

# 大豆脲酶碳化氧化镁固化法加固砂土试验研究

Experimental Study on Stabilization of Sandy Soil Using Urease - Catalyzed Carbonation of Magnesium Oxide

孙翔龙, 杭磊, 王小菲, 曹欣文

(河海大学 岩土力学与堤坝工程教育部重点实验室, 南京 210024)

**摘要:** 为研究大豆脲酶联合氧化镁固土方法对反应动力学、力学性能、微观特性的影响, 通过液体反应动力学试验、固化砂 UCS 试验和微观扫描电镜试验, 系统研究大豆脲酶浓度、尿素浓度、氧化镁掺量及含水率对反应进程、固砂效果和微观结构的影响。结果表明: 大豆脲酶浓度 60 g/L、尿素浓度 1 mol/L 时, 氧化镁转化率最高; 当氧化镁掺量为 8%、含水率为 20% 时, 固化砂的 UCS 最大, 较仅氧化镁处理砂土无侧限抗压强度提升 221%; 从微观结构观察, 在氧化镁掺量 8% 时的碳化效果最好, 能够有效起到填补孔隙、胶结土体的作用。研究内容可为大豆脲酶联合氧化镁固化砂土的优化设计提供参考。

**关键词:** 大豆脲酶; 氧化镁碳化; 砂土加固; 反应动力学; 无侧限抗压强度

中图分类号: TU411

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0078-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.015

SUN Xianglong, HANG Lei, WANG Xiaofei, CAO Xinwen

(Key Laboratory of Ministry of Education for Geomechanics and Embankment Engineering,  
Hohai University, Nanjing 210024, China)

**Abstract:** This article focuses on the method of carbonizing solid soil using oxidase based on the hydrolysis of urea catalyzed by soybean urease. Through liquid reaction kinetics experiments, unconfined compressive strength (UCS) tests of solidified sand, and micro-scanning electron microscopy tests, the effects of soybean urease concentration, urea concentration, magnesium oxide content, and moisture content on the curing reaction process, solidified sand performance, and microstructure are systematically studied. The results indicate that at a soybean urease concentration of 60 g/L and urea concentration of 1 mol/L, the conversion rate of magnesium oxide is highest. When the magnesium oxide content is 8% and moisture content is 20%, the UCS of the solidified sand is maximized, which is a 221% increase compared to the unconfined compressive strength of sand treated only with magnesium oxide. Microscopic observations show that the carbonization products of magnesium oxide can effectively fill the pore spaces in the soil.

**Key words:** soybean urease; magnesium oxide carbonation; sand soil reinforcement; reaction kinetics; unconfined compressive strength

基金项目: 国家自然科学基金 (No. 52208338)

作者简介: 孙翔龙 (2000—), 男, 硕士研究生。研究方向: 生物岩土。

通信作者: 杭磊 (1992—), 男, 博士, 副研究员。研究方向: 生物岩土。

收稿日期: 2025-09-07

## 0 引言

近年来, 何稼<sup>[1]</sup>发现可以通过生物诱导碳酸盐沉淀技术来加固土体, 目前生物诱导碳酸盐沉淀技术主要分为微生物诱导碳酸盐沉淀 (MICP) 和脲酶诱导碳酸盐沉淀<sup>[2]</sup> (EICP) 两类, 二者作用机理都

是通过催化尿素水解产生  $\text{CO}_3^{2-}$ ,  $\text{CO}_3^{2-}$  与  $\text{Ca}^{2+}$  结合生成沉淀。通过众多学者的研究, 生物诱导碳酸盐沉淀技术可以有效应用于诸多工程领域, 例如防风固沙<sup>[3]</sup>、裂缝修复<sup>[4-5]</sup>、土体抗渗<sup>[6]</sup>等。但两种技术存在一定的局限性, MICP 技术所需的微生物培养条件较为复杂<sup>[7]</sup>, 需严格控制培养环境的温度、pH 值, 不适用于工程实践, 相比于 MICP, EICP 的固化效果明显<sup>[8]</sup>, 但高纯度的脲酶成本较高, 也不适用于工程实践。大豆中含有丰富的较多的植物脲酶<sup>[9]</sup>, 且大豆成本低廉, 因此可以通过对大豆进行粗提取获得脲酶。

