

DOI:10.3969/j.issn.1672-1144.2025.06.017

基于响应面法的 CLPSS 固化河道疏浚底泥强度研究

杨永辉¹, 刘庆华², 雷颖³, 高德彬³

(1. 电信综合勘察设计院有限公司, 陕西 西安 710054;

2. 达孜虎峰园林绿化有限公司, 西藏 拉萨 850100;

3. 长安大学 地质工程与测绘学院, 陕西 西安 710054)

摘要: 为探究自研新型固化剂 CLPSS 对灞河河道疏浚底泥的固化效果, 采用响应面法的中心组合设计, 选取底泥含水率、有机质含量与固化剂 CLPSS 掺量作为响应因素, 并以龄期 7 d 和 28 d 无侧限抗压强度作为响应值, 分析了三种响应因素对疏浚底泥固化强度的影响规律, 并选取底泥固化效果最优组与基准样(8%水泥)进行了微观电镜扫描。结果表明:底泥含水率、有机质含量与固化剂 CLPSS 掺量对河道疏浚底泥固化效果均存在显著影响, 其中含水率对于底泥固化强度存在最优值, 有机质含量对固化强度存在消极影响, 而复合固化剂 CLPSS 对消除两者因含量过多带来的消极影响具有显著作用。电镜扫描也揭示了底泥固化强度增强的影响机制, 研究成果对灞河道的疏浚底泥固化提供了试验依据。

关键词: 疏浚底泥; 响应面法; CLPSS 固化剂; 无侧限抗压强度; 微观结构

中图分类号: X522

文献标识码: A

文章编号: 1672—1144(2025)06—0124—06

Strength Analysis of River Dredged Sediment Solidified by CLPSS Based on Response Surface Methodology

YANG Yonghui¹, LIU Qinghua², LEI Ying³, GAO Debin³

(1. China DK Comprehensive Investigate and Design Research Institute Co., Ltd., Xi'an, Shaanxi 710054, China;

2. DaziHufeng Landscaping Co., Ltd., Lhasa, Tibet 850100, China;

3. School of Geological Engineering and Surveying, Chang'an University, Xi'an, Shaanxi 710054, China)

Abstract: In order to explore the curing effect of a new self-developed curing agent CLPSS on the dredged sediment, a central composite design (CCD) based on the response surface methodology (RSM) was adopted. The moisture content of sediment, organic matter content, and CLPSS dosage were selected as independent variables, while the unconfined compressive strengths at 7-day and 28-day curing ages were set as response values. The influence patterns of these three independent variables on the solidification strength of dredged sediment were analyzed. Scanning electron microscopy (SEM) tests were conducted on the sediment sample with the best solidification effect and the reference sample (incorporating 8% cement). The results showed that the moisture content of sediment, organic matter content, and CLPSS dosage all exerted significant effects on the solidification effect of river dredged sediment. Specifically, there was an optimal value of moisture content for the sediment's solidification strength; the organic matter content imposed adverse effects on the solidification strength; and the composite curing agent CLPSS played a significant role in alleviating the adverse effects caused by excessive contents of the above two factors. The research results could provide experimental basis for the solidification of dredged sediment in the Bahe River channel.

Keywords: dredged sediment; response surface methodology; CLPSS stabilizer; unconfined compressive strength; microstructure

收稿日期: 2025-07-11

修稿日期: 2025-08-27

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(41372329); 中国电建集团西北勘测设计研究院有限公司项目(XBY-2019-KJ-08)

