

节水钻探系统井下工况判断水力模型

宋继伟¹, 徐伟²

(1. 贵州省地矿局 115 地质大队, 贵州 清镇 551400; 2. 河南省地质测绘总院, 河南 郑州 450006)

摘要:节水钻探是基于解决干旱地区和漏失地层钻探严重缺水问题而发展起来的一项最新技术,其通过实现钻井液的孔底局部循环,使钻进过程中的用水量降为原来的 5%~20%。节水钻探系统在使用过程中,由于孔内不返水,在地表只能通过观察压力表的变化量来判断孔内工况,精度不高。通过研究,最终解决通过地表压力变化值来判断孔内工作情况的量化问题,建立初步理论模型,从而更加准确地判断孔内的工况,使这套钻具更快地应用到实际工程中。

关键词:节水钻探;孔底局部循环;用水量;井下工况;水力模型;压力计算

中图分类号:P634 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2009)11-0021-03

Hydraulic Model for Downhole Drilling Condition Judgment with Water-saving Drilling System/SONG Ji-wei¹, XU Wei² (1. No. 115 Geological Team, Bureau of Geology and Mineral Exploration and Development of Guizhou Province, Qingzhen Guizhou 551400, China; 2. Henan General Institute of Surveying and Mapping of Geology, Zhengzhou Henan 450006, China)

Abstract: Water-saving drilling system is a newest technique, which was developed to deal with the serious water scarcity for drilling in arid area and leaking formation. The water consumption in the drilling process was only 5%~20% of the original amount by drilling fluid local circulation at downhole. In the application of water-saving drilling system, in-hole drilling condition can only be judged by observing pressure change in pressure gauge on the surface with low precision. By study, the quantization of working condition in the hole could be observed through the surface pressure variation value and the preliminary theoretical mode was established to have more accurate judgment on in-hole drilling condition.

Key words: water-saving drilling; local circulation at downhole; water consumption; downhole drilling condition; hydraulic model; pressure calculation

1 新型节水钻探技术概述

我国西部多半是地表干旱无水、地下浅部漏水、深部有水的地区,这种条件下,虽然空气钻进、泡沫钻进等技术有许多优越性,但需要配备大型空压机、泡沫泵、地表采样分离系统等设备,资金投入大,对操作人员素质的要求也较高,所以,目前上述方法在西部仍未大量推广。在西部经常出现一台钻机配两辆水罐车还要停工待水的现象。在这种情况下,如果进行堵漏,不仅耗费资金,而且大多数堵漏材料都会造成环境污染,对今后的注浆效果也不利。如果顶漏钻进,则不仅浪费大量的水,增加钻孔成本,而且可能冲垮地层诱发滑坡等地质灾害。

节水钻探技术是以地表水作为动力的媒介,利用地层水作为冲洗液形成孔底局部循环进行钻进,地表水和地下水相互隔开,钻进过程中基本不消耗地表水或消耗很少量的地表水,从而达到节水钻进的目的。节水钻探系统是通过地表脉动器+孔内潜

水泵来实现的,其原理是通过水力脉冲驱动潜水泵的活塞,形成孔底局部循环,达到冷却钻头、排除岩粉,实现正常钻进。节水钻探系统的工作原理如图 1。

目前,节水钻探技术已经在野外和室内分别进行了实验,实验过程中存在的主要问题是:潜水泵出水流量的大小是决定孔底局部循环成败的关键,若潜水泵不能正常工作或出水流量太小就不能很好的实现冷却钻头和携带岩粉的功能,容易造成卡钻、埋钻事故,使钻进无法进行。实验中主要依靠观察地表压力变化量了解孔内潜水泵的工作情况,没有量化的理论计算方法作为指导,精度非常低,这个问题如不能解决,将极大的限制节水钻探系统的推广使用。

实验后,我们通过对节水钻探机械水力特性进行分析计算,推导出一套系统钻进过程中地表压力极值的理论计算公式,使节水钻探理论真正科学化,

收稿日期:2009-05-14; 改回日期:2009-09-17

基金项目:中国地质调查局地质调查项目(编号:1212010561304)

