

DOI: 10.11835/j.issn.2096-6717.2024.116



开放科学(资源服务)标识码 OSID:



明矾含量对豆酶液及其生物固化效果的影响

赖汉江^{1a,2}, 罗开伟^{1a}, 崔明娟^{1b}, 刘惠^{1a}, 史佳璇^{1a}, 钟意平^{1a}, 林驰烽^{1a}
(1. 福州大学 a. 紫金地质与矿业学院; b. 土木工程学院, 福州 350108; 2. 智能环境岩土工程
福建省闽台科技合作基地, 福州 350116)

摘要: 基于自提取豆酶液诱导碳酸钙晶体沉积的岩土体改良技术具有经济、绿色、环境友好等诸多优点,但其较高的浊度易导致生物灌浆过程中发生生物堵塞现象,使得生物固化效果较差。采用含明矾的溶剂提取豆酶液,以降低其浊度;通过豆酶液提取试验、溶液试验、砂柱固化试验并结合宏微观测试,研究不同明矾含量对豆酶液浊度、脲酶活性及生物固化效果的影响。结果表明:添加适量的明矾(如 100 g/L 的豆粉添加 3.0 g/L 的明矾)能显著降低豆酶液的浊度,且不影响其脲酶活性,但过量的明矾会导致脲酶活性降低甚至丧失。降低豆酶液浊度有利于改善其生物固化的均匀性,但对所诱导沉积碳酸钙晶体的类型及结晶度并无明显影响。

关键词: 脲酶诱导碳酸钙晶体沉积;豆酶液;明矾;浊度;脲酶活性;生物固化

中图分类号: TU472.99 **文献标志码:** A **文章编号:** 2096-6717(2026)02-0001-07

Effect of alum content on soybean urease solution and its biocementation

LAI Hanjiang^{1a,2}, LUO Kaiwei^{1a}, CUI Mingjuan^{1b}, LIU Hui^{1a}, SHI Jiaxuan^{1a},
ZHONG Yiping^{1a}, LIN Chifeng^{1a}

(1a. Zijin School of Geology and Mining; 1b. College of Civil Engineering, Fuzhou University, Fuzhou 350108,
P. R. China; 2. Fujian-Taiwan Science and Technology Cooperation Base of Fujian Province on Intelligent
Geo-environmental Engineering, Fuzhou 350116, P. R. China)

Abstract: Enzyme induced carbonate precipitation (EICP) technique for soil improvement using self-extracted soybean urease solution to induce calcium carbonate precipitation has various advantages such as economic, ecological and environmental considerations. However, the high turbidity of the self-extracted soybean urease solution easily leads to bioclogging during the biogroutting process, resulting in poor biocementation. In this study, an alum-containing solvent was used for the extraction of soybean urease solution to reduce its turbidity. Incorporating soybean urease extraction, solution tests, and sand column solidification with macro- and micro-scale tests were carried out to investigate the effects of alum content on turbidity and biocementation of the extracted

收稿日期: 2024-07-19

基金项目: 国家自然科学基金(42477160、52178319、52108307、51708243);福建省自然科学基金(2022J05020、2022J05127)

作者简介: 赖汉江(1987-),男,教授,博士生导师,主要从事生物岩土理论基础与技术研究,E-mail: laihj@fzu.edu.cn。

崔明娟(通信作者),女,博士,副研究员,E-mail: cuimj@fzu.edu.cn。

Received: 2024-07-19

Foundation items: National Natural Science Foundation of China (Nos. 42477160, 52178319, 52108307, 51708243); Natural Science Foundation of Fujian Province (Nos. 2022J05020, 2022J05127)

Author brief: LAI Hanjiang (1987-), professor, doctoral supervisor, main research interests: basic theory and technology development of biogeotechnics, E-mail: laihj@fzu.edu.cn.

CUI Mingjuan (corresponding author), PhD, associate professor, E-mail: cuimj@fzu.edu.cn.

soybean urease solution. The results indicate that the addition of an appropriate amount of alum (e.g., 3.0 g/L for 100 g/L soybean powder content) can effectively reduce the turbidity of the self-extracted soybean urease solution without affecting its urease activity. However, excessive amount of alum may lead to a reduction or even loss of urease activity. The use of a low-turbidity soybean urease solution is beneficial in improving the uniformity of its biocementation, without an apparent effect on the morphology and crystallinity of the precipitated calcium carbonate crystals.

