

不同材料组成的触变泥浆减阻性能试验研究

邹德乾, 朱小刚

(中交一航局第三工程有限公司)

摘要: 为保证顶管施工中触变泥浆能表现出最佳减阻效果, 保障顶管施工安全快速进行并实现经济效用最大化, 以武汉光谷中心城综合管廊工程 PPP 项目为依托, 利用工程采购现有的触变泥浆原材料, 开展多配比性能对比试验。通过试验对不同配比泥浆的黏度、失水量、滤饼厚度指标进行分析, 筛选出综合性能最优配比方案的结果, 并通过自由滑动模型装置模拟减阻效果进一步证实最优配比方案的可行性。结果表明, 经优化后的材料组成配比触变泥浆能最大程度发挥润滑减阻和支撑地层作用, 为顶管施工提供重要保障, 该配比方案应用于工程施工可实现经济效用最大化, 为类似工程的触变泥浆配比优化提供了参考。

关键词: 摩阻表现; 矩形顶管; 触变泥浆; 配合比设计

0 引言

触变泥浆是一种具有特殊流变特性的胶体体系, 其核心成分为膨润土、水和添加剂。其中, 膨润土颗粒在水中分散后形成片状胶体结构, 通过吸附水分子形成具有一定强度的凝胶网络。当泥浆受到机械扰动(如顶管推进时的剪切作用), 凝胶网络破坏并转化为可流动的溶胶状态, 从而显著降低管土界面摩擦力。扰动停止后, 溶胶又逐渐恢复为凝胶, 在管壁周围形成厚度均匀、强度稳定的“泥浆套”。这一特性使触变泥浆兼具减阻与支撑双重功能。光滑的黏膜层可将顶进阻力降低 40%~70%, 大幅减少顶进设备负荷与能耗; 泥浆通过一定压力密实填充管节与土体间的空隙, 产生的液柱静压力可以平衡土压, 有效控制地表沉降, 尤其适用于富水地层、软弱土层等复杂地质条件^[1]。

国外自 1952 年开创触变泥浆液体减阻法后, 不断研发新型添加剂改善泥浆性能, 并针对复杂地层开展大量试验与模拟。国内自 1969 年起应用触变泥浆, 近年来在材料上对膨润土改性开发环保型材料, 在施工中解决了多项复杂工程难题, 但触变泥浆研究和应用仍存在诸多问题包括: 泥浆置换困难, 影响结构稳定性; 性能受环境因素干扰大; 材料配比缺乏针对性; 关键指标缺乏统一评价标准, 制约行业发展。本文围绕触变泥浆的材料组成、作用机制及性能优化展开研究, 通过工程现有材料的科学配比设计优化, 提升顶管

施工的安全性与经济性。

本文通过对比不同配比下的泥浆指标表现, 结合一套自由滑动模型装置, 室内模拟顶进试验验证减阻效果, 最终筛选出兼顾施工效率与地层保护的最优配比。研究成果不仅可为具体工程提供参数依据, 更有望为触变泥浆的标准化应用与高性能材料开发提供理论支撑, 推动顶管施工技术向绿色化、智能化方向发展。

1 工程概况

武汉光谷综合管廊项目全长 24.47 km, 是武汉市一次性建设长度最长的管廊项目。项目建成后, 规划入廊管线包括给水、再生水、冷/热水、电力、信息等, 极大程度地解决了地上与地下管线杂乱布设后影响城市景观与后期建设, 以及管线损坏后不易排查、修复困难的问题, 进一步推进智慧城市建设。

项目结构在神墩五路交叉口与正在运营的 T2 线有轨电车及武黄高速位置存在立体交叉, 采用矩形顶管下穿工艺, 包括下穿 T2 线及下穿武黄高速 2 处, 顶进段长度均为 42.405 m, 管节单节长度约为 1.5 m, 管节顶进节数总计 56 节, 总长 84.81 m。下穿 T2 线处管顶覆土平均厚度 5.3 m, 下穿武黄高速处管顶覆土平均厚度 5.7 m。根据地质报告, 顶进区域为均匀地质, 处于强风化、中风化岩层条件, 管节与土层摩阻力很大, 注入触变泥浆后, 摩阻力将由原来的 220 kN/m² 以上降至 5 kN/m² 以下, 在降低能耗方面的功效极其显著。

2 原材料

目前行业内常用的触变泥浆配方以膨润土、羧甲基纤维素钠(CMC)和纯碱为基础^[2]。传统配方虽能满足基本施工需求,但在长距离顶进、高渗透性地层等场景下,常因泥浆失水率高、黏度衰减快而导致减阻效果下降,甚至引发土体坍塌风险。因此,优化材料配比、平衡各项性能指标成为工程实践的迫切需求。以下分别是膨润土、羧甲基纤维素钠(CMC)和纯碱3种材料各项性能指标检测结果。

