

# 小口径深孔钻探冲洗液循环阻力测算

段鸿海<sup>1</sup>, 宋金亭<sup>1</sup>, 赵洪<sup>2</sup>

(1. 河北地质职工大学, 河北 石家庄 050081; 2. 河北省地矿局第三地质大队, 河北 张家口 075000)

**摘要:**小口径深孔钻进是目前地矿勘探主要的钻探方式。但由于其本身具有的特点, 憋泵在工程实际中普遍遇到, 如何科学地计算小口径深孔的循环阻力, 提高循环减阻能力是亟待解决的技术难题。从钻探实际问题出发, 通过建立流体力学模型, 理论推导了钻杆内部和环空间的循环阻力计算公式, 依托具体工程实例分析并提出了提高循环减阻能力的技术措施和对策。

**关键词:**深孔钻探; 小口径; 冲洗液; 循环阻力; 压力损失

中图分类号: P634.6 文献标识码: A 文章编号: 1672-7428(2012)05-0004-04

**Calculation of Circulation Resistance for Drilling Deep Hole of Slim Diameter/DUAN Hong-hai<sup>1</sup>, SONG Jin-ting<sup>1</sup>, ZHAO Hong<sup>2</sup>** (1. Hebei Vocational College of Geology, Shijiazhuang Hebei 050081, China; 2. No. 3 Geological Brigade, Hebei Bureau of Geology and Mineral Exploration, Zhangjiakou Hebei 075000, China)

**Abstract:** Drilling deep hole of slim diameter is the main method in geological and mineral exploration, but pump suffocation is often encountered in engineering practice. It is a technical difficulty to improve the ability of reducing circulation resistance by scientifically calculation. By the establishment of hydrodynamic model, calculation formulas of circulation resistance in annulus and drill strings were theoretically derived. With the engineering practice, the paper analyzed and put forward the technical measures of improving the ability of circulation resistance reduction.

**Key words:** deep hole drilling; slim diameter; washing fluid; circulation resistance; pressure loss

小口径深孔钻进是目前地矿勘探主要采用的钻探方式, 由于小口径深孔钻进具有其独特的特点, 其遇到的问题也比较突出, 其中循环减阻能力差、憋泵情况是经常遇到的技术难题。因此科学地计算小口径深孔钻探冲洗液的循环阻力, 提高循环减阻能力是该类钻探亟待解决的问题, 而合理的选用润滑减阻处理剂将有效地降低小口径的环空阻力, 从而提高小口径的钻进效率及钻进深度。

## 1 冲洗液循环阻力分析

钻孔冲洗液在循环流动过程中, 流经地面管路、钻杆、孔底钻具、钻头和环状间隙时, 形成一定的水力损失或称压力损失, 也可称为压降。正常循环时泵的泵压力用来克服上述压力损失, 迫使循环液流动。泵上的压力表所显示的压力就是上述各部分压力损失的总和。显然, 泵所承受的压力是随循环负载的变化而变化的。而泵铭牌上所标的额定压力是指泵所能承受的最大压力。

钻孔冲洗液循环时的阻力损失主要由以下因素决定:

(1) 循环通道的长度, 主要取决于钻孔的深度, 钻孔越深, 压力损失越大;

(2) 循环液的流变性, 循环液的粘性越大, 压力损失越大;

(3) 泵量或流速的大小, 泵量或流速越大, 压力损失越大;

(4) 过流断面的截面积, 钻孔口径越大(钻杆直径不变), 压力损失越小。

钻孔冲洗液循环阻力损失可由下式表示:

$$P = k \sum P_i = k(P_1 + P_2 + P_3 + P_4) \quad (1)$$

式中:  $P_1$ 、 $P_2$ 、 $P_3$ 、 $P_4$ ——分别为流体流经地面管路、钻杆、孔底钻具和环状间隙时的阻力损失。

## 2 钻杆内流体压力损失( $P_2$ )计算

### 2.1 流体在圆管中的基础方程

为分析方便, 首先要做必要的假设:

(1) 流体的流动是稳定流动, 没有受到外部干扰;

(2) 所研究流体是非变性的不可压缩流体;

(3) 流体只有轴向流动, 没有径向流动;

