

DOI:10.3876/j.issn.1000-1980.2025.05.017

淤泥质黏土层触变泥浆配比与性能关联性试验

张文慧^{1,2}, 钟可^{1,2}, 吴跃东^{1,2}, 刘坚^{1,2}, 卞安琪^{1,2}

(1. 河海大学岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 江苏 南京 210098;

2. 河海大学岩土工程科学研究所, 江苏 南京 210098)

摘要: 针对顶管施工中触变泥浆配比多依赖经验, 缺少结合工程地层条件对泥浆配比与性能关联性机理进行分析的问题, 依托南京市某穿越淤泥质黏土层的顶管工程, 建立了泥浆性能评价指标体系, 通过配比试验确定了 Na_2CO_3 最优掺量, 采用灰色相似绝对关联度模型分析了膨润土、羧甲基纤维素(CMC)与泥浆性能指标的关联度。试验结果表明: 以膨润土为基准的 Na_2CO_3 最优掺量使泥浆流变性达到最佳, Na_2CO_3 最优掺量仅与膨润土中蒙脱石含量有关, 触变性作为测定 Na_2CO_3 最优掺量的指标最为合理; 膨润土与泥浆的触变性和失水量的关联度更高, CMC 作为增黏剂, 与马氏漏斗黏度的关联度更大, 膨润土和 CMC 对动切力的影响程度相当。

关键词: 淤泥质黏土层; 泥浆配比; 最优掺量; 膨润土; CMC; Na_2CO_3 ; 顶管施工

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1000-1980(2025)05-0147-07

Experimental study on correlation between mix ratio and performance of thixotropic slurry in silty clay layer

ZHANG Wenhui^{1,2}, ZHONG Ke^{1,2}, WU Yuedong^{1,2}, LIU Jian^{1,2}, BIAN Anqi^{1,2}

(1. Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering, Hohai University, Nanjing 210098, China;

2. Geotechnical Research Institute, Hohai University, Nanjing 210098, China)

Abstract: The mix ratio of thixotropic slurry in pipe jacking is mostly determined based on experience, and engineering geological conditions are hardly considered in the mechanism analysis of the correlation between slurry composition and properties. To address these issues, a pipe jacking project traversing silty clay layers in Nanjing was studied, and a slurry performance evaluation index system was established. The optimum Na_2CO_3 dosage was determined through mix ratio testing, and a grey similarity absolute correlation model was employed to analyze the correlation between bentonite, carboxymethyl cellulose (CMC), and slurry performance indexes. The results indicate that the optimal Na_2CO_3 dosage (relative to bentonite) maximizes the rheological properties of the slurry, and this percentage depends solely on the montmorillonite content in bentonite. Thixotropy serves as the most reasonable index for determining this percentage. Bentonite exhibits stronger correlations with thixotropy and fluid loss of slurry, while CMC, as a tackifier, shows a higher correlation with Marsh funnel viscosity. Both components have comparable effects on the dynamic shear force.

Key words: silty clay layer; mix ratio of slurry; optimal dosage; bentonite; CMC; Na_2CO_3 ; pipe jacking

顶管法作为一种新型暗挖施工方法在近年发展迅猛, 其中触变泥浆在顶管顶进过程中起到润滑和填充支撑的关键作用。不同的施工环境对泥浆配比要求不同^[1-2], 因此研究不同地质条件下的泥浆配比能有效保证顶管施工安全和效率。目前学者对不同地质条件下泥浆配比以及提升泥浆性能的新型外加剂进行了大量研究: Fritz^[3]通过在泥浆中添加高聚物、蛭石、细砂改善了高渗透性地层中泥浆成膜效果; 王李昌等^[4]基于沙漠深部顶管提出的黏土-聚合物浆液可以稳定砂层、降低顶进阻力并减少顶进偏差; Lin 等^[5]研发了由膨润土、触变剂、水玻璃和羟乙基纤维素组成的泥浆, 能够有效控制富水砂砾石地层的表面塌陷; Sun 等^[6]针对北

基金项目: 国家自然科学基金项目(52378337)

作者简介: 张文慧(1974—), 男, 副教授, 博士, 主要从事特殊土工程性质和改良技术研究。E-mail: zhangwenhui@hhu.edu.cn

通信作者: 刘坚(1986—), 男, 副教授, 博士, 主要从事软土地基处理研究。E-mail: 499625298@qq.com

引用本文: 张文慧, 钟可, 吴跃东, 等. 淤泥质黏土层触变泥浆配比与性能关联性试验[J]. 河海大学学报(自然科学版), 2025, 53(5): 147-153.

