



DOI:10.12404/j.issn.1671-1815.2309214

引用格式:王旭,李超,刘宇,等.长距离岩石顶管泥浆配比优化及减摩效果分析[J].科学技术与工程,2025,25(3):1235-1244.

Wang Xu, Li Chao, Liu Yu, et al. Optimization of mud ratio and friction reduction effect of longdistance rock pipe jacking analysis [J]. Science Technology and Engineering, 2025, 25(3): 1235-1244.

# 长距离岩石顶管泥浆配比优化及减摩效果分析

王旭,李超\*,刘宇,赵千军

(贵州大学土木工程学院,贵阳 550025)

**摘要** 在超长距离岩石微盾构顶管中,管壁摩擦是决定顶推力大小和中间顶升站布置的关键因素,而选择好的膨润土泥浆是控制管壁摩擦的关键因素。为能充分发挥聚合物膨润土泥浆在顶管施工过程中润滑和支撑的作用,以重庆观景口水利枢纽工程为依托,通过正交试验和室内直剪试验方法对不同类型的膨润土泥浆的基础配比优化,根据浆液性能参数,以及减摩机理得出最优类型泥浆及其配比。结果表明:钠基膨润土泥浆为最优泥浆类型,其配比为膨润土与水的质量比为14%,瓜儿胶0.20%,纯碱0.40%,羧甲基纤维素(carboxymethyl cellulose, CMC)为0.40%,聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)为0.10%,其减摩效果明显,能够使混凝土与灰岩之间的摩擦系数降低35%,使得岩石顶管顶进过程中,管岩间的摩阻力大大降低。

**关键词** 聚合物;膨润土泥浆;直剪试验;摩擦系数

中图法分类号 U454; 文献标志码 A

## Optimization of Mud Ratio and Friction Reduction Effect of Long-distance Rock Pipe Jacking Analysis

WANG Xu, LI Chao\*, LIU Yu, ZHAO Qian-jun

(College of Civil Engineering, Guizhou University, Guiyang 550025, China)

**[Abstract]** In ultra-long-distance rock micro-shield pipe jacking, pipe wall friction is a key factor in determining the size of the jacking force and the arrangement of the intermediate jacking station, and the selection of a good bentonite mud is a key factor in controlling the pipe wall friction. In order to give full play to the polymer bentonite mud in the pipe jacking construction process of lubrication and support, the Chongqing Guanjingkou water conservancy hub project was used as the basis, through orthogonal tests and indoor straight shear test method on the basis of different types of bentonite mud ratio optimization, based on the performance parameters of the slurry, as well as the friction reduction mechanism to derive the optimal type of mud and its ratio. The results show these as follow. Sodium bentonite mud is the optimal type of mud, the ratio of bentonite to water is 14%, guar gum is 0.20%, soda ash is 0.40%, CMC (carboxymethyl cellulose) is 0.40%, PAM (polyacrylamide) is 0.10%, and its friction reduction effect is obvious, it can make the friction coefficient between concrete and gray rock reduced by 35%, which makes the friction between the pipe and the rock greatly reduced in the process of pipe jacking in the rock.

**[Keywords]** polymer; bentonite slurry; straight shear test; friction coefficient

膨润土在顶管施工中拥有重要的作用,它是一种层状硅铝酸盐矿物,主要成分为蒙脱石。当与水接触时,膨润土会膨胀,同时具备卓越的吸附性和造浆性能。这使得它成为顶管施工过程中不可或缺的材料。

膨润土泥浆在顶管施工中发挥多重功能。首先,它有助于减小顶进过程中的摩阻力,从而促进施工的顺利进行。此外,它还能提供支撑,防止隧洞地层的坍塌。在岩石地层的顶管施工中,膨润土

泥浆通过注入的方式,能有效清除产生的岩石碎屑,避免它们在管道内积聚导致堵塞的情况发生。

关于膨润土泥浆的选择,需要根据实际的情况进行权衡。不同膨润土泥浆具有不同的特性,包括黏度和流动性。流动性较强的泥浆提供摩擦阻力,而黏度较高、流动性较差的泥浆则适用于填充过度开挖区域,稳定底层,减少沉降和变形的风险<sup>[1-3]</sup>。

因此,选择适宜的膨润土泥浆配比和使用策

收稿日期:2023-11-23 修订日期:2024-06-24

基金项目:国家自然科学基金青年科学基金(52208391);贵州大学博士人才基金(2021-78)

第一作者:王旭(1999—),男,汉族,贵州遵义人,硕士研究生。研究方向:地下工程与隧道工程。E-mail:1711988785@qq.com。

\*通信作者:李超(1990—),男,汉族,贵州都匀人,博士,讲师。研究方向:地下工程与隧道工程。E-mail:chaoliclee@163.com。

略,成为保证顶管施工的成功和安全的重要环节。这需要充分综合施工需求和地质条件,以制定最佳的策略和浆液配比。许多学者对顶管的泥浆配比优化展开了一系列研究工作,传统的膨润土浆料一般由膨润土、水、纯碱、钠羧甲基纤维素(carboxy methyl cellulose, CMC)按一定质量比组成,其中膨润土的质量通常不超过水质量的10%。Zhou等<sup>[4]</sup>通过模型试验,模拟了淤泥地层顶升管隧道内顶升力和地面沉降的变化,得出了传统触变浆料对降低摩阻力具有较好的效果;冯锐等<sup>[5]</sup>通过顶力变化规律得出比起普通的膨润土浆料,聚合物改性膨润土浆料更适合长距离钢顶管顶进的润滑;王昭鹏等<sup>[6]</sup>通过用粉质黏土替代膨润土来制备泥浆,为废弃粉质黏土资源化利用提供新的思路;Zhang等<sup>[7]</sup>通过顶管顶进距离和摩阻力的分析,以聚丙烯酰胺(polyacrylamide, PAM)为添加剂优化了泥浆配比;雷华阳等<sup>[8]</sup>研究了羧甲基纤维素钠、瓜尔胶、和水解聚丙烯酰胺对泥浆工程特性影响的影响,并提出了适用于相应指标的预测计算公式;周海文等<sup>[9]</sup>利用响应面法将富水砂卵石地层冻结孔钻进泥浆配比进行了优化;夏炜洋以国内最大直径泥水-土压双模盾构在卵石土及泥岩侵入地层中的掘进为背景,对泥浆配比进行了优化;Liu等<sup>[10]</sup>通过正交试验,得出在聚合物改性膨润土浆料中加入硼酸交联聚合物,大大减少了浆料中的裂纹和空隙数量,使得抗渗透性能得到了极大的改善。

