

化学聚合物泥浆与膨润土泥浆温感性能 对比试验研究*

程 飞^{1,2}, 陈高照^{1,2}, 夏 瑜^{1,2}, 田 浩^{1,2}, 李佳鹏^{1,2},
洪云峰³, 聂良涛⁴, 方明镜³

(1. 中建三局集团有限公司, 湖北 武汉 430064; 2. 中建三局集团长江有限公司,
湖北 黄冈 438408; 3. 武汉理工大学土木工程与建筑学院, 湖北 武汉 430070;
4. 石家庄铁道大学交通运输学院, 河北 石家庄 050299)

[摘要] 旋挖钻孔桩作为先进的桩基施工技术, 广泛应用于公路、铁路及大型建筑的基础施工中。在钻孔过程中, 泥浆护壁技术被广泛采用, 以防止孔壁坍塌, 保障施工安全。对比了化学聚合物泥浆与膨润土泥浆的性能, 探讨了不同温度条件下两者的适用性。研究结果表明, 化学聚合物泥浆在低温和常温下具有更好的护壁效果, 且黏度受温度影响较大; 而膨润土泥浆在温度变化较大的气候环境中表现出更好的稳定性。化学聚合物泥浆在低温条件下黏度较高, 有助于提升护壁效果; 而膨润土泥浆在 $>35^{\circ}\text{C}$ 的高温条件下表现更优越。此外, 化学聚合物泥浆的塑性黏度低, 有利于减少泵送能量消耗, 而膨润土泥浆的稳定性较好, 适合温差较大的地区。

[关键词] 桩基础; 旋挖钻孔桩; 化学聚合物泥浆; 膨润土泥浆; 温度敏感性; 试验

[中图分类号] TU753.3

[文献标识码] A

[文章编号] 2097-0897(2025)22-0127-06

Experimental Study on Temperature Sensitivity of Chemical Polymer Slurry and Bentonite Slurry

CHENG Fei^{1,2}, CHEN Gaozhao^{1,2}, XIA Yu^{1,2}, TIAN Hao^{1,2}, LI Jiapeng^{1,2},
HONG Yunfeng³, NIE Liangtao⁴, FANG Mingjing³

(1. China Construction Third Engineering Bureau Group Co., Ltd., Wuhan, Hubei 430064, China;
2. China State Construction Third Engineering Group Changjiang Co., Ltd., Huanggang, Hubei 438408, China;
3. School of Civil Engineering and Architecture, Wuhan University of Technology, Wuhan, Hubei 430070, China;
4. School of Traffic and Transportation, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang, Hebei 050299, China)

Abstract: As an advanced pile foundation construction technology, rotary drilling pile foundations are widely used in the foundation construction of highways, railways, and large buildings. During the drilling process, slurry wall protection technology is commonly employed to prevent wall collapse and ensure construction safety. This paper compares the performance of chemical polymer slurry and bentonite slurry, exploring their applicability under different temperature conditions. The study finds that chemical polymer slurry provides better wall protection at low and normal temperatures, and its viscosity is significantly affected by temperature. In contrast, bentonite slurry exhibits better stability in environments with large temperature variations. Specifically, chemical polymer slurry has higher viscosity at low temperatures, which helps improve wall protection, while bentonite slurry performs better in high-temperature conditions (above 35°C). Furthermore, the plastic viscosity of chemical polymer slurry is lower, which helps reduce pumping energy consumption, while bentonite slurry shows better stability, making it suitable for regions with large temperature fluctuations. Based on experimental results, this

* 中建三局工程总承包公司科技研发计划(CSCEC3Z-2022-16)

[作者简介] 程 飞, 工程师, E-mail: 137295540@qq.com

[收稿日期] 2025-03-10

paper proposes a reasonable method for selecting slurries under complex climatic conditions, providing scientific guidance for the choice and use of slurry in practical engineering applications.