ZHANG Wenhui, ZHONG Ke, WU Yuedong, et al. Experimental study on correlation between mix ratio and performance of thixotropic slurry in silty clay layer[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025, 53(5): 147-153.

京地层特性提出一种新型泥浆配制方案,提高了盾构土体的黏附阻力系数和坍塌度;Liu 等^[7]提出了适用于无水砂层大断面矩形顶管的纳米改性泥浆配方;Abu-Jdayil 等^[8]在钠基膨润土泥浆中加入壳聚糖后实现了用较少的膨润土获得所需的流变性;Cui 等^[9]指出生物可降解预胶化淀粉(PGS)可以提高泥浆的漏斗黏度;Kai 等^[10]用植物胶作为增黏剂合成了一种更具环保性的高黏度聚合物泥浆。此类研究取得了显著的成果,但是对泥浆常用原料与整体性能的关联度研究不足。例如:Heinz^[11]在泥浆中掺入粉土、砂土和聚合物,分别对单一指标进行了分析;雷华阳等^[12]研究了羧甲基纤维素(CMC)、聚丙烯酰胺(PAM)和瓜尔胶添加量对Na₂CO₃膨润土浆滤失量和漏斗黏度两个指标的影响,但未与其他指标综合分析;张雪等^[13]开展了以膨润土、Na₂CO₃和 CMC 为影响因素的泥浆性能正交试验,但对各因素影响关联度评价较为粗略。

现有研究主要集中在外加剂对泥浆少数性能指标的提升以及针对不同地区地质条件提出合适的泥浆配比方案,对泥浆常用配比与多个乃至整体性能指标的关联性机理研究不足。由于原材料差异较大,当前注浆配比多依赖施工经验,因此有必要结合实际工程地质背景,探究泥浆配比与性能的关联性机理。本文基于南京市河西地区某穿越淤泥质黏土地层的顶管工程实例,结合类似地质条件下顶管所用泥浆的配比参数及相关规范构建泥浆性能评价体系,通过泥浆配比试验确定适用于淤泥质黏土层中顶进同步注浆的较优配比,分析 Na₂CO₃、膨润土和 CMC 掺量与泥浆性能指标的联系。

1 试验方法

本文试验研究依托的工程位于南京市河西地区,顶管顶进距离为 225 m,顶管通道分东、西两线,净间距为 1.5 m,采用截面尺寸为 6.54 m×4.3 m 的土压平衡矩形顶管机由南向北顶进施工。顶管主要穿越土层为淤泥质黏土层和粉质黏土夹粉砂层,其中淤泥质黏土层占比超过 66%,因此主要考虑淤泥质黏土层条件,土层参数见表 1。

表 1 顶管穿越区域土层参数
Table 1 Soil layer parameters in area crossed by pipe jacking

土层名称	含水率/%	容重/(kN/m ³)	孔隙比	黏聚力/kPa	内摩擦角/(°)	压缩模量/MPa
淤泥质黏土	39.4	18.2	1.091	3.7	25.5	3.61
粉质黏土夹粉砂	33.7	18.4	0.988	2.2	31.0	3.89

1.1 试验方案

原材料选用河北省灵寿县怡然矿产品加工厂的钠基膨润土、天津致远化学试剂有限公司的无水碳酸钠分析纯和重庆力宏精细化工有限公司的食品级 CMC。许多工程中根据经验将膨润土掺量的 5%作为 Na₂CO₃ 的掺量,但在膨润土和外加剂掺量固定的前提下,Na₂CO₃ 掺量存在一个最优值,使得以它为单一变量的这组浆液的漏斗黏度存在一个峰值。由于目前对 Na₂CO₃ 的最优掺量还缺乏研究,因此提出以下假设:对于固定膨润土掺量的泥浆,Na₂CO₃ 掺量存在一个最优值,使得该掺量下浆液的某流变性指标在同组中达到最佳,将这一 Na₂CO₃ 掺量最优值与膨润土掺量的比值定义为 Na₂CO₃ 最优掺量百分比(Na₂CO₃ 掺量与膨润土掺量的比值即为 Na₂CO₃ 掺量百分比)。

固定 CMC 掺量为 1.5 g/L(所有试验均拌制 1 L 泥浆),以膨润土掺量为单一变量,设置 75.0、87.5、100.0 g/L 3 组试验,每组分别加入以膨润土掺量为基准的 0%、1%、2%、3%、4%、5%的 Na₂CO₃。在水温、室温、组分添加顺序和搅拌速度相近的前提下充分拌匀并静置 24 h 待泥浆水化,测定每个样本的性能指标,选取受 Na₂CO₃ 掺量影响的指标进行分析,得到对应的 Na₂CO₃ 最优掺量。以 CMC 掺量为单一变量整理试验数据,分为膨润土掺量为 75.0、87.5、100.0、112.5 g/L 的 4 组,各组试验 CMC 掺量分别为 1.5、2.0、2.5、3.0 g/L,研究 CMC 掺量变化对泥浆性质的影响规律。