作者简介: 杨永辉(1980—), 男, 硕士, 高级工程师, 主要从事地质工程方面研究工作。E-mail: yyhui123@163.com

通讯作者: 刘庆华(1985—), 男, 工程师, 主要从事生态工程领域研究工作。E-mail: 81792866@qq.com

城市河网疏浚会产生大量的疏浚底泥,疏浚底泥力学性质差,传统的处理措施是就近堆填,这不仅会侵占大量的土地,同时底泥中的污染物可能会对环境造成二次污染。如若对其处理不当,易造成二次污染,引发相应的环境问题。在新时代绿色低碳发展背景下我国经济发展面临严峻的生态环境问题,淤泥固化技术可以固定有害物质,改善底泥力学性质,达到化害为利的作用,已在实际工程中得到了广泛应用^[1-4]。但不同区域河湖疏浚底泥物质成分复杂,不同因素对底泥固化效果的影响还需进行研究,以对配合比进行优化设计。张有斌等^[5]采用 Box-Behnken Design 的响应曲面法探究了土壤固化剂掺量、河沙替代率和短切玄武岩纤维掺量对固化高原红土的无侧限抗压强度和水稳性能的关系,得到了三者的最优配合比,同时对其影响机理进行了阐述。雷颖^[6]选用多种固化材料对疏浚底泥改性固化开展了室内试验研究,得出了各固化剂对改性固化强度的影响规律,并通过正交试验与响应面试验得出了固化剂的最佳掺比。吴章平等^[7]开展淤泥固化土在不同固化材料配比、不同固化材料掺入量、不同养护龄期的无侧限抗压强度试验,得到淤泥固化土无侧限抗压强度与不同因素的关系并发现无侧限抗压强度与养护龄期呈对数增长关系。付怀合等^[8]利用工业废渣与水泥协同固化淤泥,以无侧限抗压强度作为固化效果指标并通过扫描电镜揭示了淤泥的固化机理。黄炜等^[9]在正交试验的基础上利用响应面法研究了再生砖骨料取代率与聚丙烯纤维体积分数对纤维增强再生砖骨料混凝土抗压强度和劈裂抗拉强度的影响得出最佳水灰比与最优体积分数。

综上所述,诸多学者针对不同土体和固化剂进行了大量的试验研究,取得了丰硕的研究成果,但不同地区土体性质差异大,不同固化剂成分及其作用机理也有所差异。因此,针对不同的固化剂和土体,仍需进行深入试验,研究不同因素对疏浚底泥固化效果的影响,以优化固化剂与底泥的合理配比。同时,响应面法作为一种能够以三维响应曲面直观分析单因素与复合因素对目标值影响规律的方法^[10-13],对于验证固化剂使用效果有着极大的优势。基于此,本文通过响应面试验研究了含水率及有机质含量与固化剂掺量对灞河河道疏浚底泥的固化效果,并建立了响应面预测模型,为疏浚底泥资源再生利用提供了试验依据,可为其它条件相同或相似的河湖疏浚底泥固化的工程应用提供参考。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 疏浚底泥

试验所用的疏浚底泥取自灞河河道右岸,呈灰褐色-灰黑色,取样后及时送往实验室对其进行各项指标测定,测定结果见表 1,底泥的粒度分布如图 1 所示。

表 1 疏浚底泥物理性质及有机质含量

含水率 w /%	密度 ρ /($\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$)	液限 w_l /%	塑限 w_p /%	pH	有机质 /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总磷 /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)	总氮 /($\text{mg} \cdot \text{kg}^{-1}$)	全钾 /($\text{g} \cdot \text{kg}^{-1}$)
74.6	1.19	38.9	17.2	8.03	28.1	5.52	<48	18.3

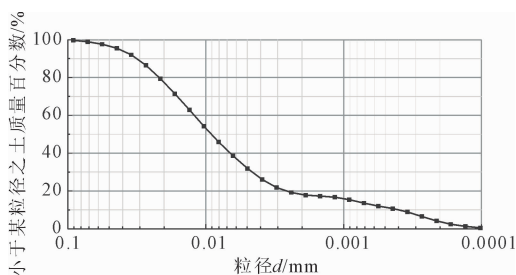


图 1 底泥粒径分布曲线

1.1.2 新型固化剂

固化剂选用长安大学自主研发的新型复合固化剂 CLPSS,该固化剂综合考虑河道疏浚底泥的特征、固化材料价格及废弃资源再利用的理念,最终选用硅酸盐水泥、生石灰、聚丙烯、矿渣及高分子吸水树脂作为固化材料。通过正交试验,并以龄期 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度作为参考,确定出复合固化剂各材料的最优配合比,水泥:生石灰:聚丙烯:矿渣:高分子吸水树脂 = 200: 40: 1: 110: 0.8^[14]。