Keywords: enzyme induced carbonate precipitation (EICP); soybean urease solution; alum; turbidity; urease activity; biocementation

生物固化技术是岩土工程领域新兴的岩土体改良技术,该技术利用产脲酶菌^[1]或脲酶^[2-4]水解尿素,诱导具有胶结及填充作用的碳酸钙晶体沉积,将松散的岩土体胶结成整体并填充其内部孔隙,达到改善岩土体工程特性的目的。其中,基于游离脲酶的EICP(enzyme induced carbonate precipitation)技术,因不存在生物安全风险、无需考虑是否有氧、能处理更小粒径土体等优势,推广应用前景广阔,近年来受到学者的广泛关注。

一般而言,脲酶可通过3种方式获得:商业购买^[5-6];从产脲酶菌菌液中自提取^[7-9],即菌源脲酶;从富含脲酶的植物种子中自提取^[10-13],即植物源脲酶。商业购买的脲酶纯度高、活性高,但价格昂贵,大规模工程应用成本高昂;菌源脲酶的纯度及活性也较高,但涉及产脲酶菌的活化、培育,需具备较高的生物操作技能;从植物种子中自提取脲酶一般只需将植物种子粉浸泡后过滤或离心即可获得,兼具成本低、操作简便的优势,近年来受到广泛关注。例如, Dilrukshi等^[10]从西瓜、南瓜等植物种子中获取植物脲酶用于生物固化砂土。但另一方面,从植物种子中自提取获得的植物脲酶液存在浊度高的不足,对生物固化均匀性影响显著。为此,诸多学者尝试通过添加外加剂(如 $\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$ ^[11]、 CaCl_2 ^[12]、酒精^[13]等)降低自提取植物源脲酶液的浊度。Lai等^[13]将含乙醇溶液作为溶剂,从黄豆粉中提取大豆粗脲酶液(以下简称豆酶液),发现添加体积分数为20%~30%的乙醇能获得具有较高脲酶活性和纯度的豆酶液。然而,既有研究中用于豆酶液提取的化学物质或多或少存在价格高或提取效果不佳的问题,寻找更低成本、更高效率的豆酶液提取试剂对推进该技术的工程应用具有重要意义。

明矾($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)是一种常见的净水剂,溶于水后形成具有强吸附性的 $\text{Al}(\text{OH})_3$,能吸附溶液中的悬浮杂质并使其沉积。笔者尝试采用明矾配制用于从黄豆粉中提取豆酶液的溶剂,通过对提取的豆酶液浊度和脲酶活性的测试,探究明矾含量对豆酶液提取效果的影响。在此基础上,采用通

过不同明矾含量溶剂提取的豆酶液配制生物处理液,开展溶液试验和砂柱固化试验,通过对生物处理液pH值、钙离子转化率及砂柱无侧限抗压强度的测定,研究不同明矾含量条件下豆酶液提取对砂土生物固化效果的影响;通过微观测试分析,探讨EICP固化土微观结构特征及其固化机理。

1 试验材料及方法

1.1 试验材料

试验用豆粉为市售黄豆粉,过0.1 mm筛后封装,置于4℃冰箱保存备用。试验用硅砂粒径为0.6~0.85 mm($G_s=2.65$ 、 $e_{\max}=1.146$ 、 $e_{\min}=0.701$ 、 $C_u=1.14$ 、 $C_c=0.96$),其级配曲线如图1所示。试验用豆酶液提取剂为含明矾($\text{KAl}(\text{SO}_4)_2 \cdot 12\text{H}_2\text{O}$)溶液。胶结液(4.0 mol/L)为含等摩尔氯化钙、尿素的混合液。所用明矾、尿素、氯化钙均为分析纯试剂。

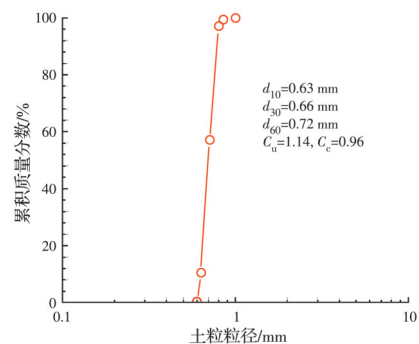


图1 试验用砂颗粒级配曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of the test sand

1.2 试验方案

1.2.1 豆酶液提取试验

为分析明矾对豆酶液提取效果的影响,以去离子水为对照组,配制明矾含量为1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、7.5、10.0、15.0、20.0 g/L的溶剂,开展豆酶液提取试验。豆酶液提取过程如图2所示,其步骤为^[13]:1)称取一定质量明矾,将其溶于去离子水中,配制成溶剂;2)称取一定质量豆粉(100 g/L),加入按步骤1)配制的溶剂中,置于磁力搅拌器上搅



