

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2023.140



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



硫酸亚铁协同胶凝材料固化填埋场市政污泥 试验研究

郭晓静¹, 黄志亮¹, 陈辉¹, 何肖², 蒲诃夫², 袁满², 曹剑峰²

(1. 北京涇渭环境科技有限公司, 北京 100020; 2. 华中科技大学土木与水利工程学院, 武汉 430074)

摘要:为解决填埋场扩容扩建工程中市政污泥含水率高、强度低的问题,提出硫酸亚铁协同胶凝材料(石灰、粉煤灰和水泥)原位固化填埋污泥的方法,并采用响应面法对该协同固化方法的药剂掺量进行优化。以养护 28 d 后固化污泥的含水率、无侧限抗压强度(UCS)作为评价指标,开展单因素试验,探究硫酸亚铁及各胶凝材料在污泥固化过程中的作用;借助响应面法分析硫酸亚铁以及各胶凝材料之间的交互作用,进而优化药剂材料的掺量。结果表明:硫酸亚铁与胶凝材料均能降低固化污泥的含水率,其中,石灰、水泥的降低效果更显著;固化污泥的 UCS 随硫酸亚铁、水泥掺量的增加而增大,随石灰掺量先增大后减小,但基本不受粉煤灰掺量的影响;响应面法建立的二次多项式模型能较准确地预测固化污泥的含水率和 UCS,预测值与试验值相对误差小于 20%;在设置的约束条件下,推荐优化方案 R7(硫酸亚铁 8%,石灰 6%,粉煤灰 10%,水泥 11%),该方案下固化污泥的含水率由 360.3% 降低至 131.5%,UCS 由 0 kPa 提升至 317.0 kPa,满足填埋处置规定以及机械进场要求。

关键词: 填埋污泥; 固化; 协同; 硫酸亚铁; 胶凝材料

中图分类号: X705 文献标志码: A 文章编号: 2096-6717(2026)01-0210-11

Experimental study on solidifying landfilled municipal sludge using ferrous sulfate and cementitious materials

GUO Xiaojing¹, HUANG Zhiliang¹, CHEN Hui¹, HE Xiao², PU Hefu²,
YUAN Man², CAO Jianfeng²

(1. Beijing Jingwei Environmental Engineering Co., Ltd., Beijing 100020, P. R. China; 2. School of Civil and Hydraulic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, P. R. China)

Abstract: In order to address the issues of elevated water content and diminished strength of municipal sludge in the landfills, a synergistic method using ferrous sulfate and cementitious materials (such as lime, fly ash, and cement) was proposed for the in-situ solidification of landfilled sludge, with its reagent dosage further optimized by the response surface method (RSM). In this study, the water content and unconfined compressive strength (UCS) of the solidified sludge after 28 days of curing were selected as evaluation indexes. Initially, a single

收稿日期: 2023-09-01

基金项目: 国家重点研发计划(2019YFC1806003)

作者简介: 郭晓静(1984-), 女, 主要从事固体废物处理与处置研究, E-mail: gtyguoxiaojing@126.com。

何肖(通信作者), 男, 博士生, E-mail: shawho@hust.edu.cn。

Received: 2023-09-01

Foundation item: The National Key R & D Program of China (No. 2019YFC1806003)

Author brief: GUO Xiaojing (1984-), main research interest: solid waste treatment and disposal, E-mail: gtyguoxiaojing@126.com.

HE Xiao (corresponding author), PhD candidate, E-mail: shawho@hust.edu.cn.

factor test was conducted to explore the roles of ferrous sulfate and cementitious materials in the sludge solidification process, followed by the analysis of interactions between ferrous sulfate and cementitious materials using RSM to optimize the material dosages. The results showed that both ferrous sulfate and cementitious materials could reduce the water content of the solidified sludge, with lime and cement exhibiting more significant reduction effects; the UCS of the solidified sludge increased with increasing ferrous sulfate and cement dosages, first increased and then decreased with lime dosage, and remained essentially unchanged with fly ash dosage; the quadratic polynomial model derived from RSM could accurately predict the water content and UCS of the solidified sludge, and verification indicated that the relative error between the predicted and experimental values was less than 20%; under the constraints set in this study, the water content of the solidified sludge in the recommended solution R7 (ferrous sulfate 8%, lime 6%, fly ash 10%, and cement 11%) decreased from 360.3% to 131.5%, while the UCS increased from 0 to 317.0 kPa. The aforementioned results met the requirements for landfill disposal and mechanical access.

Keywords: landfilled sludge; solidification; synergism; ferrous sulfate; cementitious materials

填埋是长期广泛采用的污泥处置方式之一^[1-2]。然而,长期不规范的污泥-生活垃圾混合填埋导致中国半数以上垃圾填埋场的库容所剩无几,污泥与生活垃圾面临无处可填的困境^[3]。相较于新建填埋场所面临的土地紧张、选址困难等问题,在原填埋场基础上进行扩容扩建更容易实现^[4-5]。但填埋坑内高含水率且几乎不具有承载能力的污泥给现场扩建施工以及扩容后填埋场的稳定性带来挑战^[6-8]。因此,寻求简单、有效提高填埋污泥强度的方法成为首要任务。

与岩土工程中的高含水率淤泥相比,污泥除具有高含水率特点外,还富含有机物,属于特殊软土^[9-11]。当直接采用石灰、水泥等胶凝材料固化污泥时,有机物对其水化反应有抑制作用,往往导致固化效果不佳或材料掺量过高,最终难以达到预期工程目标。例如,梁仕华等^[12]发现,单掺普通硅酸盐水泥固化浓缩污泥时,50%掺量下的固化试样经标准养护7 d后仍无法脱模;赵乐军等^[13]选用石灰、粉煤灰和土作为固化剂固化污泥,当3种固化剂总掺量达到污泥湿重的0.67~1.23倍时,才能使污泥满足无侧限抗压强度(UCS)大于50 kPa的要求;冯彬等^[14]采用100%垃圾焚烧底灰、25%水泥和25%石膏固化脱水污泥,最终使固化污泥的强度和含水率满足填埋要求(含水率<60%, UCS>50 kPa)。根据文献^[15-16]所述,化学调理能有效破解污泥中的有机物,从而减小其对胶凝材料水化反应的抑制作用。林珊伊等^[17]利用芬顿试剂调理填埋污泥后,再掺入15%氧化钙,使污泥抗剪强度达到填埋标准(>25 kPa);罗小勇等^[18]在水泥、石灰等常规固化剂基础上加入硫酸铝、氯化钙等化学调理剂,在20%~25%固化剂掺量下,固化后填埋污泥的含水