1.2 触变泥浆性能评价指标体系

淤泥质黏土层因为具备渗透系数低、土壤颗粒小的特点^[14],基本不需要触变泥浆具有过高的黏度,但由于该土层的含水量大,要求泥浆能在失水量较小的情况下形成质量良好、薄而致密的泥皮。参考类似条件的典型工程实例^[15-18]同步注浆的配比及其基本性能指标,结合 T/CECS 716—2020《矩形顶管工程技术规程》,构建如表 2 所示的适用于淤泥质黏土层中顶管工程的触变泥浆性能评价指标体系。

表 2 触变泥浆性能评价指标体系

Table 2 Performance evaluation index system for thixotropic slurry

评价指标	对应性质	技术要求	测试工具
漏斗黏度	特定条件下的流变性与稠度	25~45 s	NC-1006 型泥浆黏度计
失水量	特定压强下特定时间内失水能力	<24 mL/h	ZNS-1 型泥浆失水量测定仪
泥皮厚度	造壁性	0.8~1.5 mm	直尺
动切力	泥浆起始流动所需的最小动切力,反映泥浆携岩屑能力		ZNN-D1 型电动六速旋转黏度计
触变性	特定时间内泥浆静止时形成空间网架结构的强度与效率		
析水率	颗粒分散水化程度与浆液稳定性	配置完成后静置 24 h 无析水	100 mL 封口量筒
比重	浆液中固相含量	1.02 1.10	泥浆比重计
pH	酸碱性	8 11	广泛 pH 试纸

1.3 试验过程

反映泥浆流变性的指标主要有马氏漏斗黏度(以下简称“漏斗黏度”)、动切力、初始静切力、终了静切力与触变性等,其中漏斗黏度用 NC-1006 型泥浆黏度计测得。调整六速旋转黏度计升降旋钮使装入泥浆试样的量杯升到最高,分别读取 600 r/min 和 300 r/min 转速下扭转格数,之后恢复 600 r/min 的转速 1 min 后立即降至 3 r/min,记录最大扭转格数,静置 10 min 后再记录最大扭转格数。根据记录的扭转格数,采用与预试验泥浆拟合较好的假塑性流体模型^[19]计算得到其余 6 个指标。使用 ZNS-1 型泥浆失水量测定仪进行失水造壁性试验,测定泥浆的比重、析水率、pH 和泥皮厚度等基础性性质指标。

2 试验结果与分析

2.1 Na₂CO₃ 最优掺量百分比

分析试验所得的 3 组配比泥浆的各类性能指标,Na₂CO₃ 掺量对泥浆的流变性影响较为显著,流变性指标中又以漏斗黏度、动切力和触变性的变化规律最为明显。每组试验中 Na₂CO₃ 掺量百分比的初始值设置为 1%、2%、3%、4%、5%(即 Na₂CO₃ 掺量为膨润土掺量的 1%、2%、3%、4%、5%),完成试验绘制初始曲线后发现各指标每条曲线的最优值均落在 2%~3% 区间内,因此补充了 Na₂CO₃ 掺量百分比为 2.5% 的泥浆性质试验,最终得到 3 种指标随 Na₂CO₃ 掺量百分比的变化曲线,如图 1 所示。

