

DOI: 10.7672/sgjs2025080144

# 水平定向钻进泥浆清孔性能优化试验与模拟研究\*

李亚隆

(中交二公局东萌工程有限公司, 陕西 西安 710119)

[摘要] 水平定向钻进是一种广泛应用于地下管道铺设的非开挖技术。近年来,该技术不断向大直径、长距离穿越方向发展,但钻孔直径的增大会显著降低泥浆流速,削弱其携岩能力,导致钻孔清洁不彻底,进而引发卡钻、钻杆断裂甚至铺管失败等工程事故。为解决大直径水平定向钻进施工中钻孔清洁问题,以水平定向钻进泥浆的清孔性能为研究对象,结合大直径水平定向钻进工程特点,建立环空泥浆流动方程组,发现流核区直径越大,压降梯度越小,清孔性能越好;拟合泥浆流变模型,发现赫-巴模型能准确描述泥浆流变特性,特定粒径钻屑能增大动切力;数值模拟结果表明,入口流速和环空直径比能提高清孔效率。

[关键词] 地下工程;定向钻进;泥浆;清孔性能;流变特性

[中图分类号] TU554

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)08-0144-07

## Experimental and Numerical Research on Hole Cleaning Performance Optimization of Horizontal Directional Drilling Mud

LI Yalong

(CCCC Second Highway Engineering Co., Ltd. Dongmeng Engineering Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710119, China)

**Abstract:** Horizontal directional drilling is a trenchless technology widely used in underground pipeline laying. In recent years, the technology is continuously developed in the direction of large diameter and long distance crossing. However, the increase of borehole diameter will significantly reduce the mud flow rate and weaken its rock carrying capacity, resulting in incomplete cleaning of boreholes, which will lead to engineering accidents such as pipe sticking, drill pipe fracture and even pipe laying failure. In order to solve the problem of hole cleaning in the construction of large-diameter horizontal directional drilling, the hole cleaning performance of horizontal directional drilling mud is taken as the research object. Combined with the characteristics of large-diameter horizontal directional drilling engineering, the annular mud flow equations are established. It is found that the larger the diameter of the flow core area is, the smaller the pressure drop gradient is, and the better the hole cleaning performance is. Fitting the rheological model of mud, it is found that the Herschel-Bulkley model can accurately describe the rheological properties of mud, and the specific particle size of drilling cuttings can increase the dynamic shear force. The numerical simulation shows that the ratio of inlet velocity to annulus diameter can improve the hole cleaning efficiency.

**Keywords:** underground engineering; directional drilling; mud; hole cleaning performance; rheological properties

### 0 引言

地下管线是保障人类社会稳定运行的重要基础设施,具有跨地域输送自然资源、维持城市功能稳定运转的作用,为经济社会的生产生活提供了必

要的物质资源<sup>[1]</sup>。非开挖工程技术被用于新管线的铺设和旧管线的修复和更新<sup>[2]</sup>。其中,水平定向钻(horizontal directional drilling, HDD)技术是一种应用于管道铺设的非开挖工程技术,被广泛用于铺设各类地下管线<sup>[3-4]</sup>,特别是在穿越江河湖泊、市政公路、文物保护区的管道铺设工程中发挥了巨大的技术优势<sup>[5]</sup>。水平定向钻技术虽在大直径、长距离

\* 中交二公局东萌工程有限公司科技研发项目(2021-6-30)

[作者简介] 李亚隆,高级工程师, E-mail: 284242513@qq.com

[收稿日期] 2025-01-20

方面不断实现突破,但仍面临一系列工程挑战<sup>[6]</sup>。钻孔直径通常为管道直径的 1.2~1.5 倍,并随管道直径的增大而增大,导致钻孔环空中的泥浆流速明显降低<sup>[7]</sup>。在扩孔阶段,扩孔器切削岩土体产生大量钻屑颗粒。由于泥浆流速较低,泥浆运移钻屑的效率急剧降低,导致钻屑颗粒堆积于钻孔孔壁,形成钻屑床<sup>[8]</sup>。在南水北调配套工程沙颍河穿越段施工中,扩孔器断裂事故导致该段工期延误 1 个月<sup>[9]</sup>。因此,在大直径水平定向钻穿越工程中,提高钻孔清洁效率已成为该技术成功应用所面临的重要挑战。

结合大直径水平定向钻施工特点,本文开展泥浆清孔性能研究,通过理论分析、室内试验和计算流体力学数值模拟的研究方法对钻屑运移规律、泥浆流变特性、泥浆流动规律进行深入研究,为水平定向钻现场泥浆的配制、泥浆压力设计、现场施工指导提供了理论和试验依据。