氧化镁作为一种新型的固化土体材料, 已被广泛应用于土体改良<sup>[10-11]</sup>, Xiao 等<sup>[14-15]</sup>已经将氧化镁碳化技术与微生物诱导碳酸盐沉淀技术相结合。目前已被证实该方法的可行性, 王布康等<sup>[16]</sup>对尾矿砂使用氧化镁 - MICP 处理后进行无侧限抗压强度试验, 发现随着含水率的升高, 试样强度先上升后降低; Yang 等<sup>[17]</sup>通过对砂土利用氧化镁 - MICP 处理后, 发现随着氧化镁掺量的增加, 试样的无侧限抗压强度先上升后下降, 在氧化镁掺量为 8% 时强度达到峰值, 含水率在 20% 时试样强度达到峰值。然而氧化镁 - MICP 技术最大的难点在于细菌的获取, 在细菌培养过程中需要严格的营养环境、温度、湿度、pH 等<sup>[18]</sup>环境条件, 同时细菌种类繁多, 无法预估使用某种细菌后会带来怎样的风险。

为防止细菌对环境造成不可预估的危害, He<sup>[19]</sup>从植物中获取脲酶, 将植物磨成粉末, 把粉末溶于水后离心即可获得脲酶溶液, 通过脲酶对尿素的催化作用得到的碳酸根离子作为碳源。自然界中大豆种类丰富, 且价格低廉容易获取, 大豆产生的大豆脲酶具有较高的活性, 因此可以将大豆作为主要的脲酶来源, 目前已有较多学者进行了大豆脲酶诱导碳酸钙沉淀的研究<sup>[3,20-22]</sup>, 但较少有大豆脲酶诱导氧化镁碳化相关的文献, 将基于大豆脲酶联合氧化镁固化技术, 开展液体反应动力学、砂柱无侧限抗压强度试验, 研究氧化镁掺量、含水率、尿素浓度、脲酶浓度对固化反应过程和砂土固化效果的影响, 并与氧化镁处理砂土对比分析。

## 1 试验材料与方法

### 1.1 试验材料

试验所用砂为厦门标准砂, 基本性质见表 1; 氧化镁为 AR 级分析轻质氧化镁, 其化学指标见表 2; 尿素为 AR 级分析纯尿素, 无毒; 大豆为东北黄豆, 将大豆用粉碎机研磨成粉, 用 0.25 mm 孔径的筛子过筛, 将 50 g 的豆粉倒入 500 ml 的去离子水中, 使用磁力搅拌器搅拌 30 min 后获得豆粉悬浊液, 将悬浊液在离心机中离心 15 min, 离心条件设置为 4 ℃、4 000 r/min。离心结束后将上清液通过 0.075 mm 孔径筛网过筛, 去除不溶杂质, 得到大豆脲酶溶液, 并通过电导率法测量大豆脲酶的活性<sup>[9]</sup>。

表 1 砂土基本性质

Table 1 Basic properties of sandy soil

| 比重<br>$G_s$ | 最大干密度<br>$\rho_{\max}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 最小干密度<br>$\rho_{\min}/(\text{g}/\text{cm}^3)$ | 不均匀系数<br>$C_u$ |
|-------------|---|---|----------------|
| 2.65        | 1.937   | 1.555   | 4.22           |

表 2 轻质氧化镁化学指标表

Table 2 Chemical index table of light magnesium oxide

| 钡<br>(Ba)      | 铁<br>(Fe)      | 重金属<br>(以 Pb 计) | 盐酸<br>不溶物     | 灼烧<br>适量     | 硫酸盐<br>( $\text{SO}_4$ ) | 氯化物<br>(Cl)   | 视比重<br>$\rho/(\text{ml}/\text{g})$ |
|----------------|----------------|-----------------|---------------|--------------|--------------------------|---------------|------------------------------------|
| $\leq 0.003\%$ | $\leq 0.005\%$ | $\leq 0.005\%$  | $\leq 0.05\%$ | $\leq 4.5\%$ | $\leq 0.05\%$            | $\leq 0.07\%$ | $\geq 8.0\%$                       |

### 1.2 试样方法

#### 1.2.1 液体反应动力学试验

将 2.4 g 氧化镁、30 mL 的大豆脲酶溶液、30 mL 的尿素溶液按顺序倒入试管中进行氧化镁碳化反应, 在室温 25 ℃ 下定期测量不同反应时间下氧化镁的碳化转化率。试验方案见表 3。

表 3 液体反应动力学试验方案

Table 3 Liquid reaction kinetics test protocol

| 大豆脲酶浓度<br>$\rho/(\text{g}/\text{L})$ | 尿素浓度<br>$\rho/(\text{mol}/\text{L})$ | 氧化镁浓度<br>$\rho/(\text{g}/\text{L})$ |
|--------------------------------------|--------------------------------------|-------------------------------------|
| 20                                   | 1, 2, 3                              | 40                                  |
| 40                                   | 1, 2, 3                              | 40                                  |
| 60                                   | 1, 2, 3                              | 40                                  |
| 80                                   | 1, 2, 3                              | 40                                  |

