

薛飞, 魏永红, 邵成龙, 等. 富有机质淤泥基流态固化土流动性与力学特性研究[J]. 水利水电技术(中英文), 2026, 57(2): 283-296. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.021

XUE Fei, WEI Yonghong, SHAO Chenglong, et al. Study on fluidity and mechanical properties of organic-matter-rich dredged sediment-based flowable solidified soil [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2026, 57(2): 283-296. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.021

富有机质淤泥基流态固化土流动性与力学特性研究

薛飞¹, 魏永红¹, 邵成龙¹, 丁垣博², 蔡鑫², 张佳慧², 王宏伟²

(1. 中交一公局集团有限公司, 北京 100024; 2. 中南大学资源与安全工程学院, 湖南长沙 410083)

摘要: 【目的】传统水泥、石灰等固化材料对富有机质疏浚淤泥的固化效果较差, 且淤泥需预先脱水, 降低了施工效率。【方法】利用新型固废基胶凝材料协同高锰酸钾用于高含水富有机质淤泥的流动固化处理, 以制备流态固化土。通过开展流动度试验和无侧限抗压强度试验, 研究高锰酸钾掺量与有机质含量对固化淤泥流动性及无侧限抗压强度的影响。【结果】结果表明: 当有机质含量为 7% 时, 固化淤泥流动度随高锰酸钾掺量的增加而增加, 其中高锰酸钾掺量为 2% 和 3% 时, 固化淤泥的流动度(170 mm 与 204 mm) 满足规范要求。在有机质含量为 8.5% 和 10% 的情况下, 固化淤泥的流动度随高锰酸钾掺量的增加而降低。在高锰酸钾掺量相同的情况下, 固化淤泥的无侧限抗压强度随着有机质含量的提高而大幅降低。当有机质含量相同时, 随着高锰酸钾掺量从 0% 增加到 1%, 固化淤泥的抗压强度大幅下降; 继续增加至 3% 时, 固化淤泥抗压强度下降幅度减缓。【结论】有机质和高锰酸钾影响了固废基胶凝材料水化产物的形成, 导致固化淤泥的力学性能降低。研究成果可为高含水富有机质淤泥制备流态固化土的工程应用提供理论指导。

关键词: 地下空区回填; 疏浚淤泥; 流态固化土; 固废基胶凝材料; 流动度; 无侧限抗压强度; 影响因素

DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2026.02.021

开放科学(资源服务)标志码(OSID):

中图分类号: TU 44

文献标志码: A

文章编号: 1000-0860(2026)02-0283-14



Study on fluidity and mechanical properties of organic-matter-rich dredged sediment-based flowable solidified soil

XUE Fei¹, WEI Yonghong¹, SHAO Chenglong¹, DING Yuanbo², CAI Xin², ZHANG Jiahui², WANG Hongwei²

(1. China First Highway Engineering Co., Ltd., Beijing 100024, China; 2. School of Resources and Safety Engineering, Central South University, Changsha 410083, Hunan, China)

Abstract [Objective] Traditional solidification materials, such as cement and lime, have poor improvement effects on organic-

收稿日期: 2024-09-20; 修回日期: 2025-01-08; 录用日期: 2025-01-24; 网络出版日期: 2025-04-29

基金项目: 中交一公局第一工程有限公司立项科研项目(KJYF2024-C-01); 国家自然科学基金项目(52304114)

作者简介: 薛飞(1982—), 男, 高级工程师, 学士, 主要从事公路工程相关科研与施工工作。E-mail: xuefei223456@163.com

通信作者: 王宏伟(1993—), 男, 副教授, 博士, 主要从事环境岩土工程与固废资源化等方向研究。E-mail: whuwhw@whu.edu.cn

©Editorial Department of Water Resources and Hydropower Engineering. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license.

matter-rich dredged sediment, and the sediment needs to be pre-dewatered, which reduces construction efficiency. [Methods] A novel solid waste-based cementitious material, combined with potassium permanganate, were used for the flowable solidification treatment of high-water-content, organic-matter-rich dredged sediment to prepare flowable solidified soil. Flowability tests and unconfined compressive strength (UCS) tests were conducted to investigate the effects of potassium permanganate dosage and organic matter content on the flowability and UCS of solidified sediment. [Results] These findings indicated that when the organic matter content was 7%, flowability of solidified sediment increased with increasing potassium permanganate dosage. At potassium permanganate dosages of 2% and 3%, the flowability of the solidified sediment (170 mm and 204 mm) met the standard requirements. However, when the organic matter content was 8.5% and 10%, the flowability of solidified sediment decreased as potassium permanganate dosage increased. Under the same potassium permanganate dosage, increase in organic matter content significantly reduced UCS of the solidified sediment. When the organic matter content was constant, an increase in potassium permanganate from 0% to 1% resulted in a significant decrease in UCS. Further increases to 3% led to a slower decrease in UCS. [Conclusion] Organic matter and potassium permanganate affect the formation of hydration products of the solid waste-based cementitious material, leading to a reduction in the mechanical properties of the solidified sediment. The research findings provide theoretical guidance for the engineering application of flowable solidified soil made from high-water content, organic-matter-rich sediment.

Keywords: underground space backfilling; dredged sediment; flowable solidified soil; solid waste-based cementitious material; flowability; unconfined compressive strength; influencing factors

0 引言

随着对港口、航道运维以及河流、湖泊等水环境治理工程投入的进一步扩大,我国每年都有超过数亿方的疏浚淤泥产生。传统的淤泥处置方法包括海洋倾倒和陆地抛填,但这些处理方法都会造成严重的环境污染,同时陆地填埋会占用大量土地资源。因此,固化/稳定化处理是对疏浚淤泥进行减量化、资源化利用的最有效方式之一^[1]。通过将疏浚淤泥与一定量的固化剂混合,产生一系列物理化学反应,进而改善淤泥的理化与力学性能。固化处理后的疏浚淤泥可以作为建筑材料在堤防、道路、填方和绿化等工程中应用^[2-4]。

一方面,我国疏浚工程施工常采用绞吸式疏浚,这种方法得到的淤泥含水率极高。针对高含水率疏浚淤泥,在固化处理前需要先预处理降低其含水率,这使得淤泥固化处理的施工成本增加、效率降低。为解决上述问题,从高效处理高含水率疏浚淤泥的目的出发,提出了疏浚淤泥流动固化的方法^[5-6]。对高含水率疏浚淤泥进行流动固化处理,得到的流态“固化淤泥拌和物”由于具有高流动性和自密实特点,可以采取泵送的方式,将其输送到需要回填的工程目标区域,无需捣振,即可自然成型,进一步提高施工效率,降低工程成本^[7]。另一方面,由于城市中的人类活动和雨水径流,大量的有机污染物被带入河流中。从河流中疏浚得到的淤泥往往具有较高含量的有机质,如果处理不当将会对生态环境和人类健康构成严重威胁^[8]。YUN等^[9]探究使用腐殖质还原菌降解

河流沉积物中的有机质,其研究结果表明,腐殖质还原菌可有效去除活性有机质含量较高的沉积物中的轻组分有机质以及高腐殖化程度沉积物中的重组分有机质。进一步研究富有机质疏浚淤泥的稳定化固化处理方法,对于减少富有机质淤泥对环境的污染具有一定的必要性和紧迫性。

由于疏浚淤泥具有高含水率和富有机质的特性,使用传统水泥、石灰固化处理的效果较差。淤泥中的有机质会阻碍水泥水化产物的生成,进而降低水泥固化淤泥的强度,使得固化后的淤泥强度难以达到施工要求,无法实现预期效果^[10]。此外,水泥、石灰等传统固化材料的生产过程会排放大量二氧化碳,这为全球环境保护和节能减排带来了巨大挑战^[11]。因此,国内外专家学者针对可替代水泥、石灰用于淤泥固化的新型低碳高性能胶凝材料开展了大量研究。荆子阳等^[12]通过一系列试验,验证了加入水泥、废石膏和矿粉这种复合胶凝材料固化疏浚软土的有效性和可行性。其研究发现,随着固化材料掺量和养护龄期的增加,土体强度增强,试样破坏应变降低,试样趋向发生脆性剪切破坏。王宏伟等^[13]将低碳、环保的活性MgO引入淤泥固化处理,通过一维压缩固结试验开展系列探索性研究,发现掺入活性MgO对淤泥固化土的压缩特性具有明显改良作用。CHEN等^[14]对比了普通硅酸盐水泥(OPC)和硫铝酸盐水泥(SAC)两种胶凝材料对污泥的固化处理效果,研究发现OPC对污泥的固化效果明显低于SAC,且SAC与高有机质软土的相容性优于OPC。ZHANG等^[15]探究了利用普通波特兰水泥(OPC)和磨细高炉矿渣(GGBS)处理的

沉积物的潜在再利用性,研究发现掺入 GGBS 可进一步改善沉积物强度特性,并能够提高对 Fe、Ni 和 Zn 的固定能力。WANG 等^[16]采用水泥协同富硅矿物对疏浚淤泥进行固化处理,结果表明淤泥中的重金属可以被有效固定和封闭在固化淤泥中,降低了其迁移性和生物有效性,同时也提升了固化淤泥的力学性能。上述分析表明,学者们已从固化剂种类、掺量、疏浚淤泥有机质含量和含水率等多个因素出发,分析了这些因素对固化淤泥强度和流动度的影响,进一步提出了提高固化淤泥强度的方法^[17]。尽管对于新型低碳固化剂的研究日益增多,适用于高含水率、富有机质淤泥的固化剂仍较为稀缺,尤其是针对高含水率、富有机质淤泥制备流态固化土的研究显著偏少。此外,现有的流态固化土研究大多集中在水泥固化低有机质含量淤泥制备流态固化土方面^[18-20],而对于新型固废基胶凝材料在高含水率、富有机质淤泥的流动固化及其特性方面的研究相对匮乏。因此,亟需开展相关研究,以促进疏浚淤泥和工业固废的资源化利用^[21]。

