

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.071



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



生物矿化技术加固锁阳城土体的效果评估

朱非清^{1,2}, 李洁^{1,2}, 郭青林^{1,2,3}, 陈雨鑫^{1,2}, 章高森⁴, 李平^{2,5}, 尚东娟^{2,5},
余静^{2,3,5}, 善忠伟^{2,5}, 武发思^{1,2,3}

(1. 敦煌研究院 国家古代壁画与土遗址保护工程技术研究中心; 古代壁画保护国家文物局重点科研基地, 甘肃 敦煌 736200; 2. 甘肃省文物保护研究中心, 甘肃 敦煌 736200; 3. 西北大学 文化遗产学院, 西安, 710127; 4. 中国科学院西北生态环境资源研究院 甘肃省极端环境微生物重点实验室, 兰州 730000; 5. 甘肃莫高窟文化遗产保护设计咨询有限公司, 甘肃 敦煌 736200)

摘要:微生物或酶诱导碳酸钙沉积(MICP/EICP)是一种加固强度高、环境友好的新型固土技术。为探索 MICP/EICP 技术在岩土质文物保护修复领域的应用,采用巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*)和脲酶(Urease)两种不同的矿化材料对锁阳城遗址周边土分别进行拌和制样和滴渗加固处理。通过 SEM、EDS、XRD、CaCO₃生成量测定、TG-DSC 和透气性能试验等方法对试样进行表征分析,并测试了表面硬度、抗剪强度等力学性能,评估不同材料及加固方法的矿化效果,用离子色谱法对试样进行易溶盐含量分析。结果表明,两种生物矿化材料均能与胶结液(氯化钙/尿素混合液)在土体中发生矿化作用,矿化程度随养护时间呈上升趋势;生物矿化在一定程度上提高了土体的力学性能,且对土体性质和色度影响甚微;整体而言,拌和法的加固效果优于滴渗法,但这两种方法均会导致土体内易溶盐含量增加。结合文物保护实践, MICP/EICP 技术在土遗址裂隙灌浆及防风化加固保护中具有较好的应用潜力,但生物矿化过程中易溶盐控制及潜在盐害风险等问题仍需进一步研究。

关键词:生物矿化;土遗址;文物保护;模拟试验;加固修复

中图分类号: TU444 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(XXXX)XX-0001-13

Effect evaluation of biomineralization techniques on soil reinforcement in Suoyang Ancient City

ZHU Feiqing^{1,2}, LI Jie^{1,2}, GUO Qinglin^{1,2,3}, CHEN Yuxin^{1,2}, ZHANG Gaosen⁴, LI Ping^{2,5}, SHANG Dongjuan^{2,5}, YU Jing^{2,3,5}, SHAN Zhongwei^{2,5}, WU Fasi^{1,2,3}

(1. National Research Center for Conservation of Ancient Wall Paintings and Earthen Sites; Key Scientific Research Base for Conservation of Ancient Wall Paintings of NCHA, Dunhuang Academy, Dunhuang 736200, Gansu, P. R. China;
2. Gansu Provincial Research Center for Conservation of Cultural Heritage, Dunhuang 736200, Gansu, P. R. China;

收稿日期: 2024-03-13

基金项目:国家重点研发计划(2020YFC1522200);甘肃省科技计划(21JR11RA218);甘肃省文物保护科学和技术研究课题(GSWW202222)

作者简介:朱非清(1989-),女,馆员,主要从事文化遗产保护研究, E-mail: feiqing007@163.com。

武发思(通信作者),男,博士,研究馆员, E-mail: wufs@dha.ac.cn。

Received: 2024-03-13

Foundation items: National Key R & D Program of China (No. 2020YFC1522200); Gansu Province Science and Technology Plan (No. 21JR11RA218); Project of Gansu Cultural Relics Bureau (No. GSWW202222)

Author brief: ZHU Feiqing (1989-), PhD, museologist, main research interest: cultural heritage conservation, E-mail: feiqing007@163.com.

WU Fasi (corresponding author), PhD, professor of cultural heritage and museology, E-mail: wufs@dha.ac.cn.

3. School of Culture Heritage, Northwest University, Xi'an 7101276, P. R. China; 4. Key Laboratory of Extreme Environmental Microbial Resources and Engineering, Northwest Institute of Eco-Environment and Resources, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, P. R. China; 5. Cultural Heritage Conservation and Design Consulting Co., Ltd. of Mogao Grottoes, Dunhuang 736200, Gansu, P. R. China)

Abstract: Microbial- or enzyme-induced calcium carbonate precipitation (MICP/EICP) is a new soil solidification technology with high strength and environmental friendliness. In order to explore its application in rock and soil cultural relics protection and restoration, *Sporosarcina pasteurii* and Urease were used to prepare simulated samples with the soil from the surrounding Suoyang Ancient City by mixing respectively, and the blank samples only by the soil were treated with drip reinforcement. The samples were characterized by SEM, EDS, XRD, CaCO_3 content measurement, TG-DSC, air permeability test, and the other methods, and their mechanical properties including surface hardness and shear strength were also tested, to evaluate the mineralization effect of different materials and reinforcement methods. Additionally, the content of soluble salt was analyzed by ion chromatography. The results showed that the two mineralized materials and the urea-calcium chloride solutions could mineralization react, and the mineralization displayed an increased trend with curing time. Mineralization improves the mechanical properties of the soil to a certain extent and has little influence on soil properties and color difference. Overall, the reinforcement effect of the mixing method is better than that of the dripping method, while both of the methods lead to the increase of soluble salt content in the soil. Integrate with the practice of cultural relic protection, MICP/EICP techniques had great application potential in the fracture grouting and weathering protection of earthen sites, but further research is still needed on the control of soluble salt and the potential risk of salt damage in the process of biomineralization.

Keywords: biomineralization; earthen sites; protection of cultural heritage protection; simulation experiment; reinforcement

土遗址作为以土为主要建筑材料的文化遗产,是历史上遗存下来的人类进行生产、生活、文化宗教等活动的场地或场所,其中长城、交河故城、锁阳城遗址等已列入世界文化遗产^[1]。然而,在长期风沙、降雨、冻融、地震等自然营力以及人为因素的作用下,土遗址普遍存在片状剥离、风化粉化、墙体开裂坍塌、生物侵蚀等病害甚至形成毁灭性破坏^[2]。经过近30年的探索,当前对土遗址病害主要采取表层防风化、锚固、裂隙灌浆等保护加固技术^[3];在保护材料方面,有机、无机或杂化材料在土遗址加固中普遍使用^[4],但有机保护材料兼容性和耐久性不足、无机保护材料渗透性差等问题仍非常突出,亟须进一步开展适用性保护修复材料和技术的研发工作。

近年来,基于微生物/脲酶诱导 CaCO_3 沉淀 (Microbially/Enzyme Induced Calcite Precipitation, EICP/MICP) 的生物矿化技术在岩土加固领域得到了广泛关注。这种新兴跨学科生物技术主要通过自然界中具有特殊功能微生物的新陈代谢活动以及直接利用植物源脲酶诱导沉淀碳酸盐、草酸盐及氧化物等矿物以达到胶结加固的作用。生物矿化技术最早用于多孔材质的堵漏^[5-6],随后被推广至石质材料 and 水泥基材料的表面裂缝缺陷修复^[7],在土

体加固中的应用相对较晚。研究表明,生物矿化过程中生成的 CaCO_3 起到了孔隙填充和土颗粒胶结作用^[8-9],可以通过喷洒的方法对土体的表层进行防侵蚀、防风化处理,也可以采用注浆的方法对土体孔隙或裂隙进行处理^[10],改变土体导水率、孔隙率^[11]、膨胀率、黏聚力^[12-13]、剪切力^[14]和强度^[15]等力学性能。相较于传统加固技术,生物矿化是一种耗能少、成本低且环境友好的新型防风化方法,目前已在西班牙、意大利等地的建筑文物保护^[16-17]和国内三合土遗址、古建筑的修复研究^[18-20]中取得了较好的加固试验效果。在成本控制方面,MICP 技术因尿素水解机制简单,反应过程容易控制,而且在短时间内能够产生大量 CO_3^{2-} ,成本低廉,一直作为主流的碳酸钙生物矿化技术被广泛应用^[21-22]。关于 EICP 技术,笔者使用的是纯度和活性较高的商用脲酶,相比 MICP 技术操作更为简便快捷,但商用脲酶生产工艺复杂,成本高昂,价格也相对较高^[23]。在实际应用中从大豆中直接提取脲酶代替商用脲酶,能降低成本^[24]。

锁阳城位于丝绸之路的咽喉要地,是我国目前保存最为完整的汉唐古城之一,对汉唐时期河西走廊历史、政治、经济、文化以及军事等方面的研究具有重要价值。锁阳城遗址分为内、外两城,均为就

