大管径定向钻进穿越扩孔泥浆技术参数探讨

尤伟星, 杨　威
(中国石油天然气管道工程有限公司,河北 廊坊 065000)

摘要:对于 D1219 mm 大管径管道定向钻施工,在穿越包含粘土层、砂层、岩层等复杂地层时,需合理确定泥浆排量、扩孔器喷嘴数量等扩孔工艺参数。以举水河定向钻穿越工程为例,针对定向钻施工中泥浆排量不足、扩孔器选型不合理等问题,参考钻井工程中相关公式,验证了定向钻穿越中泥浆排量计算,补充了穿越施工规范中扩孔器喷嘴数量计算公式,并采用代尔夫特方程对定向钻施工中所需最大泥浆压力进行了计算,将计算成果应用到举水河定向钻施工中,为今后类似工程设计施工提供一定的参考。

关键词:输气管道;定向钻进;非开挖铺管;泥浆排量;喷嘴
中图分类号:P634.7　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1672 - 7428(2016)11 - 0088 - 04

Discussion of Mud Parameters for Reaming in Large Diameter Horizontal Directional Drilling Crossing/*YOU Wei - xing*, *YANG Wei* (China Petroleum Pipeline Engineering Corporation, Langfang Hebei 065000, China)

Abstract: In the directional drilling construction of D1219mm large diameter pipeline, the reaming process parameters should be reasonably determined while drilling through complex formations of clay, sand and rock, such as the mud displacement and the number of reamer nozzles. Taking an example of Jushui River HDD crossing engineering, according to the inadequate mud displacement and unreasonable reamer selection in directional drilling construction, the related drilling engineering formulas were referred to verify the mud displacement calculation in directional drilling crossing engineering and provide the calculation formula of reamer's nozzle number for crossing construction specification. The required maximum mud pressure was calculated used Delft equation in directional drilling construction, the calculation results were applied in directional drilling construction in Jushui River, which a reference for future similar design and construction.

Key words: gas pipelines; horizontal directional drilling; trenchless pipe laying; mud displacement; nozzle

0　引言

大管径定向钻穿越复杂地层时,由于施工过程中扩孔曲线不圆滑,钻屑难以返回地表等因素,施工风险很大。在扩孔阶段,工艺参数的优化设计之一是泥浆排量和喷嘴直径、数量的计算。本文采用相关公式对举水河定向钻穿越中的泥浆排量等扩孔工艺参数进行了计算探讨,为今后类似工程设计施工提供一定的参考。

举水河定向钻穿越是西气东输二线东段河流穿越的控制性工程,穿越位于武汉市新洲区。穿越处设计压力 10 MPa,管径 1219 mm,定向钻穿越长度 958 m,主要穿越地层为粉质粘土、粉细砂、泥质粉砂岩,定向钻穿越曲线穿越地层复杂,地质软硬不均,在施工过程中曾出现钻杆卡阻、管道回拖困难、钻杆断裂等问题,为解决施工中出现的问题,在施工中通过提高泥浆排量、优化扩孔器喷嘴等措施,定向钻回拖取得成功。

1　扩孔阶段泥浆排量计算

由于主要穿越砂层和岩石层,扩孔器牙轮切削下来的钻屑较多,需要大排量的泥浆携带至地表。提高泥浆携带性主要 2 种途径,第一是提高泥浆本身工艺性能参数,比如泥浆密度、粘度、滤失量等[1],保证泥浆具有良好的流动性,又具有较强的携带能力[2];第二是提高泥浆排量及压力,而泥浆的排量主要受到泥浆泵量的限制,泥浆排量有以下 2 种计算方法[3]。

1.1　以钻屑的上返速度达到必需值来确定泵量

由于钻屑的密度比泥浆密度大,钻屑相对于泥浆的沉降速度为 v_1,所以钻屑的绝对上移速度 v_2 为泥浆的上返速度 v 减去钻屑相对于泥浆的沉降速度为 v_1,则 $v_2 = v - v_1$,因而有:

收稿日期:2016 - 01 - 12; **修回日期**:2016 - 09 - 25
作者简介:尤伟星,男,汉族,1981 年生,工程师,从事油气管道穿跨越设计工作,河北省廊坊市和平路 146 号中国石油管道设计大厦,349922860@qq.com。

万方数据

$$v = v_1 + v_2, Q = vA \quad (1)$$

为保证钻屑以不大的绝对速度上移,一般取 $v_2 = (0.1 \sim 0.3)v_1$,则 $v = (1.1 - 1.3)v_1$。其中,确定泥浆的沉降速度 v_1 是关键,主要有 3 种方法。

(1)方法一:采用李丁格尔公式,则:

$$v_1 = k\sqrt{d_1(\rho_1 - \rho_2)/\rho_2} \quad (2)$$

式中:d_1——钻屑直径,m;ρ_1——岩屑颗粒的密度,kg/m^3;ρ_2——泥浆密度,kg/m^3;k——系数,$k = \sqrt{4g/(3c)}$(其中:g 为重力加速度;c 为颗粒的形状系数,圆球 $c = 0.5$,圆片 $c = 0.64 \sim 0.82$,不规则的或扁平状 $c = 2.1$)。