1.2 试验方法

1.2.1 试样制备

按照中心组合设计给定的试验方案,取定量固化材料、底泥干土与水,采用振动法进行制样,试样制备完成后放入相对湿度大于 90% 的保湿器中,养护至所需龄期后,采用 SLB-6A 型三轴剪切渗透试验仪对试样进行无侧限抗压强度试验。

1.2.2 中心组合设计

根据已有研究^[15]及多次单因素试验结果,选择底泥含水率(A)、有机质含量(B)与固化剂 CLPSS 掺量(C)三个因素,以龄期 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度作为响应值,试验因素与水平如表 2 所示。

表 2 中心组合设计方案与试验结果

因素	水平				
	-1.682	-1	0	1	1.682
A/%	19.77	30.00	45.00	60.00	70.23
B/%	0.95	3.00	6.00	9.00	11.05
C/%	6.48	15.00	27.50	40.00	42.53

2 试验结果与分析

根据设计方案进行试验,结果见表 3。同时,建立基于 Central Composite 响应面的二次非线性模型,并进行方差分析与显著性检验,结果见表 4。

根据统计学的理论, P 值表示原假设出现的概率, F 值越大, P 值越小,即表明模型的显著性越高^[15]。由表 4 可以看出,固化底泥 7 d 和 28 d 的无侧限抗压强度的响应模型 P 值均远小于 0.05,拟合相关系数 R^2 大于 0.9,且变异系数为 17.6% 和 8.77%,均在合理范围内。由此可以看出,回归模型拟合度优良,可以对后续工作进行预测和指导。

表 3 基于 Central Composite 响应面法的设计方案及试验结果

试验序号	A	B	C	无侧限抗压强度/kPa	
				7 d	28 d
1	60.00	9.000	40.000	1176.2	3630.5
2	45.00	6.000	27.500	1572.7	2948.2
3	45.00	6.000	6.475	232.4	308.2
4	30.00	3.000	40.000	1212.3	2722.3
5	45.00	0.954	27.500	1180.1	3164.6
6	30.00	9.000	40.000	599.6	2616.8
7	45.00	6.000	27.500	1462.6	2581.8
8	70.23	6.000	27.500	741.0	1802.3
9	30.00	3.000	15.000	604.8	2372.7
10	45.00	6.000	48.525	1693.0	4429.7
11	60.00	3.000	15.000	393.9	739.4
12	60.00	3.000	40.000	1761.3	4006.6
13	45.00	6.000	27.500	1877.0	2664.6
14	19.77	6.000	27.500	297.4	1688.0
15	45.00	6.000	27.500	1355.4	2496.6
16	60.00	9.000	15.000	407.6	871.6
17	45.00	11.046	27.500	1424.8	2718.6
18	45.00	6.000	27.500	1514.1	2470.1
19	45.00	6.000	27.500	1588.7	2740.2
20	30.00	9.000	15.000	1075.1	294.9

2.1 7 d 无侧限抗压强度分析

以龄期 7 d 的无侧限抗压强度为响应指标,并剔除不显著因子,得到优化后的回归方程为:

$$Y_7 = -2896.45 + 110.80A + 146.79B + 71.58C + 1.34AC - 5.51BC - 1.59A^2 - 1.28C^2 \quad (1)$$

