

DOI:10.11918/202302052

生物酶联合水泥固化淤泥力学性能及机理

林楚轩¹, 孙宏磊^{1,2}, 翁振奇²

(1. 浙江大学 建筑工程学院, 杭州 310058; 2. 浙江工业大学 土木工程学院, 杭州 310014)

摘要: 为改良淤泥强度, 环保、高效解决疏浚淤泥处理问题, 采用生物酶联合水泥对淤泥进行固化处理。通过无侧限抗压强度试验、直接剪切试验初步分析了生物酶对水泥固化淤泥强度的影响规律, 并通过阳离子交换量试验(CEC)、电动电位试验、扫描电镜测试(SEM)、X射线衍射试验(XRD)和红外光谱试验(FTIR)等手段进一步探究了其协同固化机理。结果表明: 生物酶联合水泥固化处理对淤泥强度有明显提升效果, 其强度最高可提升73.8%, 且生物酶掺量、种类、养护龄期影响其固化效果, 但生物酶不和土体内矿物发生化学反应; 生物酶和水泥的联合固化作用主要通过促进淤泥内阳离子交换作用, 降低土体的电动电位, 提高水泥水化产物的胶凝作用, 促进活性黏土矿物的胶结以及催化包膜结构的形成实现; 各类生物酶中, 路易酶的固化效果最好, 其水泥固化淤泥7 d无侧限抗压强度达378.8 kPa、黏聚力达307 kPa、内摩擦角达52.3°, 相比水泥固化淤泥分别提高73.8%、33.2%和55.2%。

关键词: 生物酶; 水泥土; 淤泥固化; 固化机理; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 0367-6234(2024)07-0046-09

Strength and solidification mechanism of cement solidified sludge improved with biological enzyme

LIN Chuxuan¹, SUN Honglei^{1,2}, WENG Zhenqi²

(1. College of Civil Engineering and Architecture, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China;

2. College of Civil Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: In order to improve the strength of sludge, solve the problem of dredging sludge treatment in an environmentally friendly and efficient manner, biological enzymes combined with cement are used to solidify the sludge. Through the unconfined compressive strength test and direct shear test, the influence of biological enzymes on the strength of cement solidified sludge were preliminarily analyzed. The synergistic solidification mechanism was further explored by means of cation exchange capacity test (CEC), scanning electron microscope test (SEM), X-ray diffraction test (XRD), and infrared spectroscopy (FTIR). The results show that the combination of biological enzymes and cement solidification treatment has a significant improvement effect on the strength of sludge, with a maximum strength increase of 73.8%. Moreover, the amount, type and curing time of biological enzymes influenced its solidification effect, but biological enzymes do not react chemically with minerals in the soil. The combined solidification action of biological enzymes and cement is mainly achieved by promoting cation exchange in the sludge, reducing the electromotive potential of soil, improving the cementation of cement hydration products, promoting the cementation of active clay minerals, and catalytically forming the coating structure. Among all kinds of biological enzymes, Louis enzyme has the best curing effect. The unconfined compressive strength of Louis enzyme cement solidified sludge in 7 days can reach 378.8 kPa, and the cohesion and angle of internal friction can reach 307 kPa and 52.3°, which are increased to 73.8%, 33.2% and 55.2% respectively higher than cement solidified sludge.

Keywords: biological enzyme; cement soil; sludge solidification; curing mechanism; unconfined compressive strength

随着中国城市化进程不断加快, 城市建设中桩基打设、盾构隧道、河道疏浚等工程产生的废弃淤泥

量明显增加。据统计, 中国每年仅珠三角地区淤泥产量就达到5 000万 m³, 而全国淤泥产量更是达10亿 m³

收稿日期: 2023-02-23; 录用日期: 2023-04-12; 网络首发日期: 2024-06-05

网络首发地址: <https://link.cnki.net/urlid/23.1235.T.20240605.1107.002>

基金项目: 国家自然科学基金(52078464)

作者简介: 林楚轩(1998—), 男, 硕士研究生; 孙宏磊(1981—), 男, 教授, 博士生导师

通信作者: 孙宏磊, sunhonglei@zju.edu.cn

以上,若将如此大量的淤泥倾倒入水体或抛填于堆场会带来严重的资源浪费和环境污染问题^[1]。因此,需采取行之有效的措施对其进行处理^[2]。目前,固化法是处置废弃淤泥的主要方法^[3],通过在淤泥中添加胶凝类固化材料,使淤泥强度得到改良并转化为良好的填土材料^[2-3]。目前常用的固化材料以水泥、粉煤灰、石灰等无机材料为主^[4-9],但传统无机固化材料在处理淤泥时所需掺量较大,浪费资源的同时极易造成环境污染^[10-11]。因此,近年来许多学者开始研发新型固化剂,以满足国家对“双碳”目标的要求^[12]。

生物酶固化剂是由植物细胞产生或由微生物发酵并提炼的天然、无毒、无污染的多肽氨基酸产品^[10],由于其高效环保的特点近年来常被用于软土固化。研究^[11-17]表明,生物酶能改良天然土体的工程性质并可提高水泥、石灰等传统无机固化剂的固化效果。文献[16]将泰然酶和 1% 掺量(质量分数)下的硅酸盐水泥混合后加固黏土,通过无侧限抗压强度试验、循环三轴试验探究了泰然酶对低掺量水泥固化土的固化效果及加固机理,其试验表明泰然酶对水泥水化起促进作用。文献[17]将泰然酶、石灰和 5 种不同类型黏土混合,通过无侧限抗压强度试验、加州承载比试验探究了泰然酶在石灰加固土中的固化作用,试验结果表明泰然酶能促进火

山灰反应并提高石灰加固土的 USC 和 CBR 值。目前针对生物酶联合无机固化材料应用于淤泥固化的研究,大部分集中在固化淤泥的物理力学性能研究方面,对于生物酶和无机固化材料的联合固化机制研究较少,对于生物酶联合无机固化材料在淤泥固化过程中淤泥土体结构、矿物组成、电化学性质的认知尚不清晰。因此,有必要对生物酶联合无机固化材料的固化效果和固化机制进行研究,为生物酶的淤泥固化应用提供理论支持。