率可降至60%,十字板剪切强度增大到40~50 kPa。综上,与直接使用胶凝材料的固化方法相比,化学调理联合固化法在保证污泥固化效果的前提下还能显著减少胶凝材料用量,有利于降低施工成本、避免污泥增容,因此在污泥固化中更具有优势。三氯化铁(FeCl_3)常作为化学调理剂用于增强污泥的脱水性能,其主要作用机理是通过 Fe^{3+} 的混凝作用和酸化作用破坏游离型与疏松型胞外聚合物的蛋白质结构,从而释放被胞外聚合物束缚的水分^[19-20]。考虑到 Fe^{2+} 在污泥体系中易被氧化成 Fe^{3+} ,且硫酸亚铁(FeSO_4)比 FeCl_3 更便宜,因此可采用 FeSO_4 替代 FeCl_3 用于污泥脱水调理。然而,目前关于 FeSO_4 单独作为污泥化学调理剂的研究较少,其与胶凝材料联合作用的固化效果还需进一步探索。

基于此,提出了硫酸亚铁协同胶凝材料(石灰、粉煤灰和水泥)固化填埋污泥的方法,并采用响应面法对该协同固化方法的药剂掺量进行优化,以期对填埋污泥原位固化的工程实践提供技术指导。研究内容包括:开展单因素试验,分别考察硫酸亚铁、石灰、粉煤灰和水泥掺量对固化污泥含水率及UCS的影响,分析评价该协同固化方法的处理效果;以养护28 d后固化污泥的含水率和UCS为目标响应,采用响应面法中的Box-Behnken设计,优化该协同固化方法的药剂掺量。

1 材料与试验

1.1 材料

试验所用填埋污泥取自辽宁省某生活垃圾填埋场的污泥坑,运输至实验室后密封存放于阴凉处。开展试验前,先清除污泥中的小石块、塑料袋等杂质并搅拌均匀。原污泥的基本性质参数如表1

所示。图 1 为原污泥的 SEM 图片,由图 1 可知,原污泥表观结构粗糙,颗粒之间存在大小不一的孔隙,且颗粒内部分布有微孔洞,整体呈松散状态。

表 1 填埋污泥基本性质参数

Table 1 Basic properties of landfill sludge

密度/(g/cm ³)	比重	含水率/%	有机物/%	pH 值	UCS
1.1	1.9	360.3	34.6	8.5	≈0

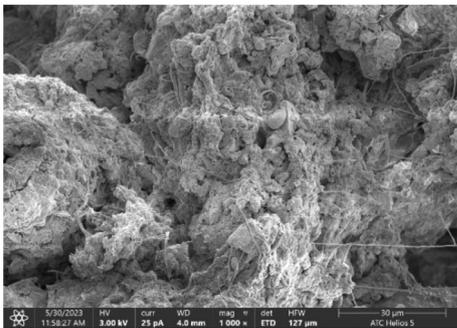


图 1 原污泥的 SEM 图片

Fig. 1 SEM micrograph of landfill sludge

试验所用硫酸亚铁为质量分数 98% 的工业级产品,采购自苏州雄润化工;所用胶凝材料分别为纯度 >99.6% 的石灰(CaO)、二级粉煤灰(FA)及华新堡垒牌 42.5# 普通硅酸盐水泥(OPC)。

1.2 试验

试验内容主要包括两部分:1)为考察硫酸亚铁、石灰、粉煤灰和水泥的掺量对填埋污泥固化效果的影响,以养护 28 d 后固化污泥的含水率和 UCS 为评价指标,设计试验方案如表 2 所示(共计 20 组,各药剂掺量按污泥湿重占比计算,下同);2)基于单因素试验结果,选取药剂掺量范围:硫酸亚铁 0~14%、石灰 0~12%、粉煤灰 0~10%、水泥 0~14%,如表 3 所示。以养护 28 d 后固化污泥的含水率(Y_{wc})和 UCS(Y_{ucs})为目标响应(假设所收集目标响应的试验结果符合正态分布),采用响应面法中的 Box-Behnken 设计方法制定试验方案(共计 29 组)。通过软件分析拟合出含水率 Y_{wc} 和无侧限抗压强度 Y_{ucs} 随药剂掺量变化的模型预测公式,进而优化得出该协同固化方法的最佳药剂掺量。

试验流程主要包括取泥、搅拌、制样及养护,养护 28 d 后测量含水率和 UCS。根据杨爱武等^[21]的

表 2 单因素试验方案

Table 2 Single-factor experimental design

组别	FeSO ₄ /%	CaO/%	FA/%	OPC/%
S1	1,4,7,10,13	8	5	10
S2	7	2,4,6,8,10	5	10
S3	7	6	1,3,5,7,9	10
S4	7	6	7	1,4,7,10,13

表 3 Box-Behnken 试验方案

Table 3 Box-Behnken design

变量	符号	掺量水平/%	中值/%
FeSO ₄	X ₁	0~14	7
CaO	X ₂	0~12	6
FA	X ₃	0~10	5
OPC	X ₄	0~14	7

研究,添加固化剂前先用石灰对污泥进行消化处理,有利于提高污泥固化效果。因此,各药剂添加顺序为:先加入硫酸亚铁与石灰,搅拌均匀后静置 24 h,再加入粉煤灰和水泥。将药剂与污泥均匀混合后填入 PVC 模具(内径 3.9 cm、高 8.0 cm)制样,待 UCS 试样具有自立能力后脱模,用塑料膜包裹并置于养护箱(温度(20±2)°C、湿度>97%)中养护 28 d。含水率和 UCS 的测量均按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)执行,各组试验结果取 3 次平行试验的平均值。

2 试验结果与讨论

2.1 单因素试验结果

2.1.1 硫酸亚铁掺量的影响

图 2 为硫酸亚铁掺量对养护 28 d 后固化污泥含水率和 UCS 的影响。由图 2 可知,随着 FeSO₄ 掺量从 1% 增加到 13%,固化污泥的含水率由 134.1% 逐渐降低至 123.8%,整体变化幅度较小(10.3%)。当 FeSO₄ 掺量 <4% 时,固化污泥的 UCS 变化不明显,可能是由于低掺量 FeSO₄ 调理污泥时释放的水分有限,不利于水泥等胶凝材料发生水化反应生成水化产物,从而提高固化污泥的强度;而当 FeSO₄ 掺量 >4% 时,固化污泥强度增长显著,可能是由于 FeSO₄ 掺量越大调理后污泥释放出的水分越多,水泥等胶凝材料的水化反应越充分,生成的水化产物也随之增多。

图 3(a)、(b)分别为固化污泥试样 S1-1% FeSO₄

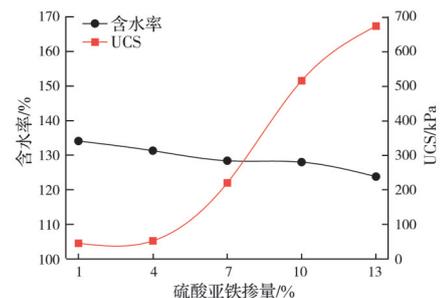
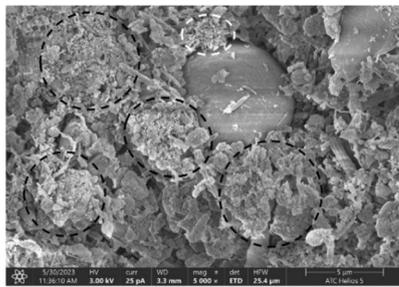


