

# 旋挖钻机提钻速度对井壁稳定的影响分析

孔 伟<sup>1</sup>, 段新胜<sup>1</sup>, 刘朝阳<sup>2</sup>, 胡汉军<sup>3</sup>

(1. 中国地质大学(武汉)工程学院, 湖北 武汉 430074; 2. 武汉地质工程勘察院, 湖北 武汉 430051; 3. 湖北省地质环境总站, 湖北 武汉 430051)

**摘 要:**介绍了用旋挖钻机施工桩孔提钻时孔内波动压力的产生和井壁稳定原理,建立了井内波动压力的计算模型,分别分析和计算了各施工工艺参数产生的波动压力值,给出了许用提钻速度的计算方法。

**关键词:**旋挖钻机;提钻速度;波动压力;井壁稳定;许用起钻速度

**中图分类号:**P634 **文献标识码:**B **文章编号:**1672-7428(2008)01-0055-03

**Analysis on Influence of Withdraw Speed of Rotary Drilling Rig to Borehole Stability/KONG Wei<sup>1</sup>, DUAN Xin-sheng<sup>1</sup>, LIU Zhao-yang<sup>2</sup>, HU Han-jun<sup>3</sup>** (1. China University of Geosciences, Wuhan Hubei 430074, China; 2. Wuhan Geological Engineering Investigation Insitute, Wuhan Hubei 430051, China; 3. Wuhan Geological Environment Terminal, Wuhan Hubei 430051, China)

**Abstract:** The occurrence of slurry surge pressure and stability principle of borehole during bit-raising of the rotary drilling rig were introduced here. Computation model of surge pressure was also established in this paper. Surge pressure produced with each construction technological parameter was separately analyzed and calculated, and the calculating method of allowable withdraw speed was presented.

**Key words:** rotary drilling rig; withdraw speed of drill rod; slurry surge pressure; borehole stability; allowable withdraw speed

## 1 问题的提出

保持井壁稳定一直是钻孔中的主要问题之一。据统计,世界每年消耗在处理这类问题上的费用高达数亿美元,因此人们很早就开始了这一问题的研究工作,但一直没有彻底解决。在旋挖钻机施工桩孔时,当地层条件一定时,钻机的提钻速度是影响井壁稳定的最重要因素。旋挖钻具在充满泥浆的钻孔中提升时会产生一个方向向上的波动压力,这对井壁的稳定是有危害的,因此我们必须深入研究提钻速度对井壁稳定的影响,以指导工程施工。

## 2 井壁稳定的原理分析

在起钻过程中保持井壁稳定的基本原则为:起钻时,钻具底面下钻孔中任一点的泥浆压力大于或等于相应点的孔隙水压力,即:

$$P_m - P_n \geq P_p \quad (1)$$

式中: $P_m$ ——钻具静止时孔底泥浆液柱压力, kPa;  $P_n$ ——提钻时的抽吸压力或泥浆流经钻具的压力损失, kPa;  $P_p$ ——孔底孔隙水压力, kPa。

孔内提钻情况如图 1(a) 所示。在旋挖钻施工

中,必须保持孔内泥浆液柱高度高于地下水位,以保持孔壁稳定。以孔壁上任一点  $A$  为原点建立坐标系,横坐标表示地层内离孔壁的距离,纵坐标表示地层中孔隙水压力大小。在钻柱没有向上运动时,  $A$  点的压力为孔内泥浆液柱压力  $P_{mA}$ ,随着距离的增加,压力不断减小,当到达一定距离之后,压力值降到地层相应点原始孔隙水压力  $P_p$ ,并趋于稳定。由于  $P_{mA} > P_p$ ,保证了泥浆向地层中的渗透扩散和孔壁的稳定。当提钻钻杆向上运动时,随着钻头下面钻孔体积的增大,泥浆不断向下流动,以填补钻柱移出后而在井内余出的空间。钻头处形成类似于活塞的抽吸作用,产生了一个向上的抽吸压力  $P_n$ 。提钻时,当钻头刚过  $A$  点时,孔隙水压力的峰值位于孔壁土内某一点,孔隙水既向远离孔壁的地层中渗透也向孔内渗透。因此若  $P_n$  过大,则有可能造成孔壁坍塌。若泥浆柱压力  $P_{mA}$  减去抽吸压力  $P_n$  小于相应点的原始孔隙水压力  $P_p$ ,则在整个提钻过程中,地层内的流体就会向孔内流动,造成孔壁失稳坍塌的可能性就会大大增加。所以必须保证泥浆柱压力  $P_{mA}$  减去抽吸压力  $P_n$  的值大于等于相应点地层原始

