

[法]石油与天然气勘探开发工会等 编

钻井泥浆与水泥浆 流变学手册

石油工业出版社

内 容 提 要

本书介绍了流变学的一些基本概念,以及流变学理论在钻井泥浆与水泥浆方面的应用,还介绍了水力设计参数优选的方法并举例加以说明。

本书内容丰富且全面,省去了数学公式的繁琐推导,突出公式的应用及流变参数的优选。本书适合于钻井工程技术人员现场使用,也可用作研究人员及有关院校师生的参考书。

Drilling Mud and Cement Slurry Rheology Manual

Gulf Publishing Company

Book Division

Houston, Texas

1982

*

钻井泥浆与水泥浆流变学手册

〔法〕石油与天然气勘探开发工会等编

曾祥熹 译

*

石油工业出版社出版

《北京安门内大街东后街甲36号》

煤炭出版社印刷厂排版

北京顺义燕华营印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

*

787×1092毫米32开本4印张 81千字 印1—8,300

1984年10月北京第1版 1984年10月北京第1次印刷

书号: 15037·2492 定价: 0.45元

序 言

(摘 译)

钻井液与水泥浆的流变特性，即流动性质，现在已不言而喻地被认为是重要的。

钻井过程中，用简便且快速的方法调节泥浆的“粘度”或流变特性，已成为井场技术人员经常必需的指南，直到今天还是如此。实际上，流动性质直接影响各种作业的进行。适当调节流动性质，能保证井眼规则并在尽可能短的时间内及尽可能安全的条件下完钻。

同样，注水泥时水泥浆顶替泥浆的效率也取决于其液体的流动性质。

在其他限制条件下调节和优选流变特性，显然计算繁杂。但是，近年来由于采用了现代计算技术，特别是使用了可程序的微型计算机，数据处理变得更加容易了。

石油与天然气勘探开发工会 (*Chambre Syndicale de la Recherche et de la Production du Pétrole et du Gaz Naturel*) 法国技术委员会“钻井液及水泥”小组打算把有关钻井液流变学的资料编写成一本单独的手册，以供同行们使用。

本书不着重于理论论述，也不注重于大量的公式推导。因此它有可能使读者失望，因为它主要偏重于实践。本书试图提出一种易在实践中应用的逻辑处理方法。结果，省略了某些计算方法，并且有时精确性由于简化而降低。然而，

近似值的使用是可行的，实际上，如果考虑那些不能进行定量处理的固有因素，任何严格的尝试是注定要失败的。

本书第一章讨论了基本概念。第二章论述了确定钻井液和水泥浆流变参数的一般原则。第三章是应用前两章所得结果的实用方法，使用现场采用的单位制。其主要目的是供技术人员钻井过程中进行水力计算时使用。第四章是计算实例。

本书是由法国石油与天然气勘探开发工会，开发委员会，以Raymond Broc（法国石油产品公司）为首的开发实验室分会“钻井液和水泥”小组编写的。

编写本手册最早的想法是Jacques de LAUTREC（埃尔夫·阿奎坦国际石油公司）提出来的。如果没有大家的帮助、合作和不倦的努力，是不可能实现的。

开发委员会实验室分会会长 R. MONICARD

参数符号及单位

为了便于了解第一、二章，这两章的所有方程均采用国际单位制。第三、四章所用的符号和单位附录及其换算表，见表Ⅱ表Ⅲ。

符 号	含 义	量 纲	国际单位
A	喷嘴总截面积	L^2	米 ²
A_n	钻速	LT^{-1}	米/秒
C_r	阻力系数(沉降)	无因次	
D	钻柱内径	L	米
D_i	环空内径(钻柱外径)	L	米
D_o	环空外径	L	米
f	摩擦(流动)系数	无因次	
g	重力加速度	LT^{-2}	米/秒 ² (9.81)
g_t	时间 t 时的 静切力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
I_h	水力冲击力	MLT^{-2}	牛顿
K	稠度系数	$ML^{-1}T^{n-2}$	帕·秒 ^{n}
L	长度	L	米
n	幂律指数	无因次	
P	压力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
P_h	水静压力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
P_i	排出压力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
P_s	泥浆循环中的工作压力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
P	功率	ML^2T^{-3}	瓦