基于以上研究背景,本文选取 4 种生物酶制剂联合硅酸盐水泥对淤泥进行固化。通过无侧限抗压强度试验和直剪试验,研究了生物酶掺量、养护时间对水泥固化淤泥强度的影响。通过阳离子交换量试验(CEC)、电动电位测试、扫描电镜试验(SEM)、X 射线衍射测试(XRD)以及红外光谱试验(FTIR),从微观角度揭示了生物酶联合水泥固化淤泥时的固化机制,为废弃淤泥的环保高效处理提供了新的思路。

1 试 验

1.1 试验材料

试验所用淤泥取自杭州市钱塘区某地铁隧道施工现场,其基本物理指标见表 1,化学组成见表 2。根据卡萨格兰德塑性图可知试验样本属于低液限有机粉土。

表 1 淤泥基本物理性质
Tab. 1 Basic physical property of sludge

天然含水量 $w/\%$	液限 $w_L/\%$	塑限 $w_p/\%$	塑性指数 I_p	不同粒径质量分数/%				有机质 $P_c/\%$	相对密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	pH
				<0.002 mm	0.002 ~ <0.075 mm	0.075 ~ <0.425 mm	0.425 ~ 2 mm			
87.3	26.6	18.2	8.4	5.5	55.4	29.4	9.7	8.64	2.07	6.3

表 2 淤泥及水泥材料的化学组成
Tab. 2 Main components of test materials

试验材料	不同化学组成的质量分数/%							
	SiO ₂	Al ₂ O ₃	CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	K ₂ O	Na ₂ O	SO ₃
淤泥	59.36	14.73	12.39	6.16	1.35	3.50	0.83	1.68
普通硅酸盐水泥	19.99	5.39	66.57	3.26	1.21	0.37	0.33	2.88

试验所采用的水泥基固化剂为普通硅酸盐水泥,其化学组成(以氧化物形式表征)为 SiO₂、Al₂O₃、CaO、Fe₂O₃、MgO、Na₂O、K₂O、SO₃,具体质量分数见表 2。试验用生物酶固化剂包括 Alkazyme

(碱性酶)、Earthzyme(路易酶)、Terrazyme(泰然酶)及 Permazyme(帕尔玛酶),如图 1 所示,其基本指标见表 3。



图 1 试验所用生物酶制剂

Fig. 1 Biological enzyme preparation used in the test

表 3 生物酶制剂基本性质指标

Tab. 3 Basic property index of biological enzyme preparation

制剂名称	密度 $\rho/(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	pH	主要成分
碱性酶	1.12	7~9	嗜碱细菌提取物、纤维素酶、蛋白酶
路易酶	1.10	3~6	植物多糖发酵提取物、氯化钾、硫酸镁、乳酸、非离子表面活性剂
泰然酶	1.05	3~6	$\text{C}_{12} \sim \text{C}_{16}$ 乙氧基化醇、甜菜发酵提取物
帕尔玛酶	1.05	4~7	蔬菜发酵提取物、氯化钾

1.2 试验方案

研究^[18-19]表明,生物酶固化剂存在最佳掺量,根据前期无侧限抗压强度试验结果,试验采用的生物酶掺量分别设置为 0.05%、0.10%、0.15%、0.20%、0.25%、0.30%、0.35%、0.40%、0.50%、0.70%、0.90%、1.10%、1.30%、1.50%;养护时间分别设置为 1 d、3 d、7 d、14 d、21 d、28 d、40 d、50 d;采用的固化剂分别为 10% (质量分数) 水泥、碱性酶 + 10% 水泥、路易酶 + 10% 水泥、泰然酶 + 10% 水泥、帕尔玛酶 + 10% 水泥,组号分别为 S-C 组、S-CA 组、S-CE 组、S-CT 组、S-CP 组。其中,生物酶掺量和水泥掺量均为质量分数。

1.3 试验方法

首先去除淤泥内肉眼可见杂质,取样测定初始含水率后置于 50 ℃ 恒温环境烘干。将淤泥土粉碎并加入 10% 水泥搅拌形成干混合物。按初始含水量与试验配比方案称量去离子水和生物酶制剂并混合搅拌形成生物酶溶液。将生物酶溶液分 3 次加入干混合物中并机械搅拌 10 min 得到不同配比淤泥。

1) 力学性能试验。采用静压法^[20]以 1.8 g/cm³ 密度分别制备 $\phi 39.1 \text{ mm} \times 80 \text{ mm}$ 重塑筒试样和 $\phi 61.8 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 环刀试样。试样真空饱和 24 h 后脱模并用塑料薄膜包裹置于标准养护箱 (温度 20 ℃ $\pm$ 2 ℃,湿度 95%) 内养护。分别采用 DW-1 电动应变式无侧限压力仪和全自动直接剪切仪测定试样无侧限抗压强度和抗剪强度指标。

2) 电化学试验。取 10 g 试样与 100 mL 去离子水混合后以转速 4 000 r/min 离心 5 min。测定试样上层清液电导率后取沉淀淤泥。反复上述操作直至

上层清液电导率小于 30 $\mu\text{S}/\text{m}$ 。将所得沉淀淤泥置于 50 ℃ 恒温环境烘干后研磨过 0.15 mm 筛。采用马尔文电位与纳米粒度仪 (NANO ZS90) 测定沉淀淤泥中黏土颗粒电动电位。采用 BaCl₂ 缓冲法进行 CEC 测试,并采用岛津原子吸收分光光度计 (AA-7000) 以原子吸收法测定试样内可交换阳离子成分及含量。

3) 微观结构观测。从试样中切取 10 mm $\times$ 10 mm $\times$ 8 mm 的方形试块。将样品冷冻后于真空冷冻干燥机内干燥 48 h。取未受切割扰动断面喷金后用场发射环境电镜 (FEI QUANTA FEG 650) 观测。

4) 物相成分分析。取 5 g 试样置于 50 ℃ 恒温环境烘干 12 h,烘干后将其研磨成粉并过 0.15 mm 筛。采用布鲁克 X 射线衍射仪 (D8 ADVANCE) 测定粉末晶体不同衍射角下衍射强度并确定其矿物成分。将 1 mg 土样与 200 mg KBr 置于玛瑙乳钵中,混合研磨均匀后用压模装置制成透明片样,采用 Thermo Scientific iCE 3500 原子吸收光谱仪测定试样的 FTIR 图。

