

文章编号: 1000-8241(2013)03-0309-04

水平定向钻铺管过程中回拖力计算方法的改进

肖守金¹ 刘永松² 武尚¹

1. 中国地质大学(武汉)工程学院,湖北武汉 430074; 2. 中国石化江汉油田分公司清河采油厂,山东潍坊 262714

摘要: 针对目前水平定向钻穿越施工时回拖力只考虑管道回拖力而忽略钻杆和扩孔器回拖力的问题,提出应综合考虑穿越地层地质条件、管道拉力、孔壁摩擦力和流体阻力等因素,建立回拖力的计算模型。介绍了 ASTM(American Society of Testing and Material)的回拖力计算方法,并在其基础上推导了考虑钻杆和扩孔器回拖力的回拖力计算方法。通过对两个不同地层条件的工程实例进行模拟计算,考虑钻杆和扩孔器回拖力的回拖力与实际回拖力的最大误差为 2.4%,计算结果比仅考虑管道回拖力时更接近实际回拖力。(表 4,图 3,参 10)

关键词: 水平定向钻; 扩孔器; 钻杆; 回拖力; 计算方法

中图分类号: TE89

文献标识码: A

doi: 10.6047/j.issn.1000-8241.2013.03.018

Calculation method improvement for the backtow force in pipelaying process of horizontal directional drilling crossing

Xiao Shoujin¹, Liu Yongsong², Wu Shang¹

1. Faculty of Engineering, China University of Geosciences (Wuhan), Wuhan, Hubei, 430074

2. SINOPEC Qinghe Oil Production Plant of Jiangnan Oilfield Company, Weifang, Shandong, 262714

Abstract: For the problem existing in HDD (Horizontal Directional Drilling) crossing construction, the backtow force of pipeline is often considered, but the backtow force of drill rod and bore reamer is neglected. In the paper, the factors to be considered in geological condition of crossing formations, pipeline pulling force, bore wall friction and fluid resistance are proposed, and calculation model for backtow force is established. The backtow force calculation method based on ASTM (American Society of Testing and Material) is introduced and the calculation method considering the backtow force of drill rod and bore reamer are derived. Researchers have performed simulation calculation for two project examples with different stratigraphic conditions, the maximum error between the backtow force considering the drill rod and bore and the actual pulling backtow force is 2.4%, the calculated results are more closer to the actual backtow force than that of only considering pipeline backtow force. (4 Tables, 3 Figures, 10 References)

Key words: horizontal directional drilling, bore reamer, drill rod, backtow force, calculation method

在管道水平定向钻穿越施工过程中,回拖力是选择施工设备、施工工艺以及管材的关键参考因素,也是决定工程成败的关键因素之一。在实际施工过程中,由于工况比较复杂且影响因素众多,难以建立与实际工况相吻合的回拖力计算模型,因此,回拖力不能直接计算而只能估算。管道回拖力计算方法有很多,多数方法忽略了钻杆和扩孔器对回拖力的影响,而在实际回拖过程中,钻机施加的拉力一部分作用于钻杆和扩孔器,另一部分作用于管道^[1-3]。确切地说,总回拖力应该是钻杆、扩孔器及管道回拖力三者之和。

1 管道回拖力的计算方法

ASTM(American Society of Testing and Material)法是常用的管道回拖力计算方法^[4-8],该方法为美国材料试验学会所采用。ASTM法将回拖力分段计算,不仅考虑泥浆的粘性阻力、管道在弯曲段产生的绞盘效应力,而且考虑管道在被拖入孔道前与地表面的摩擦阻力,以及管道在回拖时与地表面和孔壁的摩擦阻力。因此,采用 ASTM法作为管道回拖力的计算方法。

一般而言,穿越管道的钻孔轨迹包括出、入土处的弯曲倾斜段和中间的水平直线段(图1)。对于水平直线段或地面上水平拖动的管道,回拖力计算公式为:

$$F = \mu w L \quad (1)$$

式中: F 为管道在水平孔内(或在地面上水平拖动)的回拖力,kN; μ 为管道与孔内流体(泥浆)或管道与地面之间的摩擦因数; w 为单位长度穿越管道在孔内的

净浮力或在地面上的重力,kN/m; L 为管道长度,m。

对于弯曲管段,绞盘效应对回拖穿越管道的影响客观存在^[8],当弯曲半径足够大时,考虑管道绞盘效应的回拖力计算公式为:

$$F_f = e^{\mu\theta} (\mu w L) \quad (2)$$

式中: F_f 为水平或垂直弯曲管道的回拖力,kN; θ 为管道弯曲段的夹角,弧度。

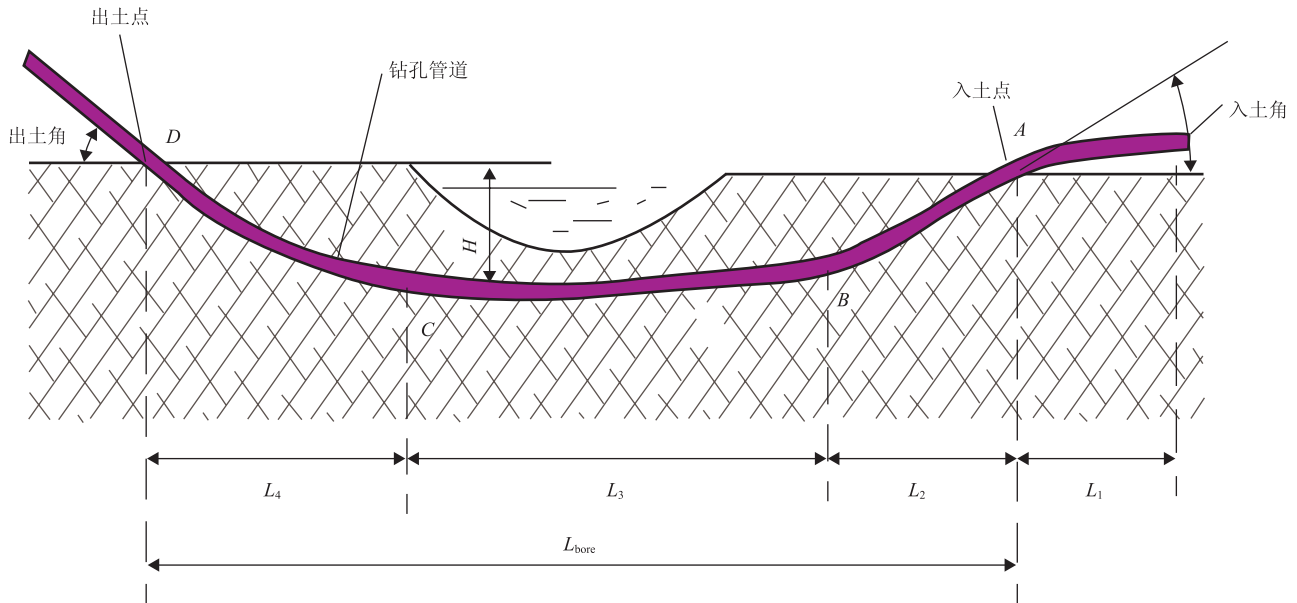


图1 管道穿越钻孔轨迹示意图

根据式(1)、式(2),考虑孔内流体(泥浆)对穿越管道的阻力,以扩孔器为基点,可以推导出管道到达每个拐点处的回拖力。

$$\begin{aligned} T_A &= e^{\mu_a \alpha} \mu_a w_a (L_1 + L_2 + L_3 + L_4) \\ T_C &= T_B + T_{HK} + \mu_b |w_b| L_3 - (\mu_a w_a L_3 e^{\mu_a \alpha}) e^{\mu_b \alpha} \\ T_D &= e^{\mu_b \alpha} [T_C + T_{HK} + \mu_b |w_b| L_4 - w_b H - (\mu_a w_a L_4 e^{\mu_a \alpha}) e^{\mu_b \alpha}] \end{aligned} \quad (3)$$

式中: T_A 、 T_B 、 T_C 、 T_D 分别为管道在A、B、C、D点受到的回拖力,kN; T_{HK} 为流体阻力,kN; μ_a 为管道在拖入钻孔前与地面之间的摩擦因数; μ_b 为管道与钻孔孔壁之间的摩擦因数; w_a 为单位长度空管道的重力,kN/m; w_b 为单位长度管道在钻孔内的净浮力,kN/m; α 为管道入土点的钻孔倾角,弧度; β 为管道出土点的钻孔倾角,弧度; L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 为管段长度,m。