续表

符号	含 义	量 纲	国际单位
P_h	水马力	ML^2T^{-3}	瓦
P_{hc}	钻头外循环的水马力	ML^2T^{-3}	瓦
P_{h_0}	钻头水马力	ML^2T^{-3}	瓦
P_{hl}	最大有效水马力	ML^2T^{-3}	瓦
Q	排量	L^3T^{-1}	米 ³ /秒
Q_c	临界排量	L^3T^{-1}	米 ³ /秒
Q_m	保证环空中岩屑上升的最小排量	L^3T^{-1}	米 ³ /秒
Q_s	压力为 P_s 时的最大排量	L^3T^{-1}	米 ³ /秒
Re	雷诺数	无因次	
Re_c	临界雷诺数	无因次	
Re_s	单颗粒沉降雷诺数	无因次	
v	单岩屑颗粒的体积	L^3	米 ³
V	钻井液流速	LT^{-1}	米/秒
V_s	泥浆环空流速	LT^{-1}	米/秒
V_c	钻井液临界流速	LT^{-1}	米/秒
V_r	岩屑的上升速度	LT^{-1}	米/秒
V_s	岩屑的滑落速度	LT^{-1}	米/秒
$\dot{\gamma}$	剪切速率	T^{-1}	1/秒
ΔP	压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
ΔP_s	环空压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
ΔP_c	钻头喷嘴外循环的压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
ΔP_s	钻头压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
ΔP_l	循环系统的最大允许压力损失	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
μ	动力粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	帕·秒
μ_a	表观粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	帕·秒
μ_e	等效粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	帕·秒
μ_p	塑性粘度	$ML^{-1}T^{-1}$	帕·秒

续表

符 号	含 义	量 纲	国际单位
ρ	密度	ML^{-3}	公斤/米 ³
ρ_l	钻井液的密度	ML^{-3}	公斤/米 ³
ρ_s	固相颗粒的密度	ML^{-3}	公斤/米 ³
τ	剪切应力	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
τ_0	屈服值(极限剪切应力)	$ML^{-1}T^{-2}$	帕
φ_s	环空等效直径	L	米
φ_h	水力直径	L	米
φ_p	岩屑的等效直径	L	米

目 录

参数符号及单位

第一章 基本概念

1. 1 流变学定义	1
1. 2 流动类型	1
1. 2. 1 稳定流	1
1. 2. 2 不稳定流	2
1. 2. 3 流动类型随平均流速的变化	2
1. 3 流变特性	3
1. 4 流变参数的试验测定方法	5
1. 4. 1 马氏漏斗粘度计	5
1. 4. 1. 1 原理	5
1. 4. 1. 2 操作	5
1. 4. 1. 3 校准	6
1. 4. 1. 4 误差来源	7
1. 4. 2 范氏粘度计	7
1. 4. 2. 1 原理	7
1. 4. 2. 2 旋转式同轴圆筒粘度计采用的方程	7
1. 4. 2. 3 范氏粘度计的应用	9
1. 4. 2. 4 操作步骤	10
1. 4. 2. 5 表观粘度的测定	10
1. 4. 2. 6 触变性的测定	11
1. 4. 2. 7 在旋转式同轴圆筒粘度计中流动与在直 圆柱形管中流动的比较	11
1. 5 流变体分类	12

1. 6	流变方程	13
1. 6. 1	牛顿流体	13
1. 6. 2	非牛顿流体	13
1. 6. 2. 1	宾汉流体	14
1. 6. 2. 2	假塑性或幂律流体	16
1. 6. 2. 3	剪切速率-剪切应力关系曲线一览表	18
1. 7	剪切稀释作用	18
1. 8	在环空中流动	19

