

水平定向钻进工程泵量与钻速匹配的计算模型

刘远亮

(广东省建筑科学研究院,广东 广州 510500)

摘要:在非开挖水平定向钻进过程中,泵量与钻进速度是2个关键施工参数,泵量与钻速匹配与否将直接影响钻进成孔质量和施工进度,而国内外对这方面的研究较少,没有形成成熟的理论体系,现场施工大多靠经验来估算取值。运用数学解析方法,并考虑钻屑含量的影响,建立泵量与钻速相匹配的计算模型,再结合现场实测数据进行验证。实践表明该模型比较符合实际,对现场施工有一定的指导意义。

关键词:水平定向钻进;非开挖;泵量;钻速;匹配;计算模型

中图分类号:P634.7 **文献标识码:**A **文章编号:**1672-7428(2011)01-0068-03

Calculation Model for Matching of Pump Displacement and Drilling Speed in HDD/LIU Yuan-liang (Guangdong Provincial Academy of Building Research, Guangzhou Guangdong 510500, China)

Abstract: Pump displacement and drilling speed are 2 pivotal parameters in HDD. The matching state of pump displacement and drilling speed will affect the borehole quality and the construction progress, but there is no mature academic system to obtain them, for little research has been done in China, these parameters usually are estimated with experience in construction. In this article, mathematical analysis method is used with the consideration on the influence of drilled cuttings amount, calculating model of optimization of pump displacement and drilling speed is established combining with testing data for verification. It is proved by practice that this model is according with field construction.

Key words: HDD; trenchless technology; pump displacement; drilling speed; matching; calculating model

1 问题的提出

在非开挖水平定向钻进过程中,泵量与钻速是2个重要施工参数。泵量过大,容易造成钻孔内泥浆压力过大,导致孔壁失稳;泵量过小,则造成钻屑无法顺利排出,导致孔内憋压、卡钻和进尺困难。另一方面,钻速太快则造成相同时间里切削下来的钻屑过多,钻屑含量过大,同样会导致卡钻和进尺困难;钻速太慢则会影响施工进度和成孔质量。由此可知在现场施工过程中,泵量与钻速的匹配是很关键的。而以往有关这方面的研究大都局限于垂直孔钻井,对在水平钻进中的研究则很少,没有形成成熟的理论体系,而现场施工大多靠经验来估算取值。因此,建立泵量与钻速相匹配的计算模型具有十分重要的意义^[1]。

2 泵量与钻速相匹配的计算模型

泥浆的主要作用之一是悬浮、携带和排出钻屑,而泵量的大小则是能否顺利从钻孔中排出钻屑的关键。在垂直孔钻井,其钻屑在泥浆的带动下运行,其运行方向与钻屑本身重力方向相反,而在水平定向钻进施工中,最常见的是水平孔,钻屑虽也是在泥浆

的带动下运行,但此时钻屑本身的重力方向与泥浆的流动方向相互垂直。在钻进过程中,所有的钻屑在钻头的剪切力作用下或在高压泥浆射流作用下,一开始都是悬浮于泥浆中。此时钻头附近或射流作用下的环状空间内泥浆处于紊流状态。随着钻孔的深入,钻孔环空中的泥浆流态逐渐地由紊流变成层流,在这种层流条件下,钻屑的沉降速度与钻屑颗粒大小等有关^[2,3]。

下面运用固液两相流的理论,计算钻屑在泥浆中的沉降速度,由此可计算出悬浮和排出钻屑所需的泵量,再根据泵量和钻屑含量可确定与泵量相匹配的钻速。

对单个钻屑颗粒进行受力分析(假设颗粒充分分散、互不干扰,也不考虑颗粒的群体效应),颗粒受到泥浆垂直向上的浮力 F_b 、阻力 F_d 和垂直向下的重力 F_g (如图1所示),单颗粒在流体中自由沉降时,在所受合力方向上产生加速度合力为零时,颗粒与流体之间将保持一个稳定的相对速度。