2 回拖力计算方法的修正

在实际回拖过程中,钻杆、扩孔器和管道为相连接的整体(图2)。

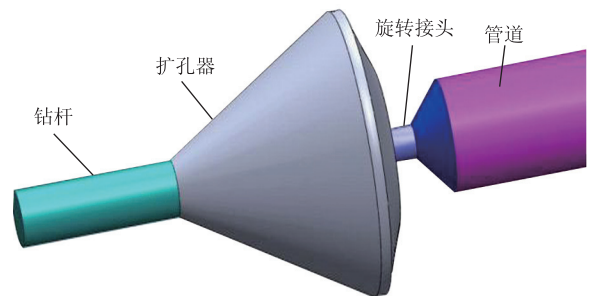


图2 管道穿越回拖连接示意图

2.1 扩孔器回拖力计算公式的推导

扩孔器主要受重力、孔壁的摩擦力、泥浆等流体的阻力^[9]、浮力以及回拖力的作用(图3)。

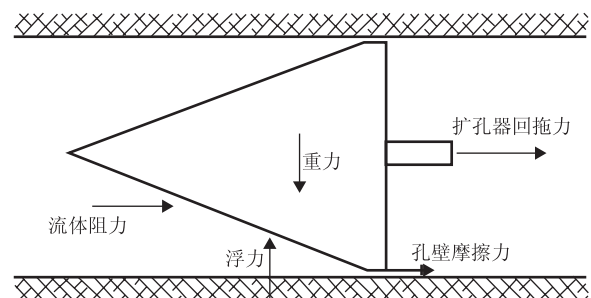


图3 管道穿越扩孔器受力示意图

孔壁摩擦力为：

$$T_f = \mu f \quad (4)$$

式中： T_f 为扩孔器与孔壁间的摩擦力，kN； f 为扩孔器所受的浮力，kN； μ 为扩孔器与孔壁间的摩擦因数。

在回拖过程中，扩孔器受到的流体阻力与泥浆性能、泥浆流速、钻孔的几何尺寸及自身的形状等因素有关，可按下式计算：

$$T_{HK} = q\pi L_1 R_1 \quad (5)$$

式中： T_{HK} 为泥浆的流体阻力，kN； L_1 为锥形扩孔器的母线长，m； R_1 为扩孔器底面圆的半径，m； q 为流体压力，kPa。

扩孔器的回拖力为：

$$T_r = T_f + T_{HK} \quad (6)$$

式中： T_r 为扩孔器的回拖力，kN。

2.2 钻杆的回拖力计算

钻杆在回拖过程中，受重力、浮力、流体阻力以及回拖力的作用，同时受扭矩的影响，并在重力和钻机的轴向拉力的影响下，时刻寻求以最短的路径回到地表。该过程受流体粘滞阻力的影响，而粘滞阻力与接触面积、流体的粘性系数、流体的速度梯度 (dv/dy) 有关，其关系式为^[9]：

$$S = l_2 \pi D$$

$$T_v = \mu_2 S \frac{dv}{dR_2} \quad (7)$$

式中： S 为钻杆柱的侧面积， m^2 ； l_2 为钻杆所在钻孔的曲线长度，m； D 为钻杆外径，m； T_v 为钻杆与泥浆之间的粘滞阻力，kN； μ_2 为泥浆的动力粘度； v 为流体的流速，m/s； R_2 为钻孔半径，m。

钻杆总体受到的粘滞阻力与钻杆长度有关，为简

化计算，可近似将钻孔的曲线长度视为在孔中的钻杆长度，即计算钻孔的三维曲线长度。由于钻杆外径较小（相对于扩孔后的孔径），经计算 FWD ϕ 73 的钻杆在单位长度所受的浮力大约为 4 N，对整个计算结果影响不大，因此浮力可忽略不计。钻杆回拖力可近似表述为：

$$T_d \approx T_v \quad (8)$$

式中： T_d 为钻杆的回拖力，kN。

2.3 回拖力计算方法的修正

将上述管道回拖力、扩孔器回拖力和钻杆回拖力相加，可得到钻机的总回拖力：

$$T = T_p + T_r + T_d \quad (9)$$

式中： T 为总回拖力，kN； T_p 为用 ASTM 法计算得到的管道回拖力，kN； T_r 为扩孔器的回拖力，kN； T_d 为钻杆的回拖力，kN。

为确保施工安全，使用管道回拖力完成管道抗拉强度的校核后，建议再使用总回拖力校核管道的抗拉强度。

3 实例对比

引用地层分别为冲填土、粘土、粉质粘土和部分砂夹卵石层（表 1）及砂性粘土和砂夹卵石层（表 2）的两个工程实例^[10]，分别以 B、C 两处为例进行计算（图 1），相对误差计算采用以下公式：

$$\delta_1 = |T - T_{\max}| / T_{\max}$$

$$\delta_2 = |T_p - T_{\max}| / T_{\max} \quad (10)$$

式中： δ_1 为总回拖力与实际回拖力的相对误差； δ_2 为管道回拖力与实际回拖力的相对误差。

表 1 工程 1 参数

管道总长 L /m	管道附加长度 L_1 /m	入土弯曲倾斜段 L_2 /m	水平直线段 L_3 /m	出土弯曲倾斜段 L_4 /m	入土角 /($^\circ$)	出土角 /($^\circ$)	穿越深度 H /m	管道外径 /mm
564	15	250.5	19.5	278.3	6	10	21.5	711

表 2 工程 2 参数

管道总长 L /m	管道附加长度 L_1 /m	入土弯曲倾斜段 L_2 /m	水平直线段 L_3 /m	出土弯曲倾斜段 L_4 /m	入土角 /($^\circ$)	出土角 /($^\circ$)	穿越深度 H /m	管道外径 /mm
483	0	207.5	84.5	188	6	10	16.5	1 067