地取材,用当地黏性土夯筑而成,内城呈不规则形,城墙夯层内排列圆木,顶部有用土坯、柴草维修的痕迹。因长期受到风沙磨蚀、雨蚀和植物侵蚀等作用的影响^[25-28],锁阳城遗址风化和裂隙坍塌等问题严重,迫切需要开展保护加固工作。笔者针对当前锁阳城遗址保护需求,通过模拟样品加固处理和多维表征,旨在系统评估基于生物矿化技术的土遗址加固效果,为此类新型技术在土遗址保护中的推广应用提供科学依据。

1 材料与方法

1.1 土样来源

试验土样取自锁阳城遗址周边,遗址风化土层干密度约 1.2~1.7 g/cm³^[29-30]。试验土样的基本物理性质见表 1,黏粒含量较低^[31]。

表 1 锁阳城遗址土的基本物理性质
Table 1 Basic physical properties of soil in earthen sites

天然含水率/%	土粒相对密度	液限/%
0.25	2.27	26.3
塑限/%	塑性指数	天然密度/(g/cm ³)
16.0	10.3	1.2~1.7

1.2 生物矿化材料制备

采用两种矿化材料,脲酶选用尿素酶 U4002,来源于洋刀豆,购于西格玛奥德里奇(上海贸易有限公司)。试验使用浓度为 0.1 g/L 尿素酶溶液,其脲酶活性为 7.94 (mmol/L)/min。微生物菌种选用巴氏芽孢八叠球菌(*Sporosarcina pasteurii*, CGMCC1.3687,曾用名 *Bacillus pasteurii*^[32]),直接来源国为德国,购置于中国普通微生物菌种保藏中心。将菌种冻干粉进行活化后,接种于液体培养基(酪蛋白胨 30 g/L,大豆蛋白胨 10 g/L,氯化钠 10 g/L,尿素 40 g/L),30℃、200 r/min 条件下振荡培养,扩繁得到原始菌液,浓度 OD₆₀₀ 值为 2.533。在该培养条件下,菌液生长曲线与其脲酶活性变化趋于一致,脲酶活性随菌液浓度增加而变大,选用培养 20~22 h 后的菌液为宜(图 1),试验使用的巴氏芽孢八叠球菌的脲酶活性为 5.75 (mmol/L)/min。

1.3 试验方案

试验处理分组见表 2。配置氯化钙和尿素的混合液作为胶结液,浓度为 0.5 mol/L^[33-34],试验处理中胶结液与脲酶/菌液按体积比为 2:1 添加。

1.3.1 试块制作

试验参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)和《土遗址保护试验技术规范》(WW/T 0039—2012)。试块制作中,将不同处理材料(表 1)分别与过筛的遗址土搅拌均匀采用遗址土的最优含水

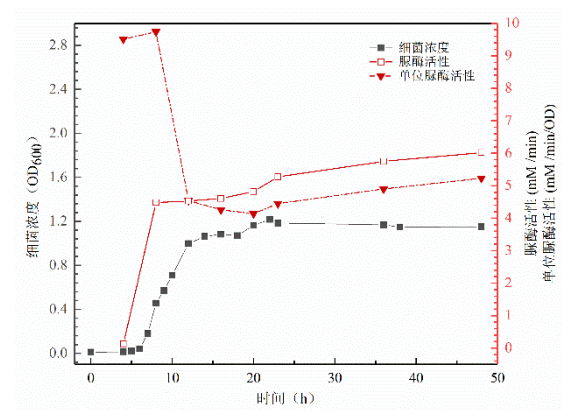


图 1 巴氏芽孢八叠球菌生长曲线和脲酶活性曲线

Fig. 1 The growth curve of *S. pasteurii* and urease activity

表 2 试验方案设计

Table 2 Design of the experimental treatments

分组	编号名称	组分
空白对照	CK0	去离子水
阴性对照组	CK	0.5 mol/L 胶结液
试验组 1	Urease	0.5 mol/L 胶结液+0.1 g/L 脲酶
试验组 2	SP	0.5 mol/L 胶结液+S. pasteurii 菌液

率 13.5% 制成干密度为 1.7 g/cm³ 重塑土样,根据试验需求,采用万能材料试验机制作不同规格的试块(表 3),后置于室温(30℃)养护 30 d,干燥至天然含水率 0.25%,此为拌和组样品。取部分空白对照组的试块,采用从试块上表面、缓慢多次滴渗的方式进行加固处理,后置于试验室密封养护 30 d 后干燥至干密度为 0.25%,此为滴渗组样品,滴渗用量参考《土遗址保护试验技术规范》(WW/T 0039—2012)按原状试样或重塑孔隙度体积的 85% 计算用量。

1.3.2 测试方法

生物矿化材料与胶结液的沉淀物以及加固前后土样的测试指标见表 3。其中为了确定新生成的碳酸钙含量,采用了钙离子计测定的方法。每组分别称取 2 份预先在 105℃ 温度下烘干至恒重的土样 0.06 g,置于 100 mL 烧杯中,加少量蒸馏水浸湿,滴加稀盐酸溶液至土样全部溶解,再将溶液移入 250 mL 容量瓶中,用蒸馏水稀释至刻度,摇匀,为酸洗处理;除去稀盐酸溶解土样的步骤同酸洗处理的操作方法,为水洗处理。使用钙离子计测得酸洗和水洗处理后的钙离子浓度;使用色差仪在试块上表面取 5 个测试点测得 L*a*b* 值,以 CK0 为对照数据,与各处理组(CK、Urease、SP)作比较,用 CIE 1976 L*a*b* 色彩系统计算平均色度变化 ΔE*ab;使用 Linseis DIL-75 测定热膨胀系数(CTE)和线性热膨胀(Δl),试验温度为 -30~60℃,升温速度为 0.5℃/min,测量精度 0.1 nm。制备样品见表 3,将试样养

护至含水率稳定后进行试验。试验初始温度为 20℃,先降温后升温^[35];土水特征曲线参考《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)将样品用叠式饱和器放入真空缸进行饱和,试样饱和后放入压力膜

仪,设定压力 15、30、45、60、80、100、200、300、400、500 kPa 进行试验,吸力平衡时取出称质量。试验前后使用三维激光扫描仪对样品的体积进行测量,测量分辨率为 0.05 mm。

表 3 样品测试指标、仪器及规格

Table 3 Test indicators, instruments, and specifications of samples

测试指标	仪器名称及型号	样品规格
SEM	JSM-6610LV 型扫描电子显微镜(日本)	粉末样品
XRD	Dmax/2500X 型 X 射线衍射分析仪(日本)	粉末样品
CaCO ₃ 生成量	MP518 型钙离子浓度钙离子检测仪	粉末样品
热重-差热	STA-409PC 同步热分析仪(德国)	粉末样品
含盐量	Thermo Fisher 戴安 ICS-900 睿智型离子色谱仪(美国)	粉末样品
色度	3nh NR20XE 色差仪	∅50 mm×100 mm
硬度	Equotip Piccolo2 表面硬度计	∅50 mm×100 mm
土水特征曲线	1500 F2 土壤水分特征曲线测定仪(美国)	∅61.8 mm×10 mm
抗剪强度	ZJ 型四连应变控制式直剪仪	∅61.8 mm×20 mm
透气性	METTER TOLEDO EL204-IC 电子天平	∅100 mm×10 mm
热膨胀系数	Linseis DIL-75 型热膨胀仪	∅5 mm×20 mm

2 结果与分析

2.1 特征表征

2.1.1 沉淀物微观形貌特征及定性

采用扫描电子显微镜观察两种矿化材料与胶结液生成沉淀物的形态,并结合能谱分析(EDS),对选定微区进行定性分析。经扫描电镜观察到 SP 和 Urease 处理组均有沉淀物生成,为棱角明显、边长约 10 μm 的立方体矿物颗粒(图 2)。MICP 加固土体的有效粒径范围为 10~1 000 μm,相对密度越大,配级越好则加固效果越好^[29]。能谱分析表明,所得沉淀物主要含 Ca、O、C 元素,因此推测上述沉淀物均为 CaCO₃。