本研究使用的新型固废基胶凝材料由磷石膏、粉煤灰和矿渣等工业固废混掺熟石灰和水泥制备而成,有效实现了工业固废的资源化利用。同时,相较于传统的水泥、石灰固化剂,该新型固废基胶凝材料展现出更低的碳排放和更高的环保性能^[22]。本文以湖南省湘江长沙段疏浚淤泥为研究对象,使用固废基胶凝材料协同高锰酸钾固化高含水率的富有机质淤泥,以制备流态固化土。通过开展流动度测试和无侧限抗压强度试验,研究高锰酸钾掺量与有机质含量对固化淤泥流动性及无侧限抗压强度的影响,进而探究新型固废基胶凝材料协同高锰酸钾的固化效果。研究结果可为高含水率、富有机质淤泥制备流动固化土及其在地下空区回填和道路建设等领域的工程应用提供理论指导,具有重要的工程实践价值和环保意义。

1 材料与方法

1.1 试验材料

试验所用淤泥取自湖南省湘江长沙段,根据《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[23]规定的试验方法,在实验室测得淤泥的比重、液塑限等基本岩土物理特性,有机质含量则根据《城镇污泥标准检验方

法》(CJ/T 221—2023)规范^[24]中的相关要求测定。试验用淤泥的基本物理性质如表 1 所列,其累积粒径分布如图 1 所示,根据测定结果可以确定所用淤泥为有机质低液限黏土^[23],其有机质含量为 6.94%。

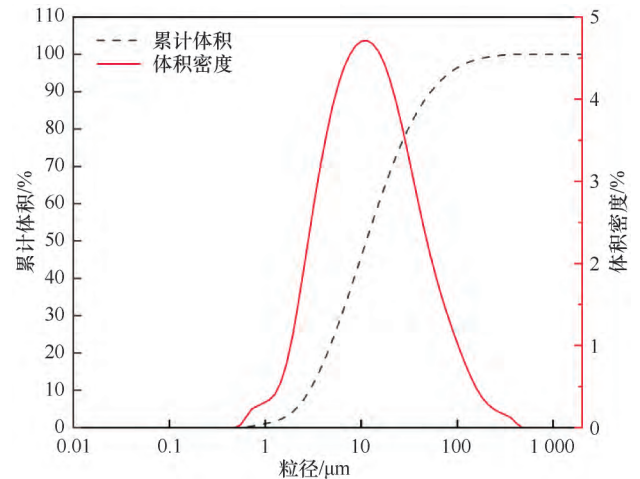


图 1 淤泥粒径分布

Fig. 1 Particle size distribution of dredged sediment

新型低碳固废基胶凝材料主要由磷石膏(PG)、矿渣(GGBS)、粉煤灰(FFA)、熟石灰 $[\text{Ca}(\text{OH})_2]$,以及少量普通硅酸盐水泥(OPC)按一定质量配比(35.40% PG、19.60% GGBS、14.00% FFA、1.00% $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 30.00% OPC)制成,其中约 70%的主要成分为工业固废^[22]。试验所用磷石膏来自贵州磷化集团,经水洗后烘干,粉碎制成。矿渣采购自百丰矿产品加工厂,依据《普通工业沉淀碳酸钙》(HG/T2226—2019)^[25]规范测得:该矿渣比表面积为 $480 \text{ m}^3/\text{kg}$,含水率 0.1%,7 d 和 28 d 活性指数分别为 86 和 95,碱含量 0.56%,烧失量为 0.8%,所检测项目均符合要求。粉煤灰采购自河津市龙江粉煤灰开发利用有限公司,其外观为灰色粉末,依据《用于水泥和土中的粉煤灰》(GB/T 1596—2017)^[26]规范测得其基本物理化学性质如表 2 所列,符合粉煤灰 I 级标准要求。试验所用 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 采购自上海阿拉丁生化科技股份有限公司,其中 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量为 96.96%,镁和碱金属含量为 0.222 8%,且其 X 射线衍射符合相关结构要求。试验用水泥为 42.5 普通硅酸盐水泥,采购自安徽海螺水泥股份有限公司,其外

表 1 试验所用淤泥基本性质

Table 1 Basic properties of dredged sediment

比重 G_s	初始含水率 / %	粒组含量 / %			液限 ω_L / %	塑限 ω_p / %	塑性指数 I_p	有机质含量 / %
		黏粒	粉粒	砂粒				
1.86	35.4	4.11	90.48	8.41	30.1	18.4	11.7	6.94

观为灰黑色粉末,依据《通用 酸盐水泥》(GB 175—2023)^[27]规范对其基本性质进行了测定,如表3所列,其各项性质均符合要求。

试验中有机质选用深圳市杜高生物新技术有限公

司的杜高黄腐酸,材料外观为黑色粉末,其基本性质如表4所列。试验中高锰酸钾选用河南华凯生物科技有限公司鑫华凯牌高锰酸钾,其外观为紫黑色晶体,高锰酸钾含量 $\geq 90\%$ 。

表2 试验用粉煤灰基本性质

Table 2 Basic properties of FFA used in the experiment

细度/%	需水量比/%	烧失量/%	SO ₃ 含量/%	Cl ⁻ /%	含水率/%	CaO含量/%	游离CaO含量/%	安定性/mm
9.0	91	2.0	1.6	0.007	0.1	1.6	0.1	0.2

表3 试验用水泥基本性质

Table 3 Basic properties of OPC used in the experiment

比表面积/m ² ·kg ⁻¹	安定性	初凝/min	终凝/min	3 d抗折强度/MPa	28 d抗折强度/MPa	3 d抗压强度/MPa	28 d抗压强度/MPa
355	合格	233	293	5.5	8.2	26.6	50.4

表4 试验用黄腐酸基本性质

Table 4 Basic properties of fulvic acid in the experiment

黄腐酸(FA)含量/%	腐殖酸(HA)含量/%	有机质含量/%	钾(K ₂ O)含量/%	pH值
≥ 50	≥ 70	≥ 75	≥ 12	9.77

1.2 试验方案

流动固化土在实际施工中一般采用泵送法输送,因此要求其具有一定的流动性。流动度是描述流动固化淤泥流动性的重要指标。同时,无侧限抗压强度是评估固化淤泥力学性能的重要参数。因此,本研究通过测定固化淤泥的流动度与无侧限抗压强度来研究淤泥基流态固化土的工程特性。在试验方案设计中,运用控制变量法,固定固化剂掺量为20%,初始含水率为75%,以高锰酸钾掺量(0%、1%、2%、3%)、有机质含量(7%、8.5%、10%)为变量,探究不同高锰酸钾掺量和有机质含量对固化淤泥流动度及抗压强度的影响。具体试验方案如表5所列(本文中所有配比均为干土重量比)。

表5 试验方案设计

Table 5 Experimental design

试验序号	有机质含量/%	高锰酸钾掺量/%	固化剂掺量/%	初始含水率/%
1	7.0	0	20	75
2	7.0	1	20	75
3	7.0	2	20	75
4	7.0	3	20	75
5	8.5	0	20	75
6	8.5	1	20	75
7	8.5	2	20	75
8	8.5	3	20	75
9	10.0	0	20	75
10	10.0	1	20	75
11	10.0	2	20	75
12	10.0	3	20	75

1.3 试验方法

1.3.1 流动特性测试方法

对于固化淤泥的流动性测试,本研究依据相关规范采用直径为80 mm、高80 mm的两端开口圆柱筒测量固化淤泥的水平扩展度作为其流动度指标。为满足实际工程施工要求,流态固化土的流动度需达到 180 ± 20 mm。

流动性试验的测试过程如图2所示。首先在准备好的圆柱筒内壁涂少量润滑油,并将其放置在一块水平玻璃板(边长400 mm)中央,将刚搅拌好的固化淤泥加入圆柱筒内,如图2(a)所示。接着敲击圆柱筒外壁以振捣出气泡,并用调土刀抹平上表面淤泥,清理多余的材料以免影响试验结果,如图2(b)所示。最后将圆柱筒垂直迅速向上提起,测定坍落后淤泥的最大直径和最小直径,取其平均值作为此次流动度测试的结果,如图2(c)所示。将玻璃板上的材料重新刮入容器中,重复以上步骤得到共三个平行试验数据,取其均值作为流动度测试最终结果。

1.3.2 力学特性测试方法

无侧限抗压强度试验的试样设计为标准圆柱筒直径50 mm、高为100 mm的标准圆柱体,将按照试验方案搅拌好的均匀固化淤泥浇注到标准圆柱筒模具中。将其放置至完全固化成型后拆模,分组放入密封袋;做好标记后放置在温度20℃、湿度95%的标准养护箱中养护。在养护至7 d、14 d及28 d龄期时,取出固化淤泥试样,进行无侧限抗压强度试验。试