假设泥浆为不可压缩流动,泥浆和钻屑之间无质量交换,钻屑为均匀颗粒,钻屑颗粒在液体中均匀分布。

收稿日期:2010-08-03

作者简介:刘远亮(1980-),男(汉族),广东人,广东省建筑科学研究院,地质工程专业,博士,从事非开挖钻进铺管技术、岩土力学、工程力学和钻井液技术的研究工作,广东省广州市大金钟路金钟东二街3号201,liang801014@126.com。

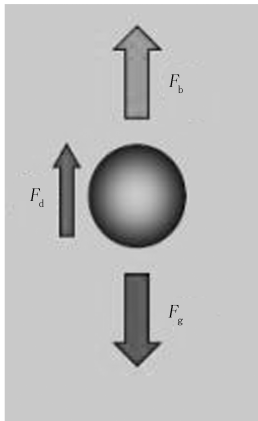


图 1 钻屑颗粒受力分析图

$$F_d = F_g - F_b$$

即: $f_m \pi \rho_d v_1^2 / 8 = \pi g (\rho_p - \rho) d^3 / 6$
 得到钻屑颗粒沉降速度:

$$v_1 = \sqrt{4gd(\rho_s - \rho) / (3f_m \rho)} \quad (1)$$

根据浆体与粒状颗粒输送水力学的理论^[4-6]可
 得出泥浆携带钻屑的临界流速 V_c 的计算式:

$$V_c = \left[\frac{2\eta g D (\rho_s - \rho_m) v_1}{e_s f_m \rho_m} \right]^{1/3} \quad (2)$$

将(1)式代入(2)式得到:

$$V_c = \left[\frac{2\eta g D (\rho_s - \rho_m)}{e_s f_m \rho_m} \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3f_m \rho}} \right]^{1/3}$$

因此可得携带钻屑的临界泵量 Q 的计算式:

$$Q = \left[\frac{2\eta g D (\rho_s - \rho_m)}{e_s f_m \rho_m} \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3f_m \rho}} \right]^{1/3} \cdot A \quad (3)$$

式中: η ——钻屑含量,%; g ——重力加速度, m/s^2 ;
 D ——钻孔直径, m ; ρ_s ——钻屑密度, kg/m^3 ; ρ_m ——
 混合液密度, $\rho_m = \eta \rho_s + (1 - \eta) \rho$, kg/m^3 ; e_s ——悬浮
 效率系数,无量纲,一般取 0.006 ~ 0.01,与钻屑含
 量成反比; d ——钻屑颗粒粒径,现场可近似取钻屑
 颗粒的平均粒径, m ; f_m ——泥浆阻力系数,无量纲,
 一般可取 0.02; ρ ——泥浆密度, kg/m^3 ; A ——钻孔
 横截面积, m^2 。

设钻头沿钻孔方向切削土体的线速度(钻头的
 钻进速度)为 v ,则在 t 时间内,钻头切削下来的土体
 体积 V_1 为:

$$V_1 = vtA$$

钻进导向孔时 $A = \pi d_0^2 / 4$,扩孔时 $A = \pi (d_i^2 - d_{i-1}^2) / 4$ (其中 d_0 为导向孔直径, d_i 为第 i 级扩孔直
 径)。

假设 t 时间内钻头破碎的土体全部进入钻孔环

空,泥浆泵量为 Q 。而不考虑新增钻屑体积时, t 时
 间内流进钻孔环空的泥浆体积 V_2 为:

$$V_2 = Qt$$

则钻屑含量 η 计算公式为:

$$\eta = V_1 / (V_1 + V_2) \times 100\% \\ = Av / (Av + Q) \times 100\%$$

所以,在一定钻屑含量条件下最优钻速可按下
 式确定:

$$v = \eta Q / [(1 - \eta)A] \quad (m/min) \quad (4)$$

3 确定钻屑含量的室内实验

实验过程:以一定配方的泥浆作为基浆,在基浆
 内分别加入不同含量的膨润土,以模拟实际中钻头
 切削下来的不同含量的钻屑。通过测试加入不同膨
 润土后泥浆的六速旋转粘度,并用相应的环空泥浆
 压力计算公式,可以得出不同钻屑含量对泥浆压力
 的影响,由此确定合理的钻屑含量。