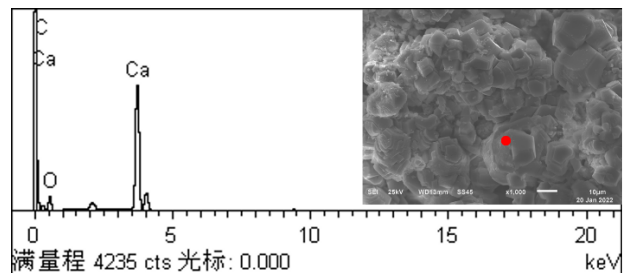
为进一步定性所得沉淀物质,对样品进行 X 射线衍射分析,结果如图 3 所示,沉淀物质为纯 CaCO₃,主要为方解石晶型,并含有少量的球霏石晶型。球霏石晶型,常温常压下不稳定,是热力学上最不稳定的 CaCO₃晶型,一般呈球状,容易形成方解石,但是形成的方解石对岩土材料的胶结效果未有文献证明^[36-37]。尹黎阳等^[33]认为生物矿化的过程中要尽量避免球霏石的形成。

2.1.2 土样中 CaCO₃含量测定

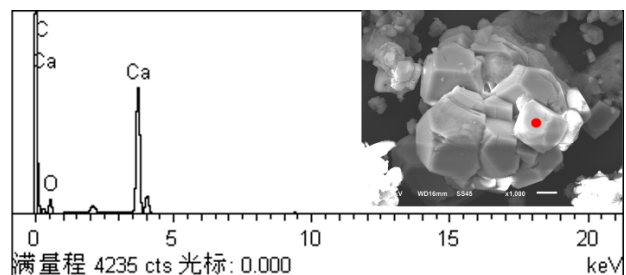
利用钙离子计测定的方法对处理组及阴性对照中 CaCO₃含量进行测定,并按式(1)计算。

$$\omega_{\text{CaCO}_3} = \frac{C_{\text{acid}} - C_{\text{water}}}{W \times 4 \times 10^3} \times 100\% \quad (1)$$

式中: C_{acid} 为钙离子计测得的容量瓶酸洗溶液的钙离子浓度; C_{water} 为钙离子计测得的容量瓶水洗溶液的钙离子浓度; W 为样品质量。图 4 为各处理组及



(a) *Sporosarcina pasteurii*



(b) Urease

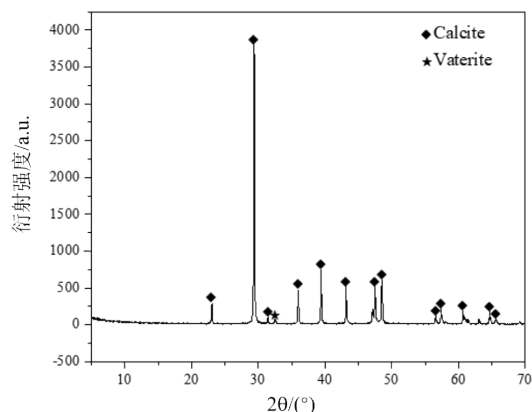
注:红点标注为沉淀物晶体扫描电镜照片

图 2 两种生物矿化材料与胶结液作用后沉淀物的

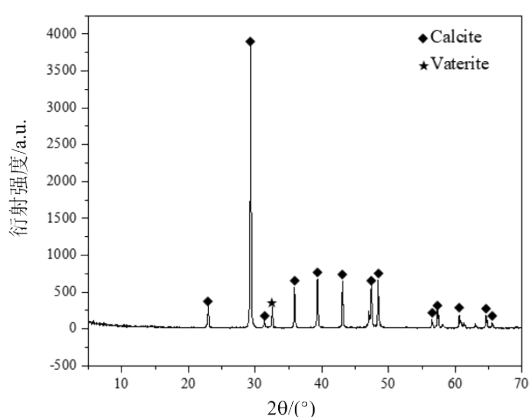
Fig. 2 Scanning electron micrographs of the precipitates from the interaction of two biomineralized materials with the cementing solution

阴性对照中 CaCO₃含量的计算结果。结果显示随着养护时间的推移,样品中的 CaCO₃含量不断增加,说明 Urease 和 SP 在土体内发生了有效的矿化反应,使 CaCO₃含量显著增加($p < 0.05$)养护至第 30 天时,Urease 组的生成量最大。

取微量样品进行热重-差热(TG-DSC)分析,得出 TG-DSC 曲线(图 5)。结果显示在代表 CaCO₃分



(a) SP 处理组沉淀物



(b) Urease 处理组沉淀物

图3 两种矿化材料与胶结液生成的沉淀物XRD图谱

Fig. 3 X-ray diffraction phase spectra of samples from sediment

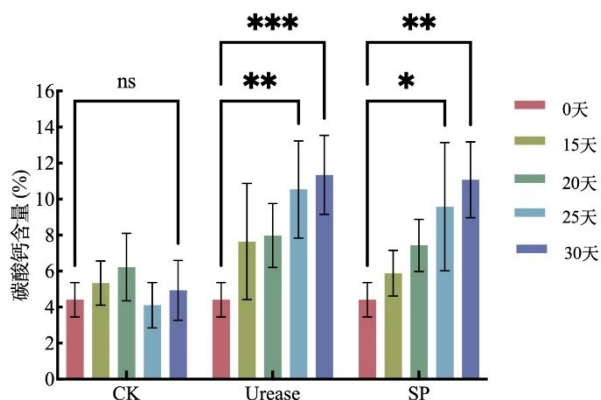
图4 不同养护时间土样中 CaCO_3 含量

Fig. 4 Calcium carbonate content in soil samples with different curing time

解失重的 570~900 °C 范围内,未加固土样的质量变化为 15.92%,SP 处理组的 CaCO_3 质量与未加固的差值为 2.48%,与不加菌液的阴性对照 CK 组相比变化差值为 0.46%,从而确定经 SP 处理后新生成的 CaCO_3 含量增加了 0.46%,经 Urease 处理后新生成的 CaCO_3 含量增加了 0.81%。这表明加固后土

样中均有新的 CaCO_3 生成, Urease 处理后 CaCO_3 生成量较高。已有研究表明, 当温度到达 90°C 时, CaCl_2 与尿素反应生成 CaCO_3 , 可推断图 5 中 CK 阴性对照组的 TG 结果中产生了 2.02% 新的 CaCO_3 [38-39]。从加固前后土样的 DSC 曲线可见, 两个吸热峰均出现在 $600\sim 900^\circ\text{C}$ 范围内, 这个区域内为 TG 质量减小区域, 主要因为 CaCO_3 晶体受热分解, 释放 CO_2 气体, 从而进一步验证了土样中有新的 CaCO_3 生成。

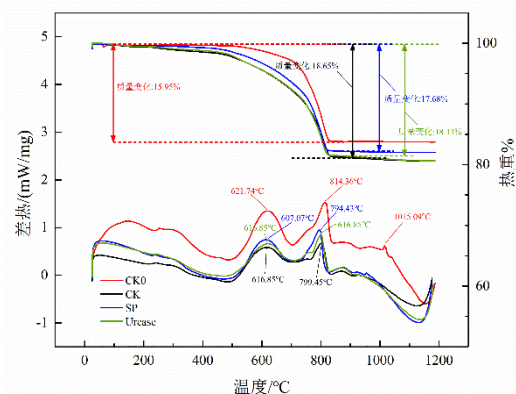


图 5 TG-DSC 曲线

Fig. 5 Thermo gravimetric and differential scanning calorimetry curve of soil samples

2.1.3 土样中 CaCO_3 分布

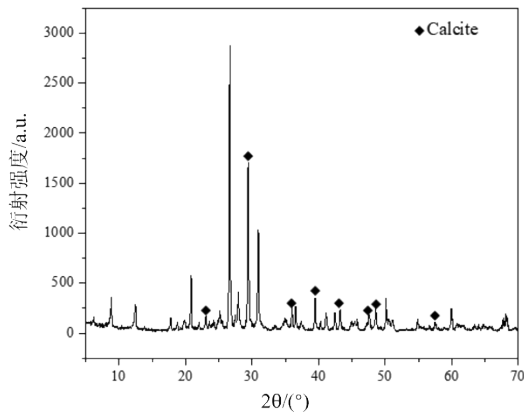
通过X射线衍射仪分析,加固后 Urease 和 SP 处理组在土体内部矿化生成的 CaCO_3 中并未检测到球霏石,均为晶型稳定且适合改善岩土材料性能的方解石(图6)。

从土样加固前后扫描电子显微镜照片(图7)可知,未加固土样结构疏松,经生物矿化材料加固后,土体原有的孔隙被新生成的 CaCO_3 填充,图像结果显示Urease加固后的填充效果更好,与其他研究中土壤颗粒间形成胶结物质包裹住片状的土壤颗粒状态相似^[40],土体结构更加密实。

