

基于赫巴流体的大型水平定向钻返浆流动模型

王志宇¹, 胡长明^{1,2*}, 王培岩¹, 杨超³, 梁慧³

(1. 西安建筑科技大学土木工程学院, 西安 710055; 2. 陕西省岩土与地下空间工程重点实验室, 西安 710055; 3. 陕西华山路桥集团有限公司, 西安 710016)

摘要: 明确大型水平定向钻穿越工程中的返浆流动方向, 对于精确计算泥浆循环最小需要压力、返浆流量以及钻孔压力等参数至关重要。本文基于赫巴流体提出了一个计算返浆流动方向及上述物理参数的理论模型, 并通过工程实例验证了模型的有效性和适用性。分析了管道安装过程中泥浆循环最小需要压力、返浆流量和钻孔压力的变化规律。此外, 对泥浆流变特性、偏心率、出入土点高差、扩孔循环以及扩孔级差对返浆流动的影响进行了参数分析。本文所提出的模型充分考虑了返浆流动方向、出入土点高差等因素, 可为大型水平定向钻穿越工程的返浆流动提供一个有效分析工具。

关键词: 水平定向钻; 返浆流动; 赫巴流体; 偏心环空; 最小需要压力

中图分类号: TU990.3

文献标志码: A

作者简介: 王志宇(1994—), 男, 博士研究生, 主要从事城市地下空间和非开挖工程方面的研究工作。E-mail: zy_wang94@163.com。

Theoretical Analysis of Mud Flow in Large-scale Horizontal Directional Drilling Based on Herschel-Bulkley Fluid

WANG Zhi-yu¹, HU Chang-ming^{1,2*}, WANG Pei-yan¹, YANG Chao³, LIANG Hui³

(1. School of Civil Engineering, Xi'an University of Architecture and Technology, Xi'an 710055, China; 2. Shaanxi Key Laboratory of Geotechnical and Underground Space Engineering, Xi'an University of Architecture & Technology, Xi'an 710055, China; 3. Shaanxi Huashan Road and Bridge Group Co., Ltd., Xi'an 710016, China)

Abstract: Determining the mud flow direction in large-scale horizontal directional drilling projects is crucial for accurately calculating the required circulation pressure, flow rate, and drilling pressure. This paper presents a theoretical model for calculating the flow direction and the aforementioned physical parameters based on the Herschel-Bulkley fluid. The model's effectiveness and applicability are validated through engineering case studies. Variations in required circulation pressure, flow rate, and drilling pressure during pipeline installation are analyzed. Additionally, a parametric analysis is conducted on the effects of rheological properties, eccentricity, height differences between entry and exit points, reaming cycles, and reaming differential on mud flow. The proposed model considers factors such as flow direction and elevation differences, providing an effective analytical tool for analyzing mud flow in large-scale horizontal directional drilling projects.

Keywords: horizontal directional drilling; mud flow; Herschel-Bulkley fluid; eccentric annulus; required circulation pressure

基金项目: 陕西省自然科学基金基础研究计划(2022JQ-375)

收稿日期:

*通信作者 (E-mail: hu.tm@163.com)

0 引言

水平定向钻（Horizontal Directional Drilling，简称 HDD）作为一种非开挖管线铺设工艺，因其在减小环境干扰、提高施工效率、降低工程造价等方面的显著优越性^[1]，近年来发展迅速并广泛应用于油气管道、电力电缆、市政管网的施工中^[2,3]。其所铺设管道的直径和穿越距离逐步增加，大型 HDD 工程的应用日趋广泛^[3]。

在大型定向钻施工中，由于钻孔孔径、埋深大、穿越距离长，易发生回拖抱管^[4]、孔壁失稳^[5,6]、泥浆回收不及时^[7]等情况，这就对工程建设方计算回拖荷载、钻孔压力和返浆体积的精度提出了更高的要求。上述要求则与泥浆的流动特性，诸如流动方向、压力梯度、返浆流量等密切相关^[8]。因此，有必要建立一个合理的返浆流动分析模型。

水平定向钻返浆流动分析的难点之一在于确定流动方向，由于存在入土点和出土点两个出口，返浆流动方向有多种可能。在早先研究中，学者们^[9-11]假定在管道安装过程中存在一个返浆点，在扩孔器到达返浆点前，泥浆经出土点环空（扩孔器与出土点间的钻孔环空）流向地面，经过返浆点后，泥浆经由入土点环空（扩孔器与入土点间的钻孔环空）流向地面。但后续研究中发现，在一个典型安装过程中，泥浆在相当长的回拉长度上可以同时从出、入土点环空返回地面^[12]。而且，出、入土点高差的影响也没有被考虑。

Rabiei 等^[12]提出了一种三阶段返浆流动模式，假定了各阶段的返浆流动方向，并基于幂律模型推导了各阶段泥浆在出、入土点环空内的流量计算方法。Shu 等^[8]分析了不同出、入点高差情况对流动方向的影响。

可见，目前对于泥浆流动方向的假设多有不同，且多将泥浆视为宾汉姆或幂律流体。而已有研究表明水平定向钻所用的泥浆往往具有屈服点^[13]，幂律流体显然无法体现泥浆这一特性。而宾汉姆模型虽然考虑了泥浆的屈服点，但该模型用线性变化来描述剪切应力与应变速率的关系，对于低剪切速率的泥浆适用性较差^[14]。大型定向钻工程由于穿越距离较长，容易出现出、入土点存在高差的现象，虽然已有方法提出了可能的流动模式以及关键点的确定原则，但是泵送压力与流动方向间的关系尚未建立。同时，存在高差时的返浆流量及钻孔压力的计算方法仍不明确。此外，钻孔内管道的位置因泥浆密度、管道规格（包括直径、刚度和重量）、钻孔曲线和配重降浮措施等因素而异，有必要在返浆流动分析时考虑管道的偏心特性。

本文旨在提出一种适用于大型水平定向钻泥浆流动分析的理论模型。该模型综合考虑了流动方向、出、入土点高差、泵送压力、泥浆重力、管道偏心、施工进度、泥浆流变特性、环空尺寸等因素。通过该模型，可以根据泵送压力与泥浆循环最小需要压力确定回拖过程中的泥浆流动方向。同时，所提出的模型也可用于计算返浆流量、钻孔压力以及泥浆循环所需的最小压力。最后，通过工程实例和参数分析，对大型水平定向钻进中泥浆流动特性进行了全面研究，以便加深对泥浆流动规律的理解。

