

纳米添加剂对触变泥浆减阻效果影响的试验研究

金棋武¹, 杨 讷², 夏 伟², 张 军², 陈 超^{3,4}, 陈超维^{3,4}, 王 伟^{3,4}

(1. 浙江省水利水电工程质量与安全中心; 2. 浙江省水电建筑安装有限公司;

3. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室; 4. 河海大学岩土工程科学研究所)

摘要:为寻找能有效提升引水工程顶管施工中触变泥浆减阻效果的纳米添加剂,设计了三因子五水平正交试验以获得适用于实际工程的触变泥浆最优配合比,并在此基础上进行缩尺物理模型试验以探究不同纳米添加剂对泥浆减阻效果的影响。结果表明:膨润土含量对泥浆黏度、滤失量和泥皮厚度有极大影响,CMC含量对泥浆滤失量和黏度影响较大,碳酸钠含量主要提高泥浆的pH值,对其黏度和滤失量也略有影响,选取质量分数为10%的膨润土、0.3%的CMC和0.32%的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比;纳米添加剂的减阻效率大致在0.4~0.6之间,随着管土间压强增大,添加剂减阻效率有所降低;涂抹凡士林后管片变得光滑,其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低;纳米碳粉和纳米氧化锌可降低管土间摩擦系数,所有纳米材料均可降低管土黏聚力,在实际引水工程中,可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。

关键词:触变泥浆; 纳米添加剂; 减阻; 正交试验; 顶管施工

Experimental study on effect of nano-additives on drag reduction performance of thixotropic slurry// Jin Qiwu¹, Yang Ne², Xia Wei², Zhang Jun², Chen Chao^{3,4}, Chen Chaowei^{3,4}, Wang Wei^{3,4} (1. Zhejiang Provincial Water Resources and Hydropower Engineering Quality and Safety Management Center; 2. Zhejiang Hydropower Construction and Installation Co., Ltd.; 3. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University; 4. Geotechnical Research Institute, Hohai University)

Abstract: In order to identify nano-additives that can effectively enhance drag reduction performance of thixotropic slurry used in pipe jacking construction of water diversion projects, an orthogonal test with three factors and five levels was designed to obtain an optimal slurry formulation suitable for engineering practice. On this basis, reduced-scale physical model tests were conducted to investigate the effects of different nano-additives on the slurry's drag-reduction performance. The results show that the bentonite content has a significant influence on the slurry's viscosity, fluid loss, and filter-cake thickness, the CMC content greatly affects fluid loss and viscosity, and the sodium carbonate content mainly increases the slurry's pH value, while only slightly affecting viscosity and fluid loss. Consequently, the optimal formulation was determined as 10% mass fraction of bentonite, 0.3% of CMC, and 0.32% of sodium carbonate. The friction reduction efficiency of the nano-additives is generally within 0.4 to 0.6 and decreases with increasing contact pressure between the pipe and soil. After applying petroleum jelly, the pipe surface becomes smoother, and both the friction force and pipe-soil cohesion are reduced. Nano carbon powder and nano zinc oxide can reduce the pipe-soil friction coefficient, and all nano-materials can reduce pipe-soil cohesion. For practical water diversion projects, nano zinc oxide is recommended as a preferred additive.

Key words: thixotropic slurry; nano-additive; drag reduction; orthogonal test; pipe jacking construction

为解决区域性缺水问题,优化水资源“南北调配、东西互济”格局,2023年印发的《国家水网建设规划纲要》明确提出将跨流域引调水工程列为国家水网建设核心任务。然而,随着引水工程规模不断扩大,面对生态环境敏感且需穿越河流湖泊水域或既有设施区域的复杂地段,传统施工方法已无法满

足工程需求^[1]。相较于明挖法、盾构法等地下开挖方法,顶管施工可避免大规模的土方开挖,对周围环境影响较小,且工期短、造价低、地层条件适应性强,在引水工程中得到广泛应用^[2]。但在长距离或复杂地层顶进过程中,管土界面摩擦持续累积,可能诱发“整体背土效应”^[3],进而威胁施工稳定性和工程

安全,因此如何有效控制管土界面摩阻成为顶管施工的关键问题。

触变泥浆由膨润土、水和化学处理剂混合而成,在静置和受扰动条件下分别呈凝胶和溶胶状态,这种独特的触变性使其被广泛应用于顶管施工中。在管节顶进过程中,触变泥浆作为润滑剂被压入管节与土层之间,将管土间的干摩擦转变为湿摩擦,大大减小了管节所受摩阻力,能有效降低背土效应对工程安全的影响^[4]。同时,在注浆压力作用下,触变泥浆向地层中渗透和扩散,逐步形成相对密实的泥浆套,对土层起到了一定的填补和支撑作用^[5]。但是,目前工程中所用的触变泥浆大多配方简单,仅有最基本的膨润土和水,减阻效果往往达不到预期值,并且对于不同性质的地层其减阻效果差异十分明显。因此,针对特定地层与工况,需要研发相应的减阻性能优良的触变泥浆以满足引水工程安全与高效的需求。