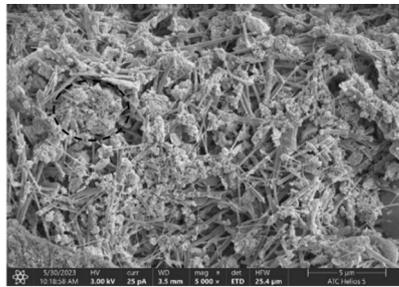
图 2 硫酸亚铁掺量对 28 d 养护后固化污泥含水率和 UCS 的影响

Fig. 2 Effect of FeSO₄ dosage on water content and UCS of solidified sludge after 28 days curing

与 S1-13% FeSO₄ 的 SEM 图片。由图 3(a) 可见,黏土颗粒间存在大量沟壑状间隙,这些间隙可能是被有机物束缚的水分在真空冷冻干燥时蒸发产生的;同时,水泥等胶凝材料水化程度较低,仅生成少量水化产物(如白色圆圈所示),大部分未完全反应的水泥则以块状基体形式存在(如黑色圆圈所示)。当 S1 组中 FeSO₄ 掺量增加至 13% 时,结合图 3(b) 及图 4 中试样 S1-13% FeSO₄ 的 XRD 衍射图谱可知,水泥的水化反应进行得较为完全,生成的大量针状钙矾石填充于污泥黏土颗粒间的孔隙,水化硅/铝酸钙等凝胶网状产物则胶结在黏土颗粒表面,最终共同形成具有结构强度的刚性骨架。因此,在宏观上固化污泥 S1-13% FeSO₄ 的强度远高于 S1-1% FeSO₄。



(a) S1-1% FeSO₄



(b) S1-13% FeSO₄

图 3 FeSO₄ 影响下固化污泥的 SEM 图片

Fig. 3 SEM micrograph of solidified sludge under the effect of FeSO₄

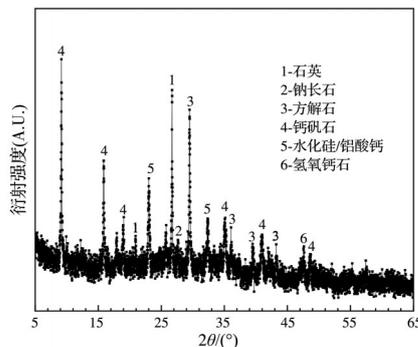


图 4 试样 S1-13% FeSO₄ 的 XRD 衍射图谱

Fig. 4 XRD diffractogram of sample S1-13% FeSO₄

2.1.2 石灰掺量的影响

图 5 所示为石灰掺量对养护 28 d 后固化污泥含

水率和 UCS 的影响。由图 5 可见,当石灰掺量从 2% 增大至 10% 时,固化污泥的含水率由 144.1% 降低至 113.6%,表明石灰掺量对固化污泥含水率的影响显著,这与石灰能大量消耗调理污泥中释放的水分有关。然而,随着石灰掺量的增大,污泥的 UCS 呈现先增大后减小的规律,即石灰掺量对污泥 UCS 的影响存在最优值,试验中 UCS 在石灰掺量为 4% 时达到最大值 279.1 kPa。受石灰添加顺序影响,高掺量石灰会优先消耗污泥在 FeSO₄ 调理过程中释放的水分,对后续添加水泥的水化反应产生负面作用,使其无法充分进行,最终抑制固化污泥强度的增长。

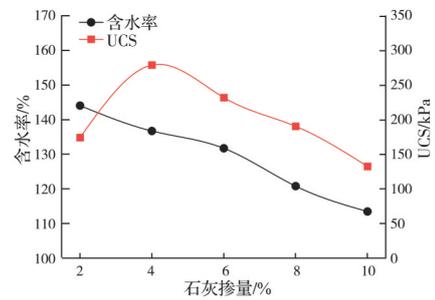
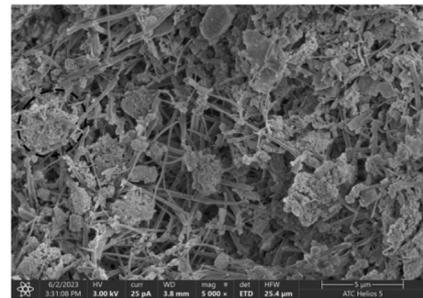


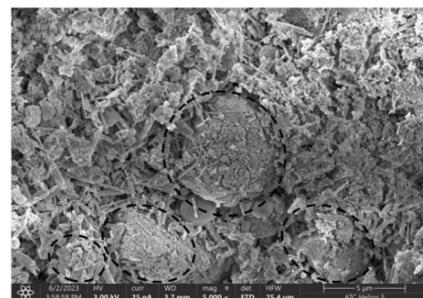
图 5 石灰掺量对 28 d 养护后固化污泥含水率和 UCS 的影响

Fig. 5 Effect of lime dosage on water content and UCS of solidified sludge after 28 days curing

图 6(a)、(b) 分别为固化污泥试样 S2-4% CaO 与 S2-10% CaO 的 SEM 图片。如图 6(a) 所示,当石



(a) S2-4% CaO



(b) S2-10% CaO

图 6 CaO 影响下固化污泥 SEM 图片

Fig. 6 SEM micrograph of solidified sludge under the effect of CaO

灰掺量处于合适范围(例如4%)时,污泥中黏土颗粒间分布有大量针状钙矾石,具有胶结作用的水化硅/铝酸钙等凝胶网状产物附着在黏土颗粒表面,说明S2-4% CaO中水泥的水化反应较为完全。与图3(a)中S1-1% FeSO₄的情况类似,图6(b)中S2-10% CaO也出现大量未反应完全的块状基体,表明进一步提高石灰掺量无法继续增加固化污泥的强度。可能的原因是石灰与污泥中的水分发生反应具有优先级,过量石灰会优先消耗前期经硫酸亚铁调理释放的水分,导致后续水泥的水化反应受到抑制。