然而现在的研究主要基于固定的比例,设定膨润土与水的质量比,通过正交试验来研究各类聚合物添加剂的影响来优化泥浆配比,而并未考虑到基础配比是否是膨润土泥浆的最优配比,并且对与各类膨润土泥浆的研究主要集中在某一类膨润土泥浆,并未考虑其余种类的膨润土泥浆性能对实际工程的影响,因此对于膨润土泥浆配比优化还需要进行进一步的研究。

以重庆观景口水利枢纽工程为工程背景,选用不同种类的膨润土不同种类的膨润土,对其进行基本性能参数评估,以了解它们的特性。然后,通过研究流性指数和稠度系数的变化规律,确定各种泥浆的最佳质量比。接下来,采用正交试验的方法,确定在不同类型的泥浆中各种聚合物的最佳配比。从而确保聚合物能够在不同泥浆中发挥最佳性能,以实现减小摩擦的效果。最后,通过进行室内直剪试验来验证所选择的泥浆和聚合物的配比对于减小摩擦的效果。这些试验结果可提供重要的参考数据,以便为实际工程提出参考,确保施工的安全和高效进行。

## 1 工程概况

观景口水利枢纽工程位于重庆市巴南区东泉镇长江右岸一级支流的五布河干流上东泉镇双胜村,距东泉镇中心约4.5 km,距重庆市市中心约55 km。采用先进的硬岩顶管施工技术,其中要求单向最长顶进达2 km,研究的地层为石灰岩段。

在施工过程中<sup>[11]</sup>,顶升力由开始的8 000 kN巨增至16 000 kN,现场初步排查为膨润土泥浆选用不当导致摩阻力增大,因此迫切需要优化泥浆配比,避免该现象再次发生。

## 2 试验材料与方法

### 2.1 试验材料

试验采用不同种类的膨润土样品,分别为钙基膨润土、钠基膨润土和有机膨润土。这些样品的蒙脱石含量均不低于75%。此外,使用来自富辰化学有限公司购买的PAM、纯碱和CMC。

在泥浆的制备过程中,采用自来水,并保持其pH为8,确保实验的可重复性和结果的准确性,为实验提供准确的数据。

### 2.2 泥浆制备及其性能测定

使用数显搅拌机进行泥浆搅拌,该设备最高转速为11 500 r/min,水的含量为500 mL,其余添加材料均以百分比形式进行添加,选用中压滤失仪Zns-2a对膨润土浆料的失水量和泥饼厚度进行测量,选取100 mL的量筒来测定析水率,选取六速旋转仪来测量,根据如表1所示具体参数指标,来计算泥浆的黏度及流性指数和稠度系数等一系列指标,结果如表1所示。

表1 六速旋转仪参数表

转速/(r·min <sup>-1</sup> )	3	6	100	200	300	600
剪切速率/(r·min <sup>-1</sup> )	5	10	170	340	511	1 022

流性指数、稠度系数公式为

$$n = 3.321 \times \frac{600}{300} \quad (1)$$

$$k = \frac{0.511 \times 300}{511^n} \quad (2)$$

式中:600 r/min与300 r/min为六速旋转仪的读数; $n$ 为流性指数; $k$ 为稠度系数,Pa·s <sup>$n$</sup> 。

### 2.3 试验条件设置

膨润土与水的质量比在实际工程中的配比各不相同,张雪等<sup>[12]</sup>证明钠基膨润土泥浆的最优配比为10%左右,而Deng等<sup>[13]</sup>通过室内直剪试验得出当质量比超过20%时,聚合物膨润土浆液呈固态,

摩擦系数为 0.32 ~ 0.38,超过了 Stein<sup>[14]</sup> 推荐的润滑驱动器上限值 0.30,这种情况只能用于填充过度开挖区域,稳定周围底层,减少沉降变形,而不能用于润滑,所以将纯膨润土泥浆的质量比确定为 10% ~ 18%,通过浆液的性能分析来确定 3 种膨润土各自的最优配合比,如表 2 所示。

表 2 纯膨润土泥浆配合比  
Table 2 Pure bentonite slurry ratio

膨润土类型	钙基	钠基	有机
配比/%	10	10	10
	12	12	12
	14	14	14
	16	16	16
	18	18	18

### 2.4 膨润土浓度的确定

如图 1(a)、图 1(c)、图 1(e) 所示,可以清晰地看到随着膨润土与水的质量比增加,不同膨润土泥浆的流性指数呈下降趋势。具体而言,钠基和钙基膨润土在 12% 质量比时的下降速度最快,但当质量比达到 14% 后,下降速度减小,逐渐趋于稳定;而有机膨润土在 12% 时下降最快,虽然也有下降趋势,但并未趋于稳定。流性指数<sup>[15]</sup> 通常用于反映泥浆的剪切稀释性和结构力,取值范围在 0 ~ 1 之间。当流性指数减小时,泥浆的剪切稀释性减弱,结构力增强,这有助于在顶管施工中有效排出岩屑。