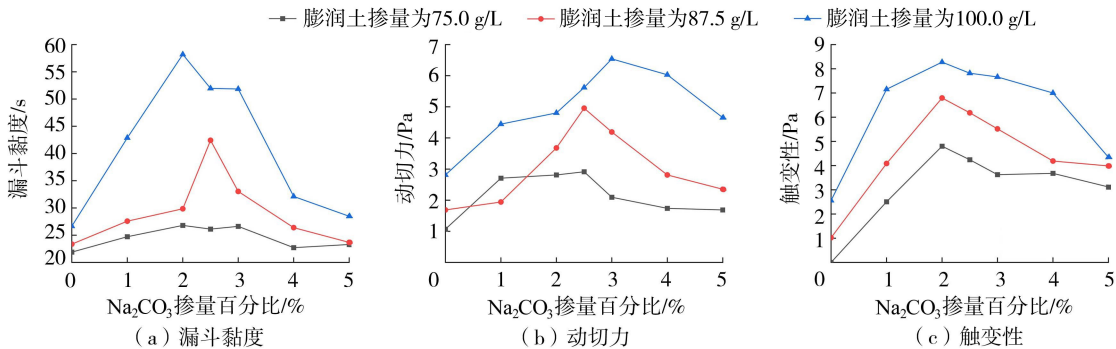


图 1 泥浆性能指标随 Na₂CO₃ 掺量百分比的变化

Fig. 1 Variation of slurry performance indexes with Na₂CO₃ dosage in percentage

对于同一种类的膨润土,存在一个最优 Na₂CO₃ 掺量百分比使得该百分比下膨润土浆的流变性达到最佳,试验中 3 种流变性指标达到最优时对应的 Na₂CO₃ 掺量百分比均落在 2%~3% 区间内,不随膨润土掺量变化而发生明显变化;漏斗黏度的最大值分别在 3.0%、2.5%、2.0% 的 Na₂CO₃ 掺量百分比下取得;动切力最大值则在 2.5%、2.5% 和 3.0% 的 Na₂CO₃ 掺量百分比下取得;触变性最为统一,3 组试验均在 2.0% 的 Na₂CO₃ 掺量百分比下取得最大值。其原因在于,Na₂CO₃ 作为分散剂,主要由 Na⁺ 置换 Ca²⁺ 后增厚了晶层表面的水化膜,加剧了黏土颗粒的分散作用,当 Na₂CO₃ 掺量百分比小于最优值时分散作用不明显,大于最优值后溶液中存在过量 Na⁺,对黏土颗粒的分散起负作用。Na₂CO₃ 掺量最优值仅与膨润土中的蒙脱石的含量有关,因此特定种类及品牌的膨润土对应的 Na₂CO₃ 最优掺量是定值。本文试验事先确定配置膨润土浆使用的 Na₂CO₃ 最优掺量百分比,相较于直接添加经验值 5%,最多可节省 60% 的 Na₂CO₃ 用量。

漏斗黏度试验中易出现人为误差,如漏斗难以完全保持竖直、少许浆液残留杯壁等,并且所测得的黏度仅是一定条件下的表观黏度,不能反映液体相对密度及压力差对黏度的影响;而六速旋转黏度计试验仅需读取刻度盘示数,人为因素影响小,使用假塑性流体模型计算与现实一致性较好。此外,动切力是使得泥浆处于层流状态所需的最小剪切力,而根据 Zhang 等^[20-21]提出的概率熵分析发现,泥浆触变性与颗粒间的吸引力和排斥力的动态平衡密切相关,微观上是颗粒聚集和重新组织的过程。因此,触变性更能反映本质变化机理,结合数据统一性,相比于漏斗黏度和动切力,触变性作为确定 Na_2CO_3 最优掺量百分比的依据更具准确性。根据流变性试验结果,以触变性为依据确定本文试验使用的钠基膨润土 Na_2CO_3 最优掺量百分比为 2.0%。

为研究膨润土掺量对泥浆性能的影响,对 3 组泥浆的 3 种指标求极差,其中 Na_2CO_3 掺量百分比为 0% 和 2% 时的极差如表 3 所示。

由表 3 可知,由于各组试验中流变性指标的最小值均在 Na_2CO_3 掺量百分比为 2% 时取得, Na_2CO_3 掺量百分比为 0 的极差均大于 Na_2CO_3 掺量百分比为 2% 的极差,证明了 Na_2CO_3 作为分散剂在泥浆配置中的重要性。然而实际工程中 Na_2CO_3 掺量一般不为 0,因此 Na_2CO_3 掺量百分比为 2% 更具现实意义。对 3 个指标数据作归一化处理后再求 Na_2CO_3 掺量不为 0 时的极差,计算得到漏斗黏度、动切力与触变性 3 组试验的均值分别为 0.92 s、0.72 Pa 和 0.55 Pa,因此 Na_2CO_3 掺量对漏斗黏度的影响最大,动切力次之,触变性最小。

2.2 膨润土和 CMC 掺量对泥浆性能的影响规律

根据前文确定的 Na_2CO_3 最优掺量百分比(2.0%),下文所有试验中均采用膨润土掺量 2.0% 作为 Na_2CO_3 的掺量,因此在分析配比对试验泥浆的性质影响时, Na_2CO_3 视为弱影响因素,在后面的分析中将该因素忽略,将三因素(Na_2CO_3 、膨润土和 CMC 掺量)影响化为两因素(膨润土和 CMC 掺量)影响。

取 CMC 掺量为 1.5、2.0、2.5、3.0 g/L,膨润土掺量为 75.0、87.5、100.0、112.5 g/L,进行两因素 4×4 水平的配比试验,结果如图 2 和图 3 所示。

