特点。对于非简单剪切流， u 与 y 为非线性关系，则：

$$\dot{\gamma} = \frac{du}{dy} \quad (1-2)$$

速度分布线就不再是直线了。

二、牛顿内摩擦定律

牛顿在1687年首先提出了一个假设，流体流动时，其切应力与应变速度成正比，在简单剪切流动中，不可压缩流体的牛顿内摩擦定律可表示为

$$\tau = \mu \dot{\gamma} \quad (1-3)$$

式中： μ 为牛顿流体的动力粘度 (Dynamic Viscosity)，它在一定温度和压力下是常数。式 (1-3) 就是牛顿流体的定义式。虽然水和空气等大多数流体是牛顿流体，但也有很多流体不满足式 (1-3)，或者说，应力和应变速度之间存在着非线性关系，即为非牛顿流体。

非牛顿流体极为普遍，如钻井用的泥浆，水泥浆；采油用的增粘液或降粘液；高含蜡或沥青质的易凝原油；食品工业中的奶油、蜂蜜和蛋白；化工上的各种高分子溶液以及人体中的血液等都是非牛顿流体。所以非牛顿流体力学的理论，在许多工业生产中和应用科学领域都有应用。非牛顿流体力学的研究对这些工业的发展具有重大的现实意义。

三、应变速度和角度形速度

应变速度是流变学研究中的一个重要概念，我们讨论如下：

在简单剪切流中取一微小矩形 $ABCD$ ，如图1—2， AB 层速度为 u ， CD 层速度为 $u + du$ ，两层间垂直距离为 dy ，经过 dt 时间后 A 、 B 、 C 、 D 各点分别运动至 A' 、 B' 、 C' 、 D' 点，可见

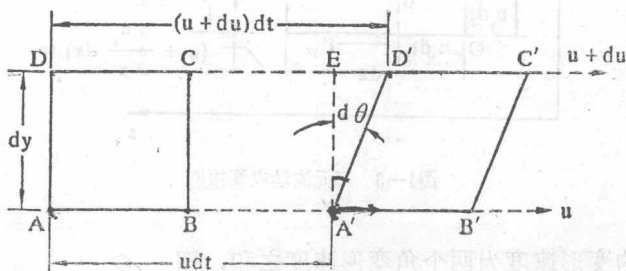


图1—2 应变速度

$$ED' = DD' - AA' = (u + du)dt - udt = du dt$$

因此
$$du = \frac{ED'}{dt}$$

由此得应变速度

$$\frac{du}{dy} = \frac{ED'}{dy dt} = \frac{\operatorname{tg} \theta d\theta}{dt} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1-4)$$

我们知道 $d\theta$ 是矩形 $ABCD$ 在 dt 时间后剪切变形角度，这表明应变速度实质上就是流体运动时的角变形速度。

四、广义牛顿内摩擦定律

牛顿内摩擦定律描述了流体一元流动时应力与应变之间的关系。二元流动与一元流动类似，不过此时矩形微团剪切变形后，将变成平行四边形，其两邻边都将产生转角，如图1—3所示。

此时，应变速度与变形角速度的关系将是

$$\frac{\partial u_x}{\partial y} = \frac{d\alpha}{dt}; \quad \frac{\partial u_y}{\partial x} = \frac{d\beta}{dt} \quad (1-5)$$

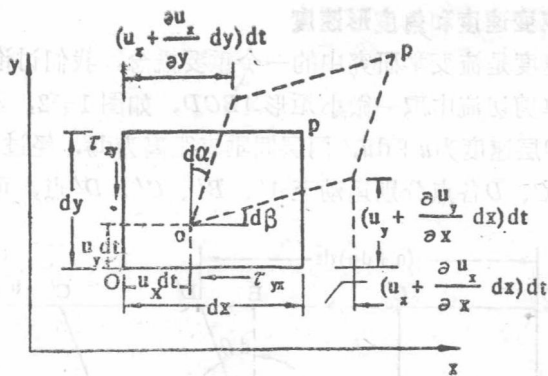


图1-3 二元流动应变速度

而总的变形速度为两个角变形速度之和，即

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d\alpha}{dt} + \frac{d\beta}{dt} = \frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \quad (1-6)$$