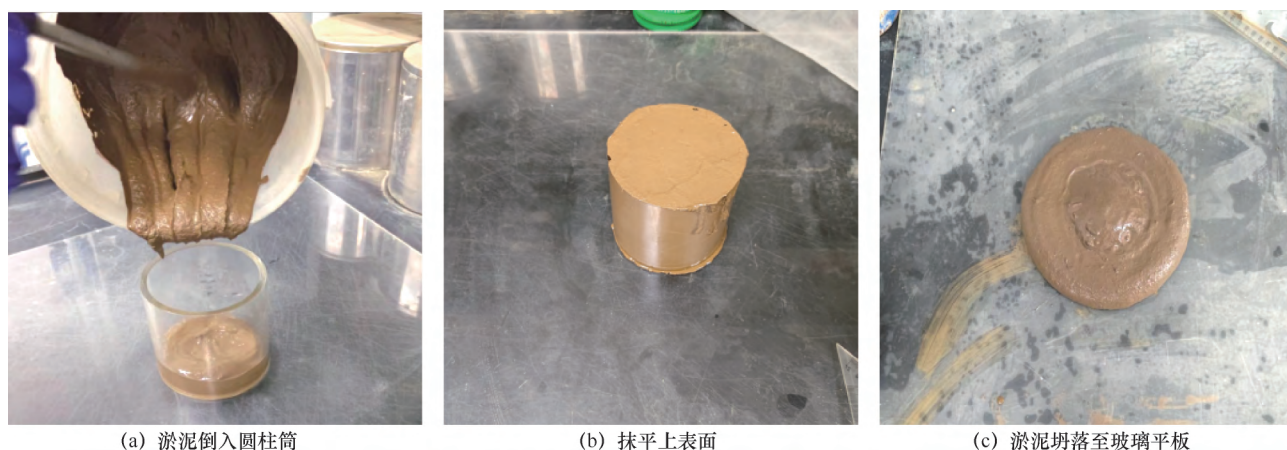


图2 流动度试验过程

Fig. 2 Process of flowability test

验采用量程 10 kN 的 WHY-200/10 微机控制压力试验机进行试验, 其中竖向加载速率设定为 0.5 mm/min。计算公式为

$$UCS = \frac{4F_{\max}}{\pi d^2} \quad (1)$$

式中, UCS 为无侧限抗压强度(kPa); F_{\max} 为峰值压力(kN); d 为试样底面直径(mm)。

计算后取 3 个平行试样的平均值作为最终无侧限抗压强度值。

1.3.3 pH 测试

在无侧限抗压强度试验破坏后的试样中取小部分样品用于 pH 试验, 将其烘干后过 2 mm 筛, 然后取 10 g 过筛后的样品放入容器中, 加入与试样相同质量的水, 制成 1:1 的浆液, 静置 1 h 后用 pH 计读取浆液的 pH 并记录。

2 试验结果与分析

2.1 流动度试验

2.1.1 试验结果

固化淤泥流动度试验的结果如图 3 所示。由图 3 可知, 在所有掺高锰酸钾的固化淤泥试样中, 有机质含量为 7% 且高锰酸钾掺量为 2% (170 mm) 和 3% (204 mm) 的两组流态固化土的流动度满足相关规范要求(180±20 mm)。其中, 只有高锰酸钾掺量为 3% 的流态固化土的流动度大于水泥固化淤泥的流动度(181 mm)。

由图 3(a) 可知, 当淤泥有机质含量为 7% 时, 流态固化土的流动度会随着高锰酸钾掺量的增加而增大。由图 3(b)(c) 可知, 淤泥的有机质含量为 8.5% 和 10% 时, 随着高锰酸钾掺量的增加, 流态固化土

的流动度会降低, 其流动度均不符合施工要求。

针对流态固化土流动度不符合工程设计要求的情况, 可以通过增加淤泥初始含水率或添加减水剂的方法来解决。然而后续抗压强度的试验结果表明, 外掺高锰酸钾后的流态固化土抗压强度并不符合工程要求, 因此本研究未开展相关流动性改良试验提升其流动度。

2.1.2 图片分析

流动度试验的代表性图片如图 4 所示。由图 4 可知, 当淤泥有机质含量为 7% 时, 淤泥坍塌后的形状逐渐从圆台状转变为饼状; 当淤泥有机质含量为 8.5% 和 10% 时, 淤泥坍塌的形状从圆台状(接近圆柱状)变为圆柱状, 此时的固化淤泥可看作没有流动性。

就其颜色进行分析, 当淤泥有机质含量为 7% 时, 固化淤泥的颜色随着高锰酸钾掺量的增加而变深。这是因为高锰酸钾本身是深紫色, 与淤泥混合后表现出部分高锰酸钾自身的颜色。根据后续试验情况可知, 固化淤泥的颜色会随着时间的推移而逐渐变淡直至消失, 这是由于高锰酸钾逐渐反应或分解变质, 其含量逐渐降低。同时, 对于有机质含量为 8.5% 和 10% 的固化淤泥, 其颜色并没有明显变化。由此可以推断, 固化淤泥颜色的变化可能是高锰酸钾在开始搅拌时已经与有机质反应所致。

2.2 固化淤泥抗压强度分析

2.2.1 高锰酸钾掺量对固化淤泥无侧限抗压强度的影响

无侧限抗压强度试验旨在探究高锰酸钾是否可以通过将有机质大分子分解为小分子或单体来减弱有机质对固化淤泥力学性能的影响。先前的研究^[28]表明,

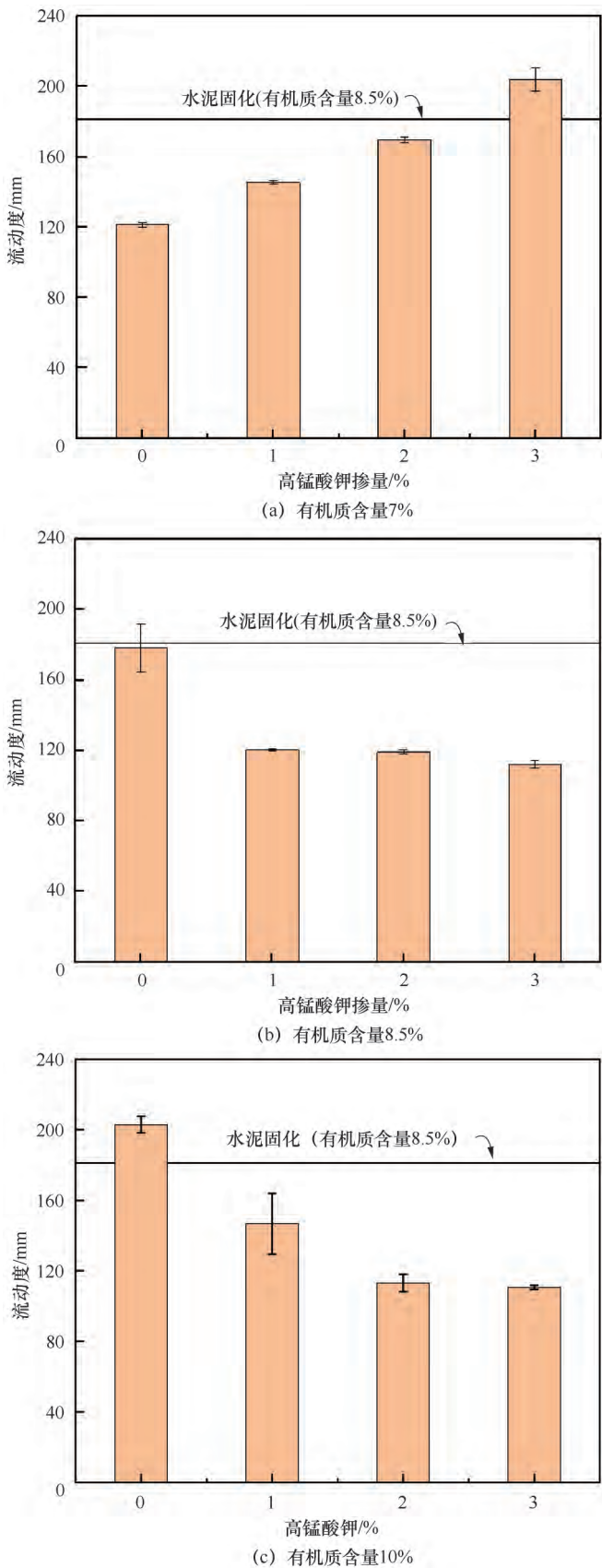


图3 流动度测试结果

Fig. 3 Results of flowability tests

在高锰酸钾掺量从0%增加到1.2%时均可提升富有机质淤泥的抗压强度,所使用的固化剂主要成分为磷石膏、矿渣、粉煤灰和水泥。郭印^[29]研究发现,随着高锰酸钾掺量的增加,水泥固化土的抗压强度先升高,达到峰值后逐渐降低,其中抗压强度达到峰值时对应的高锰酸钾掺量为1.5%。

三种不同有机质含量的淤泥加入不同掺量高锰酸钾后固化淤泥的抗压强度变化如图5所示。整体来看,固化淤泥的无侧限抗压强度随着有机质含量和高锰酸钾掺量的增加而降低。在养护龄期为28 d时,只有第1、2、3、4、5组试样抗压强度超过300 kPa。