## 1 水平定向钻进泥浆清孔性能影响因素分析

### 1.1 环空泥浆流场分析

为了对环空泥浆流动进行定量描述,本研究采用流体动力学方程构建环空泥浆流场模型。泥浆作为常见的流体,其流动遵循基本物理学原理,基于连续介质理论和牛顿第二定律,可采用三大基本方程描述,分别为质量守恒方程、动量守恒方程和能量守恒方程,统称为 N-S 方程<sup>[10]</sup>。

流体的流变模型反映了泥浆力学行为特性,表征了剪切应力与剪切应变速率间的关系<sup>[11]</sup>。泥浆主要由水、膨润土和各类添加剂配制而成,大多为非牛顿流体,具有显著的流变特性。泥浆的流变特性是指泥浆在外加剪切应力作用下发生变形和流动,即泥浆受到的剪切应力与产生的剪切应变速率间的关系<sup>[12]</sup>。为求解泥浆微元的运动方程组,基于赫-巴流变模型,推导了剪切应力张量  $\mathbf{T}$  与流体流速  $\mathbf{U}$  的数学关系。

综上,可得环空泥浆流动的偏微分方程组,其矢量形式为:

$$\begin{cases} \nabla \cdot (\rho \mathbf{U}) = 0 \\ \frac{\partial \rho \mathbf{U}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{U} \mathbf{U}) = -\nabla p + \nabla \cdot \mathbf{T} \\ \mathbf{T} = \tau_s + K \cdot [\nabla \mathbf{U} + (\nabla \mathbf{U})^T]^n \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\rho$  为流体密度; $t$  为时间; $p$  为流体压强; $\tau_s$  为流体动切力; $K$  为流体黏稠度; $n$  为流性指数。

### 1.2 流场压降梯度分析

为研究泥浆在钻孔流动过程中的压力变化,通常采用环空流动试验方法对环空管道中流动泥浆

压降梯度进行测试。

对于泥浆流速的影响,采用不同泥浆和环空管道进行试验,泥浆流变模型均符合赫-巴模型,流速大多位于层流流态范围内,环空管道倾角为竖向和水平向。对试验数据进行压降梯度归一化处理后发现,当泥浆处于层流流态时,竖向与水平向环空中的压降梯度均随流速增大而增大,但其增长率随流速增大呈递减趋势。对于钻杆旋转的影响,采用不同条件进行试验,针对试验中符合赫-巴模型的泥浆,选取处于层流流态下压降梯度数据。可以得到,在完全偏心环空中,随着转速的增大,压降梯度不断增大。在同心环空中压降梯度随着转速的增大而减小,最大降幅为 25%~66%。由于钻杆旋转可引起惯性效应,会对泥浆流动产生额外扰动,导致压降梯度增大。此外,泥浆作为非牛顿流体,流动时存在剪切稀释效应,即随着流速增大,泥浆黏度减小。泥浆的剪切稀释效应导致压降梯度减小。

此外,环空偏心和钻屑颗粒对压降梯度均有显著影响,环空偏心可降低压降梯度,注入钻屑颗粒会增大压降梯度。

### 1.3 钻屑运移效率分析

为研究泥浆流动中的钻屑运移规律,广泛采用钻屑运移试验方法。该试验系统在环空流动试验系统的基础上,还需增设注入装置、收集装置及运移过程观测装置。

对于泥浆流速的影响,选取不同泥浆进行试验。可以得到,在湍流态下增大泥浆流速可有效提高钻屑运移效率。然而,在大直径水平定向钻孔施工中,由于钻孔直径较大,泥浆通常保持层流状态而难以形成湍流,因此依靠泥浆高速冲蚀作用的方法并不适用。对于钻杆旋转的影响,研究结果显示,钻杆旋转有利于钻屑的运移,钻杆旋转对小钻屑输送效率的提高是大钻屑输送效率的 2 倍。此外,添加剂、钻屑粒径、环空倾角等也对钻屑运移规律有影响。

## 2 试验研究

### 2.1 流变性能测试原理与仪器

为准确测得流体流变参数,需对流体施加单一一流场。流变特性测试中常用的单一一流场主要有剪切流场和拉伸流场。在不同工艺中,选用的流场也不同。为模拟钻孔环空中泥浆流场,选用单一的剪切流场进行流变性能测试。