Keywords: pile foundation; rotary drilling piles; chemical polymer slurry; bentonite slurry; temperature sensitivity; tests

0 引言

旋挖钻孔桩施工过程中,常使用泥浆护壁防止孔壁坍塌,保障施工人员的安全^[1]。我国目前主要使用的钻孔灌注桩护壁材料是膨润土矿物泥浆和化学聚合物泥浆,2 种泥浆材料在成分、性能和应用领域上各有优劣。膨润土泥浆的主要材料是膨润土,是以蒙脱石为主要成分的黏土矿物质^[2],具有很强的吸湿性和膨胀性,能与水、泥或细砂混合形成具有可塑性和黏结性的浆状物。化学聚合物泥浆是以高分子聚合物为基础,通过人工合成的聚合电解质^[3],这种泥浆在水中溶解后呈半透明糊状,黏度大,渗透能力强,可以有效调节泥浆液的流变性。国内外学者对化学聚合物泥浆与膨润土泥浆的形成与作用机理进行了深入的分析,并且在粉细砂层、黏土层、黄土层等地质中进行了推广及应用^[4]。Aftab 等^[5]测试了新型定制的 TiO₂ 纳米颗粒-膨润土(TNBT)纳米复合增强钻井液,增强了原膨润土泥浆的润滑性,并大幅度减缓了页岩和黏土中的膨胀。Khalil 等^[6]利用水和纳米 SiO₂ 颗粒改性化学聚合物钻井液降低了钻井过程中的黏滑振动,使其更耐热,并增强了它的黏度和摩擦性能。陈宏信等^[7]以聚丙烯酸钠(PAAS)为改性剂对钙基膨润土进行改良,确定了制浆-干燥-研磨法制备聚丙烯酸钠改性钙基膨润土(PAAS-CaB)的最佳制备条件。叶必军^[8]设计合成出用于钻孔桩施工的高效护壁聚合物 PZH-4,并采用正交试验优化出其合成的最优条件,其配制的泥浆体系在稠化性、含砂率、胶体率、失水量等方面效果极佳。幸雪松等^[9]在行业标准基础上,考察了氯化钠组分对絮凝剂表观黏度、热滚回收率、絮凝速度、絮凝现象的影响。聂强勇等^[10]以丙烯酸、二烯丙基二甲基氯化铵以及丙烯酰胺作为反应单体,采用自由基水溶液聚合合法合成了新型水溶性聚合物降滤失剂 XN10,并通过单因素法和正交试验,优化出了 XN10 的最佳合成条件。目前国内外学者对护壁泥浆的研究主要集中在通过外加掺合剂改善其性能方面,对于泥浆在不同温度和不同地质条件下的选择与使用、泥浆的质量控制及泥浆的排放与回收利用等方面研究尚不够充分。鉴于此,本文开展化学聚合物泥浆与膨润土泥浆温感性能试验,通过对比研究不同温度下化学聚

合物泥浆与膨润土泥浆的性质,提出在复杂气候环境下的泥浆选择方法。

1 工程概况

山东济曲快速路项目地处温暖带半湿润季风气候区,具有四季分明、降水丰沛的气候特征,历年无霜期平均为 150~200d。区域内盛行南风 and 东南风,季风交替显著。根据工程地质勘察报告可知,在勘察深度范围内(0~65m),覆盖层主要由第四系粉质黏土、粉土层和砂土层组成。场区地下水的主要类型为第四系潜水,水文地质条件较稳定。结合现场地质条件,本工程暂定设计桩基 1 317 根,桩基长度范围为 32~64m,桩径分别为 1.0、1.2、1.4、1.6、1.8m,均采用摩擦桩。施工工艺选用旋挖钻孔桩,作业流程如图 1 所示。