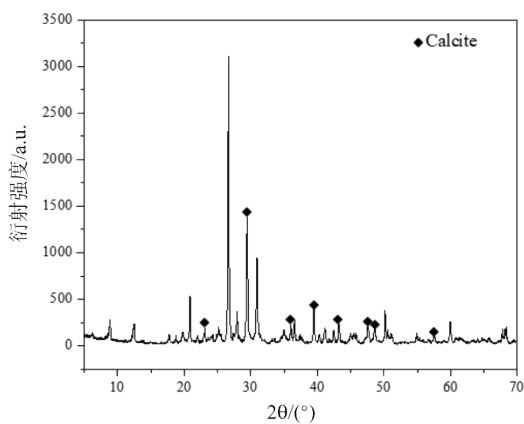
2.2 加固材料对土体性质的影响

2.2.1 色度变化

不改变原状是文物古迹保护修复的基本准则,这要求在保护过程中不能改变其原貌,色度变化是评估施工技术是否合理的重要指标之一^[41],因此对加固后土样表面色差的分析尤为重要。已有研究表明,当色差 $\Delta E^*ab>3$ 时,色差较大,肉眼可轻易识别;色差 $1.5<\Delta E^*ab<3$ 时,色差轻微,肉眼不易识别;色差 $\Delta E^*ab<1.5$ 时,色差微弱,且肉眼无法识别^[42]。张金凤^[43]认为针对土遗址保护而言,色差 ΔE^*ab 值不大于6是可接受色差范围。因此 $\Delta E^*ab\leq 5$ 被设定为是可以接受的变化量。如表4所示,各处理组的色差值 ΔE 均低于3,色度变化微小(图8),



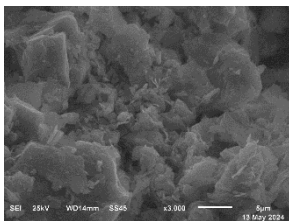
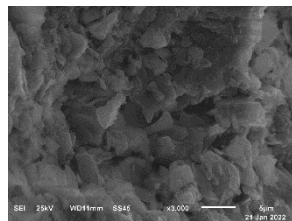
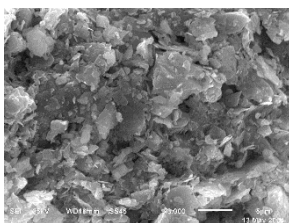
(a) SP处理组土样



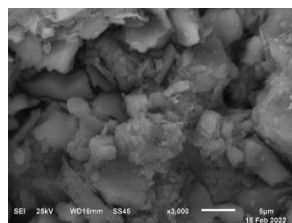
(b) Urease处理组土样

图6 加固后土样XRD图谱

Fig. 6 X-ray diffraction phase spectra of soil samples after reinforcement

(a) CK0未加固土样
(空白组对照)(b) CK组土样
(阴性对照组)

(c) Urease处理组土样



(d) SP处理组土样

图7 土样加固前后扫描电子显微镜照片

Fig. 7 Scanning electron micrographs of soil samples before and after reinforcement

说明生物矿化材料的添加对土体色度影响甚微。但滴渗处理后试块的色差值略大,在滴渗试验过程中,试样表面易形成白色粉末,从而影响土体表面色度,这可能与滴渗速度及材料的滴加顺序有关。也有研究表明,含有微生物细胞的砂粒与胶结液接触时会立即发生反应,在表面形成白色絮状物^[44-45]。



图8 试样表面

Fig. 8 Surface of samples

表4 试样表面色差值

Table 4 Surface color difference value of samples

加固方式	CK	Urease	SP
拌和 ΔE	1.35	1.27	0.87
滴渗 ΔE	1.68	1.42	1.17

2.2.2 热膨胀系数差异

图9为加固前后土样的热膨胀率和热膨胀系数。由图9可见,加固前土体的膨胀系数呈非线性,在不同的温度下具有不同的膨胀系数,在-30~60℃的区间内,热膨胀系数差异大于60%。Urease矿化加固后,土体的热膨胀率趋于线性变化,这主要是加固材料通过矿化的方式将土体颗粒及其骨架有效地连接起来,使得矿物成分膨胀具有方向性,限制了土颗粒的不规则膨胀和变形,而SP加固前后的土样差异较小。

2.2.3 加固后土样对水的响应

土水特征曲线反映了岩土体的持水性能,是进行稳定性分析的重要参数^[46]。使用VG模型拟合的土-水特征曲线,拟合优度 R^2 都在0.95以上。由图10和图11可知,基质吸力可分为牢固吸附区、水膜吸附区和毛细吸附区3个区域,各处理组的体积含水率均随基质吸力的增加而减小,其曲线均呈单峰反“S”型。拌和加固后的SP和Urease处理组土颗粒间的间隙被 CaCO_3 填充,颗粒之间位移比未加固土样的小,其中SP处理组中残余体积含水率较大。滴渗各处理组结果显示体积收缩率均大于未加固,未起到整体加固的效果。

在测定土-水特征曲线的同时,使用Polyworks软件和Geomagic Control软件进行三维扫描数据处

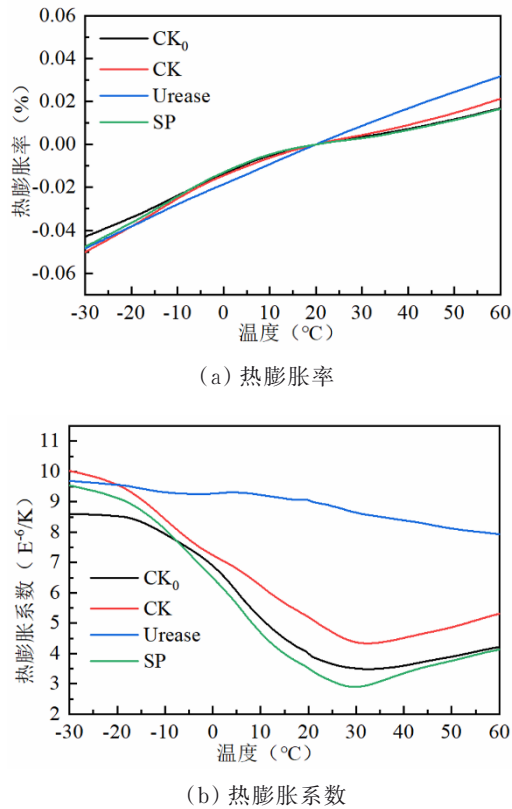


图9 加固前后土样热膨胀率和热膨胀系数

Fig. 9 The CET ratio and CTE of soil samples before and after reinforcement

理和分析,得出偏差色谱图。由图12可知,拌和加固后土样的标准偏差 Urease 为 0.3、SP 为 0.16,滴渗加固后土样的标准偏差 Urease 为 0.3、SP 为 0.53,拌和加固后小于加固前的标准偏差 0.35,也小于阴性对照 CK 的标准偏差 0.38;而在滴渗加固中,SP 加固后的土样标准偏差较大,大于加固前的标准偏差约 1.5 倍。拌和加固后土样的体积变化出现在不同区域,滴渗加固后的土样变化大多位于边缘,由此可以进一步说明拌和加固的方法中生物矿化材料对土样体积的收缩具有良好的抑制作用,试样整体特性更为一致。

2.2.4 透气性变化

依据《建筑材料及其制品水蒸气透过性能试验方法》(GB/T 17146—2015)设计水蒸气渗透杯,利用质量变化率表征加固前后土样的透气性,湿流密度表示单位时间内流经试件单位面积的水蒸气的质量;透湿率为湿流密度除以试件两侧的水蒸气压力差。有研究者认为,材料加固文物后,透气性下降值低于 10% 为优,20%~30% 为中^[47]。试验结果如图 13 所示,在拌和加固处理中,各处理后的湿流密度相对于 CK₀ 有所降低,但幅度很小,下降值均低于 10%,因此生物矿化反应后对水汽输送通道的影响不大。

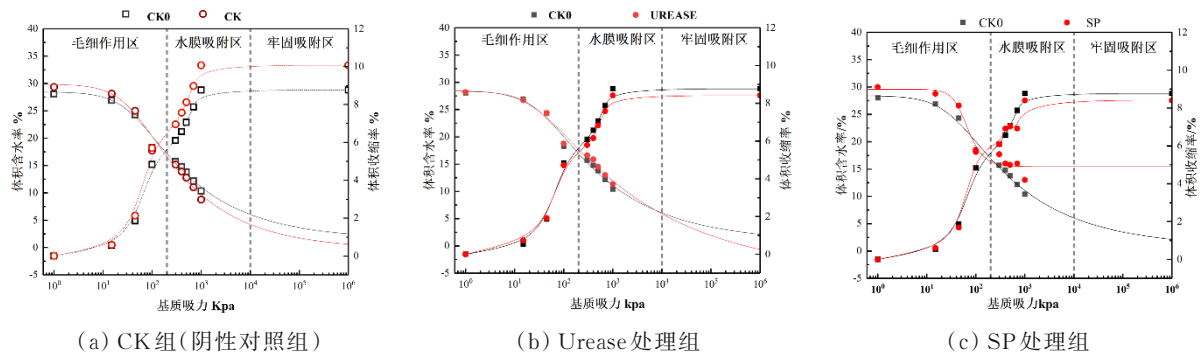


图10 拌和加固前后土-水特征曲线

Fig. 10 Curves of soil-water characteristic of soil samples before and after mixing reinforcement