近年来,众多学者对触变泥浆开展了系统研究,取得了丰硕的成果。例如:刘招伟等^[6]针对不同覆土压力和浆土混合比例,利用自行设计的试验台架对触变泥浆在砂质土和黏性土两种地层条件下的减阻效果和浆液扩散半径进行了模拟试验,发现提高黏土含量会降低泥浆减阻效果;王明胜等^[7]对触变泥浆进行了一系列性能测试,以研究不同组分含量对泥浆性能的影响,并结合现场地层条件确定了泥浆最优配合比,根据现场实测数据得出泥浆的减阻效果达到50%以上;张雪等^[4]通过正交试验优选出触变泥浆的最优配合比,开展模型试验研究了泥浆的减阻性能,并结合电镜扫描试验结果分析了泥浆的微观结构和减阻机理,发现各组分含量都会影响泥浆性能。总体而言,现有研究多聚焦于膨润土、碳酸钠等常规材料体系内的配合比优化,主要改善泥浆黏度、滤失量等指标,而管土界面在高压、长时程条件下的边界润滑能力仍受材料本身性质制约,导致减阻性能存在材料上限^[8-9]。因此,将具备特殊润滑特性的材料作为添加剂加入触变泥浆中以提高泥浆的减阻效果将成为突破泥浆性能上限的关键。

目前,在润滑与减摩领域,纳米材料常被作为添加剂广泛用于提升水基或油基润滑介质的润滑效果,并减少物体摩擦损耗^[10-12],其作用机理通常包括在接触界面形成承载摩擦膜、以微滚动降低剪切阻力、对磨损表面起到修复与隔离作用等^[13-14]。相关研究表明,少量纳米添加剂与商用润滑剂复配即可显著提升润滑剂的减摩性能^[15],并已被拓展至钻井液等复杂流体体系以提升其减阻润滑能力^[16]。然而,与常规润滑液相比,顶管触变泥浆具有高固相、触变结构明显且需长时间静置等特点,纳米材料在其中的分散稳定性、团聚沉降风险及其在管土界

面上的有效作用方式仍缺乏面向工程的定量验证。因此,有必要结合典型顶管压力条件与界面状态,对纳米添加剂在触变泥浆中的减阻效果开展针对性试验研究。

基于上述背景与需求,本文以实际引水工程为依托,采用正交试验对膨润土-碳酸钠-羧甲基纤维素(CMC)体系进行配合比优化,并引入不同类型纳米添加剂以强化界面润滑,以期为特定地层顶管施工提供可复现的泥浆配方与添加剂选型依据。

1 试验原理及方法

1.1 泥浆制备

使用电子秤称取一定量胶质价为100 mL/15 g的膨润土、纯度大于95%的碳酸钠粉末和CMC。首先将膨润土与CMC干混均匀后加入泥浆桶,并加入计量水,以250~350 r/min的转速搅拌15 min,使其充分水化分散,随后将碳酸钠粉末溶解于少量水中配制成碳酸钠溶液,缓慢加入泥浆桶并继续搅拌15 min至均匀。为降低纳米材料团聚沉降风险,纳米添加剂采用先预分散、再掺入的方式加入。采用的纳米材料规格为20~50 nm,首先将称量好的纳米材料边搅拌边加入部分配制用水中,使其完全润湿并得到均匀的纳米分散液,随后倒入泥浆桶中继续搅拌15 min,使其在泥浆体系中充分分散。泥浆搅拌完成后,将其倒入空桶中封闭起来,放置24 h后进行后续试验。考虑触变泥浆在静置条件下可能发生析水或团聚沉降等情况,放置过程中应对泥浆状态进行观察,本文试验条件下未观测到析水或团聚沉降现象。

1.2 试验仪器

试验仪器包括中压滤失仪、量筒、比重计、电子pH计和马氏漏斗,分别用于测定触变泥浆滤失量、析水率、比重、pH值和黏度。此外,搭建缩尺物理模型,配合电子拉力计测定不同条件下管片与地层间的摩阻力。

1.3 试验原理

触变泥浆性能指标主要包括黏度、滤失量和析水率等,不同配合比的泥浆性能差异悬殊,因此本文首先以膨润土、碳酸钠和CMC为基料进行正交配合比试验,研究不同组分对泥浆性能的影响,并根据试验结果提出触变泥浆最优配合比;再进行缩尺物理模型试验,在最优配合比基础上,掺入纳米材料作为润滑添加剂,研究其对触变泥浆减阻润滑作用的提升效果。具体试验流程见图1。

1.4 试验方案

首先进行触变泥浆配合比正交试验^[17],取3种基料膨润土(A)、碳酸钠(B)和CMC(C)的质量分数 w_A 、 w_B 、 w_C 作为影响因子,依据工程常用范围设