根据施加流场方式的不同,剪切测试的流变仪可分为毛细血管流变仪和旋转流变仪<sup>[13]</sup>。毛细血管流变仪通过挤压流体的方式施加剪切流场,旋转

流变仪通过锥板或圆筒的旋转施加剪切流场<sup>[14]</sup>。旋转流变仪常用的夹具为平行板、锥板和同轴圆筒。六速旋转黏度计是一种适用于测试低黏度流体的旋转流变仪,因其操作简便且测量准确,被推荐用于泥浆流变特性测试<sup>[15]</sup>。

## 2.2 石英砂筛分试验

在水平定向钻施工过程中,钻头切削破碎岩土体产生大量颗粒。在本试验中,选用石英砂代替钻屑颗粒,探究其对泥浆流变性能和流场特征的影响。

为得到粒径范围较小的石英砂颗粒,参考 GB/T 50123—2019《土工试验方法标准》中的筛析法,利用电动振动机和试验筛对石英砂进行筛分。试验中获得的石英砂颗粒如图 1 所示。

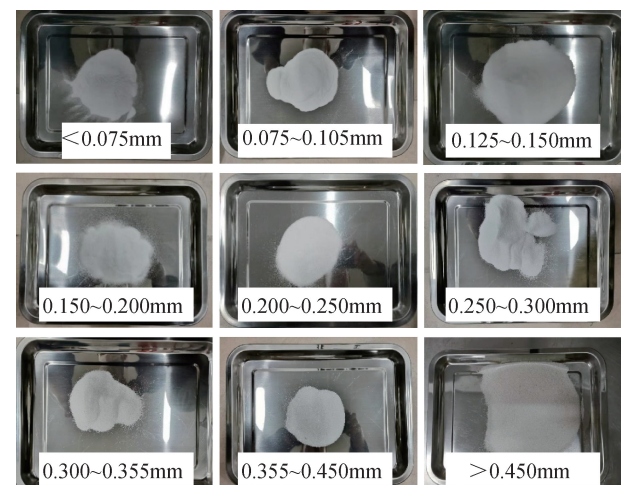


图 1 筛分试验得到的石英砂颗粒

Fig. 1 Quartz sand particles obtained from screening experiment

## 2.3 含钻屑膨润土泥浆流变特性试验

使用工业级钠基膨润土配制水基泥浆。在非开挖水平定向钻施工中,被广泛推荐使用的泥浆膨润土含量为 3%~7%。本试验配制的泥浆中膨润土含量为 5.5%。

采用旋转流变仪进行流变性能测试。试验中的流变仪为安东帕 MCR302 高级智能流变仪。在测试过程中,通过电脑控制程序将旋转流变仪剪切速率分别设定为 5.11, 10.22, 170.33, 340.66, 510.99, 1 021.80s<sup>-1</sup>。利用搅拌器辅助配制水基泥浆样品,待膨润土泥浆静置水化完成后,向膨润土泥浆中缓慢倒入称取的钻屑颗粒。试验中添加的石英砂含量如表 1 所示。

## 2.4 泥浆流变特性分析

为消除偶然误差的影响,对不同石英砂含量的泥浆样品分别进行多次测试,结果显示,泥浆发生

表 1 石英砂含量

Table 1 Content of quartz sand

粒径/mm	石英砂含量/%	增量/%
0.075~0.105	5~30	5
0.105~0.125	5~30	5
0.250~0.300	5~30	5

流动需要一定的剪切应力;随着剪切速率的增加,剪切应力的增幅减缓,表现出剪切稀释特性。这表明含石英砂的膨润土泥浆可采用赫-巴模型描述。

通过 Origin 软件对试验测试得到的数据进行拟合。不含石英砂的膨润土泥浆拟合得到的确定系数为 0.990 14。含石英砂的膨润土泥浆确定系数如表 2 所示。可以看出,确定系数最小为 0.982 42,最大为 0.999 37,所有确定系数均接近于 1,赫-巴模型对试验测试数据的拟合度良好,可用于描述试验测试的膨润土泥浆流变特性。

表 2 含不同石英砂的膨润土泥浆确定系数

Table 2 Determination coefficient of bentonite slurry containing different quartz sand

粒径/mm	石英砂含量/%	确定系数 R <sup>2</sup>
0.075~0.105	5	0.986 25
	10	0.982 42
	15	0.990 48
	20	0.991 59
	25	0.988 90
	30	0.993 76
0.105~0.125	5	0.998 77
	10	0.995 93
	15	0.992 96
	20	0.998 65
	25	0.997 79
	30	0.998 16
0.250~0.300	5	0.999 37
	10	0.997 16
	15	0.997 22
	20	0.997 49
	25	0.997 54
	30	0.997 32

