

DOI: 10.11779/CJGE20240274

# 碱改性粉煤灰增强 MICP 固化砂土性能试验研究

张鹏, 李治辉, 于佳林, 宫玉辉, 唐雨孜

(1. 青岛理工大学土木工程学院, 山东 青岛 266525)

**摘要:** 碱改性粉煤灰在 MICP 技术中的应用, 能够充分发挥其吸附性能, 消减 MICP 作用过程中产生的氨氮, 为环保型土壤固化技术开辟了新的途径。本文以碱改性粉煤灰作为增强体, 开展了碱改性粉煤灰增强 MICP 固化砂土的宏观与微观试验研究, 研究内容涵盖了固菌率测定、除氨率测定、碳酸钙含量测定、单轴抗压强度测定、渗透率测定以及扫描电子显微镜 (SEM) 观测。结果表明: ①经过碱改性的粉煤灰对氨氮的去除效率显著提升, 达到了 62.6%, 相较于未改性的粉煤灰, 其吸附氨氮的能力提高了 42.2%。②碱改性粉煤灰在微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 加固砂土的过程中, 能够显著提高固菌率和胶结物的产量, 当掺量为 7% 时, 胶结物的生成比例达到了 17.3%。③碱改性粉煤灰的加入有助于增强固化体的抗压强度和抗渗性能, 当掺量为 7% 时, MICP 固化砂土的抗压强度提高了 2.6 倍, 渗透系数降低了两个数量级。

**关键词:** 碱改性粉煤灰; MICP; 固化砂土; 氨氮吸附; 机理分析

中图分类号: TU472

文献标识码: A

文章编号: G24-1280

**作者简介:** 张鹏(1985—), 男, 教授, 博士生导师, 青岛理工大学国际交流处处长, 长期致力于岩土与地下工程相关的基础理论与应用研究。E-mail: zhangpchn@qut.edu.cn。

## Experimental study on the performance of alkali modified fly ash enhanced MICP solidified sand

ZHANG Peng, LI Zhihui, YU Jialin, GONG Yuhui, TANG Yuzi

(1. School of Civil Engineering, Qingdao University of Technology, Qingdao, Shandong 266525, China)

**Abstract:** The application of alkali modified fly ash in MICP technology can fully utilize its adsorption performance, reduce the ammonia nitrogen generated during the MICP process, and open up new avenues for environmentally friendly soil solidification technology. This article conducts macroscopic and microscopic experimental research on alkali modified fly ash as a reinforcing agent to enhance MICP solidified sand. The research content covers the determination of bacterial fixation rate, ammonia removal rate, calcium carbonate content, uniaxial compressive strength, permeability, and scanning electron microscopy (SEM) observation. The results showed that: (1) The alkali modified fly ash significantly improved the removal efficiency of ammonia nitrogen, reaching 62.6%. Compared with unmodified fly ash, its ability to adsorb ammonia nitrogen increased by 42.2%. (2) During the process of microbial induced calcium carbonate precipitation (MICP) reinforcement of sandy soil, alkali modified fly ash can significantly improve the bacterial fixation rate and cement production. The bacterial fixation rate almost doubles, and when the dosage is 7%, the proportion of cement generation reaches 17.3%. (3) The addition of alkali modified fly ash helps to enhance the compressive strength and impermeability of the solidified body. When the dosage is 7%, the compressive strength of MICP solidified sand is increased by 2.6 times, and the permeability coefficient is reduced by two orders of magnitude.

**Key words:** Alkali modified fly ash; MICP; Solidified sandy soil; Ammonia nitrogen adsorption; Mechanism analysis

## 0 引言

粉煤灰是煤经高温燃烧后形成的一种类似于火山灰质的混合材料, 燃煤电厂是粉煤灰的主要产生地,

通常每消耗 4 吨煤, 就会产生 1 吨粉煤灰。2019 年中国粉煤灰产生量约为 6.55 亿吨<sup>[1]</sup>, 2023 年中国粉煤灰的产量达到 8.65 亿吨, 2013 年到 2023 年 10 年时间里

基金项目: 国家自然科学基金项目 (42177167)

收稿日期(Received): 2024-12-24

修回日期(Revised): 2025-4-15

接受日期(Accepted): 2025-6-24

网络出版日期(Online): 2025-6-25

\*通信作者 (E-mail: 943601595@qq.com)

增加了 1.5 倍之多。大部分粉煤灰被直接废弃，占据了宝贵的土地资源，对生态环境和人体健康构成了巨大威胁，因此，粉煤灰的综合利用问题受到了广泛关注。由于粉煤灰是煤炭在高温燃烧后的残留物，在形成过程中形成了多孔结构和较大的比表面积，同时自身呈碱性，并含有许多活性的铝、硅等元素，因此，粉煤灰展现出了强大的吸附能力。众多国内外学者依据其吸附性能，对水中氨氮的处理进行了深入研究<sup>[2-3]</sup>。同时，也有研究者对粉煤灰进行了改性实验，旨在提升其吸附能力<sup>[4]</sup>，以获得更佳的处理效果。