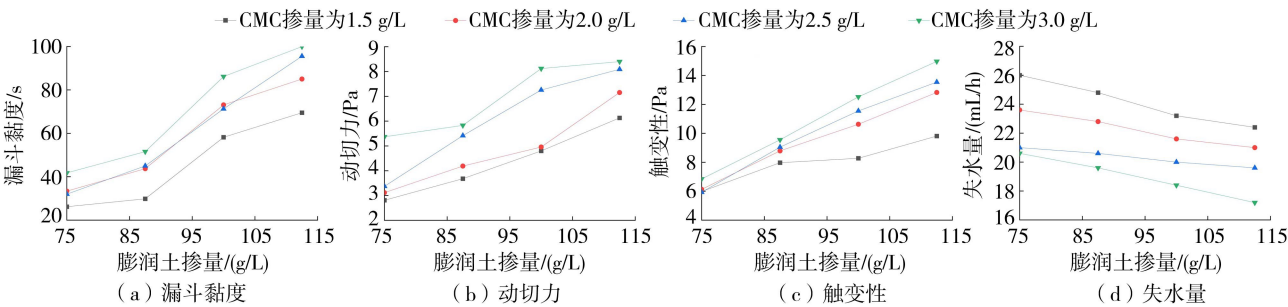


图 2 泥浆性能指标随膨润土掺量的变化

Fig. 2 Variation of slurry performance indexes with bentonite content

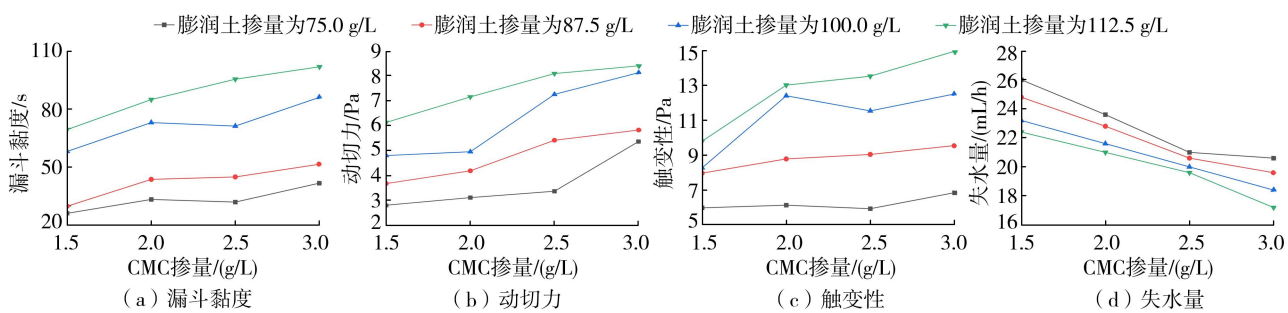


图 3 泥浆性能指标随 CMC 掺量的变化

Fig. 3 Variation of slurry performance indexes with CMC content

由图 2 和图 3 可知,漏斗黏度、动切力、触变性这 3 个反映浆液流变性的指标均随两因素掺量的增大而增强,失水量则呈现相反的规律,这说明膨润土与 CMC 均能有效提升触变泥浆的稠度、空间网架结构力与形成空间网架结构的效率,从而降低水分子在一定压强下从浆液中流失的可能性。

2.3 膨润土和 CMC 与泥浆性能灰色关联度分析

由于膨润土和 CMC 两因素对 4 种泥浆性能指标的影响趋势较为接近,为进行更为细致的比较,引用刘勇等^[22]提出的拓展型灰色相似绝对关联度模型进行计算分析,结果如表 4 所示。

表 4 两因素与泥浆性能指标的灰色关联度

Table 4 Grey correlation between two factors and slurry performance indexes								
泥浆性能指标	不同 CMC 掺量下膨润土与各指标的灰色关联度				不同膨润土掺量下 CMC 与各指标的灰色关联度			
	1. 5 g/L	2. 0 g/L	2. 5 g/L	3. 0 g/L	75. 0 g/L	87. 5 g/L	100. 0 g/L	112. 5 g/L
漏斗黏度	0. 946	0. 958	0. 916	0. 958	0. 976	0. 963	0. 949	0. 979
动切力	0. 967	0. 964	0. 915	0. 963	0. 945	0. 971	0. 951	0. 971
触变性	0. 970	0. 957	0. 922	0. 965	0. 949	0. 951	0. 913	0. 970
失水量	-0. 973	-0. 969	-0. 961	-0. 976	-0. 958	-0. 957	-0. 945	-0. 957