对试验中测试数据按赫-巴模型进行非线性拟合,得到每种膨润土泥浆流变参数如图 2 所示。

由图 2a 可知,加入不同粒径石英砂,泥浆动切力变化不同。小粒径石英砂可被泥浆较好地悬浮,随着石英砂含量增加,石英砂颗粒与黏土颗粒的接触概率增大,石英砂与黏土颗粒间的内摩擦力增大,因而动切力增大。而加入较大粒径石英砂则相反。由图 2b 可知,在石英砂含量为 5%~15%时,相同石英砂含量的泥浆稠度系数随钻屑粒径增大而减小。对于石英砂对流性指数的影响,由图 2c 可知,不同粒径石英砂加入泥浆后,随着石英砂含量的增加,泥浆流性指数先增大后减小。

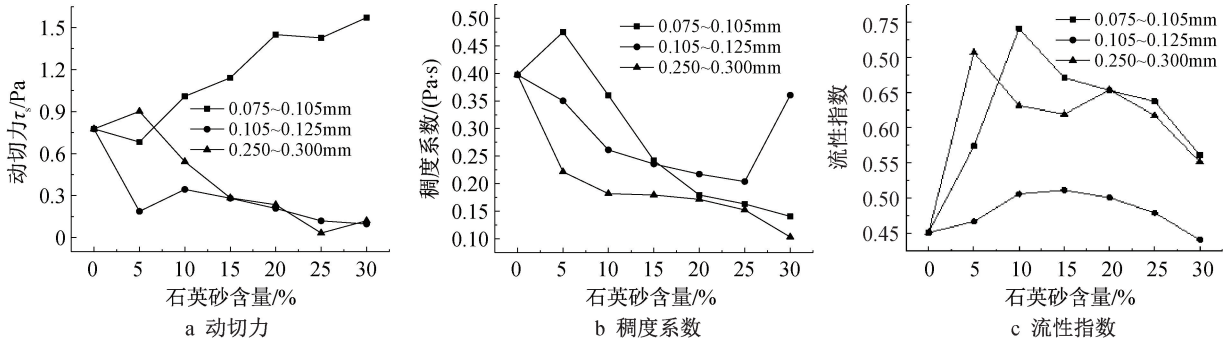


图2 膨润土泥浆流变参数拟合曲线

Fig. 2 Fitted curves of rheological parameters for bentonite slurry

## 2.5 泥浆流动特性分析

为评估钻屑颗粒对泥浆清孔性能的影响,利用相关案例,对压降梯度和流核区直径进行分析,如图3所示。

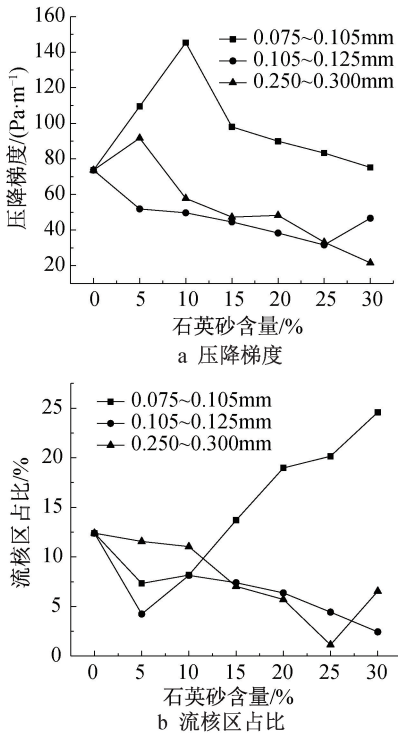


图3 泥浆流动特性分析

Fig. 3 Analysis of slurry flow characteristics

图3a对比了3种粒径石英砂不同含量下压降梯度变化规律,可知粒径及石英砂含量对压降梯度有直接影响。相较于中、粗粒径,细粒径石英砂显著增大了泥浆压降梯度,显示泥浆具有较大流动阻力。此外,当石英砂含量 $>10\%$ 时,压降梯度随石英砂含量增加逐渐减小,展示出较好流动性。为直观地比较流核区直径,根据环空直径对流核区直径作归一化处理(即流核区占比),得到如图3b所示的变化曲线。由图3b可知,不同粒径石英砂对应的流核区占比变化趋势不同。细粒径石英砂流核区占