2 试验结果与分析

2.1 无侧限抗压强度试验

图 2(a) 所示为 7 d 养护龄期下生物酶联合水泥固化淤泥无侧限抗压强度随生物酶掺量的变化关系。相较于 S-C 组,生物酶处理后固化淤泥无侧限抗压强度明显提升,且其强度随生物酶掺量增加均呈现先增大后减小趋势。以 S-CA 组为例,当碱性酶掺量为 0.35% 时固化淤泥强度达峰值 334.1 kPa。

随着生物酶掺量的进一步提高, 固化淤泥强度逐渐下降。其原因是过量的生物酶会导致土体黏聚力和内摩擦角有不同程度的下降, 进而导致土体强度劣化^[21-22]。相较于 10% 水泥固化淤泥, 碱性酶、路易酶、泰然酶、帕尔玛酶无侧限抗压强度最优固化掺量分别为 0.35%、0.10%、1.30% 和 0.08%, 对应无侧限抗压强度峰值分别为 334.1、378.8、338.9、325.2 kPa, 相较于 S-C 组分别提升了 53.3%、73.8%、55.5% 和 49.2%。

图 2(b) 为最佳掺量下生物酶联合水泥固化淤泥无侧限抗压强度随养护龄期的变化关系曲线。生物酶联合水泥固化淤泥强度均随养护龄期增长有明显提高, 且早期强度增长幅度明显大于水泥固化淤

泥。以 S-CA 组为例, 其无侧限抗压强度 3 d 龄期相较于 1 d 龄期提高了 208.8%, 而 S-C 组仅提升了 135.8%。随养护龄期增加, 各组固化淤泥强度趋于稳定。当养护时间达 28 d 时, S-CE 组、S-CT 组、S-CP 组强度基本稳定, 分别为 550、501、512 kPa。而 S-C 组、S-CA 组强度在 28 d 后仍有提升, 在养护龄期 40 d 时稳定, 分别为 362 kPa 和 490 kPa。

对比国内外相关研究结果, 采用生物酶联合水泥固化淤泥, 其固化效果相较于使用单一固化剂有明显提升^[16-22]。但不同种类生物酶联合水泥固化效果有明显差异。其中, 采用路易酶联合水泥对淤泥进行固化处理时固化效果最为明显。

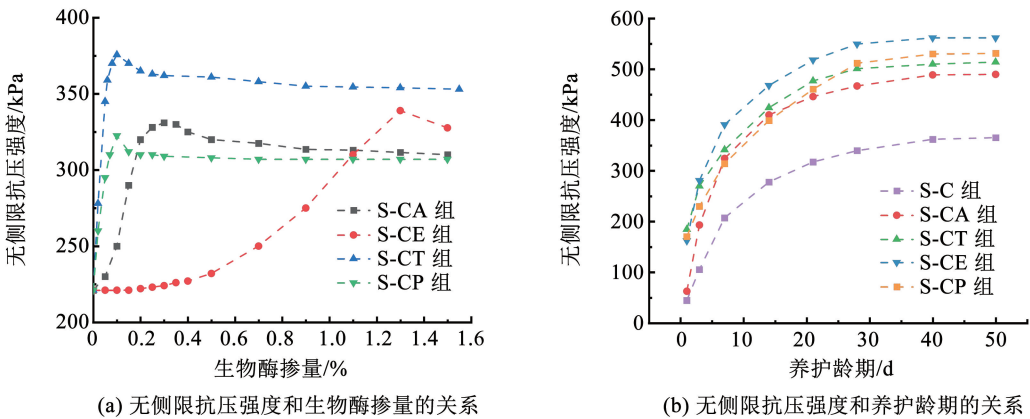


图 2 不同生物酶掺量和养护龄期下固化淤泥无侧限抗压强度变化

Fig. 2 Changes in unconfined compressive strength of solidified sludge under different levels of enzyme and curing age

2.2 直剪试验

表 4 所示为最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土样的抗剪强度指标。相较于 S-C 组, 生物酶处理后的固化淤泥抗剪强度指标均有不同程度提高。其中, S-CA 组、S-CP 组黏聚力增长较为明显, 而 S-CE 组、S-CT 组内摩擦角增长较为明显。试验结果表明碱性酶能显著提升土体黏聚力; 泰然酶、帕尔玛酶能显著提升土体内摩擦角; 路易酶可同时提升土体内摩擦角和黏聚力。

表 4 最佳掺量下养护龄期 7 d 固化淤泥抗剪强度指标
Tab. 4 The shear strength index of solidified sludge with a curing period of 7 days under the optimal dosage

组别	黏聚力/ kPa	内摩擦角/ (°)	黏聚力 增长率/%	内摩擦角 增长率/%
S-C	230.5	33.5	—	—
S-CA	323.5	37.2	40.35	11.04
S-CE	307.0	52.0	33.19	55.22
S-CT	271.0	52.8	17.57	57.61
S-CP	282.0	54.3	22.34	62.09

2.3 电化学分析

2.3.1 电动电位分析

电动电位和淤泥黏土颗粒的絮凝情况密切相关, 电动电位值反映黏土颗粒双电层厚度, 其和黏土颗粒表面吸附的阳离子有关, 阳离子化合价越低, 离子半径越小, 扩散层越厚, 电动电位越高^[21-22]。表 5 给出了最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土样电动电位测试结果。经生物酶联合水泥固化处理后淤泥电动电位均有一定程度降低, 相较于 S-C 组, S-CA 组、S-CE 组、S-CT 组、S-CP 组土样电动电位分别下降了 1.29、4.27、3.34、3.81 mV, 其中路易酶处理后固化淤泥的电动电位值下降最明显。

表 5 最佳掺量下养护龄期 7 d 固化淤泥电动电位
Tab. 5 Electric potential of solidified sludge after 7 days of curing at the optimal dosage

组别	电动电位/mV	
	1#	2#
S-C	20.66	20.87
S-CA	19.33	19.63
S-CE	16.19	16.80
S-CT	17.58	17.27
S-CP	16.69	17.23