微生物诱导碳酸钙沉积技术作为一种创新的加固技术，展现了其在修复强度、环境友好性以及提升材料强度方面的显著优势。目前，国内外研究者主要将 MICP 技术应用于建筑材料领域，包括材料覆膜处理<sup>[5]</sup>、微生物砂浆<sup>[6]</sup>、建筑裂缝修复<sup>[7]</sup>等方向，并已取得显著成效。围绕 MICP 技术加固效果的影响因素，如细菌浓度<sup>[8]</sup>、胶结介质浓度<sup>[9]</sup>、pH 值<sup>[10]</sup>、温度<sup>[11]</sup>、反应时间<sup>[12]</sup>和氧气<sup>[13]</sup>等，学者们进行了大量研究，并获得了丰富的成果。Soon 等<sup>[14]</sup>的研究表明，在较低的胶结介质浓度下，方解石的形成效率更高。Zhao 等<sup>[15]</sup>发现，在胶结介质浓度较高时，尿素和钙离子的利用并不充分，高浓度的氯化钙会降低细菌酶的脲酶活性<sup>[16]</sup>。郑槐森等<sup>[17]</sup>在微生物注浆加固尾砂过程中引入同步脱氮，发现氨氮浓度与空白对照组相比降低效果并不显著。鉴于 MICP 技术在砂土加固应用中仍面临氨氮排放和菌液利用率低等问题，可以在 MICP 技术应用过程中添加吸附材料以改善这些问题，不仅可以实现废弃物的资源化利用，还能达到以废治废的目的。

本文鉴于碱改性粉煤灰优秀的吸附性能，以及本身具有碱性，这与巴氏芽孢八叠球菌在微生物诱导碳酸钙沉淀（MICP）技术中的理想生长环境相契合。因此将碱改性粉煤灰作为外加剂，应用于 MICP 技术中砂土的加固过程。在综合前人研究的基础上，确定了胶结介质浓度和加固处理方法<sup>[14-15-18]</sup>，通过宏观物理性能测试和微观实验观察，分析碱改性粉煤灰对 MICP 固化砂土的增强效果以及其作用机制。

## 1 试验与方法

### 1.1 主要试验材料

本研究采用菌株类型为巴氏芽孢八叠球菌，在液体培养基接种后，放入恒温振荡器中扩培，培育温度为 35℃，转速 200 r·min<sup>-1</sup>，培育时间为 12 h。配制培养基所需的药品如表 1。

表 1 培养基配方

Table 1 Medium formulation

| 药品名称 | 含量                   |
|------|----------------------|
| 酵母粉  | 20 g·L <sup>-1</sup> |
| 氯化铵  | 15 g·L <sup>-1</sup> |
| 氯化镍  | 1 ml·L <sup>-1</sup> |

粉煤灰取自郑州巩义某发电厂，规格为一级灰，主要成分为 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>（36.8%）、SiO<sub>2</sub>（45.1%）、CaO

（5.3%），根据《土工试验方法标准：GB/T 50123—2019》进行试验，得出基本物理参数，天然密度为 2.1 g·cm<sup>-3</sup>，堆积密度为 1.1 g·cm<sup>-3</sup>，孔隙率 47.6%。

通过碱改性技术对粉煤灰进行改良，提升粉煤灰的吸附性能。操作步骤包括：在常温下，将 50 g 粉煤灰浸泡于 500 mL、2 mol·L<sup>-1</sup> 的氢氧化钠溶液中 24 小时，然后用去离子水清洗，最后在 105℃ 下干燥 24 小时，以便后续使用。

图 1 为粉煤灰及其碱改性后的 SEM 图像。图 1a 显示未改性粉煤灰颗粒大小不均，小颗粒聚集，大颗粒表面光滑，部分粗糙不规则；图 1b 中，碱改性后粉煤灰结构松散，孔道增多，表面粗糙，比表面积提高，小颗粒聚集形成孔隙。这些变化表明碱改性提升了粉煤灰的吸附能力。

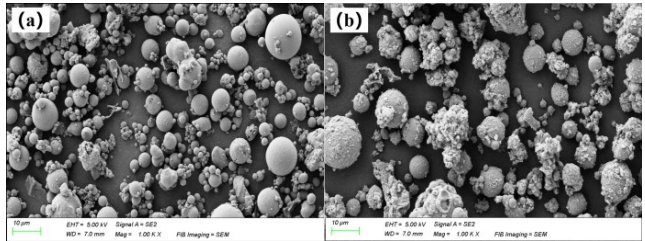


图 1 原状粉煤灰(a)及碱改性粉煤灰(b)的 SEM 形貌

Fig. 1 SEM morphology of intact fly ash (a) and alkali modified fly ash (b)

本试验采用的砂料为中国 ISO 标准石英砂，由厦门艾思欧标准砂有限公司生产，如图 2 所示。C<sub>u</sub>=5.8，C<sub>c</sub>=1，d<sub>10</sub>=0.077 mm，d<sub>30</sub>=0.185 mm，d<sub>60</sub>=0.445 mm，颗粒级配良好，级配曲线如图 3 所示。实验前对砂土进行了预处理：分别用 0.1 mol·L<sup>-1</sup> 的 HCl 溶液和相同浓度的 NaOH 溶液将砂土浸泡 24 小时，以去除其中可能存在的微生物、有机物和无机杂质。



图 2 中国 ISO 标准石英砂

Fig. 2 Chinese ISO standard quartz sand

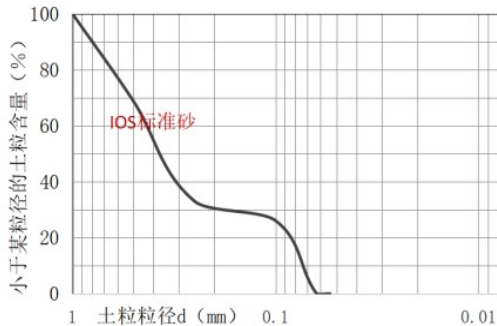


图 3 标准砂颗粒级配曲线

Fig. 3 Standard sand particle size distribution curve

1.2 砂土加固实验

为了评估粉煤灰及碱改性粉煤灰对砂土加固性能的影响,将试样分为三组: A 组作为对照组, B 组分别掺入 1%、3%、5%、7%、9% 的粉煤灰,命名为 B<sub>1</sub> 至 B<sub>5</sub>; C 组则掺入相同比例的碱改性粉煤灰,命名为 C<sub>1</sub> 至 C<sub>5</sub>。试样采用直径 50 mm、高 100 mm 的圆柱体,试验模具由 1 mm 厚的橡胶管制成,两端用双层透水纱布包裹并用橡皮筋固定,模具侧边开有直径 1 mm 的孔,通过浸泡灌浆法对砂土进行加固。