相对于流性指数,稠度系数在膨润土与水的质量比升高时逐渐增加。对钠基膨润土来说,在浓度从 12% 升至 14% 时,稠度系数呈线性上升趋势,但

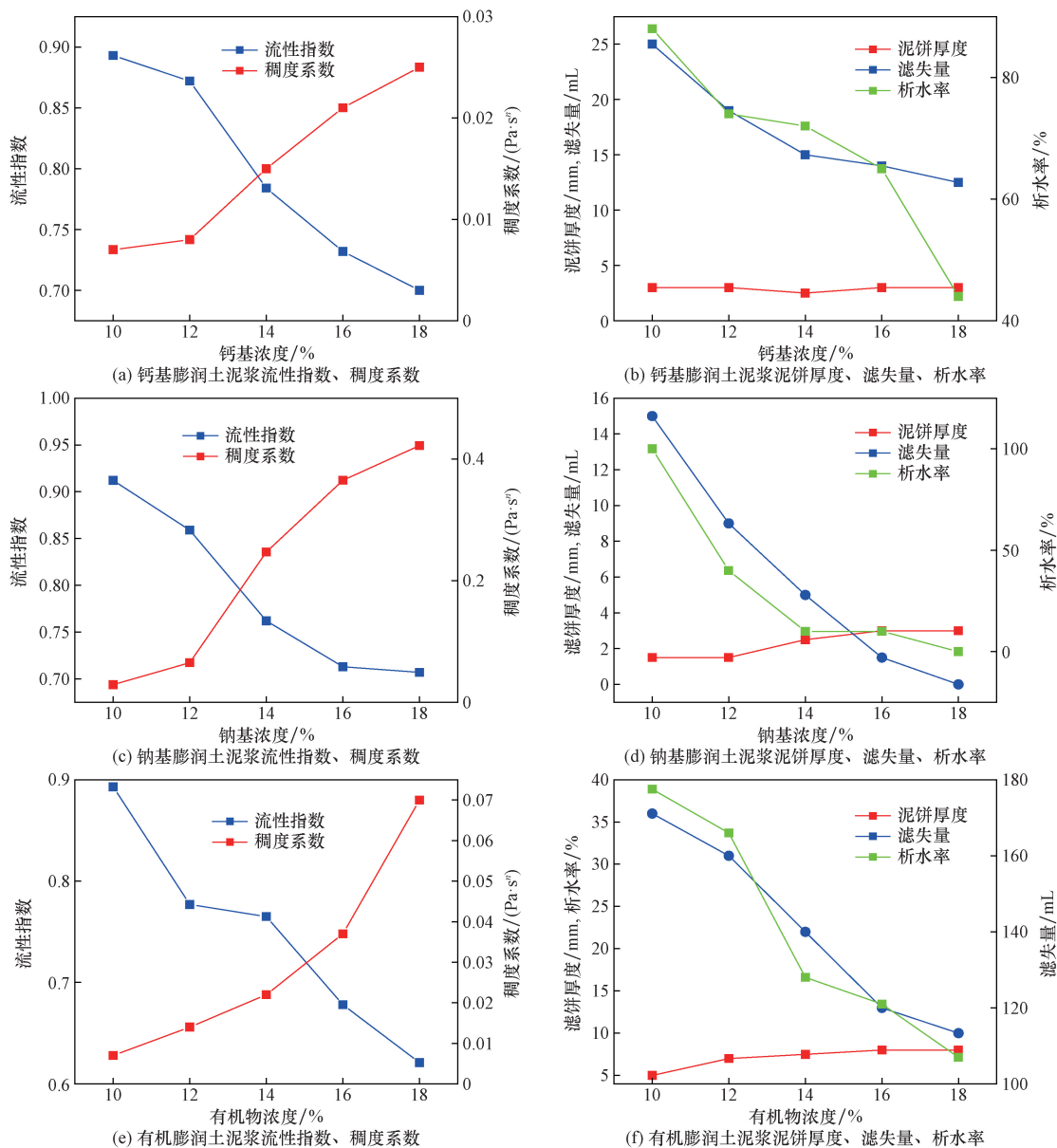


图 1 各类膨润土泥浆的性能参数图

Fig. 1 Performance parameters of various types of bentonite slurries

在达到一定浓度后,增加速度减缓,逐渐趋于平稳。而钙基膨润土和有机膨润土的稠度系数<sup>[15]</sup>则继续增加。过高的稠度系数会减弱顶管的顶进能力,减缓施工速度,而过低的稠度系数可能导致泥浆的悬浮岩屑能力减弱,从而在实际工程中可能出现管道堵塞的问题。

如图1(b)、图1(d)、图1(f)所示,随着膨润土与水的质量比增加,3种膨润土泥浆的性能发生了明显的变化。具体来说,滤失量呈下降趋势,减小的滤失量代表着泥浆性能更加稳定,能够形成更紧密和有韧性的泥浆套。在这方面,钠基和钙基膨润土表现出良好的性能,泥饼厚度小于3 mm,符合使用标准。然而,有机膨润土的泥饼厚度明显较大,最高值达到了8.5 mm,这会导致滤饼过厚,容易脱落,不利于形成更紧密的泥浆套。因此,有机膨润土需要通过添加聚合物和其他添加剂来减小泥饼的厚度。

此外,随着质量比的增加,3种膨润土泥浆的析水率也呈下降趋势。析水率的降低反映了泥浆更好的稳定性。高析水率的泥浆在地下水流较大的情况下容易受到水的冲刷和稀释,从而降低减摩效果。在这一方面,只有钠基膨润土表现出卓越性能,而其他两种膨润土需要进一步验证其在实际工程中的适用性。这些观察结果有助于指导正确选择膨润土类型和优化泥浆性能,以确保在顶管施工中获得最佳效果。

根据上述试验结果的综合分析,可以明显观察到膨润土的各项性能参数随着膨润土浓度的变化而发生变化。结合不同膨润土配比对泥浆性能参数的影响,发现在钠基膨润土与水的质量比为14%时,泥浆的性能表现相对理想。在这一浓度下,流变系数和稠度系数开始趋向稳定,而饼滤厚度、滤失量和析水率也维持在平稳且相对较低的水平。

然而,对于钙基膨润土泥浆和有机膨润土泥浆,滤失量和析水率均超出了顶管工程的标准范围<sup>[16]</sup>。考虑到这两个参数随着质量比的增加而下

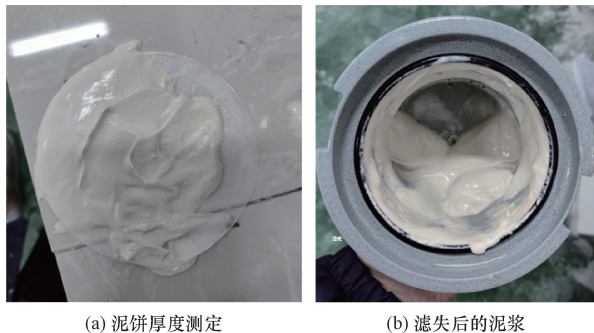


图2 有机膨润土泥浆未取得紧密的泥饼及滤失

Fig. 2 Organo bentonite slurry did not obtain a compact mud cake and filtration loss

降,可以选择质量比为18%作为聚合物改性膨润土的基础配比,以满足工程要求。这个选择有助于改善泥浆的性能,确保其在顶管施工中表现出良好的稳定性和适用性。这两类膨润土泥浆需要通过后续添加聚合物来验证是否具有减摩效果。

### 3 膨润土泥浆配比优化分析

聚合物膨润土泥浆在各类地质条件下的配比情况各不相同,泥浆的性能参数评定也各不一样,采用表3所示指标来评定泥浆的性能<sup>[17]</sup>,为之后的泥浆配比做出参考依据,由于有机膨润土在四类添加剂含量均为最大时的密度仅为 $0.96 \text{ g/cm}^3$ ,不满足聚合物膨润土泥浆的标准,其标准如表3所示,故配比优化分析不考虑有机膨润土泥浆。

表3 聚合物膨润土泥浆性能指标

Table 3 Polymer bentonite slurry performance indicators

指标	条件	性能
滤失量	30 mL/min	滤饼完整
析水率	静置时间 24 h	0%
密度	静置时间 24 h	1.05 ~ 1.16 g/cm <sub>3</sub>
pH	直接测定	8 ~ 10