在高锰酸钾掺量相同的情况下,随着有机质含量的增加,固化淤泥的无侧限抗压强度大幅度降低。而当有机质含量相同时,抗压强度随高锰酸钾掺量的变化在不同有机质含量下稍有不同。有机质含量7%时,随着高锰酸钾掺量从0%增加到1%,固化淤泥的抗压强度大幅降低;高锰酸钾掺量继续增加至3%时,固化淤泥抗压强度仍保持降低的趋势,但下降幅度变小。在有机质含量较高(8.5%和10%)的条件下,高锰酸钾掺量的增加使得固化淤泥在14 d与28 d龄期的抗压强度降幅呈现出明显的递减趋势。以有机质含量8.5%的四组试样为例,随着高锰酸钾掺量从0%增加到1%,固化淤泥28 d的抗压强度下降了333 kPa;而随着高锰酸钾掺量从1%增加到3%,其28 d抗压强度下降了133 kPa。在高有机质含量下,随着高锰酸钾掺量增加,固化淤泥7 d抗压强度先小幅增长,后降低。整体来看,高锰酸钾掺量变化对固化淤泥的后期强度影响较大,对于早期强度,高锰酸钾掺量为2%时反而可以小幅增加固化淤泥的抗压强度。

2.2.2 养护龄期对固化淤泥无侧限抗压强度的影响

流态固化淤泥试样的无侧限抗压强度随着养护龄期增加而变化的结果如图6所示。随着养护龄期增加,固化淤泥的无侧限抗压强度不断提升。此外,对于相同有机质含量的固化淤泥,掺入一定量高锰酸钾后,试样的抗压强度增长速率低于未掺高锰酸钾(即高锰酸钾含量为0%)的试样,且掺有高锰酸钾的三组试样的抗压强度随龄期增加的增长速率大体相同。

2.3 破坏形式分析

不同有机质含量和高锰酸钾掺量下流态固化土试样的破坏模式如图7所示。从试样破坏后的裂缝形式来看,大部分裂缝为斜向裂缝或X型裂缝,是以

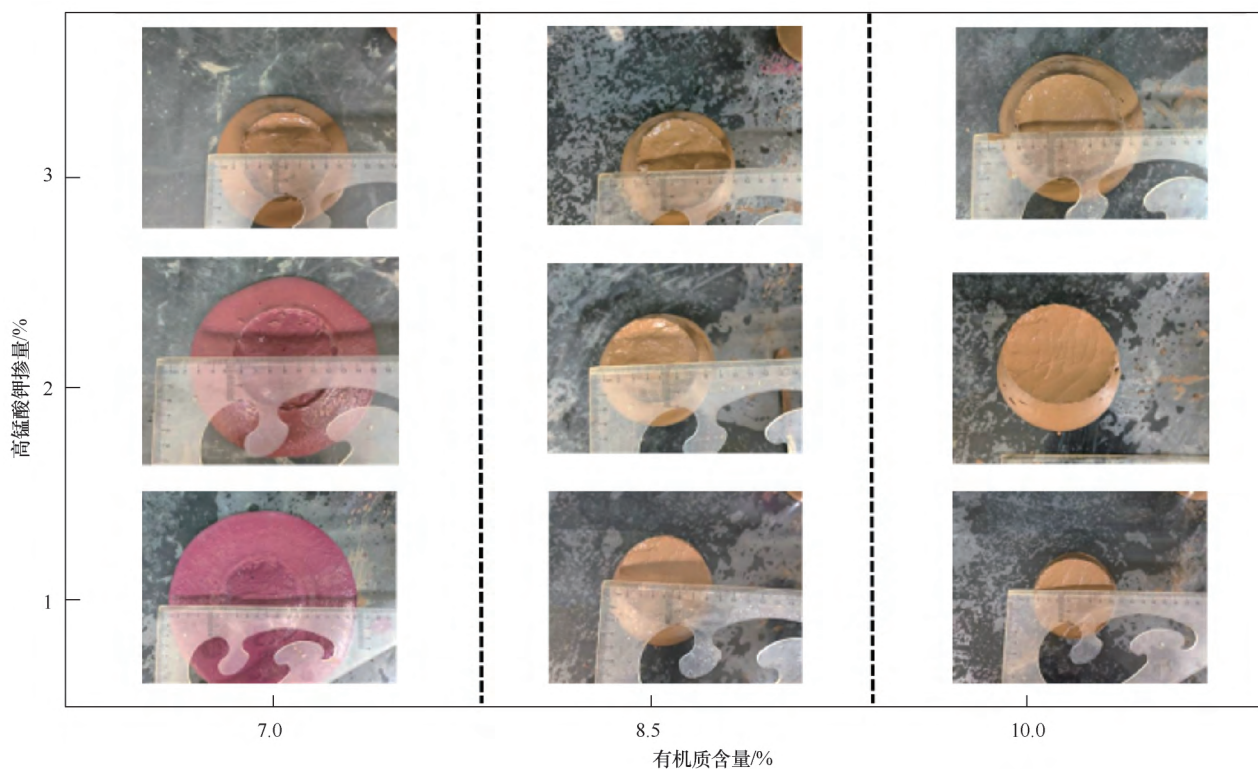


图4 固化淤泥流动度测试

Fig. 4 Images from the flowability test for solidified sediment

剪切破坏为主的拉剪破坏模式或延性破坏。当有机质含量为7%且高锰酸钾掺量为1%时的28 d固化淤泥试样破坏后,出现贯通的接近90°的裂缝,此时试样的破坏形式以拉应力破坏为主,表现出较高的脆性。图中仅展示了试样破坏后较为明显的裂缝,实际上由于低抗压强度下的试样塑性较大,在压缩过程中产生了较多的小裂隙。这也表明有机质和高锰酸钾影响了固化淤泥中水化产物的形成,导致固化淤泥强度不足且塑性较高。

2.4 应力-应变关系

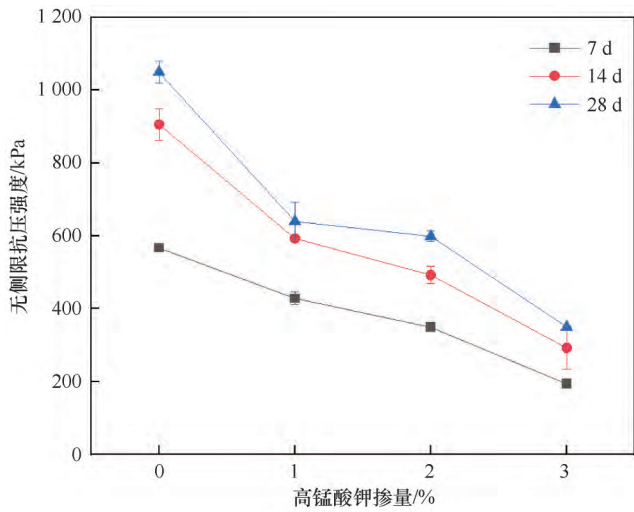
不同有机质含量下流态固化土试样随高锰酸钾掺量变化的应力-应变曲线如图8—图10所示。根据试样的应力-应变曲线可以将其分为四个典型阶段: 压密阶段、弹性变形阶段、塑性屈服阶段以及应变软化阶段。

由图可知,大部分试样的应力-应变曲线表现出较平缓的塑性屈服阶段和应变软化阶段。特别是低抗压强度试样的应力-应变曲线,该特征表现得更为明显,即表现出延性破坏的曲线特征。而高抗压强度试样的应力-应变曲线则表现出典型的脆性破坏特征。该结果与图7中对应的试样破坏模式相一致。具体来说,随着养护龄期的增加和有机质含量的减小,试样

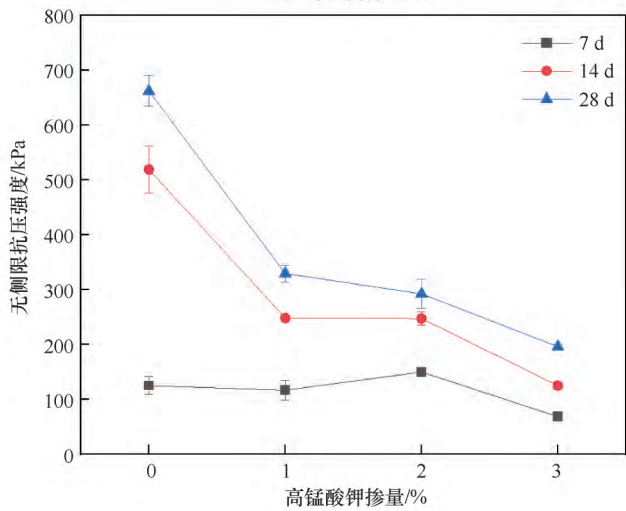
趋向于从延性破坏转为脆性破坏,破坏应变提前,抗压强度增大。当淤泥有机质含量为7%时,随着高锰酸钾掺量增加,试样的抗压强度下降,应力-应变曲线由脆性破坏转为延性破坏。当淤泥有机质含量为8.5%和10%时,掺入高锰酸钾的固化淤泥试样均表现为延性破坏,曲线变化不明显。