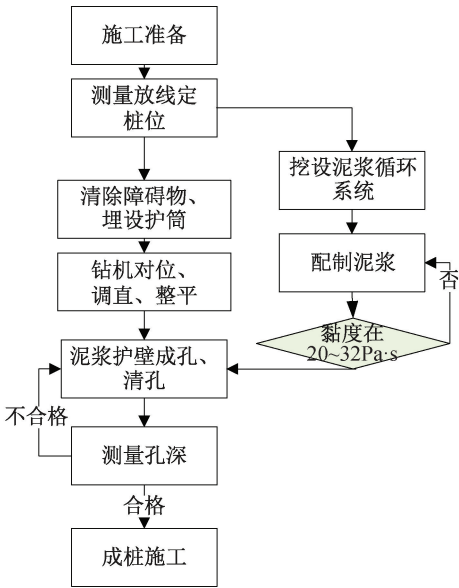


图 1 旋挖钻成孔作业流程

Fig. 1 Rotary drilling hole formation operation process

根据施工要求,旋挖钻机施工使用的泥浆通常由水、膨润土和助剂(如聚合物、表面活性剂等)混合而成,使用过程涉及泥浆配制、输送、循环、调节和清理等多个环节。其中,泥浆起冷却润滑、清除碎屑、支护井壁和控制地下水压力的作用。泥浆质量、使用效果及回收处理是保证施工顺利进行的关键,采用专用化学聚合物泥浆,由旋挖钻机专用聚合物泥浆粉末制备,制备前用氢氧化钠将水的 pH 值调至 8~11,泥浆黏度控制在 20~32Pa·s。

2 材料与方法

2.1 试验材料

项目地质情况主要为淤泥、细中砂,选用旋挖钻机专用聚合物泥浆作为化学聚合物泥浆的主要材料,不同地质条件下的聚合物泥浆掺量如表 1 所示。聚合物泥浆与清水按一定比例配比^[2],掺量为 0.64kg/m³,搅拌形成专用聚合物泥浆。钠基膨润土相比钙基膨润土具有更好的膨胀性能,且保水性和流动性更好,故采用钠基膨润土。往 350mL 清水中加入 22.5g 钠基膨润土,并搅拌形成膨润土泥浆。

表 1 不同地质条件下的聚合物泥浆掺量

Table 1 Polymer mud dosage under different geological conditions

地质情况	聚合物泥浆掺量/(kg·m ⁻³)	泥浆黏度/(Pa·s)
黏土与页岩	0.2~0.6	24~30
淤泥、细~中砂	0.3~0.7	26~32
粗砂、较小砾石	0.4~0.9	26~35
卵石	0.7~1.1	35~45

2.2 试验方法

现场实际温度在 15~35℃,试验模拟 4 个不同施工温度工况,分别为 10,20,30,40℃,泥浆配制完成后,放入恒温恒湿养护箱设置特定参数养护 24h。参考 GB/T 5005—2010《钻井液材料规范》,根据黏度试验方法分别测试膨润土泥浆和化学聚合物泥浆在黏度计 600r/min 和 300r/min 时的读数 R600 和 R300,并通过黏度试验结果计算泥浆在不同温度下的塑性黏度、动切力及动塑比,每个测试指标需进行 3 次平行试验,最后取平均值。因此,共需制备 12 份旋挖钻机专用聚合物泥浆和膨润土泥浆。

具体试验方法如下:边在搅拌器上搅拌边向 350mL 去离子水中加入 22.5g 钠基膨润土,形成悬浮液。搅拌 5min 后,从搅拌器上取下搅拌杯,用刮刀刮下粘在杯壁上的所有泥浆混合到悬浮液中,并将搅拌杯重新放到搅拌器上继续搅拌 20min,之后将悬浮液放入密闭或带盖容器中养护 16h,养护温度为设置的试验温度。悬浮液养护完成后,调节 pH 值到 9,摇匀并倒入搅拌杯中,在搅拌器上再次搅拌 5min,最后将悬浮液倒入为直读式黏度计配备的样品杯中,在每档转速下达到稳定后记录读数 R300 和 R600,测定应在悬浮液温度为设置的试验温度±1℃的条件下进行。试验主要流程如图 2 所示。