2.3.2 阳离子交换量试验

阳离子交换量(CEC)衡量了土体离子交换的能力,CEC 值越高,表明土颗粒可交换阳离子量越大,土体的亲水性越强^[21-22]。表 6 所示为最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土样阳离子交换量试验结果。经生物酶联合水泥固化处理后土体内可交换的

阳离子量显著减少,相较于 S-C 组,S-CA 组、S-CE 组、S-CT 组、S-CP 组可交换阳离子量分别减少 37.3%、92.3%、85.1% 和 85.6%。试验结果表明,生物酶联合水泥固化处理能促进了淤泥内的阳离子交换作用,降低了土体的电动电位,压缩了土颗粒双电层厚度。

表 6 最佳掺量下养护龄期 7 d 固化淤泥可交换阳离子质量摩尔浓度

Tab.6 The content of exchangeable cations in solidified sludge with a curing period of 7 days at the optimal dosage

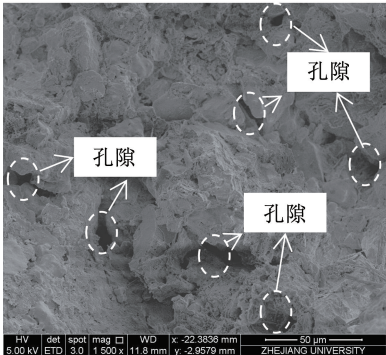
组别	CEC/(mmol·kg ⁻¹)	可交换阳离子质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)				可交换阳离子总质量摩尔浓度/(mmol·kg ⁻¹)
		K ⁺	Na ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	
S-C	139.1	10.2	13.5	67.4	22.4	113.5
S-CA	99.1	5.8	7.4	43.7	14.3	71.2
S-CE	15.8	1.4	0.5	4.5	2.3	8.7
S-CT	25.6	3.7	1.5	8.4	3.3	16.9
S-CP	26.3	3.3	1.3	7.6	4.2	16.4

2.4 微观结构观测和物相成分分析

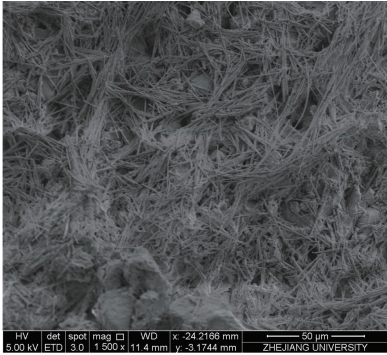
2.4.1 扫描电镜测试

图 3 所示为最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土样扫描电镜试验结果。如图 3(a)所示,水泥固化淤泥试样颗粒间多以边-面形式接触,局部可见面-面堆积,存在较多孔隙,在视域内未见到明显的短棒状或纤维状水泥水化产物。而相较于 S-C

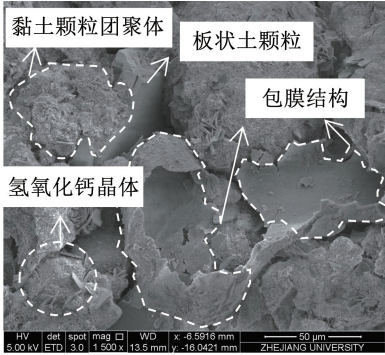
组,在相同放大倍数下生物酶联合水泥固化淤泥内能明显观察到大量的纤维状水化硅酸钙(S-C-H)凝胶或氢氧化钙晶体等水泥水化产物。这表明生物酶能一定程度上促进淤泥内水泥的水化。在碱性酶-水泥固化淤泥内可明显观察到大量水化硅酸钙凝胶(图 3(b)),其覆盖于土体结构表面并相互胶结,减少了孔隙数量,显著提高了淤泥结构的密实度。而



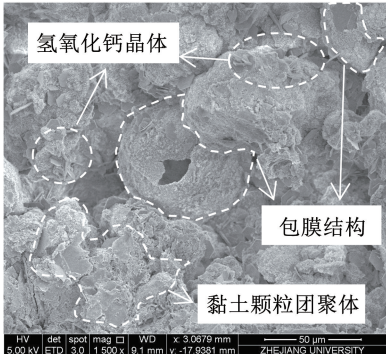
(a) S-C组



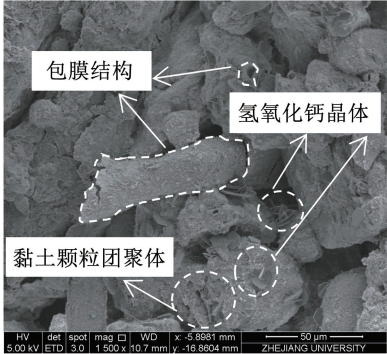
(b) S-CA组



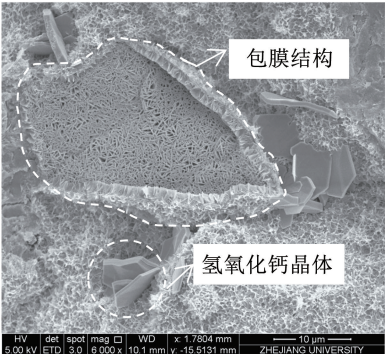
(c) S-CE组



(d) S-CT组



(e) S-CP组



(f) 包膜结构

图 3 最佳掺量下养护龄期 7 d 固化淤泥扫描电镜

Fig.3 Scanning electron microscopy of solidified sludge at the optimal dosage and curing time of 7 days

在泰然酶、路易酶和帕尔玛酶联合水泥处理后的土颗粒表面可明显观察到氢氧化钙晶体及破裂的包膜结构,如图 3(c)、3(d)、3(e)所示。图 4 为包膜结构电镜扫描图及 EDS 谱图,试验结果表明包膜结构主要元素为 Si、Ca、O,同时含有微量的 C,其 Ca/Si 约为 1.57,接近水泥水化产物 C-S-H 凝胶中的 Ca/Si(1.5~1.8)^[23],由此判断包膜结构由 C-S-H 凝胶组成。由图 4 和图 3(f)可以发现包膜结构表面生长有波浪形和絮凝状水泥水化物并镶嵌氢氧化钙晶体,由于膜结构表面的水化物具有较高的强度,因此当土体结构遭受破坏时膜结构能与土体结构紧密结合,提供一定抗压强度^[24]。此外,在泰然酶、路