1 基本问题及假定

典型的水平定向钻穿越曲线由倾斜直线段（ L_1 ）-曲线段（ L_2 ）-水平直线段（ L_3 ）-曲线段（ L_4 ）-倾斜直线段（ L_5 ）组成，图 1 给出了典型穿越曲线上，水平定向钻在扩孔、管道安装阶段泥浆流动所处的环形空间示意图。本文中，倾斜直线段 L_1 与水平线的夹角（出土角）用 α 表示，倾斜直线段 L_5 与水平线的夹角（入土角）用 β 表示； R_{L2} 为曲线段 L_2 的曲率半径， $L_2 = \pi R_{L2} \alpha / 180$ ， R_{L4} 为曲线段 L_4 的曲率半径， $L_4 = \pi R_{L4} \beta / 180$ 。将扩孔器至出土点间的环空定义为出土点环空（内半径为 R_{in} 、外半径为 R_{out} ），将扩孔器至入土点间的环空定义为入土点环空（内半径为 R'_{in} 、外半径为 R'_{out} ）。泥浆经扩孔器进入钻孔后，可分别通过出土点环空和入土点环空流向地面，流经出土点环空的流量为 Q_1 ，流经入土点环空的流量为 Q_2 。

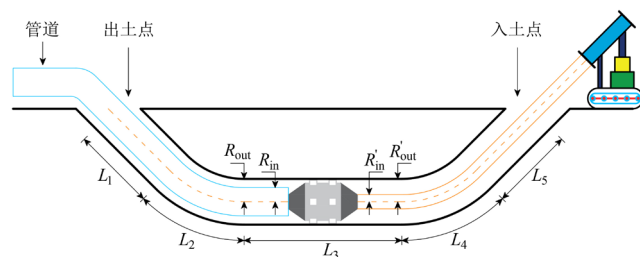


图 1 水平定向钻泥浆流动环形空间示意图

Fig. 1 Schematic diagram of mud flow in HDD annular space

大型水平定向钻工程埋深较大，非水平段曲线在穿越路径中占比较高，重力在泥浆流动中的作用不应忽视，将泥浆在钻孔内的流动简化为其在水平环空内的流动显然不再适用。绝大多数水平定向钻穿越路径在同一垂直平面内^[15]，泥浆流动也主要发生在此平面，且由于较低的泥浆流速和较高的泥浆黏度，在大型水平定向钻工程中泥浆流动模式通常被视为层流^[8]。已有研究表明，泥浆多是具有屈服应力的非牛顿

流体, 赫巴模型考虑了泥浆的屈服点以及剪切应力和剪切速率间的非线性关系, 可以较好的描述水平定向钻泥浆的流变特性^[14]。在水平定向钻进施工中, 一些泥浆不可避免地会流失到地层中, 由于环境的复杂性, 准确计算泥浆损失通常是困难的。为了获得解析解, 本文假定泥浆不会流失到地层中。鉴于上述讨论, 本文基本假定如下:

(1) 将大型水平定向钻孔内的泥浆流动视为赫巴流体在偏心环空内的定常层流问题;

(2) 在泥浆流动过程中, 泥浆不会流失到地层中。

2 数学模型

2.1 赫巴流体单一出口倾斜偏心环空流动模型

首先建立赫巴流体在倾斜同心环空内层流流动的压力梯度预测模型(图2), 随后考虑偏心特性的影响对压力梯度公式进行修正。考虑重力作用的流体动量方程为:

$$\frac{dp}{dl} - \frac{d(\tau r)}{r dr} \pm f_b = 0. \quad (1)$$

其中, dp/dl 为压力梯度 (Pa/m); τ 为流体切应力 (Pa); f_b 为体积力 (N/m³), $f_b = \rho g \sin \theta$, ρ 为流体密度 (kg/m³); g 为重力加速度 (9.8 m/s²); 流动方向与 f_b 方向相同时取+, 相反时取-; r 为径向坐标 (m)。

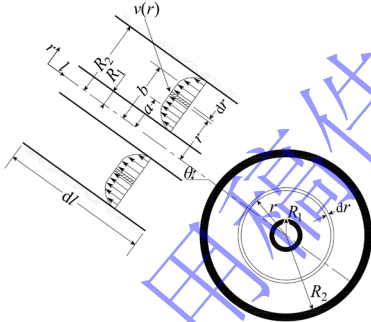


图2 赫巴流体同心环空流动简图

Fig. 2 Schematic of concentric annular flow of Herschel-Bulkley fluid

赫巴流体切应力 τ 与剪切速率 γ 的关系如下^[14]:

$$\tau = \tau_0 + k\gamma^n. \quad (2)$$

其中, τ_0 为流体屈服应力 (Pa); n 为流性指数; k 为稠度系数 (Pa·sⁿ); γ 为剪切速率 (s⁻¹)。

泥浆流量可由下式计算:

$$Q = \int_{R_1}^a 2\pi r v(r) dr + \int_a^b 2\pi r v_0 dr + \int_b^{R_2} 2\pi r v(r) dr. \quad (3)$$

其中, R_1 为环空内半径 (m); R_2 为环空外半径 (m); a 为流核区下边界 (m); b 为流核区上边界 (m); $v(r)$

为半径 r 处的流体速度; v_0 为流核区速度。

根据无滑移边界条件和流体在流核区 ($a \leq r \leq b$) 速度相等可得如下速度边界条件:

$$\begin{cases} v(r=R_1) = v(r=R_2) = 0 \\ v(r=a) = v(r=b) = v_0 \end{cases}. \quad (4)$$

当 R_1/R_2 大于 0.3 时, 流体在同心环空内流动可以等效为间距为 $R_2 - R_1$ 的槽流而不丧失计算精度^[16]。因此, 本文采用 Bourgoyne 等^[16]推导宾汉姆流体同心环空层流压力梯度的方法, 将图2所示的同心环空流动等效为赫巴流体在间距为 $R_2 - R_1$, 宽度为 $\pi(R_2 + R_1)$ 的矩形槽内的流动后通过联立式(1)~(4)即可求出流量 Q 和压力梯度 dp/dl 的关系。为节约篇幅, 此处直接给出流量 Q 和压力梯度 dp/dl 的关系:

$$Q = \left(\frac{P}{k}\right)^m \left[\frac{\pi(R_2 + R_1)}{(m+1)(m+2)} \right] \left[m \left(\frac{R_2 - R_1}{2} - \frac{\tau_0}{P} \right)^{m+2} + (m+2) \left(\frac{R_2 - R_1}{2} + \frac{\tau_0}{P} \right) \left(\frac{R_2 - R_1}{2} - \frac{\tau_0}{P} \right)^{m+1} \right]. \quad (5)$$