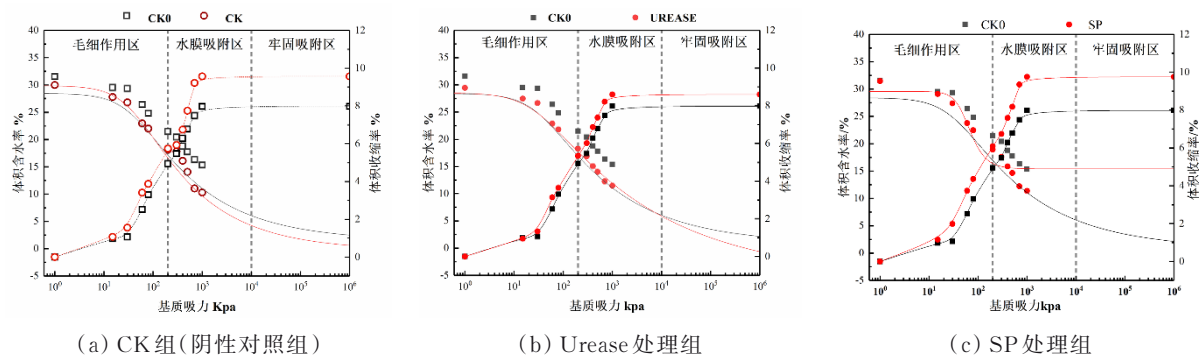


图11 滴渗加固前后土-水特征曲线

Fig. 11 Curves of soil-water characteristic of soil samples before and after dripping reinforcement

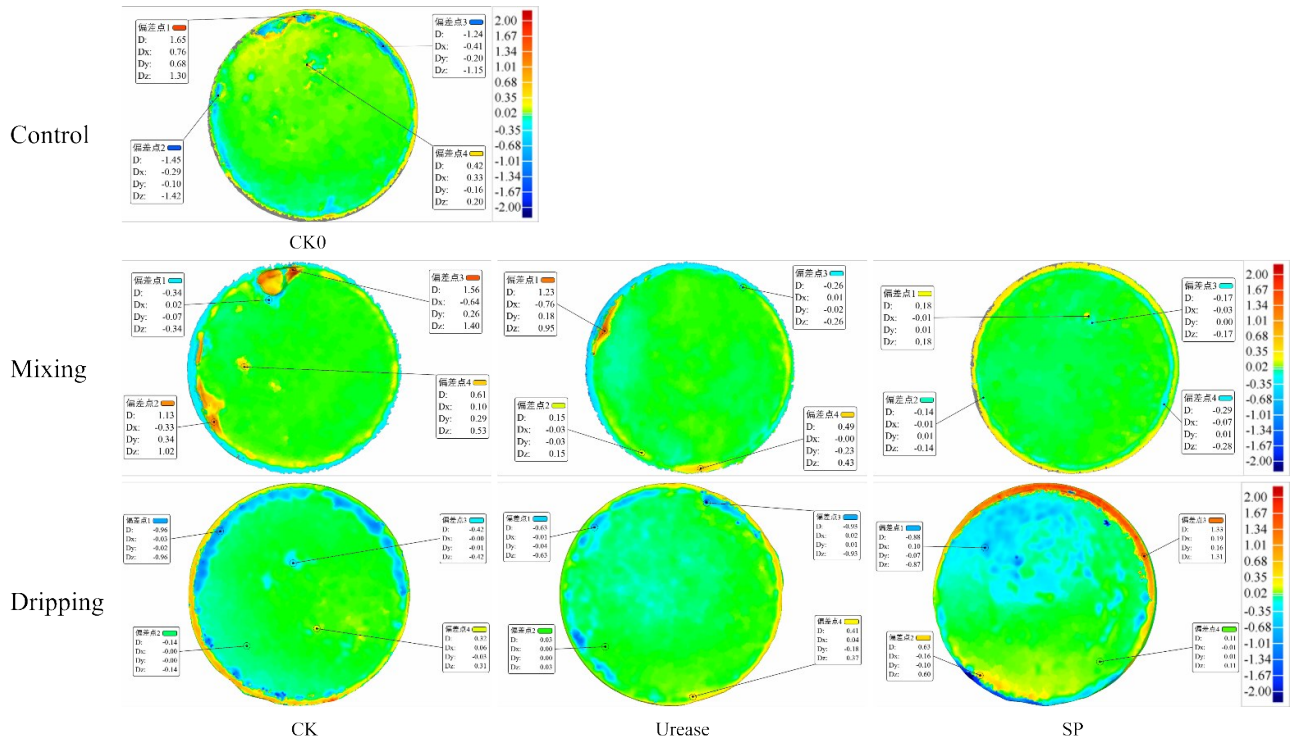
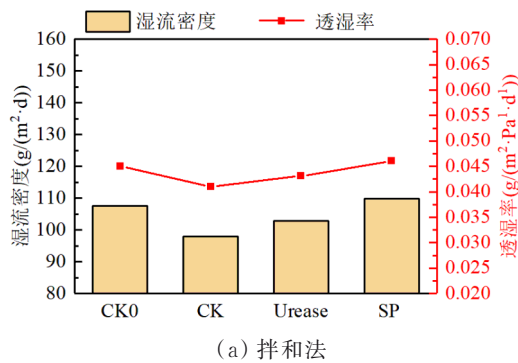
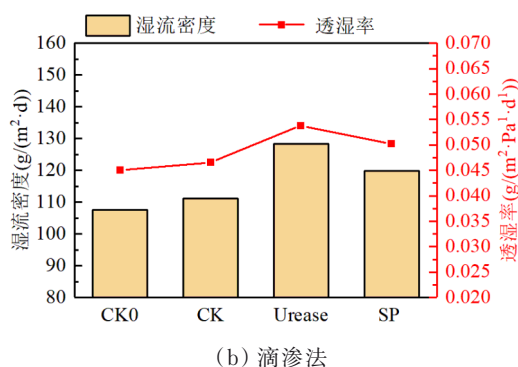


图 12 加固前后土样三维扫描对比图

Fig. 12 Comparison of 3D scans of soil samples before and after reinforcement



(a) 拌和法



(b) 滴渗法

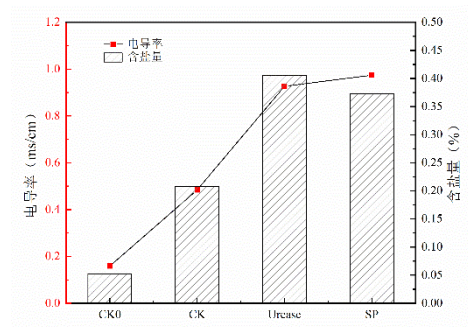
图 13 添加不同生物矿化加固材料不同处理方式透气性

Fig. 13 The air permeability tests of treated soil sample

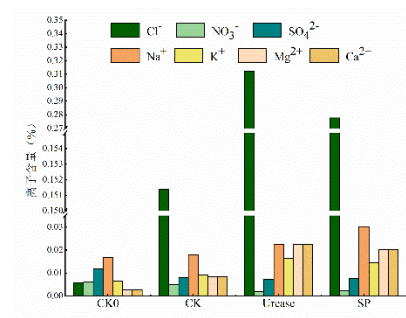
2.2.5 易溶盐分析

使用离子色谱法对加固前后的土样进行易溶盐含量分析。有研究指出,电导率在 0~8 ms/cm 时,电导率与含盐量具有线性关系^[48]。拌和加固后土样的电导率和含盐量如图 14 所示,土样的电导率

与离子色谱法测定的含盐量对应成正相关,其中 Urease 处理组的含盐量较高,根据离子含量的结果推断与 SP 处理组比较其 CaCl₂ 的利用率低,因此在土样中残余较多,导致易溶盐的含量增加。SP 处理