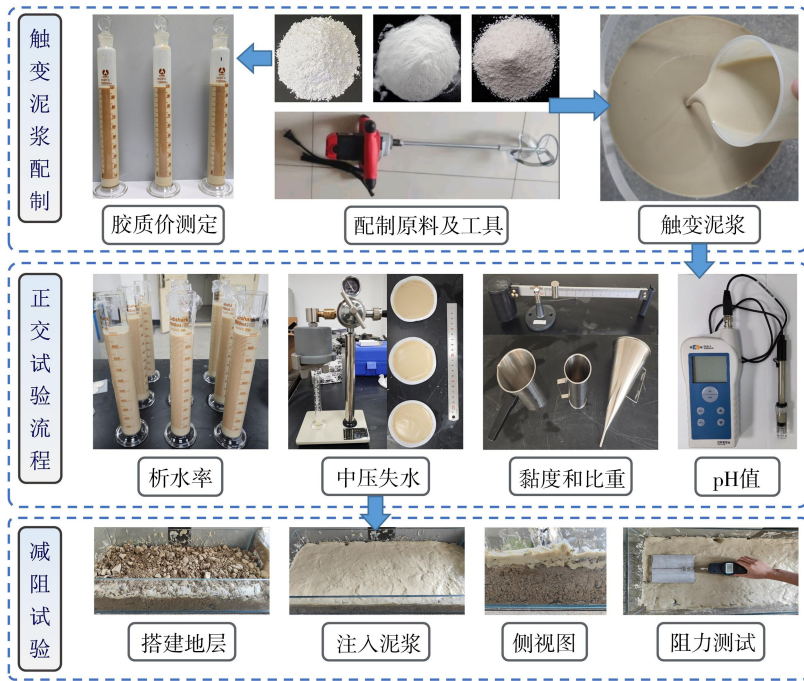


图1 试验仪器及流程

置5个水平^[4,18],具体水平值见表1。

表1 泥浆配合比取值

水平	$w_A/\%$	$w_B/\%$	$w_C/\%$
1	7.50	0.08	0.10
2	8.75	0.16	0.20
3	10.00	0.24	0.30
4	11.25	0.32	0.40
5	12.50	0.40	0.50

正交试验完成后,依据工程需求和规范要求选取泥浆最优配合比,在此基础上统一按0.5%的质量分数分别掺入纳米氧化硅、纳米氧化锌、纳米氧化铝、纳米碳粉和纳米纤维素以提高泥浆减阻润滑效果,并在缩尺物理模型中进行摩阻试验。摩阻试验所选用的混凝土板尺寸为150 mm×150 mm×10 mm。为模拟实际施工中管片涂蜡对减阻效果的影响,试验设置了采用刮刀在混凝土板底部均匀涂抹约2 mm厚的凡士林与不涂抹凡士林的对照工况,并对比了法向荷载为5.0、7.5、10.0 N条件下的摩阻试验结果。

2 触变泥浆配合比试验结果与分析

2.1 试验结果

按表1泥浆配合比基料取值进行三因子五水平正交试验,测试不同配合比泥浆的性能参数,试验结果见表2。本文所选配合比泥浆析水率皆为零,因此不作讨论。在部分组分条件下,泥浆黏度过大,甚至失去流动性,采用马氏漏斗测试时泥浆无法连续流出,导致读数超出该试验适用测量范围,因此不对读数进行记录,在后续极差分析时以1800 s代替读

数结果。

表2 正交试验设计及结果

编号	$w_A/\%$	$w_B/\%$	$w_C/\%$	比重	黏度/s	滤失量/mL	泥皮厚度/mm	pH值
1	7.50	0.08	0.10	1.04	47	11.2	1.0	10.46
2	7.50	0.16	0.20	1.04	59	9.6	1.5	10.61
3	7.50	0.24	0.30	1.04	81	8.4	1.2	10.80
4	7.50	0.32	0.40	1.04	136	7.8	1.5	10.83
5	7.50	0.40	0.50	1.04	206	7.2	1.5	10.90
6	8.75	0.08	0.20	1.05	77	8.8	2.0	10.48
7	8.75	0.16	0.30	1.05	88	8.2	2.0	10.62
8	8.75	0.24	0.40	1.05	129	7.0	1.8	10.72
9	8.75	0.32	0.50	1.05	104	6.8	2.0	10.82
10	8.75	0.40	0.10	1.05	228	10.2	2.0	10.87
11	10.00	0.08	0.30	1.06	82	8.2	2.0	10.38
12	10.00	0.16	0.40	1.06	154	7.2	2.0	10.61
13	10.00	0.24	0.50	1.06	404	7.0	2.0	10.95
14	10.00	0.32	0.10	1.06	1025	10.0	2.0	10.81
15	10.00	0.40	0.20	1.06	60	9.4	2.0	11.00
16	11.25	0.08	0.40	1.07		6.8	2.5	10.58
17	11.25	0.16	0.50	1.07		6.4	2.5	10.99
18	11.25	0.24	0.10	1.07	185	10.0	2.5	11.12
19	11.25	0.32	0.20	1.07	605	8.0	2.5	10.79
20	11.25	0.40	0.30	1.07		7.2	2.5	11.15
21	12.50	0.08	0.50	1.07		6.0	2.0	10.65
22	12.50	0.16	0.10	1.07	669	9.7	2.0	10.64
23	12.50	0.24	0.20	1.07		8.2	1.5	10.80
24	12.50	0.32	0.30	1.07		7.2	1.5	11.12
25	12.50	0.40	0.40	1.07		6.4	1.0	11.18