易酶和帕尔玛酶固化淤泥中还可观察到大块黏土颗粒团聚体,其由片状黏土矿物黏结形成(图 3(f))并与土颗粒(图 3(c))、包膜及土体结构(图 3(d)、3(e))相互胶结,一定程度上提高了固化淤泥的密实度和力学性能。

2.4.2 X 射线衍射试验

图 5 为最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土 X 射线衍射曲线及矿物成分含量。从 XRD 谱图中可以看出,水泥固化淤泥的矿物成分主要为 SiO₂、Al₂O₃、CaCO₃、Fe₂O₃、K₂O、MgO、TiO₂、Na₂O 等。对比 S-C 组,生物酶联合水泥固化淤泥中矿物成分无明显变化。

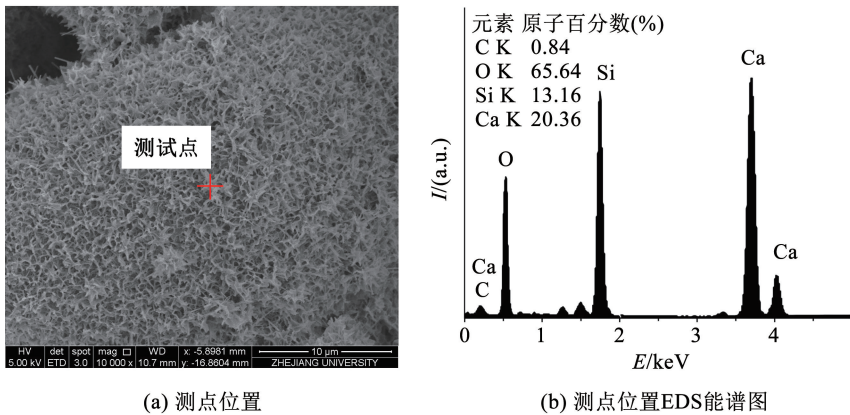


图 4 包膜结构 EDS 测试能谱
Fig. 4 EDS test energy spectrum of coating structure

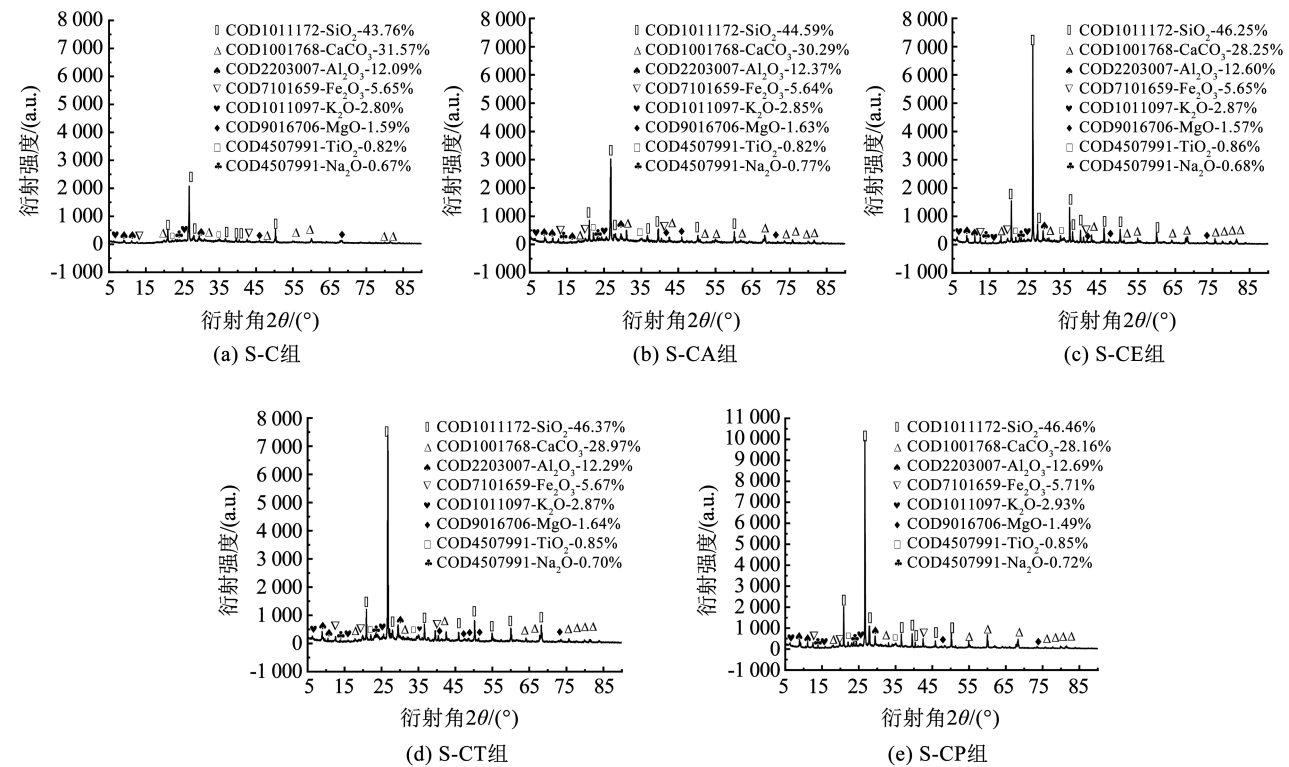


图 5 最佳掺量下养护龄期 7d 固化淤泥 XRD 衍射谱图

Fig. 5 XRD diffraction pattern of solidified sludge at the optimal dosage after curing for 7 days

2.4.3 傅里叶变换红外光谱 (FTIR) 试验

图 6 所示为最佳掺量下养护龄期为 7 d 的各组试验土红外光谱图。经生物酶处理后,试样红外光谱整体变化不明显,谱图中的主要吸收峰仍然存在,

其中在中低频区: $1\,031\text{ cm}^{-1}$ (Si—O—Si), 520 cm^{-1} (Al—O—Si), 796 cm^{-1} (Al—O—H) 等主要结构基团的振动吸收峰变化不大,说明土体内物质成分未发生明显改变。

