

doi:10.11835/j.issn.2096-6717.2020.096

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



# 海水环境下微生物诱导磷酸盐沉淀加固钙质砂效果评价

董博文<sup>a</sup>, 刘士雨<sup>a,b</sup>, 高歌雨<sup>a</sup>, 王闰锐<sup>a</sup>

(华侨大学 a. 福建省隧道与城市地下空间工程技术研究中心; b. 福建省智慧基础设施与监测重点实验室, 福建 厦门 361021)

## Evaluation of effect of microbial induced struvite precipitation strengthening calcareous sand in seawater environment

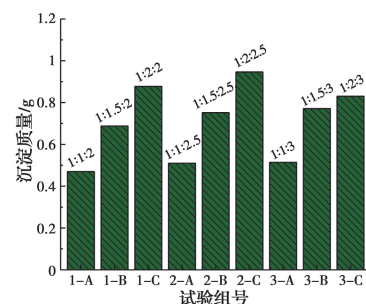
Dong Bowen<sup>a</sup>, Liu Shiyu<sup>a,b</sup>, Gao Xinyu<sup>a</sup>, Wang Runkai<sup>a</sup>

(a. Fujian Research Center for Tunneling and Urban Underground Space Engineering; b. Key Laboratory for Intelligent Infrastructure and Monitoring of Fujian Province, Huaqiao University, Xiamen 361021, Fujian, P. R. China)

微生物岩土技术被广泛应用于岩土材料的改良和加固<sup>[1-2]</sup>, 其中, 利用微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP)加固钙质砂已经取得良好的效果<sup>[3]</sup>。但传统 MICP 过程中, 副产物  $\text{NH}_4^+$  难以回收, 大面积应用时会对环境产生严重威胁。为了消除  $\text{NH}_4^+$  的不利影响, 可对 MICP 技术进行改进, 使  $\text{NH}_4^+$  反应生成鸟粪石(MAP), 以此作为矿化产物进行钙质砂的矿化处理, 达到加固钙质砂的目的。鉴于此, 笔者研究了模拟海水环境下微生物诱导 MAP 沉淀(MISP)加固钙质砂的效果及其影响因素。

为最大限度消除  $\text{NH}_4^+$  的不利影响, 必须提高 MAP 的产率, 回收多余的  $\text{NH}_4^+$ 。MAP 沉淀的产率主要受 pH 值和 N、P、Mg 比例的调控。为保证 MAP 的产率, 将反应体系的 pH 值控制在 8.5~9.0。在既有研究基础上<sup>[4-5]</sup>, 设置 9 个 N:P:Mg 物质的量比例不同的试验组, 控制 N 的物质的量比值为 1, P 的比值分别为 1、1.5、2, Mg 的比值为 2、2.5、3。每个试验组按比例配置 50 mL 溶液, 包括 48 mL 尿素(2 mmol)、 $\text{K}_2\text{HPO}_4$ 、 $\text{MgCl}_2$  的混合溶液和 2.0 mL  $\text{OD}_{600}$  值为 1.7 的巴氏芽孢杆菌菌液, 培养矿化 7 d 后收集全部沉淀物, 冲洗、烘干。沉淀物的质量如图 1 所示。2-C 组(N:P:Mg=1:2:2.5)的沉淀质量最高且沉淀物为纯净的 MAP, 没有出现其他副产物(图 2), 而其他试验组中检测到磷酸镁和

碳酸镁的吸收峰, 还有一些非晶体物质, 这不利于  $\text{NH}_4^+$  的最大化去除。因此, 将 N、P、Mg 的比例设置为 1:2:2.5, 并以此作为后续钙质砂加固试验 N、P、Mg 的最佳比例。



注: 柱状图上方的数字为 N、P、Mg 的比例  
图 1 不同试验组的沉淀产量

在 N、P、Mg 的最佳比例下, 进行模拟海水环境下钙质砂加固试验。南海海水的平均盐度为 3.5%, 因此, 在处理溶液中添加 0.6 mol/L 的 NaCl 模拟海水盐度, 并与不添加 NaCl 的试验组对比分析。采用蠕动泵在钙质砂砂柱中先注入 55 mL (1.5 PV) 的 A 液(巴氏芽孢杆菌菌液和 NaCl、 $\text{K}_2\text{HPO}_4$  溶液), 再注入 55 mL B 液( $\text{MgCl}_2$  和 NaCl、尿素溶液), 注浆速率为 1 mL/min, 静置 24 h, 为一个轮次。每个试验组设置 3 个平行试样, 分别进行 3、4、5、6 轮次的矿化处理。矿化完成后, 经过冲洗、烘干、拆模, 得到

收稿日期: 2020-07-12

基金项目: 国家自然科学基金(51978292); 福建省自然科学基金(2019J01048); 华侨大学研究生科研创新基金(18014086010)

作者简介: 董博文(1996-), 男, 主要从事微生物岩土材料与工程研究, E-mail: hqudbw@stu.hqu.edu.cn.  
刘士雨(通信作者), 男, 博士, E-mail: scholarrain@163.com.