钠基膨润土为灰色粉末,是一种以蒙脱石为主要成分的黏土矿,其层间主要交换的阳离子为钠离子,具有稳定的悬浮性和增稠性,能有效托浮分散粉体,还具有优良的胶体性能和剪切稀释能力。项目材料采购自杭州锐钻膨润土有限公司,各项性能指标均符合 GB/T 20973—2020《膨润土》要求,检测数据见表1。

表1 钠基膨润土性能检测值

含水率/%	滤失量/m ³	用75 μm筛网湿筛余量/%	塑性黏度/(mPa·s)	pH值
15	14.0	2.5	2	9.5

羧甲基纤维素钠(CMC-Na)是增稠剂的一种,为白色絮状粉末,几乎无臭、无味,易吸潮溶于水,当pH值>10或pH值<5时,胶体黏度显著降低,在pH值=7时性能最佳。各项性能指标均符合 GB/T 12028—2006《洗涤剂用羧甲基纤维素钠》要求,检测数据见表2。

表2 羧甲基纤维素钠性能检测值

取代度	黏度/(mPa·s)	pH值
0.93	420	7.0

纯碱又名碳酸钠,为白色粉末,易溶于水,适当调节泥浆pH值,在提高泥浆稳定性方面效果显著。各项性能指标均符合 GB/T 2102—2004《工业碳酸钠及其试验方法》要求,检测数据如表3所示。

表3 纯碱性能检测值

总碱量	氯化钠	水不溶物
99.61	0.33	0.007

3 试验方法

本文以“高保水、低黏度”为核心原则,通过正交试验设计多组泥浆配比,系统研究材料比例对泥浆性能的影响规律,分析验证减阻效用,从而优选泥浆配比。注浆稠度通常需要保持在15~20s(秒表法)之间,泥浆稠度直接决定了注浆效率以及减阻效果,过稠的泥浆可能会导致顶进困难,而过稀的泥浆则无法有效减少摩擦阻力。因此,施工前应进行充分的试验和优化调整,以确保达到最佳的施工效果和经济效益,以下根据进场膨润土各项性能,先配制不同比例的泥浆,以适应现场地质条件,比选出最佳稠度的膨润土掺量。综合性能评价参考黏度(马氏漏斗黏度计测定)、滤饼厚度(滤失仪测试)、失水量等关键性指标。其中,黏度直接影响减阻效果,低黏度泥浆更利于在管土间隙中快速扩散形成有效泥浆套;滤饼厚度与失水量表征泥浆的抗渗性能,数值越小表明保水能力越强,越不易在高渗透性地层中失效,抑制泥浆静置后的分层倾向,维持长时间稳定性能力更强。

3.1 膨润土基准掺量确定

为满足现场施工对泥浆性能的精准需求,基于工程经验与材料特性,初步划定膨润土掺量的区间为2%~16%,既涵盖了低掺量下泥浆的基础性能测试,也包含高掺量下稠度极限的验证可能。再以2%梯度掺量递增,配置出8种不同配合比的泥浆样本。每种配比均严格遵循称量、搅拌、静置的标准化流程制备,确保样本的一致性与可对比性。

为了系统分析膨润土掺量与泥浆稠度的线性关系,通过数据波动识别临界掺量节点,为后续优化施工配合比提供详实的试验依据,稠度检测采用马氏漏斗黏度计测定,对每种配比泥浆进行3次平行试验,取平均值以降低偶然误差,并绘制出关系曲线,见图1。

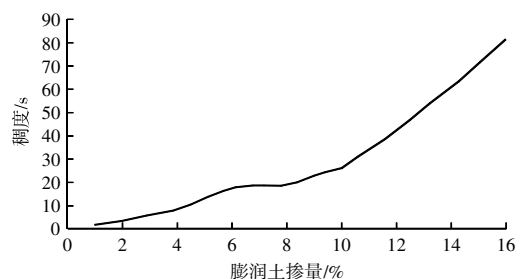


图1 膨润土掺量与稠度的关系曲线

由图1可以看出,泥浆稠度随着膨润土含量的增加呈明显递增趋势,当膨润土含量在6%~8%时,稠度在17~19s之间,稳定性最好,也是最佳注浆稠度,结合经济成本考虑,取中值7.0%作为膨润土基准掺量。

然而以上所有配比泥浆的失水量都超过了35 mL,泥饼厚度均在10 mm以上,现场施工条件无法实现注浆,进而需要添加羧甲基纤维素钠 CMC 和纯碱来改善黏度和失水量,以下从9组比例的不同性能比选出最优配比。