2.5 pH 试验

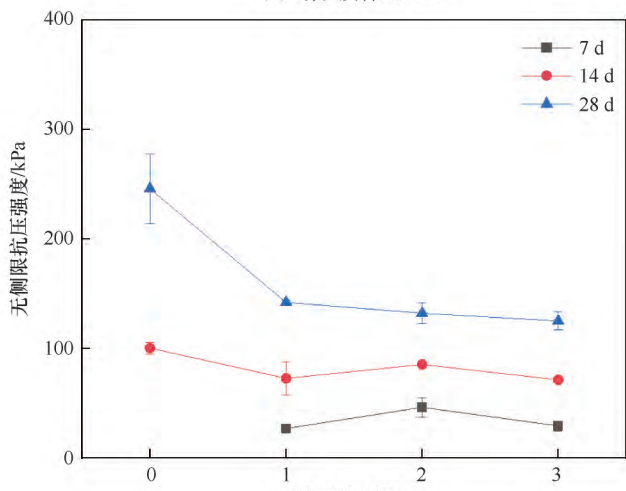
养护7 d时固化淤泥试样的pH与抗压强度的关系如图11所示。其中高锰酸钾掺量0%且有机质含量10%的固化淤泥试样由于强度较低,未测得其抗压强度,取0 kPa作为其抗压强度。可以发现,在pH为9.6~10.6的范围内,试样的无侧限抗压强度随pH增加先快速下降,后趋于稳定。对于未掺高锰酸钾的固化淤泥试样,在其有机质含量为7%时,试样pH小于掺加高锰酸钾的固化淤泥;而在高有机质含量下,未掺高锰酸钾的固化淤泥的pH均大于对应掺高锰酸钾的固化淤泥试样。二者区别仅在于有机质含量不同,特别是腐殖酸和黄腐酸的含量,这充分说明高锰酸钾的掺入分解了固化淤泥中的有机质,可能生成有机酸等物质,或在强碱性条件下消耗 OH^- 离子,导致碱性降低和 Ca^{2+} 含量降低等,均不利于水化产物的生成。此外,图11还表明,



(a) 有机质含量7%



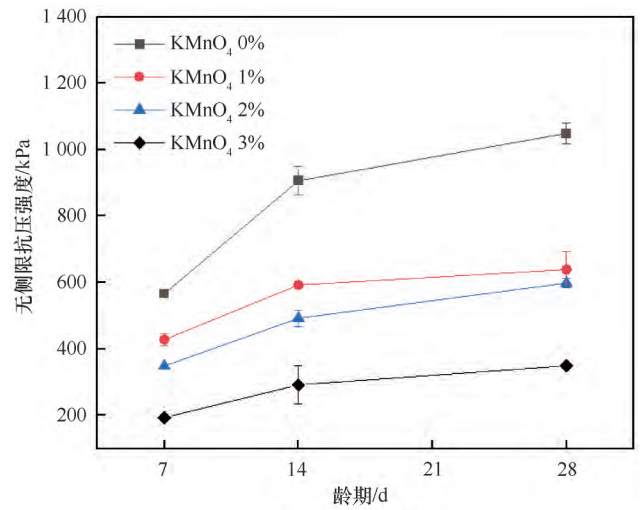
(b) 有机质含量8.5%



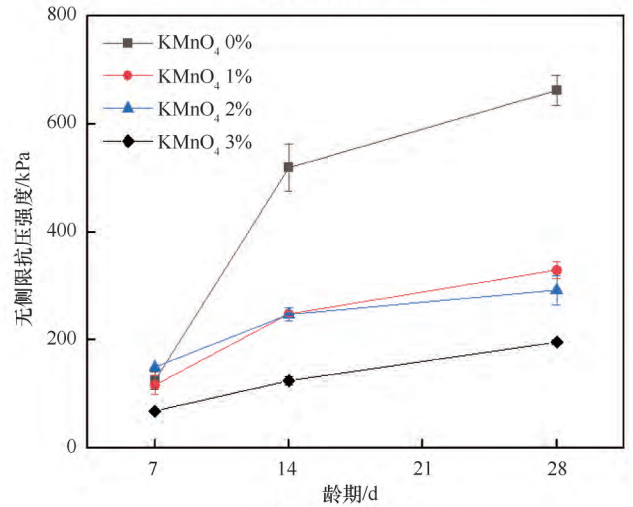
(c) 有机质含量10%

图5 不同有机质含量下高锰酸钾掺量对无侧限抗压强度的影响

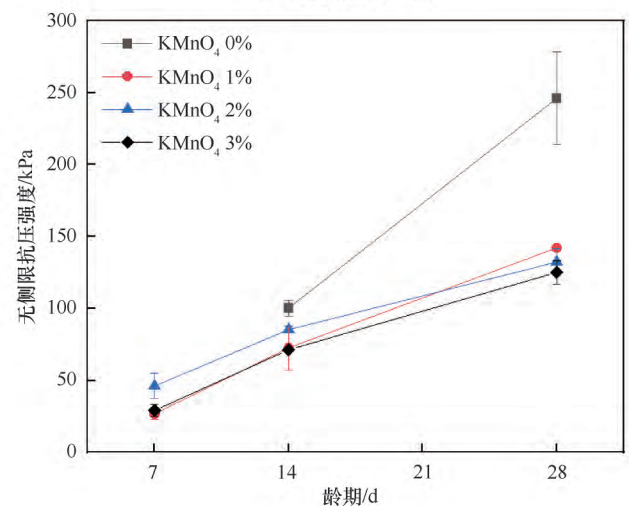
Fig. 5 Effect of KMnO_4 (potassium permanganate) dosage on UCS under different organic matter contents



(a) 有机质含量7%



(b) 有机质含量8.5%



(c) 有机质含量10%

图6 不同有机质含量下试样无侧限抗压强度随龄期变化

Fig. 6 Specimens UCS development with age under different organic matter contents

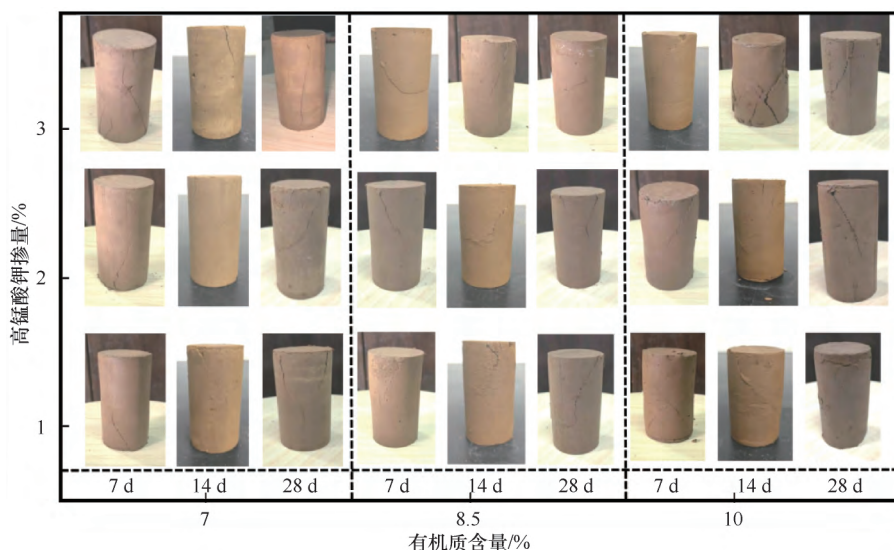


图7 不同有机质含量和高锰酸钾掺量固化淤泥试样的破坏模式

Fig. 7 Failure modes of solidified sediment specimens under different organic matter contents and KMnO_4 dosages

试样抗压强度形成的 pH 范围为 9.6~10.6, 该范围小于普通硅酸盐水泥主要水化产物 C-S-H 等稳定存在的 pH 范围, 但符合钙矾石稳定存在的 pH 范围^[30], 因此, 结合课题组前期研究^[22]可以合理推测固化淤泥中的主要水化产物为钙矾石。

3 结果讨论

试验结果表明, 对于未掺入高锰酸钾的固化淤泥, 随着有机质含量的增加, 其流动度相应增加但抗压强度随之降低。可能是由于高锰酸钾掺量为 0% 时, 一方面淤泥中的腐殖酸、富里酸等物质会与 Ca^{2+} 和 Al^{3+} 等发生系列反应生成沉淀物, 使得参与水化反应的有效离子浓度降低; 另一方面部分有机质会吸附于淤泥与固化剂等颗粒之间^[31], 进一步阻碍水化反应的进行^[29-33], 使得固化淤泥基质中颗粒间黏结程度降低。因此, 对于未掺入高锰酸钾的固化淤泥试样, 有机质含量增加时, 其流动度随之增加, 而抗压强度随之降低。

针对掺入高锰酸钾的固化淤泥, 其后期抗压强度均大幅降低, 而其流动度与早期抗压强度的变化规律与淤泥中有机质含量有关。因此, 应根据有机质含量和具体试验现象, 分不同情况进行讨论。

在 7% 的低有机质含量时, 固化淤泥的流动度随高锰酸钾掺量增加而升高。研究发现, 高锰酸钾的氧化还原能力在酸性条件下最强, 中性或强碱性条件下氧化能力减弱^[34]。其他研究^[35-37]也通常将高锰酸钾或其他氧化剂作为添加剂对淤泥进行预处理, 再加入固化剂进行固化, 即在有利于反应的条件先氧化有