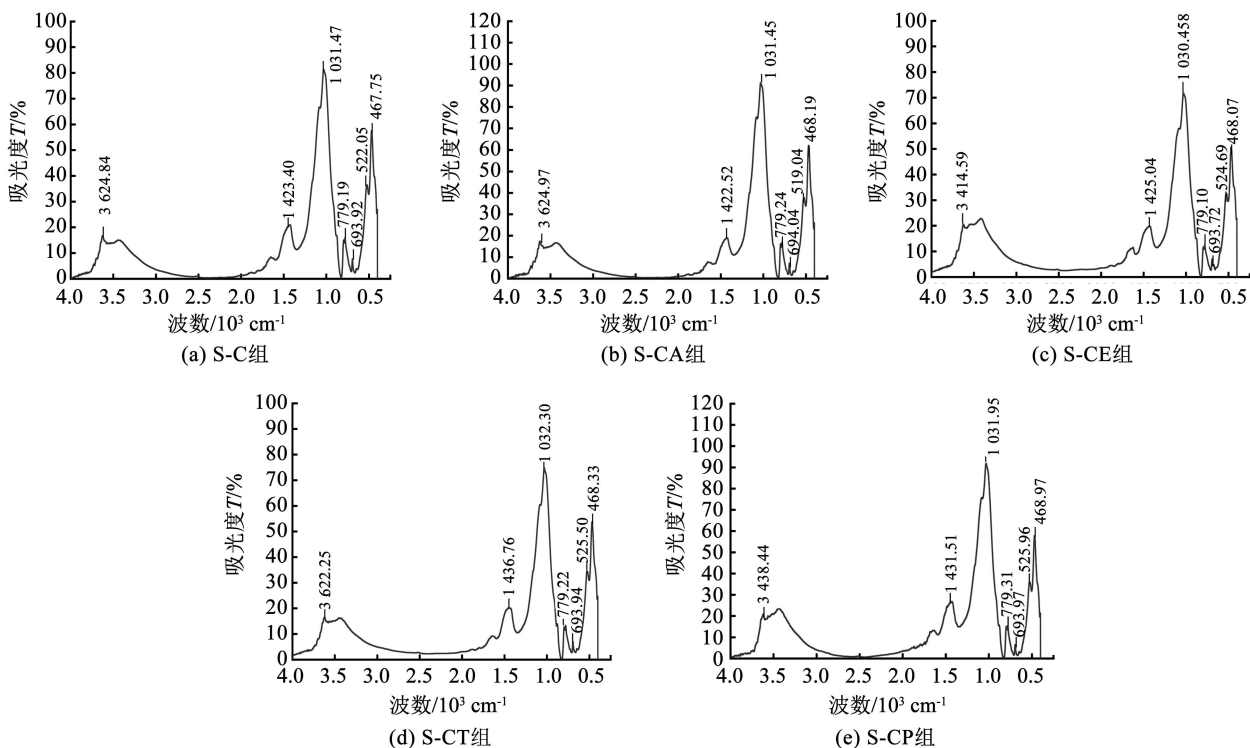


图 6 最佳掺量下养护龄期 7 d 固化淤泥傅里叶变换红外光谱

Fig. 6 Fourier transform infrared spectroscopy of solidified sludge at the optimal dosage and curing time of 7 days

3 生物酶联合水泥固化机制分析

结合电化学试验可知,采用生物酶联合水泥固化淤泥时,淤泥内高价阳离子会置换出土颗粒表面吸附的低价金属阳离子,从而压缩土颗粒双电层厚度,降低黏土颗粒的亲水性,促进黏土颗粒的聚集。研究表明,生物酶能吸附活性较强的黏土矿物并使其发生连接从而胶结土颗粒^[10,25-27],其反应过程如图 7 所示。同时,生物酶还能促进水泥的水化作用。研究表明,淤泥内有机质会影响水泥水化产物和土颗粒间的胶结,而生物酶加入后通过水解有机物或吸附有机大分子的形式减少有机质的影响^[13,27]。结合微观结构试验可知,在水泥水化过程中,水化产物逐渐在黏土颗粒表面聚集,并最终在生物酶的催化作用下形成包膜结构。包膜结构增加了土颗粒和水泥水化产物间的胶结面积并提高了黏土颗粒间的摩擦,使土颗粒难以滑动,从而能有效抑制破坏面的

扩展,提高固化淤泥强度和力学性能^[28]。结合物相成分分析试验可知,经生物酶联合水泥固化处理后土体内并没有形成新的矿物及官能基团,即生物酶与土体矿物没有发生化学反应。

研究表明,不同种类生物酶固化剂其固化机理存在相应差异,碱性酶联合水泥应用于淤泥固化时,其主要通过水解有机物促进水泥水化,以水化产物胶凝土体实现土体固化,其固化淤泥黏聚力提升明显,力学性能与水泥固化淤泥相似^[22,29-31];而帕尔玛酶、泰然酶、路易酶则主要通过促进土体内阳离子交换反应、催化黏土颗粒聚集和连接、促使水泥水化产物对土体结构的胶凝及土颗粒表面包膜结构的形成实现土体固化,其作用机制与无机类固化剂相比更为复杂,其固化淤泥内摩擦角提升明显,力学性能显著优于水泥固化淤泥,且微观结构可观察到明显的包膜结构和黏土颗粒团聚体。