从表2可以看出,膨润土含量对泥浆比重起决定作用。当膨润土含量为7.5%时,泥浆比重为1.04,随着膨润土含量上升,泥浆比重逐渐增大,当膨润土含量为11.25%时,泥浆比重达到1.07。膨润土的主要成分为蒙脱石,是一种具有高吸水性的

黏土矿物,其颗粒能够吸收并保持大量水分。随着膨润土含量的增加,泥浆中的固体颗粒数量增加,使得泥浆密度增大,比重相应明显增大。其他因子掺量相较于膨润土极小,因此在膨润土含量相同时,其他因子变化对泥浆比重几乎没有影响。其余泥浆参数受不同因子耦合影响,无法直接看出各因子水平对浆液性能影响效果,需进行极差分析。

2.2 各因子水平对泥浆性能影响分析

根据正交试验结果进行极差分析,计算各因子所有水平的加和值和平均值,将各因子水平的平均值绘制成曲面图以直观分析不同因子对泥浆参数的影响效果,如图2所示。由图2可知,膨润土对泥浆各参数均有影响,CMC对泥浆滤失量和黏度影响较大,碳酸钠只对pH值有显著影响。根据平均值计算各因子对泥浆参数的极差(R 值),具体结果见表3。从表3可以看出,随膨润土含量增加,泥浆滤失量明显减小,泥皮厚度明显增大,黏度极大增加,pH值略有上升。膨润土主要矿物成分为蒙脱石,其结构为上下两层硅氧四面体夹一层铝氧八面体,具有较强的吸湿性和胀缩性。在水中加入少量膨润土后,蒙脱石颗粒在水中分散,悬浮于水中,形成稀疏的网状结构,使浆液具有黏滞性、触变性和润滑性^[19]。膨润土含量上升后,泥浆中固相含量增加,黏土颗粒网状结构变得致密,能有效增大浆液的黏

度并降低滤失量。此外,由膨润土颗粒相互吸附黏结形成的泥皮也随固相含量增加而明显增大。

表3 各因子对泥浆参数的 R 值计算结果

因子	R 值			
	滤失量/mL	泥皮厚度/mm	黏度/s	pH 值
w_A	1.34	1.16	1468	0.224
w_B	3.54	0.24	779	0.126
w_C	0.26	0.20	299	0.510

随 CMC 含量增大,泥浆滤失量极大减少,黏度明显增大,泥皮厚度和 pH 值几乎不变。CMC 是一种易溶于水的高分子化合物,一方面,其分子链上的羧甲基基团能与水分子间形成氢键,在分子间提供相互作用力,从而增加浆液的黏稠度^[20]。另一方面,CMC 能吸附于泥浆表面并形成一层薄膜,可有效减少黏土颗粒间的团聚沉降,从而大大提高膨润土悬浮稳定性,减少泥浆滤失量。

随碳酸钠含量增大,泥浆 pH 值明显上升,黏度略有增大,滤失量略有减小,泥皮厚度几乎不变。碳酸钠是一种常见的碱性无机化合物,在泥浆中水解后与钙离子、镁离子等反应生成沉淀,减少膨润土中杂质对泥浆性能的不利影响^[21],增大泥浆黏度。此外,碳酸钠可改善黏土颗粒的水化性能,使矿物结合更多自由水,从而促进膨润土在水中分散形成泥浆,并降低浆液滤失量。