#### 3.1 正交试验设计

正交试验<sup>[18-19]</sup>是一种高效的试验设计方法,特别适用于研究多个因素和不同水平对实验结果的影响,以找到最佳的混合比例或参数设置在正交试验中,将瓜尔胶、CMC、PAM、纯碱的含量设定为4个因素每个因素设定5个水平。A为瓜尔胶质量占泥浆总质量的百分比,B为纯碱质量占泥浆总质量的百分比,C为CMC质量占泥浆总质量的百分比,D为PAM质量占泥浆总质量的百分比取正交表L25的前四列,试验次数共25次,正交表如表4所示。

由于钠基纯膨润土泥浆的稠度系数远高于钙基远高于钙基纯膨润土泥浆,其添加剂参数应根据情况进行改变,由于瓜儿胶在0.30%时泥浆的表观黏度达到了220,已经超过了顶管泥浆的工程标准,且流动性指数为0.211,流动性极差,无法作为配比参考,因此将钠基膨润土泥浆正交表中的瓜儿胶含量进行优化,正交表如表5所示。

表4 膨润土泥浆配比正交表

Table 4 Orthogonal table of bentonite slurry ratios

水平数	因素			
	A/%	B/%	C/%	D/%
	0.10	0.10	0.10	0.05
	0.20	0.20	0.20	0.10
膨润土配比最优	0.30	0.30	0.30	0.15
	0.40	0.40	0.40	0.20
	0.50	0.50	0.50	0.25

表 5 钠基膨润土泥浆配比正交表

Table 5 Orthogonal table of sodium bentonite slurry ratios

水平数	因素			
	A/%	B/%	C/%	D/%
膨润土 配比最优	0.05	0.10	0.10	0.05
	0.10	0.20	0.20	0.10
	0.15	0.30	0.30	0.15
	0.20	0.40	0.40	0.20
	0.25	0.50	0.50	0.25

3.2 正交试验结果分析

表6、表7为各类膨润土泥浆正交试验后的结果,采用直观分析法进行分析,计算各个泥浆性能参数的均值和极差,通过大小对各个泥浆性能参数的重要性进行排序,得出各个因素的最优组合,即聚合物膨润土泥浆的最优配比。

3.3 各类添加剂对泥浆各项指数的影响

由于已经确定了膨润土与水的最佳质量比,上述实验结果表明,滤失量、析水率以及泥饼厚度大多符合实际工程中的泥浆标准。表8、表9求出了各因素的极差R,来选择对泥饼厚度影响最小的因素,确定其最优配比。由于泥饼厚度变化较大,这里重点关注泥饼厚度的变化趋势,如图3所示,钙基膨润土泥浆瓜儿胶的含量对泥饼厚度有显著影响。

当瓜儿胶含量达到0.40%时,泥饼厚度达到最大值并趋于稳定。这是因为泥浆的表观黏度在此时趋于稳定,表明泥浆已经进入了一个相对稳定的状态,进一步增加瓜儿胶含量不会显著改变泥饼厚度。其次,纯碱含量对泥饼厚度的变化也产生明显影响。在纯碱含量为0.20%~0.40%时趋于稳定。在0.20%时,纯碱与纯膨润土泥浆发生了水化作用,导致表观黏度急剧上升,泥饼厚度随着表观黏度

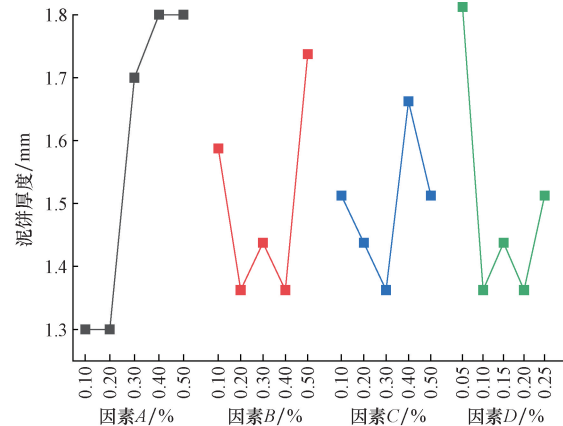


图3 各因素对钙基膨润土泥饼厚度的影响效果

Fig. 3 Effect of each factor on the thickness of calcium bentonite cake

表 6 钙基膨润土泥浆正交结果表

Table 6 Table of orthogonal results for calcium bentonite slurry

试验 编号	A/%	B/%	C/%	D/%	pH	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	流性 指数	稠度系数/ (Pa·s <sup>n</sup> )	析水率/ %	滤失量/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥饼厚度/ mm
1	0.10	0.10	0.10	0.05	9	1.08	11.5	8	0.617	0.164	2.0	3	2.0
2	0.10	0.20	0.30	0.20	9	1.08	22.0	13	0.505	0.679	0.5	0	1.0
3	0.10	0.30	0.50	0.10	9	1.08	29.5	19	0.560	0.620	0.3	0	1.0
4	0.10	0.40	0.20	0.25	9	1.08	18.5	11	0.509	0.557	1.1	0	1.0
5	0.10	0.50	0.40	0.15	10	1.08	22.5	14	0.537	0.555	0.1	0	1.5
6	0.20	0.10	0.50	0.20	10	1.09	25.0	17	0.599	0.402	0.1	0	1.0
7	0.20	0.20	0.20	0.10	10	1.09	24.0	12	0.415	1.384	0	0	0.5
8	0.20	0.30	0.40	0.25	10	1.09	27.5	17	0.533	0.699	0	0	2.0
9	0.20	0.40	0.10	0.15	10	1.09	19.0	10	0.440	0.918	0	0	1.0
10	0.20	0.50	0.30	0.05	10	1.10	23.5	14	0.510	0.701	0	0	2.0
11	0.30	0.10	0.40	0.10	10	1.09	28.0	18	0.559	0.594	0	0	2.0
12	0.30	0.20	0.10	0.25	10	1.10	21.0	13	0.534	0.530	0	0	1.5
13	0.30	0.30	0.30	0.15	10	1.10	27.5	16	0.496	0.906	0	0	1.0
14	0.30	0.40	0.50	0.05	10	1.10	37.5	21	0.474	1.439	0	0	2.0
15	0.30	0.50	0.20	0.20	10	1.11	22.0	14	0.552	0.490	0	0	2.0
16	0.40	0.10	0.30	0.25	10	1.11	22.0	14	0.552	0.490	0	0	1.5
17	0.40	0.20	0.50	0.15	10	1.11	35.0	21	0.514	1.013	0	0	2.0
18	0.40	0.30	0.20	0.05	10	1.11	34.0	20	0.502	1.070	0	0	2.0
19	0.40	0.40	0.40	0.20	10	1.11	27.0	15	0.469	1.068	0	0	1.5
20	0.40	0.50	0.10	0.10	10	1.11	21.5	9	0.339	2.103	0	0	2.0
21	0.50	0.10	0.20	0.15	10	1.11	21.0	13	0.534	0.530	0	0	2.0
22	0.50	0.20	0.40	0.05	10	1.12	38.0	21	0.466	1.534	0	0	2.0
23	0.50	0.30	0.10	0.20	10	1.12	24.0	14	0.497	0.782	0	0	1.5
24	0.50	0.40	0.30	0.10	10	1.12	34.0	28	0.443	1.609	0	0	1.5
25	0.50	0.50	0.50	0.25	10	1.12	38.5	22	0.485	1.364	0	0	2.0