3 泥浆温度敏感性分析

3.1 化学聚合物泥浆

不同温度下化学聚合物泥浆的性能如表 2 所示。由表 2 可知,随着温度升高,化学聚合物的黏

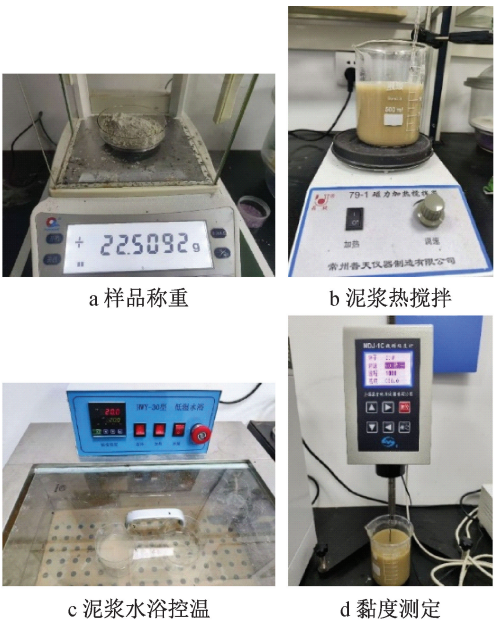


图 2 试验过程
Fig. 2 Testing process

度、动切力、动塑比均不断降低,且转速越大,测得的黏度值越大。当温度升高时,聚合物分子的热运动加剧,空间阻效应下降^[11],聚合物分子链之间的交联和缠结减少,这些分子链在溶液中更容易伸展,形成更加松散的结构,分子间的作用力也会相对减弱,从而引起黏度下降,影响了泥浆体系的稳定度。当温度在 10~30℃ 时,黏度均>28Pa·s,满足施工要求,无需再补充造浆剂;而当温度处在 30~40℃ 时,需注意开启循环泵进行自循环,从出水口处补充化学造浆剂,并用空压机搅拌均匀,除此以外,还需提前用另一个泥浆池配制好下一个钻孔所需的泥浆。

表 2 不同温度下的化学聚合物泥浆性能

Table 2 Performance of chemical polymer slurry at different temperatures

温度/℃	R300 平均值/(Pa·s)	R600 平均值/(Pa·s)	塑性黏度/(Pa·s)	动切力/Pa	动塑比
10	32.8	40.8	8.0	12.4	1.55
20	30.6	38.1	7.5	11.6	1.54
30	28.2	35.4	7.2	10.5	1.46
40	25.4	32.2	6.8	9.3	1.37

3.2 膨润土泥浆

不同温度下的膨润土泥浆性能如表 3 所示。由表 3 可知,随着温度的升高,膨润土泥浆的黏度、动切力、动塑比呈下降趋势。一方面,膨润土分散在水中,蒙脱石的颗粒可能呈单一晶胞,也可以是许多晶胞的附聚体,随着温度升高,减弱了晶层表面的双电层^[12-17],黏土层间距减小,膨润土分散更加

集中,表现为黏度和动切力下降。另一方面,在温度上升过程中,由于泥浆黏度和动切力的下降,流体在流动过程中的内摩擦阻力变小,泥浆变得更易流动,动塑比减小。随着温度升高,膨润土泥浆的塑性黏度提高,一是因为随着温度的升高,泥浆中的水分蒸发加快,导致泥浆的固相含量相对增加,从而为更多的固体颗粒增加了泥浆的内部摩擦力;二是因为温度上升使得土颗粒表面自发地吸附反电荷离子(阳离子)形成络合物或有机、无机复合物的能力提升,使得内部分子间相互作用而产生阻力。在温度<20℃时,膨润土泥浆的黏度较高,低温使膨润土的分子活动减缓,导致泥浆中的颗粒更容易聚集,从而增加泥浆的黏性。在这种低温条件下,泥浆的流动性较差,可能影响钻头的冷却与润滑效果,同时增加了泥浆的输送阻力,需适当调整泥浆配方或使用加热装置降低泥浆黏度,以保持良好的流动性。而当温度>20℃时,水分蒸发快,膨润土粒子间的相互作用力减弱,泥浆黏度降低,导致泥浆在钻进过程中对碎屑的携带能力降低,孔壁不稳定,甚至影响钻头的润滑和清洗效果。此时应适当降低膨润土浓度或加入增稠剂、黏土矿物等,以防止泥浆黏度过低,与此同时,还应调节泥浆系统的压力和流量,确保泥浆能够有效携带岩屑并保持孔壁稳定。

表 3 不同温度下的膨润土泥浆性能

Table 3 The performance of bentonite mud at different temperatures					
温度/ ℃	R300 平均 值/(Pa·s)	R600 平均 值/(Pa·s)	塑性黏度/ (Pa·s)	动切力/ Pa	动塑 比
10	24.8	34.4	9.6	7.6	0.79
20	22.5	32.8	10.3	6.1	0.59
30	20.7	31.6	10.9	4.9	0.45
40	19.6	30.8	11.2	4.2	0.38

