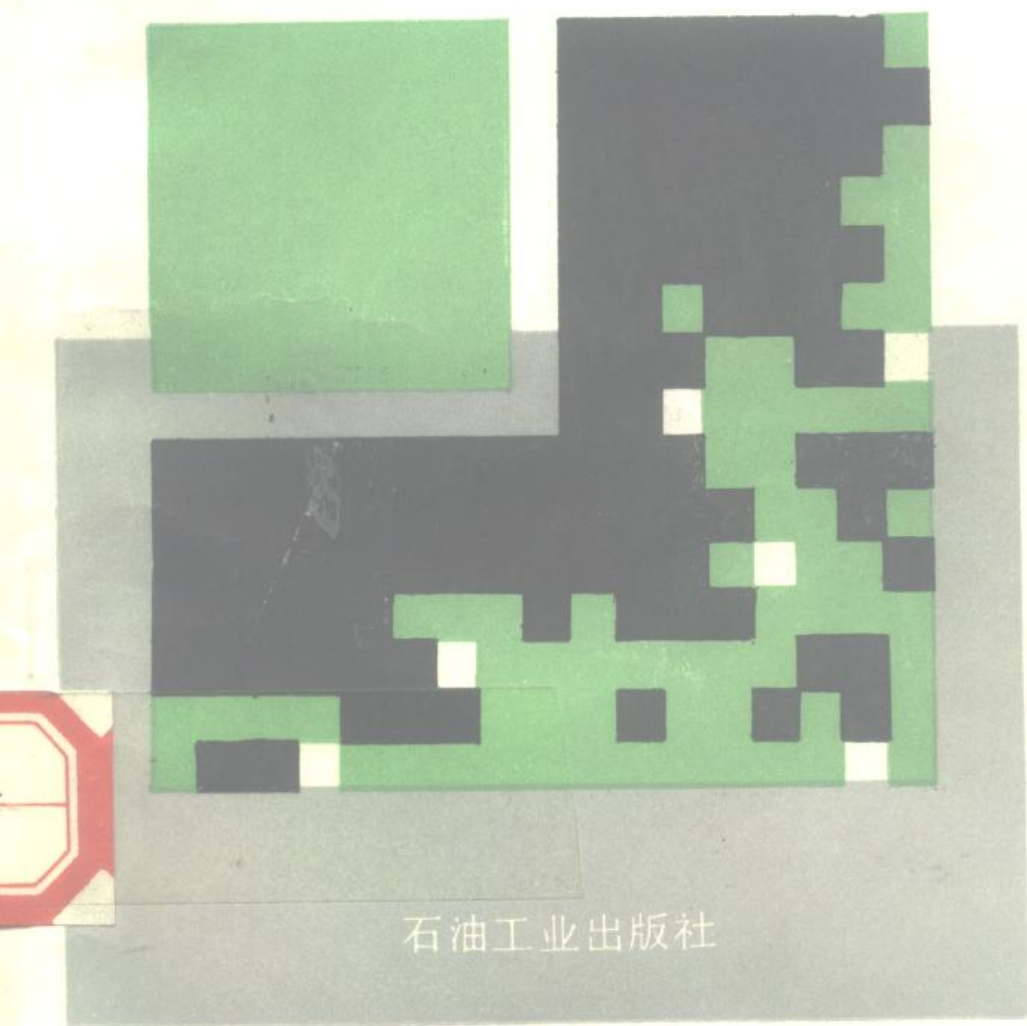


钻井计算

B.米切尔



石油工业出版社

钻井计算

B.米切尔

焦 棣 译 郝俊芳 校

石油工业出版社

目 录

第一章 确定泥浆密度	(1)
一. 确定泥浆密度的影响因素.....	(1)
二. 套管下入深度的选择.....	(2)
三. 破裂梯度.....	(3)
四. 当量泥浆密度或当量压力梯度.....	(8)
五. 破裂压力梯度曲线.....	(9)
✓ 六. 压力波动.....	(10)
七. 起钻灌泥浆计算.....	(16)
八. 压差卡钻.....	(17)
九. 解除压差卡钻.....	(19)
十. 泥浆向地层失水.....	(22)
十一. 泥浆成本.....	(23)
十二. 钻头水力参数.....	(25)
十三. 高压地层.....	(26)
十四. 利用测井资料预测地层压力.....	(28)
十五. 井涌余量.....	(30)
十六. 地层破裂压力试验.....	(39)
十七. 泥浆排量.....	(42)
第二章 控制井涌及防止井喷	(46)
一. 概述.....	(46)
二. 井涌控制设备.....	(47)
三. 溢流的监测.....	(48)
四. 排除溢流.....	(49)
五. 孔隙压力、初始溢流体积及溢流密度的确定.....	(50)
六. 用司钻法排除溢流.....	(51)

七. 排除溢流过程中的井内压力及套管压力	(53)
八. 用等候加重法排除溢流	(56)
九. 压井计算例题	(61)
十. 井涌余量的计算	(67)
十一. 完全井喷	(68)
十二. 水或纯油溢流	(69)
第三章 定向钻井	(72)
一. 概述	(72)
二. 定义	(72)
三. 定向井设计	(75)
四. 定向井的控制	(82)
五. 定向测量中的误差	(87)
六. 北、磁北和栅北	(93)
七. 工具面旋转	(94)
八. 以最小狗腿严重度与靶相交	(97)
第四章 钻井和固井水力学	(103)
一. 流体力学	(103)
二. 泥浆循环系统	(105)
三. 最大钻头水马力或水力冲击力	(106)
四. 摩擦压力损失	(109)
五. 注水泥水力学	(121)
第五章 钻头的选择	(129)
一. 概述	(129)
二. 钻头的特性	(129)
三. 钻头分类	(129)
四. 选择钻头的条件	(130)
五. 最佳钻压和转速	(135)