在实际工程中,需根据地层条件选用不同配合

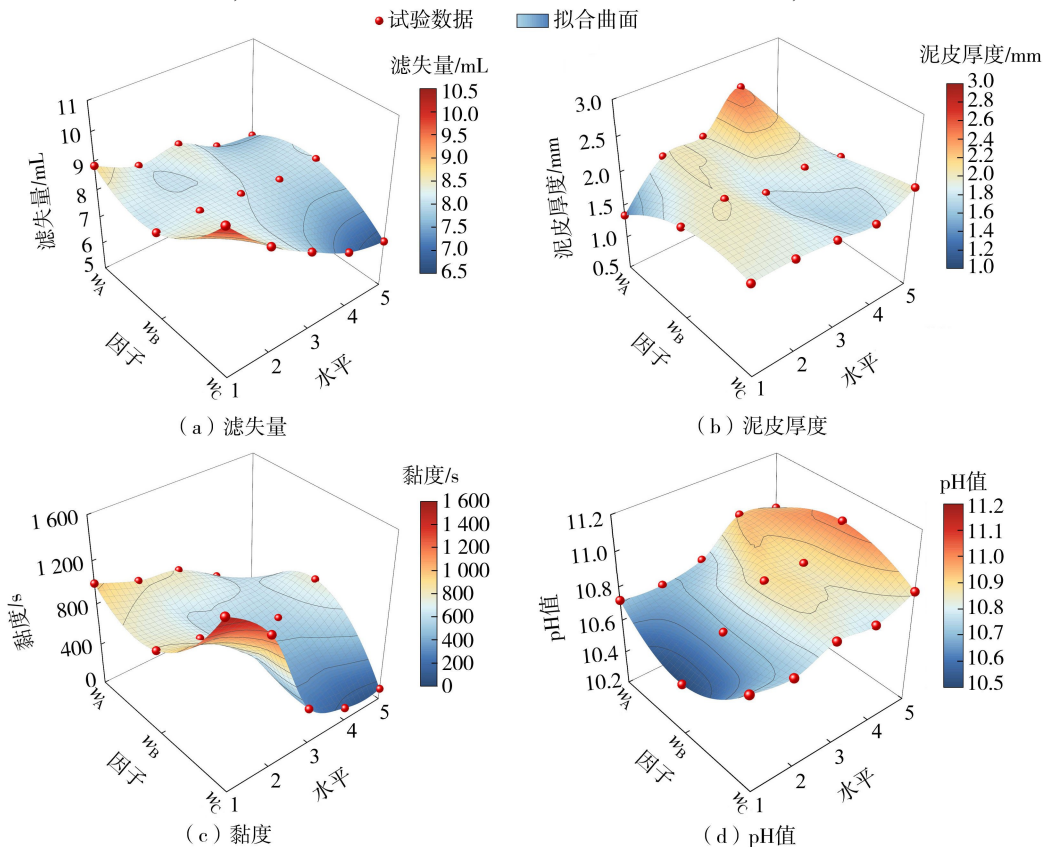


图2 泥浆参数随各组分水平变化

比泥浆以满足施工需求。一般工程要求触变泥浆黏度约为 120 s, 滤失量在 10 mL 以下, 泥皮厚度不大于 2 mm, pH 值约为 10, 并根据现场条件进行相应调整。根据表 2 试验结果及极差分析, 本文选取质量分数为 10% 的膨润土、0.3% 的 CMC 和 0.32% 的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比。

3 摩阻试验结果与分析

3.1 试验结果

根据 1.4 节方案进行摩阻试验, 在不同压力条件下采用涂抹与不涂抹凡士林管片对每种纳米添加剂配制而成的触变泥浆进行 5 次拉力测试, 取 5 个结果的平均值作为该压力下管片所受摩阻力, 再对 3 种压力条件下的摩阻力平均值进行曲线拟合, 绘制水泥板拉力与不同荷载情况下水泥板重量的摩阻力 F 和压力 P 的曲线, 结果如图 3 所示。

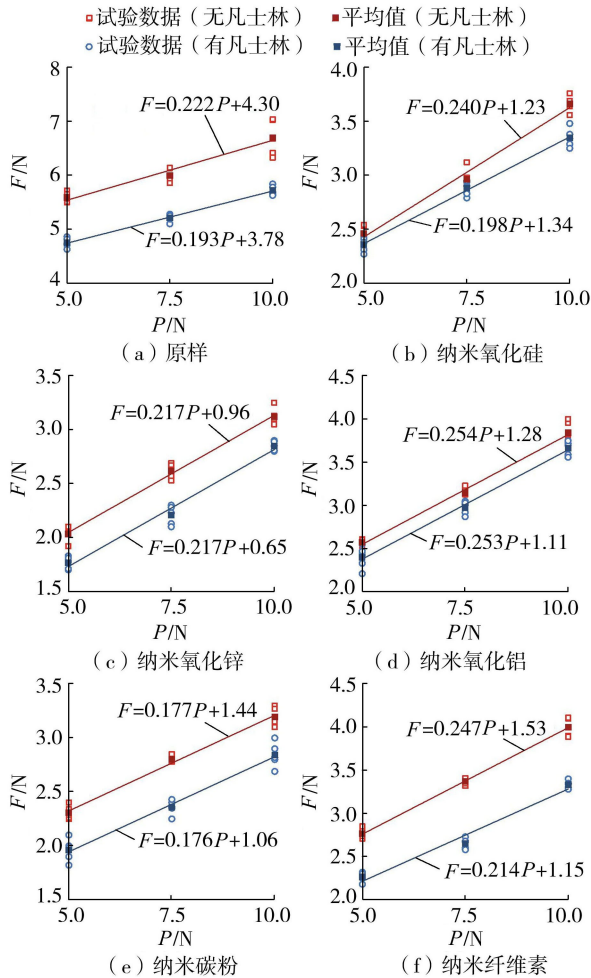


图 3 不同纳米添加剂对触变泥浆的减阻效果曲线

3.2 减阻效率分析

由图 3 可知, 添加不同纳米添加剂后管片所受摩阻力明显减小。定义添加纳米添加剂后管片所受摩阻力与原配合比条件下所受摩阻力比值为纳米添加剂的减阻效率, 将不同条件下添加剂的减阻效率

