

● 董法昌 主编

钻井液水力学理论与应用



石油大学出版社



钻井液水力学理论与应用

董法昌 主编

TE25
D1
石油大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

钻井液水力学理论与应用/董法昌主编. —东营:石油大学出版社, 2003. 8

ISBN 7-5636-1794-9

I. 钻... II. 董... III. 钻井泥浆-水力学
IV. TE252

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第064463号

书 名: 钻井液水力学理论与应用
主 编: 董法昌

责任编辑: 郇云飞(电话 0546—8391935)

封面设计: 傅荣治(电话 0546—8391805)

出版者: 石油大学出版社(山东 东营 邮编 257061)

网 址: <http://suncetr.hdpu.edu.cn>

电子信箱: sanbians@mail.hdpu.edu.cn

印刷者: 石油大学印刷厂

发 行 者: 石油大学出版社(电话 0546—8391797)

开 本: 140×202 印张: 5.25 字数: 100千字

版 次: 2003年8月第1版第1次印刷

印 数: 1—550册

定 价: 20.00元

编写说明

本书的编写目的是:(1) 作为一本综合的钻井水力学教材。(2) 为现场地质专家进行水力学计算提供快速参考。第一章介绍了流体的基本性质,第二章介绍了水力学一般原理,第三章到第十章分析了钻井过程中的具体水力学问题,如粘度测量、压力损失、抽吸激动压力、岩屑输运以及水力学参数的优化。每一章后面列有参考文献。

全书采用统一的单位和术语,公式采用的是SI制,一些常用的表达式采用了油田应用单位。在每个公式后面都有必要的术语说明,附录一中给出了总的术语表,附录二中列出了度量单位,附录三中给出了一些重要公式,附录四是水力学计算实例。

有关非法定计量单位的 换算关系

$$1 \text{ ft} = 0.3048 \text{ m}$$

$$1 \text{ in} = 25.4 \text{ mm}$$

$$1 \text{ ft}^2 = 0.0929 \text{ m}^2$$

$$1 \text{ in}^2 = 645.16 \text{ mm}^2$$

$$1 \text{ ft}^3 = 0.0283 \text{ m}^3$$

$$1 \text{ bbl} = 158.987 \text{ dm}^3$$

$$1 \text{ gal} = 3.785 \text{ dm}^3 (\text{美制液量})$$

$$1 \text{ lb} = 0.4536 \text{ kg}$$

$$1 \text{ psi} = 6.895 \times 10^3 \text{ Pa}$$

$$1 \text{ hp} = 745.6999 \text{ W}$$

$$1 \text{ 泊} = 0.1 \text{ Pa} \cdot \text{s}$$

$$1 \text{ 夸脱} = 946 \text{ cm}^3$$

目 录

第一章 流体基本知识	(1)
1.1 流体的基本性质	(1)
1.2 密度	(2)
1.3 流体静压力	(2)
1.4 帕斯卡定律	(4)
参考文献	(4)
第二章 流体流动的原理、模型与测量	(5)
2.1 流体流动原理	(5)
2.2 流体变形	(6)
2.3 流态	(8)
2.4 流态的确定	(11)
2.5 流动的连续性	(12)
2.6 流动模型	(13)
2.7 时间相依性	(20)
2.8 流体流动参数的测量	(21)
2.9 现场操作程序	(33)
参考文献	(39)
第三章 钻井液	(42)
3.1 简介	(42)

3.2	水基泥浆	(43)
3.3	油基泥浆	(44)
3.4	泥浆粘度	(44)
	参考文献	(45)
第四章	泥浆循环系统	(46)
(1)	4.1 简介	(46)
(1)	4.2 泵	(47)
(S)	4.3 钻柱	(49)
(S)	4.4 钻头	(50)
(1)	4.5 环形空间	(51)
(1)	参考文献	(52)
第五章	钻柱	(53)
(2)	5.1 层流	(53)
(8)	5.2 紊流	(63)
(8)	5.3 过渡流	(68)
(1)	5.4 钻具接头	(70)
(S)	参考文献	(71)
第六章	马达、涡轮与钻头	(74)
(6)	6.1 马达	(74)
(18)	6.2 涡轮	(76)
(88)	6.3 钻头喷嘴	(76)
(98)	参考文献	(79)
第七章	环形空间	(80)
(S)	7.1 层流	(80)