由牛顿内摩擦定律可知

$$\tau_{yx} = \mu \frac{d\theta}{dt} = \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial x} \right) \quad (1-7)$$

若为三元流动，则存在相互正交的三个面，将有

$$\left. \begin{aligned} \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \tau_{xy} &= \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \\ \tau_{yz} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-8)$$

上式称为广义牛顿内摩擦定律。

其余三个切应力 τ_{xz} , τ_{yx} , τ_{zy} ，与式(1-8)的三个切向应力之间存在着对应相等的关系，则

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xz} = \tau_{zx} &= \mu \left(\frac{\partial u_x}{\partial z} + \frac{\partial u_z}{\partial x} \right) \\ \tau_{xy} = \tau_{yx} &= \mu \left(\frac{\partial u_y}{\partial x} + \frac{\partial u_x}{\partial y} \right) \\ \tau_{yz} = \tau_{zy} &= \mu \left(\frac{\partial u_z}{\partial y} + \frac{\partial u_y}{\partial z} \right) \end{aligned} \right\} \quad (1-9)$$

三个坐标面上的应力除了上述六个切向应力外，还有三个法向应力。

在流体力学中可以证明三个法向应力之和与坐标的选择无关，也就是不论把坐标轴怎样转动，三个法向应力之和保持不变，即

$$p_{xx} + p_{yy} + p_{zz} = \text{const} \quad (1-10)$$

现定义三向压强的平均值为该点的压强，即

$$-p = \frac{1}{3}(p_{xx} + p_{yy} + p_{zz}) \quad (1-11)$$

以拉力为正，压力为负，故三向平均压强为 $-p$ 。三个法向应力可表示为平均压强和附加法向应力之和

$$\left. \begin{aligned} p_{xx} &= -p + \tau_{xx} \\ p_{yy} &= -p + \tau_{yy} \\ p_{zz} &= -p + \tau_{zz} \end{aligned} \right\} \quad (1-12)$$

τ_{xx} 、 τ_{yy} 、 τ_{zz} 为附加法向应力，把式(1-12)代入式(1-11)可得到

$$\tau_{xx} + \tau_{yy} + \tau_{zz} = 0 \quad (1-13)$$

将广义牛顿内摩擦定律推广应用于附加法向应力，即附加法向应力等于动力粘度与两倍的线应变速度的乘积。

$$\left. \begin{aligned} \tau_{xx} &= 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ \tau_{yy} &= 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ \tau_{zz} &= 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-14)$$

所以式(1-12)变为

$$\left. \begin{aligned} p_{xx} &= -p + 2\mu \frac{\partial u_x}{\partial x} \\ p_{yy} &= -p + 2\mu \frac{\partial u_y}{\partial y} \\ p_{zz} &= -p + 2\mu \frac{\partial u_z}{\partial z} \end{aligned} \right\} \quad (1-15)$$

五、非牛顿流体的分类

牛顿流体切应力和应变速度呈线性关系，在简单剪切流动中

$$\tau = \mu \dot{\gamma}$$

图1-4表示牛顿流体切应力 τ 和应变速度 $\dot{\gamma}$ 的关系曲线。牛顿流体的流变特性曲线是通过坐标原点的直线，其斜率就是牛顿流体的粘度 μ ，即

$$\mu = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} = \text{tg}\theta \quad (1-16)$$