式中: Y_7 为 7 d 无侧限抗压强度, kPa; A 为含水率, %; B 为有机质含量, %; C 为 CLPSS 掺量, %。

表 4 模型可信度检验分析结果

响应目标模型	P 值	F 值	相关系数 R^2	修正后的相关系数 R_{adj}^2	变异系数 CV
7 d 无侧限抗压强度	0.0001	14.50	0.9288	0.9034	17.60
28 d 无侧限抗压强度	<0.0001	43.08	0.9894	0.9664	8.77

为了直观显示底泥含水率、有机质含量与固化剂 CLPSS 掺量三因素之间的关系规律,绘制龄期 7 d 的 3D 响应曲面图,如图 2 所示。

由图 2(a) 可知,CLPSS 掺量取中值(27.5%)时,含水率与有机质含量的交互作用并不显著,龄期 7 d 的无侧限抗压强度随着含水率的增加呈先增大后减小的变化趋势,而 7 d 无侧限抗压强度随有机质含量增加呈现缓慢增加又减小的趋势。由此可以看出,疏浚底泥有机质含量与含水率均对龄期 7 d 的无侧抗压强度具有明显的负面作用。这是由于在该掺量下 CLPSS 的最佳含水率为 45% 左右。当含水率较低时,CLPSS 无法充分反应,而当含水率超过 45% 时,该掺量下的 CLPSS 已经反应完全,无法抵消含水率带来的负面影响。同时,有机质中的富里酸会附着在土颗粒表面,阻碍固化材料与土颗粒间的接触,使得水化产物降低,对抗压强度带来负面影响。

由图 2(b) 可知,保持有机质含量不变条件下,当含水率较高时,龄期 7 d 的无侧限抗压强度随着 CLPSS 掺量的增加呈现出增大趋势,且最终趋于平缓;而当含水率较低时,7 d 无侧限抗压强度随着 CLPSS 掺量的增加呈现出先增后减的变化趋势。这是由于 CLPSS 发挥作用需要一定的水分,当含水率较低时,CLPSS 无法充分反应,因此试样强度随着含水率的增加呈增大趋势。当含水率较高时,CLPSS 能够充分反应发挥最大作用,使试样强度得到充分提高。

由图 2(c) 可知,保持含水率不变的条件下,当 CLPSS 掺量较少时,龄期 7 d 的无侧限抗压强度随有机质含量增加而增大,而当 CLPSS 掺量较高时,随着有机质的增加而减少。这是由于低 CLPSS 掺量下,有机质中的富里酸虽附着在土颗粒表面,阻碍固化材料与土颗粒间的接触,但因其附着量有限,

CLPSS 仍能完全反应,且因有机质的粒径小于黏土颗粒,可以填充在黏土颗粒间,使固化强度增大,因此在低 CLPSS 掺量下 7 d 无侧限抗压强度随有机质含量增加而增大;当 CLPSS 掺量较高时,CLPSS 反应程度在底泥固化中起决定性作用,富里酸阻碍固化材料的接触使得固化材料反应不完全,导致在 CLPSS 掺量较高时随有机质含量增加而底泥固化强度呈减小趋势。

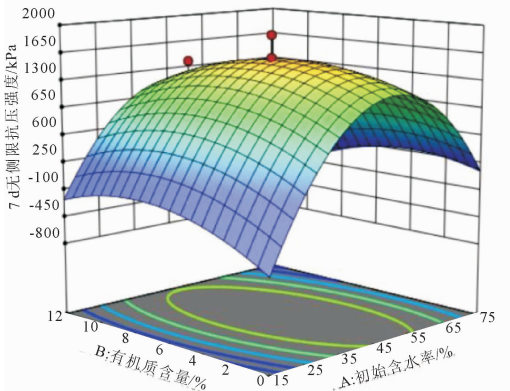
2.2 28 d 无侧限抗压强度分析

以龄期 28 d 的无侧限抗压强度为响应指标,并剔除不显著因子,得到优化后的回归方程为:

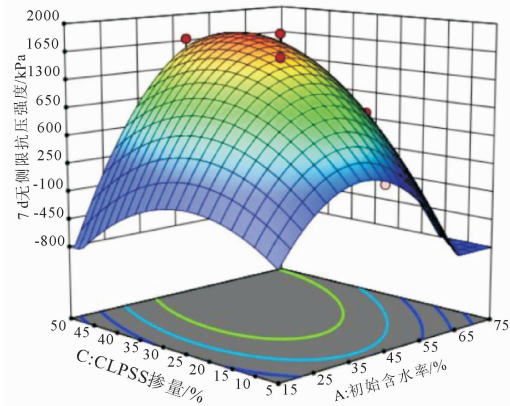
$$Y_{28} = 5495.07 + 32.27A + 1136.33B - 136.76C + 20.55AB + 5.54AC + 29.69BC - 1.62A^2 - 0.92C^2 - 0.55ABC \quad (2)$$

式中: Y_{28} 为 28 d 无侧限抗压强度, kPa。

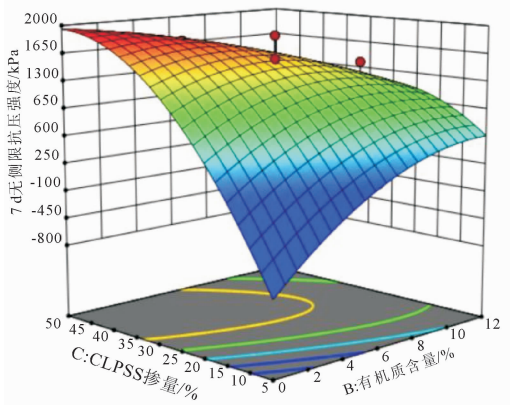
为了直观显示底泥含水率、有机质含量与固化剂 CLPSS 掺量之间的关系,绘制龄期 28 d 的 3D 响应曲面图,如图 3 所示。