胶结完好的砂柱(图 3(a))。砂柱表面几乎全部覆盖白色的 MAP,颗粒之间的孔隙也都被 MAP 填补;对砂柱进行 UCS 测试,测试过程中砂柱内出现上下贯通的裂缝,最终发生整体剪切破坏(图 3(b))。

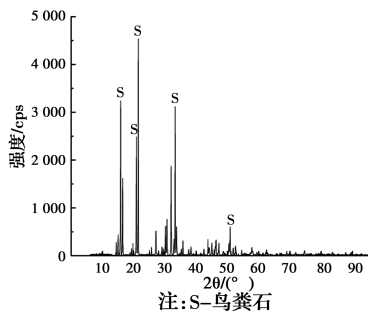


图 2 试验组 2-C 矿化产物的 XRD 分析



(a) 胶结完好的砂柱 (b) 砂柱整体剪切破坏

图 3 砂柱 UCS 测试

使用去离子水和模拟海水不同矿化轮次钙质砂柱的 UCS 试验的应力-应变曲线(图 4)表明,随着注浆轮次的增加,砂柱的平均 UCS 值不断提高;但模拟海水试验组的 UCS 值均低于对应轮次的去离子水试验组,说明模拟海水中的盐度对 MAP 生成具有一定抑制作用,盐度可能会抑制微生物在矿化过程中的生长活性,同时不利于  $Mg^{2+}$ 、 $HPO_4^{2-}$  与  $NH_4^+$  在带负电荷的细菌表面生成 MAP,限制 MAP 晶体生长,最终表现为钙质砂砂柱 UCS 值的下降。即便如此,经过 6 轮 MAP 矿化处理后,模拟海水环境下钙质砂的 UCS 值也能达到 1.2 MPa,相比原状钙质砂有显著提高,可以满足一般工程需要。

模拟海水和去离子水环境下钙质砂柱的 XRD 分析结果表明,二者钙质砂砂柱中主要成分均为文石和矿化处理后新产生的 MAP,没有其他磷镁沉淀副产物生成,处理后 MAP 的纯度良好。

模拟海水环境下钙质砂柱的 SEM(图 5)图像显示,大部分 MAP 为柱状长斜方晶型,与先前的研究结果吻合,但也出现了部分不规则的 MAP 晶体,说明盐度可能会改变 MAP 的晶体形状。不同形状的 MAP 填充了粒间孔隙,将钙质砂颗粒胶结成一个整体,这是钙质砂力学强度提高的直接原因。

模拟海水环境下 MAP 加固钙质砂效果良好,加固后钙质砂平均 UCS 值可达 1.2 MPa,证明可以用微生

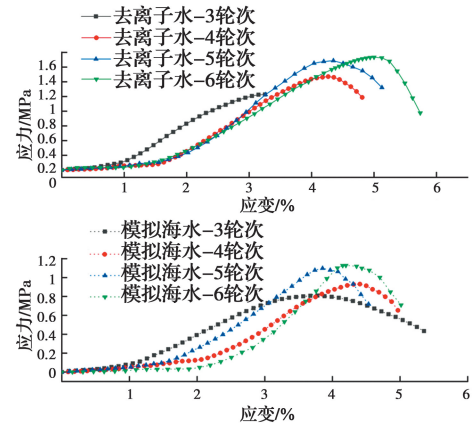


图 4 模拟海水和去离子水环境下砂柱的应力-应变曲线

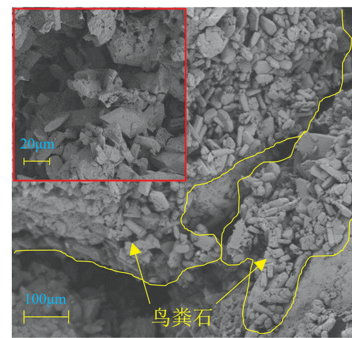


图 5 模拟海水环境钙质砂砂柱的 SEM 图像

物诱导鸟粪石矿化对南海钙质砂进行加固处理。事实上,南海鸟粪石资源非常丰富,用鸟粪石加固钙质砂具有良好的环境相容性,未来在南海岛礁建设中可以使用环保型鸟粪石作为生物矿化产物进行钙质砂地基的加固处理。

#### 参考文献:

- [1] 冉进瑜,王雪亮,汪杨,等. 微生物加固路基强度及稳定性[J]. 土木建筑与环境工程, 2018, 40(4): 128-134.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] YU X N, QIAN C X, XUE B. Loose sand particles cemented by different bio-phosphate and carbonate composite cement [J]. Construction and Building Materials, 2016, 113: 571-578.
- [5] YU X N, ZHAN Q W, QIAN C X, et al. The optimal formulation of bio-carbonate and bio-magnesium phosphate cement to reduce ammonia emission [J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 240: 118156.