比明显高于中、粗粒径石英砂,与压降梯度变化规律一致。

## 3 数值模拟研究

### 3.1 环空泥浆流动数值模型建立

利用环空流场模型运动方程组建立控制方程、流变模型。根据工程实践经验,钻孔直径为0.73~2.28m。单节钻杆长度为9m,直径为89,140,168,225mm。泥浆在大直径钻孔环空中处于层流流态,环空返回的平均流速一般为0.1m/s。结合工程实践中各工况参数一般取值范围,选取泥浆流变参数,如表3所示。

表3 初始模型中各类参数

Table 3 Various parameters in the initial model

输入参数	设定值	输入参数	设定值
钻孔直径 $D_b$ /mm	1 200	稠度系数 $K$ /(Pa·s)	1
钻杆直径 $D_r$ /mm	168	流动性指数 $n$	0.5
环空长度 $l_r$ /cm	90	入口流速 $v_{in}$ /(m·s <sup>-1</sup> )	0.1
环空偏心率 $e$	0	出口压力 $P_{out}$ /kPa	101.325
动切力 $\tau_s$ /Pa	1		

环空直径比  $r$ 、偏心率  $e$  计算分别如式(2)、(3)所示。

$$r = \frac{D_r}{D_b} \quad (2)$$

$$e = \frac{\delta}{D_b - D_r} \quad (3)$$

结合工程实践参数,对水平钻孔环空进行三维几何建模。对单节钻杆与钻孔形成的环空在笛卡尔坐标系下建立模型,钻孔直径为1 200mm,钻杆直径为168mm,其中钻孔环空长度为9m。假设泥浆为不可压缩流体,充满整个钻孔环空,进行等温层流流动,温度维持在25℃,处于稳定状态。

钻孔环空进口边界条件设为速度入口,其速度值根据不同工况下的泥浆参数确定,方向垂直于环空进口截面。钻孔环空出口边界条件为压力出口,压力值取标准大气压。钻孔孔壁设置为相对无滑

移边界,不存在湍流脉动。计算域的网格模型中,共有 954 867 个单元,其中有 858 065 个四面体单元,96 800 个棱柱单元。为节省建模时间,对每种工况下的变量做参数化扫描,利用 Comsol Multiphysics 求解器在变量设定范围内进行计算。

为探究泥浆流速、钻孔几何参数、钻杆状态等对钻孔环空中泥浆流动规律的影响,在模型的初始变量中对入口流速、环空内外直径比、钻杆偏心率分别进行设定,设计的模拟工况如表 4 所示。

表 4 模型中各工况下参数设计

Table 4 Parameter design under various working conditions in the model

工况	初始变量	参数取值
1	入口流速 $v_{in}/(m \cdot s^{-1})$	0.02~0.12
2	钻杆偏心率 $e$	0.1~0.6
3	环空直径比 $r$	0.08~0.16

### 3.2 数值模型有效性验证

为评估基于 CFD 的数值模型对钻孔环空中泥浆流动进行预测的可靠性,利用环空流动系统对膨润土泥浆在不同流速下的压降梯度展开研究。环空管道总长 5m,压力测试段长 0.9m,管壁视为光滑无摩擦。泥浆流变模型为赫-巴模型,流动泥浆温度保持在 24℃。根据试验条件,数值模型中各类输入参数的设定如表 5 所示。

表 5 数值模型中各类参数

Table 5 Various parameters in the numerical model

模型参数	设定值	模型参数	设定值
钻孔直径 $D_h/mm$	70	流性指数 $n$	0.879 8
钻杆直径 $D_t/mm$	40	环空偏心率 $e$	0
环空长度 $l_t/cm$	90	入口流量	$7.11 \times 10^{-4} \sim$
		$Q_{in}/(m^3 \cdot s^{-1})$	$32.38 \times 10^{-4}$
动切力 $\tau_s/Pa$	1.073	出口压力	101.325
		$P_{out}/kPa$	
稠度系数 $K/(Pa \cdot s)$	0.008 8		

根据数值模拟与试验测试得到压降梯度随流量的变化曲线,如图 4 所示。可以看出,随着流量增大,试验测试与数值模拟得到的压降梯度均增大。对比 2 种方法得到的压降梯度误差发现:在流量为  $15.30 \times 10^{-4} m^3/s$  时,相对误差达最大值 15.74%;在流量为  $32.38 \times 10^{-4} m^3/s$  时,相对误差达最小值 5.62%;2 种方法平均相对误差为 9.71%。因此,数值模拟结果能较好地吻合试验测试数据,数值模拟得到的数据具有良好的可信度,可证实基于 CFD 的数值模型在钻孔环空内泥浆流动计算中的可靠性。