由表 4 可知:CMC 与漏斗黏度的灰色关联度均不小于 0. 949,总体大于膨润土与漏斗黏度的灰色关联度,因此 CMC 较膨润土对漏斗黏度影响更大;失水量则正好相反,膨润土与失水量的灰色关联度的绝对值明显大于 CMC 与失水量的灰色关联度的绝对值,因此膨润土与失水量的关联更为密切。仅从灰色关联度数据不能得出有关两因素对动切力、触变性影响程度的有效结论,因此计算 4 种指标对应的灰色关联度的均值与标准差,结果见表 5。

a. 漏斗黏度。CMC 与漏斗黏度的灰色关联度均值明显大于膨润土与漏斗黏度的灰色关联度均值,虽然膨润土与漏斗黏度灰色关联度数据的标准差大于 CMC,但其波动范围内的最大值仍未超过 CMC 与漏斗黏度的灰色关联度均值,说明 CMC 与漏斗黏度的关联更为密切。CMC 作为一种增黏剂,起到了分散黏土颗粒、阻止浆液静置后分层的作用,因此它对泥浆表观黏度的影响较膨润土更大。

b. 动切力。两因素对该指标的影响程度十分接近,两者均值仅相差 0. 006 5,并且膨润土与动切力的灰色关联度波动范围涵盖了 CMC 与动切力的灰色关联度波动范围,虽然前者的均值小于后者,但其波动范围内的峰值超过了后者,因此认为两因素对动切力的影响程度相近。

c. 触变性。两因素与触变性灰色关联度的均值十分接近,差值为 0. 007 7,膨润土与触变性的灰色关联度均值较大且其浮动范围内的最大值大于 CMC 与触变性的灰色关联度最大值。膨润土颗粒越多,颗粒间彼此搭接的可能性越大,从而能够更快地由搅动作用下的流态恢复为凝胶态。

d. 失水量。膨润土与失水量的灰色关联度绝对值的均值明显大于 CMC 与失水量的灰色关联度绝对值的均值。一方面泥浆中蒙脱石含量越大,吸附水分子的能力越强,水分子在一定压强下流失得越少;另一方面在进行失水量试验时膨润土含量大的泥浆在滤纸上形成的泥皮更为致密,进一步阻止了水分子的通过。

综上所述,由于膨润土对触变泥浆触变性与失水造壁性的重要作用,因此与触变性、失水量的灰色关联度更高。而主要起增黏作用的 CMC 与漏斗黏度的灰色关联度更大,两因素对动切力的影响程度相当。在 4 种指标中,CMC 与漏斗黏度的灰色关联度最大,与触变性的灰色关联度最小;膨润土与失水量的灰色关联度最大,与漏斗黏度的灰色关联度最小,对动切力与触变性的影响程度十分接近。

3 结 论

a. 对于同一种类的膨润土,存在一个 Na₂CO₃ 最优掺量使得膨润土浆的流变性达到最佳,本文试验 Na₂CO₃ 最优掺量百分比为 2. 0%,该百分比仅与膨润土中蒙脱石含量有关。

b. 触变性作为确定 Na₂CO₃ 最优掺量百分比的依据较准确,由试验结果的极差均值分析 Na₂CO₃ 掺量

表 5 泥浆性能指标的灰色关联度均值与标准差

Table 5 Mean and standard deviation of grey correlation of slurry performance indexes				
泥浆性能指标	膨润土		CMC	
	均值	标准差	均值	标准差
漏斗黏度	0. 945 5	0. 017 2	0. 965 2	0. 012 0
动切力	0. 953 0	0. 021 6	0. 959 5	0. 011 7
触变性	0. 953 5	0. 018 8	0. 945 8	0. 020 7
失水量	-0. 969 8	0. 005 6	-0. 954 3	0. 008 5

对流变性指标的影响程度由大到小依次为漏斗黏度、动切力、触变性,其极差均值分别为 0.92、0.72 和 0.55。

c. 膨润土与触变性、失水量的灰色关联度更高,均值分别为 0.953 5、-0.969 8,而 CMC 与漏斗黏度的灰色关联度更大,均值为 0.965 2,两者与动切力的灰色关联度相近,均值仅相差 0.006 5。

参考文献:

[1] 甘磊,吴健,戴寿晔,等. 含施工裂缝隧道穿越段堤防渗流和稳定分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2022,50(1):85-90. (GAN Lei, WU Jian, DAI Shouye, et al. Seepage and stability analysis of embankment with construction cracks in tunnel crossing section[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2022,50(1):85-90. (in Chinese))

[2] 朱伟,钱勇进,王璐,等. 长距离盾构隧道掘进的主要问题及发展趋势[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(1):138-149. (ZHU Wei, QIAN Yongjin, WANG Lu, et al. Main problems and development trends of long-distance shield tunneling[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2023,51(1):138-149. (in Chinese))

[3] FRITZ P. Additives for slurry shields in highly permeable ground[J]. Rock Mechanics and Rock Engineering,2007,40(1):81-95.