(a) 有机质含量和初始含水率

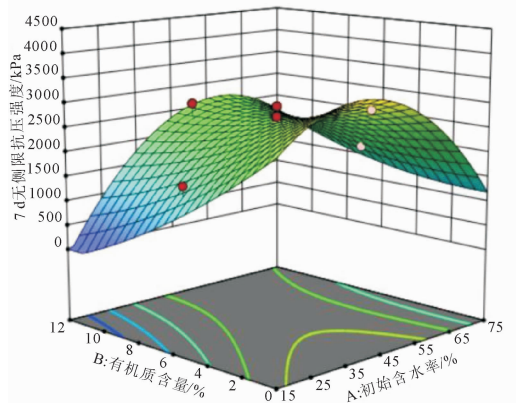


(b) CLPSS掺量和初始含水率

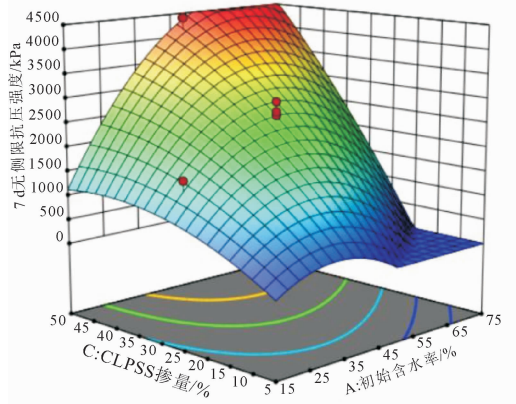


(c) CLPSS掺量和有机质含量

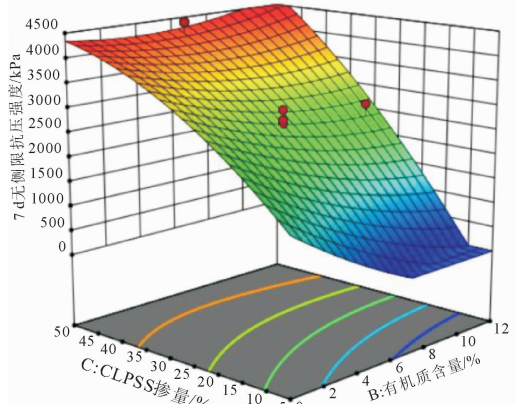
图 2 7 d 无侧限抗压强度响应曲面图



(a) 有机质含量和初始含水率



(b) CLPSS掺量和初始含水率



(c) CLPSS掺量和有机质含量

图 3 28 d 无侧限抗压强度响应曲面图

由图 3(a)可知,CLPSS 掺量不变的条件下,当含水率较高时,龄期 28 d 的无侧限抗压强度基本保持不变,而当含水率较低时,28 d 无侧限抗压强度随有机质含量的增加而减少。与龄期 7 d 对比分析发现,28 d 时两参量呈现强交互关系,即有机质对于固化强度的消极影响更为明显,这可能是由于含水率较高时,因养护时间较长,有机质中的富里酸对复合固化剂 CLPSS 的反应影响有限,此掺量下的 CLPSS 已经充分反应,表现出抗压强度保持不变;当含水率较低时,由于 CLPSS 无法充分反应,抗压强度也保持较低水平。

由图 3(b)可知,有机质含量一定的条件下,当含水率较高时,龄期 28 d 的无侧限抗压强度随着复合固化剂 CLPSS 掺量的增加而增大,最终趋于平缓;而当含水率较低时,28 d 无侧限抗压强度随着 CLPSS 掺量的增加而增大。与龄期 7 d 对比分析可知,底泥固化强度得到了显著的提升且图像变化幅度较小,底泥固化强度随着龄期的延长得到了稳定提高。同时,随着 CLPSS 掺量的增加,高含水率底泥的固化强度逐渐增大。由此可以看出,复合固化剂 CLPSS 可在很大程度上消除含水率对底泥固化带来的不利影响。

由图 3(c)可知,初始含水率一定的条件下,当 CLPSS 掺量较少时,龄期 28 d 的无侧限抗压强度随有机质含量的增加而增大,而 CLPSS 掺量较高时,28 d 无侧限抗压强度随着有机质含量的增加基本保持不变。与龄期 7 d 对比分析发现,两响应曲面图呈现明显的不同,有机质含量在养护前期对固化效果影响并不显著,甚至有利于固化强度,但随着养护时间的增长,有机质对底泥固化的消极影响逐步显现,但是随着 CLPSS 掺量的逐渐增加,有机质的消极影响逐渐减弱,底泥固化强度增大。由此可知,复合固化剂 CLPSS 可以在一定程度上消除有机质对于底泥固化强度的不利影响。

2.3 底泥固化结构微观分析

选取龄期 28 d 的最优固化试样 10#(含水率 45%,有机质含量 6%,CLPSS 掺量 48.5%)与 8% 水泥固化的基准样进行了不同倍数(1 000 倍、3 000 倍和 10 000 倍)的微观结构电镜扫描,分析最优固化试样与基准样的固化效果。室内电镜仪器选用 JEOL JSM17500F 场发射电镜。试样电镜扫描结果如图 4 所示。

图 4(a)一图 4(d)低倍镜(1 000、3 000 倍)下,

基准样(8%水泥)呈多孔隙状,整体结构较为松散,而最优固化试样(10#)孔隙数量相对较少,结构密实。当放大至 10 000 倍(图 4(f))时,可以看到 10# 聚丙烯纤维与水泥和矿渣的水化、水解反应产生的絮状凝胶产物以及板状的 $\text{Ga}(\text{OH})_2$ 晶体错综盘绕,形成了致密的空间网状结构附着在黏土颗粒表面,使得最优固化试样(10#)的稳定性相较于基准样(8%水泥)大大增强。由此可以看出,复合固化剂 CLPSS 相较于纯水泥具有较强的固化能力。