收稿日期:2007-07-21

作者简介:孔伟(1983-),男(汉族),湖北荆门人,中国地质大学(武汉)在读硕士,地质工程专业,研究方向为基础工程,湖北省武汉市鲁磨路中国地质大学硕 1200630 班, kongwei198376@163.com。

孔隙水压力  $P_p$ , 此时孔壁才有可能保持稳定不发生事故。提钻过程中的压力分布情况参见图 1(b)。

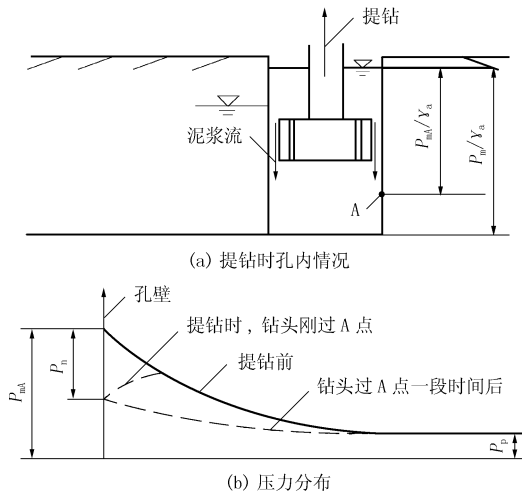


图 1 提钻时孔内的情况及压力示意图

### 3 泥浆的环空流速

提钻时, 泥浆的粘滞性使泥浆随钻柱向上运动。同时, 随着钻头体以下钻孔体积的增大, 泥浆不断向下流动, 以填补钻具移出后孔内余出的空间。泥浆在流动过程中由于克服了流动阻力而使压力降低。压力降低值的大小随钻具提升的速度而变化, 提升速度越大, 压力降低值越大。

抽吸压力与泥浆的环空流速有关, 因此要计算抽吸压力就必须求出泥浆在环空中的流速。泥浆的环空流速由两部分组成, 即泥浆粘附力引起的环空速度和泥浆填补钻具提升在钻具底部增大的空间的速度。如图 2 所示。

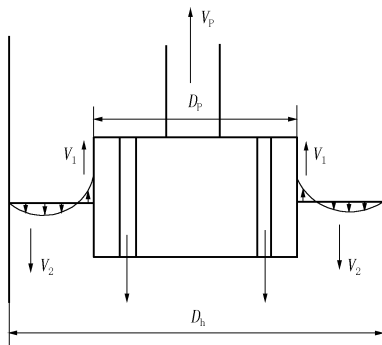


图 2 提钻时环空速度示意图

$V_1$  表示由泥浆粘稠力引起的平均流速, 其大小与环空间隙、流动状态有关。伯克哈特 (Burkhardt) 通过研究提出了  $V_1$  与钻柱的平均提升速度  $V_p$  的关系:

$$V_1 = K_c V_p \quad (2)$$

式中:  $K_c$ ——粘附系数, 一般取 0.5。

泥浆填补起出钻柱所占空间引起的环空速度  $V_2$  由下式确定:

$$V_2 = V_p D_p^2 / (D_h^2 - D_p^2) \quad (3)$$

泥浆在环空中的速度为:

$$V = V_1 + V_2 \quad (4)$$

$$V = V_p \{ [D_p^2 / (D_h^2 - D_p^2)] + K_c \} \quad (5)$$

根据经验, 钻柱的最快提升速度相当于平均提升速度的 1.5 倍, 将钻具最快提升速度代入 (5) 式,  $V$  的方向向下, 取“-”号, 则

$$V = -1.5 V_p \{ [D_p^2 / (D_h^2 - D_p^2)] + K_c \} \quad (6)$$

式中:  $V$ ——泥浆在环空中的速度, m/s;  $V_p$ ——钻柱的平均提升速度, m/s;  $D_h$ ——钻孔直径, m;  $D_p$ ——钻柱外径, m。

### 4 孔内波动压力的计算

波动压力的研究方法可分为 2 种, 即稳态法和动态法。稳态法基于流体不可压缩, 忽略管柱及井眼的收缩与膨胀, 也不考虑运动的惯性, 这样使得下钻顶替的钻井液能全部上返。传统稳态计算方法是假定波动压力的产生是由环空内钻井液稳定流动摩擦的压力损失引起的。

本文建立了在刚性管-不可压缩流体理论基础上的稳态分析模型。它适用于外力作用时间比压力波动通过液柱所需时间长得多的流道, 实验表明, 对于浅井, 稳态分析理论值与实测值较吻合。在石油钻井中, 波动压力由泥浆的静切力、泥浆的粘滞力、管柱惯性力和钻头等因素组成。但是由于旋挖钻机钻杆直径与孔径相比很小, 所以管柱的惯性力可以忽略不计。

#### 4.1 泥浆静切力引起的波动压力

由于泥浆具有一定的静切力, 在管柱的运动过程中, 管柱的运动摩擦携带管柱周围的泥浆一同运动。这样由于管柱的运动便会造成井眼内的压力波动。由泥浆的静切力引起的波动压力的大小与运动管柱的长度、井眼的直径、管柱的外径和静切力的大小有关。波动压力的大小为:

$$P_r = 4 \times 10^{-4} L \tau_s / (D_h - d_0) \quad (7)$$

式中:  $P_r$ ——波动压力, MPa;  $L$ ——运行管柱的长度, m;  $D_h$ 、 $d_0$ ——井眼直径、管柱直径, cm;  $\tau_s$ ——井内流体静切力, Pa。

#### 4.2 泥浆粘滞力引起的波动压力

管柱在井眼内运动过程中, 粘附于管柱周围的流体也会随之以一定的速度梯度随管柱运动。管柱

在运动过程中排开钻井液并克服钻井液的粘滞力而引起井眼内的压力波动。该波动压力的大小与钻井液的密度、管柱长度、管柱运行速度、井眼的直径、管柱的外径以及摩阻系数有关。

$$P_{bt} = 2fL\rho V^2 / (D_h - d_0) \quad (8)$$

式中:  $V$ ——泥浆在环空中的流速,  $m/s$ ;  $f$ ——摩阻系数;  $\rho$ ——泥浆的密度,  $g/cm^3$ 。

#### 4.3 钻头引起的波动压力

堵口钻头引起的波动压力为:

$$P_{bo} = 5.31529 \times 10^{-4} \rho D_h^{-4} V^2 / (D_h^2 - d_0^2)^2 \quad (9)$$

#### 4.4 总波动压力

旋挖钻施工起钻时,井内某一点处的实际波动压力值为:

$$P_n = -P_\tau - P_{bt} - P_{bo} \quad (10)$$

### 5 许用起钻速度

当施工中的各设计参数确定后,控制波动压力保持井壁稳定的可行措施之一就是控制钻柱的起下钻速度。许用起钻速度的确定主要是要考虑到起钻

$$V_p \leq \sqrt{\frac{(D_h^2 - d_0^2) [9.81(\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2)(D_h^2 - d_0^2) - 4 \times 10^{-4} (D_h + d_0) L \tau_s]}{2fL\rho_1 (D_h - d_0) (D_h + d_0)^2 + 5.31529 \times 10^{-4} \rho_1 D^4}} \quad (12)$$