绘于图 4 中。由图 4 可知, 不同条件下纳米添加剂的减阻效率大致在 0.4~0.6 之间。其中, 纳米氧化锌和纳米碳粉的减阻效率明显高于其他添加剂。随着管土间压强增大, 添加剂减阻效率有所降低。这是因为在外部压力作用下, 黏土颗粒间接触面积增大, 相互作用力增强, 使得管土黏聚力增强^[22], 导致管片受到的摩阻力增大。

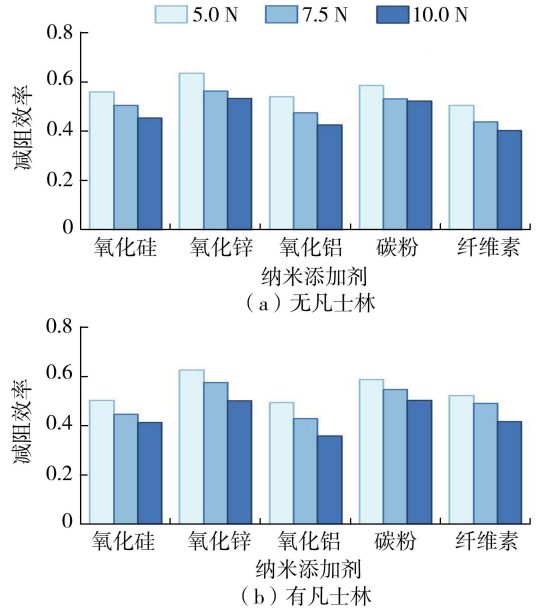


图 4 不同压力条件下纳米添加剂减阻效率

3.3 摩阻力组成分析

从图 3 还可以看出, 随着管土间压强增大, 管片所受摩阻力线性增大。管土间摩阻力主要由管土间摩擦力和管土黏聚力组成^[23], 单位面积所受摩阻力大小取决于摩擦系数、管土间压强及管土黏聚力, 可表示为:

$$f = \mu p + c \quad (1)$$

式中: f 为管片单位面积所受摩阻力, MPa; μ 为管土间摩擦系数; p 为管土间压强, MPa; c 为管片单位面积所受管土黏聚力, MPa。

对比不同粗糙度管片摩阻力, 可以发现涂抹凡士林后管片变得光滑, 管片不易与土粒间形成机械咬合, 其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低。为具体分析不同条件下管土间摩擦系数及黏聚力, 将其绘制成柱状图, 如图 5 所示。由图 5 可知, 纳米碳粉作为润滑剂可有效降低摩擦系数, 纳米氧化锌的作用略小, 其余纳米材料对降低摩擦系数的作用不大。纳米碳粉和纳米氧化锌在摩擦过程中可在管片表面形成一层保护膜^[24], 以减少管片与土粒直接接触, 这不仅能减少管片损耗, 还可以显著降低管土间的摩擦系数。所有纳米材料均可显著降低管土黏聚力, 这是因为纳米材料粒径较小, 极易在水中分散并吸附水分子, 从而改善浆液流动性能。

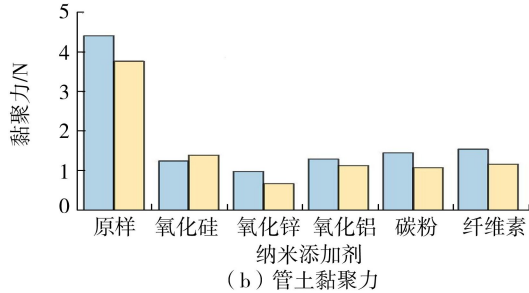
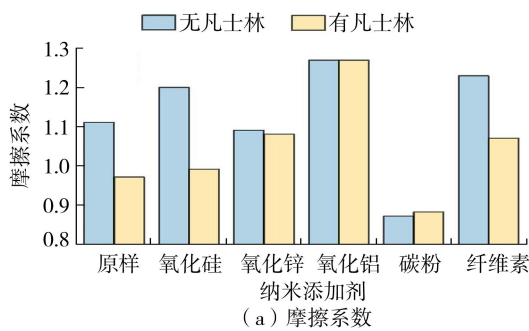


图5 不同纳米添加剂对摩擦系数与管土黏聚力的影响

根据上述分析,选用纳米碳粉或纳米氧化锌作为纳米添加剂可有效提升触变泥浆减阻效果,但考虑到碳粉价格高昂,大量使用会降低工程经济效益,因此可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。此外,也可根据实际条件选用其余纳米材料来减少管土黏聚力对管片的摩擦阻力。