图2 豆酶液提取过程

Fig. 2 Extraction process of the soybean urease solution

拌 30 min;3)将豆粉悬浊液放入 4℃冰箱中静置 12 h;4)取上清液在 4℃、10 000 r/min 条件下离心 15 min;5)收集离心后的上清液(即豆酶液),并测定其浊度、脲酶活性和 pH 值。其中,豆酶液浊度采用浊度仪(INESA, WGZ-2000B)直接测定,脲酶活性基于尿素水解法测定。

1.2.2 溶液试验

为明确明矾含量对所提取豆酶液诱导碳酸钙沉积过程的影响,采用明矾含量为 0(对照组)、1.0、1.5、2.0、3.0、4.0、5.0、7.5、10.0 g/L 的溶剂提取豆酶液,并将其与胶结液混合,配制成 EICP 处理液,开展溶液试验。试验过程为:1)将豆酶液与 4.0 mol/L 胶结液按体积比 3:1 混合,配制成含 1.0 mol/L 尿素-Ca²⁺的 EICP 处理液(120 mL);2)将 EICP 处理液放置在室温((25±1)℃)条件下并监测其 pH 值随时间的变化;3)放置 24 h 后,采用 EDTA 滴定法测定处理液的 Ca²⁺浓度并计算 Ca²⁺转化效率;4)采用自来水浸泡沉积物以去除其中残留的化学物质,而后通过烘干法测定沉积物总质量(105℃下烘干至恒重);5)根据 Ca²⁺转化效率及沉积物总质量,计算豆酶液中杂质含量。

1.2.3 砂柱固化试验

为探究明矾含量对所提取豆酶液生物固化效果的影响,将与 1.2.2 节相同明矾含量溶剂提取的豆酶液与胶结液混合,配制成处理液,开展砂柱固化试验。砂柱固化试验共设置 9 组,每组设 3 个平行试样,试样直径为 50 mm、高为 100 mm。试验过程为:1)采用落雨法将一定质量干砂分 3 层装入 PVC 管,并压实至 100 mm 高(未固化试样的孔隙比 $e=0.87$);2)将豆酶液与 4.0 mol/L 胶结液按体积比 3:1 混合,配制成含 1.0 mol/L 尿素-Ca²⁺的处理液,并立即注入试样内(每次处理均注入 1.2 倍初始孔隙体积处理液,多余处理液从试样底部排出);3)将试样放置在室温((25±1)℃)条件下养护 24 h;

4)重复步骤 2)和步骤 3),直至完成 3 次处理。

1.3 测试方法

1.3.1 豆酶液浊度及脲酶活性

豆酶液浊度通过便携式浊度仪(WGZ-500B)测得。豆酶液脲酶活性采用电导率法测定,其步骤为^[13]:1)将浓度为 1.11 mol/L 的尿素溶液与待测液按体积比 9:1 混合,而后立即采用电导率仪(DDS-307B)监测混合液的电导率变化;2)待电导率的变化率相对稳定后,根据式(1)计算豆酶液脲酶活性 U_b 。

$$U_b = \Delta\sigma \times 10 \times 11.1 \quad (1)$$

式中: $\Delta\sigma$ 为电导率变化值;10 为大豆粗脲酶液的稀释倍数;11.1 为系数,即 1 mS/min 的电导率变化率对应 11.1 U 的脲酶活性。每组豆酶液浊度及脲酶活性均重复测 3 次,取其均值为测试值。

1.3.2 钙离子浓度

处理液 Ca²⁺浓度采用 EDTA 滴定法测定,其步骤为^[14]:1)烧杯中加入 10 mL 去离子水、0.15 mL 钙羧酸指示剂和 8~10 滴 pH 缓冲剂(此时溶液呈蓝色),并持续搅拌;2)加入一定体积待测液(若待测液中含 Ca²⁺,溶液将变成红色);3)通过滴定装置逐滴加入 0.01 mol/L 的 EDTA 标准液,直到溶液由红色转变成蓝色时停止滴定。而后,可根据式(2)计算出待测液的钙离子浓度 C_m ,并通过式(3)计算出钙离子转化率 E_{Cal} 。

$$C_m = 0.01 \times V_{EDTA} / V_t \quad (2)$$

$$E_{Cal} = (C_0 - C_m) \times 100\% / C_0 \quad (3)$$

式中: V_{EDTA} 为滴定试验中消耗的 EDTA 标准液体积; V_t 为加入的待测液体积;0.01 为 EDTA 标准液浓度; C_0 为 EICP 处理液初始的 Ca²⁺浓度; C_m 为待测液的 Ca²⁺浓度。