表 7 钠基膨润土泥浆正交结果表

Table 7 Table of orthogonal results for sodium bentonite slurry

试验编号	A/%	B/%	C/%	D/%	pH	密度/ (g·cm <sup>-3</sup> )	表观黏度/ (mPa·s)	塑性黏度/ (mPa·s)	流性 指数	稠度系数/ (Pa·s <sup>n</sup> )	析水率/ %	滤失量/ [mL·(30 min) <sup>-1</sup> ]	泥饼厚度/ mm
1	0.05	0.10	0.10	0.05	10	1.06	26.0	19	0.656	0.283	0	0	1.0
2	0.05	0.20	0.30	0.20	10	1.07	30.0	20	0.585	0.533	0	0	1.5
3	0.05	0.30	0.50	0.10	10	1.06	41.0	26	0.550	0.927	0	0	1.5
4	0.05	0.40	0.20	0.25	10	1.07	17.0	12	0.628	0.224	0	0	2.0
5	0.05	0.50	0.40	0.15	10	1.07	28.5	19	0.585	0.507	0	0	2.0
6	0.10	0.10	0.50	0.20	10	1.07	63.5	35	0.465	2.589	0	0	1.5
7	0.10	0.20	0.20	0.10	10	1.07	43.5	26	0.512	1.280	0	0	2.0
8	0.10	0.30	0.40	0.25	10	1.07	45.5	37	0.752	0.253	0	0	1.5
9	0.10	0.40	0.10	0.15	10	1.08	23.0	16	0.616	0.328	0	0	2.0
10	0.10	0.50	0.30	0.05	10	1.08	34.5	21	0.523	0.939	0	0	2.0
11	0.15	0.10	0.40	0.10	10	1.08	88.0	43	0.404	5.474	0	0	2.5
12	0.15	0.20	0.10	0.25	10	1.08	44.0	34	0.704	0.342	0	0	2.0
13	0.15	0.30	0.30	0.15	10	1.08	52.0	29	0.471	2.027	0	0	2.0
14	0.15	0.40	0.50	0.05	10	1.08	68.5	32	0.384	4.906	0	0	1.5
15	0.15	0.50	0.20	0.20	10	1.08	33.5	19	0.481	1.223	0	0	1.5
16	0.20	0.10	0.30	0.25	10	1.08	82.0	35	0.346	7.613	0	0	2.0
17	0.20	0.20	0.50	0.15	10	1.09	109.0	48	0.359	9.283	0	0	2.5
18	0.20	0.30	0.20	0.05	10	1.09	65.5	29	0.361	5.494	0	0	2.5
19	0.20	0.40	0.40	0.20	10	1.09	77.0	31	0.324	8.329	0	0	2.0
20	0.20	0.50	0.10	0.10	10	1.09	42.5	20	0.387	2.977	0	0	2.0
21	0.25	0.10	0.20	0.15	10	1.09	83.0	35	0.341	7.961	0	0	2.0
22	0.25	0.20	0.40	0.05	10	1.09	117.5	51	0.353	10.419	0	0	2.5
23	0.25	0.30	0.10	0.20	10	1.09	65.0	25	0.308	7.683	0	0	2.5
24	0.25	0.40	0.30	0.10	10	1.09	80.5	31	0.308	9.709	0	0	2.0
25	0.25	0.50	0.50	0.25	10	1.09	73.5	32	0.354	6.463	0	0	2.0

表 8 钙基膨润土泥浆滤饼厚度分析

Table 8 Analysis of filter cake thickness of calcium bentonite slurry

因素	不同水平的滤饼厚度均值 $D_{kl}$ /mm						最佳组合
	1	2	3	4	5	R	
A	1.3	1.3	1.7	1.8	1.8	0.5	A4B5 C4D1
B	1.7	1.4	1.5	1.4	1.9	0.5	
C	1.6	1.5	1.4	1.8	1.6	0.4	
D	2.0	1.4	1.5	1.4	1.6	0.6	

的上升开始上升,因此纯碱的含量选用 0.40%。最后,CMC 和 PAM 对泥饼厚度的变化呈波动状态。我们选择了 CMC 含量为 0.30% 和 PAM 含量为 0.15% 时,泥饼厚度为 1.9 mm,并且保持相对稳定,从而确保泥浆在实际工程中满足性能要求。

如图 4 所示,随着瓜儿胶含量的增加,泥饼厚度呈逐渐增加的趋势。当瓜儿胶的含量达到 0.20% 时,泥饼厚度达到最大值,之后继续增加瓜儿胶含量并不会显著影响泥饼厚度。这表明瓜儿胶在 0.20% 的含量下,泥浆的性能最佳,有助于形成稳定而较薄的滤饼。纯碱对钠基泥浆具有较强的分散作用。随着纯碱含量的增加,泥饼厚度逐渐减小。在 0.20% ~ 0.40% 的纯碱含量范围内,纯碱的水化

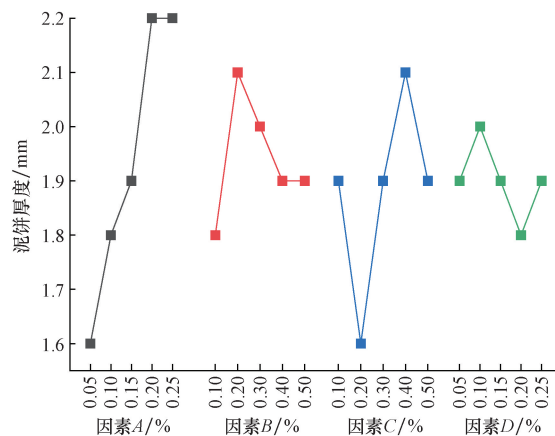


图 4 各因素对钠基膨润土泥饼厚度的影响效果  
Fig. 4 Effect of each factor on the thickness of sodium bentonite cake

作用较为显著,导致较薄的滤饼形成。然而,当纯碱含量超过 0.40% 时,泥浆已趋于稳定,泥饼厚度开始增加并保持相对稳定。

CMC 和 PAM 的添加对泥饼厚度的变化影响较小,呈现波动趋势。这是因为它们的变化受纯碱的分散作用的影响,与纯碱的变化趋势相似。因此,此处选择了它们的峰值作为最佳添加比例,即 CMC 含量为 0.40% 和 PAM 含量为 0.10%。