第六章 下部钻具组合	(141)
一. 概述	(141)
二. 使用钻铤的目的	(142)

三. 弯曲中和点与拉压中和点.....	(144)
四. 钻柱的可能弯曲形状.....	(145)
五. 选用钻铤所用公式.....	(147)
六. 稳定器或扩大器的安放位置.....	(150)
七. 钻铤直径的选用.....	(154)
第七章 垂直井和定向井中的钻杆和套管设计	(156)
一. 概述.....	(156)
二. 轴向拉伸和压缩.....	(157)
三. 定向井中钻柱的拉伸和压缩.....	(161)
四. 钻杆和套管的双轴应力.....	(164)
五. 钻杆的抗挤强度和抗破裂强度.....	(169)
六. 油层套管的设计准则.....	(171)
七. 套管的计量和扶正器的位置.....	(174)
八. 打捞钻柱时所受的扭转力、拉力和压力.....	(180)
九. 钻杆的弯曲破坏和由井眼狗腿引起的钻杆疲劳破坏	(185)
十. 钻柱的轴向振动和横向振动.....	(196)
十一. 套管伸长和井口负荷.....	(198)
十二. 套管的弯曲、井口负荷和应力.....	(208)
第八章 空气钻井	(217)
一. 概述.....	(217)
二. 空气(气体)钻井法的优点和使用条件.....	(217)
三. 空气钻井设备.....	(220)
四. 空气钻井气动设备和水力设备.....	(227)
五. 操作方法.....	(240)
六. 专题讨论.....	(244)
附录 本书所用单位与法定计量单位换算表	(250)

第一章 确定泥浆密度

一、确定泥浆密度的影响因素

在进行油井钻井设计时，确定某一井段的泥浆密度是一项很复杂且难以掌握的工作。其影响因素如下：

- (1) 地层破裂压力梯度（有两个）；
- (2) 孔隙压力；
- (3) 井涌余量；
- (4) 套管鞋深度；
- (5) 井眼稳定性（坍塌地层）；
- (6) 地面井控设备；
- (7) 环空循环压力；
- (8) 波动压力；
- (9) 压差卡钻；
- (10) 泥浆失水量；
- (11) 井眼灌泥浆；
- (12) 泥浆气侵；
- (13) 钻头水力条件；
- (14) 泥浆成本；
- (15) 钻速；
- (16) 清除岩屑；
- (17) 地层孔隙度、渗透率和所含流体；
- (18) 大于孔隙压力的安全系数；
- (19) 小于破裂压力的安全系数；