(2)方法二:采用斯托克斯公式,则:

$$v_1 = 2r^2(\rho - \rho_0)g/(9\eta) \quad (3)$$

式中:r——钻屑半径;ρ——钻屑密度;ρ_0——泥浆密度;η——泥浆粘度。

(3)方法三:根据钻井工程经验公式,可采用下面公式进行估算:

$$V_a = 18.24/(\rho_d d_k) \quad (4)$$

式中:V_a——最低环空返速,m/s;ρ_d——泥浆密度,g/cm^3;d_k——井径,cm。

3 种方法计算出的泥浆环空返速见表 1。

表 1　定向钻穿越泥浆环空返速计算比较表

计算方法	泥浆密度/(kg·m^{-3})	钻屑密度/(kg·m^{-3})	钻屑直径/m	系数 k	泥浆粘度/(mPa·s)	扩孔直径/m	泥浆环空返速/(m·s^{-1})
方法一	1200	2000	0.0005	2.49			0.059
方法二	1200	2000	0.0005		20		0.000005
方法三	1200	2000	0.0005			1.6	0.095

由表 1 可知,方法一及方法三计算出的流速与实际较相符,方法三中考虑了不同扩孔孔径影响,推荐采用方法三计算泥浆环空返速。由此可见,确定泥浆返速 v 是关键,一般最低返速要求为 0.3 ~ 0.8 m/s,根据统计,大部分定向钻穿越泥浆环空返速 < 1.2 m/s[4],对于定向钻穿越施工,冲携钻屑的过流面积是孔壁与钻杆之间的环状间隙横截面积,泥浆排量计算公式为:

$$Q = v\pi(D^2 - d^2)/4 \quad (5)$$

式中:D——钻孔内径;d——钻杆内径。

以举水河定向钻第二次扩孔为例,采用 2 台 3HS - 250 型泥浆泵并联,理论上最大排量可以达到 4.5 m^3/min,但在实际中,考虑到泥浆泵的使用寿命,一般设定在四挡,冲次 182,转速 1500 r/min 左右,实际输出排量约 1.6 m^3/min。扩孔直径分别为 559、762、914、1067、1270、1422、1575 mm,钻杆外径为 168.275 mm,采用式(5),计算得到所需的泥浆排量见表 2。

表 2　定向钻扩孔施工泥浆排量表(一)

扩孔外径/mm	钻杆外径/m	泥浆环空返速/(m·s^{-1})	泥浆排量/(m^3·min^{-1})
254	0.168275	0.06	0.10
559	0.168275	0.06	0.80
762	0.168275	0.06	1.56
914	0.168275	0.06	2.28
1067	0.168275	0.06	3.14
1270	0.168275	0.06	4.48
1422	0.168275	0.06	5.64
1574	0.168275	0.06	6.93

根据式(5)计算结果偏大,不适宜水平定向钻中应用,原因是随着泥浆性能不断提高,需要的泥浆的上返速度比计算值要小。但该公式说明,随着扩孔级别加大,在扩孔时要保证钻屑随泥浆带出,需要不断加大泥浆排量。

1.2　以泥浆中钻屑的百分含量不超过一定值来确定泵量

泥浆在孔底与钻屑相混合,将它们携带出地表。泥浆中钻屑含量不能过大,以维持泥浆的流变性能,一般钻屑含量≯10%。当钻头尺寸 A 和钻进速度 v_d 一定时,单位时间内产生的钻屑量 q 就确定,泥浆中钻屑含量 W 由泵量 Q 决定,泵量大则钻屑含量少,反之,泵量小则钻屑含量多。泥浆排量计算公式为:

$$Q = Av_d/W \quad (6)$$

式中:A——钻头尺寸;v_d——钻杆钻进速度;W——泥浆中钻屑含量。

举水河定向钻施工扩孔阶段所需的最小泥浆排量见表 3。

表 3　定向钻扩孔施工泥浆排量表(二)

扩孔外径/mm	单位切削量/(m^3·m^{-1})	钻杆钻进时间/(min·根$^{-1}$)	钻进速度/(m·min^{-1})	总切削量/m^3	返浆含砂量/%	所需最小泥浆排量/(m^3·min^{-1})
254	0.051	40	0.238	0.012	4	0.301
559	0.194	40	0.238	0.046	4	1.155
762	0.211	35	0.271	0.057	4	1.430
914	0.201	35	0.271	0.054	4	1.361
1067	0.237	35	0.271	0.064	4	1.608
1270	0.373	50	0.190	0.071	4	1.771
1422	0.322	50	0.190	0.061	4	1.530
1575	0.359	50	0.190	0.068	4	1.703

万方数据

由表 3 可知,在钻进速度和返浆含砂量确定后,在 Ø559、762、914 mm 扩孔时,所需的泥浆排量都在 1.5 m^3/min 以下,泥浆泵设备可以满足要求;在 Ø1067、1270、1422、1575 mm 扩孔时,所需的泥浆排量均大于 1.5 m^3/min,而目前泥浆泵实际排量最多达到 1.6 m^3/min,就可能发生部分钻屑无法被带出地表的情况,这时只有进一步放慢扩孔速度,才能减小扩孔的风险。推荐采用式(6)计算定向钻进施工时的泥浆排量。