1.3.3 生物固化砂柱的宏微观特性

完成砂柱固化后,用自来水对试样进行至少 5 次冲洗,以去除试样内残留的化学物质。而后立即

拆模,并以 1.0 mm/min 的加载速率对固化砂柱开展无侧限抗压强度测试,取峰值压力为试样的无侧限抗压强度。收集试样所有碎块,放入 105 °C 烘箱中烘干至恒重,并进行固化试样的碳酸钙含量和微观结构测试。

固化试样的碳酸钙含量采用酸洗法测定,步骤为:1)取一定质量(m_1)试样,加入浓度为 2.0 mol/L 的盐酸将试样完全溶解;2)采用自来水将溶解的试样冲洗干净,并放入 105 °C 烘箱中烘干至恒重,其质量记为 m_2 。而后,根据式(4)计算试样的碳酸钙含量 C_c 。

$$C_c = \frac{m_1 - m_2}{m_1} \times 100\% \quad (4)$$

在各固化砂柱上中下位置分别取 3 份试样,测定其碳酸钙含量,并取其均值作为砂柱各位置的碳酸钙含量值。

取烘干试样进行扫描电镜(SEM)和 X 射线衍射(XRD)测试。其中,SEM 测试前将烘干试样制成约 1 cm³ 的方块,喷金 30 s 后进行 SEM 测试,以分析固化试样内碳酸钙晶体的形态及分布情况。XRD 测试时,将试样磨碎后过 0.075 mm 筛,获取脲酶诱导沉积的碳酸钙晶体,而后进行 XRD 测试,以分析酶诱导沉积碳酸钙晶体的类型及结晶度。

2 试验结果与分析

2.1 豆酶液性质

图 3 为不同明矾含量条件下所提取豆酶液的照片。从图 3 可看出,采用含明矾溶剂能明显降低豆酶液的浊度。整体而言,豆酶液的浊度随明矾含量的增大而减小,并在明矾含量超过 3.0 g/L 后达到相对稳定。其中,未添加明矾(即采用去离子水为溶剂)所提取豆酶液的浊度约 2 000 NTU,含 3.0 g/L 明矾溶剂所提取豆酶液的浊度约 100 NTU,比未添加明矾时降低了 95%。图 4 所示为不同明矾含量条件下豆酶液的浊度及脲酶活性。在明矾含量为 0~3.0 g/L 的范围内,脲酶活性基本保持稳定,约为 6.0 mmol/min。而后,脲酶活性随明矾含量的增加而减小,并在明矾含量增至 10 g/L 左右时降至 0。出现上述现象的原因可能主要包括以下两方面:

1)明矾在溶液中会电离产生 Al^{3+} ,并进一步水解($Al^{3+} + 3H_2O \rightleftharpoons Al(OH)_3 + 3H^+$)形成具有较强吸附性的 $Al(OH)_3$ 胶体,该胶体能凝聚溶液中的悬浮杂质及胶体使其沉积,从而降低所提取豆酶液的浊度。同时,脲酶分子(尺寸约 12 nm)也是一种胶体,也可能被 $Al(OH)_3$ 胶体凝聚沉积,尤其是在明矾含