收稿日期: 2011-12-19; 修回日期: 2012-03-26

**作者简介:**段鸿海(1968-), 男(汉族), 河北石家庄人, 河北地质职工大学副教授, 探矿工程专业, 硕士, 从事钻探技术及岩土工程的教学与科研工作, 河北省石家庄市中山西路901号, dhh1968@163.com; 宋金亭(1956-), 男(汉族), 河北石家庄人, 河北地质职工大学副校长、高级工程师, 从事学校管理及钻探技术研究工作。

(4) 流体在管壁上不存在滑移,即壁面上的流速为零。

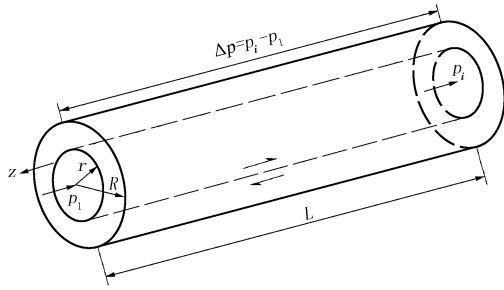


图 1 管内层流流动在平衡时的作用示意图

图 1 是层流流动分析的假设模型示意图,管内的层流流动就是同心流层彼此滑过,每个流层的速度保持不变,这样建立平衡方程,平衡体系的力系为零。即流体产生加速运动的压力与阻止流体产生加速的摩擦力相等。

在流层端部有压力:

$$F_1 = \Delta p \pi r^2 z^2 \quad (2)$$

式中:  $F_1$ ——压力;  $\Delta p$ ——压差;  $r$ ——管内半径;  $z$ ——管内某点半径  $r'$  与管半径  $r$  的比。

摩擦力是由剪切应力作用在管表面所产生的。即:

$$F_2 = 2 \pi r L z \tau \quad (3)$$

式中:  $F_2$ ——摩擦力;  $\tau$ ——剪切应力;  $r$ ——管内半径;  $L$ ——管长;  $z$ ——管内某点半径  $r'$  与管半径  $r$  的比。

$$\Delta p \pi r^2 z^2 = 2 \pi r L z \tau \quad (4)$$

$$\tau = \frac{\Delta p r z}{2L} \quad (5)$$

由式(5)可见,流体中任意点处的剪切应力与其半径成正比。对所有流动模型,满足之前的假设条件,就都适用于以上公式。需要说明的是,在管中心剪切应力为 0,此时  $z=0$ ,而在管壁处剪切应力达到最大值。如果流体具有屈服值时,在管中心会出现半径为  $2L\tau_0/\Delta p$  的等速核,其中  $\tau_0$  为屈服应力。

### 2.2 钻杆内压力损失计算

对每一种流型来说,剪切应力是半径的函数,而剪切速率又是剪切应力的函数,因此剪切速率又可以表示为半径的函数。

以牛顿流体为例,其流变方程为:

$$\tau = \eta \gamma \quad (6)$$

式中:  $\tau$ ——剪切应力;  $\eta$ ——牛顿粘度,又称为动力粘度;  $\gamma$ ——剪切速率。

$$\gamma = \frac{\Delta p r z}{2L\eta} \quad (7)$$

又因为:

$$\gamma = \frac{dv}{dr} = \frac{dv}{r dz} \text{ 或 } dv = r \gamma dz \quad (8)$$

将式(8)代入式(6)得:

$$dv = \frac{\Delta p r^2 z}{2L\eta} dz \quad (9)$$

因此:

$$dv = \int \frac{\Delta p r^2 z}{2L\eta} dz \quad (10)$$

对式(10)  $z$  进行积分,从管内一点  $y$  积分到管壁处  $z=1$ 。

$$v = \frac{\Delta p r^2}{2L\eta} \int_y^1 z dz = \frac{\Delta p r^2 z}{4L\eta} (1 - y^2) \quad (11)$$

根据流量方程得:

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi r^2} \quad (12)$$

式中:  $\bar{v}$ ——钻孔内冲洗液的平均流速。

因此:

$$Q = v \cdot 2 \pi r y \cdot r dy \quad (13)$$

总流量就是总流层的积分。将式(11)从在管壁处半径比  $y=1$  到管中心半径比  $y=0$  进行积分,得到总流量。即:

$$Q = 2 \pi r^2 \int_0^1 v y dy \quad (14)$$

将式(11)代入式(14)得:

$$\begin{aligned} Q &= 2 \pi r^2 \int_0^1 \frac{\Delta p r^2}{4 \eta L} (1 - y^2) y dy \\ &= \frac{\Delta p r^4}{2 L \eta} \left[ \frac{y^2}{2} - \frac{y^4}{4} \right]_0^1 \\ &= \frac{\Delta p r^4}{8 \eta L} \end{aligned} \quad (15)$$