机质, 而将高锰酸钾直接作为固化剂组分用于固化的研究较少^[38]。本研究旨在设计一种含高锰酸钾的新型固化剂, 因此将所有组分同时掺加对淤泥进行固化, 进而削弱了高锰酸钾对有机质的氧化作用, 部分高锰酸钾可能在混合搅拌即在与固废基胶凝材料发生反应而消耗。例如淤泥中的有机质被高锰酸钾氧化分解后生成有机酸等物质, 可能会与 Ca^{2+} 发生反应生成沉淀等, 影响水化产物生成^[39]。而试验设计时所设置的高锰酸钾掺量范围可能过大, 高锰酸钾掺量在 1% 时已经过量, 可能会加剧高锰酸钾与胶凝材料间的反应^[38]。对于 7% 低有机质含量的固化淤泥, 其 7 d 时的早期抗压强度随高锰酸钾掺量增加而逐渐降低。这是由于初期试样孔隙液中用于水化产物生成的离子浓度仍较为充足, 因此有机质含量增加对固化淤泥的抗压强度影响较大。当有机质含量为 7% 时, 有机质对固化淤泥强度的影响有限, 因此随着高锰酸钾掺量的增加, 反而会因为上述机理影响水化产物的生成。

高有机质含量下, 固化淤泥的流动度随高锰酸钾掺量增加而减小。这是由于在高有机质含量下, 固化淤泥中的有机质被高锰酸钾氧化分解^[29], 弱化了有机质的润滑作用; 同时水化产物由于受到有机质的影响减弱而快速生成, 共同导致了流动度的降低。图 4 中流动度试验的照片中, 试样颜色的变化很好地佐证了这一结论。然而, 在高有机质含量情况下, 固化淤泥的 7 d 早期抗压强度随高锰酸钾掺量的增加表现出先增后减的演化规律。这可能是因为高锰酸钾在弱碱性条件下生成了二氧化锰沉淀, 填充了试样的孔隙。

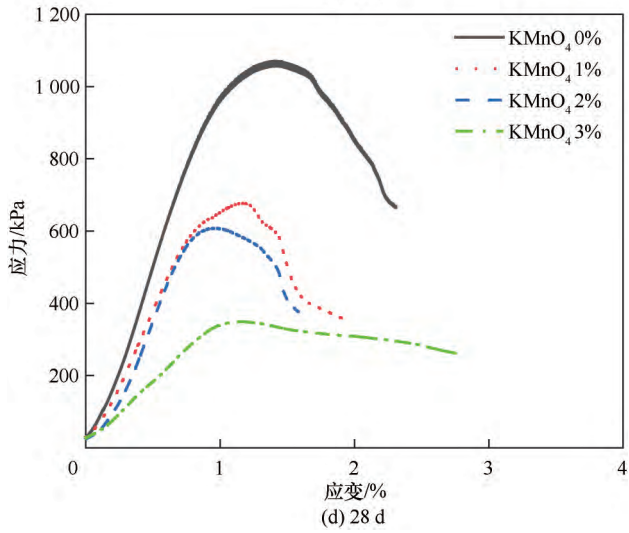
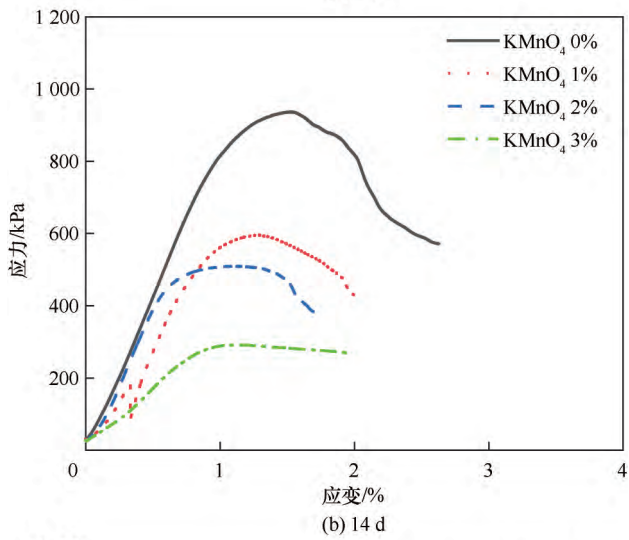
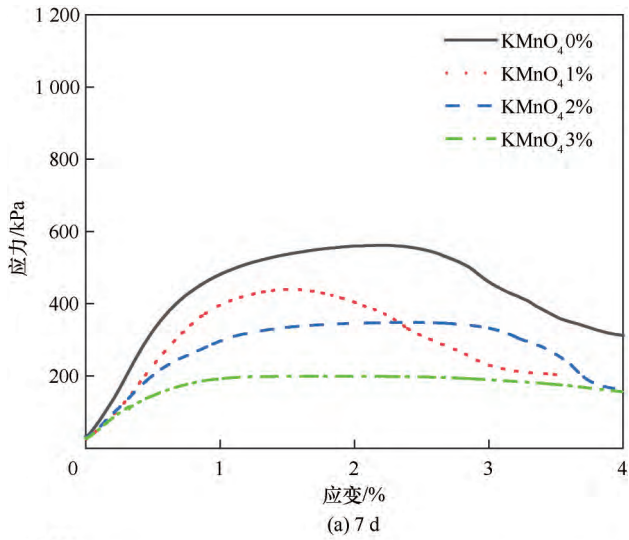


图8 不同高锰酸钾掺量下的应力-应变曲线
(有机质含量 7%)

Fig. 8 Stress-strain curves under different KMnO_4 dosages
(7% organic matter content)

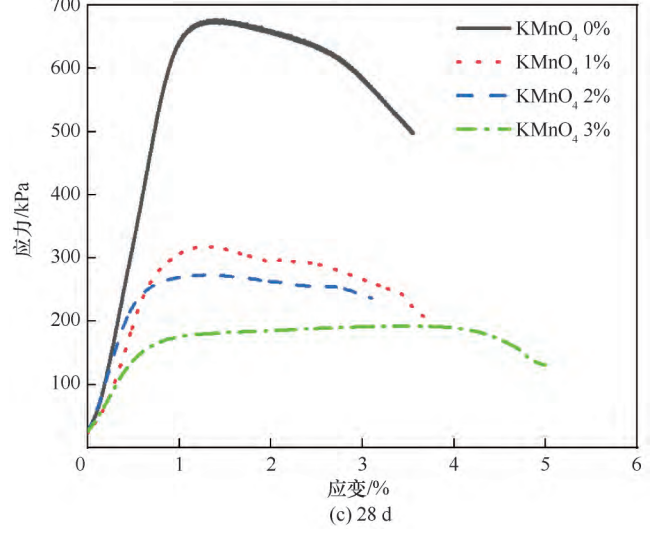
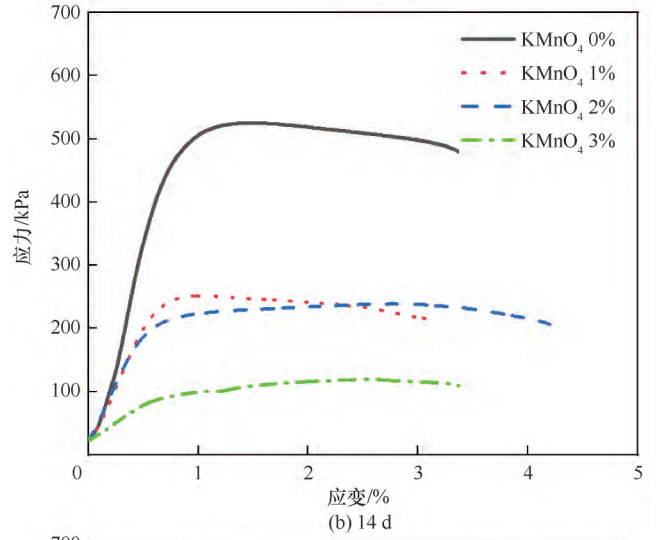
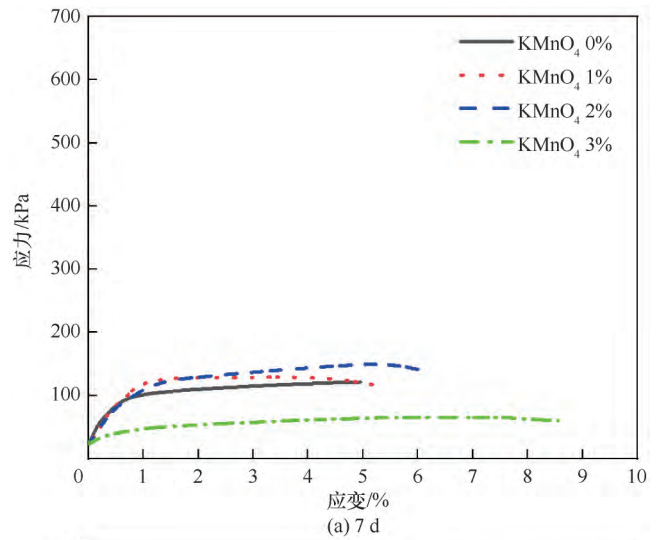


图9 不同高锰酸钾掺量下的应力-应变曲线
(有机质含量 8.5%)

Fig. 9 Stress-strain curves under different KMnO_4 dosages
(8.5% organic matter content)