其中, $P = dp/dl \pm f_b$ (N/m³), 流动方向与 f_b 方向相同时取+, 相反时取-; m 为流性指数的倒数, $m = 1/n$ 。

根据式(5)即可在已知流变参数 (τ_0 、 n 、 k)、环空尺寸 (R_1 、 R_2) 和流量 Q 的情况下求出 P , 进而求得赫巴流体在倾斜同心环空内层流流动的压力梯度:

$$\frac{dp}{dl} \Big|_c = P \pm f_b. \quad (6)$$

其中, 流动方向与 f_b 方向相同时取-, 相反时取+;

由于管道在钻孔内往往不位于钻孔中心, 赫巴流体在单一出口偏心环空中层流流动所需的压力梯度可由下式计算^[17]:

$$\frac{dp}{dl} = CP \pm f_b. \quad (7)$$

其中, C 为修正系数, 与偏心率 e , 扩径比 R_2/R_1 有关, 由下式计算^[17]:

$$C = 1 - 0.082 \frac{e}{n} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{1.502} - 1.57 e^2 \sqrt{n} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.44} + 0.975 e^3 \sqrt{n} \left(\frac{R_1}{R_2} \right)^{0.597} + 0.0735 e^2 \tau_0^{0.408}. \quad (8)$$

式(8)为 Dokhani 等^[17]提出的摩擦压力损失偏心修正公式, 适用于具有屈服应力的非牛顿流体, 如宾汉姆流体和赫巴流体。其中 e 为偏心率, 定义如下:

$$e = \frac{\lambda}{R_2 - R_1}. \quad (9)$$

其中, λ 为管道中心和钻孔中心间的距离。

2.2 大型水平定向钻泥浆流动模型

根据水平定向钻泥浆流动的出口数量, 可将泥浆流动方向分为以下两种情况: (1) 泥浆同时通过出口点和入口点环空流向地面, 称为双侧流动; (2) 泥浆仅从其中一个环空流向地面, 称为单侧流动。本节首先介绍双侧和单侧流动的泥浆流量、最小需要压力和泥浆压力的计算, 随后对大型水平定向钻泥浆流动分析流程进行总结。

2.2.1 双侧流动

泥浆流经钻杆时存在一定的压力损失, 扩孔器处的压力 p_{in} 可由下式计算:

$$p_{in} = p_{pump} - p_{loss} \quad (10)$$

其中, p_{pump} 为泥浆泵送压力 (Pa); p_{loss} 为泥浆在钻杆内流动的压力损失 (Pa), 可根据 Su 等^[18]和 Yan 等^[5]提出的公式计算。

出 (入) 土点环空的入口和出口之间的压力差可以通过在钻孔曲线上对压力梯度积分得到:

$$\Delta p_i = \int_{S_i} \frac{dp}{dl} \bigg|_i ds \quad (11)$$

其中, $i=1$ 表示出土点环空 (此时 $R_1=R_{in}$, $R_2=R_{out}$), $i=2$ 表示入土点环空 (此时 $R_1=R'_{in}$, $R_2=R'_{out}$); Δp_i 表示环空入口与出口间的压力差 (Pa); $(dp/dl)|_i$ 表示环空内泥浆流动的压力梯度 (Pa/m), 可由式(7)计算; S_i 为钻孔曲线。

考虑到大型水平定向钻泥浆流动是一种压力流^[19], 当泥浆同时从出、入土点流向地面时, 泥浆流量与维持定常层流所需的压力差成反比:

$$Q_1 \Delta p_1 = Q_2 \Delta p_2 \quad (12)$$

依据质量守恒, 出、入土点返浆流量与泵送流量间满足以下关系:

$$Q_1 + Q_2 = Q_p + Q_d \quad (13)$$

其中, Q_p 为钻机泵送流量(m^3/s); Q_d 为因钻机回拉导致环空体积变化率 (m^3/s), 扩孔施工时

$$Q_d = |v_d| \pi (R_{out}^2 - R_{out}'^2) (1 - \varphi), \quad \text{管道回拖时,}$$

$$Q_d = |v_d| \pi (R_{in}^2 - R_{in}'^2); \quad \varphi \text{ 为土体孔隙度; } v_d \text{ 为钻机回拉速度。}$$

出、入土点环空的流量 Q_1 、 Q_2 和压力差 Δp_1 、 Δp_2

可通过联立式(11)、(12)和(13)求解得到:

$$\begin{cases} \Delta p_1 = \int_{S_1} \frac{dp}{dl} \bigg|_1 ds \\ \Delta p_2 = \int_{S_2} \frac{dp}{dl} \bigg|_2 ds \\ Q_1 \Delta p_1 = Q_2 \Delta p_2 \\ Q_1 + Q_2 = Q_p + Q_d \end{cases} \quad (14)$$

其中, 下标 1 代表出土点环空, 下标 2 代表入土点环空。

当入口压力大于维持定常层流所需的压力差时泥浆发生流动。所以可用压力差 Δp_1 和 Δp_2 中的较大值表示泥浆发生双侧流动最小需要压力 p_{r1} :

$$p_{r1} = (\Delta p_1, \Delta p_2)_{\max} \quad (15)$$

根据压力梯度计算式, 出 (入) 土点环空内沿环空轴线任一点处运动流体的压力 p_j 可由下式计算:

$$p_j = p_m - \int_{S_j} \frac{dp}{dl} \bigg|_i ds \quad (16)$$

其中, S_j 为扩孔器至计算点之间的曲线; 当计算点位于出土点环空时, $i=1$, 计算点位于入土点环空时, $i=2$ 。

2.2.2 单侧流动

当入口压力仅能够维持出、入土点环空中某一个环空内的泥浆流动时, 泥浆将发生单侧流动。此时, 泥浆从维持定常层流所需压力差较小的环空中流向地面。因此用压力差 Δp_1 和 Δp_2 中的较小值表示泥浆发生单侧流动的最小需要压力 p_{r2} :

$$p_{r2} = (\Delta p_1, \Delta p_2)_{\min} \quad (17)$$

单侧流动时, 流动侧环空流体压力 p_j 可由式(16)计算。非流动侧环空流体压力 p_j 为静水压力:

$$p_j = \rho g h_f \quad (18)$$

其中, h_f 为环空出口与计算点之间的高差 (m)。

2.3 分析流程

基于上节提出的流动模型, 表 1 列出了大型水平定向钻泥浆流动方向的确定依据以及环空流量和泥浆压力计算式。

表 1 流动方向确定及环空流量、泥浆压力计算

Table 1 The determination of flow direction, flow rate and mud pressure

流动方向	确定依据	环空流量	泥浆压力
双侧流动	$p_{in} > p_{r1}$	式(14)	式(16)
单侧流动	$p_{r2} < p_{in} < p_{r1}$	$Q_p + Q_d$ 或 0	式(16) 或 (18)