作者简介:宋继伟(1982-),男(汉族),河北沧州人,贵州省地矿局 115 地质大队助理工程师,钻井与钻探工程专业,硕士,从事钻探机具、钻探工艺学研究工作,贵州省清镇市贵州地矿局 115 地质大队人事科, songjiwei8759@163.com。

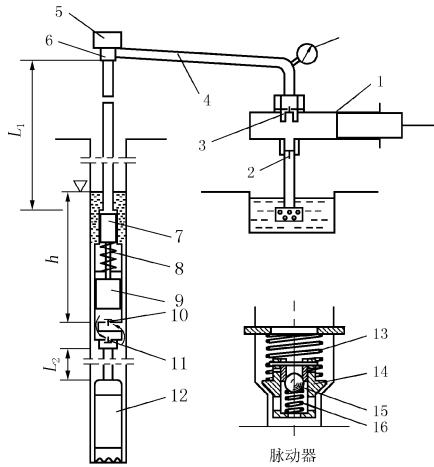


图1 节水钻探系统的工作原理图

1—水泵;2—吸水阀;3—脉动器;4—高压胶管;5—水龙头;
6—钻杆;7—传动柱塞;8—复位弹簧;9—工作柱塞;10—潜
水泵吸水阀;11—潜水泵排水阀;12—岩心管;13—弹簧;
14—阀体;15—反向阀;16—弹簧。

使得现场通过压力表读数变化预测钻进事故变得有理可依。实践证明,这套理论能够较准确地判断潜水泵的工作情况,本文就对该内容进行简要介绍。

2 节水钻探系统中的压力损失计算

节水钻探系统的压力损失计算中,需要计算压力损失的部位很多,具体计算的部位如下:

p_1 ——动力传送系统中发生在钻杆中的压力损失;

p_2 ——动力传送系统中发生在钻杆接头处的压力损失;

p_3 ——潜水泵中的压力损失;

p_4 ——孔底局部循环系统发生在钻杆中的压力损失;

p_5 ——孔底局部循环系统中发生在钻杆接头处的压力损失;

p_6 ——孔底局部循环系统中发生在岩心管和钻头中的压力损失;

p_7 ——孔底局部循环系统中发生在环状空间中的压力损失;

p_F ——孔底局部循环系统的总压力的损失。

在对各处压力损失计算前,根据流体力学理论,把钻进过程中要计算的液体(水)做如下定义:

(1) 视为不可压缩流体,即不考虑压缩性对液体流动的影响;

(2) 视为理想流体,不考虑流动过程中粘性的影响;

(3) 视为牛顿流体,不考虑孔底局部循环系统

中,岩粉含量的问题;

(4) 紊流状态,计算沿程损失和局部损失按紊流形态计算。

计算出上面的各处损失的压力瞬时值后,然后对整个系统的压力变化进行计算。在计算过程中,以潜水泵中的传动柱塞和工作柱塞为研究对象,对其进行受力分析,如果取传动柱塞和工作柱塞重力方向为正,则工作柱塞和传动柱塞正向行程阶段所受的合力为 F :

$$F = \rho g L_1 A_1 + (P - p_1 - p_2) A_1 - [R + p_m + (p_3 + p_F + \rho g h) A_2] \quad (1)$$

$$p_F = k(p_4 + p_5 + p_6 + p_7) \quad (2)$$

$$F = ma \quad (3)$$

式中: $p_m = (P - p_1 - p_2 + \rho g L_1 - p_F - p_3 - \rho g h) A$; L_1 ——潜水泵上部钻杆总长度, m; ρ ——冲洗液的密度, kg/m^3 ; g ——重力加速度, $9.81 \text{ m}/\text{s}^2$; P ——地表压力表的瞬时读数, Pa; A_1 ——工作柱塞截面积, m^2 ; A_2 ——传动柱塞截面积, m^2 ; k ——附加阻力系数,由于岩粉颗粒使冲洗液重度提高而增加的压力损失, $k = 1.1$; m ——传动柱塞和工作柱塞的质量, kg; A —— 0.0000969 m^2 。

根据上述公式,地表压力极值的推导过程如下:

(1) 地表压力最大值的推导过程

对不同的钻进条件下,首先分别计算出 $p_1 \sim p_7$, 然后代入到公式(1)中,经过化简整理会得到一个关于 $(\cos \varphi, P)$ 二元二次函数,如下:

$$P = -a \cos^2 \varphi - b \cos \varphi + c$$

式中:

$$a = \frac{(p_1 + p_2)(A_1 - A) + (p_3 + p_F)(A_2 - A)}{A_1 - A}$$

$$b = 1003.21 / (A_1 - A)$$

$$c = a + b = \rho g L_1 + \rho g h (A_2 - A) / (A_1 - A)$$

根据二元二次函数曲线的特点,可以判断这个函数的顶点的值为最大值,根据顶点坐标公式 $(-\frac{b}{2a}, \frac{4ac - b^2}{4a})$ 计算得出地表压力的最大值。

(2) 地表压力表的最小值的推导过程

压力表最小值的计算要简单得多,只考虑专用单缸柱塞泵中的脉动器就可以了。当专用单缸柱塞泵的活塞回程运动时,潜水泵中的柱塞在工作弹簧的作用下也做回程运动,这时潜水泵上部钻杆中的水把脉动器中的反向球阀压开,水回流到专用单缸柱塞泵的泵腔中,当钻杆中的水的压力小于反向球阀下弹簧的预压应力时,反向球阀关闭。这时地表

压力表显示的数值为最小数值。具体计算如下:

$$P = 4kx / (\pi r^2)$$

式中: P ——压力表的数值, Pa; k ——脉动器反向球阀处的弹簧的刚度系数, 53000 N/m; x ——脉动器反向球阀处的弹簧的预压变形量, 0.0026 m; r ——反向球阀的直径, 0.016 m。

最小值的计算主要与脉动器中的反向球阀有关, 与孔内情况无关, 所以各种钻进情况下, 地表压力表的最小值都相等, 即为 $P_{\min} \approx 0.7 \text{ MPa}$ 。

3 室内实验数据与理论计算数据的比较

通过室内实验对该套理论公式进行了对比验证, 过程如下。

采用 $\varnothing 146 \text{ mm}$ 开孔, 孔深达到 35 m 时, 使用节水钻具进行钻进, 在节水钻进过程中记录潜水泵在孔内的不同深度时的压力表数据; 使用推导出的公式, 对节水钻进过程中上述各深度地表压力变化进行计算, 得出相应数据。各个深度钻进压力的计算最大值与实验数据对比如表 1。

表 1 地表压力理论计算值与实际测量值的对比表

孔深/m	钻头类型	地表压力表理论压力范围/MPa	地表压力表实际压力范围/MPa
32.46	普通金刚石钻头	0.7~3.4	0.5~3.7
52.06	阶梯式金刚石钻头	0.7~4.4	0.6~3.9
66.4	普通金刚石钻头	0.7~5.5	0.6~4.4
67.89	阶梯式金刚石钻头	0.7~5.0	0.4~4.2
潜水泵	单独放在地表	0.7~1.7	0.4~1.8

通过对比, 可以看出理论计算出来的地表压力的理论变化值比实际的偏大, 经过分析研究, 主要由以下原因所引起的。

地表专用单缸柱塞泵和潜水泵的实际平均流量和实际瞬时流量比理论值要小。对于地表专用单缸柱塞泵, 其实际平均流量和实际瞬时流量为:

$$Q = \alpha Q_{th}$$

$$Q_{th} = \alpha Q'_{th}$$

式中: α ——流量系数, $\alpha < 1$ 。

对 α 取值进行讨论:

对于单缸柱塞泵, 吸入过程, 当吸入管路中的压力较低时, 将会从吸入液体中分离出溶解在液体中的气体; 当吸入管路密封不严时, 外界空气也会渗入液缸内, 使得吸入液缸内的液体量减少。