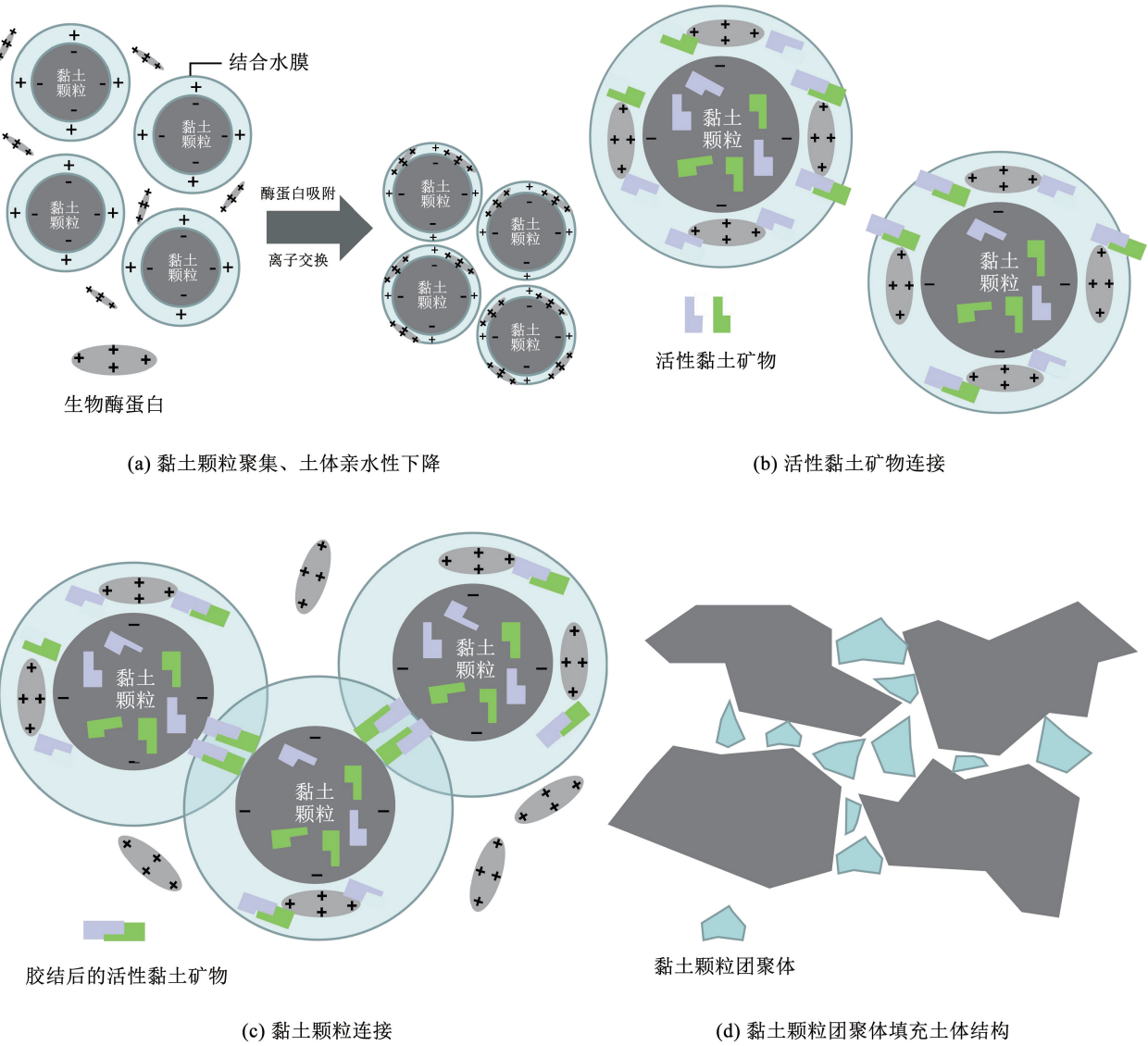


图 7 生物酶联合水泥固化处理对淤泥的微观作用

Fig. 7 Micro effect of biological enzyme combined with cement solidification treatment on sludge

4 结 论

1) 经生物酶联合水泥固化处理后后, 固化淤泥力学性能改良效果明显, 所需养护时间更短。其中, 路易酶固化效果最好, 最优掺量下 7 d 无侧限抗压强度达 378.8 kPa, 强度提升了 73.8%, 黏聚力和内摩擦角分别达 307 kPa 和 52.3°。

2) 经生物酶联合水泥固化处理后, 淤泥内可交换阳离子量减少, 土颗粒电动电位下降, 表明生物酶联合水泥固化处理能促进土体内阳离子交换反应, 压缩土颗粒双电层厚度; 同时淤泥内没有形成新的矿物成分及官能集团, 表明生物酶不参与土体内化学反应。

3) 生物酶水泥联合固化机制包括: 离子交换反应造成的黏土颗粒聚集和土体亲水性的下降、生物酶对黏土颗粒的胶结、水泥水化产物对土体结构的

胶凝及生物酶催化下土颗粒表面包膜结构的形成。

参考文献

[1] 朱伟, 闵凡路, 吕一彦, 等. “泥科学与应用技术”的提出及研究进展[J]. 岩土力学, 2013, 34(11): 3041
ZHU Wei, MIN Fanlu, LÜ Yiyang, et al. Subject of "mud science and application technology" and its research progress[J]. Rock and Soil Mechanics, 2013, 34(11): 3041

[2] 朱伟, 张春雷, 刘汉龙, 等. 疏浚泥处理再生资源技术的现状[J]. 环境科学与技术, 2002, 25(4): 39
ZHU Wei, ZHANG Chunlei, LIU Hanlong, et al. The status quo of dredged spoils utilization[J]. Environmental Science and Technology, 2002, 25(4): 39

[3] BANOUNE B, MELBOUCI B, ROSQUOËT F, et al. Treatment of river sediments by hydraulic binders for valorization in road construction[J]. Bulletin of Engineering Geology & the Environment, 2016, 75(4): 1

[4] 刘松玉, 詹良通, 胡黎明, 等. 环境岩土工程研究进展[J]. 土木工程学报, 2016, 49(3): 6
LIU Songyu, ZHAN Liangtong, HU Liming, et al. Environmental