相应的分析流程可总结如下:

(1) 将泥浆流变参数 (k, n, τ_0)、钻孔几何参数 (R_{in} 、 R_{out} 、 R'_m 、 R'_{out} 、 S_1 、 S_2)、施工参数 (Q_p 、 v_d) 和土体参数 (φ) 代入式(14)中得到 Δp_1 、 Δp_2 ;

(2) 根据式(10)、(15)和(17)分别计算 p_{r1} 、 p_{r2} 和 p_{in} ;

(3) 依据表 1 确定流动方向, 并选择对应的公式计算环空流量和泥浆压力。

3 实例分析

3.1 工程概况

以泾河污水管线穿越工程管道回拖阶段为例进行泥浆流动分析, 该工程穿越长度 972 m, 铺设管道外半径 0.63 m, 采用五级分级扩孔。分析用到的有关参数如表 2 所示。

表 2 主要参数
Table 2 Main parameters

参数	值
穿越长度 (m)	972
L_1 、 L_2 、 L_3 、 L_4 、 L_5 长度 (m)	62、150、469、175、116
出土点高差 Δh (m)	2.93
入土角 α ($^\circ$)	10
出土角 β ($^\circ$)	14
曲率半径 R_3 (m)	612
曲率半径 R_4 (m)	1000
管道外半径 (m)	0.63
钻杆长度 (m)	9.6
钻杆外半径 (m)	0.219
土体孔隙度 φ	0.4
偏心率 e	0
泥浆密度 (kg/m^3)	1138
泥浆屈服点 τ_0 (Pa)	8.001
泥浆稠度系数 k ($\text{Pa}\cdot\text{s}^n$)	0.06292
泥浆流性指数 n	0.789
入口压力 P_{in} (MPa)	0.5
扩孔直径 (m)	0.45, 0.6, 0.75, 0.9, 1.05
泥浆泵送流量 (m^3/min)	1.7
钻机回拉速度 (m/s)	0.057

3.2 泥浆循环最小需要压力

图 3 给出了管道回拖阶段泥浆循环最小需要压力的变化情况。可以看出, p_{r1} 始终大于 p_{r2} , 二者峰值点位置和变化规律不同: p_{r1} 在平衡点两侧均表现出

先增大后减小的趋势, 呈现出两个峰值点, 分别位于两个曲线段 (L_2 和 L_4) 与水平段 L_3 的交界处; p_{r2} 先增长后降低, 在平衡点 (出、入土点环空返浆流量相等^[8]) 处到达峰值。由式(15)和(17)可知, 最小需要压力与出、入土点环空压力差 Δp_1 和 Δp_2 有关, 管道回拖过程中, 扩孔器位置的改变使 Δp_1 和 Δp_2 发生变化, 进而导致了图 3 所示的最小需要压力的变化。

同时, 通过计算 p_{r1} 和 p_{r2} 可以得到不同流动模式的压力取值范围 (图 3)。红色区域代表双侧流动区; 黄色区域代表单侧流动区, 泥浆仅从入、出口压力差较小的环空流动至地面; 绿色区域表明静止区, 此区域压力将不足以维持泥浆系统的循环。良好的返浆流动将有利于润滑器具、稳定孔壁、输移岩屑和冷却钻头, 因此, 应确保入口压力取在双侧流动区, 但同时应注意压力过大引起水力劈裂。根据峰值点的位置, 建议选取曲线段与水平段的交点处的 p_{r1} 值作为泥浆泵送压力的确定依据。

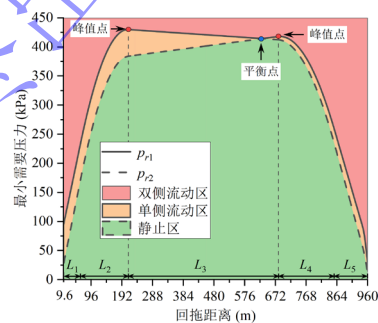


图 3 管道安装过程最小需要压力变化图

Fig.3 The minimum required pressure during pipeline pullback

3.3 返浆流量

因为在一个回拉阶段中, 出土点与入土点流量占比之和为 100%, 为节约篇幅, 本文仅以出土点流量为例进行分析。同时通过章节 3.2 分析可知此时入口压力 (0.5MPa) 处于双侧流动区, 泥浆流动方向为双侧流动。图 4 给出了管道安装过程中, 出土点流量占比随回拖距离的变化。

可以看出, 随着回拖距离增加, 不管是否考虑重力作用, 出土点流量占比均逐渐降低。但二者变化规律不同: 当考虑重力作用时, 在倾斜直线段 L_1 和 L_5 , 出土点流量随着扩孔器移动迅速下降。在其他曲线段, 流量随回拉进程的变化速率较小。而当不考虑重力作用时, 流量变化速率在回拉全程变化不大。

这是因为当考虑重力作用时, 维持泥浆流动的压差力需要与泥浆的粘性切应力和重力平衡, 而在倾斜直线段 L_1 和 L_5 , 扩孔器深度 h (扩孔器与出土点间的高差) 随着回拉快速变化, 虽然此时泥浆重力引起的压差力变化在出土点环空和入土点环空是相同的, 但粘

性切应力与重力的比例发生了变化,进而导致维持出、入土点环空泥浆流动所需的压力差 Δp_1 和 Δp_2 的比例发生剧烈变化,所以此时出土点流量随着回拉迅速下降。而当不考虑重力作用时,维持出、入土点环空泥浆流动的压差力仅需要与泥浆的粘性切应力平衡,此时 Δp_1 和 Δp_2 的变化与扩孔器所处深度无关。