实验步骤如下:

(1) 将砂土与不同比例的材料混合后,分层装入模具中,装填结束后用双层纱布包裹并固定,然后放置于图 4 所示的容器内。(2) 制样完成后,向模具内注入细菌溶液,静置 1 小时;(3) 配置 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 的胶结液(由等体积的 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 尿素溶液和 0.5 mol·L<sup>-1</sup> 氯化钙溶液混合而成),将胶结液倒入装有试样的容器中,开启空气泵,持续向溶液内通气,浸泡 3 天。之后,将试样置于 60℃ 烘箱中烘干 8 小时以排除水分,接着清理模具钻孔中的碳酸钙,以防堵塞影响后续注浆作业。重复(2)和(3)步骤,共进行 7 次循环灌浆。待浸泡灌浆加固试验完成后,将试样置于 60℃ 烘箱中烘干 48 小时,拆模后进行后续相关试验。加固后的砂土试样如图 5 所示。



图 4 加固装置及模具

Fig. 4 Reinforcement device and mold



图 5 固化后的试样

Fig. 5 The cured sample

1.3 对氨氮的吸附性测定试验

为了研究粉煤灰及碱改性粉煤灰对氨氮的吸附性能,开展了氨氮吸附实验。通过纳氏试剂分光光度法<sup>[19]</sup>测定氨氮浓度,并依据相关公式计算其去除效率。

$$\rho_N = \frac{A_s - A_b - a}{b \times V} \tag{1}$$

式中:  $\rho_N$ ——水样中氨氮的质量浓度(mg·L<sup>-1</sup>);  
 $A_s$ ——水样的吸光度;  
 $A_b$ ——空白实验的吸光度;  
 $a$ ——校准曲线的截距;  
 $b$ ——校准曲线的斜率;  
 $V$ ——试料体积(ml)。

$$\text{去除率} = \frac{C_0 - C_n}{C_0} \times 100\% \tag{2}$$

式中:  $C_0$ ——模拟废水中原始氨氮的浓度(mg·L<sup>-1</sup>);  
 $C_n$ ——处理后溶液中氨氮的浓度(mg·L<sup>-1</sup>)。

首先,通过纳氏分光光度法测定不同氨氮含量的吸光度,并绘制出氨氮标准曲线(见图 6)。通过拟合得到的标准方程为  $y = 0.0353x + 0.008$ ,其相关系数  $R^2$  达到 0.9995。



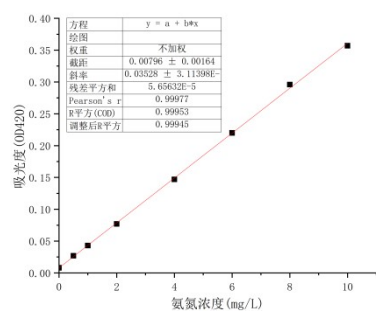


图 6 氨氮标准曲线

Fig. 6 Ammonia nitrogen standard curve

在 6 个装有氨氮废水的锥形瓶中，分别加入粉煤灰和碱改性粉煤灰进行吸附试验。每种材料重复 3 次。操作步骤包括：取 5 g 材料放入 250 mL 锥形瓶，加入 50 mL 模拟氨氮废水，振荡 2 小时后，用分光光度计测量 420 nm 波长处的吸光度。根据公式（1）、（2）计算氨氮去除效率，结果见表 2。

表 2 粉煤灰和碱改性粉煤灰对氨氮的去除率

Table 2 Removal rate of ammoniac nitrogen by fly ash and alkali modified fly ash

| 材料名称       | 吸光度   | $\rho_N$ | 去除率(%) |
|------------|-------|----------|--------|
| 模拟氨氮废水     | 1.158 | 0.647    |        |
| 粉煤灰 1      | 0.643 |          |        |
| 粉煤灰 2      | 0.677 |          |        |
| 粉煤灰 3      | 0.645 |          |        |
| 粉煤灰 (均值)   | 0.655 | 0.362    | 44.0   |
| 碱改性粉煤灰 1   | 0.421 |          |        |
| 碱改性粉煤灰 2   | 0.458 |          |        |
| 碱改性粉煤灰 3   | 0.450 |          |        |
| 改性粉煤灰 (均值) | 0.443 | 0.242    | 62.6   |

由表 2 可知，粉煤灰和碱改性粉煤灰对氨氮吸附率分别达到了 44%和 62.6%。相较于未处理的粉煤灰，碱改性粉煤灰的吸附效率提升了 42.2%。这说明，无论是原生粉煤灰还是其碱改性形态，均能有效去除 MICP 过程中产生的氨氮，而碱改性粉煤灰则显示出更优越的吸附性能。

1.4 固菌率测定

为了研究粉煤灰及其碱改性产物对细菌的吸附能力，采用固菌率这一指标进行评估。固菌率的计算公式如下：

$$W=(1-\frac{OD_L}{OD_C})\times100\%$$
 (3)

其中 W 表示固菌率，以百分比形式呈现；OD<sub>C</sub> 代表注浆前的菌液在 600 nm 波长下的吸光度；OD<sub>L</sub> 则表示从试样中流出的菌液在相同波长下的吸光度。固菌率的测试装置如图 7 所示。