[4] 王李昌,赵跃奇,隆威,等. 大直径顶管穿越沙漠深部护壁浆液体系研究与应用[J]. 地质与勘探,2020,56(1):163-172. (WANG Lichang, ZHAO Yueqi, LONG Wei, et al. Research on the wall protection slurry system of large diameter pipe jacking across deep desert and its application[J]. Geology and Exploration,2020,56(1):163-172. (in Chinese))

[5] LIN Xin, ZHOU Xiong, YANG Yuyou. A new soil conditioner for highly permeable sandy gravel stratum in EPBs[J]. Applied Sciences,2021,11(5):11052109.

[6] SUN Yongshuai, ZHAO Dongjie. Research and experimental application of new slurry proportioning for slag improvement of EPB shield crossing sand and gravel layer[J]. Coatings,2022,12(12):12121961.

[7] LIU Shuo, ZHANG Bin, ZHANG Xue, et al. Formulation optimization and performance analysis of the thixotropic slurry for large-section rectangular pipe jacking in anhydrous sand[J]. Construction and Building Materials,2022,357:129380.

[8] ABU-JDAYIL B, GHANNAM M, ALSAYYED A K, et al. The effect of biopolymer chitosan on the rheology and stability of Na-bentonite drilling mud[J]. Polymers,2021,13(19):3361.

[9] CUI Wei, LIU Dong, SONG Huifang, et al. Development and experimental study on environmental slurry for slurry shield tunneling [J]. Construction and Building Materials,2019,216:416-423.

[10] KAI Chunmei, ZHANG Fengjun, CHENG Congliang, et al. Design synthesis and performance of anti-collapse drilling polymer mud with higher stability[J]. Pigment & Resin Technology,2021,51(1):101-109.

[11] HEINZ A. Modifizierte bentonitsuspensionen für geotechnische bauverfahren in böden hoher durchlässigkeit [D]. Zürich; Eidgenössische Technische Hochschule Zürich,2006.

[12] 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(增刊2):51-55. (LEI Huayang, LIU Xu, SHI Fushuo, et al. Proportional optimization of polymer-modified bentonite slurry in pipe jacking[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,2021,43(Sup2):51-55. (in Chinese))

[13] 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))

[14] 吴建,周志芳,王浩,等. 太湖隧道湖相沉积软土工程特性研究[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(2):63-70. (WU Jian, ZHOU Zhifang, WANG Hao, et al. Study on engineering properties of lacustrine soft soils along the Taihu tunnel[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences), 2025,53(2):63-70. (in Chinese))

[15] 戢鸿鑫,刘跃军,张强,等. 浅埋大断面矩形顶管下穿京杭大运河施工关键技术研究[J]. 施工技术(中英文),2023,52(7):39-45. (JI Hongxin, LIU Yuejun, ZHANG Qiang, et al. Construction technique study on shallow-buried large-section rectangular pipe jacking undercrossing Beijing-Hangzhou Grand Canal [J]. Construction Technology, 2023, 52(7):39-45. (in Chinese))

[16] 张兴其,张坤勇,张梦,等. 膨胀土地区减阻泥浆配比试验研究[J]. 粉煤灰综合利用,2024,38(6):68-72. (ZHANG Xingqi, ZHANG Kunyong, ZHANG Meng, et al. Experimental study on ratio of drag reducing mud in expansive soil area[J]. Fly Ash Comprehensive Utilization,2024,38(6):68-72. (in Chinese))

[17] 汪雨珍,刘念武,梁锦涛,等. 触变泥浆组成对减阻性能影响的室内测定试验[J]. 科技通报,2024,40(10):36-39. (WANG

Yuzhen,LIU Nianwu, LIANG Jintao, et al. Laboratory test of influence of thixotropic slurry composition on drag reduction performancel[J]. Bulletin of Science and Technology ,2024,40(10) :36-39. (in Chinese))

[18] 王义盛,赵小鹏,袁锐,等. 风化岩层岩渣配制的盾构同步注浆浆液性能及微观形貌分析[J]. 河海大学学报(自然科学版),2023,51(4) :65-71. (WANG Yisheng,ZHAO Xiaopeng,YUAN Rui,et al. Analysis on performance and micro morphology of shield synchronous grouting slurry made of weathered rock slag[J]. Journal of Hohai University(Natural Sciences),2023,51(4) :65-71. (in Chinese))

[19] 黄汉仁,杨昆鹏,罗平亚. 泥浆工业原理[M]. 北京:煤炭工业出版社,1994:62-65.