7.2 紊流	(91)
7.3 过渡流	(93)
参考文献	(94)
第八章 抽吸压力和波动压力	(98)
参考文献	(104)
第九章 岩屑的运移	(106)
参考文献	(113)
第十章 水力学方案的优化	(115)
参考文献	(121)
附录	(122)
附录一:术语表	(122)
附录二:度量单位	(126)
附录三:关键公式	(128)
附录四:水力学计算实例	(141)
附录五:名词解释	(153)



第一章 流体基本知识

要安全和成功地钻进一口井,必须对钻井水力学原理有全面的认识和理解,因此,钻井水力学是所有测井地质学家都必须熟悉的一门非常重要的学科。

钻井水力学是流体动力学——研究流体行为的学科——原理的特殊应用。流体动力学原理起源于固体的牛顿力学原理,二者的主要区别在于对流体介质性质的解释不同。因此,在钻井水力学分析中,首先需要讨论流体的基本性质。

1.1 流体的基本性质

物质有两种——固体和流体。固体是刚硬的,流体是流动的。但是,二者的区别并不总是很明显,有些物质会表现出固体和流体两种性质。要深入理解钻井水力学,必须首先了解流体的基本性质,即流体区别于固体的特性。这些性质是引起钻井液水力学主要现象的原因,本书将对这些性质进行分析和量化。

流体有两类——气体和液体。气体是可以被高度压缩的,也就是说,气体体积取决于压力,此外,还取决于温度。而液体只可以轻微压缩,也就是说,随着压

力的变化,液体体积只发生微小的变化,与温度的关系也很小。

本书只分析钻井液水力学特性。由于钻井泥浆通常被称为“钻井液”,因此,本书都采用了流体这一术语。在本书所讨论的问题中,钻井液的体积不随压力和温度发生显著的变化,也就是说,在分析中忽略了压力和温度对体积的影响。

不能维持固定的形状是流体的一个重要特性。将一个木块放在桌子上,可以从一边推动它,使它在桌面上滑动。现在设想放在桌上的是一个“水块”,则不能通过推动一边使其整体移动。流体不能承受剪切应力。对固体来说,外力可以作用在任意方向,而对静止流体,外力只能垂直地作用于流体表面。一个切向作用力将使流体改变形状、产生连续变形而导致流动。

1.2 密度

1 ft³ 的水重 62.4 lb, 因此,水的重度是 62.4 lb/ft³。重度除以重力常数称为物质密度或密度。在油田生产中,测得的钻井液泥浆重量就是密度,其单位是 lb/gal。

1.3 流体静压力

由流体静止液柱的重力产生的压力称为流体静压力。1 ft³ 的水的重力,均匀地分布在面积为 1 ft² 的底

面上,产生的流体静压力为 62.4 lb/ft^2 。

钻井液柱的静压力可以用下式计算:

$$p_h = (D_v - F_1) \times \rho \times g \quad (1-1)$$

式中 p_h ——流体静压力;

D_v ——垂直深度;

F_1 ——流线深度;

ρ ——流体密度;

g ——重力加速度常数。

或者采用油田应用单位,计算公式为:

$$p_h = (D_v - F_1) \times M_w \times 0.0519$$

式中 p_h ——流体静压力,psi;

D_v ——垂直深度,ft;

F_1 ——流线深度,ft;

M_w ——泥浆重度,lb/gal。

其中 0.0519 是油田英制单位(psi,lb/gal/ft)的转换因子,推导如下:

$$1 \text{ ft}^3 = 7.48 \text{ gal}$$

$$1 \text{ ft}^2 = 144 \text{ in}^2$$

因此:

$$1 \text{ lb/gal} \times 7.48 \text{ gal/ft}^3 \times \frac{1}{144} \text{ ft}^2/\text{in}^2 = 1 \text{ psi/ft}$$

这样:

$$\frac{7.48}{144} = 1 \text{ psi/ft/lb/gal}$$

$0.0519 = 1 \text{ psi/ft/lb/gal}$

因此,重度为 8.34 lb/gal 的清水产生的压力是:

$$8.34 \times 0.0519 = 0.433 \text{ psi/ft}$$

采用 SI 制单位时变为:

$$p(\text{kPa}) = \rho(\text{kg/m}^3) \times D(\text{m}) \times 0.0098(\text{m/s}^2)$$