1.3 举水河定向钻穿越扩孔施工中泥浆排量确定

由以上分析可以看出,如穿越地层为粘土,则泥浆中返浆含砂量较低,固相含量易于控制,则泥浆泵的排量可以不必很高;如穿越地层为砂层及岩石层,则在提高泥浆粘度的基础上,泥浆携带钻屑能力增强,返浆含砂量会达到 5% 以上,则泥浆排量要求增大,而如果由于设备的限制,无法提高泥浆的排量,则孔洞中的钻屑无法被及时带出,会堆积在孔底,影响下一级的扩孔及最后的管道回拖。

举水河定向钻穿越地层主要为泥质粉砂岩层,部分地段夹杂有卵砾石层,扩孔过程岩屑和卵砾石堆积,扩孔困难和卡钻等。另外,穿越曲线两端为粉细砂层和粉质粘土层,较为松软,且地层变化大,加上粉细砂流动性强,易堆积,随着扩孔级别增大,由于岩石扩孔器自身结构的加重,在砂层和粘土层扩孔时,更易造成扩孔孔位下沉,在岩石层和普通地层间形成台阶状曲线[5-6],穿越管道管头无法进入岩石洞内。其中洗孔过程中效果不佳是主要原因之一,由于前期采用的泥浆泵排量偏小,钻屑不能全部带出地表,此处的钻屑堆积比较多,在回拖过程中必然会导致管道卡阻,后期增加泥浆泵后,泥浆携带能力有效改善,返砂量达到 6% 以上。

2 扩孔阶段泥浆压力及喷嘴数计算

定向钻扩孔时,泥浆压力是需要关注的参数之一,适当的泥浆压力既可以保证扩孔器喷嘴有足够的喷射速度,又要防止泥浆压力过大撑裂地表,引起冒浆。

2.1 定向钻所需扩孔器喷嘴数计算

定向钻施工中,需要足够的泥浆压力能够将孔洞中的钻屑带出,泥浆在环空区域循环流动的门限压力值为最小需要泥浆压力[7]。在泥浆泵型号确定的情况下,泵的额定压力是确定的。在扩孔阶段,工艺参数的优化设计主要是泥浆排量和喷嘴直径和数量的计算。特别是在大管径管道定向钻施工中,在扩孔过程中钻屑带出较多,需要扩孔器喷嘴产生的高速射流冲击孔底的岩屑,使其快速离开孔底,随泥浆带出地表。《油气管道穿越工程施工规范》(GB 50424—2015)[8] 中第 7.1.9 条公式:应根据泥浆泵排量确定切割刀、扩孔器的泥浆喷射孔的个数,泥浆喷射孔的个数应按下式计算:

$$N = Q/(\pi r^2 V) \tag{7}$$

式中:N——泥浆喷射孔的个数,个;V——要求泥浆的喷射速度,m/min;Q——泥浆泵的正常排量,m^3/min;r——喷射孔的半径,m。

在泥浆泵排量确定的情况下,关键是确定喷嘴处泥浆的喷射速度。规范中对喷射速度的计算没有给出说明,而喷射速度是与喷嘴处的泥浆压力降有关,参考《钻井工程理论与技术》[9] 中,泥浆喷嘴喷射速度的计算公式为:

$$v = 10C\sqrt{20/\rho_d}\sqrt{\Delta p_b} \tag{8}$$

式中:v——泥浆喷射速度,m/s;ρ_d——泥浆密度,g/cm^3;C——喷嘴流量系数,与喷嘴的阻力系数有关,一般 $C<1$;Δp_b——喷嘴处泥浆的压力降,MPa。

以举水河穿越为例,取泥浆排量分别为 1.6、2.0 m^3/min,喷嘴直径 10 mm 和 6 mm,计算得喷嘴数量 N 见表 4。

表 4 扩孔器喷嘴数量计算表

ρ_d/(g·cm^{-3})	Q/(L·s^{-1})	C	Δp_b/MPa	v/(m·s^{-1})	r/cm	N
1.2	27	0.96	6	96	0.5	3.54
1.2	33	0.96	6	96	0.3	12.3

由表 4 可看出,在泥浆排量为 2.0 m^3/min 时,需要的最少喷嘴数为 13 个,举水河定向钻现场采用镶齿牙轮扩孔器,实际喷嘴数 10 个,证明施工中扩孔器喷嘴数还需增加。

2.2 定向钻所需最大泥浆压力

定向钻施工中,当孔洞内的泥浆压力超出地层允许的最大泥浆压力时,会导致地面冒浆,造成环境污染及工程费用增加,适当控制泥浆压力是必要的。

在当泥浆压力达到一定值时,钻孔周围土体会发生塑性变形,孔壁周围形成一定的塑性区,塑性区以外的土体为弹性状态。当压力继续增大直至超过一定值,塑性区土体进一步扩大,直至冒浆[10]。

目前定向钻最大泥浆压力计算,国内外学者已

万方数据