第二章 在钻井液和水泥浆方面的应用

2. 1	引言	21
2. 2	模式的选择	23
2. 3	流动类型的确定	24
2. 3. 1	雷诺数的一般表达式及其临界值	24
2. 3. 2	雷诺数及临界流速以流变参数为变量的函数 表达式	25
2. 3. 2. 1	牛顿流体	25
2. 3. 2. 2	宾汉流体	25
2. 3. 2. 3	幂律流体	27
2. 4	压力损失计算	28
2. 4. 1	方程	28
2. 4. 2	计算步骤	28
2. 5	起下钻时的压力变化	20
2. 5. 1	凝胶泥浆压力的应用	30
2. 5. 2	钻柱运动时的压力变化	31
2. 5. 2. 1	泥浆的理论位移速度	31
2. 5. 2. 2	泥浆的等效位移速度	31
2. 5. 2. 3	压力激动的计算	32
2. 5. 3	惯性力的影响	33
2. 6	当量密度的概念	33
2. 6. 1	水静压力(P_s)	34

2. 6. 2	环空（或环空的一部分）压力损失 ΔP_0	35
2. 6. 3	当量循环密度和当量循环比重	35
2. 7	井眼净化与井壁力学强度	35
2. 7. 1	井眼净化	35
2. 7. 1. 1	岩屑由井底进入泥浆流中	35
2. 7. 1. 2	岩屑在环空中的上升	36
2. 7. 2	井壁力学强度	42
2. 7. 2. 1	井壁的冲蚀和力学强度降低的原因	42
2. 7. 2. 2	泥浆流动状态的影响	42
2. 7. 2. 3	Z 值	43
2. 8	水马力	44
2. 8. 1	定义和来源	44
2. 8. 2	水力条件的作用	45
2. 8. 2. 1	钻头水马力	46
2. 8. 2. 2	钻头水力冲击力 I_h	46
2. 8. 3	P_{h_0} 与 I_h 值的优选	46
2. 8. 3. 1	压力损失方程和限制条件	47
2. 8. 3. 2	压力损失的最优分配	48
2. 8. 3. 3	ΔP_0 和 Q 关系式的说明及其结果	51
2. 9	流变参数的描述	52
2. 9. 1	宾汉流体	52
2. 9. 1. 1	塑性粘度	52
2. 9. 1. 2	屈服值	53
2. 9. 2	幂律流体	54
2. 9. 2. 1	稠度系数 K	54
2. 9. 2. 2	幂律指数 n	54
2. 9. 3	静切力	54
2. 9. 4	马氏漏斗粘度	54
	参考文献	55

第三章 基本评价方法

3.1 引言	58
3.2 模式选择与流变参数的确定	58
3.2.1 六速范氏粘度计	58
3.2.1.1 图解法确定宾汉模式的参数	59
3.2.1.2 图解法确定幂律模式的参数	59
3.2.1.3 最小二乘法	60
3.2.2 两速范氏粘度计	62
3.3 流动类型的确定与压力损失的计算	63
3.4 起下钻时的压力变化	64
3.5 循环时的当量密度与当量比重	64
3.6 岩屑的上升	64
3.7 水马力	64
3.7.1 最优排量和钻头压力损失的确定	68
3.7.1.1 $\Delta P-Q$ 基本关系图	68
3.7.1.2 钻头最大水马力的标准	69
3.7.1.3 最大水力冲击力的标准	71
3.7.2 钻头水眼(喷嘴)的计算	73
3.7.3 环空上返速度	73
3.7.4 最优排量应用的限制	74
3.7.5 各种水力参数随井深变化总表	74
3.7.6 已知井深时水马力最优分配的实际确定方法	74
3.8 方程式表	79

第四章 实 例

4.1 工作实例	100
4.1.1 一般数据	100
4.1.2 宾汉流体的计算实例	101
4.1.2.1 模式选择及流变参数的确定	101
4.1.2.2 雷诺数为1100时最大排量的确定	101