3.3 2 种泥浆对比

通过对比不同温度下 2 种泥浆的黏度、塑性黏度、动切力以及动塑比,得出不同环境因素下泥浆种类的选择方法,如图 3 所示。

1)由图 3 可知,在设置的温度梯度中,化学聚合物泥浆黏度均大于膨润土泥浆,说明在实际施工过程中,化学聚合物泥浆的护壁效果优于膨润土泥浆,这种优势在低温条件下尤为明显,因此建议在低温和常温条件下使用化学聚合物泥浆,而在温度>35℃的高温气候条件下,建议使用膨润土泥浆。2 种泥浆的黏度都会随温度升高而降低,但化学聚合物泥浆受温度影响较大,在温度波动大的气候条件下,膨润土泥浆的稳定性更好,所以在昼夜温差

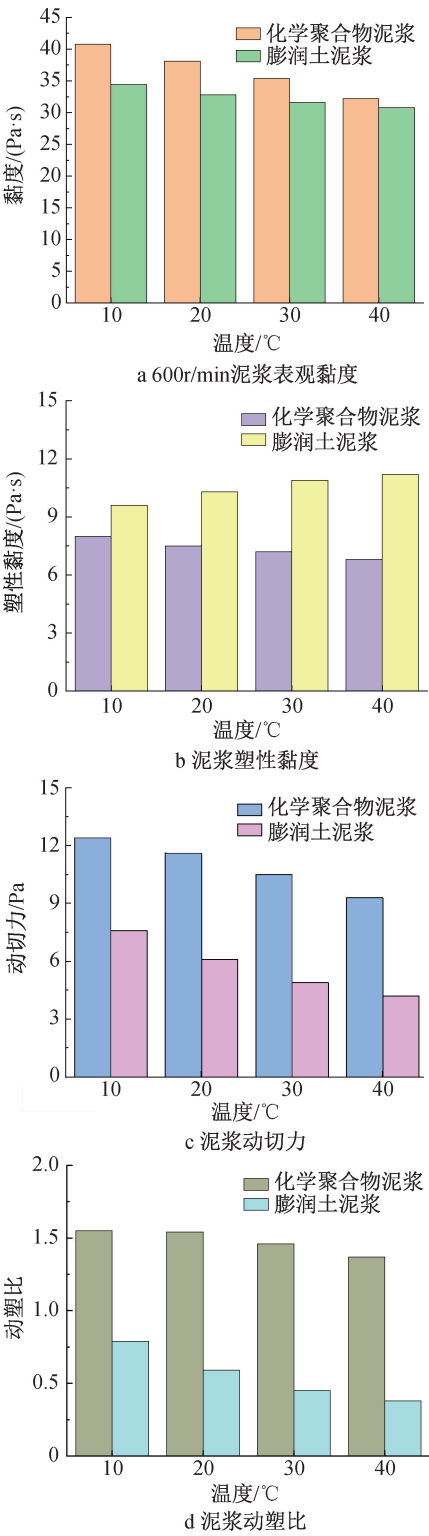


图 3 泥浆性能对比
Fig. 3 Comparison of mud properties

较大或季节更换期间建议使用膨润土泥浆。
2)对比塑性黏度可知,化学聚合物泥浆的塑性黏度随温度的升高而降低,而膨润土泥浆的塑性黏度随温度的升高而升高,这与它们的结构组成有很大关系。化学聚合物泥浆由多种有机高分子聚合物配制而成,具有特定的分子结构和功能基团,其

塑性黏度受聚合物分子链的伸展、缠绕和相互作用力影响;而膨润土泥浆主要由天然矿物蒙脱石组成,具有吸水膨胀性和吸附性,其塑性黏度主要受蒙脱石颗粒的分散程度和相互作用力影响。低塑性黏度有利于泥浆流动,减少泵送过程中的能量消耗;而高塑性黏度可能导致泥浆流动阻力增大,增加泵送成本。化学聚合物泥浆的塑性黏度在试验过程中均低于膨润土泥浆。因此,在泵压不足的情况下,推荐使用化学聚合物泥浆。