### 3.3 数值模拟结果分析

为得到不同入口流速下泥浆轴向流速的准确分布,沿径向均匀提取流速数据,绘制环空剖面中

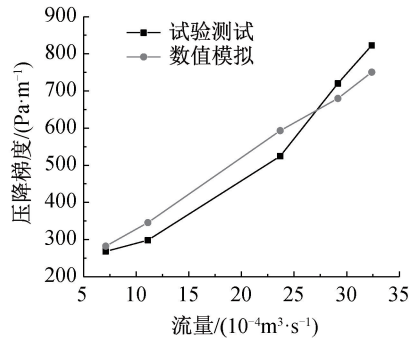
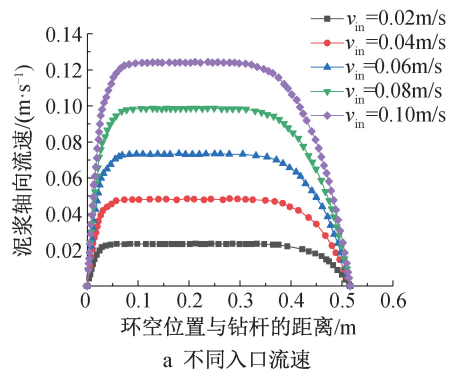


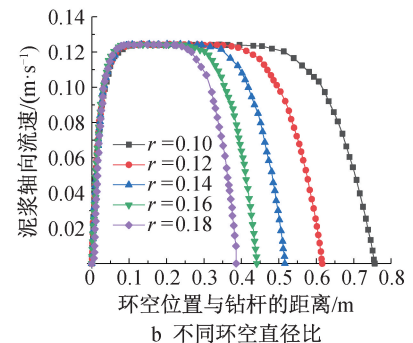
图 4 试验测试与数值模拟计算得到的压降梯度

Fig. 4 Pressure drop gradient obtained from experimental test and numerical simulation

泥浆轴向流速分布曲线,如图 5a 所示。从图 5a 中可看出,在不同入口流速下,泥浆轴向流速近似呈对称分布,从环空两端向流核区不断增大。随着入口流速的增大,流核区直径逐渐减小,流核区轴向速度不断增大。环空中钻屑的运移主要依赖流核区的泥浆,因而入口流速越大,越有利于泥浆对钻屑的运移。不同环空直径比下泥浆轴向流速分布如图 5b 所示,随着环空直径比增大,流核区流速不变,流核区直径不断增大。



a 不同入口流速



b 不同环空直径比

图 5 环空流场中流速分布分析

Fig. 5 Analysis of flow velocity distribution in an annular flow field

不同入口流速下钻孔环空中泥浆流动的压降梯度如图 6a 所示,在不同入口流速下,泥浆压降梯度沿着流动方向随钻孔长度呈线性变化,且不断减

小。随着入口流速的增大,泥浆压降梯度不断增大,且压降梯度的增大幅度趋于平缓。不同环空直径比下泥浆流动的压降梯度如图 6b 所示,泥浆压降梯度沿流动方向随钻孔长度呈现线性递减趋势。泥浆的压降梯度随环空直径比的增大而不断增大,且二者表现出近似线性递增的关系。

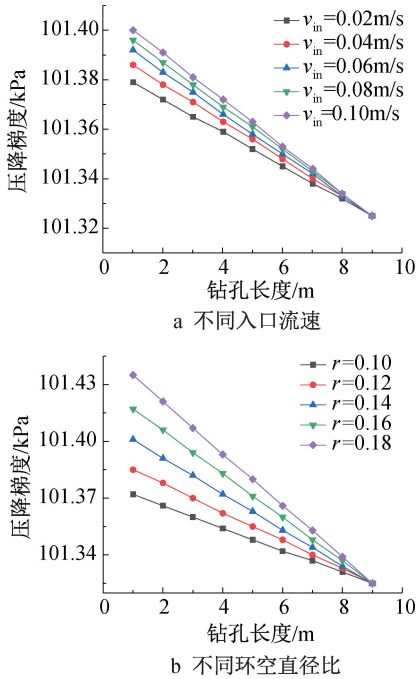


图 6 环空流场中压降梯度分析

Fig. 6 Analysis of pressure drop gradients in an annular flow field

## 4 工程应用

### 4.1 工程概况

天山胜利隧道(见图 7)是 G0711 乌鲁木齐-尉犁-若羌高速公路的重要控制性工程,隧道全长 22.0km,最大埋深约 1 200m。隧道出口段 YK93+400 附近的 F7 断裂具有长期性和活跃性的特征,是隧道施工过程的控制性地质因素。