4. 1. 2. 3	水力设计	101
4. 1. 2. 4	压力损失	102
4. 1. 2. 5	当量循环密度	102
4. 1. 2. 6	岩屑上升的速度和时间	103
4. 1. 2. 7	当量钻杆移动密度 ($EPMD$) 等于当量 循环密度 (ECD) 时的起下钻速度	103
4. 1. 2. 8	操作和惯性引起的压力激动及抽吸压力	103
4. 1. 2. 9	重新循环时破坏凝胶结构的压力激动	104
4. 1. 3	幂律流体的计算实例	104
4. 1. 3. 1	模式选择和流变参数的确定	105
4. 1. 3. 2	雷诺数为1100时最大排量的确定	105
4. 1. 3. 3	水力设计	105
4. 1. 3. 4	压力损失	106
4. 1. 3. 5	当量循环密度	106
4. 1. 3. 6	岩屑上升的速度和时间	106
4. 1. 3. 7	当量钻杆移动密度 ($EPMD$) 等于当量 循环密度 (ECD) 时的起下钻速度	107
4. 1. 3. 8	操作和惯性引起的压力激动及抽吸压力	107
4. 1. 3. 9	重新循环时破坏凝胶结构的压力激动	107
4. 2	诺模图	108

第一章 基本概念

1.1 流变学定义

流变学是研究在外加应力下材料的变形（如为固体）或流动（如为液体）的学科。

作用于物体的力会使物体产生变形。如为固体，当力移去后物体恢复原状，此变形属弹性变形（例如橡皮筋的拉伸）；如只有在其他力的作用下，才恢复原状，则属于塑性变形（例如油灰球的变形）。如为液体，外力会引起流动。

1.2 流动类型

1.2.1 稳定流

稳定流流动是连续的，包括下列类型：

（a）层流 在层流中，流体的任意流层相对于另一些与其流动方向平行的流层运动，且每层有各自的流动速度。如图 1 示，流体在圆柱形管道中流动，沿管轴流速最快，而无滑动时管壁处流速为零。

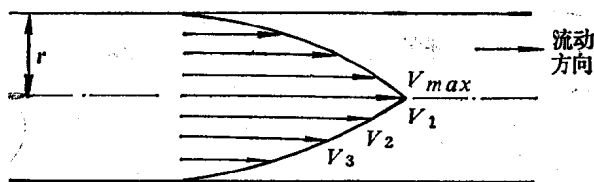


图 1 层流

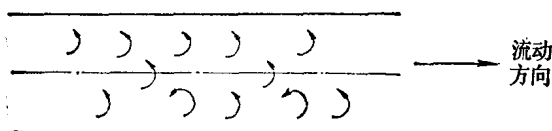


图 2 紊流

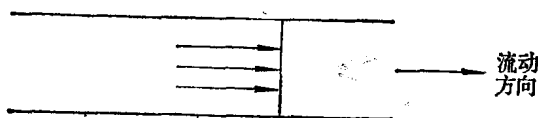


图 3 塞流

(b) 紊流 在紊流中，液流内均形成小的涡流（见图 2）。

(c) 塞流 在塞流中，流体象塞子一般沿管子流动。在已定方向上，不论与管轴的距离如何，流速为常数（见图 3）。

只有少数类型的流体表现为塞流。膨润土悬浮体是一种塑性流体，能表现为塞流，而水、柴油、甘油溶液等则不是。

1.2.2 不稳定流

不稳定流正好发生在流动条件刚改变之后，和新的流动稳定条件建立之前。

例如，流体开始流动时，以及流速变化，管道横断面变宽或变窄等时候，可以产生不稳定流。

1.2.3 流动类型随平均流速的变化

根据平均流速 V 的变化，某种流体流经给定尺寸的直圆柱形管道时，可能出现下列情况：

(a) 不存在塞流, 如图 4 示;

(b) 存在塞流, 如图 5 示。

图中, V_1 是层流末端的临界流速, V_2 是紊流起端的临界流速。

注意, “不稳定流” 的含义比 “层流-紊流过渡带” 的含义更广。

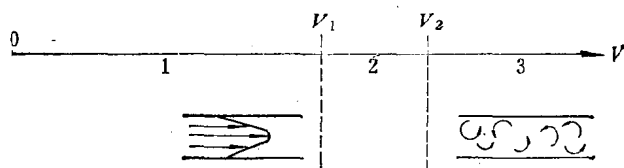


图 4 流动类型的变化

1—层流 (稳定的); 2—层流-紊流带 (不稳定的); 3—紊流 (平均是稳定的)