2.1.3 粉煤灰掺量的影响

图7为粉煤灰掺量对养护28 d后固化污泥含水率和UCS的影响。由图7可知,与石灰类似,大掺量粉煤灰也能显著降低固化污泥的含水率。例如,当粉煤灰掺量由1%增大到9%时,固化污泥含水率降低了21.1%,这可能与粉煤灰比表面积大、吸水能力强有关。然而,随着粉煤灰掺量的增加,固化污泥的UCS基本保持不变。张顶飞等^[22]采用粉煤灰为主固化剂固化软土时发现,固化土的UCS随粉煤灰掺量的增加呈先增大后减小的趋势;李诗尧等^[23]将粉煤灰用于剩余污泥固化时发现,污泥固化体的UCS随粉煤灰掺量的增加呈先下降后上升的趋势。试验中UCS随粉煤灰掺量基本不变的原因可能有两方面:1)固化污泥的碱性条件仍处于较低水平,而粉煤灰自身胶凝性较弱,其内部的Al₂O₃、SiO₂等矿物成分并未溶解,保持如图3(a)所示的较完整圆球状颗粒形态;2)试验所用粉煤灰为二级粉煤灰,整体颗粒尺寸偏小(<5 μm),而固化污泥中黏土颗粒间的孔隙较大,使得大部分粉煤灰小颗粒无法有效填充孔隙,因而难以提供刚性支撑以提高固化污泥的UCS。图8(a)、(b)分别为固化污泥试样S3-1% FA与S3-9% FA的SEM图片。需要指出的是,尽管图8(a)、(b)对应的粉煤灰掺量相差

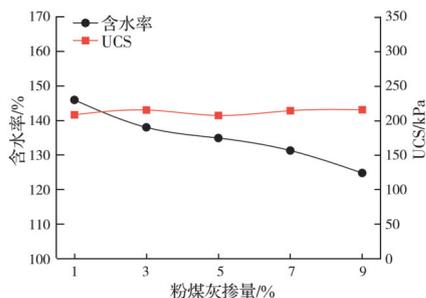
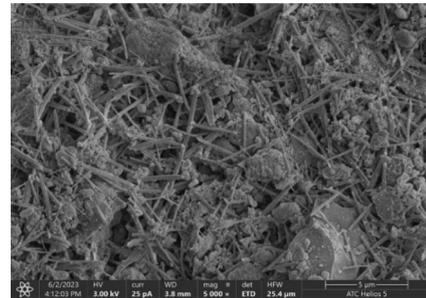


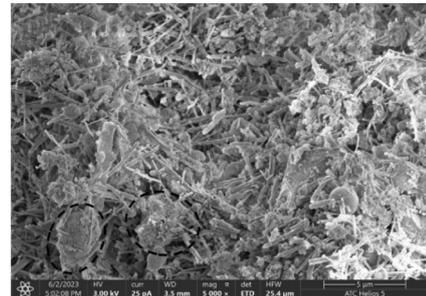
图7 粉煤灰掺量对28 d养护后固化污泥含水率和UCS的影响

Fig. 7 Effect of FA dosage on water content and UCS of solidified sludge after 28 days curing

8%,但两者中均未明显观察到粉煤灰颗粒的存在,这可能是由于SEM试样制备过程中粉煤灰颗粒发生脱落所致。



(a) S3-1% FA



(b) S3-9% FA

图8 FA影响下固化污泥的SEM图片

Fig. 8 SEM micrograph of solidified sludge under the effect of FA

2.1.4 水泥掺量的影响

图9所示为水泥掺量对养护28 d后固化污泥含水率和UCS的影响。由图9可知,当水泥掺量由1%增大到7%时,固化污泥的含水率从174.8%降低至143.1%;而当水泥掺量由7%增大到13%时,在第2个6%的增量下,固化污泥的含水率仅减少12.6%。因此,水泥虽然显著降低了固化污泥的含水率,但其作用效果随掺量的持续增加逐渐减弱。类似情况也出现在水泥掺量对固化污泥UCS的影响上:当水泥掺量由1%增加到7%时,UCS从28.5 kPa增大到198.6 kPa;当掺量进一步增加至

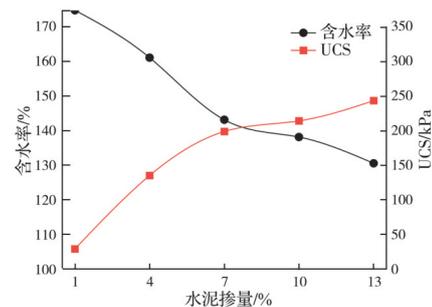


图9 水泥掺量对28 d养护后固化污泥含水率和UCS的影响

Fig. 9 Effect of OPC dosage on water content and UCS of solidified sludge after 28 days curing

13% 时, UCS 仅 243.2 kPa。这可能是由于前期 FeSO₄ 调理污泥时释放的水分有限,高掺量水泥在混合阶段已消耗污泥中大部分水分,从而影响新增水泥的水化反应,这一点可通过对比固化污泥 S4-1% OPC 与 S4-13% OPC 的 SEM 图片得到印证。

图 10(a)、(b) 分别为固化污泥土样 S4-1% OPC 与 S4-13% OPC 的 SEM 图片。如图 10(a) 所示,当水泥掺量较低时,未明显观察到钙矾石等水化产物的存在。当水泥掺量处于较高水平时,与图 3(a) 中 S1-1% FeSO₄、图 6(b) 中 S2-10% CaO 情况类似,从图 10(b) 中也观察到大量成片未完全反应的块状基体。因此,在水泥固化污泥过程中,调理污泥充分释放水分至关重要,单一增大水泥掺量并不能有效提高污泥固化体的强度。

2.2 响应面法试验结果

2.2.1 模型分析

通过软件对 Box-Behnken 试验数据进行分析,拟合得出目标响应 Y_{wc} 和 Y_{ucs} 关于药剂掺量的二次多项式预测模型,其预测公式分别如式(1)、式(2)

$$Y_{wc} = 348.5 - 6.464 29X_1 - 18.125X_2 - 10.916 67X_3 - 14.440 48X_4 + 0.428 571X_1X_2 + 0.135 714X_1X_3 + 0.076 531X_1X_4 + 0.316 667X_2X_3 + 0.452 381X_2X_4 + 0.407 143X_3X_4 + 0.097 789X_1^2 + 0.348 38X_2^2 + 0.141 667X_3^2 + 0.286 565X_4^2 \quad (1)$$

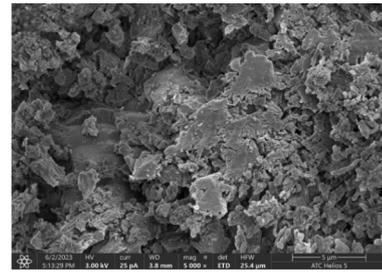
$$Y_{ucs} = -47.333 33 - 11.142 86X_1 + 29.75X_2 + 21.183 33X_3 - 3.369 05X_4 + 0.958 333X_1X_2 + 0.15X_1X_3 + 3.367 35X_1X_4 + 0.125X_2X_3 - 0.785 714X_2X_4 - 0.192 857X_3X_4 - 0.153 061X_1^2 - 2.381 94X_2^2 - 2.095X_3^2 + 0.522 959X_4^2 \quad (2)$$