3)对比动切力可知,化学聚合物泥浆的动切力在不同温度下均高于膨润土泥浆,在钻井过程中,较高的动切力有助于提高钻井液的抗剪切能力和稳定性,而较低的动切力有助于提高钻井液的流动性和携带岩屑的能力,在实际工程中,如果地基抗剪切能力较差,建议使用化学聚合物泥浆,如果钻孔过程中产生较多钻渣,则建议使用膨润土泥浆。

4)对比动塑比可知,化学聚合物泥浆的动塑比大于膨润土泥浆,说明化学聚合物泥浆在受到剪切力时更稳定,抗剪切能力更强,对钻井作业中保持井壁稳定、防止卡钻等具有重要意义。在遇到抗剪能力弱的土壤时,推荐使用化学聚合物泥浆防止钻孔坍塌,以保障施工人员的安全,使工程更加顺利地进行。

5)由温度敏感性可知,2种泥浆在不同温度下表现出显著差异:化学聚合物泥浆黏度随温度升高降低幅度较大,更适合低温和常温条件下施工,可提供优越的护壁性能,但在高温或温差较大的环境中稳定性较弱;而膨润土泥浆对温度的适应性更强,黏度和塑性黏度在高温条件下可保持稳定,更适合昼夜温差大或高温气候下的施工。因此,应根据施工环境的温度特点合理选择泥浆类型,确保施工效率与质量。

4 结语

1)低温与常温条件下,化学聚合物泥浆表现更优,其护壁效果和抗剪切能力优于膨润土泥浆,其黏度在低温下更高,有助于提升泥浆的护壁性能,防止孔壁坍塌,尤其适用于寒冷地区和季节性气候变化较大和地基抗剪能力较弱的场景。

2)高温环境或温差较大的条件下,膨润土泥浆更具优势。当温度超过 35℃ 时,膨润土泥浆表现出更好的稳定性,能够有效应对高温环境下的温度波动。同时,泥浆黏度相对降低有助于提高流动性和携带岩屑的能力,适合昼夜温差大或钻渣较多的施工场景。因此,在高温地区或温差较大的季节交替期间,膨润土泥浆更合适。

3)黏度与流变性能的温度依赖性方面,化学聚合物泥浆的黏度受温度影响较大,其黏度随着温度的升高显著降低,这使得其在温度波动较大的气候条件下可能出现流变性不稳定的问题。而膨润土泥浆的黏度受温度影响相对较小,能够在更大范围的温度变化中维持较好的稳定性。

4)泵送效率与能量消耗方面,化学聚合物泥浆的塑性黏度较低,能够减少泵送过程中的能量消耗,适用于泵送系统压力较低的情况。相比之下,膨润土泥浆虽然具有较高的塑性黏度,但其在需要高黏结力和抗剪切能力的场合表现更佳。

参考文献:

[1] 卞书军,李明,阳德伟. 化学聚合物泥浆与膨胀土矿物泥浆在旋挖钻孔桩施工中的应用对比[J]. 隧道建设,2015,35(S1): 65-68.
BIAN S J, LI M, YANG D W. Comparison of application of chemical polymer mud and expansive soil mineral mud in rotary drilling pile construction [J]. Tunnel construction, 2015, 35 (S1): 65-68.

[2] 王金芬,耿东士,仪晓玲,等. 钻井液用膨润土评价标准研究[J]. 钻井液与完井液,2018,35(6): 37-41.
WANG J F, GENG D S, YI X L, et al. Study on the evaluating standard of drilling bentonite [J]. Drilling fluid & completion fluid, 2018, 35(6): 37-41.

[3] 秦楠. 用于桥梁基桩的化学聚合物泥浆的性能研究[J]. 筑路机械与施工机械化,2019,36(12): 46-50.
QIN N. Study on properties of chemical polymer mud for bridge foundation pile [J]. Road machinery & construction mechanization, 2019, 36(12): 46-50.

[4] 陈钱宝,梅晓君,陈雷. 聚合物泥浆与膨润土泥浆对摩擦桩桩基承载力的对比研究[J]. 胶体与聚合物,2018,36(1): 12-14.
CHEN Q B, MEI X J, CHEN L. Comparative study of bearing capacity of friction pile by use of polymer mud and bentonite slurry [J]. Chinese journal of colloid & polymer, 2018, 36(1): 12-14.