注: 大豆脲酶浓度和尿素浓度均为溶液混合后的浓度。

#### 1.2.2 无侧限抗压强度及微观试验

模具材料采用亚克力板, 内径尺寸为直径 50 mm, 模具高度为 120 mm, 底座中间设计密集小孔, 制样时将 300 纱布放置于模具底部, 防止标准砂中细小颗粒从底部小孔漏出。制备尺寸为直径 50 mm, 高度 100 mm 的砂柱试样。

## 材料科学

砂柱试样制备过程如图 1 所示, 采用拌合法按照不同含水率和不同氧化镁掺量的尿素溶液、脲酶溶液、氧化镁和砂土拌合, 充分搅拌均匀后将拌合后的砂土倒入模具中, 使砂柱表面平整后静置养护 3 d, 养护后将试样脱模放入烘箱在 40 °C 环境下烘干 12 h。无侧限抗压强度试验方案见表 4。每组试样制作三个平行样保证数据准确性。

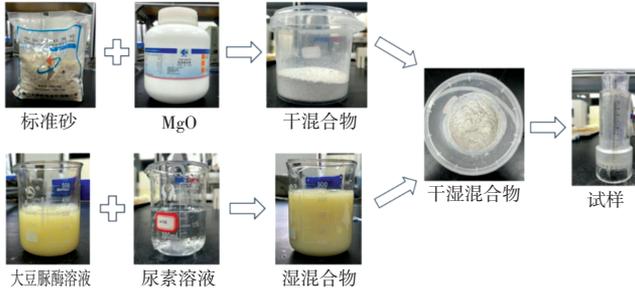


图 1 砂柱试样制备流程图

Fig. 1 Process diagram for preparing sand column samples

表 4 无侧限抗压强度试验方案

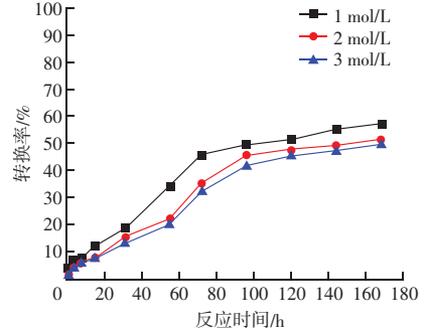
Table 4 Unconfined compressive strength test scheme

| 氧化镁掺量/%   | 含水率/%    |
|-----------|----------|
| 4、8、12、16 | 15、20、25 |

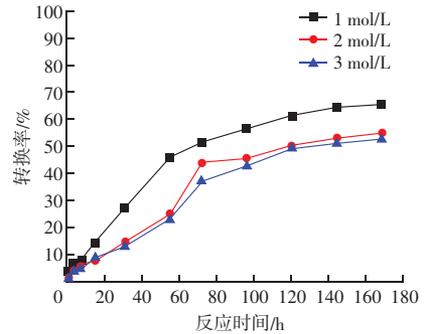
## 2 结果分析

### 2.1 反应动力学试验结果分析

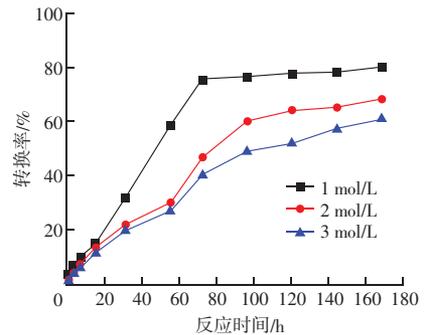
不同大豆脲酶、尿素浓度下氧化镁的转换率与时间的关系如图 2 所示。当大豆脲酶浓度分别为 20、40、60、80 g/L 时, 氧化镁的转换率都随着时间的增加呈现先上升后趋于平缓的趋势, 在 72 h 后反应速率显著降低。在反应初期 0~24 h, 由于溶液中碳酸根离子浓度较低, 氧化镁水化产物与碳酸根离子的反应较慢。反应中期 24~72 h, 随着尿素水解, 溶液中的碳酸根离子浓度升高, 水化后的氧化镁与碳酸根离子的反应速率显著提升。反应后期 72 h 后, 因氧化镁逐渐消耗, 反应速率下降, 曲线趋于稳定。尿素浓度对氧化镁的转换率有一定的抑制作用, 当尿素浓度从 1 mol/L 增加至 3 mol/L 时, 在相同反应时间下, 氧化镁的转换率降低 15%~20%。此现象与尿素浓度升高导致较高的盐碱环境有关, 较高的尿素浓度使得溶液形成较高的盐碱环境, 从而抑制了大豆脲酶的活性, 降低了催化效率, 导致氧化镁的转换率降低。