### 6 算例

湖北地矿局施工的店埠桥大桥钻孔灌注桩工程,在一些桩孔的施工中,特别是 32 和 35 号墩的施工中,由于提钻速度过快,发生了部分地层垮孔的现象,造成了一定的经济损失。因此必须严格遵守规程,防止提钻速度过快。

该工程 61 号墩的部分桩基础工艺参数数据如下:

$$D_h = 110 \text{ cm}, d_0 = 100 \text{ cm}, \rho_1 = 1.15 \text{ g/cm}^3, \rho_2 = 1 \text{ g/cm}^3, \tau_s = 12.3 \text{ Pa}, f = 0.05$$

将桩孔中不同深度的点代入(12)式中进行计算,可以得到许用提钻速度:

$$V = 0.43 \sim 0.65 \text{ m/s}$$

因此,施工中对提钻速度进行了规定,要求提钻速度小于  $0.55 \text{ m/s}$ 。

### 7 结论

(1)通过对粘滞力、惯性力等因素产生的波动压力的分析计算,在满足井壁稳定的原则下,求得了旋挖钻机许用提钻速度的计算方法,通过工程实例验证了该计算方法对其它工程的施工具有参考价

时不至于引起井漏、井塌。在长井眼段内可能存在不只一个薄弱的层位,起下钻时应保证这些层位上所受的应力不能低于该处的地层孔隙压力,同时不能大于该处的地层破裂压力。根据以上分析的约束条件,就可以合理的确定许用起钻速度了。

根据公式(1):

$$P_m - P_n \geq P_p$$

$$P_m = 9.81\rho_1 h_1$$

$$P_p = 9.81\rho_2 h_2$$

式中:  $\rho_1$ ——泥浆的密度,  $g/cm^3$ ;  $\rho_2$ ——地下水的密度,  $g/cm^3$ ;  $h_1$ ——孔内任意一点 A 到泥浆顶面的垂直距离,  $cm$ ;  $h_2$ ——孔内任意一点 A 到地下水水位线的垂直距离,  $h_2 = h_1 - 200, cm$ 。

则:

$$P_n \leq 9.81(\rho_1 h_1 - \rho_2 h_2) \quad (11)$$

将公式(7)、(8)、(9)、(10)代入式(11)中,即可得许用起钻速度的计算公式:

值。

(2)在波动压力影响井壁稳定的因素中,钻头结构也占了很大的比例。笔者认为钻头改进的思路应该是增大其过水面积。因此,可以在钻头结构上增加一个心管,或者在钻头底部径向对称地焊接一定厚度的铁块,加大钻头上下直径差,以增大过水面积,减少泥浆流经钻头的压力损失。

### 参考文献:

- [1] 李天太. 实用钻井水力学计算与应用[M]. 北京:石油工业出版社,2002.
- [2] 董法昌. 钻井液水力学理论与应用[M]. 山东东营:石油大学出版社,2003.
- [3] 沈忠厚. 油井设计基础和计算[M]. 北京:石油工业出版社,1998.
- [4] 陶坤. 旋挖钻机在桩基础施工中的应用与分析[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2007,34(2).
- [5] 桂兵祥. 旋挖钻机施工时孔内事故的处理[J]. 探矿工程,2000,(4).
- [6] 唐林. 基于幂律流体的许用起下钻速度[J]. 西南石油学院学报,1995,(3).
- [7] 谢国民. 小井眼波动压力影响因素分析[J]. 天然气工业,2001,(3).
- [8] Burkhardt, J. A. Wellbore Pressure Surges Produced by Pipe Movement[J]. JPT 1961,(6):595.
- [9] Clark, E. H. Jr. Bottom Hole Pressure Surges While Running Pipe [J]. Applied Mathematics and Mechanics. 1995,(27):B-86.