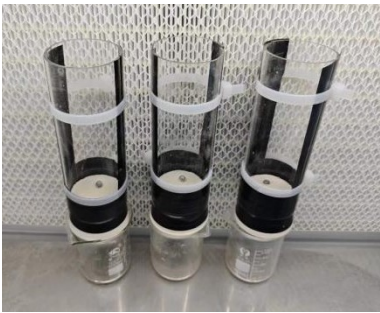


图 7 固菌率测试装置

Fig. 7 Solid bacterial rate testing device

固菌率测试结果见表 3。

表 3 固菌率对比

Table 3 Comparison of bacterial retention rate

| 试样编号           | OD <sub>C</sub> | OD <sub>L</sub> | 固菌率   |
|----------------|-----------------|-----------------|-------|
| A              | 1.549           | 0.811           | 47.6% |
| B <sub>1</sub> | 1.549           | 0.551           | 64.4% |
| B <sub>2</sub> | 1.549           | 0.355           | 77.1% |
| B <sub>3</sub> | 1.549           | 0.239           | 84.5% |
| B <sub>4</sub> | 1.549           | 0.214           | 86.2% |
| B <sub>5</sub> | 1.549           | 0.189           | 87.8% |
| C <sub>1</sub> | 1.549           | 0.440           | 71.6% |
| C <sub>2</sub> | 1.549           | 0.270           | 82.6% |
| C <sub>3</sub> | 1.549           | 0.198           | 87.2% |
| C <sub>4</sub> | 1.549           | 0.156           | 89.9% |
| C <sub>5</sub> | 1.549           | 0.136           | 91.2% |

为了方便分析，根据表 3 绘制固菌率对比的柱状图如图 8 所示。

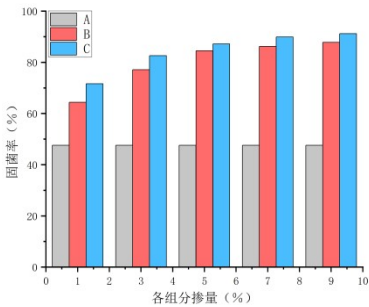


图 8 固菌率对比

Fig. 8 Comparison of bacterial retention rate

根据表 3 和图 8 的数据分析，相较于 A 组，B 组和 C 组的试样在固菌率上均表现出明显的提升。当掺量介于 5%至 9%之间时，固菌率的增长较为缓慢，在掺量达到 9%时，固菌率最高。

1.5 碳酸钙等胶结物生成量测定

对固化后的试块进行了碳酸钙等胶结物生成量的测定，通过比较加固前后的质量差来计算不同掺量下碳酸钙等胶结物的生成量，结果如图 9 所示。当粉煤

灰和碱改性粉煤灰的掺量为 7% 时,胶结物生成量分别达到了 15.8% 和 17.3%。从图中可以观察到,在掺量从 5% 增加到 7% 的过程中,胶结物的增长速率明显减缓。这是由于随着胶结物生成量的增加,孔隙被堵塞,菌液和胶结液难以深入试块内部,后续注浆仅限于试块的外层,进而导致 9% 掺量下胶结物生成量减少。上述数据表明,掺入粉煤灰和碱改性粉煤灰能显著提高试样的固菌率,增强细菌的附着效果,并为碳酸钙等胶结物的生成提供更多的附着点。

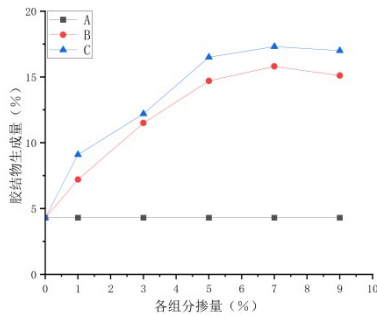


图 9 碳酸钙生成量占比  
Fig. 9 Proportion of calcium carbonate production

2 碱改性粉煤灰增强 MICP 效果分析

2.1 宏观物理分析

对 A、B、C 三组试块进行无侧限抗压强度和渗透系数的测试,数据如图 10 所示。

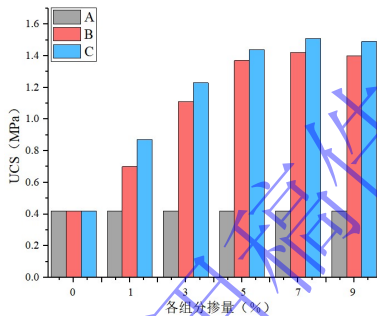


图 10 三组试样的无侧限抗压强度  
Fig. 10 Unconfined compressive strength of three sets of specimens

A 组试块的无侧限抗压强度为 0.42 MPa,而 B 组和 C 组试块随着掺量的增加,无侧限抗压强度均有所提升。增长趋势在掺量 5% 至 7% 之间变得较为平缓,当掺量达到 7% 时,B 组和 C 组试块的无侧限抗压强度分别达到了 1.42 MPa 和 1.51 MPa,相较于 A 组试块,其强度分别提升了 2.4 倍和 2.6 倍,但在 9% 掺量下均有所下降,这是因为碳酸钙等胶结物生成量减少,导致强度下降。上述结果表明,粉煤灰和碱改性粉煤灰的掺入显著增强了试样的抗压性能。试样的渗透系

数详见表 4。

表 4 试样的渗透系数

| Table 4 Permeability coefficient of the sample |                         |
|--|-------------------------|
| 试样编号   | 渗透系数/cm·s <sup>-1</sup> |
| A  | 4.32×10 <sup>-3</sup>   |
| B <sub>1</sub>                                 | 6.55×10 <sup>-4</sup>   |
| B <sub>2</sub>                                 | 4.83×10 <sup>-4</sup>   |
| B <sub>3</sub>                                 | 5.53×10 <sup>-5</sup>   |
| B <sub>4</sub>                                 | 4.80×10 <sup>-5</sup>   |
| B <sub>5</sub>                                 | 6.07×10 <sup>-5</sup>   |
| C <sub>1</sub>                                 | 5.11×10 <sup>-4</sup>   |
| C <sub>2</sub>                                 | 4.17×10 <sup>-4</sup>   |
| C <sub>3</sub>                                 | 6.10×10 <sup>-5</sup>   |
| C <sub>4</sub>                                 | 3.71×10 <sup>-5</sup>   |
| C <sub>5</sub>                                 | 5.88×10 <sup>-5</sup>   |