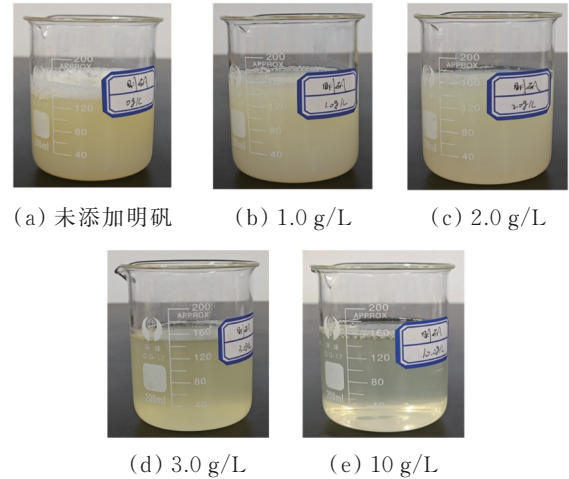


图 3 不同明矾含量条件下提取的豆酶液

Fig. 3 Soybean urease solution extracted under different alum contents

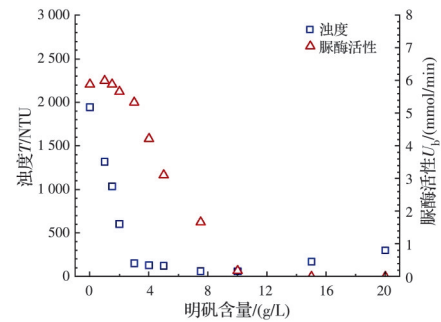


图 4 明矾含量对豆酶液浊度和脲酶活性的影响

Fig. 4 Effect of alum content on turbidity and urease activity of soybean urease solution

量较高时,从而导致所提取豆酶液的脲酶活性降低。

2)如 Al^{3+} 水解方程所示, Al^{3+} 水解会产生 H^+ 。如图 5 所示,豆酶液 pH 值随明矾含量的增加呈降低趋势,尤其是明矾含量超过 3.0 g/L 时。Lai 等^[15]指出,脲酶的活性会随溶液 pH 值的降低而降低。因此,高明矾含量条件下,豆酶液较低的 pH 值也是其活性降低的一个重要因素。

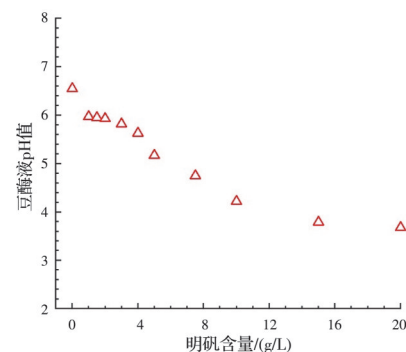


图 5 不同明矾含量豆酶液 pH 值

Fig. 5 pH values of soybean urease solution extracted with different alum content

2.2 豆酶诱导碳酸钙沉积特性

图 6 所示为溶液试验中处理液 pH 值随时间的变化规律。整体而言,处理液的 pH 值随时间的增长均呈先增大而后趋于稳定的变化规律。各工况处理液的初始 pH 值存在一定差异,即明矾含量越高、初始 pH 值越低,这主要是因为明矾含量较高时豆酶液的 pH 值较低(图 5)。尽管如此,各工况处理液的最终 pH 值并无明显差异,且都接近中性状态,该现象与酶水解尿素诱导碳酸钙晶体沉积过程中的生化反应相关^[14]。

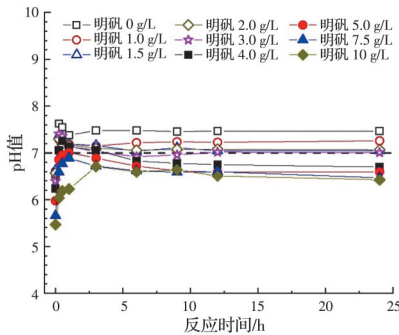


图 6 处理液 pH 值随时间的变化

Fig. 6 Variation of pH values of biotreatment solution over time

图 7 所示为溶液试验中碳酸钙产量、杂质质量及 Ca^{2+} 转化率 E_{cal} 之间的关系。120 mL 浓度为 1.0 mol/L 的 EICP 处理液,在 Ca^{2+} 完全转化条件下能产出 12 g 碳酸钙。如图 7 所示,明矾含量小于 3.0 g/L 工况的碳酸钙产量均约 10 g、 E_{cal} 约 80%;明矾含量超过 3.0 g/L 后,碳酸钙产量及 E_{cal} 均随明矾含量的增加而降低,在明矾含量达到 10 g/L 时几乎均降至 0。该规律与图 4 所示豆酶液的脲酶活性相一致,表明碳酸钙产量及 E_{cal} 均与豆酶液脲酶活性呈正相关。图 7 表明,处理液中杂质的质量随明矾含量的增加而呈降低趋势,该结果与图 4 所示豆酶液浊度随明矾含量增加的变化规律一致,一定程度上证明了豆酶液的浑浊现象是其中的杂质所致。