式中: X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 分别为硫酸亚铁、石灰、粉煤灰和水泥的掺量。

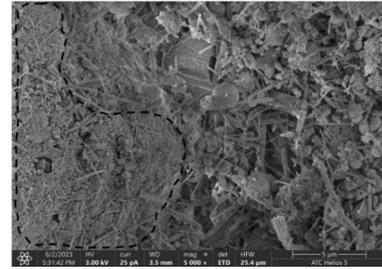
表 4 为二次多项式预测模型的方差分析结果。由表 4 可知,目标响应 Y_{wc} 和 Y_{ucs} 的模型 F 值分别为 43.81 和 19.00,该模型 F 值由噪声引起的可能性只有 0.01%,说明 Y_{wc} 和 Y_{ucs} 的二次多项式预测模型是显著的。失拟性 F 值分别为 2.65 和 13.14,相对于纯差,失拟性均不显著,表明该模型的拟合效果良好。二次多项式预测模型的拟合统计结果如表 5 所示,两个模型的相关系数(R^2)均大于 0.9,表明预测模型与试验结果具有良好的相关性。同时,模型的调整 R^2 与预测 R^2 差值均小于 0.2,且信噪比均大于 4.0,说明软件拟合得到的这两个模型均能合理预测试验结果。

此外,图 11 分别给出了目标响应 Y_{wc} 和 Y_{ucs} 的

所示。



(a) S4-1% OPC



(b) S4-13% OPC

图 10 OPC 影响下固化污泥的 SEM 图片
Fig. 10 SEM micrograph of solidified sludge under the effect of OPC

表 4 模型方差分析

Table 4 Variance analysis of response surface quadratic model

响应	来源	平方和	自由度	均方	F 值	p 值	显著性
Y_{wc}	模型	43 471.01	14	3 105.07	43.81	<0.000 1	显著
	残差	992.17	14	70.87			
	失拟性	862.17	10	86.22	2.65	0.179 9	不显著
	纯差	130.00	4	32.50			
	总离差	44 463.17	28				
Y_{ucs}	模型	6.4×10^5	14	4.6×10^4	19.00	<0.000 1	显著
	残差	3.4×10^4	14	2.4×10^3			
	失拟性	3.3×10^4	10	3.3×10^3	13.14	0.012 1	不显著
	纯差	1.0×10^3	4	250.00			
	总离差	6.8×10^5	28				

预测值与试验值的相关性分析结果。由图 11 可知,

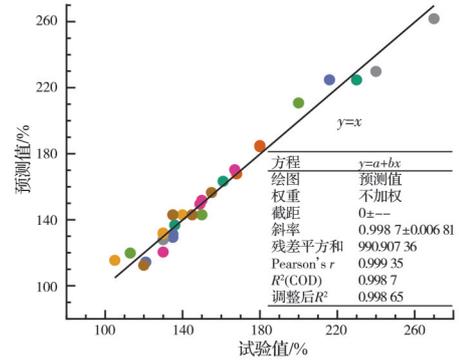
表 5 模型拟合统计

Table 5 Fit statistics of response surface quadratic model

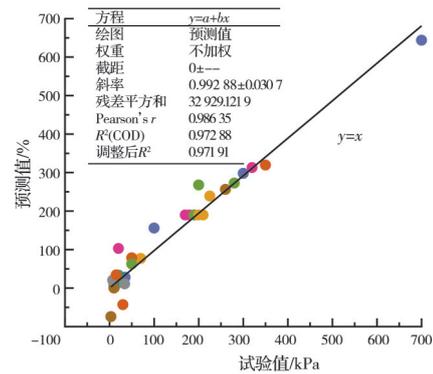
响应	标准差	均值	变异系数/%	相关系数 R^2	调整 R^2	预测 R^2	信噪比
Y_{wc}	8.42	157.45	5.35	0.977 7	0.955 4	0.883 7	24.665
Y_{ucs}	49.17	140.34	35.03	0.950 0	0.900 0	0.718 1	20.292

Y_{wc} 的预测值与试验值基本分布在直线 $y=x$ 上, Y_{ucs} 的预测值与试验值则均匀分布在该直线两侧, 直观反映出两种目标响应的预测值与试验值均具有显著相关性。综上, Y_{wc} 和 Y_{ucs} 关于 X_1 、 X_2 、 X_3 和 X_4 的二次多项式预测模型是可靠的, 其对应的预测公式 (1)、(2) 能分别较为准确地预测试验中固化污泥的含水率和 UCS。

图 12 所示为任意两因素 (X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 中任选两种) 与 Y_{wc} 之间的二维等值线图, 其余两因素水平为表 3 所示的中值。由图 12(a) 可知, Y_{wc} 随因素 X_1 、 X_2 的增加而减小, 且 X_2 对 Y_{wc} 的降低作用比 X_1 更为显著, 二者存在一定交互作用。当 X_2 为某一固定值时, X_1 从 0 增加到 14%, Y_{wc} 的变化范围仅在 20% 以内; 反之, 当 X_1 为某一固定值时, X_2 在 0~12% 范围内变化, 对应的 Y_{wc} 变化范围可扩大到 100%~220%。与不掺硫酸亚铁 ($X_1=0$) 相比, 掺入硫酸亚铁有利于石灰发挥降低固化污泥含水率的作用, 且硫酸亚铁掺量越大, 相同石灰掺量下对含水率的降低作用越显著。类似地, 如图 12(b)、(c) 所示, 掺入硫酸亚铁也能促进粉煤灰、水泥降低固化污泥的含水率。图 12(d)、(f) 中的二维等值线均为直线, 说明粉煤灰与石灰、水泥两两之间不存在交互作用; 而