将式(15)的结果代入式(12)得:

$$\bar{v} = \frac{\Delta p r^4}{8 \eta L \cdot \pi r^2} = \frac{\Delta p r^2}{8 \pi \eta L} \quad (16)$$

将式(12)代入式(16)得:

$$\Delta p = \frac{8 \eta Q L}{r^4} \quad (17)$$

同样的利用其他流型的本构方程,得出其他流型的管内压耗结果。

宾汉流体:

$$\left( \frac{2L\tau_0}{\Delta p r} \right)^4 - 4 \times \frac{2L\tau_0}{\Delta p r} \left( 1 + \frac{3\eta_p \bar{v}}{\tau_0 r} \right) + 3 = 0 \quad (18)$$

幂律流体:

$$\Delta p = \frac{2KL}{r} \left[ \frac{\bar{v}(3n+1)}{m} \right]^n \quad (19)$$

与牛顿流型和幂律流型的流体可以直接计算出

结果不同,由于宾汉流体有屈服值,采用另外的方法计算:

$$\beta = 1 + \frac{3\eta_p \bar{v}}{\tau_0 r} \quad (20)$$

$$\alpha = (\beta^2 + \sqrt{\beta^4 - 1})^{1/3} \quad (21)$$

$$y = 2\left(\alpha + \frac{1}{\alpha}\right) \quad (22)$$

$$x = 0.5\left[\sqrt{y} - \sqrt{\frac{8\beta}{y} - y}\right] \quad (23)$$

$$\Delta p = \frac{2L\tau_0}{Rx} \quad (24)$$

式中: $\Delta p$ ——钻杆压力损失, Pa;  $\eta$ ——绝对粘度,  $\eta = \varnothing_{300}$ , mPa·s;  $\eta_p$ ——塑性粘度,  $\eta_p = \varnothing_{600} - \varnothing_{300}$ , mPa·s;  $\tau_0$ ——动切力,  $\tau_0 = 0.511(2\varnothing_{300} - \varnothing_{600})$ , Pa;  $Q$ ——泥浆泵流量,  $m^3/s$ ;  $r$ ——钻杆内半径, m;  $n$ ——流性指数,  $n = 3.3221\lg(\varnothing_{600}/\varnothing_{300})$ ,  $K$ ——稠度指数,  $K = 0.511 \cdot \varnothing_{600}/(511)^n$ , (Pa·s) $^n$ ;  $L$ ——流经距离, m;  $\varnothing_{300}$ 、 $\varnothing_{600}$ ——流体 300 转和 600 转的旋转粘度读数。

### 3 环空压力损失( $P_3$ )计算

假想把图 2(a) 某处拉展开, 形成如图 2(b) 的一个梯形截面, 短边对应为环空内圆, 长边对应为环空外圆。如图 2(b) 所示梯形截面上下边长不等, 必然造成速度剖面不对称, 即最大速度不在上、下两边的中心线上, 偏离了一定的距离, 这就为数学处理带来了一些困难, 基本方程形式也十分复杂。为了计算方便, 工程上采用了一种近似方法, 当环空间隙不大时, 我们假设梯形截面上速度剖面是对称的。即将环空流动视为两平行板之间的流动。采用这种假设带来的误差与环空间隙有关。研究表明, 采用这种计算方法, 当环空内外径之比大于 0.3, 结果的相对误差不会超过 0.5。如图 2 所示, 以环空间隙中线为原点, 沿径向建立  $r$  坐标, 环空内外半径分别为  $R_1$ 、 $R_2$ 。取厚度为  $2r$  ( $r = R_2 - R_1$ ), 长度为  $L$ , 宽度为  $\pi(R_1 + R_2)$  的条形流动微元。