1.4 帕斯卡定律

将一段水柱浸入湖中,尽管水柱会对其底面产生静水压力,但水柱仍保持静止。原因是,在水柱表面的任意方向,都同时作用着一对大小相等、方向相反的力——水柱所受的浮力和周围水对其施加的压力。

这一原理可以概括为帕斯卡定律:静止流体中任何一点上的压力在所有方向上都相等。作用在流体上的任何压力,将毫无保留地、均匀地传递到流体各点。

帕斯卡定律的第二部分在钻井水力学中具有重要的作用。当在井涌期间关井时,漏层的附加压力就会均匀地传递到流体各点。在钻进时,对地层封固得越好,靠近地层的薄弱层所受的压力就越均匀。因为在钻进时,靠近地层的薄弱层最容易被压裂而造成漏失。

参考文献

- W. Russell. Introduction to Fluid Mechanics. Addition-Wesley Publishing Co., Reading, MA, 1966

第二章 流体流动的原理、模型与测量

2.1 流体流动原理

在第一章中已经指出,流体不能承受剪切应力,这是它的一个很重要的性质。流体受到剪切应力后会发生变形,流体发生连续变形就是流动。

流体的流动必须发生在通道中,这种通道不一定是圆管。当流体在倾斜的桌面上流动时,流动通道就是桌面、侧面和顶面的空气。

流动通道的性质对流体流动影响很大,所有的流动分析都必须考虑流动通道的几何形状。在本书中,我们分别分析了钻井液沿钻柱向下的流动和沿环空向上的流动,对流动通道几何形状的考虑大大增加了分析的数学复杂性。

一般来说,流体流动是平行流层相互滑动的结果。紧贴在通道表面的流层会附着在表面上,每一个与该层相连的流层则会以逐渐增大的速度滑过其相邻层,这种有序的流动方式称为层流。

当平均流速很大时,层流就会失去其有序性而发

生相互杂乱的碰撞和混掺,此时只有靠近通道表面的流层仍保持有序的流动,这一类型的流动称为紊流。

2.2 流体变形

图 2-1 给出了流体的变形情况:两平行流层之间的距离是 dy ,作用在面积 A 上的力 F 使流体发生相互滑动。阻止流体滑动的摩擦阻力称为剪切应力。

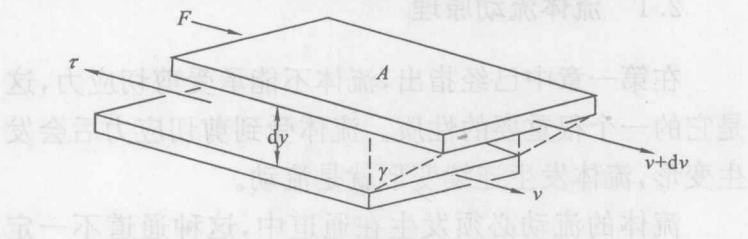


图 2-1 剪切应力作用下流体的变形

一般把剪切应力 τ 定义为力 F 与作用面积 A 之比,即 $\tau = \frac{F}{A}$ 。因为剪切应力的作用方向一般与 F 相反,所以该定义会使人产生误解。但是,若将该变形模型看成是一个处于平衡中的系统,就不会使人产生误解。流层速度 v 和 $v+dv$ 是常量,这表示流层的合力为零,因此不可能改变速度或产生加速度。因为合力为零,所以作用力 F 与摩擦力大小相等、方向相反。这样就可以用作用力 F 来定义剪切应力。