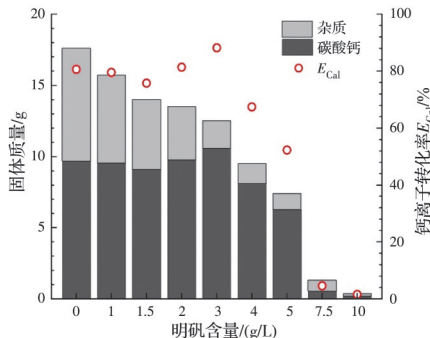


图 7 溶液试验沉积物质量及钙离子转化率

Fig. 7 Precipitate mass and calcium ion conversion efficiency obtained from solution tests

2.3 豆酶固化砂柱宏的微观特性

2.3.1 碳酸钙含量及分布

图 8 所示为不同明矾含量条件下提取的豆酶液与胶结液混合配制的处理液固化砂柱(以下简称不同明矾含量工况固化砂柱)不同高度处的碳酸钙含量 C_c 及其均值。从图 8 可以看出,明矾含量 ≤ 2.0 g/L 时,固化砂柱的碳酸钙沿砂柱高度呈明显的不均匀分布,砂柱顶部的碳酸钙含量明显比中下部高;而明矾含量 ≥ 3.0 g/L 时,固化砂柱上中下部碳酸钙含量差异并不明显,即碳酸钙沿试样高度方向的分布较均匀。该差异与注浆过程中是否出现生物堵塞密切相关。对于明矾含量 ≤ 2.0 g/L 的工况,因处理液中含杂质较多(图 7),注浆过程中能观察到明显的堵塞现象,该现象使大量脲酶分子积聚在靠近注浆口的区域,导致脲酶分子沿试样高度方向分布不均。一般认为,EICP 过程是以脲酶分子为成核位点诱导碳酸钙晶体沉积,脲酶分布不均将直接导致其所诱导沉积的碳酸钙晶体分布不均。

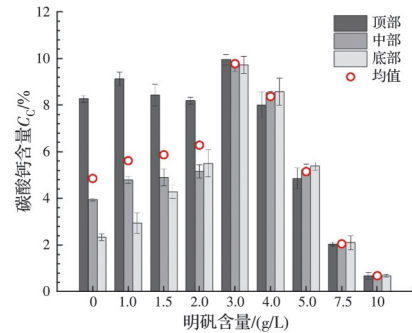


图 8 固化砂柱的碳酸钙含量

Fig. 8 Calcium carbonate content of solidified sand columns

2.3.2 无侧限抗压强度

图 9 所示为不同明矾含量工况下固化砂柱的无侧限抗压强度 q_{uc} 与碳酸钙含量 C_c 的关系。其中,明矾含量为 10 g/L 工况下砂柱在拆模时即已破坏,故其 q_{uc} 记为 0。整体而言,固化砂柱的 q_{uc} 与 C_c 正相关,即 C_c 越高 q_{uc} 越大。同时,在相同 C_c 条件下,不

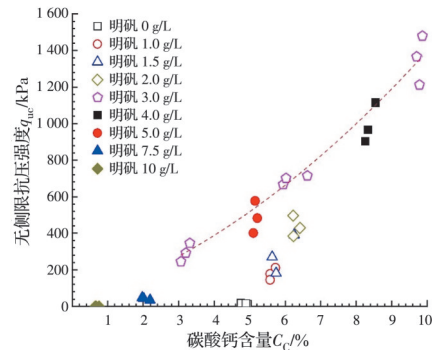


图 9 固化砂柱的无侧限抗压强度与碳酸钙含量关系

Fig. 9 Unconfined compressive strength versus calcium carbonate content of solidified sand columns

同工况下砂柱的 q_{uc} 存在一定差异。对于明矾含量小于 3.0 g/L 的工况, 相同 C_c 条件下, 砂柱的 q_{uc} 随明矾含量的降低呈减小趋势, 这主要是碳酸钙沿固化试样高度分布不均(图 8)所致^[13]。而对于明矾含量高于 3.0 g/L 的工况, 如图 9 所示, 相同 C_c 条件下, 不同工况下固化砂柱的 q_{uc} 并无明显差异。