图 7 天山胜利隧道卫星影像

Fig. 7 Satalite image of Tianshan Shengli Tunnle

为探明隧道沿线的工程地质和水文地质资料,在隧道出口段 1 720m 范围内利用水平定向钻技术

进行地质勘察,通过室内试验、孔内电视等测试完成隧道的详细勘察任务。

### 4.2 泥浆液配合比及相关检测参数

泥浆是定向穿越中的关键因素,根据工程穿越泥浆工艺要求及地质情况,天山胜利隧道出口段,泥浆液配合比如表 6 所示。结合前期室内试验研究内容,采用 5% 膨润土结合石英砂配制钻孔泥浆液,在入口段采用 6% 膨润土增强孔口稳定性,沿不同里程逐步提高携砂剂含量以调整泥浆流动性。

表 6 泥浆液配合比

Table 6 Mix proportion of mud slurry					
钻进区间/m	膨润土/%	纯碱/%	烧碱/%	携砂剂/%	润滑剂/%
0~300	6	0.5	0.5	—	—
300~800	5	0.5	0.5	0.15	—
800~1 200	5	0.4	0.4	0.20	0.3
1 200~1 700	5	0.4	0.4	0.30	0.4

由于穿越地段地质情况复杂,对泥浆要求较高。针对地层特点,确定泥浆配制方案时选用优质的定向钻专用土粉,掺合一定比例的添加剂,现场泥浆马氏漏斗黏度为 60~100s,塑料黏度为 8~12mPa·s,动切力为 5~10Pa,表观黏度为 12~20mPa·s,静切力为 3~8Pa 或 6~12Pa,pH 值为 9.5~11.5。

### 4.3 结果分析

结合钻进参数和地质数据,对泥浆清孔性能进行优化。结果显示,当泥浆黏度和携砂剂用量适当时,钻孔内的岩屑排出效率显著提高,孔内压力波动减小。现场应用表明,优化后的泥浆配方在 1 200~1 700m 钻进区间表现出良好的清孔效果,尤其是在节理裂隙发育的岩层中,泥浆能快速携带岩屑排出,避免孔内堵塞。

## 5 结语

本文针对大直径水平定向钻进施工中的钻孔清洁问题,对泥浆清孔性能进行深入研究。通过分析环空泥浆流场、流场压降梯度和钻屑运移效率的影响,建立环空泥浆运动方程组,揭示不同因素对泥浆清孔性能的影响特征。研究发现,流核区直径越大,压降梯度越小,越有利于提高泥浆清孔性能;流场压降梯度对泥浆流速和钻杆转速敏感,泥浆流速为 1m/s、钻杆转速为 40r/m 时,能显著提高钻屑运移效率,改善清孔性能。

室内流变特性试验表明,赫-巴模型能准确描述泥浆流变特性,特定粒径钻屑能增大泥浆动切力,石英砂含量在 5%~15% 时,稠度系数随钻屑含量和粒径增大而减小。数值模拟研究验证了模型的可