- geotechnics: state-of-the-art of theory, testing and application to practice[J]. China Civil Engineering Journal, 2016, 49(3): 6
- [5] 姬凤玲, 朱伟, 张春雷. 疏浚淤泥的土工材料化处理技术的试验与探讨[J]. 岩土力学, 2004, 25(12): 1999
- Ji Fengling, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Study of treatment technology of dredging sludge with geosyntheticizing method[J]. Rock and Soil Mechanics, 2004, 25(12): 1999
- [6] 丁建文, 张帅, 洪振舜, 等. 水泥-磷石膏双掺固化处理高含水率疏浚淤泥试验研究[J]. 岩土力学, 2010, 31(9): 2817
- DING Jianwen, ZHANG Shuai, HONG Zhenshun, et al. Experimental study of solidification of dredged clays with high water content by adding cement and phosphogypsum synchronously[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2817
- [7] 谈云志, 柯睿, 陈君廉, 等. 偏高岭土增强石灰-水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1146
- TAN Yunzhi, KE Rui, CHEN Junlian, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1146
- [8] 曹玉鹏, 卞夏, 邓永锋. 高含水率疏浚淤泥新型复合固化材料试验研究[J]. 岩土力学, 2011, 32(增刊1): 321
- CAO Yupeng, BIAN Xia, DENG Yongfeng. Solidification of dredged sludge with high water content by new composite additive[J]. Rock and Soil Mechanics, 2011, 32(Sup.1): 321
- [9] 范昭平, 朱伟, 张春雷. 有机质含量对淤泥固化效果影响的试验研究[J]. 岩土力学, 2005, 26(8): 1327
- FAN Zhaoping, ZHU Wei, ZHANG Chunlei. Experimental study on influence of organic matter content on solidified dredging[J]. Rock and Soil Mechanics, 2005, 26(8): 1327
- [10] 戴北冰, 徐锴, 杨峻, 等. 基于生物酶的固土技术在香港的应用研究[J]. 岩土力学, 2014, 35(6): 1735
- DAI Beibing, XU Kai, YANG Jun, et al. An investigation into application of bio-enzyme-based soil stabilization technology to Hong Kong[J]. Rock and Soil Mechanics, 2014, 35(6): 1735
- [11] VELASQUEZ R, MARASTEANU M O, HOZALSKI R. Preliminary laboratory investigation of enzyme solutions as a soil stabilizer[D]. Minneapolis: University of Minnesota, 2005
- [12] NAAGESH S, GANGADHARA S. Swelling properties of bio-enzyme treated expansive soil[J]. International Journal of Engineering Studies, 2010, 2(2): 155
- [13] RAVI S A U, KUMAR R H, RAMESHA M I. Bio-enzyme stabilized lateritic soil as a highway material[J]. Journal of the Indian Roads Congress, 2009, 5(4): 143
- [14] KUSHWAHA S S, KISHAN D, CHAUHAN M S, et al. Stabilization of red mud using eko soil enzyme for highway embankment[J]. Materials Today: Proceedings, 2018, 9(5): 20500
- [15] THIDA A N, SWE T M. Experimental research on the strength behavior of enzyme-treated soils[J]. International Journal of Science, Engineering and Technology Research, 2014, 11(1): 1322
- [16] THOMAS A G, RANGASWAMY B K. Strength behavior of enzymatic cement treated clay[J]. International Journal of Geotechnical Engineering, 2019
- [17] EUJINE G N, SANKAR N C. Accelerated subgrade stabilization using enzymatic lime technique[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2017, 29(9): 04017085
- [18] 何振华. 生物酶改良淤泥的物理力学特性及工程应用[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2020
- HE Zhenhua. Physical and mechanical properties and engineering application of biological enzyme to improve sludge[D]. Changsha: Central South University of Forestry and Technology, 2020
- [19] 文畅平, 任皖遐. 基于 Lade 模型的生物酶改良膨胀土双屈服面本构关系[J]. 吉林大学学报(工学版), 2021, 51(5): 1716
- WEN Changping, REN Wanxia. Constitutive relation with double yield surfaces of bioenzyme-treated expansive soil based on Lade model[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition), 2021, 51(5): 1716
- [20] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 水泥土配合比设计规程: JGJ T233—2011[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the people's Republic of China. Specification for mix proportion design of cement soil: JGJ T233—2011[S]. Beijing: China Construction Industry Press, 2007
- [21] 李学垣. 土壤化学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- LI Xueyuan. Soil chemistry[M]. Beijing: Higher Education Press, 2001
- [22] 刘清秉, 项伟. 离子土壤固化剂改性膨胀土的试验研究[J]. 岩土力学, 2009, 30(8): 2286
- LIU Qingbing, XIANG Wei. Experimental study of ionic soil stabilizer-improves expansive soil[J]. Rock and Soil Mechanics, 2009, 30(8): 2286
- [23] 董祥. 纤维增强高性能轻骨料混凝土物理力学性能、抗冻性及微观结构研究[D]. 南京: 东南大学, 2005
- DONG Xiang. Study on physical and mechanical properties, frost resistance and microstructure of fiber reinforced high performance lightweight aggregate concrete[D]. Nanjing: Southeast University, 2005
- [24] 陈瑞敏, 简文彬, 张小芳, 等. CSFG-FR 协同作用改良淤泥固化土性能试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(4)
- CHEN Ruimin, JIAN Wenbin, ZHANG Xiaofang, et al. Experimental study on performance of sludge stabilized by CSFG-FR synergy[J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(4)
- [25] 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
- WANG Zhenhua, XIANG Wei, WU Xueting, et al. Influences of alkaline oxidant on strength of cement-stabilized sludge[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2019, 41(4): 693
- [26] POONI J, ROBERT D, GUNASEKARA C, et al. Mechanism of enzyme stabilization for expansive soils using mechanical and microstructural investigation[J]. International Journal of Geomechanics, 2022, 21(10): 04021191
- [27] RINTU R, ROBERT D J, LAN J, et al. Optimization of enzyme-based soil stabilization[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(5): 04020091
- [28] KHAN A T, TAHA M R, FIROOZI A A, et al. Strength tests of enzyme-treated illite and black soil mixtures[J]. Engineering Sustainability, 2016, 169(5): 214
- [29] 王培铭, 赵国荣, 张国防. 聚合物水泥混凝土的微观结构的研究进展[J]. 硅酸盐学报, 2014, 42(5): 653
- WANG Peiming, ZHAO Guorong, ZHANG Guofang. Research progress on microstructure of polymer cement concrete[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2014, 42(5): 653
- [30] 曹智国, 章定文. 水泥土无侧限抗压强度表征参数研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2015, 34(增刊1): 3446
- CAO Zhiguo, ZHANG Dingwen. Key parameters controlling unconfined compressive strength of soil-cement mixtures[J]. Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2015, 34(Sup.1): 3446
- [31] 汤怡新, 刘汉龙, 朱伟. 水泥固化土工程特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2000, 22(5): 549
- TANG Yixin, LIU Hanlong, ZHU Wei. Study on engineering properties of cement-stabilized soil[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2000, 22(5): 549