由表 4 可知,在掺入粉煤灰和碱改性粉煤灰后,试样的渗透系数呈现逐渐降低的趋势,A 组试样的渗透系数为 4.32×10<sup>-3</sup> cm·s<sup>-1</sup>,掺入 7% 的粉煤灰和碱改性粉煤灰试块的渗透系数分别降低 4.80×10<sup>-5</sup> cm·s<sup>-1</sup>、3.71×10<sup>-5</sup> cm·s<sup>-1</sup>,渗透系数分别减少了两个数量级,这说明粉煤灰和碱改性粉煤灰的掺入对于改善 MICP 固化砂土试块的渗透性能具有显著效果。

2.2 微观机理分析

(1) 在引入粉煤灰和碱改性粉煤灰之前,如图 11a 所示,A 组试块颗粒间存在较为明显的大型孔隙;而如图 11b 所示,砂粒表面出现了碳酸钙的沉积,但并未被碳酸钙晶体完全覆盖。这是由于碳酸钙的形成依赖于微生物作为成核点,带有负电荷的微生物不易大量附着在砂粒表面,而是倾向于聚集在砂粒间隙中,与胶结介质发生反应生成碳酸钙,进而导致孔隙的堵塞,碳酸钙部分附着于砂粒表面,黏结作用并不理想。

(2) 在掺入粉煤灰和碱改性粉煤灰后,由于粉煤灰的多孔特性和较大的比表面积,它们展现出卓越的物理吸附能力,这使得细菌能够有效地被吸附在粉煤灰及其碱改性产物的孔隙中。此外,粉煤灰中次生的带正电荷的硅酸铝、硅酸钙和硅酸铁之间通过离子交换或形成离子对的方式进行吸附,提供了优异的化学吸附作用<sup>[20]</sup>。这种作用使得带有负电荷的微生物能够牢固地附着在粉煤灰和碱改性粉煤灰颗粒上,反应生成更多的碳酸钙等胶结物质,从而增强了固化砂土的力学性能。从图 12a 和图 13a 中可以看出,砂土颗粒之间连接紧密,孔隙被大量碳酸钙填充;而从图 12b 和图 13b 中则可见,表面覆盖着大量碳酸钙结晶,晶体间连接紧密,同时生成了硅铝酸盐胶凝物质。