当回拉至倾斜直线段 L_1 和 L_5 时出、入土点流量占比快速变化说明在管道安装的初期和末期,应及时合理分配出、入土点处的吸污车数量,避免因泥浆无法及时回收而导致的地面污染。

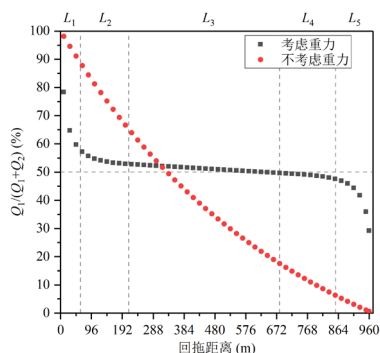


图 4 管道安装过程出土点返浆流量变化图

Fig.4 Change in Q_1 with pipeline pullback operation

为验证理论在实际工程的适用性,在工程现场统计了出、入土点处吸污车抽取的泥浆体积,计算出管道安装过程中实际的累计返浆体积,并与理论数据进行对比,对比结果如图 5 所示。可见,理论值较好的预测了出、入土点的累计返浆体积,相较于实测值,理论值在出、入土点处的平均绝对误差分别为 8.04m^3 和 33.01m^3 ,分别占总返浆体积的 1.09%和 4.46%,表明理论方法的精度可以较好地满足工程应用需求。

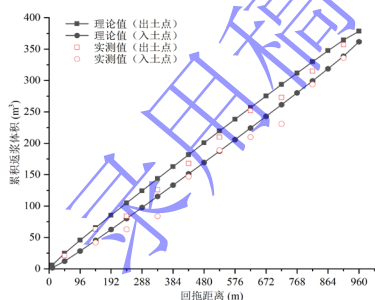


图 5 出、入土点累计返浆体积理论值与实测值对比图

Fig.5 Comparison between the theoretical and field data

同时应注意到,理论推导过程中假定泥浆不会流失到地层中,但由于该工程穿越地层为中砂层,实际返浆流动中泥浆流失不可避免,这也是实测值与理论值存在误差的原因之一。当发生泥浆流失时,理论值会过高估返浆流量,在高渗透性地层应用本文方法时应对此予以考虑。

3.4 钻孔压力分布

明确钻孔内的压力分布有助于分析孔壁稳定性问题,预防漏浆或塌孔问题的发生。通过式(16)和式(18)可以计算管道安装过程中的钻孔压力在钻进路径上的分布情况,图 6 给出了扩孔器位于 3 个不同位置时钻孔压力的分布,其中 z 为钻进距离, h 为钻进深度。可以看出,钻孔压力沿钻进路径的分布表现出先增大后减小的趋势;钻进路径上一点处的钻孔压力随扩孔器移动先减小后增大。这是因为随着扩孔器的移动,环空泥浆入口位置发生了变化,扩孔器深度越大,泥浆维持流动克服重力作用所需的压力差越大。同时,非水平段钻孔压力的变化速率明显大于水平段的情况也表明考虑重力影响的必要性。

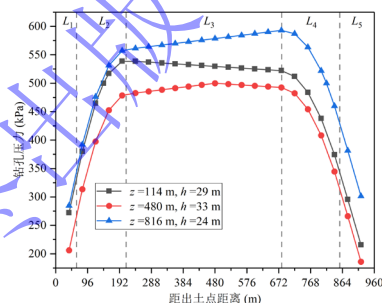


图 6 管道安装过程钻孔压力分布

Fig.6 Distribution of drilling pressure during pipeline pullback

4 参数分析

基于提出的模型,对管道回拖及扩孔施工阶段一些关键参数对泥浆流动的影响进行了分析。在管道回拖阶段,分析了泥浆流变特性、偏心率以及出、入土点高差的影响,在扩孔施工阶段,分析了扩孔循环(孔径比)和扩孔级差的影响。

4.1 泥浆流变特性

图 7-图 9 给出了不同泥浆流变参数下管道回拖过程中最小需要压力、返浆流量以及钻孔压力的变化情况。可以看出,相较于屈服点 τ_0 ,稠度系数 k 和流性指数 n 对上述参数的影响较小。这是因为大型水平定向钻返浆流速较小(数量级通常为 10^{-2} - 10^{-3} m/s [20]),泥浆的剪切速率较低,此时泥浆的切应力主要由屈服点 τ_0 控制(参见式(2))。这也表明在进行大型水平定向钻返浆流动分析时,有必要考虑泥浆的屈服特性。

实际工程中往往通过改变膨润土与添加剂含量的方式来改变泥浆的流变参数,以提高其携渣、稳定孔壁的性能。而膨润土含量会导致屈服点增大 [14],进而导致泥浆循环最小需要压力 p_{r1} 和 p_{r2} 增大(图 7),

这意味着当提高膨润土含量时，需要更大的泵送压力来保证泥浆在钻孔内的循环。因此，在添加膨润土含量提高泥浆性能的同时，还应关注泵送设备是否满足因添加膨润土而增加的泵送压力需求。

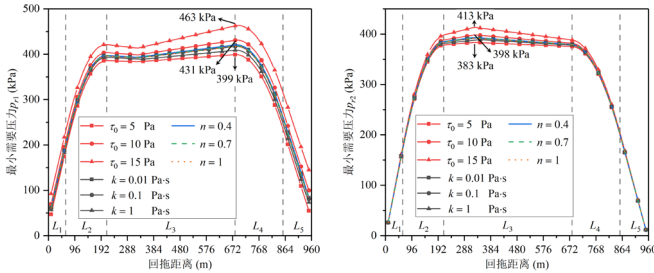
(a) p_{r1} (b) p_{r2}

图 7 泥浆流变参数对最小需要压力的影响

Fig.7 Influence of rheological parameters on the minimum required pressure

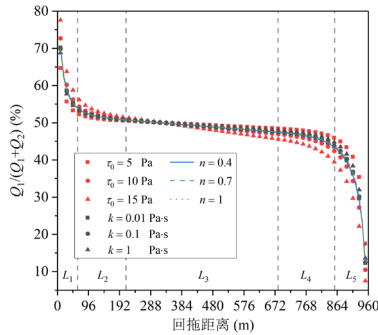


图 8 泥浆流变参数对出土点返浆流量的影响

Fig.8 Influence of rheological parameters on flow rate

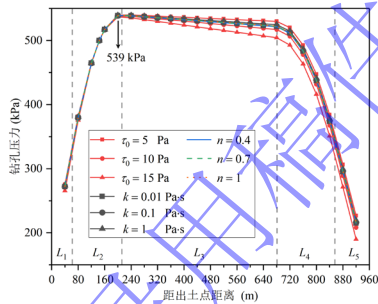


图 9 泥浆流变参数对钻孔压力的影响

Fig.9 Influence of rheological parameters on drilling pressure

在双侧返浆时，泥浆屈服点越大，出、入土点的流量差异越大(图 8)。在到达平衡点前，屈服点越大，出土点流量占比越高，在经过平衡点后，则反之。同时，屈服点的改变对平衡点位置的影响并不明显。由图 9 可以看出，在入口压力一定的情况下，屈服点越大，钻孔内压力越低，这是因为屈服点越大，泥浆流动的摩擦压力损失越大。