3.1 实验方案设计

3.1.1 配制基浆

基浆配方为:4% 土(穿越土) + 0.15% NaOH +
 0.2% Na_2CO_3 。

3.1.2 以膨润土模拟钻屑

分别在基浆基础上加入 1%、2%、4%、6% 和
 8% 的膨润土形成 5 种新的配方。测取包括基浆在
 内的 6 种泥浆配方的六速粘度值,如表 1 所示。

表 1 不同钻屑含量下泥浆配方六速旋转粘度值

编号	配方	θ_{600}	θ_{300}	θ_{200}	θ_{100}	θ_6	θ_3	τ_d / η_p	FL / mL	pH
1	4% 土粉	15	10	8	6	2.5	2	0.51	28	8
2	5% 土粉	26	19	16	13	6.5	5	0.876	22	8
3	6% 土粉	31	24	21	17	9	8	1.24	21.2	8.5
4	8% 土粉	61	51	46	41	23	20.6	2.09	16.8	9.5
5	10% 土粉	114	104	97.5	88	51	34	4.8	14.4	9.5
6	12% 土粉	192	181	171	155	95	57	7.89	11.6	8

3.2 数据处理

(1)将以上各泥浆配方的旋转粘度值代入环空
 泥浆压力计算公式,计算得到不同钻屑含量的泥浆
 压力,如表 2 所示。

(2)将配方 2~6 环空压力计算值与基浆(配方
 1)压力值相除,得到从 1% 到 8% 5 种不同钻屑加量
 对于基浆的压力增长比率,并取加权平均^[7],如表 2
 所示。

(3)将钻屑加量与压力增长倍数关系绘成曲线
 如图 2 所示。对该曲线进行拟合,得到钻屑加量与
 压力增长倍数的拟合曲线,该拟合曲线的关系式为:

表2 不同泥浆配方钻杆内、钻孔环空对应的压力值

编号	配方	环空压力 /MPa	增长比率		环空加权值
			钻杆内	环空	
1	4%粘土	0.027	1	1	1
2	5%粘土	0.065	2.07	2.41	2
3	6%粘土	0.086	2.95	3.18	3
4	8%粘土	0.209	7.41	7.74	7.5
5	10%粘土	0.467	16.92	17.3	17
6	12%粘土	0.831	30.37	30.78	30.5

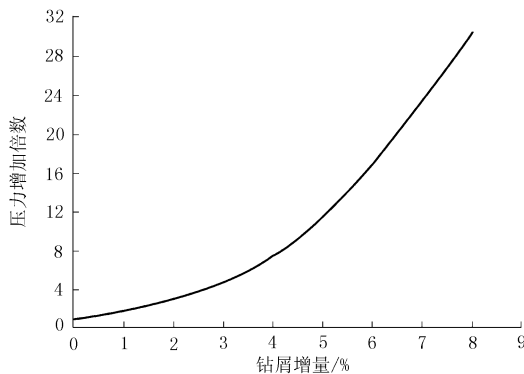


图2 压力增长倍数和钻屑增量关系曲线图

$$y = -0.0093x^4 + 0.164x^3 - 0.4161x^2 + 1.2534x + 1 \quad (R^2 = 1)$$

由以上实验数据可知,钻屑含量 > 6% 时,环空泥浆压力增加很快,所以钻屑含量不宜超过 6%,因此可取 $\eta = 6\%$ (理论上,钻屑含量当然越少越好,但综合考虑施工进度因素,可取 $\eta = 6\%$),将 $\eta = 6\%$ 代入(3)式和(4)式可得到泵量与钻速相匹配的计算模型:

$$Q = \left[\frac{0.12gD(\rho_s - \rho_m)}{e_s f_m \rho_m} \sqrt{\frac{4gd(\rho_s - \rho)}{3f_m \rho}} \right]^{1/3} \cdot A \quad (\text{m}^3/\text{s}) \quad (5)$$

$$v = 0.0638Q/A \quad (\text{m}/\text{min}) \quad (6)$$

4 现场应用

武汉某管道穿越工程,穿越水平距离 1300 m,钻遇地层以粘土、粉土和粉质粘土为主。现场测得的相关参数为: $\eta = 6\%$; $D = 0.2415 \text{ m}$; $\rho_s = 1700 \text{ kg}/\text{m}^3$; $\rho_m = 1240 \text{ kg}/\text{m}^3$; $e_s = 0.01$; $d = 0.2 \times 10^{-6} \text{ m}$; f_m