- (20) 电测分析；
- (21) 地层岩屑分析；
- (22) 油藏工程(地层损害)；
- (23) 管理上的差错。

二、套管下入深度的选择

上述诸因素中，最重要的是套管鞋深度的选择。为了能

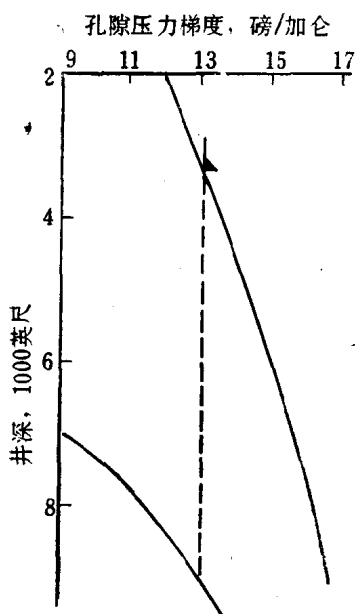


图 1-1 孔隙压力梯度
与井深的关系

用旋转钻井设备钻至预定井深，必须把套管下在正确的深度。图1-1只考虑了孔隙压力梯度和井深。从井底向上设计套管层次可决定井内所需下入套管的最小深度。

要点是，在裸眼井段泥浆液柱压力必须大于地层孔隙压力且又要小于地层最低破裂压力（一般在上层套管鞋处）。

如图1-2所示，当套管下入深度为3500英尺时，下面的裸眼井段可钻至9000英尺。如果再往下钻进，则当9000英尺处有

渗透性高压层时，就可能发生井涌。如果泥浆液柱压力超过9000英尺处的地层孔隙压力，又可能在套管鞋处造成井漏。

因此，要使钻进深度超过9000英尺，则上层套管下入深度必

须大于3500英尺。

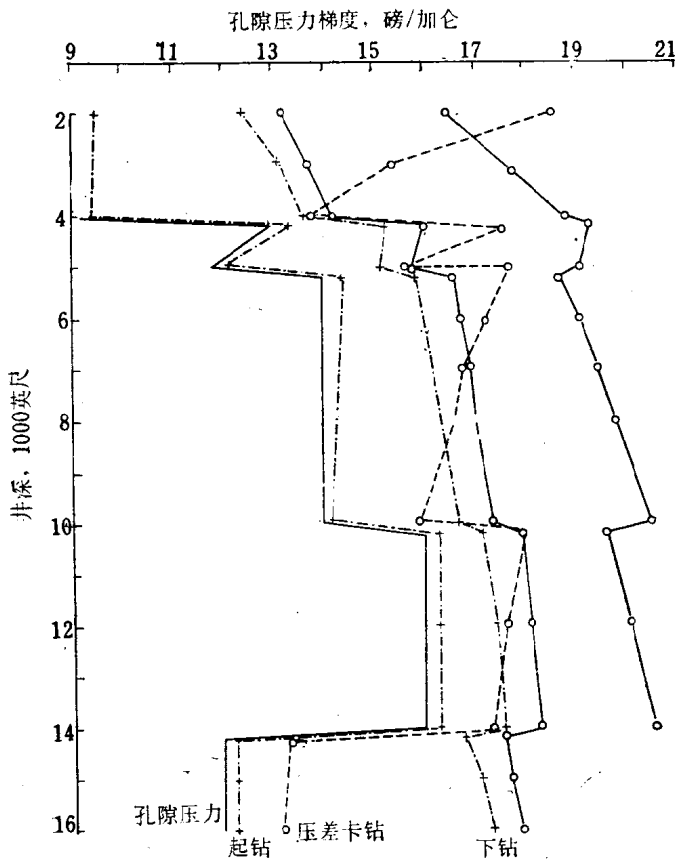


图 1-2 泥浆密度的选择

三、破裂梯度

井下地层裂缝可以有垂直的也可以有水平的，垂直裂缝一般发生在深处，对钻井来说，地层破裂就是井漏的同义

语。

1. 水平裂缝

井内流体的压力必须超过单位面积上覆岩层（包括岩石及其孔隙流体）的重量及岩石的抗拉强度之和方能举升上覆岩层并产生裂缝，即：

$$P_{10r} = S_{0s} + S_t \quad (1-1)$$

式中 P_{10r} ——产生水平裂缝的井内压力，磅/英寸²；

S_{0s} ——上覆岩层压力，磅/英寸²；

S_t ——破裂岩层单位拉应力，磅/英寸²。

2. 垂直裂缝

一般地，井眼内任一部位都有两种垂直破裂梯度，即裂缝延伸压力梯度及初始破裂压力梯度。它们与井眼的尺寸及形状有关。

上覆岩层对其下部岩层产生两种作用力，即垂直应力和水平应力。垂直应力是由上覆岩层重量及其中所含流体的重量（也称为上覆岩层压力）造成的。水平应力是由上覆岩层压力作用而产生的，其原理可用压平橡皮糖筒的现象来说明。