排出过程开始时, 由于泵阀滞后于活塞的运动, 这时吸入阀滞后关闭, 使吸入到液缸的液体倒流, 倒流的液体是尚未接受活塞能量的液体。

排出过程, 随着液缸压力升高, 接受活塞能量的

液体会经液力端各密封处泄露, 减少液体排出量。

吸入过程开始时, 排出阀也因滞后于活塞的运动而滞后关闭, 使排出的液体倒流。倒流的液体是具有能量的液体。

根据上述, 流量系数 α 分为 2 个部分: 容积效率 η_v 和充满系数 β 。

$$\alpha = \eta_v \beta$$

容积效率 η_v 表示地表专用单缸柱塞泵的实际流量和液缸内已接受能量的液体流量之比; 充满系数 β 表示吸入流量和理论平均流量 Q_{th} 之比。

对一台泵来说, 流量系数不是一个固定值, 随着泵排出压力的大小和各密封处的密封性能、失效程度、吸入性能、泵阀滞后关闭时间的长短等因素的变化, 流量系数也将随之改变。由于影响因数很多, 又不断在变化, 难于预测流量系数值。根据经验, 一般新泵的流量系数 $\alpha = 0.85 \sim 0.95$ 。

在节水钻探中对地表专用单缸柱塞泵的流量系数 α 取 0.95。

而对潜水泵而言, 不但存在上述的对于地表专用单缸柱塞泵的问题, 对于它的特殊工作环境和位置又存在上部钻杆接头的漏水问题。

在工作过程中, 由于钻杆接头处的密封条件不好, 钻杆内的水的压力又很大, 所以漏水问题很严重, 这就使潜水泵的输入动力减少。上部钻杆中有空气的存在, 也在吸收能量, 减少潜水泵的输入动力。

孔内潜水泵吸水口处的环隙空间比较小, 吸入水量不能达到泵腔的要求, 充满系数 β 很低。

综合上述的原因, 所以对潜水泵的流量系数 α 取 0.8。

使用该值对实际瞬时流量进行修正, 再计算压力值, 结果见表 2。

表 2 修正后的地表压力理论计算值与实际测量值的对比表

孔深/m	钻头类型	地表压力表理论压力范围/MPa	地表压力表实际压力范围/MPa
32.46	普通金刚石钻头	0.7~3.1	0.5~3.0
52.06	阶梯式金刚石钻头	0.7~3.8	0.6~3.9
66.4	普通金刚石钻头	0.7~4.4	0.6~4.4
67.89	阶梯式金刚石钻头	0.7~4.2	0.4~4.2
潜水泵	单独放在地表	0.7~1.7	0.4~1.8

从表中可以看出, 经过改进后的计算模型计算的理论压力值与实际的测量值基本一致了, 可以说这套计算模型具有对潜水泵在深孔中的工作情况进行预测的能力。

滑介质的磨损情况下,复合处理层虽然可以提供一定的润滑,但是由于这种润滑作用不能长时间有效,在硫化层破坏以后,磨损程度也随之上升。

由Fe-S二元相图可知,硫在铁中的溶解度极微,700℃时几乎为零,930℃时只有0.02%^[6]。因此低温离子渗硫(190℃)初期只能形成FeS。FeS具有密排六方结构,变形抗力小,易沿密排面滑移,塑性流变能力强,熔点高达1100℃,因而润滑减摩耐磨作用明显,尤其在工况恶劣、缺少油润滑的干摩擦条件下更能发挥出难得的减摩耐磨作用^[7-10]。摩擦副相对运动时,渗硫层被碾压并粘附于对磨件表面,或填充于凹陷处,可有效阻碍金属间的直接接触,避免粘着的发生。但渗硫层厚度有限,随着磨损的进行,在强烈摩擦热作用下,渗硫层会被分解破坏,固体润滑作用降低,金属间局部直接接触,磨损加剧。另一方面,虽然摩擦副正面接触部位的渗硫层被破坏,边缘处的渗硫层依然存在,经热分解形成的硫原子在摩擦热作用下又会与铁重新生成FeS,因而始终有一定的硫化物发挥作用。