3 结 论

针对灞河河道右岸生态环境综合治理工程实践,验证复合固化剂(CLPS)在不同条件下对疏浚底泥的固化效果,建立了响应面模型并开展了室内试验研究,得出以下结论:

(1) 基于响应面法对复合固化剂 CLPSS 在不同条件下的固化效果进行试验设计,并通过方差分析验证了回归模型的准确性,该模型能够有效解释初始含水率、有机质含量、CLPSS 掺量对固化河道疏浚底泥的无侧限抗压强度的影响规律。

(2) 底泥含水率、有机质含量和复合固化剂 CLPSS 掺量对河道疏浚底泥固化效果均存在显著影响。无侧限抗压强度随着初始含水率的增加先增加后下降;无侧限抗压强度随着 CLPSS 掺量的增大而增大。无侧限抗压强度随着有机质含量的增大逐渐减小,但当养护龄期短且 CLPSS 掺量较少时呈现相反的变化趋势。另外,不同因素影响下龄期 7 d 相较于龄期 28 d 的抗压强度提升幅度较小。

(3) 电镜扫描微观结构分析表明,复合固化剂 CLPSS 固化底泥是聚丙烯纤维与水泥和矿渣的水化、水解反应产生的絮状凝胶产物以及板状的 $\text{Ga}(\text{OH})_2$ 晶体错综盘绕,形成了致密的空间网状结构附着在黏土颗粒表面,使得固化后土体的结构稳定性相较于单一水泥固化底泥的试样强度得以显著提高。

参考文献:

- [1] 黄宗安. 航道疏浚工程淤泥固化处理技术应用研究[J]. 现代工程科技, 2025, 4(13): 109-112.
- [2] 赵杰, 向田一, 王浩. 淤泥固化土动力特性及在直立护岸抗震分析中的应用[J]. 地震工程学报, 2024, 46(5): 1032-1042.
- [3] 骆宫. 淤泥固化填筑路基施工技术在滨海地区的应用[J]. 科技创新与应用, 2025, 15(2): 185-188.