[20] ZHANG Xianwei,KONG Lingwei,YANG Aiwu,et al. Thixotropic mechanism of clay:a microstructural investigation[J]. Soils and Foundations,2017,57(1) :23-35.

[21] ZHANG Xianwei, LIU Xinyu, WANG Gang. Discussion of “ experimental study of the thixotropic strength recovery and microstructural evolution of marine clays ” [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering,2023,149(6) :11079.

[22] 刘勇,刘思峰,FORREST J. 一种新的灰色绝对关联度模型及其应用[J]. 中国管理科学,2012,20(5) :173-177. (LIU Yong,LIU Sifeng,FORREST J. A new grey absolute degree of grey incidence model and application[J]. Chinese Journal of Management Science,2012,20(5) :173-177. (in Chinese))

(收稿日期:2025 - 03 - 31 编辑:熊水斌)

(上接第 25 页)

[13] 余鹏明,管孝艳,陈俊英,等. 基于 Spearman 秩相关的再生水利用量影响因素研究[J]. 节水灌溉,2019(10) :78-82. (YU Pengming,GUAN Xiaoyan,CHEN Junying,et al. Study on factors affecting reclaimed water utilization based on Spearman rank correlation[J]. Water Saving Irrigation,2019(10) :78-82. (in Chinese))

[14] 陈旭,韩瑞光. 基于水文分区的海河流域洪水演变影响因素分析[J]. 中国农村水利水电,2021(11) :69-77. (CHEN Xu,HAN Ruiguang. An analysis of the influencing factors of flood evolution in Haihe River Basin based on hydrologic regionalizations [J]. China Rural Water and Hydropower,2021(11) :69-77. (in Chinese))

[15] 李艺珍,岳春芳,曹伟. 基于滑动 Copula 函数的金沟河流域径流-气温关系变异诊断[J]. 长江科学院院报,2020,37(11) :33-39. (LI Yizhen,YUE Chunfang,CAO Wei. Variation diagnosis of runoff-temperature relation in Jingou River Basin based on sliding Copula function[J]. Journal of Yangtze River Scientific Research Institute,2020,37(11) :33-39. (in Chinese))

[16] 毕可心,董增川,李大勇,等. 温州市不同海拔极端降水时空演变[J]. 河海大学学报(自然科学版),2025,53(1) :31-40. (BI Kexin,DONG Zengchuan,LI Dayong,et al. Temporal and spatial evolution of extreme precipitation at different altitudes in Wenzhou City,China[J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences),2025,53(1) :31-40. (in Chinese))

[17] 侍雪. 泰州市用水影响因素与变化趋势分析[D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

[18] 王浏琳,陈家栋,张方敏. 基于神经网络的南京市用水量预测[J]. 水电能源科学,2023,41(12) :28-31. (WANG Liulin,CHEN Jiadong,ZHANG Fangmin. Prediction of Nanjing water consumption based on neural network[J]. Water Resources and Power,2023,41(12) :28-31. (in Chinese))

[19] 李彦彬,闫文晶,张海涛,等. 基于改进 GM-LSSVR 模型的郑州市用水量预测[J]. 中国农村水利水电,2022(1) :141-146. (LI Yanbin,YAN Wenjing,ZHANG Haitao,et al. Forecast of water consumption in Zhengzhou City based on improved GM-LSSVR model[J]. China Rural Water and Hydropower,2022(1) :141-146. (in Chinese))

[20] 王文生. 海河流域防御 2021 年夏秋连汛经验启示[J]. 中国水利,2022(8) :4-7. (WANG Wensheng. Experience and enlightenment of flood defense in the summer and autumn of 2021 in the Haihe River Basin[J]. China Water Resources,2022(8) :4-7. (in Chinese))

[21] 刁子乘,赵晶,韩宇平. 中国北方地区工业用水边际效益及影响因素研究[J]. 人民珠江,2022,43(11) :8-15. (DIAO Zicheng,ZHAO Jing,HAN Yuping. Marginal benefit of industrial water use in Northern China and its influencing factors[J]. Pearl River,2022,43(11) :8-15. (in Chinese))

[22] 田贵良,高廷艳. 水资源税改革对缺水地区工业用水效率的影响[J]. 资源与产业,2022,24(3) :43-52. (TIAN Guiliang,GAO Tingyan. Impacts of water resource tax reform on industrial water use efficiency inwater shortage areas[J]. Resources & Industries,2022,24(3) :43-52. (in Chinese))

(收稿日期:2024 - 11 - 05 编辑:熊水斌)