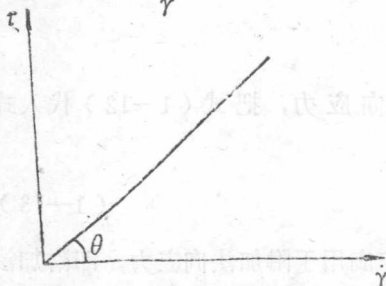


图1-4 牛顿流体流变特性曲线

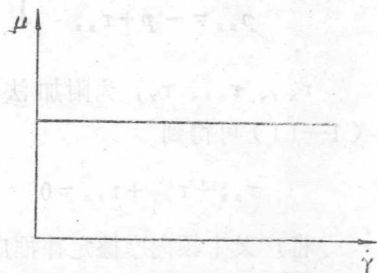


图1-5 牛顿流体的常粘度特性

图1—5表示了牛顿流体的常粘度特性。

对于非牛顿流体也可以类似于牛顿流体，把切应力和应变速度之比定义为非牛顿流体的表观粘度（Apparent Viscosity）或称粘度函数（Viscosity Function）。根据在简单剪切流中非牛顿流体的粘度函数是否与时间有关，可以把非牛顿流体分为两大类——非时变性非牛顿流体和时变性非牛顿流体。

1 非时变性非牛顿流体

这类流体切应力仅与应变速度有关，即粘度函数仅与应变速度（或切应力）有关，而与时间无关。

$$\eta = \eta(\dot{\gamma})$$

式中： η 为表观粘度或称粘度函数。主要的非时变性非牛顿流体的流变特性曲线和粘度曲线如图1—6和图1—7所示。

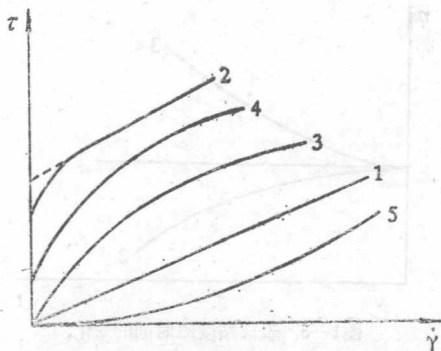


图1—6 主要非牛顿流体的流变曲线

1—牛顿型； 2—塑性型； 3—假塑型； 4—屈服假塑型 5—膨胀型

2 时变性非牛顿流体

这类流体的粘度函数不仅与应变速度有关，而且与剪切持续时间有关。大致可分为二类：

1) 触变性（Thixotropy）与震凝性（Rheopexy）流体在一定的应变速度下，触变流体的粘度函数随时间减小，而

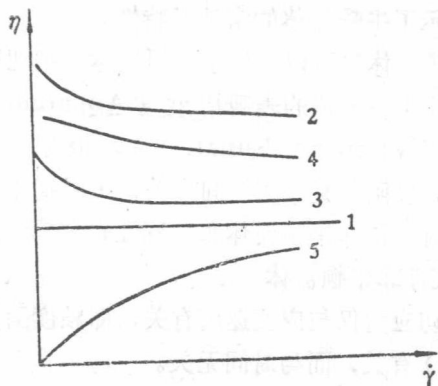


图1-7 非牛顿流体的粘度曲线

1—牛顿流体； 2、3、4—剪切稀化液体； 5—剪切稠化液体
震凝型流体则相反，表观粘度随时间增大，如图1-8所示。

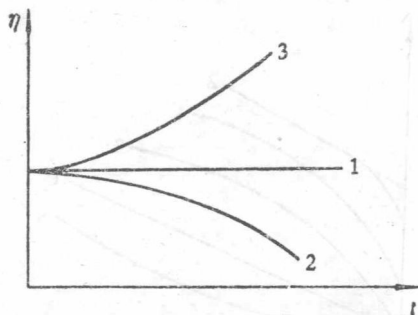


图1-8 表观粘度随时间的变化

1—牛顿流体； 2—触变性流体； 3—震凝型流体

粘弹性流体是兼有粘性和弹性的流体。与粘性流体的主要区别是外力消除后产生部分的应变回复 (Recoil)。与弹性固体的主要区别是徐变 (Creep)。

§ 1-2 非时变性非牛顿流体

一、剪切稀化流体

剪切稀化流体又称假塑性流体，在工程上应用很广，其流变

特性曲线如图1—9所示，是一根上凸的曲线。

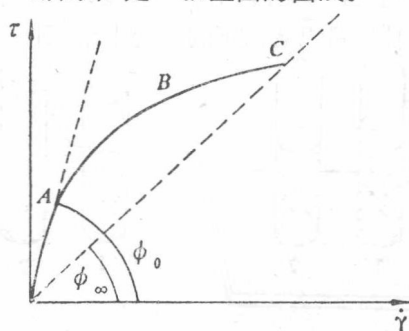