4 结论

a. 膨润土含量对触变泥浆黏度、滤失量和泥皮厚度有极大影响,对 pH 值略有影响;CMC 含量对泥浆滤失量和黏度影响较大,对泥皮厚度和 pH 值几乎没有影响;碳酸钠含量主要提高泥浆 pH 值,对黏度和滤失量也略有影响。综合试验结果和工程需求,选取质量分数为 10% 的膨润土、0.3% 的 CMC 和 0.32% 的碳酸钠作为触变泥浆最优配合比。

b. 添加不同纳米添加剂可使触变泥浆减阻效果明显增强,不同添加剂的减阻效率大致在 0.4~0.6 之间。其中,纳米氧化锌和纳米碳粉的减阻效率明显高于其他添加剂。随着管土间压强增大,添加剂减阻效率有所降低。

c. 涂抹凡士林后管片变得光滑,其受到的摩擦力和管土黏聚力均有所降低。纳米碳粉和纳米氧化锌可降低管土间摩擦系数,所有纳米材料均可降低管土黏聚力。在实际引水工程中,可优先考虑将纳米氧化锌作为添加剂使用。

参考文献:

[1] 陈旺,彭焱锋,刘维正,等. 三孔顶管上穿施工对既有隧道与地表变形影响分析[J]. 现代隧道技术, 2025, 62(1): 170-182. (Chen Wang, Peng Yanfeng, Liu

Weizheng, et al. Analysis of the impact of the three pipe jacking over-crossing construction on existing tunnel and surface deformation [J]. Modern Tunnelling Technology, 2025, 62(1): 170-182. (in Chinese))

[2] 丰土根,周坤,张箭,等. 大截面矩形顶管施工对既有管线影响研究[J]. 工程力学, 2024, 41(5): 1-12. (Feng Tugen, Zhou Kun, Zhang Jian, et al. Study on the impact of large cross-section rectangular pipe jacking construction on existing pipelines [J]. Engineering Mechanics, 2024, 41(5): 1-12. (in Chinese))

[3] 高毅,冯超元,程鹏. 浅埋矩形顶管的“整体背土效应”研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(10): 1936-1942. (Gao Yi, Feng Chaoyuan, Cheng Peng, et al. Overall-carrying-soil effect of shallow buried rectangular pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(10): 1936-1942. (in Chinese))

[4] 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. (in Chinese))

[5] 寇磊,朱新华,白云,等. 顶管管节壁后触变泥浆探地雷达探测研究[J]. 地下空间与工程学报, 2016, 12(2): 477-483. (Kou Lei, Zhu Xinhua, Bai Yun, et al. Application of GPR to detect thixotropic clay slurry outside the tube of pipe jacking [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2016, 12(2): 477-483. (in Chinese))

[6] 刘招伟,杨朝帅. 矩形顶管隧道施工中触变泥浆套形成规律及减阻效果试验[J]. 河南理工大学学报(自然科学版), 2016, 35(4): 568-576. (Liu Zhaowei, Yang Chaoshuai. Forming law of thixotropic mud holster and test of reducing resistance effect in rectangular pipe jacking tunnel construction [J]. Journal of Henan Polytechnic University (Natural Science), 2016, 35(4): 568-576. (in Chinese))

[7] 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. test of thixotropic slurry properties and study of resistance-reducing technology for pipe jacking tunnel construction [J]. Modern Tunnelling Technology, 2016, 53(6): 182-189. (in Chinese))

[8] 刘俊霞,燕依梦,海然,等. 磷酸镁水泥及其修补砂浆耐水性研究进展[J]. 水利水电科技进展, 2023, 43(3): 94-100. (Liu Junxia, Yan Yimeng, Hai Ran, et al. Research progress on water resistance of magnesium phosphate cement and its repair mortar [J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2023, 43