当外力作用在静止流体上时,流体就会从过渡口开始加速,直到达到某个不变的平均速度。在这期间,作用力 F 大于摩擦力,合外力的作用产生了加速度。可

以认为经过无限长的时间的流动后该体系达到了平衡状态。在分析流动时,认为该体系是平衡的。

用剪切速率 γ 来表示两流层之间的剪切应力,剪切速率定义为两流层的速度差除以其距离,即 $\gamma = \frac{dv}{dy}$ 。

除以距离 dy 的原因可能不是很充分,图2-2说明了距离 dy 的变化会引起 γ 的变化,距离 d 表示经过某段时间后上层流体流过的距离。

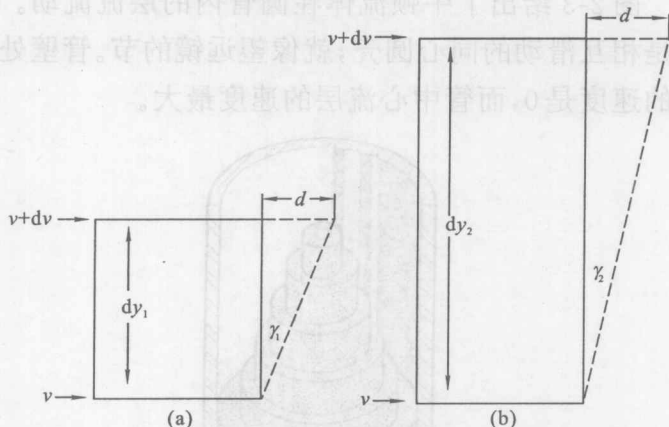


图2-2 剪切速率 γ 与流层距离 d 之间的依赖关系

剪切应力 τ 和剪切速率 γ 之间的关系确定了流体的流动情况。对于某些流体,剪切应力和剪切速率呈线性关系,也就是说,如果剪切应力增加到两倍,那么剪切速率也会增加到两倍,这种流体称为牛顿流体。大多数钻井液是非牛顿流体,其剪切应力和剪切速率之间的关系比较复杂。

2.3 流态

(1) 段塞流

在段塞流中,流体基本上作为单一的、未受扰动的固体运动,即段塞。这种运动可能是由流道壁面处流体的滑移造成的,通常在流速很低时会产生段塞流。

(2) 层流

图 2-3 给出了牛顿流体在圆管内的层流流动。流层是相互滑动的同心圆壳,就像望远镜的节。管壁处流层的速度是 0,而管中心流层的速度最大。

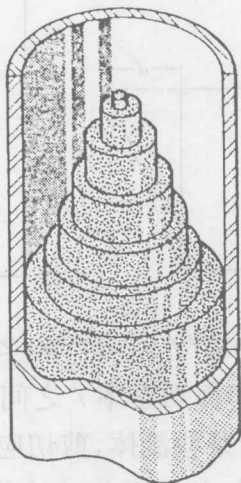


图 2-3 牛顿流体在圆管内层流流动的三维图

图 2-4 给出了二维的速度分布情况。需要注意的

是,剪切速率 $\frac{dv}{dr}$ 就是速度曲线上任一点的斜率。在管壁上剪切速率最大,而管中心的剪切速率为0。由于牛顿流体剪切应力与剪切速率成正比,所以在管壁上剪切应力最大,而在管中心剪切应力为0。这样,剪切速率和剪切应力都随着管半径的变化而变化。

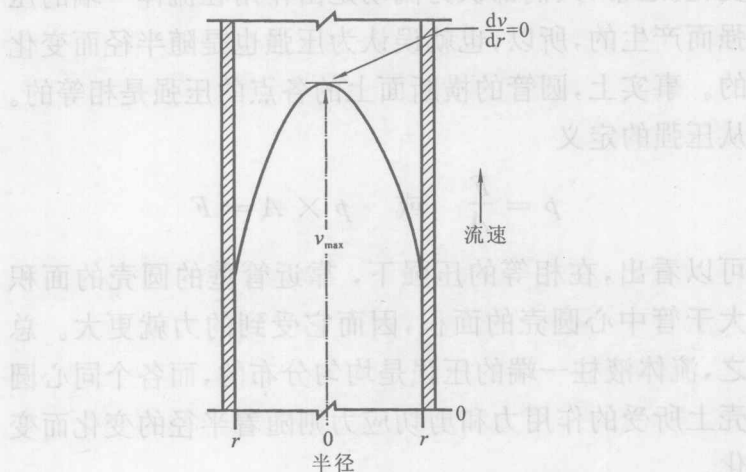


图 2-4 牛顿流体在圆管内层流流动的二维速度分布

流动流体中的剪切速率和剪切应力是变量,这一点较难理解。

首先考虑粘度的概念。一般情况下,粘度度量了流体的粘性。从数量上来说,粘度可以定义为剪切应力与剪切速率的比值。对于牛顿流体,该比值是一个常数,所以流体内任一点的粘度相等。而对非牛顿流体,粘度则随着剪切速率的变化而变化。通常人们认为物质的