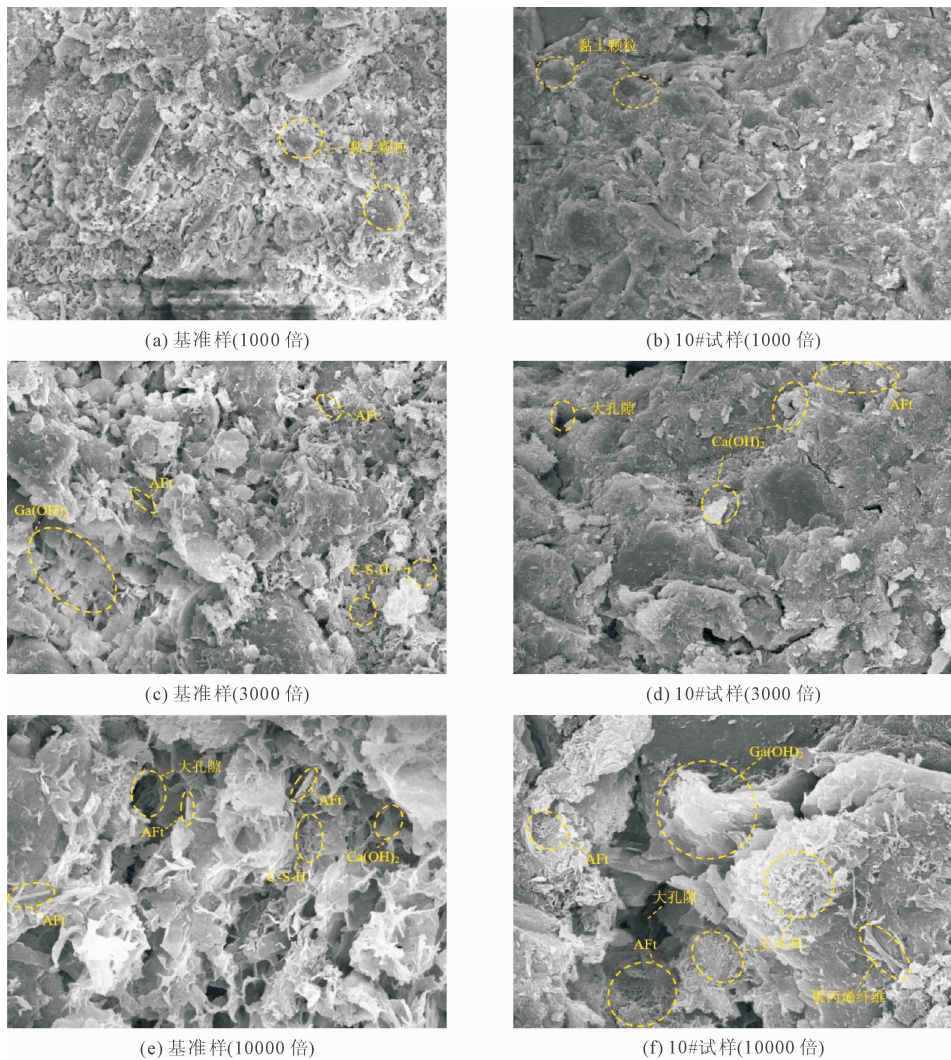


图4 底泥土与试样 10#微观图像

- [4] 姜 赟,侯 爵,陈加富,等. 脱硫灰-水泥固化淤泥强度特性与固化-抽滤联合加固应用[J]. 东南大学学报(自然科学版),2023,53(3):519-525.
- [5] 张有斌,张文琮,李叶枢,等. 基于响应面法的高原红土固化性能试验研究[J]. 材料导报,2023,37(S1):259-264.
- [6] 雷 颖. 河道疏浚底泥固化剂最优配比及强度试验研究[D]. 西安:长安大学,2022.
- [7] 吴章平,邓 海,唐昌意,等. 高含水量淤泥固化土强度增长规律试验研究[J]. 建筑结构,2025,55(11):155-160.
- [8] 付怀合,章明智,毛帅东,等. 工业废渣强化碱渣-水泥联合固化淤泥的试验研究[J]. 岩土工程学报,2025,47(S1):228-232.
- [9] 黄 炜,郭余婷,葛 培,等. 基于响应面法的聚丙烯纤维再生骨料混凝土配合比优化[J]. 中南大学学报(自然科学版),2022,53(7):2709-2718.
- [10] 张伟刚,邱跃琴,郭延庆,等. 基于响应面法的煤矸石胶结充填体抗压强度试验研究[J]. 矿产保护与利用,2022,42(6):36-44.
- [11] 吴伟军,丁北斗,张鲲鹏. 矿渣基凝胶材料固化粉土路基填料的路用性能研究与应用[J]. 硅酸盐通报,2025,44(10):3747-3760.
- [12] 赵洪轩. 多源固废基疏浚淤泥固化土静动特性研究[D]. 青岛:青岛理工大学,2025.
- [13] 高 源,王鹏伟,任冠洲,等. 基于响应面法的废弃动物骨提取物固化风积沙的抗风蚀性能研究[J/OL]. 材料导报,1-15[2025-09-11]. <https://link.cnki.net/urlid/50.1078.TB.2025.0428.2039.012>.
- [14] 马学通,高德彬,雷 颖,等. 高含水率疏浚底泥固化及强度预测模型[J]. 中国农村水利水电,2022(9):101-105.
- [15] 孙 婧,刘宏波,王 宏,等. 基于 Design-expert 的铁尾矿活性粉末混凝土配合比优化试验研究[J]. 硅酸盐通报,2020,39(3):762-769.