4.2 偏心率

管道回拖过程中，由于浮力作用，管道一般并不

处于环空中心，使得返浆流动的环形空间为偏心环空。图 10 和图 11 分别给出了不同偏心率下最小需要压力和返浆流量随回拖过程的变化情况。可以看出，在到达平衡点前，最小需要压力和出土点返浆流量随偏心率增大而降低，在经过平衡点后则反之。这与偏心会降低泥浆摩擦压力损失有关。同时，偏心率对最小需要压力 p_{r1} 的影响相较于 p_{r2} 更大，表明 p_{r1} 受泥浆切应力的影响更大，在计算最小循环压力时若不考虑偏心的影响会导致结果偏大。

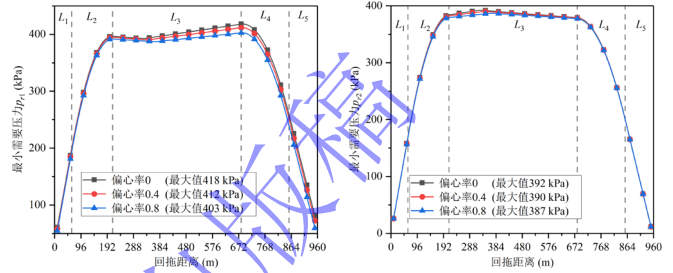
(a) p_{r1} (b) p_{r2}

图 10 偏心率对最小需要压力的影响

Fig.10 Influence of eccentricity on the minimum required pressure

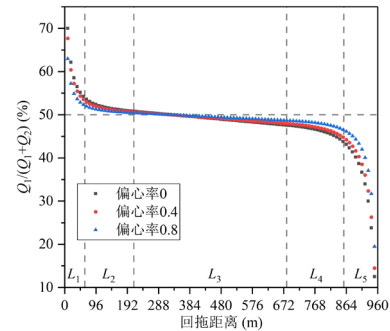


图 11 偏心率对出土点返浆流量的影响

Fig.11 Influence of eccentricity on flow rate

4.3 出、入土点高差

本文考虑下列 3 类情况：(1) 出土点高于入土点 ($\Delta h = -4\text{ m}$ 、 -2 m)；(2) 出、入土点高度相同 ($\Delta h = 0\text{ m}$)；(3) 入土点高于出土点 ($\Delta h = 4\text{ m}$ 、 2 m)。

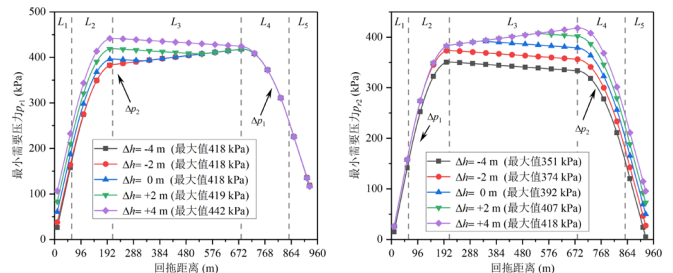
(a) p_{r1} (b) p_{r2}

图 12 出、入土点高差对最小需要压力的影响

Fig.12 Influence of the height difference between the entry and exit points on the minimum required pressure

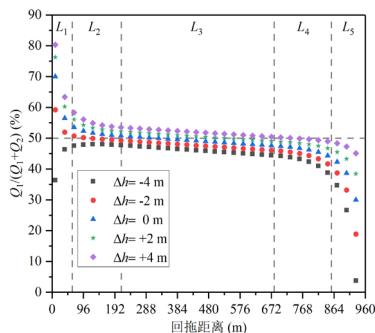


图 13 出、入土点高差对出土点返浆流量的影响

Fig.13 Influence of the height difference between the entry and exit points on flow rate

选取出土点为参考点，出、入土点高差改变即为入土点相对高度改变，高差越大，意味着入土点相对高度越高，从图 12 可以看出，高差对最小需要压力的影响与回拉阶段有关，当扩孔器到达平衡点前，高差增大会导致 p_{r1} 增大，但对 p_{r2} 无明显影响，在扩孔器经过平衡点后，高差增大会导致 p_{r2} 增大，但对 p_{r1} 无明显影响。这是因为回拉总是从出土点拉向入土点的，这意味着高差改变并不会改变扩孔器与出土点间的高差，所以高差改变对 Δp_2 的影响远大于 Δp_1 ，而在扩孔器到达平衡点前后， p_{r2} 和 p_{r1} 分别等于 Δp_1 ，所以扩孔器到达平衡点前，高差改变对 p_{r2} 无明显影响，扩孔器经过平衡点后，高差改变对 p_{r1} 无明显影响。

高差越大，泥浆越倾向于从出土点返回地面，出土点流量占比越高，且平衡点越靠近入土点（图 13），同时注意到，当出、入土点存在高差时，可能出现不存在平衡点的情况（图 13 $\Delta h=-4$ m：在各个回拉阶段，出土点流量占比始终小于 50%）。

4.4 扩孔循环（孔径比）

大型水平定向钻施工由于最终成孔半径较大，一般均需采取多级扩孔的方式逐步扩大钻孔孔径。对于返浆流动而言，扩孔施工主要改变的是钻孔孔径比（出土点环空外径与入土点环空外径之比），本节将分析扩孔循环施工对最小需要压力、返浆流量和钻孔压力的影响。1-5 级扩孔的泵送流量依次为 1、1.2、1.4、1.6、1.8 m^3/min 。