综上所述,钙基膨润土泥浆的最优配比为 A4B5C4D1,钠基膨润土的最优配比为 A4B2C4D2,另外从析水率、滤失量、泥饼厚度来看,上述试验的泥浆配比均有一定强度,也验证了,先确定膨润土与水的质量,才比能够更好地确定膨润土泥浆的最优配比。

表 9 钠基膨润土泥浆滤饼厚度分析  
Table 9 Sodium bentonite slurry filter cake thickness analysis

因素	不同水平的滤饼厚度均值 $D_{k1}/mm$						最佳组合
	1	2	3	4	5	R	
A	1.6	1.8	1.9	2.2	2.2	0.6	
B	1.8	2.1	2.0	1.9	1.9	0.3	A4B2
C	1.9	1.6	1.9	2.1	1.9	0.5	C4D2
D	1.9	2.0	1.9	1.8	1.9	0.2	

### 3.4 各类添加剂对泥浆流性指数,稠度系数分析

流性指数越小,代表着其剪切稀释性越强,也就意味着当顶管重新顶进时,所需要的顶力越小。如图 5 所示,瓜儿胶和纯碱直接影响钙基膨润土泥浆流性指数的变化,当瓜儿胶与纯碱的含量达到 0.40% 时,流性指数均为最低值,且随后增加的趋势变缓,说明此时泥浆性能最优效果最好,而 CMC 随着含量的增加使得流性指数增加,PAM 在含量为 0.05% 时出现了下降的趋势,随后呈增加的趋势,所以 CMC 和 PAM 的添加在膨润土泥浆配比的过程中不宜过多,否则会导致泥浆的流性指数过高,其剪切稀释性越弱,影响实际工程,当 CMC 含量为 0.30% 时,此时流性指数的变化趋势开始逐渐变缓,且流性指数数值不大,既具有较好剪切稀释性,又具有流动性可以作为其配比含量,而 PAM 在含量为 0.10% 时流性指数最低,宜采用该含量作为配比。

膨润土泥浆的稠度系数,反映着泥浆的黏稠度,稠度系数越大,泥浆的携岩能力越强,对于减阻的效果越明显,但稠度系数太大的话,将会增加注浆的难度,注浆压力将会增大,同时丧失了流动性,会导致顶进过程出现卡管现象,因此选择合适的稠度,成为泥浆配比的关键。如图 6 所示,瓜儿胶与 CMC 直接影响着稠度系数的变化,二者对泥浆稠度系数变化影响最大,由于要保持一定流性指数,且瓜儿胶在 0.40% 时增加的趋势开始变缓,瓜儿胶的含量选用为 0.40%,CMC 选用 0.30%,此时稠度系数增加的趋势同样开始变缓,且流动系数也不高。由于纯碱在 0.20% ~ 0.40% 时发生了水化作用,0.40% 之后稠度系数达到最高值,且有一定的减缓趋势,所以纯碱的含量为 0.40%,PAM 在 0.10% 之

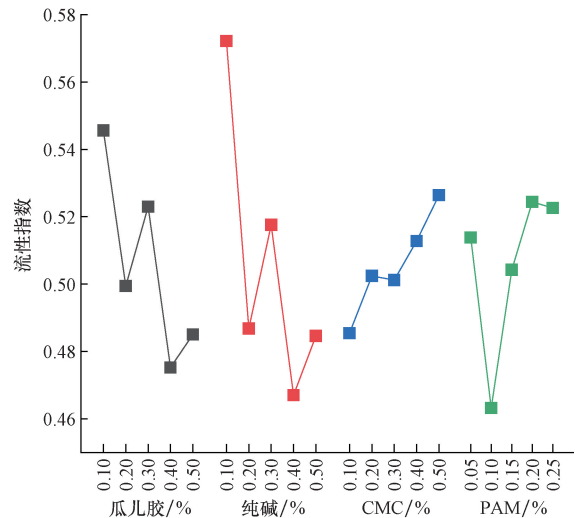


图 5 钙基膨润土流性指数变化图

Fig. 5 Variation of fluidity index of calcium bentonite

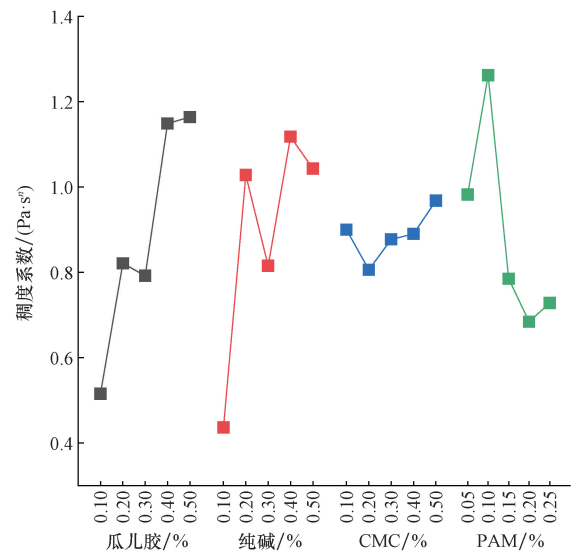


图 6 钙基膨润土稠度系数变化图

Fig. 6 Variation of consistency coefficient of calcium bentonite

后对稠度系数的影响不大,选取 0.10% 的最高值作为配比。

如图 7 所示,随着瓜儿胶含量的增加,流性指数呈直线下降,并在含量为 0.20% 时有下降的趋势,且观景口水利枢纽工程的石灰岩段地质情况复杂,瓜儿胶含量为 0.20% 为最佳含量,此时流性指数较低,能够有效填充过度开挖区域和稳定地层,纯碱、CMC、PAM 的变化不明显,综合滤饼厚度分析情况,以及去除流性指数较高的含量,取纯碱为 0.40%,CMC 的含量为 0.40%,而 PAM 在含量为 0.10% 和 0.20% 时最小,由于影响滤饼厚度的最佳含量为 0.10%,所以 PAM 含量为 0.10%。