(a) 电导率及总含盐量

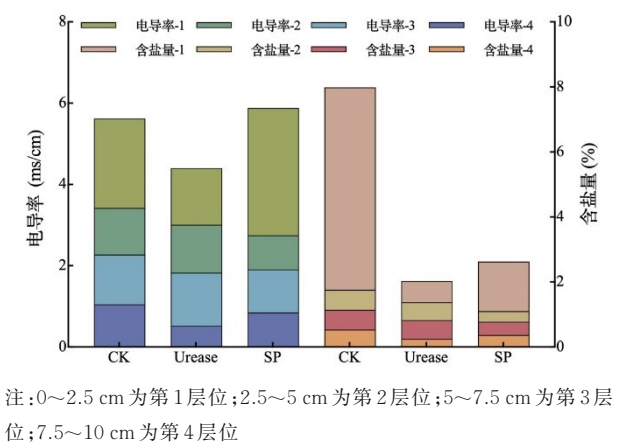


(b) 阴阳离子分布

图 14 拌和加固后土样的电导率及含盐量

Fig. 14 Conductivity and salt content of soil samples after mixing reinforcement

组中Na⁺含量较高,与菌液中培养基的成分有关。按照土遗址保护修复中施工用土含盐量不得超过0.5%的要求,需对工程用土的含盐量进行评价。拌和加固后土样中易溶盐的含量均低于0.5%,符合施工土含盐量要求。图15为滴渗加固后不同层位土样的电导率及易溶盐含量,从滴渗面起始,第1层0~2.5 cm处所取的土样电导率最大,含盐量也最高,其余层位差别微小。SP加固后处理的土样除第一层位外每一层位的易溶盐含量均未超过0.5%,而Urease加固处理后的土样含盐量除第4层7.5~10 cm为0.25%外,其余层位均超出0.5%。说明在矿化的过程中CaCl₂未得到充分利用产生了残留。因此,因地制宜筛选和优化加固技术在土遗址保护中至关重要。



注:0~2.5 cm为第1层位;2.5~5 cm为第2层位;5~7.5 cm为第3层位;7.5~10 cm为第4层位

图 15 滴渗加固后不同层位土样的电导率及含盐量

Fig. 15 Conductivity and salt content of soil samples at different layers after dripping reinforcement

2.3 力学性质

为了证明生物矿化材料对试样的加固效果,对两种方法加固的试块进行力学检测及评估。

2.3.1 表面硬度

材料局部抵抗硬物压入其表面的能力称为硬度。硬度值是反映材料弹性塑性、强度、韧性以及耐磨性等一系列不同物理性能的综合指标,具有无损或微损的特性,在土遗址保护中得到了较为广泛的应用。从硬度对比结果(表5)可知,试块表面硬度受生物矿化加固材料及加固方法的影响不大,其中Urease组试样的表面硬度相对较大。

2.3.2 抗剪强度

抗剪强度是土的重要力学性质之一,可反映土体抵抗滑坡与坍塌的能力。基于四联抗剪,采用快剪试验^[49],记录土样剪切破坏时的剪应力,根据库仑定律,求得其抗剪强度参数(内摩擦角 φ 和黏聚力 c),土体内在的结构差异导致其强度参数值的变化。

两种加固方式、添加不同生物矿化材料后试样

表 5 添加不同生物矿化材料不同加固方式硬度对比结果

Table 5 Comparison of hardness of different biomineralization materials in different reinforcement treatments

加固方法	加固材料	表面硬度(HLD)
未加固	CK0	236.8±3.4
	CK	221.4±7.0
	Urease	237.6±5.0
拌和	SP	214.4±1.7
	CK	217.4±9.9
	Urease	237.8±5.8
滴渗	SP	226.2±6.3

的抗剪强度均存在差异。由拌和处理前后抗剪强度(图16(a))可知,除加入Urease的试样内摩擦角明显变大之外,其他组别对摩擦角的影响不大;仅SP处理后试块的黏聚力比原土增大约20%。因此,拌和方式中加入SP后,其抗剪强度表现最优。由滴渗处理前后抗剪强度(图16(b))可知,加固材料的内摩擦角差异不大,但黏聚力与对照组相比均有较大的增加,SP和Urease处理组比原土增大约1

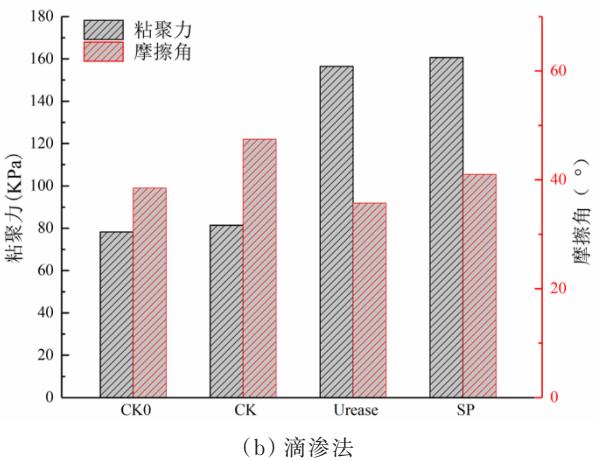
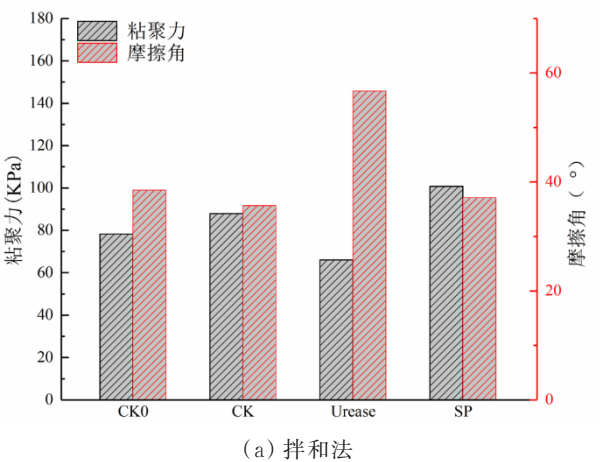


图 16 添加不同生物矿化材料及不同加固方式的抗剪强度

Fig. 16 Shear strength with different biomineralization materials in different reinforcement treatments

倍。由此可见,不同处理方式对加固效果也存在一定影响,SP 和 Urease 组均提高了其黏聚力,且 SP 组高于 Urease 组,说明两种矿化材料均生成 CaCO_3 胶结物,对土体内部孔隙形成了有效填充。但各组摩擦角差异不大,矿化材料对土样内部颗粒间的联结影响较大,而对土颗粒表面粗糙度影响较小,因此呈现出土样黏聚力增幅较大,而内摩擦角增幅较小的特征。两组处理主要通过提高试样的黏聚力来提高剪切强度。随着胶结水平的提高,仅起填充作用的碳酸钙晶体转而起到胶结的作用,碳酸钙的胶结强度越大^[50]。生物胶结是通过微生物作用在原位产生颗粒结合物质,从而提高土壤的抗剪强度^[51-52]。由生物加固材料诱导生成的颗粒物在土体内部填充孔隙,有效增加了试样的内部黏聚力。黏聚力增大还可能与菌液中分泌的胞外聚合物(extracellular polymeric substances, EPS)有关。EPS 附着在孔隙材料的表面和内部,形成微生物膜,使得材料的渗透性降低。主要是来自于填充作用,另一因素是来自于孔隙水黏度的升高^[53]。土样的剪切强度也与孔隙水分布的均匀度相关^[54],微生物的这一作用在以往的一些工程应用中被认为是负面因素,如会使过滤系统发生堵塞^[10, 55-56],但在试验中未影响土样的水汽输送。

3 结论

以锁阳城遗址周边土体试样为研究对象,通过对基于 EICP 和 MICP 技术的两种矿化材料及拌和法和滴渗法两种加固方式开展试验,以表观、微观形态特征作为定性化描述,以 CaCO_3 含量、色差、透气性、含盐量、热膨胀系数、表面硬度、剪切强度等作为评估指标,分析不同加固处理中两种加固技术的表现,得出以下结论:

1) 生物矿化材料 Urease 和 SP 与胶结液通过矿化作用均能在土体中生成 CaCO_3 ,其含量随养护时间而增加,新生成的 CaCO_3 可有效填充土体颗粒间孔隙。

2) 矿化加固后土样表面色差值均低于 3,符合文物古迹保护准则“不改变原状”的原则。透气性变化较小,不存在影响水蒸气输送而引发盐分聚集的问题。但加固后试样中易溶盐含量增加,因此还需改善培养基配方,调整加入 CaCl_2 的量,降低易溶盐残留,减少土遗址盐害风险的发生。

3) 在力学强度方面,两种矿化材料及加固方式对试样的表面硬度和抗剪强度有一定提升作用,土体黏聚力明显增加。

研究表明 MICP 技术和 EICP 技术在土遗址加

固及防风化工作中均具有应用潜力。拌和方式对工程中裂隙灌浆的实施应用更具有实践指导意义,而滴渗方式则可用于土遗址表面防风化技术工艺。未来需要针对不同生物矿化材料性能特点,进一步优化材料配方及施工工艺,以期促进该技术在土遗址保护中的推广应用。