2.3.3 微观结构特征

图 10 为不同明矾含量工况下固化砂柱的 SEM 图。从图 10 能观察到大量菱形晶体沉积在砂颗粒表面或相邻砂颗粒间。与此同时, 在明矾含量为 3.0 g/L(图 10(c)) 和 7.5 g/L(图 10(d)) 的工况下还分别观察到球形和无定形晶体。尽管如此, XRD 测试结果(图 11)显示, 各工况中的沉积物均为方解石。从图 11 能看出, 不同工况下衍射峰的峰值并无明显差异, 且均出现在衍射角 $2\theta=29.325^\circ$ 位置。此外, 各工况下碳酸钙晶体的尺寸大小不一, Cui 等^[16] 提出, 碳酸钙晶体的尺寸因新诱导沉积晶体的不断堆积而逐渐增大, 也就是说, 碳酸钙晶体尺寸与碳酸钙含量密切相关。从图 9 可以看出, 明矾含量为 0、1.0、7.5 g/L 工况下固化砂柱的碳酸钙含量较明矾含量为 3.0 g/L 工况下低, 这可能是导致图 10 所示各工况碳酸钙晶体尺寸存在差异的一个重要原因。从图 10 还能观察到, 未添加明矾处理的试样(图 10(a)) 和提取剂中含有过量明矾处理的试样(图 10(d)) 颗粒间孔隙较大, 砂颗粒间接触点位处碳酸钙晶体较少; 而在明矾含量为 3.0 g/L(图 10(c)) 工况中, 砂颗粒接触点位处碳酸钙明显增多, 部分

附着在砂颗粒表面的碳酸钙不断堆积、增厚, 形成更大尺寸的碳酸钙晶体, 从而形成与相邻砂颗粒间的胶结。该现象可能是明矾含量 3.0 g/L 工况下生物固化砂柱强度较高的另一原因。

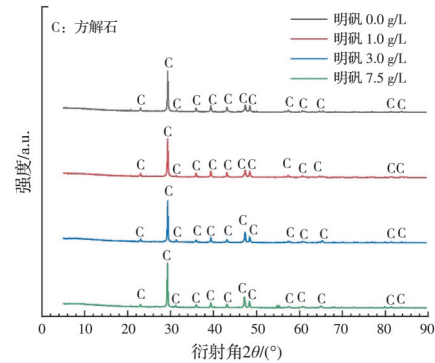


图 11 固化砂柱沉积物 XRD 图谱

Fig. 11 XRD results of precipitates obtained from biocemented sand columns

此外, Lai 等^[17] 总结了大量研究成果发现, 生物固化土的强度增长主要与碳酸钙晶体的含量、分布均匀性、晶体类型与结晶度等因素有关。SEM(图 10) 和 XRD(图 11) 测试结果显示, 采用不同明矾含量溶剂所提取豆酶液对诱导沉积碳酸钙晶体的类型与结晶度影响并不明显。因此, 如图 8、图 9 所示, 在碳酸钙晶体含量相同且分布相对较为均匀的条件下, 明矾含量对砂柱的生物固化效果影响并不明显。

3 结论

通过开展豆酶液提取试验、溶液试验和砂柱固化试验, 探究基于明矾的豆酶液提取及生物固化效果, 主要结论如下:

1) 添加明矾能显著降低所提取豆酶液的浊度, 对于 100 g/L 豆粉含量, 明矾含量达到 3.0 g/L 后所提取豆酶液浊度趋于稳定; 过量的明矾会导致豆酶液脲酶活性降低, 尤其是当明矾含量超过 3.0 g/L 后, 该观察尤为明显, 在明矾含量达到 10 g/L 后降低至 0, 该现象可能与过量明矾导致脲酶分子被絮凝沉积和溶液 pH 值降低有关。

2) 在试验关注的明矾含量内, 采用不同明矾含量提取的豆酶液会影响所配制生物处理液的初始 pH 值、碳酸钙产量(钙离子转化效率)及杂质产量, 但对生物矿化过程及所沉积碳酸钙晶体类型及结晶度的影响并不明显。

3) 对于试验所用砂土, 采用明矾含量高于 3.0 g/L 溶剂提取的豆酶液配制的处理液进行生物固化处理, 能有效避免注浆过程中发生生物堵塞, 进而提高生物固化砂柱的均匀性和无侧限抗压强度。