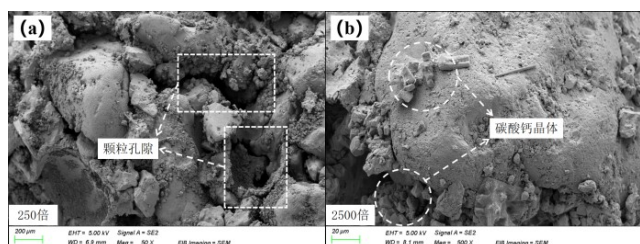


图 11 A 组试样 SEM 形貌图像

Fig. 11 SEM morphology image of Group A sample

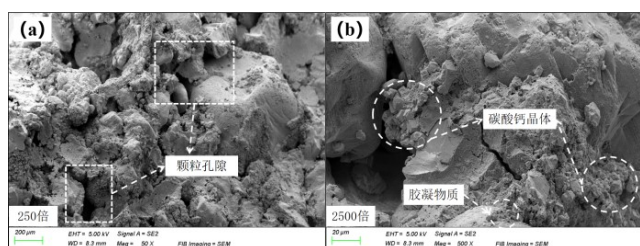


图 12 B 组试样 SEM 形貌图像

Fig. 12 SEM morphology image of Group B sample

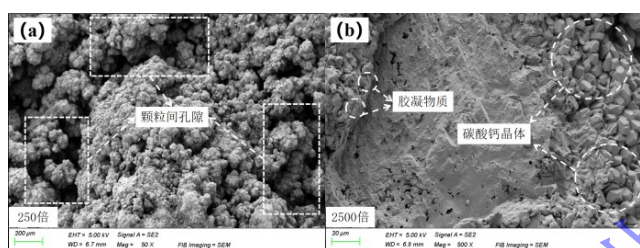


图 13 C 组试样 SEM 形貌图像

Fig. 13 SEM morphology image of Group C sample

(3) 碱改性粉煤灰能够提供硅、铝等活性物质。图 14、15 展示了加入碱改性粉煤灰前后试样生成物的 EDS 图像。

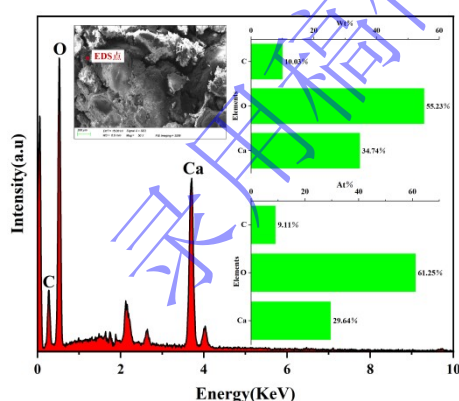


图 14 A 组试块 EDS 结果

Fig. 14 EDS results of test block A

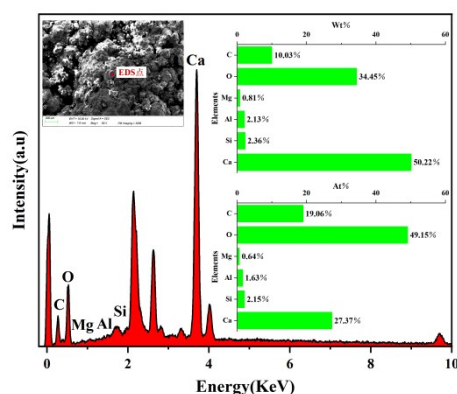
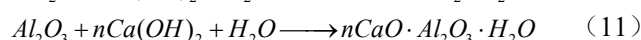
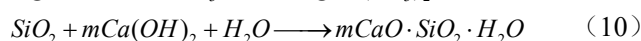
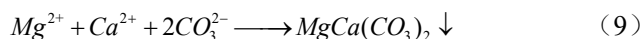
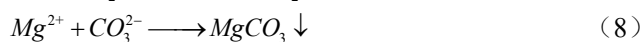
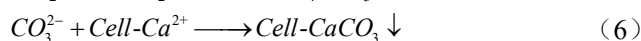
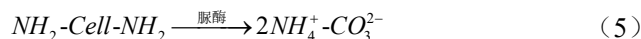


图 15 C 组试块 EDS 结果

Fig. 15 EDS results of test block C

如图 14 可见, 未掺入粉煤灰和改性粉煤灰之前, C、O、Ca 为生成物的主要组成元素, 说明生成物主要为碳酸钙, 掺入改性粉煤灰后 (图 15), 还检测到 Mg、Al、Si 三种元素, 说明生成物还包括其他碳酸盐和硅铝酸盐。这是因为粉煤灰的主要组成成分为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{MgO}$  等, 而  $\text{MgO}$  在微生物作用下可形成菱镁矿型碳酸镁, 反应产物主要有三水合菱镁矿、水纤维菱镁矿、球碳菱镁矿和水碳菱镁矿<sup>[21]</sup>。同时, 在碱性条件下,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{SiO}_2$  中的 Al、Si 会被溶出并生成  $[\text{Al}(\text{OH})_4]^-$ 、 $\text{Si}(\text{OH})_4$  等单体, 可以与溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$  生成水化硅酸钙 (C-S-H) 和水化硅铝酸钙 (C-A-S-H) 等胶凝物质<sup>[22]</sup>。并且粉煤灰中  $\text{SiO}_2$  (45.1%) 占比相对于  $\text{Al}_2\text{O}_3$  (36.8%) 更大, 而较高的  $\text{SiO}_2$  占比会使凝胶物质内部形成一个更广阔、更相互连接的网络加强内部的黏结力<sup>[23]</sup>。

巴氏芽孢杆菌产生的胞外聚合物 (EPS) 中的负离子基团能够吸附溶液中的  $\text{Ca}^{2+}$ , 使其聚集在细菌细胞的外表面。同时, 尿素在脲酶的作用下持续分解出  $\text{CO}_3^{2-}$ , 这些离子被运输至细胞表面。最终, 在细胞作为晶核的作用下, 在细菌周围析出碳酸钙结晶。MICP 过程中产生的碳酸钙晶体与上述胶凝物质协同作用, 填充孔隙, 构建起砂颗粒孔隙间的桥梁<sup>[24]</sup>, 从而共同增强固化效果。碱改性粉煤灰增强 MICP 固化效果机制如图 16 所示。反应方程式如下<sup>[21、25、26、27]</sup>:





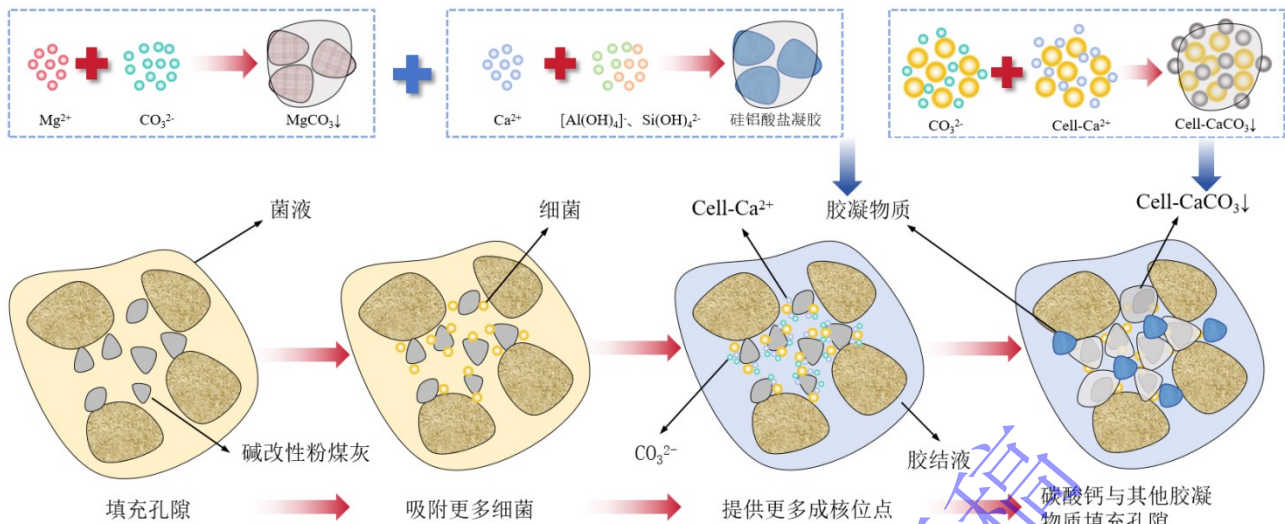


图 16 碱改性粉煤灰增强 MICP 效果机制

Fig. 16 Mechanism of alkali modified fly ash enhancing MICP effect

### 3 分析与讨论

通过对上述试验结果的深入分析,可以进一步理解碱改性粉煤灰在增强 MICP 固化砂土性能方面的作用机制。首先,碱改性粉煤灰的多孔结构和较大的比表面积不仅提供了更多的吸附位点,还通过物理和化学吸附作用显著提高了细菌的固菌率。这种增强的吸附能力使得更多的细菌能够在粉煤灰颗粒上附着并参与 MICP 过程,从而促进了碳酸钙等胶结物质的生成。同时,在碱性环境中进行的 MICP 反应中,副产物氨氮以  $\text{NH}_4^+$  的形式存在,碱改性粉煤灰能够有效吸附这些  $\text{NH}_4^+$ ,减少氨氮的释放。其次,碱改性粉煤灰中的活性物质如硅、铝等在碱性条件下被溶出,并与溶液中的钙离子反应生成水化硅酸钙、水化硅铝酸钙等胶凝物质。这些胶凝物质与碳酸钙晶体共同填充孔隙,构建起砂颗粒间的紧密连接,进一步增强了固化砂土的力学性能。此外,试验结果还表明,碱改性粉煤灰的掺入能够显著提高试样的无侧限抗压强度,并降低渗透系数。这得益于胶结物质的增加和孔隙结构的改善,使得固化砂土具有更好的整体性和抗渗性能,使得固化砂土具有更好的工程应用前景。未来,可以进一步探索碱改性粉煤灰在不同土壤类型和环境条件下的适用性以及与其他固化技术的联合应用,以期获得更佳的固化效果。

### 4 结 论

本文提出一种增强 MICP 固化砂土性能的方法,即掺入碱改性粉煤灰,进行了宏观和微观试验研究,得到以下结论:

(1) 通过碱改性粉煤灰与 MICP 技术的协同作用,能够增强 MICP 过程中对细菌的吸附与固定能力,并且有效吸附 MICP 过程中产生的副产品氨氮。

(2) 掺入碱改性粉煤灰可以提升 MICP 固化砂土中的胶结物生成量,增强固化砂土的整体强度和抗渗性能,增加固体的黏结程度。

(3) 碱改性粉煤灰的掺入不仅实现了砂土颗粒间的填充作用,优化了孔隙结构,还提供了硅铝酸盐等活性物质,在碱性条件下,这些活性物质参与反应生成硅铝酸盐胶结体,与碳酸钙等胶结体协同作用,提升了试块的整体性能。

**利益冲突声明/Conflict of Interests:** 所有作者声明不存在利益冲突。All authors disclose no relevant conflict of interest.

**作者贡献/Authors' Contributions:** 张鹏、李治辉、于佳林、宫玉辉、唐雨孜参与论文的写作和修改。所有作者均阅读并同意最终稿件的提交。The manuscript was drafted and revised by YAO Yangping, Sun Haozheng. All the authors have read the last version of paper and consented for submission.

### 参考文献

- [1] 中国粉煤灰综合利用正全面发展——粉煤灰材料分会 2020 年度行业发展报告[J].混凝土世界,2021,(10):28-29.(The comprehensive utilization of fly ash in China is developing comprehensively - Industry Development Report of Fly Ash Materials Branch in 2020[J]. Concrete World, 2021, (10): 28-29.(in Chinese))
- [2] P Youn. Research progress of adsorption materials for removing ammonia nitrogen from wastewater[J]. Applied Che