靠性,并分析了入口流速、环空直径比等因素对流速分布和压降梯度的影响,发现增大入口流速和环空直径比能提高清孔效率。工程实践表明,泥浆清孔性能良好。

本文仍存在不足,如未考虑泥浆的滤失特性。未来研究需开展泥浆滤失试验,全面分析泥浆工作性能,并针对大直径钻孔中泥浆流动进行试验研究。

#### 参考文献:

- [ 1 ] 梁志刚. 市政工程道路施工中的地下管线施工技术分析[J]. 建材发展导向, 2024, 22(20): 76-78.  
LIANG Z G. Analysis of underground pipeline construction technology in municipal engineering road construction [ J ]. Development guide to building materials, 2024, 22(20): 76-78.
- [ 2 ] 田丰. 排水管道非开挖修复技术在市政管养中的应用分析[J]. 工程与建设, 2023, 37(5): 1536-1538.  
TIAN F. Application analysis of trenchless repair technology of drainage pipeline in municipal management and maintenance [ J ]. Engineering and construction, 2023, 37(5): 1536-1538.
- [ 3 ] 余争. 非开挖拖拉管在市政污水处理中的施工与应用[J]. 工程建设与设计, 2024(16): 152-154.  
YU Z. Construction and application of trenchless drag tube in municipal sewage treatment [ J ]. Construction & design for engineering, 2024(16): 152-154.
- [ 4 ] CECÍLIA A S, BRASIL A F D, SANTOS G D. An experimental study of horizontal directional drilling(HDD) in sand in a large flexible calibration chamber [ J ]. Tunnelling and underground space technology incorporating trenchless technology research, 2023, 141: 105295.
- [ 5 ] 李术才, 李利平, 孙子正, 等. 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(1): 1-30.  
LI S C, LI L P, SUN Z Z, et al. Key technology analysis and development trend of ultra-long directional drilling and injection equipment [ J ]. Rock and soil mechanics, 2023, 44(1): 1-30.
- [ 6 ] PARK I, KANG C, BAYAT A. Challenges with using empirically determined geotechnical parameters for borehole stability evaluation in horizontal directional drilling [ J ]. Engineering geology, 2024, 336: 107565.
- [ 7 ] 李子涵. 大口径长距水平定向钻管道回拖影响因素显著性分析[D]. 合肥: 安徽建筑大学, 2022.  
LI Z H. Significance analysis of influencing factors of pullback of large-diameter long-distance horizontal directional drilling pipeline [ D ]. Hefei: Anhui Jianzhu University, 2022.
- [ 8 ] 刘成勇, 刘江涛, 杨红斌. 非开挖水平定向钻施工技术在管道穿越河流中的应用[J]. 石油化工建设, 2021, 43(S2): 37-43.  
LIU C Y, LIU J T, YANG H B. Application of trenchless horizontal directional drilling construction technology in pipeline crossing river [ J ]. Petroleum and chemical construction, 2021, 43(S2): 37-43.
- [ 9 ] 袁玉石, 苗红昌, 张志强, 等. 水平定向钻在南水北调配套工程输水管道穿越中的应用研究: 以沙颍河穿越工程为例[J]. 地质科技情报, 2016, 35(4): 208-212, 222.  
YUAN Y S, MIAO H C, ZHANG Z Q, et al. Application of horizontal directional drilling in water pipeline crossing of South-to-North Water Diversion project: taking Shaying River crossing project as an example [ J ]. Bulletin of geological science and technology, 2016, 35(4): 208-212, 222.
- [ 10 ] 张博珊, 王辉, 陈熹. 一种考虑固相浓度作用的改进泥浆流变模型[J]. 土木工程学报, 2023, 56(S1): 134-141.  
ZHANG B S, WANG H, CHEN X. An improved slurry rheological model considering the effect of solid concentration [ J ]. China civil engineering journal, 2023, 56(S1): 134-141.
- [ 11 ] 王承震, 丁万涛, 于文端, 等. 基于BP修正流变模型的泥水盾构泥浆流动模型开发及应用[J]. 现代隧道技术, 2024, 61(3): 194-201.  
WANG C Z, DING W T, YU W D, et al. Development and application of slurry shield slurry flow model based on BP modified rheological model [ J ]. Modern tunnelling technology, 2024, 61(3): 194-201.
- [ 12 ] VOJTĚCH K, VERONIKA K, RENÁTA D, et al. Rheological and pipe flow properties of chocolate masses at different temperatures [ J ]. Foods, 2021, 10(11): 2519-2519.
- [ 13 ] 代瑞, 高晓东, 曾宪奎, 等. 导热复合材料加工工艺的现状与进展[J]. 塑料, 2024, 53(1): 119-124.  
DAI R, GAO X D, ZENG X K, et al. Current status and progress in processing technology of thermally conductive composites [ J ]. Plastics, 2024, 53(1): 119-124.
- [ 14 ] 李博, 刘蓉蓉, 邹良超. 单裂隙内浆液基本流动规律的理论、试验、模拟对比分析[J]. 岩土力学, 2024, 45(S1): 751-760.  
LI B, LIU R R, ZOU L C. Comparative analysis of theory, experiment and simulation of basic flow law of slurry in single fracture [ J ]. Rock and soil mechanics, 2024, 45(S1): 751-760.
- [ 15 ] LI P, WANG L, LAI X J, et al. Two-level self-thickening mechanism of a novel acid thickener with a hydrophobic-associated structure during high-temperature acidification processes [ J ]. Polymers, 2024, 16(5): 16050679.