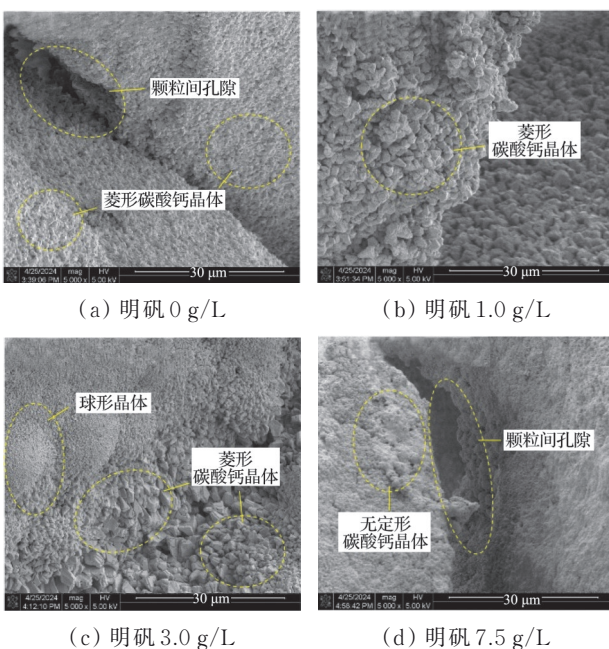


图 10 豆酶液固化砂试样 SEM 图像

Fig. 10 SEM images of soybean urease solution biocemented sand samples

参考文献

- [1] 刘汉龙,肖鹏,肖杨,等. MICP胶结钙质砂动力特性试验研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(1): 38-45.
LIU H L, XIAO P, XIAO Y, et al. Dynamic behaviors of MICP-treated calcareous sand in cyclic tests [J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40(1): 38-45. (in Chinese)
- [2] LIU Y, GAO Y F, HE J, et al. An experimental investigation of wind erosion resistance of desert sand cemented by soybean-urease induced carbonate precipitation [J]. Geoderma, 2023, 429: 116231.
- [3] WANG H X, SUN X H, MIAO L C, et al. Garlic extract addition for soil improvement at various temperatures using enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) method [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2023, 15(12): 3230-3243.
- [4] CUI M J, LAI H J, WU S F, et al. Comparison of soil improvement methods using crude soybean enzyme, bacterial enzyme or bacteria-induced carbonate precipitation [J]. Géotechnique, 2024, 74(1): 18-26.
- [5] YASUHARA H, NEUPANE D, HAYASHI K, et al. Experiments and predictions of physical properties of sand cemented by enzymatically-induced carbonate precipitation [J]. Soils and Foundations, 2012, 52(3): 539-549.
- [6] ARAB M G, ROHY H, ZEIADA W, et al. One-phase EICP biotreatment of sand exposed to various environmental conditions [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2021, 33(3): 04020489.
- [7] HOANG T, ALLEMAN J, CETIN B, et al. Sand and silty-sand soil stabilization using bacterial enzyme-induced calcite precipitation (BEICP) [J]. Canadian Geotechnical Journal, 2019, 56(6): 808-822.
- [8] HE J, GAO Y F, GU Z X, et al. Characterization of crude bacterial urease for CaCO_3 precipitation and cementation of silty sand [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32(5): 04020071.
- [9] CUI M J, LAI H J, HOANG T, et al. One-phase-low-pH enzyme induced carbonate precipitation (EICP) method for soil improvement [J]. Acta Geotechnica, 2021, 16(2): 481-489.
- [10] DILRUKSHI R A N, WATANABE J, KAWASAKI S. Sand cementation test using plant-derived urease and calcium phosphate compound [J]. Materials Transactions, 2015, 56(9): 1565-1572.
- [11] SHU S, YAN B Y, GE B, et al. Factors affecting soybean crude urease extraction and biocementation via enzyme-induced carbonate precipitation (EICP) for soil improvement [J]. Energies, 2022, 15(15): 5566.
- [12] YAN B Y, ZHOU Y D, LI C, et al. Modified SICP method to mitigate the effect of bio-clogging by excess protein from soybean crude urease extracts for biocementation process [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(9): 5047-5062.
- [13] LAI H J, CUI M J, WU S F, et al. Extraction of crude soybean urease using ethanol and its effect on soil cementation [J]. Soils and Foundations, 2023, 63(3): 101300.
- [14] WENG Y J, ZHENG J J, LAI H J, et al. Biomineralization of soil with crude soybean urease using different calcium salts [J]. Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering, 2024, 16(5): 1788-1798.
- [15] LAI H J, CUI M J, CHU J. Effect of pH on soil improvement using one-phase-low-pH MICP or EICP biocementation method [J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(6): 3259-3272.
- [16] CUI M J, ZHENG J J, ZHANG R J, et al. Influence of cementation level on the strength behaviour of biocemented sand [J]. Acta Geotechnica, 2017, 12(5): 971-986.
- [17] LAI H J, DING X Z, CUI M J, et al. Factors affecting the effectiveness of biocementation of soil [J]. Biogeotechnics, 2024, 2(3): 100087.

(编辑 胡英奎)