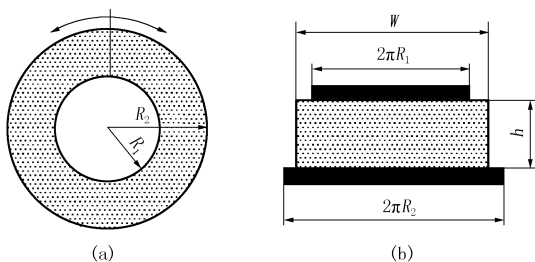


图 2 环空流动截面示意图

根据动量守恒定律, 作用在流动微元上的动量是平衡的。分析作用在流动微元上的力有: 微元两端所受压力的合力为  $\pi(R_1 + R_2)2r\Delta p_1$ , 作为驱动力, 其方向与流动方向相同; 微元上下侧面的剪切应力为  $2L\tau\pi(R_1 + R_2)$ , 由此得到动量守恒方程:

$$\tau = \frac{r\Delta p_1}{L} \quad (25)$$

对式(25)求导, 得:

$$d\tau = \frac{d\Delta p_1}{dL} dr \quad (26)$$

对式(26)两边进行积分:

$$\int_{\tau_0}^{\tau} d\tau = \frac{d\Delta p_1}{dL} \int_0^r dr \quad (27)$$

在管壁处  $r = 0$ , 相对应的剪切应力为  $\tau = 0$ , 则得:

$$\tau = r \frac{d\Delta p_1}{dL} \quad (28)$$

以牛顿流体为例, 计算环空压降, 将式(7)代入式(5)得:

$$\tau = \eta\gamma = \eta \frac{dv}{dr} \quad (29)$$

因式(29)与式(28)是数值相同、方向相反的两式, 将其联立分离变量得:

$$dv = \eta \frac{d\Delta p_1}{dL} r dr \quad (30)$$

在壁面  $r = (R_2 - R_1)/2$  处, 流体速度为  $v = 0$ ; 在环空的任意位置  $r = r$  处, 流速  $v = v$ , 代入式(30), 并积分得:

$$v = \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{d\Delta p_1}{dL} \left[ \left( \frac{R_2 - R_1}{2} \right)^2 - r^2 \right] \quad (31)$$

由图 2 可以看出, 流量总流量就是总流层的积分:

$$\begin{aligned} Q &= \int_0^{\frac{R_2 - R_1}{2}} 2\pi(R_2 + R_1) v dr \\ &= \int_0^{\frac{R_2 - R_1}{2}} 2\pi(R_2 + R_1) \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{d\Delta p_1}{dL} \left[ \left( \frac{R_2 - R_1}{2} \right)^2 - r^2 \right] dr \\ &= \frac{\pi}{12\eta} \cdot \frac{d\Delta p_1}{dL} (R_2^2 - R_1^2) (R_2 - R_1)^2 \end{aligned} \quad (32)$$

钻孔冲洗液在环空的平均流速为:

$$\bar{v} = \frac{Q}{\pi(R_2^2 - R_1^2)} \quad (33)$$

将牛顿流体环空压降用平均速度表示得:

$$\Delta p_1 = \frac{12\eta \bar{v}}{(R_2 - R_1)^2} \cdot L \quad (34)$$

同理, 利用该思路推导出其他流型的环空内泥

浆压力损失理论公式分别为式(35)和式(36)。

宾汉流体:

$$\left[ \frac{L\tau_0}{4\Delta p_1(R_2 - R_1)} \right]^3 - \frac{12\eta_p \bar{v}L}{\Delta p_1(R_2 - R_1)^2} + \frac{3L\tau_0}{\Delta p_1(R_2 - R_1)} + 1 = 0 \quad (35)$$

幂律流体:

$$\Delta p_1 = \frac{4K}{R_2 - R_1} \left( \frac{1 + 2n}{n} \cdot \frac{16\bar{v}}{R_2 - R_1} \right)^n L \quad (36)$$

式中: $\Delta p_1$ ——环空压力损失, Pa;  $R_1$ ——钻杆外半径, m;  $R_2$ ——孔壁半径, m; 其余符号意义同前。

#### 4 实际算例

由于小口径深孔钻进中孔深  $L$ 、孔径  $R$  及钻杆内外径  $R_1$ 、 $R_2$  都是预先设定好的, 在实际钻探工程中只能通过改变剪切应力  $\tau$ 、粘度  $\eta$ 、平均流速  $\bar{v}$ 、稠度系数  $K$  等泥浆性能参数以及泵量、泵压等钻进参数的值来降低钻杆内部和环空的循环阻力。由于剪切应力  $\tau$ 、塑性粘度  $\eta$ 、平均流速  $\bar{v}$ 、稠度系数  $K$  等参数都可用钻井液不同转速粘度指标表示, 这里讨论钻井液粘度、泵量与循环减阻的关系。