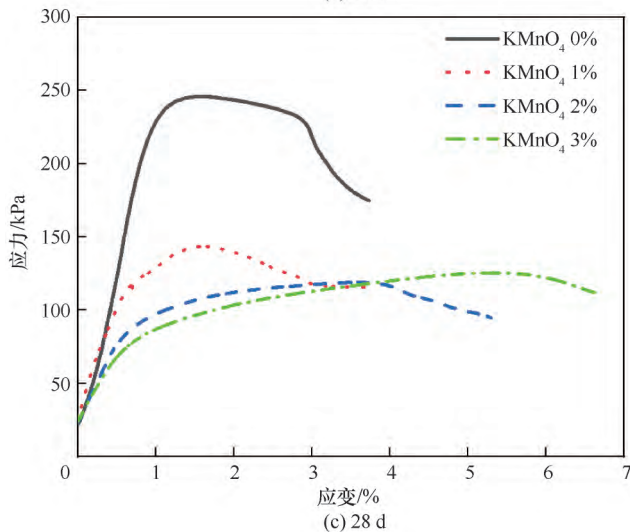
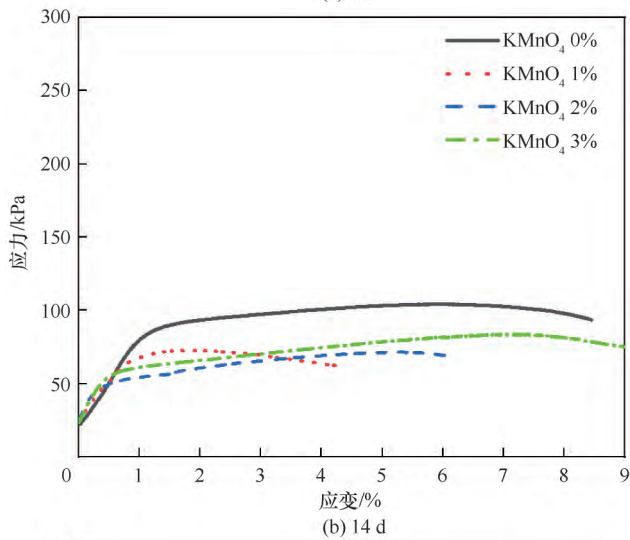
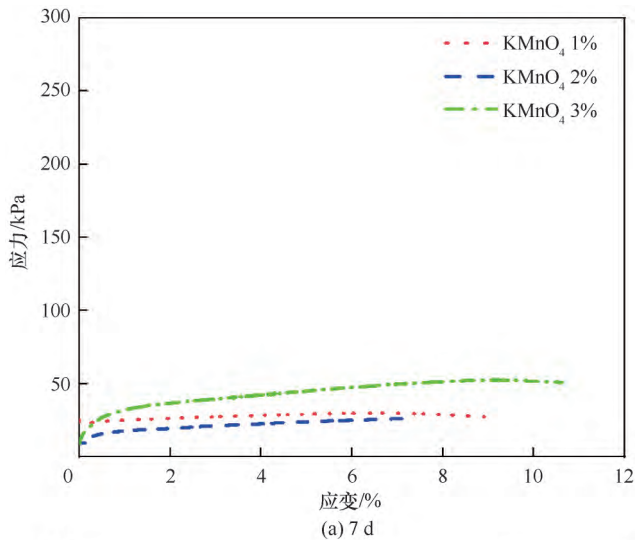


图 10 不同高锰酸钾掺量下的应力-应变曲线
(有机质含量 10%)

Fig. 10 Stress-strain curves under different KMnO_4 dosages
(10% organic matter content)

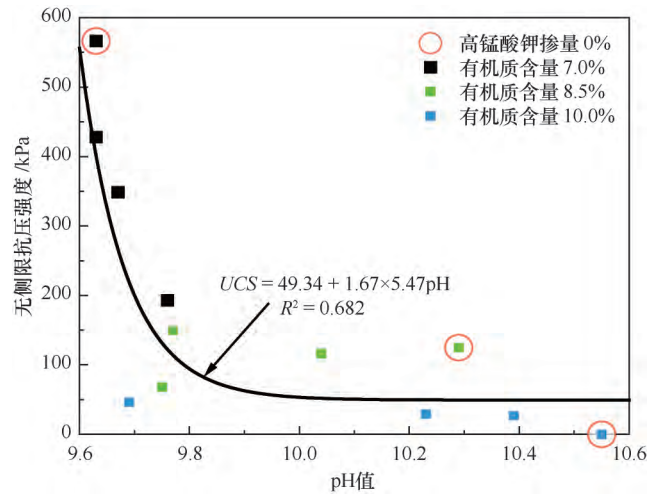


图 11 试样 pH 和无侧限抗压强度的关系 (7 d)

Fig. 11 Relationship between pH and UCS of specimens (7 d)

因此, 2%高锰酸钾掺量下, 固化淤泥在 7 d 养护龄期时的抗压强度略有提升。

其次, 由于本次试验使用的有机质为杜高黄腐酸, 其通常被作为有机肥使用, 主要成分为黄腐酸和腐殖酸以及其他物质(如 K_2O)。因此, 所使用的杜高黄腐酸中可能存在某些成分影响了固化剂对淤泥的固化效果。

针对试验中无侧限抗压强度随高锰酸钾掺量增加而降低的现象, 后续研究可进行如下改进: 缩小高锰酸钾掺量范围, 在 1.5% 的范围内设计试验, 研究低掺量高锰酸钾对淤泥固化效果的影响; 进行扫描电镜观察与矿物成分分析等试验, 分析固化淤泥的微观特征, 研究其固化机理以及高锰酸钾的微观影响; 改变固化剂配比、掺量以及掺入顺序重新设计试验, 如对高锰酸钾进行预处理后, 再加入固化剂进行固化; 改变掺入淤泥有机质的类型, 或直接人工配制有机质土进行研究, 验证该现象是否与有机质淤泥的配制原料及过程有关。

4 结论

本文对固废基胶凝材料协同高锰酸钾固化富有机质淤泥的流动度、无侧限抗压强度及应力-应变关系等进行了试验研究, 主要结论如下。

(1) 流动性方面, 在有机质含量 7% 时, 固化淤泥的流动度随高锰酸钾掺量的增加而增加。有机质含量升高时, 固化淤泥的流动度随高锰酸钾掺量的增加而降低。这可能与高锰酸钾在有机质含量较低时阻碍水化产物生成, 而在有机质含量较高时将有机质大分子分解为小分子, 促进水化产物生成有关。

(2) 力学性能方面, 固化淤泥抗压强度随养护龄期的增加而增加, 随有机质含量的增加而降低。对于掺入高锰酸钾且低有机质含量的固化淤泥, 其抗压强度随高锰酸钾掺量的增加而降低。对于掺入高锰酸钾且高有机质含量的固化淤泥, 其后期强度仍随高锰酸钾掺量增加而降低, 但早期强度随高锰酸钾掺量的增加先增加后降低。这可能是由高锰酸钾过量、pH降低和与水化产物生成有关的离子结合等原因造成的。

(3) 试样应力-应变曲线可分为四个典型的阶段: 压密阶段、弹性变形阶段、塑性屈服阶段以及应变软化阶段。综合分析试样的破坏模式和应力-应变曲线, 发现随着抗压强度增加, 固化淤泥试样由延性破坏转为脆性破坏, 其破坏应变提前。

参考文献(References):

[1] 崔卫方, 周海云, 王伟霞, 等. 疏浚淤泥建材利用研究进展[J]. 环境保护前沿, 2021, 11(2): 315-319.
CUI W F, ZHOU H Y, WANG W X, et al. Research Progress on Building Materials of Dredging Silt [J]. Advances in Environmental Protection, 2021, 11(2): 315-319.

[2] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥耐久性研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(12): 4675-4684.
WANG D X, WANG H W, ZOU W L, et al. Study of durability of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(12): 4675-4684.

[3] 王东星, 王宏伟, 王瑞红. 活性 MgO-粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S2): 3717-3725.
WANG D X, WANG H W, WANG R H. Micro-mechanisms of dredged sludge solidified with reactive MgO-fly ash [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S2): 3717-3725.

[4] 胡捷, 王艳, 张少辉, 等. 镁质胶凝材料制备与分类、水化机理及耐久性能[J]. 矿业科学学报, 2023, 8(6): 856-867.
HU J, WANG Y, ZHANG S H, et al. Preparation, classification, hydration mechanism and durability of magnesium-based cementing material [J]. Journal of Mining Science and Technology, 2023, 8(6): 856-867.

[5] TANG Y X, MIYAZAKI Y, TSUCHIDA T. Practices of reused dredgings by cement treatment [J]. Soils and Foundations, 2001, 41(5): 129-143.

[6] 王文翀, 黄英豪, 王硕, 等. 减水剂对流态固化淤泥流动性的影响试验研究[J]. 岩土工程学报, 2024, 46(8): 1605-1612.
WANG W C, HUANG Y H, WANG S, et al. Experimental study on influence of plasticizer on fluidity of convection-solidified silt [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2024, 46(8): 1605-

1612.

[7] 孟宪鹏, 张帅, 许文若, 等. 矿渣硫铝酸盐水泥流态固化土的力学性能与固化机理[J]. 市政技术, 2024, 42(2): 14-20.
MENG X K, ZHANG S, XU W R, et al. Mechanical performance and solidification mechanism of fluidized solidified soil of slag calcium sulfoaluminate cement [J]. Journal of Municipal Technology, 2024, 42(2): 14-20.

[8] HE D Q, ZHU T T, SUN J Q, et al. Emerging organic contaminants in sewage sludge: Current status, technological challenges and regulatory perspectives [J]. Science of the Total Environment, 2024, 955: 177234.