$= 0.2$; $\rho = 1200 \text{ kg}/\text{m}^3$; $A = 0.04578 \text{ m}^2$ 。代入(5)和(6)式计算最优的泵量与钻速。

计算得到的最优泵量 $Q = 1.36 \text{ m}^3/\text{min}$, 与之匹配的最优钻速 $v = 1.9 \text{ m}/\text{min} \approx 2 \text{ m}/\text{min}$ 。

现场按照上述所计算得到的泵量与钻速的数值进行施工,钻屑能顺利从钻孔中排出,钻孔的泥浆环空压力一直维持在 1 MPa 以内(如图 3 所示),成孔质量较好,没有发生憋压、卡钻等现象,保证了整个工程的顺利完成。

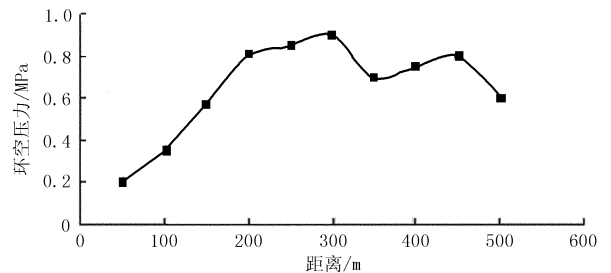


图3 实测环空压力曲线图

5 结语

泵量与钻速是水平定向钻进中的 2 个重要施工参数,本文运用固液两相流的理论知识,并考虑钻屑含量的影响,建立泵量与钻速匹配的计算模型。实践表明该模型较为符合实际,对现场施工有一定的指导意义。

参考文献:

- [1] 颜纯文,非开挖管线施工技术的发展及我国对策[J]. 探矿工程,1998,(2~3).
- [2] 李晓芬,乌鸣,王海,等. 对非开挖钻孔缩径抱管问题的分析探讨[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2008,35(2): 63-65.
- [3] David K. Ferry,等. 水平定向钻孔中钻屑的悬浮和排除[J]. 李晓苗译. 非开挖技术,2005,22(2~3).
- [4] 费祥俊. 浆体与粒状物料输送水力学[M]. 北京:清华大学出版社,1994.
- [5] 倪晋仁,王光谦,张红武. 固液两相流基本理论及其最新应用[M]. 北京:科学出版社,1991.
- [6] 白晓宁,胡寿根. 固液两相流管道水力输送的研究进展[J],上海理工大学学报,1999,21(4).
- [7] 陈立,林鹏,叶小云. 泥沙对挟沙水流流动结构影响的研究[J]. 水利学报,2003,(9): 39-42.

(上接第38页)

能够满足声频振动取样钻进的需要,从而成为我国地勘装备的一个新产品。

参考文献:

- [1] 张培丰,王福平,朱文鉴,等. 现代土壤环境科学钻探取样技术[J]. 地质装备,2009,10(S1): 17-22.

- [2] J. P. Davis. Sensitive infrastructure sites-sonic drilling offers quality control and non-destructive advantages to geotechnical construction drilling [EB/OL]. <http://www.dtic.mil/ndia/2005triservice/track7/davis.pdf>, 2005-08-04.
- [3] 叶成明,李小杰,刘迎娟. 浅析声波钻进技术[J]. 勘察科学技术,2007,14(5): 29-31.
- [4] 吴光琳. 声波钻进技术的发展及其应用[J]. 探矿工程(岩土钻掘工程),2004,31(3): 39-41.