参考文献

- [1] 王旭东. 中国干旱环境中土遗址保护关键技术研究新进展[J]. 敦煌研究, 2008(6): 6-12, 114.
WANG X D. New progresses on key technologies for the conservation of Chinese earthen sites in arid environment [J]. Dunhuang Research, 2008(6): 6-12, 114. (in Chinese)
- [2] 赵海英, 李最雄, 韩文峰, 等. 西北干旱区土遗址的主要病害及成因[J]. 岩石力学与工程学报, 2003, 22(Sup2): 2875-2880.
ZHAO H Y, LI Z X, HAN W F, et al. Main diseases and their causes of earthen ruins in arid region of Northwestern China [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2003, 22(Sup2): 2875-2880. (in Chinese)
- [3] 裴强强, 王旭东, 郭青林, 等. 干旱环境下土遗址夯补支顶加固变形机制室内试验研究[J]. 岩土力学, 2018, 39(8): 2755-2764.
PEI Q Q, WANG X D, GUO Q L, et al. Laboratory test of deformation mechanism of rammed roof-propping reinforcement at earthen heritage sites in arid environment [J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(8): 2755-2764. (in Chinese)
- [4] 和法国, 吕燃, 粟华忠, 等. SH 材料加固夯筑遗址土耐久性试验及机理研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(Sup1): 297-307.
HE F G, LV R, SU H Z, et al. Durability test and mechanism study of SH material strengthening rammed site soil [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(Sup1): 297-307. (in Chinese)
- [5] KANTZAS A, STEHMEIER L, MARENTETTE D F, et al. A novel method of sand consolidation through bacteriogenic mineral plugging [C]//Annual Technical Meeting. Calgary, Alberta. Petroleum Society of Canada, 1992.
- [6] FERRIS F G, STEHMEIER L G, KANTZAS A, et al. Bacteriogenic mineral plugging [J]. Bulletin of Canadian Petroleum Geology, 1997, 36(9): 56-61.
- [7] 程晓辉, 麻强, 杨钻, 等. 微生物灌浆加固液化砂土地基的动力反应研究[J]. 岩土工程学报, 2013, 35(8): 1486-1495.
CHENG X H, MA Q, YANG Z, et al. Dynamic response of liquefiable sand foundation improved by bio-

- grouting [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2013, 35(8): 1486-1495. (in Chinese)
- [8] 李驰, 史冠宇, 武慧敏, 等. 基于脲酶诱导碳酸钙沉积的微生物矿化技术在分散性土改良中应用的试验研究[J]. 岩土力学, 2021, 42(2): 333-342.
- LI C, SHI G Y, WU H M, et al. Experimental study on bio-mineralization for dispersed soil improvement based on enzyme induced calcite precipitation technology [J]. Rock and Soil Mechanics, 2021, 42(2): 333-342. (in Chinese)
- [9] 李焕弟, 缴锡云, 李江, 等. 基于 MICP 及 EICP 技术的土壤固化试验研究[J]. 灌溉排水学报, 2021, 40(7): 59-65.
- LI H D, JIAO X Y, LI J, et al. Using microbe-induced calcite precipitation and enzyme-induced carbonate precipitation to cement slopes of earth ditches [J]. Journal of Irrigation and Drainage, 2021, 40(7): 59-65. (in Chinese)
- [10] 何稼, 楚剑, 刘汉龙, 等. 微生物岩土技术的研究进展[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(4): 643-653.
- HE J, CHU J, LIU H L, et al. Research advances in biogeotechnologies [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(4): 643-653. (in Chinese)
- [11] LIU X J, FAN J Y, YU J, et al. Solidification of loess using microbial induced carbonate precipitation [J]. Journal of Mountain Science, 2021, 18(1): 265-274.
- [12] 喻成成, 卢正, 姚海林, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀改性膨胀土试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(Sup1): 157-163, 172.
- YU C C, LU Z, YAO H L, et al. Experimental study on modification of expansive soil by calcium carbonate precipitation induced by microorganisms [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(Sup 1): 157-163, 172. (in Chinese)
- [13] 岳建伟, 张宝玺, 赵丽敏, 等. 改良微生物诱导碳酸钙沉淀技术加固粉性土力学性能[J]. 科学技术与工程, 2021, 21(18): 7702-7710.
- YUE J W, ZHANG B X, ZHAO L M, et al. Mechanical properties of soil strengthened by improved microbially induced calcite precipitation technology [J]. Science Technology and Engineering, 2021, 21(18): 7702-7710. (in Chinese)
- [14] DEJONG J T, FRITZGES M B, NÜSSLEIN K. Microbially induced cementation to control sand response to undrained shear [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2006, 132(11): 1381-1392.
- [15] MITCHELL J K, SANTAMARINA J C. Biological considerations in geotechnical engineering [J]. Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering, 2005, 131(10): 1222-1233.
- [16] ANDREOLLI M, LAMPIS S, BERNARDI P, et al. Bacteria from black crusts on stone monuments can precipitate CaCO_3 allowing the development of a new bio-consolidation protocol for ornamental stone [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2020, 153: 105031.
- [17] ORTEGA-VILLAMAGUA E, GUDIÑO-GOMEZJURADO M, PALMA-CANDO A. Microbiologically induced carbonate precipitation in the restoration and conservation of cultural heritage materials [J]. Molecules, 2020, 25(23): 5499.
- [18] 刘士雨, 俞缙, 曾伟龙, 等. 微生物诱导碳酸钙沉淀修复三合土裂缝效果研究[J]. 岩石力学与工程学报, 2020, 39(1): 191-204.
- LIU S Y, YU J, ZENG W L, et al. Repair effect of tabia cracks with microbially induced carbonate precipitation [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2020, 39(1): 191-204. (in Chinese)
- [19] 岳建伟, 王巍智, 朱耀冬. MICP 技术改性古建筑灰浆实验研究[J]. 河南大学学报(自然科学版), 2021, 51(3): 289-298.
- YUE J W, WANG W Z, ZHU Y D. Experimental study on modification of ancient building mortar with MICP technology [J]. Journal of Henan University (Natural Science), 2021, 51(3): 289-298. (in Chinese)
- [20] 刘汉龙, 韩绍康, 陈卉丽, 等. 潮湿环境砂岩质石窟岩体微生物加固补配修复方法[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(6): 219-220.
- LIU H L, HAN S K, CHEN H L, et al. Microbial reinforcement and repair method for sandstone grottoes in humid environment [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(6): 219-220. (in Chinese)
- [21] BACHMEIER K L, WILLIAMS A E, WARMINGTON J R, et al. Urease activity in microbially-induced calcite precipitation [J]. Journal of Biotechnology, 2002, 93(2): 171-181.
- [22] DE MUYNCK W, DE BELIE N, VERSTRAETE W. Microbial carbonate precipitation in construction materials: A review [J]. Ecological Engineering, 2010, 36(2): 118-136.
- [23] 王瑞兴. 碳酸盐矿化菌研究[D]. 南京: 东南大学, 2005.
- WANG R X. Study on carbonate-mineralization microbe [D]. Nanjing: Southeast University, 2005. (in Chinese)
- [24] 崔猛, 符晓, 郑俊杰, 等. 黄豆脲酶诱导碳酸钙沉淀多变量试验研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(11): 3027-3035.
- CUI M, FU X, ZHENG J J, et al. Multivariate experimental study on soybean urease induced calcium carbonate precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2022, 43(11): 3027-3035. (in Chinese)
- [25] 杨善龙, 郭青林, 蔺青涛, 等. 甘肃瓜州锁阳城遗址环