- mical Industry,2023,Vol.52(12): 3423-3427.
- [3] 孙菱翎, 霍建利, 秦佳欢. 粉煤灰吸附废水中氨氮的研究[J]. 赤峰学院学报(自然科学版), 2019, 35(04): 38-41. (SUN Lingling, HUO Jianli, QIN Jiahuan. Study on the adsorption of ammonia nitrogen in wastewater by fly ash[J]. Journal of Chifeng University (Natural Science Edition), 2019, 35 (04): 38-41. (in Chinese))
- [4] MENG R H, LV P C, YANG Y, XU D, GAO T F, FU Y C. Low-temperature alkali-modified fly ash as an effective adsorbent for removal of ammonia nitrogen, phosphorus and COD from the wastewater[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, Vol. 569: 012026.
- [5] 郭红仙, 张越, 程晓辉, 等. 微生物诱导碳酸钙技术用于水泥基材料裂缝修复和表面覆膜[J]. 工业建筑, 2015, 45(7): 36-41+53. (GUO H X, ZHANG Y, CHENG Hongxian, ZHANG Yue, CHENG Xiaohui. Crack repair and surface deposition of cement-based materials by micp technology[J]. Building Structure, 2015, 45(7): 36-41+53. (in Chinese))
- [6] ZHANG Y, GUO H X, CHENG X H. Role of calcium sources in the strength and microstructure of microbial mortar[J]. Construction & Building Materials, 2015, Vol. 77: 160-167.
- [7] SU, Y L, ZHENG T W, QIAN C X. Application potential of *Bacillus megaterium* encapsulated by low alkaline sulphoaluminate cement in self-healing concrete[J]. Construction & Building Materials, 2021, Vol. 273: 121740.
- [8] SUN Y W, LIU K W, SUN D S, JIANG N J, XU W Y, WANG A G. Evaluation of urea hydrolysis for MICP technique applied in recycled aggregate: Concentration of urea and bacterial spores[J]. Construction and Building Materials, 2024, Vol. 419: 135366.
- [9] 李昊, 唐朝生, 尹黎阳, 等. MICP-FR 协同作用改善钙质砂的力学性能及抗侵蚀试验研究[J]. 岩土工程学报, 2021, 43(10): 1941-1949. (LI H, Tang Dynasty scholar, Yin Liyang, etc. Research on the synergistic effect of MICP-FR to improve the mechanical properties and erosion resistance of calcareous sand[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2021, 43 (10): 1941-1949. (in Chinese))
- [10] CHENG, L, Shahin MA, CHU J. Soil bio-cementation using a new one-phase low-pH injection method[J]. Acta Geotechnica, 2019, Vol. 14(3): 615-626.
- [11] 彭劫, 冯清鹏, 孙益成. 温度对微生物诱导碳酸钙沉积加固砂土的影响研究[J]. 岩土工程学报, 2018, 40(06): 1048-1055. (Peng Jie, Feng Qingpeng, Sun Yicheng. Study on the Effect of Temperature on Microbial Induced Calcium Carbonate Deposition for Strengthening Sand Soil[J]. Journal of Geotechnical Engineering, 2018, 40 (06): 1048-1055. (in Chinese))
- [12] Charalamos Konstantinou; Yuze Wang. Unlocking the Potential of Microbially Induced Calcium Carbonate Precipitation (MICP) for Hydrological Applications: A Review of Opportunities, Challenges, and Environmental Considerations[J]. Hydrology, 2023, Vol. 10(178): 178.
- [13] XU N, WANG J X, LIU X T, ZHANG X. Effect of Oxygen Supply on Behavior of Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) Cemented Soil[J]. Environmental Science and Engineering, 2024, : 113-123.
- [14] Ng Wei Soon; Lee Min Lee; Tan Chew Khun; Hii Siew Ling. Factors Affecting Improvement in Engineering Properties of Residual Soil through Microbial-Induced Calcite Precipitation[J]. Journal of Geotechnical & Geoenvironmental Engineering, 2014, Vol. 140(5): 1-11.
- [15] ZHAO Q, LI L, LI C, LI M D, Amini F, ZHANG H Z. Factors affecting improvement of engineering properties of MICP-treated soil catalyzed by bacteria and urease (Article)[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2014, Vol. 26(12): 1.
- [16] Whiffin, Victoria S. Microbial  $\text{CaCO}_3$  precipitation for the production of biocement[D]. null, 2004.
- [17] 郑槐森, 伍玲玲, 胡林, 张志军, 田亚坤, 刘迪, 潘宇翔. 微生物注浆加固某金属尾砂过程中同步生物脱氮试验研究[J]. 南华大学学报(自然科学版), 2022, 36(6): 22-28, 98. (ZHENG Huaimiao, WU Lingling, HU Lin, ZHANG Zhijun, TIAN Yakun, LIU Di, PAN Yuxiang. Experimental study on synchronous biological denitrification during microbial grouting reinforcement of a certain metal tailings[J]. Journal of Nanhua University (Natural Science Edition), 2022, 36 (6): 22-28, 98. (in Chinese))
- [18] ZHAO Q, LI L, LI C, ZHANG H Z, Amini Farshad. A Full Contact Flexible Mold for Preparing Samples Based on Microbial-Induced Calcite Precipitation Technology[J]. Geotechnical Testing Journal (GTJ), 2014, Vol. 37(5): 917-921.
- [19] 王一菲. 无机微孔材料的合成、改性及其阳离子交换性能的研究[D]. 浙江大学博士学位论文, 2007, 30-33. (WANG Yifei. Research on the synthesis, modification, and cation exchange properties of inorganic microporous materials [D]. Doctoral Dissertation of Zhejiang University, 2007, 30-33. (in Chinese))



- [20] 付 静. 粉煤灰改性及其在水处理中的应用[J]. 中国环境管理丛书, 2010, (02): 20-21+23. (FU Jing. Modification of fly ash and its application in water treatment[J]. China Environmental Management Series, 2010, (02): 20-21+23. (in Chinese))
- [21] ZHA F H, CHEN S G, KANG B, XU L, SHEN Y B, WANG R K. Synergistic solidification of lead-contaminated soil by magnesium oxide and microorganisms[J]. Chemosphere, 2022, Vol. 308(2): 136422.
- [22] HUANG G D, JI Y S, LI J, HOU Z H, DONG Z C. Improving strength of calcinated coal gangue geopolymer mortars via increasing calcium content[J]. Construction and Building Materials, 2018, Vol. 166: 760-768.
- [23] Makungu M. Madirisha CA1,2; Opeoluwa R. Dada; Bolanle D. Ikotun. Chemical fundamentals of geopolymers in sustainable construction[J]. Materials Today Sustainability, 2024, Vol. 27: 100842.
- [24] 钱春香, 王安辉, 王 欣. 微生物灌浆加固土体研究进展[J]. 岩土力学, 2015, 36(6): 1537-1548. (QIAN Chunxiang, WANG Anhui, WANG Xin. Advances of soil improvement with bio-grouting[J]. Rock and Soil Mechanics, 2015, 36(6): 1537-1548. (in Chinese))
- [25] 李 宇, 王 晴, 滕 涛. 碱渣粉煤灰免烧砖的研制及机理[J]. 房材与应用, 2000, (03): 24-26. (LI Yu, WANG Qing, TENG Tao. Development and mechanism of alkali residue fly ash unburned bricks[J]. Building Materials and Applications, 2000, (03): 24-26. (in Chinese))
- [26] Stefano Ciurli, Stefano Benini, Wojciech R. Rypniewski, Keith S. Wilson, Silvia Miletto, Stefano Mangani. Structural properties of the nickel ions in urease: novel insights into the catalytic and inhibition mechanisms[J]. Coordination Chemistry Reviews, 1999, Vol. 190-192: 331-355.
- [27] Warthmann, Rolf; van Lith, Yvonne. Bacterially induced dolomite precipitation in anoxic culture experiments[J]. Geology, 2000, Vol. 28(12): 1091-10

---

录用稿件，非最终出版稿