为阻止橡皮糖筒压平，就需要有与垂直应力相垂直的横向应力。由此可知，如果岩石在水平方向不发生变形，则在同一深度处的岩石必须在各水平方向有相同应力且不出现应变。用泊松比和虎克定律可以定量地说明这个问题：

$$e_r' = e_r - \nu(e_x + e_z) \quad \text{及} \quad e = S/E \quad (1-2)$$

式中 S ——应力，磅/英寸²；

ν ——泊松比；

e_r' ——发生应变 e_x 和 e_z 下的水平应变，英寸/英寸；

E ——杨氏模量，磅/英寸²。

由于水平方向不允许出现应变, 即 $\epsilon_r' = 0$, 于是

$$\frac{S_r}{E} = \frac{\nu}{E} (S_x - S_z) = 0 \quad (1-3)$$

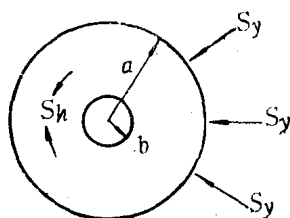
因为 $S_x = S_r$, 于是,

$$S_r = \frac{\nu}{1-\nu} S_z \quad (1-4)$$

泊松比 ν 不能小于零, 也不能大于1/2, 因此横向应力的值可在零及上覆岩层应力之间。这就是旋转钻井需要高密度泥浆的主要原因。

如果在支撑上覆岩层压力的岩层中钻一个孔, 则孔壁上的水平应力就将释放出来, 但在孔壁的岩石中会出现周向压应力。用橡皮糖筒同样能说明这个问题。在橡皮糖筒上钻一个小孔, 然后, 再部分地将其压平。

可以发现, 当压平橡皮糖筒时, 小孔的直径变小, 结果橡皮糖小孔孔壁的周长缩短, 即受到了压缩, 于是该处出现了压应力。



由Lame公式可定量得出周向压应力的值 (图1-3), 即:

图 1-3 推导公式示意图

$$S_h = 2 \frac{a^2}{a^2 - b^2} S_y \quad (1-5)$$

式中 S_h ——周向应力, 磅/英寸²。

如果 a 远大于 b (例如, 在地层中所钻井眼条件下) 时, 可有:

$$S_h = 2S_y \quad (1-6)$$

3. 裂缝延伸

如果支撑上覆岩层压力的岩石中有垂直裂缝，为了防止裂缝闭合，在裂缝表面上必须施加与水平应力相等的应力。

4. 流体影响

如果上述岩石内包含流体且是多孔隙的和渗透的，则在裂缝边壁上的压力就由两部分组成：岩石孔隙内流体的压力及由岩石颗粒所传递的水平应力，即：

$$P_{\text{裂缝}} = P_{\text{流体}} + S_y, \quad (1-7)$$

式中 $P_{\text{流体}}$ ——岩石孔隙内流体的压力，磅/英寸²。

5. 含有流体时的上覆岩层压力

Terzaghi指出，上覆岩层压力是流体压力及由岩石颗粒所传递的压力之和，即：

$$S_{ob} = P_{\text{流体}} + S_z \quad (1-8)$$

$$S_z = S_{ob} - P_{\text{流体}} \quad (1-9)$$

对垂直裂缝来说：

$$S_y = \frac{\nu}{1-\nu} (S_{ob} - P_{\text{流体}}) \quad (1-10)$$

对圆筒(井眼)来说：

$$S_r = \frac{2\nu}{1-\nu} (S_{ob} - P_{\text{流体}}) \quad (1-11)$$

6. 破裂梯度

欲使裂缝延伸，则对裂缝所施加的压力必须克服水平应力和流体压力以及岩石抗拉强度，即：

$$P_{ext} = P_{\text{裂缝}} = \frac{\nu}{1-\nu} (S_{ob} - P_{\text{流体}}) + P_{\text{流体}} + S_t \quad (1-12)$$

式中 P_{ext} ——井眼内使裂缝延伸所需的压力，磅/英寸²。

如欲使井内地层压裂，则上述应力为：

$$P_{\text{压裂}} = P_{\text{井}} = \frac{2\nu}{1-\nu}(S_{\text{压}} - P_{\text{流体}}) + P_{\text{流体}} + S_{\text{压}} \quad (1-13)$$

式中 $P_{\text{压裂}}$ ——使井壁产生垂直裂缝所需的压力，磅/英寸²。

除以井深 D ，则可把上两式的压力值换算成当量泥浆密度 (MWE)。

例1 某6000英尺深处岩层的上覆岩层压力梯度为19磅/加仑，岩石泊松比为0.3，抗拉强度为50磅/英寸²。下述计算可表明流体压力的影响。

低压下，地层流体压力当量密度为4磅/加仑。

$$MWE = \frac{0.3}{1-0.3} (19 - 4) + 4 + \frac{50/6000}{0.052} = 10.4 \text{磅/}$$

加仑 (裂缝延伸)

$$MWE = \frac{0.3}{1-0.3} \times 2 (19 - 4) + 4 + \frac{50/6000}{0.052} = 16.9$$

磅/加仑 (初始压裂)

正常压力下，地层流体压力当量密度为9磅/加仑。

$$MWE = \frac{0.3}{1-0.3} (19 - 9) + 9 + \frac{50/6000}{0.052} = 13.3 \text{磅/加}$$

仑 (裂缝延伸)

$$MWE = \frac{0.3}{1-0.3} \times 2 (19 - 9) + 9 + \frac{50/6000}{0.052} = 17.6$$

加仑 (初始压裂)

磅/高压下，地层流体压力当量密度为17磅/加仑。

$$MWE = \frac{0.3}{1-0.3} (19 - 17) + 17 + \frac{50/6000}{0.052} = 17.9 \text{磅/加仑}$$

(裂缝延伸)

$$MWE = \frac{0.3}{1 - 0.3} \times 2(19 - 17) + 17 + \frac{50/6000}{0.052} = 18.7$$

磅/加仑(初始压裂)

从以上计算可以看出, 地层流体压力梯度对裂缝延伸压力梯度有显著影响, 但对井壁初始破裂压力梯度的影响不大。

例2 计算1491英尺处地层的破裂压力梯度。海平面以上导管内泥浆柱最大长度为70英尺, 海水深度为230英尺, 地层岩石平均密度为1.9克/厘米³, 泊松比为0.2, 抗拉强度为100磅/英寸²。

设地层以前未被压裂过, 则要取水平破裂压力或初始破裂压力中的小者作为破裂压力梯度。

上覆岩层压力: $S_{ob} = 0 \times 70 + 0.052 \times 8.5 \times 230 + 0.052 \times 1.9 \times 8.33 \times (1491 - 300) = 1082$ 磅/英寸²