(a) Y_{wc}



(b) Y_{ucs}

图 11 预测值与试验值的相关性分析

Fig. 11 Correlation between predicted values and test values

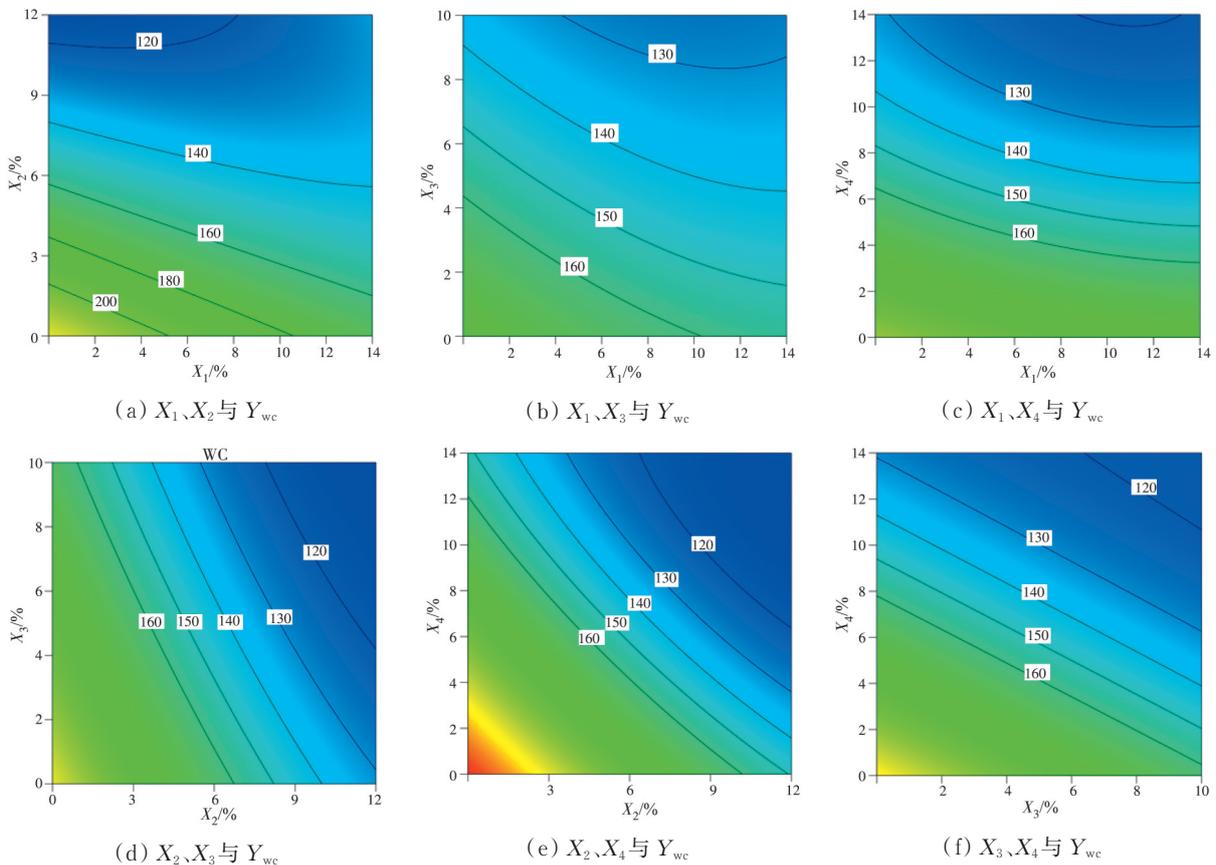


图 12 Y_{wc} 的二维等值线图

Fig. 12 Two-dimensional contour plots of Y_{wc}

图 12(e)的结果显示,当 $X_2 > 6\%$ 时,水泥与石灰之间存在一定的交互作用。综合对比图 12(d)、(f)的结果可知,当 $X_3 > 6\%$ 时,对 Y_{wc} 的降低效果更为显著。图 12(e)说明石灰、水泥在降低固化污泥含水率中的重要作用;随着二者掺量的增加,固化污泥含水率逐渐减小。当 $X_2 = 0$ 或 $X_4 = 0$ 时,固化污泥含水率仍处于较高水平(约 220%);当 $X_2 > 6\%$ 且 $X_4 > 7\%$ 时,固化污泥含水率降低到 150% 以下。总体而言,图 12 呈现的规律与图 2、图 5、图 7 和图 9 中关于含水率的试验结果基本一致,表明目标响应 Y_{wc} 的模型预测结果与室内试验结果具有良好的 consistency。

图 13 所示为任意两因素与目标响应 Y_{ucs} 之间的二维等值线图,其余两因素水平为表 3 所示的中值。由图 13(a)、(b)、(c)可知, Y_{ucs} 随 X_1 的增加而增大,但随 X_2 、 X_3 及 X_4 的增加呈不同变化趋势,同时 X_1 、 X_2 、 X_3 及 X_4 之间分别存在一定的交互作用。如图 13(a)所示,随着 X_2 的增加, Y_{ucs} 先增大后减小,且最优 X_2 随着 X_1 的增加而逐渐增大,这可能与硫酸亚铁对污泥进行化学调理时的释水量有关。与图 13(a)、

(c)所示的情况不同,图 13(b)中的等值线更加平缓:在任意 X_1 下,随着 X_3 的增加, Y_{ucs} 只在微小范围(< 25 kPa)内发生变化,因此,粉煤灰掺量对固化污泥强度的影响十分有限。由图 13(c)可知,尽管 Y_{ucs} 随 X_1 与 X_4 的增加而逐渐增大,但当 $X_1 < 4\%$ 或 $X_4 < 4\%$ 时,无论如何改变另一因素,均不能使 Y_{ucs} 发生显著变化,说明本方法提高固化污泥强度时硫酸亚铁和水泥可能存在最低掺量要求。与图 12(d)、(f)不同,图 13(d)、(e)、(f)中的二维等值线均为曲线,表明石灰、粉煤灰和水泥 3 种胶凝材料在提高固化污泥强度时任意两两之间均存在一定交互作用。由图 13(d)、(f)可知, Y_{ucs} 沿 X_3 方向的变化不显著,因而改变粉煤灰掺量未对固化污泥强度产生明显影响。此外,考察 X_2 与 X_4 之间的相互作用时(如图 13(e)所示)发现,过高的 X_2 会对水泥的水化反应造成负面影响,不利于固化污泥强度的增长。整体来看,图 2、图 5、图 7 和图 9 中关于 UCS 的试验结果在图 13 中得到印证,表明目标响应 Y_{ucs} 的模型预测结果与室内试验结果基本一致。