[5] AFTAB A, ALI M, ARIF M, et al. Influence of tailor-made TiO₂/API bentonite nanocomposite on drilling mud performance: towards enhanced drilling operations [J]. Applied clay science, 2020, 199: 105862.

[6] KHALIL A A, ADNAN M S, ASAD M S, et al. Decreasing the stick-slip vibration during drilling wells using water and polymer drilling mud modified with Nano-SiO₂ particles [J]. Kuwait journal of science, 2024, 51(2): 100178.

[7] 陈宏信,牛松茨,冯世进,等. 聚丙烯酸钠改性钙基膨润土工程特性及微观结构研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(4): 860-868.
CHEN H X, NIU S Y, FENG S J, et al. Engineering properties and microstructure of sodium polyacrylate-modified calcium bentonite [J]. Chinese journal of geotechnical engineering, 2025, 47(4): 860-868.

[8] 叶必军. 钻孔桩施工用聚合物制备技术优化与应用研究[J]. 化学工程师,2024,38(4):114-119.

YE B J. Optimization of preparation technology and application study of polymers for drilling pile construction [J]. Chemical engineer,2024,38(4):114-119.

[9] 幸雪松,何松,谷林,等. 基于活性泥岩的聚合物钻井液絮凝剂评价方法[J]. 精细石油化工,2022,39(2):1-4.

XING X S, HE S, GU L, et al. Evaluation method of flocculant for polymer drilling fluid based on active mudstone [J]. Speciality petrochemicals,2022,39(2):1-4.

[10] 聂强勇,陈仲祥,杜仕勇,等. 复合离子型聚合物钻井液降滤失剂的合成研究[J]. 当代化工研究,2023(8):59-61.

NIE Q Y, CHEN Z X, DU S Y, et al. Study on synthesis of compound ionic polymer fluid loss reducer [J]. Modern chemical research,2023(8):59-61.

[11] 向良波. 空间位阻效应对聚合物温敏性影响的研究 [D]. 湘潭:湘潭大学,2012.

XIANG L B. Research on the effect of spatial steric hindrance on the thermosensitivity of polymers [D]. Xiangtan: Xiangtan University,2012.

[12] 何世鸣,周健,侯德峰. 膨润土用于钻井泥浆改性与增效机理探讨[J]. 中国非金属矿工业导刊,2002(4):15-17.

HE S M, ZHOU J, HOU D F. Discussion on bentonite used in drilling mud modification and synergistic mechanism [J]. China non-metallic mining industry herald,2002(4):15-17.

[13] 吕林海,谢开仲,王炳华,等. 基于正交设计试验的地铁施工废弃泥浆分离影响因素研究[J]. 施工技术(中英文),2022,51(4):123-127.

LÜ L H, XIE K Z, WANG B H, et al. Research on influencing factors of subway construction waste slurry separation based on orthogonal design test [J]. Construction technology,2022,51(4):123-127.

[14] 贾丽洲,王伟山,郑柏存. 顶管施工用新型膨润土与聚合物润滑减阻浆液的性能研究 [J]. 施工技术,2017,46(6):102-105.

JIA L Z, WANG W S, ZHENG B C. Research on novel polymer and bentonite slurry's properties used in pipe jacking for lubricating and drag-reducing [J]. Construction technology,2017,46(6):102-105.

[15] 裴业虎. 膨润土制备钻孔灌注桩泥浆技术研究及应用 [J]. 非金属矿,2024,47(6):22-25.

PEI Y H. Technology research and application of mud for bored pile prepared from bentonite [J]. Non-metallic mines,2024,47(6):22-25.

[16] 张然,宋广毅,刘岩,等. 土木工程泥浆用膨润土改性增效技术研究 [J]. 矿产保护与利用,2023,43(4):96-100.

ZHANG R, SONG G Y, LIU Y, et al. Investigation on modification of bentonite to improve performance for civil engineering mud [J]. Conservation and utilization of mineral resources,2023,43(4):96-100.

[17] 余能成. 低掺量钠基膨润土改性普通水泥浆液的性能研究 [D]. 徐州:中国矿业大学,2023.

YU N C. Study on modification of cement grout with low sodium bentonite content [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology,2023.