以某钻探工程现场实际参数: 终孔孔深  $l = 986$  m, 上部入直径  $r_2 = 89$  mm, 套管深  $l_1 = 452$  m, 使用  $r_2' = 75$  mm 绳索取心钻井, 钻杆外、内径分别为  $r_1 = 71$  mm、 $R = 61$  mm 为例, 考虑泵量影响时取绝对粘度  $= 5$  mPa·s, 考虑粘度影响时取泵量  $Q = 72$  L/min。据此计算出泥浆在钻孔中的循环流动阻力与泵量的关系曲线如图3所示。

由图3可知, 在钻孔深度、直径和钻杆内、外径已知的情况下, 循环阻力是粘度与泵量乘积的正比函数。绝对粘度一定时, 循环阻力与泵量成正比关系; 泵量一定时, 粘度与循环阻力同样成正比关系。现场可采取合理降低泵量与适当降低粘度相结合的办法来降低循环阻力。此外, 不同的冲洗液配方和润滑剂加量对冲洗液润滑性能有较大影响, 多数工

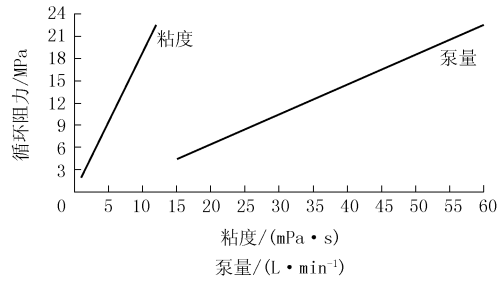


图3 绝对粘度和泵量对循环阻力的影响

程实例证实, 植物胶等高分子聚合物在提高冲洗液粘度的同时减小循环阻力、增加钻具和井壁之间润滑的有效性。但只是从降低冲洗液与钻杆内壁、井壁的摩擦阻力上讲也具有从客观上降低小口径深孔钻进冲洗液循环阻力的实际意义。

#### 5 结语

(1) 通过流体力学建模, 理论推导了小口径深孔冲洗液牛顿流体、宾汉流体和幂率流体的循环阻力计算公式, 为量化循环阻力计算提供依据。

(2) 结合工程实例实际验算了理论推导的可靠性, 测算了粘度和泵量影响循环阻力的程度。

(3) 分析了降低粘度、减小泵量和加入润滑剂3个方面降低循环阻力的可行性, 并具体提出了解决深孔小口径降低循环阻力的解决方法。

#### 参考文献:

- [1] 王达, 孙建华. 我国钻探工程技术标准现状与展望[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(1): 4-9.
- [2] 汪仲英. 科学深钻泥浆问题[A]. 第一次中国大陆科学钻探(CCS-D)研讨会(钻探专业)[C]. 1992.
- [3] 陶士先, 汤松然, 彭步涛. 绳索取心钻杆内壁结垢机理与防治[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2007, 34(S1): 155-159.
- [4] 贾军. 科钻一井主孔取心钻进钻井液技术[J]. 石油钻探技术, 2006, 34(3): 16-18.
- [5] 孙丙伦, 陈师逊, 陶士先. 复杂地层深孔钻探泥浆护壁技术探讨与实践[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(5): 13-15.

### “中国岩金勘查第一深钻”已入地 3000 m

《中国矿业报》消息(2012-05-12) 由山东地质三队在莱州施工的“中国岩金勘查第一深钻”ZK96-5 钻孔日前已钻深 3000.23 m。

据悉, 这次科研钻探共在莱州三山岛西岭矿区布设了3个钻孔, 分别是 ZK96-4、ZK96-5、ZK112-1。其中 ZK96-4、ZK112-1 设计钻孔深度各为 3000 m, ZK96-5 设计钻孔深度为 4000 m。山东地质三队施工其中的 ZK112-1、ZK96-5 两个钻孔, 设计孔深分别为 3000、4000 m。

ZK112-1 钻孔已于 2011 年 12 月 26 日顺利完工, 终孔孔深为 2738.82 m, 终孔口径 75 mm。

ZK96-5 钻孔自 2010 年 11 月 9 日开工, 山东地质三队的小口径钻探施工队伍, 发挥优势, 创新施工, 克服地层及施工中的各种困难, 利用一年多的时间成功钻进突破 3000 m。

据悉, 世界上最深的金矿钻孔是加拿大一公司在南非创造的, 深度达 5424 m, 美国公司保持的纪录是 5071 m。