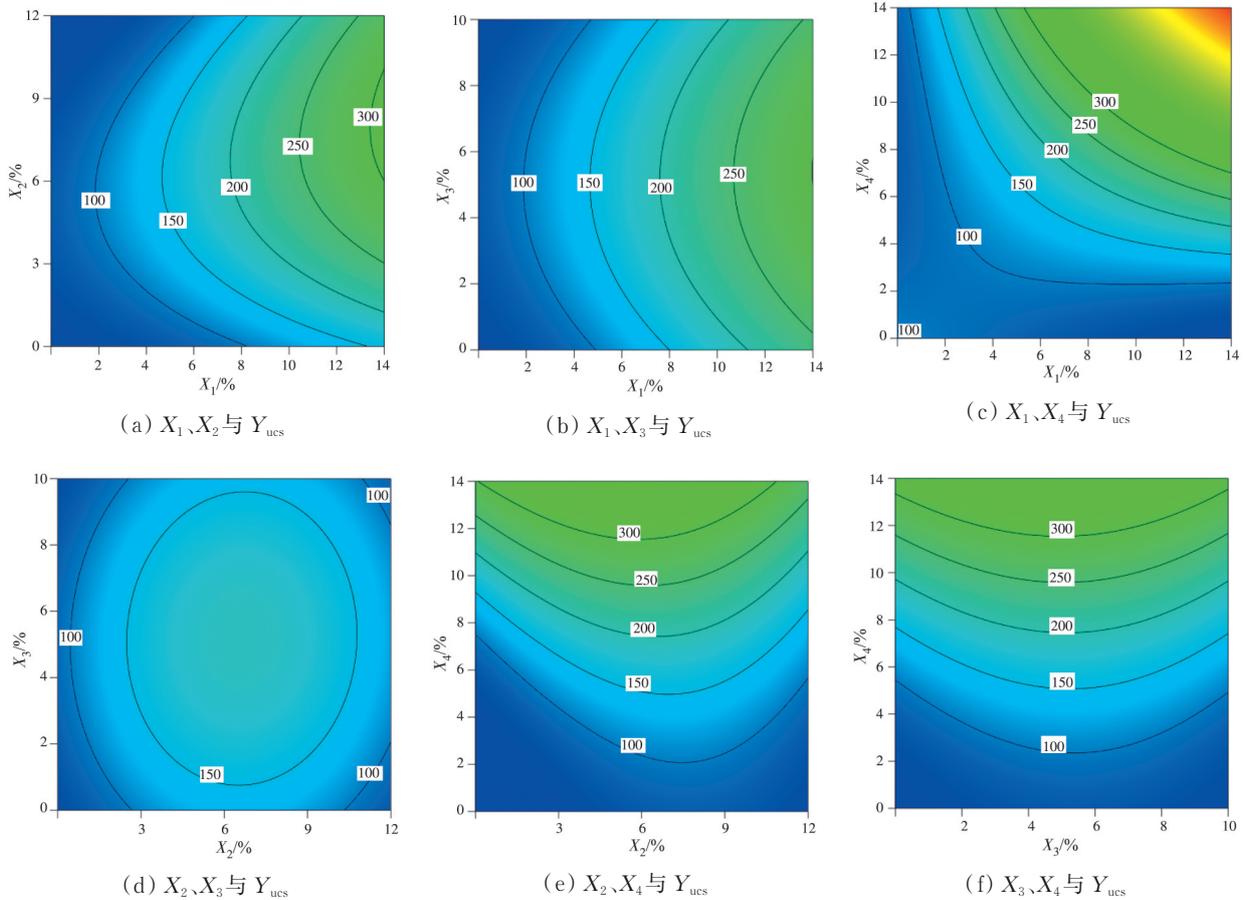


图 13 Y_{ucs} 的二维等值线图

Fig. 13 Two-dimensional contour plots of Y_{ucs}

2.2.2 数值优化

在对药剂配方进行数值优化时,设置如下约束条件:1)硫酸亚铁掺量为4%~10%、石灰掺量为2%~10%、粉煤灰掺量为6%~10%、水泥掺量为4%~12%,4种药剂分别在各自掺量区间内取值;2)含水率目标响应 Y_{wc} 在100%~150%内取值,

UCS目标响应 Y_{ucs} 在50~300 kPa内取值;3)参考药剂市场价格(硫酸亚铁650元/吨、石灰600元/吨、粉煤灰90元/吨、水泥450元/吨)计算成本,药剂总成本 Y_{cost} 在0~300元/吨内取最小值。经软件优化分析后,从所得方案中选取R1~R7等7种不同的药剂掺量,如表6所示。

表6 响应面优化方案

Table 6 RSM optimization schemes

编号	$X_1/\%$	$X_2/\%$	$X_3/\%$	$X_4/\%$	预测值 $Y_{wc}/\%$	预测值 Y_{ucs}/kPa	总成本/(元/吨)
R1	4	9	10	7	115.8	67.9	120.5
R2	4	7	10	10	118.7	120.1	122.0
R3	5	6	10	12	120.1	189.2	131.5
R4	6	9	10	7	116.3	109.9	133.5
R5	6	7	10	10	118.0	178.5	135.0
R6	7	8	10	9	116.4	179.5	143.0
R7	8	6	10	11	119.5	263.8	146.5

表7为响应面优化验证结果,由表7可知,方案R1~R7的含水率和UCS预测值与试验值接近,相对误差控制在20%以内。表明文中建立的二次多

项式预测模型可靠,能较好地预测标准养护28d后固化污泥的含水率和UCS,可用于不同工况下固化药剂掺量的优化。

表7 响应面优化验证结果

Table 7 Verification results of RSM optimization schemes

编号	预测值 $Y_w/\%$	试验均值 $R_{wc}/\%$	相对误差/ $\%$	预测值 Y_{ucs}/kPa	试验均值 R_{ucs}/kPa	相对误差/ $\%$
R1	115.8	131.8	12.1	67.9	79.4	14.5
R2	118.7	129.9	8.6	120.1	137.9	12.9
R3	120.1	131.8	8.9	189.2	173.0	-9.4
R4	116.3	138.5	16.0	109.9	119.0	7.6
R5	118.0	126.2	6.5	178.5	185.7	3.9
R6	116.4	123.2	5.5	179.5	180.8	0.7
R7	119.5	131.5	9.1	263.8	317.0	16.8

3 结论

通过试验研究提出硫酸亚铁协同胶凝材料原位固化填埋污泥方法,并采用响应面法对该协同固化方法的药剂掺量进行优化,得出以下主要结论:

1)固化污泥的含水率随药剂掺量的增加而逐渐减小。其中,石灰、水泥对降低含水率的作用显著;大掺量粉煤灰也能起到显著降低固化污泥含水率的作用。

2)固化污泥的UCS随药剂掺量的增加呈不同变化规律。随着 FeSO_4 掺量的增加,UCS逐渐增大,且存在最低掺量临界值;随着石灰掺量的增加,UCS先增大后减小,存在最优掺量;随着水泥掺量的增加,UCS虽保持增长趋势,但增幅逐渐放缓;此外,粉煤灰掺量基本不影响固化污泥的UCS。

3)响应面法建立的关于固化污泥含水率与UCS随药剂掺量变化的二次多项式模型可靠,能较

好地预测养护28d后固化污泥的含水率及UCS。

4)基于设置的约束条件,响应面优化得到的不同药剂掺量方案均通过验证,预测值与试验值之间的相对误差小于20%。其中,在方案R7的掺量条件下,固化污泥含水率降低至131.5%、UCS增大到317.0 kPa,满足填埋处置规定及机械进场要求。

参考文献

- [1] 戴晓虎. 我国污泥处理处置现状及发展趋势[J]. 科学, 2020, 72(6): 30-34, 4.
- DAI X H. Applications and perspectives of sludge treatment and disposal in China [J]. Science, 2020, 72(6): 30-34, 4. (in Chinese)
- [2] 赵乐军, 戴树桂, 辜显华. 污泥填埋技术应用进展[J]. 中国给水排水, 2004, 20(4): 27-30.
- ZHAO L J, DAI S G, GU X H. Application progress of sludge landfill technology [J]. China Water & Wastewater, 2004, 20(4): 27-30. (in Chinese)