在干摩擦的条件下,由于摩擦副的接触表面缺乏润滑,硬度较高的渗氮层反而会加剧接触表面的磨损,因此造成磨损表面较大的破坏和较高的粗糙程度。而硫氮复合处理层由于在表面存在一层硫化亚铁固体润滑层,在磨损过程中可以起到一定的润滑作用,FeS可以随着摩擦过程的进行涂抹在摩擦接触表面上,减少了较高硬度的渗氮层对于对磨副的过度破坏,并且在较软的渗硫层下还存在硬度很高的渗氮层,给表面润滑层以有效的支撑延长其固体润滑的作用^[11]。因此硫氮共渗表面在干摩擦条件下抗磨损性能较渗氮层更好。

3 结论

(1) 利用渗氮+渗硫技术可在35CrMo钢表面

制备硫氮复合处理层。

(2) 表面氮化层的存在,在离子渗硫处理过程中影响了活性S元素与基体Fe元素之间的化学热交换,抑制了硫化物的生成,硫化物只在表面存在较薄的一层。

(3) 在无润滑的干摩擦条件下,硫氮共渗层相对于渗氮层可有效提高表面抵抗磨损的能力。

参考文献:

- [1] 姜彬霖. 渗硼技术用于钻杆接头表面硬化的试验研究[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, (3): 28-29.
- [2] 刘家浚. 材料磨损原理及其耐磨性[M]. 北京: 清华大学出版社, 1993.
- [3] 张宁, 庄大明, 王燕华, 等. 低温离子渗硫层的结构和减摩性能[J]. 材料研究学报, 2000, 14(1): 61-65.
- [4] 张宁, 庄大明, 刘家浚. 离子渗硫层的抗擦伤性能及耐磨性研究[J]. 金属热处理学报, 2000, 21(4): 41-45.
- [5] Insup Lee, Ikmin Park. Solid lubrication coating of FeS layer on the surface of SKD 61 steel produced by plasma sulfidation. Surface & Coatings Technology, 2006, 200: 3540-3543.
- [6] 洪班德, 姚忠凯. 化学热处理[M]. 哈尔滨: 黑龙江人民出版社, 1981: 125-129.
- [7] Fang Xiao Dong, Zhuang Da Ming, Zhang Ning, et al. A technique of surface solid lubricants—The process of surface ion sulphuration for steel parts and its industrial applications[A]. Proceedings of the second APEC SME technology conference [C]. China, Yantai, 1998, 10.
- [8] Fang Xiao Dong, Zhuang Da Ming, Liu You Rong, et al. Tribological behavior of ion sulphuration coating on iron and steel surface and its application[A]. Proceedings of the first Asian International Conference on tribology [C]. China, Beijing, 1998, 10.
- [9] Zhong Da Ming, Liu You Rong, Liu Jia Jun, et al. Microstructure and tribological properties of sulphide coating produced by ion sulphuration[J]. Wear, 1999, 225(3): 799-805.
- [10] Zhang Ning, Zhuang Da Ming, Liu Jia Jun, et al. Microstructure of iron sulfide layer as solid lubrication coating produced by low temperature ion sulfidation [J]. Surface and Coatings Technology, 2000, 132(10): 1-5.
- [11] 高彩桥. 摩擦金属学[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1988.

(上接第23页)

4 结论

(1) 通过理论上的分析和计算得出了地表压力极值的理论计算公式。

(2) 对地表专用单缸柱塞泵的流量和潜水泵的流量进行了修正,使理论计算的数值更接近实际值。地表专用单缸柱塞泵的流量修正系数取0.95,潜水泵流量的修正系数取0.8。

实验验证表明,这套公式可以用来预测在不同工作条件下地面压力的变化范围,也可以通过地表

压力的变化来判断孔内的工作情况,但是仍存在灵敏度不高,不能及时准确的预报信息问题,需要在后期的工作中进一步完善。

参考文献:

- [1] 宋进喜, 王伯铎, 李怀恩. 西北开发中的水资源问题及对策[J]. 长安大学学报, 2002, 22(6): 108-112.
- [2] 卢春华, 鄯泰宁, 叶戈罗夫, 等. 节水钻探新技术及其改型应用[J]. 煤田地质与勘探, 2006, (4): 78-80.
- [3] 赵强, 郭孟起. 节水钻探机具及在水利工程地质勘察中的应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程), 2008, 35(3): 24-27.