3.2 配合比调配及性能指标检测

在膨润土掺量固定为7%的试验框架下,展开对 CMC(羧甲基纤维素钠)与纯碱掺量的梯度调整研究,系统性配置9组不同配合比的泥浆样本。其中,CMC 与纯碱掺量分别设定为0.2%、0.3%、0.4%三个梯度,通过正交组合形成9组比例配合比。针对每组泥浆样本,分别开展黏度、失水量、滤饼厚度3项关键性能指标的检测^[3]。黏度检测采用马氏漏斗黏度计,通过测量500 mL 泥浆从漏斗流出的时间,评估泥浆内部阻力特性,反映其悬浮携砂能力。失水量检测运用中压滤失仪(100 psi 压力条件),测定30 min 内泥浆透过滤布的水量,该指标直接关联泥浆对地层的封堵性与稳定性。滤饼厚度检测是同步观测滤失试验中形成的滤饼厚度,致密均匀的滤饼是降低渗透率、防止井壁坍塌的关键参数。通过对比9组数据综合评价触变泥浆性能,分析 CMC 与纯碱掺量对泥浆性能的协同影响机制^[4]。质量组成配比见表4。

表4 不同材料组成配比值 %

材料组成	不同分组的泥浆配比								
	第1组	第2组	第3组	第4组	第5组	第6组	第7组	第8组	第9组
水	92.6	92.5	92.4	92.5	92.4	92.3	92.4	92.3	92.2
膨润土	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0	7.0
CMC	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4	0.2	0.3	0.4
纯碱	0.2	0.2	0.2	0.3	0.3	0.3	0.4	0.4	0.4

根据表4中9组不同材料组成的配比泥浆所表现的黏度、失水量、滤饼厚度性能分别绘制曲线,如图2—图4所示,能直观地看出随着CMC和纯碱的掺量变化,泥浆黏度和失水量数据波动较为明显,滤饼厚度数据基本稳定。

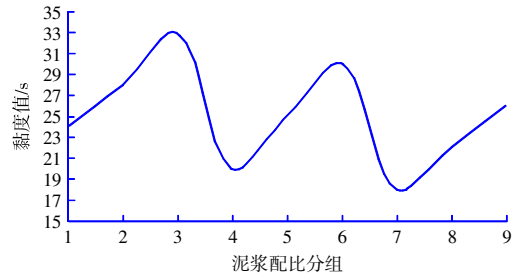


图2 不同材料组成的黏度性能曲线

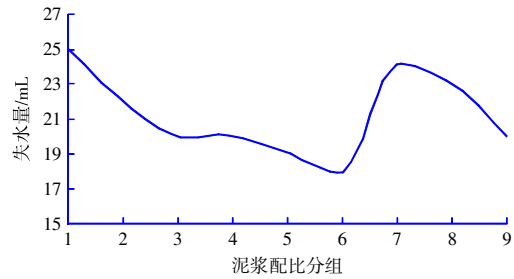


图3 不同材料组成的失水量性能曲线

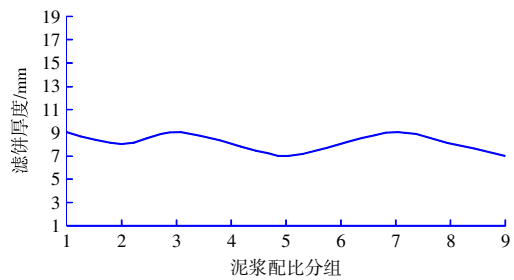


图4 不同材料组成的滤饼厚度性能曲线

3.3 最优配合比比选

图2中泥浆配比分组中的第1组、第4组、第7组的黏度曲线出现的波谷值即黏度值最小,表现出最强流动性,有利于充分发挥注浆效果,密实充填土层空隙。图3中泥浆配比分组中第3组、第4组、第5组、第6组的失水量曲线表现较平稳,数值较低,保水性较好,泥浆稳定性最佳。图4中滤饼厚度曲线整体较平稳,波动很小。综合3项性能指标,可以看出泥浆配比分组中第4组的泥浆高保水低黏度,性能表现最佳,泥浆不失水、不沉淀、不固结,既有良好的流动性,又有一定的稠度,成本较低,经济实用。

4 结果与讨论

4.1 设计自由滑动模型装置

为了室内模拟克服顶推摩阻力^[5],对比泥浆减阻效果,设计了一套自由滑动模型装置。装置包括1个C50混凝土标准试块(150 mm×150 mm×150

mm), 重量为 8.46 kg, 1 个槽型容器(长 100 cm、宽 30 cm、深 60 cm), 1 块磨砂粗糙面的木制平板(宽 28 cm、厚 3 cm, 长度经试验确定); 平板如图 5 斜向放置, 水平角度以试块在无介质情况下能自由滑动的临界点为准, 经试验确定为 26°, 试块自重对平板的正压力 $P_{正压}=mg\sin 26^\circ=36.3\text{ N}$, 向下滑力 $F_{下拉}=mg\cos 26^\circ=74.5\text{ N}$, 从而确定木制平板的长度 $L=100/\cos 26^\circ=111\text{ cm}$ 。完整的自由滑动模型装置安装后见图 5。