- [3] LIN W A, ZHAN X J, ZHAN T L, et al. Effect of FeCl_3 -conditioning on consolidation property of sewage sludge and vacuum preloading test with integrated PVDs at the Changan landfill, China [J]. *Geotextiles and Geomembranes*, 2014, 42(3): 181-190.
- [4] FANG R, GUO Z G, FENG T G. Analysis of stability and control in landfill sites expansion [J]. *Procedia Engineering*, 2011, 24: 667-671.
- [5] 张乾飞, 王艳明, 徐永福, 等. 老填埋场改扩建中的关键环境岩土技术问题[J]. *土木工程学报*, 2007, 40(4): 73-81.
ZHANG Q F, WANG Y M, XU Y F, et al. Key geotechnical problems in the reconstruction and expansion of existing MSW landfills [J]. *China Civil Engineering Journal*, 2007, 40(4): 73-81. (in Chinese)
- [6] SINGH S, MURPHY B J. Evaluation of the stability of sanitary landfills [M]//LANDVA A, KNOWLES G D, Eds. *Geotechnics of Waste Fills—Theory and Practice*. West Conshohocken, PA: ASTM International, 2009: 240.
- [7] MITCHELL R A, MITCHELL J K. Stability failure of a sanitary landfill [C]//*Proceeding of ASCE Specialty Conference on Stability and Performance of Slope and Embankments-II*, 1992: 1152-1187.
- [8] MITCHELL J K, SEED R B, SEED H B. Kettleman hills waste landfill slope failure. I: Liner-system properties [J]. *Journal of Geotechnical Engineering*, 1990, 116(4): 647-668.
- [9] 冯源, 罗小勇, 林伟岸, 等. 处置库污泥工程特性测试研究[J]. *岩土力学*, 2013, 34(1): 115-122.
FENG Y, LUO X Y, LIN W A, et al. Geotechnical properties measurement of sewage sludge at a disposal site [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2013, 34(1): 115-122. (in Chinese)
- [10] 安凯茜, 徐文杰, 兰吉武, 等. 我国填埋场污泥土工特性研究[J]. *环境卫生工程*, 2021, 29(4): 78-85.
AN K X, XU W J, LAN J W, et al. Research on the geotechnical characteristics of the landfill sludge in China [J]. *Environmental Sanitation Engineering*, 2021, 29(4): 78-85. (in Chinese)
- [11] ZHAN T L, ZHAN X J, LIN W A, et al. Field and laboratory investigation on geotechnical properties of sewage sludge disposed in a pit at Changan landfill, Chengdu, China [J]. *Engineering Geology*, 2014, 170: 24-32.
- [12] 梁仕华, 冯德鑫. 硫铝酸盐水泥协同垃圾焚烧副产物固化浓缩液污泥的强度和水稳定性试验研究[J]. *岩土力学*, 2022, 43(6): 1453-1468.
LIANG S H, FENG D L. Experimental study on strength and water stability of concentrated solution sludge solidified with sulfoaluminate cement collaborating waste incineration by-products [J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2022, 43(6): 1453-1468. (in Chinese)
- [13] 赵乐军, 戴树桂, 吴彩霞, 等. 不同添加剂改善脱水污泥填埋特性的正交试验研究[J]. *给水排水*, 2006, 32(1): 11-14.
ZHAO L J, DAI S G, WU C X, et al. Orthogonal experiment research on dewatering sludge [J]. *Water & Wastewater Engineering*, 2006, 32(1): 11-14. (in Chinese)
- [14] 冯彬, 陈萍, 詹良通, 等. 污泥-焚烧底灰混合固化配方及强度增长机理[J]. *环境科学学报*, 2016, 36(2): 590-598.
FENG B, CHEN P, ZHAN L T, et al. Optimal material proportion for co-solidification of sewage sludge and MSWI bottom ash and its strength promotion mechanism [J]. *Acta Scientiae Circumstantiae*, 2016, 36(2): 590-598. (in Chinese)
- [15] WANG Y A, ZHOU Y T, FENG D, et al. Effects of chemical conditioners on deep dewatering of urban dewatered sewage sludge in the temporary sludge lagoon [J]. *Journal of Environmental Engineering*, 2019, 145(10): 04019063.
- [16] ZHOU X, JIANG G M, WANG Q L, et al. A review on sludge conditioning by sludge pre-treatment with a focus on advanced oxidation [J]. *RSC Advances*, 2014, 4(92): 50644-50652.
- [17] 林珊伊, 孙德安, 朱明瑞, 等. 芬顿与氧化钙联合处理填埋库污泥的力学特性[J]. *环境工程学报*, 2020, 14(10): 2813-2822.
LIN S Y, SUN D A, ZHU M R, et al. Mechanical properties of landfill sludge conditioned by Fenton's reagent with calcium oxide [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2020, 14(10): 2813-2822. (in Chinese)
- [18] 罗小勇, 王艳明, 熊建英, 等. 垃圾填埋场污泥坑原位修复工程实践[J]. *环境工程学报*, 2018, 12(9): 2707-2716.
LUO X Y, WANG Y M, XIONG J Y, et al. Practice of in situ remediation of sludge pits in landfill [J]. *Chinese Journal of Environmental Engineering*, 2018, 12(9): 2707-2716. (in Chinese)
- [19] WU W, ZHOU Z, YANG J Z, et al. Insights into conditioning of landfill sludge by FeCl_3 and lime [J]. *Water Research*, 2019, 160: 167-177.
- [20] LI H S, WEN Y, CAO A S, et al. The influence of additives (Ca^{2+} , Al^{3+} , and Fe^{3+}) on the interaction energy and loosely bound extracellular polymeric substances (EPS) of activated sludge and their flocculation mechanisms [J]. *Bioresource Technology*, 2012, 114: 188-194.

- [21] 杨爱武, 胡垚, 杨少坤. 城市污泥新型固化技术及其力学特性[J]. 岩土力学, 2019, 40(11): 4439-4449.
YANG A W, HU Y, YANG S K. New solidification technology and mechanical properties of municipal sludge [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(11): 4439-4449. (in Chinese)
- [22] 张顶飞, 吕启航, 张鹏, 等. 基于响应面法的粉煤灰-电石渣地质聚合物固化软土试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(8): 2821-2829, 2845.
ZHANG D F, LYU Q H, ZHANG P, et al. Experimental study on soft soil solidified by fly ash and carbide slag geopolymer based on response surface method [J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society, 2023, 42(8): 2821-2829, 2845. (in Chinese)
- [23] 李诗尧, 赵纯, 孙志华, 等. 新疆地区电厂脱硫石膏增强的水泥基污泥固化剂的制备及性能分析[J]. 环境工程, 2019, 37(3): 146-151.
LI S Y, ZHAO C, SUN Z H, et al. Preparation and analysis of power plant desulfurization gypsum enhancing cement-based sludge solidification agent in Xinjiang [J]. Environmental Engineering, 2019, 37(3): 146-151. (in Chinese)

(编辑 朱备)