如图 8 所示,瓜儿胶与 CMC 直接影响着钠基膨润土泥浆稠度系数的变化,二者对泥浆稠度系数变

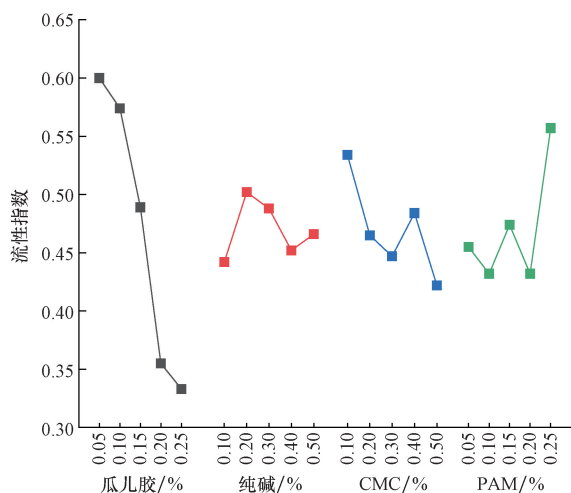


图7 钠基膨润土流性指数变化图

Fig. 7 Variation of fluidity index of sodium bentonite

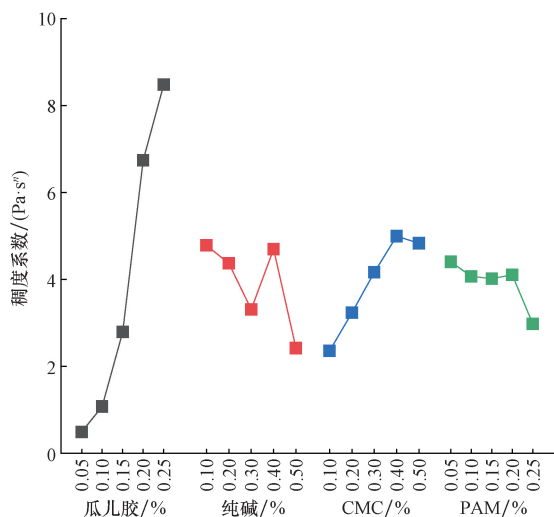


图8 钠基膨润土稠度系数变化图

Fig. 8 Variation of consistency factor of sodium bentonite

化影响最大,钠基膨润土在瓜儿胶含量为0.20%时稠度系数达到了6.739,且开始有减缓的趋势,所以瓜儿胶的含量取0.20%,纯碱含量在0.10%和0.40%时稠度系数大,考虑到流变系数在纯碱0.40%时最佳,这里取纯碱的含量为0.40%,CMC在含量为0.40%时,稠度系数达到了最大,且有下缓的趋势,CMC含量宜取0.40%,PAM除0.25%时稠度系数最低,其余含量对稠度系数影响不大,考虑泥饼厚度以及流性指数的影响,PAM取0.10%时最佳。

综合各添加剂含量对泥浆各个性能的影响,可得出瓜儿胶与CMC直接反映着膨润土泥浆的泥饼厚度以及稠度系数,意味着聚合物膨润土泥浆的质量好坏直接由二者决定,所以对于不同的地质来配置聚合物泥浆,确定二者的含量是极其重要的,下面是观景口水利枢纽工程的膨润土泥浆配比。

钙基膨润土泥浆的配比为:膨润土与水的质量比为18%,瓜儿胶0.40%,纯碱0.40%,CMC为0.30%,PAM为0.10%。

钠基膨润土泥浆的配比为:膨润土与水的质量比为14%,瓜儿胶0.20%,纯碱0.40%,CMC为0.40%,PAM为0.10%。

### 3.5 各类聚合物泥浆减摩效果分析

采用室内直剪试验,仪器为WDAJ-600型岩石剪切流变试验机(图9),底座为C50混凝土,采用曲面灰岩,材料均与现场一致,以此更好地模拟实际的顶进过程,根据注浆前的摩擦系数和注入两种优化后的聚合物泥浆的摩擦系数变化情况,得出两种优化后的聚合物泥浆的减摩效果。

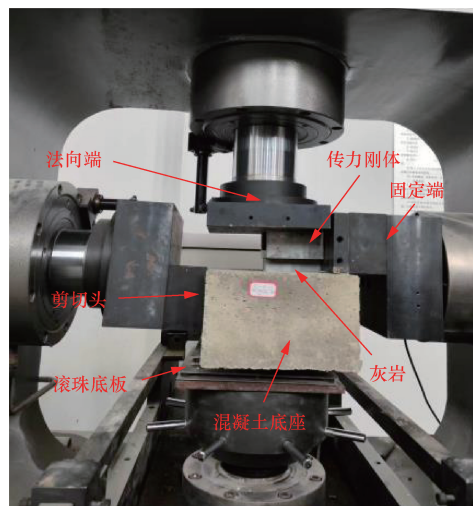


图9 WDAJ-600型岩石剪切流变试验机

Fig. 9 WDAJ-600 rock shear rheology tester

膨润土泥浆减摩效果可根据摩擦系数法进行评价<sup>[20]</sup>,相关公式为

$$\tau = \sigma' \mu = \sigma' \tan \varphi' \quad (3)$$

式(3)中: $\tau$ 为剪切力; $\sigma'$ 为法向力; $\mu$ 为接触面摩擦系数; $\varphi'$ 为混凝土与灰岩间的摩擦角,由于设定的初始法向力为1kN,法向力变化很小,接触面摩擦系数主要与剪切力有关。

根据图10摩擦系数平均值取各段曲线进入残余阶段的平均值,摩擦系数平均值分别为0.658、0.566、0.434,对比干摩擦的摩擦系数,钙基膨润土泥浆摩擦系数为干摩擦的0.86倍,使摩擦系数降低了14%;钠基膨润土泥浆摩擦系数为干摩擦的0.65倍,使得摩擦系数降低了35%。

试验结果表明:钙基膨润土泥浆对于岩石顶管的顶进效率提升并不理想,不太适用于该工程,而钠基膨润土泥浆让岩石顶管顶进效率提升了35%,进一步说明了,上述泥浆优化配比方案的可靠性和准确性。

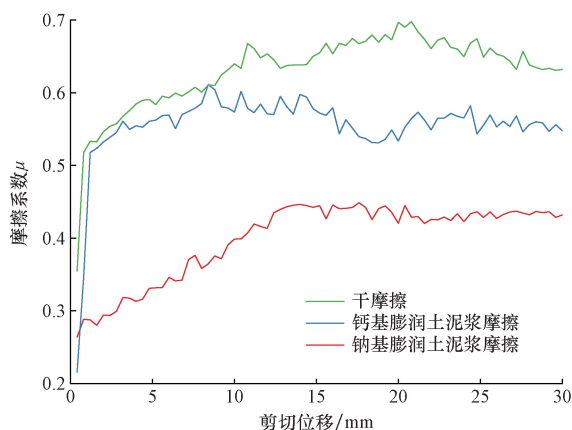


图 10 不同条件下摩擦效果变化图

Fig. 10 Variation of friction effect under different conditions

## 4 结论

以重庆观景口水利枢纽工程为基础,通过开展不同类型膨润土泥浆配比,及室内直剪试验,探究了聚合物泥浆的最优配比,以及减摩效果,并通过进一步的分析得出了以下结论。

(1)对于岩石顶管来说,钠基膨润土各项性能参数优异,钙基膨润土泥浆各项性能参数较好,但在减摩效果却没有钠基膨润土泥浆优异,而有机膨润土虽然在钻井方面有着优异的性能,但由于密度过小,无法支撑地层,无法适用于工程中,故不考虑。膨润土与水的质量比为 14%,瓜儿胶 0.20%,纯碱 0.40%,CMC 为 0.40%,PAM 为 0.10% 为钠基膨润土泥浆的最优配比,该配比的流动系数以及稠度系数处于最佳状态,具有良好的流动性和触变性,失水量与析水率为 0,泥饼厚度致密,稳定。