- 境问题分析及整治对策[J]. 敦煌研究, 2008(6): 83-86.
- YANG S L, GUO Q L, LIN Q T, et al. Analysis and regulating counter-measurements of environment problems existing in the ancient site of Suoyang City Guazhou Gansu [J]. Dunhuang Research, 2008(6): 83-86. (in Chinese)
- [26] 武发思, 杜维波, 杨小菊, 等. 瓜州锁阳城遗址植物群落特征及与土遗址保护间关系[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(4): 667-677.
- WU F S, DU W B, YANG X J, et al. Characteristics of plant community and its relationship with earthen heritage protection in Suoyang Ancient City, Guazhou [J]. Journal of Northwest University (Natural Science Edition), 2022, 52(4): 667-677. (in Chinese)
- [27] RICHARDS J, ZHAO G, ZHANG H, et al. A controlled field experiment to investigate the deterioration of earthen heritage by wind and rain [J]. Heritage Science, 2019, 7(1): 51.
- [28] RICHARDS J, VILES H, GUO Q L. The importance of wind as a driver of earthen heritage deterioration in dryland environments [J]. Geomorphology, 2020, 369: 107363.
- [29] 崔凯, 谌文武, 王旭东, 等. 干旱区土遗址盐渍带风蚀损耗效应微观机制研究[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 1167-1172.
- CUI K, CHEN W W, WANG X D, et al. Study of microscopic mechanism of effect of aeolian erosion on earthen ruins in arid region [J]. Rock and Soil Mechanics, 2012, 33(4): 1167-1172. (in Chinese)
- [30] 郭青林, 张景科, 孙满利, 等. 新疆北庭故城病害特征及保护加固研究[J]. 敦煌研究, 2013(1): 13-17, 126.
- GUO Q L, ZHANG J K, SUN M L, et al. A study on the characteristics of deterioration and the conservation of ancient Beiting City in Xinjiang [J]. Dunhuang Research, 2013(1): 13-17, 126. (in Chinese)
- [31] WANG X D, ZHANG B, GUO Q L, et al. Discussion on the environmental adaptability of weather-resistant measures for earthen sites in China [J]. Built Heritage, 2022, 6(1): 19.
- [32] YOON J H, LEE K C, WEISS N, et al. *Sporosarcina aquimarina* sp. nov., a bacterium isolated from seawater in Korea, and transfer of *Bacillus globisporus* (Larkin and Stokes 1967), *Bacillus psychrophilus* (Nakamura 1984) and *Bacillus pasteurii* (Chester 1898) to the genus *Sporosarcina* as *Sporosarcina globispora* comb. nov., *Sporosarcina psychrophila* comb. nov. and *Sporosarcina pasteurii* comb. nov., and emended description of the genus *Sporosarcina* [J]. International Journal of Systematic and Evolutionary Microbiology, 2001, 51(3): 1079-1086.
- [33] 尹黎阳, 唐朝生, 谢约翰, 等. 微生物矿化作用改善岩土材料性能的影响因素[J]. 岩土力学, 2019, 40(7): 2525-2546.
- YIN L Y, TANG C S, XIE Y H, et al. Factors affecting improvement in engineering properties of geomaterials by microbial-induced calcite precipitation [J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(7): 2525-2546. (in Chinese)
- [34] 张宝玺. 改良 MICP 技术强化濮阳戚城仿遗址土力学性能研究[D]. 河南 开封: 河南大学, 2020.
- ZHANG B X. Study on strengthening soil mechanical properties of imitation site in Qicheng, Puyang by improved MICP technology [D]. Kaifeng, Henan: Henan University, 2020. (in Chinese)
- [35] 张博. 不同气候环境下土遗址防风化技术适应性研究[D]. 兰州: 兰州大学, 2021.
- ZHANG B. Study on adaptability of windbreak technology of earth Ruins in different climatic environments [D]. Lanzhou: Lanzhou University, 2021. (in Chinese)
- [36] 王瑞兴, 钱春香, 王剑云. 微生物沉积碳酸钙研究[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2005, 35(Sup1): 191-195.
- WANG R X, QIAN C X, WANG J Y. Study on microbiological precipitation of CaCO_3 [J]. Journal of Southeast University (Natural Science Edition), 2005, 35(Sup1): 191-195. (in Chinese)
- [37] KRALJ D, BREČEVIĆ L, NIELSEN A E. Vaterite growth and dissolution in aqueous solution II. Kinetics of dissolution [J]. Journal of Crystal Growth, 1994, 143(3/4): 269-276.
- [38] WANG L F, SONDI I, MATIJEVIĆ E. Preparation of uniform needle-like aragonite particles by homogeneous precipitation [J]. Journal of Colloid and Interface Science, 1999, 218(2): 545-553.
- [39] JI Y S, YUAN Y S, SHEN J L, et al. Comparison of concrete carbonation process under natural condition and high CO_2 concentration environments [J]. Journal of Wuhan University of Technology-Mater Sci Ed, 2010, 25(3): 515-522.
- [40] 刘汉龙, 肖鹏, 肖杨, 等. 微生物岩土技术及其应用研究新进展[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2019, 41(1): 1-14.
- LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. State-of-the-art review of biogeotechnology and its engineering applications [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2019, 41(1): 1-14. (in Chinese)
- [41] 岳建伟, 陈颖, 赵丽敏, 等. 糯米浆改良戚城遗址仿遗址土强度特性与作用机理[J]. 土木与环境工程学报(中英文), 2022, 44(2): 195-204.
- YUE J W, CHEN Y, ZHAO L M, et al. Strength characteristics and mechanism of modified imitation ruins

- soil of Qicheng site with glutinous rice slurry [J]. Journal of Civil and Environmental Engineering, 2022, 44(2): 195-204. (in Chinese)
- [42] CASTILLO I F, DE MATTEIS L, MARQUINA C, et al. Protection of 18th century paper using antimicrobial nano-magnesium oxide [J]. International Biodeterioration & Biodegradation, 2019, 141: 79-86.
- [43] 张金凤. 土遗址化学加固保护中色差的评定问题[J]. 中国文物科学研究, 2016(4): 51-57.
ZHANG J F. Discussion on color difference by chemical consolidation on earthen sites [J]. China Cultural Heritage Scientific Research, 2016(4): 51-57. (in Chinese)
- [44] 荣辉, 钱春香, 张磊, 等. 微生物水泥的胶结过程[J]. 硅酸盐学报, 2015, 43(8): 1067-1075.
RONG H, QIAN C X, ZHANG L, et al. Cementation process of microbe cement [J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2015, 43(8): 1067-1075. (in Chinese)
- [45] 荣辉, 钱春香, 张磊, 等. 制备工艺对微生物水泥基材料性能的影响[J]. 功能材料, 2015, 46(Sup1): 57-62.
RONG H, QIAN C X, ZHANG L, et al. Effect of preparation process on properties of microbial cement-based materials [J]. Journal of Functional Materials, 2015, 46(Sup1): 57-62. (in Chinese)
- [46] Ning Lu, LikosWilliam J. 非饱和土力学[M]. 北京: 高等教育出版社, 2012.
NING L, WILLIAM J L. Unsaturated soil mechanics [M]. Beijing: Higher Education Press, 2012. (in Chinese)
- [47] 雷涛. 石质文物保护材料评价方法研究[D]. 兰州: 兰州理工大学, 2010.
LEI T. Study on evaluation method of stone cultural relics protection materials [D]. Lanzhou: Lanzhou University of Technology, 2010. (in Chinese)
- [48] 郭青林, 周杰, 裴强强, 等. 电导率在土遗址易溶盐快速测定中的研究与应用[J]. 地下空间与工程学报, 2019, 15(3): 891-901.
GUO Q L, ZHOU J, PEI Q Q, et al. Study and application of electrical conductivity to rapid determination of salt content in earthen sites [J]. Chinese Journal of Underground Space and Engineering, 2019, 15(3): 891-901. (in Chinese)
- [49] 李广信, 张丙印, 于玉贞. 土力学[M]. 2版. 北京: 清华大学出版社, 2013.
LI G X, ZHANG B Y, YU Y Z. Soil mechanics [M]. 2nd ed. Beijing: Tsinghua University Press, 2013. (in Chinese)
- [50] 吴超传, 郑俊杰, 赖汉江, 等. 微生物固化砂土强度增长机理及影响因素试验研究[J]. 土木与环境工程学报, 2020, 42(1): 31-38.
WU C C, ZHENG J J, LAI H J et al. Experiential study of the strength enhancing mechanism of bio-cemented sand and its influential factors[J]. Journal of civil and Environment Engineering, 2020, 42(1): 31-38.
- [51] IVANOV V, CHU J. Applications of microorganisms to geotechnical engineering for bioclogging and biocementation of soil insitu [J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2008, 7 (2): 139-153.
- [52] FU T Z, SARACHO A C, HAIGH S K. Microbially induced carbonate precipitation (MICP) for soil strengthening: A comprehensive review [J]. Biogeotechnics, 2023, 1(1): 100002.
- [53] BAVEYE P, VANDEVIVERE P, HOYLE B L, et al. Environmental impact and mechanisms of the biological clogging of saturated soils and aquifer materials [J]. Critical Reviews in Environmental Science and Technology, 1998, 28(2): 123-191.
- [54] WANG J P, LI X, YU H S. A micromechanical interpretation of the capillary effect of unsaturated granular material in a pendular state [M]//Computer Methods and Recent Advances in Geomechanics. Boca Raton: CRC Press, 2014: 1563-1568.
- [55] DEJONG J T, SOGA K, KAVAZANJIAN E, et al. Biogeochemical processes and geotechnical applications: progress, opportunities and challenges [J]. Géotechnique, 2013, 63(4): 287-301.
- [56] BOUWER H. Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering [J]. Hydrogeology Journal, 2002, 10(1): 121-142.
- (编辑 XXX)