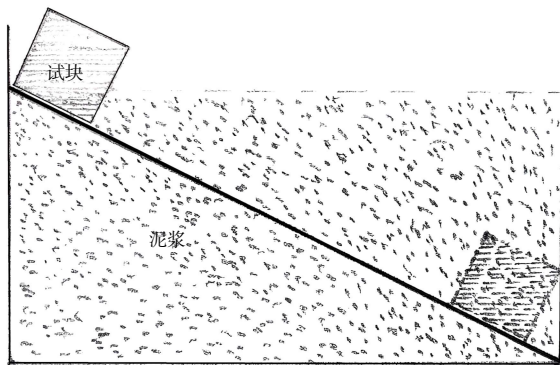


图 5 自由滑动模型装置

将配置好的泥浆灌入容器, 保证泥浆刚好浸没平板上端, 静置 30 min 后, 选取试块固定面自平板上端放下, 不施加任何外力, 任试块自上而下自由滑动, 采用秒表连续记录 3 次试块滑动时间, 取平均值。

4.2 摩阻效果比对

顶管摩阻是顶管施工中管道与周围土体相互作用产生的阻力, 主要由土体与管道外表面的黏滞力、土体对管道的被动土压力构成。顶管推进时, 管道与土体紧密接触, 土体的摩擦特性、密实度、含水量以及管道表面粗糙度等都显著影响摩阻值大小, 直观表现在顶推移动时间上。由此, 本文研究的触变泥浆减阻效果表现由滑动时间来体现, 根据以上 9 种配合比泥浆, 分别测算出滑动时间见表 5。

表 5 不同泥浆配比的滑动时间

泥浆配比分组	第 1 组	第 2 组	第 3 组	第 4 组	第 5 组	第 6 组	第 7 组	第 8 组	第 9 组
滑动时间	10.34	8.33	7.03	6.77	9.28	11.41	12.37	13.22	14.09

从表 5 中数据能够清晰地观察到, 不同配比的泥浆在滑动时间上呈现出明显差异, 充分证明了泥浆具有显著的润滑减阻作用。在各种配比之中, 第 4 组(质量百分比为水:膨润土:CMC:纯碱=92.5:7.0:0.2:0.3)的泥浆表现尤为突出, 对应的滑动摩阻力最小。数据表明, 当使用第 4 组配比的泥浆时, 能够最大程度地降低管壁和土壤之间的摩阻力。这种良好的润滑减阻效果对于顶推设备意义重大, 可使顶推设备在工作过程中减少能量损耗, 从而充分发挥出最大工效, 提高施工效率, 降低施工难度和成本。通过对图表的综合分析, 不仅直观地展现了不同泥浆配比的性能差异, 更为实际工程中泥浆配比的选择提供了科学、可靠的依据, 有助于在工程实践中选取最优的泥浆配比方案, 以达到最佳的施工效果。

5 结语

城市建设中, 顶管施工技术应用广泛, 泥浆减阻是关键。触变泥浆通过形成黏膜层降低摩擦、平衡土压, 对施工安全、能效及成本控制意义重大。本文研究优化泥浆配比, 细化材料组成, 比对摩阻效果, 可显著降阻提效、保安全、减成本, 为顶管技术升级提供方向, 推动地下空间可持续发展。本文研究仅局限在配比规律方面, 对不同地层(如软土、砂层、岩层)的泥浆适应性差异分析尚不充分, 缺乏多场景对比数据。未深入探讨泥浆长期性能(如抗老化、循环利用)对施工耐久性的影响, 工程全周期成本评估不够全面。触变泥浆与其他辅助工法(如注浆加固)的协同作用机制研究不足, 综合技术方案优化空间待拓展。

参考文献:

- [1] 罗坤, 杨育文. 中风化软质岩石地基承载力及桩端阻力的取值探讨[J]. 勘察科学技术, 2009(2): 12-14, 18.
- [2] 武志国. 顶管施工中的泥浆种类和应用[J]. 非开挖技术, 2022(2): 102-104.
- [3] 上官柏年, 田琨. 触变泥浆减摩技术在长距离顶管施工中的应用[J]. 市政设施管理, 2014(3): 34-36.
- [4] 蒋学湛. 顶管施工中注浆减阻技术探讨[J]. 市政工程, 2024(2): 112-113.
- [5] 吴岳源, 汪德希, 刘荣毅. 利用滑动测微计测试 PHC 管桩负摩阻力[C]//地质调查环境保护实现找矿新突破——2012 年华东六省一市地学科技论坛文集. 2012.