- (3):94-100. (in Chinese))
- [9] 郑忠良, 尤博, 张兆彪, 等. 不同水灰比条件下碳酸钙晶须对水泥净浆收缩性能的影响[J]. 水利水电科技进展, 2024, 44(1): 66-72. (Zheng Zhongliang, You Bo, Zhang Zhaobiao, et al. Influence of calcium carbonate whiskers on shrinkage performance of cement paste with different water cement ratios[J]. Advances in Science and Technology of Water Resources, 2024, 44(1): 66-72. (in Chinese))
- [10] 乔红斌, 陈文勇, 张大伟, 等. 高分子固体润滑材料研究进展[J]. 高分子通报, 2023, 36(12): 1598-1609. (Qiao Hongbin, Chen Wenyong, Zhang Dawei, et al. Research progress on solid lubricating polymer materials [J]. Polymer Bulletin, 2023, 36(12): 1598-1609. (in Chinese))
- [11] 付甜, 麻拴红, 周峰, 等. 石墨烯的功能化改性及其作为水基润滑添加剂的应用进展[J]. 摩擦学学报, 2022, 42(2): 408-425. (Fu Tian, Ma Shuanhong, Zhou Feng, et al. Progress of functionalized graphene nanomaterials and their applications as water-based lubricating additives[J]. Tribology, 2022, 42(2): 408-425. (in Chinese))
- [12] 王永欣, 胡艺纹, 赵海超, 等. 石墨烯基水基润滑添加剂研究进展[J]. 材料导报, 2021, 35(19): 19055-19061. (Wang Yongxin, Hu Yiwen, Zhao Haichao, et al. Research progress of graphene as additives of water-based lubricants [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19055-19061. (in Chinese))
- [13] 赵聪慧, 张传祥, 张晓琪, 等. 碳量子点的摩擦学研究进展[J]. 表面技术, 2023, 52(10): 1-19. (Zhao Conghui, Zhang Chuanxiang, Zhang Xiaoqi, et al. Research progress of carbon quantum dot in tribology [J]. Surface Technology, 2023, 52(10): 1-19. (in Chinese))
- [14] 王伟, 解泽磊, 屈怡坤, 等. Graphene/SiO₂ 纳米复合材料作为水基润滑添加剂的摩擦学性能[J]. 材料研究学报, 2023, 37(7): 543-553. (Wang Wei, Xie Zelei, Qu Yishen, et al. Tribological properties of Graphene/SiO₂ nanocomposite as water-based lubricant additives [J]. Chinese Journal of Materials Research, 2023, 37(7): 543-553. (in Chinese))
- [15] 岳鹏, 张玉娟, 张平余, 等. 润滑油纳米添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2020, 49(9): 19-34. (Yue Peng, Zhang Yujuan, Zhang Pingyu, et al. Research progress of nanomaterials as lubricant oil additives [J]. Surface Technology, 2020, 49(9): 19-34. (in Chinese))
- [16] 龙海锋, 王平全, 李前贵, 等. 纳米材料在水基钻井液中的应用研究进展[J]. 应用化工, 2021, 50(增刊1): 274-277. (Long Haifeng, Wang Pingquan, Li Qiangui, et al. Advances in the application of nanomaterials in water-based drilling fluids [J]. Applied Chemical Industry, 2021, 50(S1): 274-277. (in Chinese))
- [17] 张伟为, 康元顺, 崔哲华, 等. 基于正交试验方法的大型有面外支撑杆 X 撑结构的屈曲分析和优化设计[J]. 工程力学, 2022, 39(增刊1): 261-271. (Zhang Weiwei, Kang Yuanshun, Cui Zhehua, et al. Buckling analysis and optimal design of large-scale X-brace structure with out-of-plane support bars based on orthogonal test method [J]. Engineering Mechanics, 2022, 39(S1): 261-271. (in Chinese))
- [18] Yu Xiao, Cao Yajun, Tian Fubing, et al. Experimental study on the effect of hydroxyethyl cellulose on the friction-reducing performance of thixotropic slurries in pipe jacking construction [J]. Materials, 2025, 18(13): 3155.
- [19] 张超凡, 管学茂, 张海波, 等. 机械力化学改性钙基膨润土提高注浆材料的稳定性[J]. 材料导报, 2019, 33(20): 3408-3412. (Zhang Chaofan, Guan Xuemao, Zhang Haibo, et al. Mechano-chemical modified calcium bentonite improves stability of grouting materials [J]. Materials Reports, 2019, 33(20): 3408-3412. (in Chinese))
- [20] 袁小一, 崔琦, 陈兵. 聚合物对膨润土基竖向防渗屏障工程性能的影响与机理表征[J]. 哈尔滨工程大学学报, 2025, 46(6): 1090-1097. (Yuan Xiaoyi, Cui Qi, Chen Bing, et al. Effects of polymers on the engineering properties and modification mechanisms of bentonite-based vertical barriers [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2025, 46(6): 1090-1097. (in Chinese))
- [21] 李娜娜, 刘月妙. 高温低氧条件下膨润土添加碳酸钠和菱铁矿试验研究[J]. 原子能科学技术, 2019, 53(12): 2344-2352. (Li Nana, Liu Yuemiao. Experiment study on adding Na₂CO₃ and siderite into bentonite under high temperature and low oxygen condition [J]. Atomic Energy Science and Technology, 2019, 53(12): 2344-2352. (in Chinese))
- [22] 许桐, 刘昌义, 胡夏嵩, 等. 西宁盆地黄土区荷载条件下植被护坡力学效应[J]. 农业工程学报, 2021, 37(2): 142-151. (Xu Tong, Liu Changyi, Hu Xiasong, et al. Mechanical effects of vegetation protection on slope under loading conditions in loess areas of Xining Basin [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2021, 37(2): 142-151. (in Chinese))
- [23] 张鹏, 谈力昕, 马保松. 考虑泥浆触变性和管土接触特性的顶管摩阻力公式[J]. 岩土工程学报, 2017, 39(11): 2043-2049. (Zhang Peng, Tan Lixin, Ma Baosong, et al. Formulae for frictional resistance considering mud thixotropy and pipe-soil contact characteristics [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2017, 39(11): 2043-2049. (in Chinese))
- [24] 苏峰华, 张欣博, 孙建芳. 功能化石墨烯及石墨烯基纳米复合材料润滑添加剂的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 1-17. (Su Fenghua, Zhang Xinbo, Sun Jianfang, et al. Research progress of functionalized graphene and graphene-based nanocomposites lubricant additives [J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 1-17. (in Chinese))

(收稿日期: 2025-11-04 编辑: 俞云利)