图1—9 剪切稀化流体的流变特性曲线

在流变特性曲线图上，表观粘度就是纵坐标与横坐标之比值， $\eta = \frac{\tau}{\dot{\gamma}}$ 。剪切稀化流体的表观粘度随应变速度的增大而减小，应变速度愈大，表观粘度愈小，流动性就愈好，这就是剪切稀化流体的主要特点。也是剪切稀化流体名称的由来。

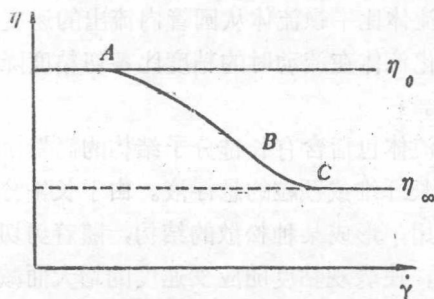


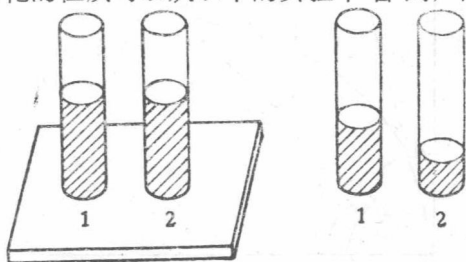
图1—10 剪切稀化流体的粘度曲线

图1—10为剪切稀化流体表观粘度的变化规律。当应变速度较低和较高时，表观粘度接近于常数值，

$$\begin{aligned} \eta(\dot{\gamma} \rightarrow 0) &\rightarrow \eta_0 \\ \eta(\dot{\gamma} \rightarrow \infty) &\rightarrow \eta_\infty < \eta_0 \end{aligned} \quad (1-17)$$

式中： η_0 称零切粘度； η_∞ 称极限牛顿粘度， η_∞ 小于 η_0 。

剪切稀化的性质可以从以下的实验中看到，图1-11为两根



1-牛顿流体；2-剪切稀化流体

1-牛顿流体； 2-剪切稀化流体

图1-11 剪切稀化的流动现象

相同的圆管铅直放置在玻璃板上，左侧圆管内装牛顿流体，右侧圆管内装剪切稀化流体。牛顿流体是甘油溶液，用改变浓度的方法可在大幅度范围内调整其粘度，以使剪切稀化流体的零切粘度和牛顿流体的粘度相等。但当把圆管底部的玻璃板抽去后，就会发现剪切稀化流体比牛顿流体从圆管内流出的速度要快得多，这是因为剪切稀化流体在流动时的粘度比零切粘度降低了，而牛顿流体粘度不变。

剪切稀化流体包括含有长链分子结构的高聚溶体和 高聚物溶液以及含有细长纤维或颗粒的悬浮液。由于长链分子或颗粒之间的物理化学作用，形成某种松散的结构，随着剪切流动的进行结构逐渐被破坏，使表观粘度随应变速度的增大而减小。此外，非牛顿流体粘度的成因也是由于长链分子或颗粒本身的性质产生的。这种液体在静止时，长链分子细长纤维呈杂乱卷曲状态。随着流动的进行，它们沿流动方向排列起来，显然应变速度越大，定向排列越整齐，流动阻力就越小。其表观粘度也就越小。

当应变速度甚小时不足以破坏原有的结构，不能使卷曲的分子伸展和定向。此时粘度为常数而与应变速度无关。而当应变速