采用 ASTM 法，取 $\mu_a = 0.15$ ， $\mu_b = 0.25$ ，将有关数据代入以上公式计算管道回拖力。考虑扩孔器和钻杆的回拖力后，B 处 δ_1 比 δ_2 小很多。虽然 C 处的总回拖力和管道回拖力均与实际回拖力的数值相近，但总

回拖力与实际回拖力只相差 2.4%，比管道回拖力更接近实际回拖力（表 3）。工程 2 的地层情况与工程 1 不同，在考虑扩孔器和钻杆的回拖力后， δ_1 比 δ_2 小很多，尤其在 C 处，总回拖力与实际回拖力只相差 2%，虽然

B处的计算结果不明显,但总回拖力还是比管道回拖力更接近于实际回拖力(表4)。可见,在回拖过程中,考虑钻杆和扩孔器部位的管道回拖力计算结果比只

考虑管道自身回拖力的计算结果更接近工程实际。因此,在摩擦因数较大的地层中,考虑钻杆和扩孔器对回拖力的影响是必要的。

表3 工程1回拖力计算结果及误差对比

地点	管道回拖力 T_p /kN	扩孔器回拖力 T_r /kN	钻杆回拖力 T_d /kN	总回拖力 T /kN	实际回拖力 T_{max} /kN	相对误差对比 (δ_1/δ_2)
B	765	64	0.3	829.3	996	16.73%/23.19%
C	956	64	0.1	1020.1	996	2.42%/4.01%

表4 工程2回拖力计算结果及误差对比

地点	管道回拖力 T_p /kN	扩孔器回拖力 T_r /kN	钻杆回拖力 T_d /kN	总回拖力 T /kN	实际回拖力 T_{max} /kN	相对误差对比 (δ_1/δ_2)
B	452	83	0.6	535.6	681	21.35%/33.62%
C	584	83	0.3	667.3	681	2.01%/14.24%

4 结论

(1)在计算穿越工程管道回拖力时,不能只考虑管道回拖力,还要考虑扩孔器和钻杆的回拖力。对于回拖力的计算方法,ASTM法对管道的受力情况考虑较为全面,计算结果相对准确。

(2)通过数据分析,推导出扩孔器和钻杆的回拖力计算公式。虽然扩孔器和钻杆的回拖力相对管道回拖力的数值较小,但是在摩擦因数较大的地层中,考虑钻杆和扩孔器对回拖力计算值的影响是有必要的。

(3)根据工程实例计算,与ASTM法的计算结果相比,考虑钻杆和扩孔器回拖力对总回拖力的影响后,结果更接近于工程实际。

horizontal directional drilling[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2002, 16(1): 47-55.

- [6] Baumert M E, Allouche E N. Methods for estimating pipe pullback loads for HDD crossings[J]. J Infrastruct Syst, 2002, 8(1): 12-19.
- [7] 马保松. 非开挖工程学[M]. 北京: 人民交通出版社, 2008: 357-376.
- [8] 杨先亢, 逄仲森, 马保松, 等. 水平定向钻管道穿越回拖力计算公式的比较分析[J]. 石油工程建设, 2011, 37(1): 1-5.
- [9] 刘鹤年. 流体力学[M]. 2版. 北京: 中国建筑出版社, 2004: 15-37.
- [10] 安全龙. 水平定向钻穿越回拖力的计算方法及其分析[J]. 石油工程建设, 2008, 17(1): 21-26.

(收稿日期: 2012-05-21; 编辑: 谷英翠)

参考文献:

- [1] 钟鸣. PE 给水管道水平定向地下穿越回拖力计算的探讨[J]. 工程建设与设计, 2011(11): 141-143.
- [2] 颜纯文, Stein D. 非开挖地下管道施工技术及其应用[M]. 北京: 地震出版社, 1992: 10-11.
- [3] 孙晓宝, 姜伟. 水平定向钻设计考虑因素[J]. 国外油田工程, 2009, 25(5): 44-45.
- [4] 朱波, 张永高. 应用水平定向钻安装管道时回拖拉力的计算方法[J]. 筑路机械与施工机械化, 2005, 22(10): 41-44.
- [5] Polak M A, Lasheen A. Mechanical modelling for pipes in

作者简介: 肖守金, 在读硕士生, 1987年生, 2010年毕业于中国地质大学(武汉)勘查技术与工程专业, 现主要从事工程地质方向的研究工作。

电话: 15907128736; Email: xiaoshoujin2006@163.com

Xiao Shoujin, reading master, born in 1987, graduated from China University of Geosciences (Wuhan), exploration technology and engineering, in 2010, engaged in the research of engineering geology direction.

Tel: 15907128736, Email: xiaoshoujin2006@163.com