如图 14 所示，不同扩孔循环间，最小需要压力随钻进距离的变化模式并未改变，最小需要压力 p_{r1} 和 p_{r2} 均随钻进距离增加而减小。但是当不同扩孔循环钻进至同一位置时，最小需要压力值不同。这是因为随着扩孔器直径增加，孔径比逐渐减小，使得泥浆流动克服粘性切应力所需的压差力减小。

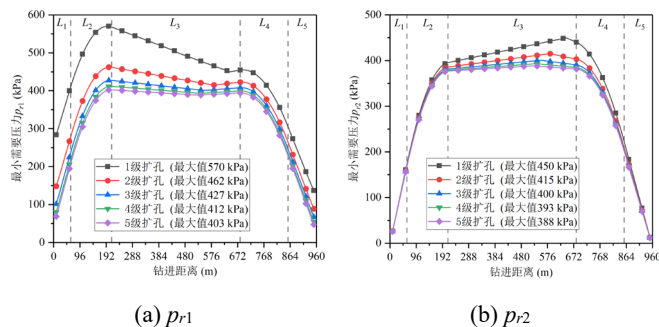


图 14 扩孔施工对最小需要压力的影响

Fig.14 Influence of reaming on the minimum required pressure

从图 15 可以看出，扩孔施工对出土点返浆流量的影响可以分为两部分：在扩孔器到达平衡点前，随着扩孔施工进行，出土点返浆流量减少；在扩孔器经过平衡点后，出土点返浆流量增加。同时，在 1 级扩孔过程中出现了泥浆单侧流动的情况。这与图 14 的计算结果相一致：在 1 级扩孔的部分回拉阶段中，入口压力（0.5MPa）位于单侧流动区（ $p_{r2} < p_{in} < p_{r1}$ ）。

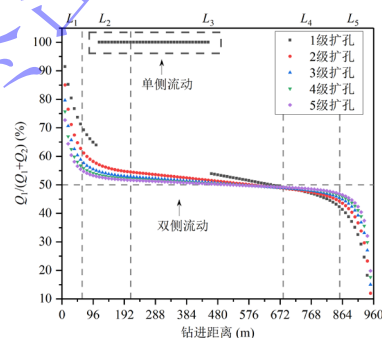


图 15 扩孔施工对出土点返浆流量的影响

Fig.15 Influence of reaming on flow rate

图 16 给出了各级扩孔过程中，钻进至 144 m 时钻孔压力沿轴向的分布情况，此时对 1 级扩孔而言，泥浆流动方向为单侧流动（图 15、图 16），入土点环空泥浆静止，压力为静水压力。从其他双侧返浆的扩孔施工阶段可以看出，随着逐级扩孔进行，钻孔内泥浆压力增大。

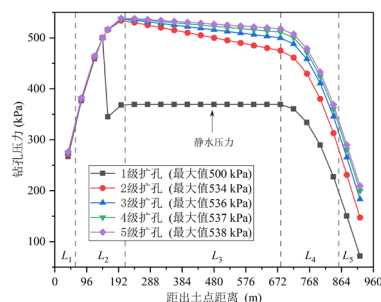


图 16 扩孔施工对钻孔压力的影响

Fig.16 Influence of reaming on drilling pressure

4.5 扩孔级差

扩孔级差为相邻两级扩孔直径之差,一般而言,较小的扩孔级差可以减小卡钻的风险,但会增加施工工期及施工成本。由图 17 可以看出,扩孔级差对最小需要压力的影响与回拉阶段存在明显的相关性。对 p_{r1} 而言,仅在钻进后期,扩孔级差对 p_{r1} 存在影响,扩孔级差越小, p_{r1} 越大。这是因为在钻进前期 $p_{r1}=\Delta p_2$,在钻进后期 $p_{r1}=\Delta p_1$,扩孔级差改变的仅是出土点环空的外径大小,即主要影响的是 Δp_1 的值;对 p_{r2} 而言,仅在钻进前期,扩孔级差对 p_{r2} 存在影响(扩孔级差越小, p_{r2} 越大),且这一影响随着钻进距离增加而增加。这是因为,一方面在钻进前期, p_{r2} 由 Δp_1 决定,另一方面,随着钻进距离增加,出土点环空长度变大,粘性切应力所占的比例相应增加。

图 18 和图 19 分别为不同扩孔级差时的出土点返浆流量和钻孔压力分布图,可以看出,扩孔级差越大,泥浆越倾向于从出土点返回地面(图 18),出土点环空钻孔压力越大(图 19)。但是扩孔级差对钻孔压力的影响与钻进距离有关,当钻进至 144 m 时,不同扩孔级差下的钻孔压力分布几乎无差别,但是当钻进至 816 m 时,扩孔级差越大,出土点环空钻孔压力越大。较小的扩孔级差对应较小的钻孔压力也表明,较小扩孔级差可以在钻进中后期降低水力劈裂的风险。

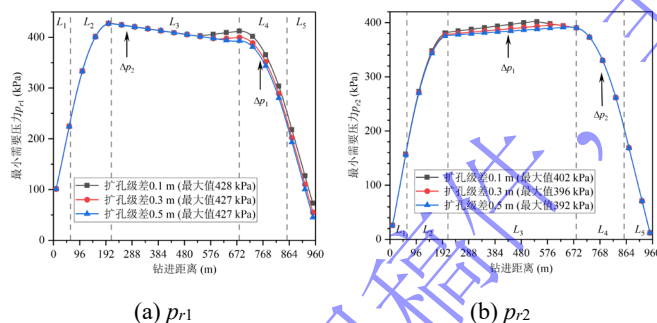


图 17 扩孔级差对最小需要压力的影响

Fig.17 Influence of reaming differential on the minimum required pressure

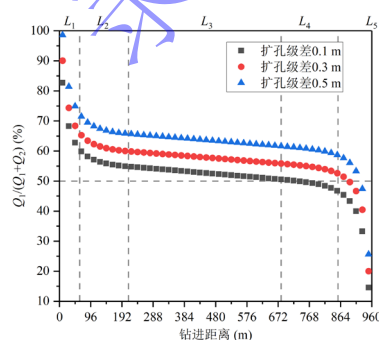


图 18 扩孔级差对出土点返浆流量的影响

Fig.18 Influence of reaming differential on flow rate

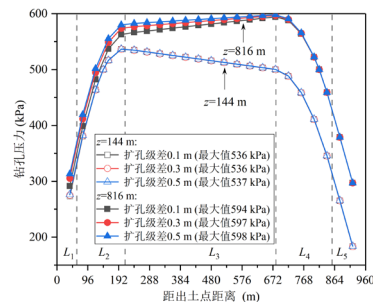


图 19 扩孔级差对钻孔压力的影响

Fig.19 Influence of reaming differential on drilling pressure

5 结论

本文提出了一种计算返浆流动方向、返浆流量、泥浆循环最小需要压力及钻孔压力分布的新方法,考虑了流动方向、出、入土点高差、泵送压力、泥浆重力、回拖操作、泥浆流变特性和环空尺寸等多种参数。通过工程实例验证了该方法的适用性。主要结论如下:

(1) 建立了泥浆泵送压力与返浆流动方向的关系,通过计算单侧流动和双侧流动的最小需要压力可以得到不同流动模式的压力取值范围。建议使用两个曲线段和水平段交界处较大的双侧流动最小需要压力作为确定泵送压力的依据。

(2) 重力对返浆流动存在影响,随着扩孔器移动,粘性切应力与重力的比值发生变化,导致出、入土点环空的最小需要压力、流量和钻孔压力发生变化,且这种变化在非水平段尤为显著。

(3) 屈服点对返浆流动的影响相较于稠度系数和流性指数更大,随着屈服点增大,需要更高的泵送压力来维持泥浆循环。偏心率越大,双侧流动最小需要压力和出土点返浆流量越小。

(4) 扩孔循环对返浆流量的影响和高差对最小需要压力的影响取决于扩孔器与平衡点的相对位置。在分级扩孔过程中,双侧及单侧流动的最小需要压力均有所降低。减少扩孔级差可以有效降低钻孔压力,防止水力劈裂。

参考文献:

- [1] BINA S M, FUJII H, TSUYA S, KOSUKEGAWA H, NAGANAWA S, HARADA R. Evaluation of utilizing horizontal directional drilling technology for ground source heat pumps[J]. Geothermics, 2020, 85:101769.
- [2] 李术才, 李利平, 孙子正, 刘知辉, 李梦天, 潘东东, 屠文锋. 超长定向钻注装备关键技术分析及发展趋势[J]. 岩土力学, 2023, 44(01):1-30. (LI Shucai, LI Liping, SUN

- Zizheng, LIU Zhihui, LI Mengtian, PAN Dongdong, TU Wenfeng. Analysis of Key Technologies and Development Trends of Ultra-Long Directional Drilling and Grouting Equipment [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2023, **44**(01):1-30.)
- [3] 孙平贺, 刘伟胜, 杨涵涵, 韦帮第, 夏余宏焯. 中国非开挖水平定向钻进装备与技术研究应用进展[J]. *工程科学学报*, 2021:1-10. (SUN Pinghe, LIU Weisheng, YANG Hanhan, WEI Bangdi, XIA Yuhongye. Research and Application Progress of China's Non-excavation Horizontal Directional Drilling Equipment and Technology [J]. *Journal of Engineering Science*, 2021:1-10.)
- [4] GAO H, LI G, MA X, GUO J, MA J. Special practices of horizontal directional drilling in China[C]. *International Conference on Pipelines & Trenchless Technology 2011*, **2011**:2216-2224.
- [5] YAN X F, MA B S, ZENG C, LIU Y. Analysis of formation fracturing for the maxi-HDD qin river crossing project in China[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **53**:1-12.
- [6] LAN H, MOORE I D. Numerical investigation of the circumferential stresses around boreholes during horizontal directional drilling[J]. *International Journal of Geomechanics*, 2017, **17**(12):04017114.
- [7] SHU B, MA B, ZENG C, LAN H. Preparation and recycling of drilling mud in large scale horizontal directional drilling projects in mainland China[C]. *International Conference on Pipelines & Trenchless Technology 2011*, **2011**:2049-2059.
- [8] SHU B, MA B S. The return of drilling fluid in large diameter horizontal directional drilling boreholes[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2016, **52**:1-11.
- [9] CAI L, HE L. Mechanical model for determining the crossover point of mud flow in pull-back of horizontal directional drilling installations[C]. *International Conference on Pipelines & Trenchless Technology 2009*, 2009.
- [10] DUYVESTYN G. Comparison of predicted and observed HDD installation loads for various calculation methods[C]. *Proc., No-Dig Conf., Cleveland*, 2009.
- [11] CAI L X, POLAK M A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **83**:313-323.
- [12] RABIBEI M, YI Y L, BAYAT A, CHENG R, OSBAK M. Estimation of hydrokinetic pressure and fluidic drag changes during pipe installations via HDD based on identifying mud-flow pattern change within a borehole[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2017, **8**(4):04017020.
- [13] ARIARATNAM S T, HARBIN B C, STAUBER R L. Modeling of annular fluid pressures in horizontal boring[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2007, **22**(5):610-619.
- [14] DENG S, KANG C, BAYAT A, KURU E, OSBAK M, BARR K, TROVATO C. Rheological properties of clay-based drilling fluids and evaluation of their hole-cleaning performances in horizontal directional drilling[J]. *Journal of Pipeline Systems Engineering and Practice*, 2020, **11**(3):04020031.
- [15] CAI L, POLAK M A. A theoretical solution to predict pulling forces in horizontal directional drilling installations[J]. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 2019, **83**:313-323.
- [16] BOURGOYNE A T, MILLHEIM K, CHENEVER M, YOUNG F S. *Applied drilling engineering*[M]. Richardson, TX: Society of Petroleum Engineers (SPE), 1991.
- [17] DOKHANI V, MA Y, LI Z, GENG T, YU M. Effects of drill string eccentricity on frictional pressure losses in annuli[J]. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 2020, **187**:106853.
- [18] SU H, MA H, HU B, QU C, WANG N. An analysis of drilling fluid pumping pressure for the maxi-HDD crossing project[J]. *Arabian Journal of Geosciences*, 2018, **11**(13).
- [19] YAN X, ZENG C, KONG Y, YANG C. Study on the flow model of annulus drilling fluid in the large diameter horizontal directional drilling[C]. *Pipelines 2013*, **2013**:757-766.
- [20] 闫雪峰. 大直径非开挖水平定向钻岩屑运移规律研究[D]. 中国地质大学, 2018. (YAN X F. Study on the Migration Law of Non-excavation Horizontal Directional Drilling Sludge with Large Diameter [D]. China University of Geosciences, 2018.)