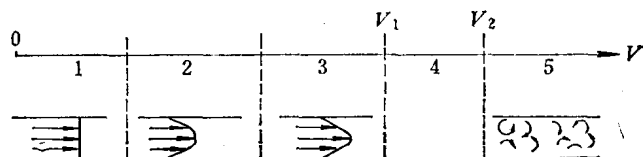


图 5 流动类型的变化

1—塞流 (稳定的); 2—随流速增加流核减小; 3—层流 (稳定的); 4—层流-紊流 (过渡带); 5—紊流 (平均是稳定的)

1.3 流变特性

在一定温度和压力条件下, 流体具有如下特性:

A. 在不稳定的条件下, 流动状态可用对应于流动条件改变的时间来表示。

B. 层流态可以用其试验流变曲线或流变图来表示。这

种曲线所代表的流动方程的不变系数是流变参数，对不同流体是各不相同的。

如流动为层流，流动方程把剪切应力 τ 与剪切速率 $\dot{\gamma}$ 联系起来。对一给定流体，它随温度及压力而变化。

已说过，在层流中，流体可剪切成与流动方向相互平行的流层，每层均具有特定的运动速度。因而可定义如下：

(a) 剪切速率为

$$\dot{\gamma} = \frac{dV}{dr} = \frac{\text{两相邻层间的流速差}}{\text{两层间距离}} \quad (1)$$

$\dot{\gamma}$ 的量纲式是

$$\frac{LT^{-1}}{L} = T^{-1}$$

即 $\dot{\gamma}$ 的量纲是时间的倒数（秒⁻¹或1/秒）。

(b) 剪切应力为剪切液层单位面积上的力。

τ 的量纲式是

$$\frac{MLT^{-2}}{L^{-2}} = ML^{-1}T^{-2}$$

即 τ 具有压力的量纲。经常以磅/100英尺²（磅力/100 英尺²）或以国际单位制（SI）帕（Pa）来表示。

对一已知剪切速率，表观粘度 μ_a 由下列方程来定义：

$$\mu_a = \frac{\tau}{\dot{\gamma}} \quad (2)$$

式中 τ 是相应于 $\dot{\gamma}$ 的剪切应力。

μ_a 的量纲式为

$$\frac{ML^{-1}T^{-2}}{T^{-1}} = ML^{-1}T^{-1}$$

即 μ_a 具有粘度的量纲。

国际单位制中, μ_a 以帕·秒 (Pa·s) 表示。这一单位常用毫帕·秒 (mPa·s), 相当于厘泊 (cP)。

常常需要考虑液流通道壁处的剪切应力、剪切速率和表观粘度。

C. 对触变流体, 静止时其状态可用静止一定时间后形成凝胶来表示。

符合下列条件的流体是触变流体:

(a) 摇动并静止后可形成凝胶;

(b) 如再次摇动后, 它可恢复到原有状态。

在常温和常压下, 触变状态是可逆的。

1.4 流变参数的试验测定方法

常用于井场测试的仪器有:

(a) 马氏漏斗粘度计;

(b) 范氏粘度计。

1.4.1 马氏漏斗粘度计 (图6)

1.4.1.1 原理

马氏漏斗粘度计是一种固定式测试仪器。测量参数为一定量的泥浆流过仪器尾管所需的时间, 用秒表示。此仪器是一个简单的标准漏斗。泥浆可收集在一个量杯中。

1.4.1.2 操作

手握漏斗, 用手指堵住尾管管口。

通过漏斗上的筛网倒入泥浆, 直至泥浆面与筛网平齐, 此时其体积相当于1500厘米³。

握住漏斗把手, 按动秒表, 让泥浆流入量杯中, 当杯中收集到946厘米³ (1/4加仑) 泥浆时, 再次按动秒表, 秒表上的读数, 即泥浆的马氏粘度。