水平破裂压力: $P_{hor} = 1082 + 100 = 1182$ 磅/英寸²

预计孔隙压力: $P_p = 0.052 \times 8.5 \times (1491 - 70) = 628$ 磅/英寸²。

垂直初始破裂压力: $P_{init} = (1082 - 628) \times 2 \times \frac{0.2}{1 - 0.2} + 628 + 100 = 955$ 磅/英寸²

计算许用最高泥浆密度 (MW):

因为 $0.052 \times MW \times 1491 = 955$

所以 $MW = 12.3$ 磅/加仑

因此, 当泥浆密度或当量泥浆密度为12.3磅/加仑时就会垂直压裂1491英尺处的地层。

四、当量泥浆密度或当量压力梯度

作用在井内深度D处以磅/英寸²表示的压力值可用下式

换算成以磅/加仑表示的当量泥浆密度或当量压力梯度:

$$\text{当量泥浆密度}(MWE) = \frac{P}{0.052 \times D} \quad (1-14)$$

式中 P ——压力, 磅/英寸²;

D ——井深, 英尺。

五、破裂压力梯度曲线

设计中产生的若干争议问题可通过绘制可用的最低和最高密度曲线而得到解决。这种泥浆密度选用曲线表明了压力梯度与深度间的关系。为了说明若干问题, 确定了孔隙压力梯度。用初始破裂压力公式和延伸破裂公式以及Eaton的海湾地区的可变的上覆岩层压力梯度和泊松比曲线, 当裸眼内地层最低抗拉强度取100磅/英寸², 就可以计算出初始破裂压力梯度和延伸破裂压力梯度。与Eaton数据非常接近的公式为:

$$\begin{aligned} \text{可变上覆岩层压力梯度 (磅/英寸}^2 \cdot \text{英尺)} &= 0.0886 \ln \\ & (D + 4000) + 0.1052, D \geq 2000 \text{英尺} \end{aligned} \quad (1-15)$$

$$\begin{aligned} \text{泊松比} \nu \text{ (无量纲)} &= 0.0594 \ln (D - 1000) \\ &- 0.1106, D \geq 2000 \text{英尺} \end{aligned} \quad (1-16)$$

式中 D ——井深, 英尺。

例3 利用Ben Eaton的数据计算图1-2中 井深8000英尺处地层的初始破裂压力梯度和延伸破裂压力梯度。

可变上覆岩层压力梯度

$$= 0.0886 \ln (8000 + 4000) + 0.1052 = 0.937 \text{磅/英寸}^2 \cdot \text{英尺 (亦称为} s_{ob} \text{)}$$

泊松比 ν

$= 0.0594 \ln(0 - 1000) - 0.1106 = 0.415$ (无因次)

从图上查出8000英尺处的当量泥浆密度:

$MWE = 14$ 磅/加仑

初始破裂压力当量泥浆密度 MWE_{init} 为:

$$MWE_{init} = (0.937 - 0.052 \times 14) \frac{2 \times 0.415}{1 - 0.415} + 0.052$$

$$\times 14 + \frac{100}{8000} = 1.037 \text{ 磅/英寸}^2 \cdot \text{英尺或} 19.9$$

磅/加仑

延伸破裂压力当量泥浆密度 MWE_{ex} 为:

$$MWE_{ex} = (0.937 - 0.052 \times 14) \frac{0.415}{1 - 0.415} + 0.052$$

$$\times 14 + \frac{100}{8000} = 0.889 \text{ 磅/英寸}^2 \cdot \text{英尺或} 17.1$$

磅/加仑

图 1-2 表明了这两个点。

六、 压 力 波 动

井内压力波动可由下述原因造成:

- (1) 管柱运动时泥浆与管壁之间产生摩擦;
- (2) 钻柱开始运动及停止运动时或开始及停止泥浆循环时, 使井内泥浆加速或减速的惯性力;
- (3) 当钻柱开始及停止运动或开泵及停泵时破坏触变性泥浆的网架结构;
- (4) 上提泥包的扶正器和钻头。