[9] YUN M H, ZHANG C, WANG B, et al. The effects and mechanism of organic matter degradation in river sediment driven by humic-reducing bacteria [J]. Journal of Water Process Engineering, 2024, 67: 106150.

[10] 王朝辉, 郭滕滕, 孙晓龙, 等. 新型固化剂 CDK 固化淤泥微观结构及性能[J]. 长安大学学报(自然科学版), 2015, 35(1): 14-19.
WANG C H, GUO T T, SUN X L, et al. Investigation of microstructure and performance of silt solidified by new stabilizer CDK [J]. Journal of Chang'an University (Natural Science Edition), 2015, 35(1): 14-19.

[11] 王东星, 王宏伟, 邹维列, 等. 碱激发粉煤灰固化淤泥微观机制研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2019, 38(S1): 3197-3205.
WANG D X, WANG H W, ZOU W L, et al. Research on micro-mechanisms of dredged sludge solidified with alkali-activated fly ash [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2019, 38(S1): 3197-3205.

[12] 荆子阳, 袁金兴, 李祖辉, 等. 复合胶凝材料固化高含水量疏浚软土的试验研究[J]. 天津建设科技, 2025, 35(01): 43-47.
JING Z Y, YUAN J X, LI Z X, et al. Experimental study on solidification of dredged soft soil with high water content using composite cementitious materials [J]. Tianjin Construction Science and Technology, 2025, 35(01): 43-47.

[13] 王宏伟, 王东星, 贺扬. MgO 改性淤泥固化土压缩特性试验[J]. 中南大学学报(自然科学版), 2017, 48(8): 2133-2141.
WANG H W, WANG D X, HE Y. Experimental study on compressibility behavior of solidified dredged sludge with reactive MgO [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2017, 48(8): 2133-2141.

[14] CHEN Y J, HE X X, ZHANG S H, et al. Strength and microstructure properties of solidified sewage sludge with two types of cement-based binders [J]. Scientific Reports, 2020, 10(1): 20769.

[15] ZHANG W L, ZHAO L Y, MCCABE B A, et al. Dredged marine sediments stabilized/solidified with cement and GGBS: Factors affecting mechanical behaviour and leachability [J]. Science of the

- Total Environment, 2020, 733: 138551.
- [16] WANG L, CHEN L, CHO D W, et al. Novel synergy of Si-rich minerals and reactive MgO for stabilisation/solidification of contaminated sediment [J]. Journal of Hazardous Materials, 2019, 365: 695-706.
- [17] 赵俊先, 李军伟, 夏旭江, 等. 矿粉-粉煤灰-偏高岭土复合基低地聚物疏浚淤泥固化材料力学特性试验研究[J]. 中国港湾建设, 2023, 43(10): 55-60.
- ZHAO J X, LI J W, XIA X J, et al. Experimental study on mechanical properties of mineral powder-fly ash-metakaolin composite based low carbon geopolymer dredged silt solidified material [J]. China Harbour Engineering, 2023, 43(10): 55-60.
- [18] 肖建庄, 沈剑羽, 高琦, 等. 工程弃土现状与资源化创新技术[J]. 建筑科学与工程学报, 2020, 37(4): 1-13.
- XIAO J Z, SHEN J Y, GAO Q, et al. Current situation and innovative technology for recycling of engineering waste soil [J]. Journal of Architecture and Civil Engineering, 2020, 37(4): 1-13.
- [19] 金生莲, 张鑫, 杨作青, 等. 湿陷性黄土红砂岩混合填料流态固化土的性能研究[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(4): 46-51.
- JIN S L, ZHANG X, YANG Z Q, et al. Performance of fluidized solidified soil with collapsible loess red sandstone mixed filler [J]. New Building Materials, 2024, 51(4): 46-51.
- [20] 赵运福, 吴庆霞. 硅酸盐水泥基固化剂流态固化土抗压强度研究[J]. 建材世界, 2024, 45(3): 18-21.
- ZHAO Y F, WU Q X. Compressive strength of fluidized solidified soil with Portland cement based solidifying agent [J]. The World of Building Materials, 2024, 45(3): 18-21.
- [21] 林文逸, 方祥雷, 雷运涛, 等. 流态固化淤泥复合胶凝材料配比优化及其固化机理 [J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2025: 1-11.
- LIN Wenyi, FANG Xiangwei, LEI Yuntao, et al. Ratio optimization and solidification mechanism of composite cementing materials of fluidized solidified sludge [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2025: 1-11.
- [22] SHI Y, LI Y, WANG H W. Eco-friendly solid waste-based cementitious material containing a large amount of phosphogypsum: Performance optimization, micro-mechanisms, and environmental properties [J]. Journal of Cleaner Production, 2024, 471: 143335.
- [23] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020 [S]. Beijing: China Communications Press, 2020.
- [24] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城镇污泥标准检验方法: CJ/T 221—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard Examination Methods for Municipal Sludge: CJ/T 221—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [25] 中华人民共和国工业和信息化部. 普通工业沉淀碳酸钙: HG/T 2226—2019 [S]. 北京: 化学工业出版社, 2019.
- Ministry of Industry and Information Technology of the People's Republic of China. Ordinary Industrial Precipitated Calcium Carbonate: HG/T 2226—2019 [S]. Beijing: Chemical Industry Press, 2019.
- [26] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596—2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Fly Ash Used for cement and Concrete: GB/T 1596—2017 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [27] 国家质量监督检验检疫总局, 中国国家标准化管理委员会. 通用硅酸盐水泥: GB 175—2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Common Portland Cement: GB 175—2023 [S]. Beijing: Standards Press of China, 2023.
- [28] GU Z, HUA S D, ZHAO W X, et al. Using alkali-activated cementitious materials to solidify high organic matter content dredged sludge as roadbed material [J]. Advances in Civil Engineering, 2018, 2018(1): 2152949.
- [29] 郭印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- GUO Y. Study on Solidification and Mechanical Properties of Silty Soil [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007.
- [30] 刘子铭. 基于钙矾石填充的有机质土加固试验研究 [D]. 南京: 东南大学, 2017.
- LIU Z M. Experimental study on organic soil reinforcement based on ettringite filling [D]. Nanjing: Southeast University, 2017.
- [31] ZENG L L, HONG Z S, WANG C, et al. Experimental study on physical properties of clays with organic matter soluble and insoluble in water [J]. Applied Clay Science, 2016, 132: 660-667.
- [32] TREMBLAY H, DUCHESNE J, LOCAT J, et al. Influence of the nature of organic compounds on fine soil stabilization with cement [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2002, 39(3): 535-546.
- [33] 宋琳, 姜言霞. 利用手持技术探究酸碱性对高锰酸钾氧化性的影响 [J]. 化学教育(中英文), 2020, 41(19): 103-106.
- SONG L, YANG Y X. Study on effects of acidity and alkalinity on the oxidability of potassium permanganate by handheld technology [J]. Chinese Journal of Chemical Education, 2020, 41(19): 103-106.

- [34] 张静. Ru^{III}催化KMnO₄氧化去除水中新兴微污染物的效能与机理[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG J. Efficiency and mechanism of Ru^{III} catalytic KMnO₄ oxidation for removing emerging micro-pollutants in water [D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [35] HE X X, WAN Y, CHEN Y J, et al. Strength improvement of high organic dredged soil by solidification/oxidization synergistic method [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2024: cgj-2023-0134.
- [36] WANG S Q, HE X X, CAI G H, et al. Strength characteristic and micro-mechanism of organic dredged sludge solidified by cement incorporating sodium persulfate [J]. Developments in the Built Environment, 2024, 17: 100323.
- [37] 王臻华, 项伟, 吴雪婷, 等. 碱性氧化剂对水泥固化淤泥强度的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(4): 693-699.
- WANG Z H, XIANG W, WU X T, et al. Influences of alkaline oxidant on strength of cement-stabilized sludge [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 693-699.
- [38] PAN C G, XIE X Y, GEN J, et al. Effect of stabilization/solidification on mechanical and phase characteristics of organic river silt by a stabilizer [J]. Construction and Building Materials, 2020, 236: 117538.
- [39] 陈妙兰. 高锰酸钾滴定法测定钙片中的钙含量[J]. 化工技术与开发, 2009, 38(4): 42-43.
CHEN M L. Determination of calcium in calcium tablet by permanganate titration [J]. Technology & Development of Chemical Industry, 2009, 38(4): 42-43.

(责任编辑 王璐)

勘 误 声 明

2025年第11期第71页眉修改如下:

张晓蕾, 秦瑞华, 姚秋玲, 等. 基于分类递归特征消除法-随机森林优化算法的山洪灾害风险模拟技术[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(11): 71-82. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.11.006

ZHANG Xiaolei, QIN Ruihua, YAO Qiuling, et al. Flash flood disaster risk simulation technology based on classified recursive feature elimination-random forest optimization algorithm [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(11): 71-82. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.11.006

2025年第11期第98页眉修改如下:

张颖, 宋晓猛, 王小军, 等. 鄂尔多斯市用水结构演变及驱动因素分析[J]. 水利水电技术(中英文), 2025, 56(11): 98-114. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.11.008

ZHANG Ying, SONG Xiaomeng, WANG Xiaojun, et al. Analysis of evolution and driving factors of water consumption structure in Ordos City [J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2025, 56(11): 98-114. DOI: 10.13928/j.cnki.wrahe.2025.11.008