(2)直剪试验表明,钙基膨润土泥浆和钠基膨润土泥浆都有着较好的减摩效果,其中钠基膨润土泥浆减摩明显,能够使混凝土与灰岩之间的摩擦系数降低了 35%,使得顶管顶进过程中,管岩间的摩擦阻力大大降低。

(3)由于聚合物泥浆在静置后,其稠度和流变系数均会发生改变,由于工程中可能会存在泥浆静置的情况,因此聚合物泥浆静置后其浓度以及减摩性能仍需要进一步地研究。

## 参 考 文 献

[1] 魏纲,徐日庆,邵剑明,等.顶管施工中注浆减摩作用机理的研究[J].岩土力学,2004(6):930-934.  
Wei Gang, Xu Riqing, Shao Jianming, et al. Research on mechanism of reducing friction through injecting slurry in pipe jacking [J]. Geotechnics, 2004(6): 930-934.

[2] Cheng W, Wang L, Xue Z, et al. Lubrication performance of pipe-jacking in soft alluvial deposits[J]. Tunnelling and Underground

Space Technology, 2019, 91: 102991.

[3] Khazaei S, Shimada H, Matsui K, et al. Analysis and prediction of thrust in using slurry pipe jacking method[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2004, 19(4/5): 356.

[4] Zhou S, Wang Y Y, Huang X C. Experimental study on the effect of injecting slurry inside a jacking pipe tunnel in silt stratum[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2009, 24(4): 466-471.

[5] 冯锐,张鹏,苏树尧,等.大口径长距离钢顶管注浆减阻技术:以黄浦江上游水源地连通管工程为例[J].地质科技通报,2020,39(4):174-180.  
Feng Rui, Zhang Peng, Su Shuyao, et al. Resistance reduction by grouting to large diameter and long distance steel pipe jacking: a case study of pipe jacking project in the upstream water source area of Huangpu River[J]. Geoscience and Technology Bulletin, 2020, 39(4): 174-180.

[6] 王昭鹏,赵文,王志国,等.粉质黏土替代膨润土改性泥浆配比试验[J].科学技术与工程,2023,23(21):9287-9295.  
Wang Zhaopeng, Zhao Wen, Wang zhiguo, et al. Proportioning test of silty clay replacement bentonite modified slurry [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(21): 9287-9295.

[7] Zhang P, Ma B, Zeng C, et al. Key techniques for the largest curved pipe jacking roof to date: a case study of Gongbei tunnel [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2016, 59: 134-145.

[8] 雷华阳,刘旭,施福硕,等.顶管工程聚合物改性膨润土泥浆配比优化研究[J].岩土工程学报,2021,43(S2):51-55.  
Lei Huayang, Liu Xu, Shi Fushuo, et al. Proportional optimization of polymer-modified bentonite slurry in pipe jacking [J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43(S2): 51-55.

[9] 周海文,周晓敏,葛良,等.富水砂卵石地层冻结孔钻进泥浆配比优化研究[J].科学技术与工程,2023,23(14):6207-6216.  
Zhou Haiwen, Zhou Xiaomin, Ge Liang, et al. Optimization of mud ratio for freezing hole drilling in water-rich sand pebble formation [J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(14): 6207-6216.

[10] Liu J, Wang X, Cheng H, et al. Orthogonal design and micro-structure mechanism analysis of novel bentonite polymer slurry in pipe jacking[J]. Polymers, 2023, 15(6): 1461.

[11] Li C, Zhong Z, Liu X, et al. Numerical simulation for an estimation of the jacking force of ultra-long-distance pipe jacking with frictional property testing at the rock mass-pipe interface[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2019, 89: 205-221.

[12] 张雪,万中正,王传银,等.无水砂层中矩形顶管施工用触变泥浆配比优化及减阻性能试验[J].工程地质学报,2021,29(5):1611-1620.  
Zhang Xue, Wan Zhongzheng, Wang Chuanyin, et al. Optimization thixotropic slurry ratio and drag reduction performance test for rectangular pipe jacking in anhydrous sand layer[J]. Journal of Engineering Geology, 2021, 29(5): 1611-1620.

[13] Deng Z, Liang N, Liu X, et al. Analysis and application of friction calculation model for long-distance rock pipe jacking engineering[J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2021, 115: 104063.

[14] Stein D. Trenchless technology for installation of cables and pipe-

- lines [ M ]. Bochum; Prof. Dr. -Ing. Stein & Partner GmbH, 2005.
- [15] Sun Y, Zhao D. Research and experimental application of new slurry proportioning for slag improvement of EPB shield crossing sand and gravel layer[J]. Coatings, 2022, 12(12): 1961.
- [16] 袁为岭, 荣亮, 杨红军. 原材料含量对顶管施工触变泥浆性能的影响[J]. 隧道建设, 2016, 36(6): 683-687.  
Yuan Weiling, Rong Liang, Yang Hongjun. Influence of raw materials content on performance of thixotropic slurry used in pipe jacking[J]. Tunnel Construction, 2016, 36(6): 683-687.
- [17] 王明胜, 刘大刚. 顶管隧道工程触变泥浆性能试验及减阻技术研究[J]. 现代隧道技术, 2016, 53(6): 182-189.  
Wang Mingsheng, Liu Dagang. Research on thixotropic mud performance test and drag reduction technology for pipe jacking tunnel engineering[J]. Modern Tunneling Technology, 2016, 53(6): 182-189.
- [18] Liu D, Zhang W, Tang Y, et al. Orthogonal experimental study on concrete properties of machine-made tuff sand[J]. Materials, 2022, 15(10): 3516.
- [19] 幸雪松, 邱浩, 文敏, 等. 基于正交实验法射孔参数优化设计数值模拟[J]. 科学技术与工程, 2022, 22(25): 10952-10957.  
Xing Xuesong, Qiu Hao, Wen Min, et al. Numerical simulation investigation of perforation parameter optimization design based on orthogonal experimental method[J]. Science Technology and Engineering, 2022, 22(25): 10952-10957.
- [20] Reilly C C, Orr T L L. Physical modelling, of the effect of lubricants in pipe jacking [J]. Tunnelling and Underground Space Technology, 2017, 63: 44-53.