如果泥浆性能良好且排量足够, 则第 (3) 和第 (4) 两项的影响就很小。当泥浆静液柱压力只稍大于钻头下渗透性

高压层的压力时,则可能因泥包后起钻而产生抽吸作用,如图1-4和图1-5中a和c点所示。对比两图可知,最大抽吸力是当上提钻具取出卡瓦时产生的,这时,泥浆触变静切力和惯性力可能起主要作用。c点是刹住钻柱时产生的压力波动,这时泥浆惯性力产生负波动压力(即抽吸作用)。e, f, g, h, i各点是因不均匀地刹住钻柱时所引起的波动压力。

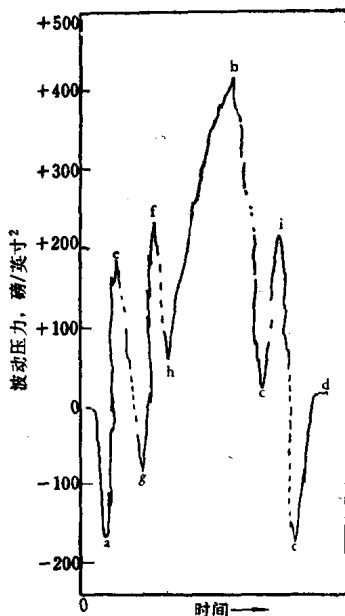


图 1-4 时间与波动压力的关系

要用层流波动压力公式和紊流波动压力公式计算出两种条件下的波动压力,并取其中数值大者作为使用的波动压力。

为便于计算波动压力,要向井队索取每下一单根套管的时间或下一立根钻杆时中间那一单根钻杆所需的时间(以秒表示)。

1. 粘滞牵引波动压力计算公式

波动压力计算公式是由J. Burkhardt给出的。

泥浆环空层流波动压力降 P_L 的计算式为:

$$P_L = G \cdot B \cdot PV \cdot VP + 3.3 \frac{VP}{E} \quad (1-17)$$

泥浆环空紊流波动压力降 P_T 计算式为:

$$A_1 \quad \mu \quad \checkmark \quad \tau \quad D$$

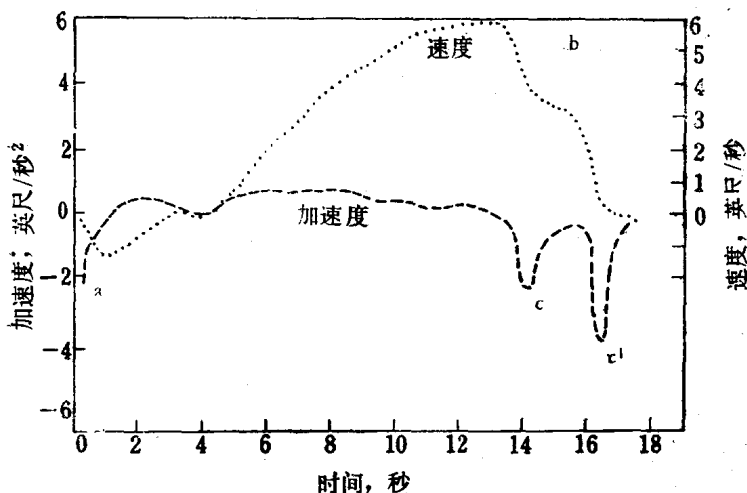


图 1-5 时间与加速度的关系

$$P_T = F \cdot A \cdot PV^{0.21} \cdot MW^{0.81} \cdot VP^{1.8} \quad (1-18)$$

当管柱底端封闭时（堵口管柱）， $G = F = 1.0$ 。对开口管柱， G 或 F 应从有关曲线中查出。

式中 P_L ——每1000英尺管柱层流波动压力，磅/英寸²。
1000英尺；

G, B ——由曲线查出的系数，无量纲；

PV ——泥浆塑性粘度，厘泊；

VP ——提升或下放管柱速度，英尺/分；

YP ——泥浆动切力，磅/100英尺²；

H ——井径（钻头直径），英寸；

E ——从曲线中查出的有效直径，英寸；

D ——钻杆外径，英寸；