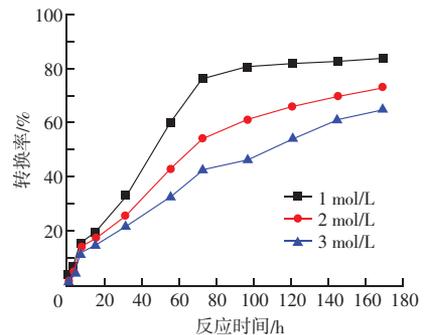
(a) 大豆脲酶浓度 20 g/L



(b) 大豆脲酶浓度 40 g/L



(c) 大豆脲酶浓度 60 g/L

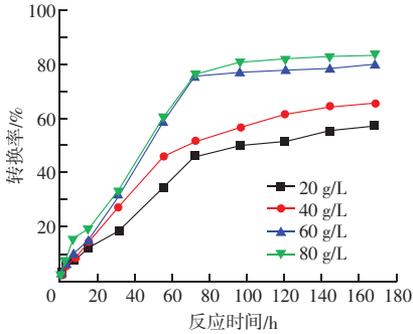


(d) 大豆脲酶浓度 80 g/L

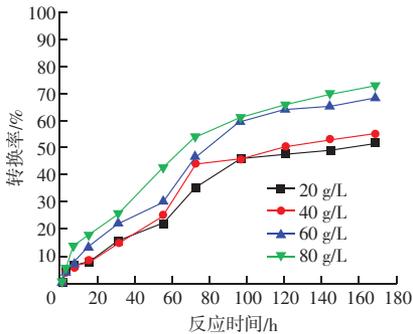
图 2 不同尿素浓度下的氧化镁转换率与时间的关系  
Fig. 2 Relationship between magnesium oxide conversion rate and time at different urea concentrations

不同尿素浓度下氧化镁转换率与反应时间的关系如图 3 所示。在三种尿素浓度下, 氧化镁的转换率随着大豆脲酶浓度的增加而呈现增长趋势, 当大豆

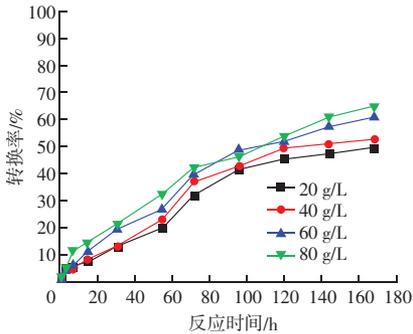
脲酶浓度超过 60 g/L 后, 氧化镁的转换率提高不大。综合反应动力学的试验结果, 考虑到反应效率和经济性, 处理液设置大豆脲酶浓度为 60g/L、尿素浓度为 1mol/L 可在保证较高转换率的同时降低材料成本。



(a) 尿素浓度 1 mol/L



(b) 尿素浓度 2 mol/L



(c) 尿素浓度 3 mol/L

图3 不同脲酶浓度下氧化镁转换率与时间的关系  
Fig. 3 Magnesium oxide conversion rate vs. time at different urease concentrations

## 2.2 无侧限抗压强度试验结果分析

经大豆脲酶溶液处理后的不同氧化镁掺量下抗压强度与含水率的关系如图4所示。随着含水率的升高, 试样的无侧限抗压强度呈现先增后减的规律, 峰值强度出现在含水率 20% 处。当含水率低于 20% 时, 氧化镁水化碳化的过程不充分, 生成的氢氧化镁、水和碳酸镁 (HMCs) 不足以有效填充砂土孔

隙; 同时因氧化镁的密度为  $3.58 \text{ g/cm}^3$ , 水镁石的密度为  $2.36 \text{ g/cm}^3$ , HMCs 的密度为  $1.69 \sim 2.25 \text{ g/cm}^3$ , 当含水率达到 20% 时, HMCs 的生成量显著增加, 填充了土颗粒之间的孔隙, 因此无侧限抗压强度增加; 当含水率继续增大超过 20% 时, 氧化镁水化碳化量会继续增加, 但由于孔隙中过量的自由水, 使得土体内部孔隙率增加导致土体强度降低。

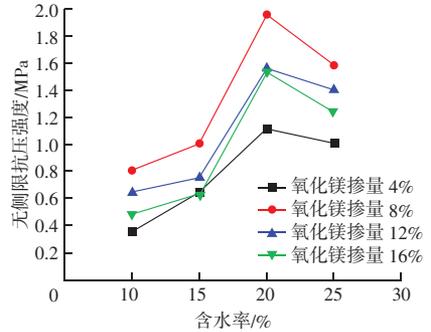


图4 不同氧化镁掺量下抗压强度与含水率的关系

Fig. 4 Relationship between compressive strength and moisture content under different magnesium oxide contents

经大豆脲酶溶液处理后的不同含水率下无侧限抗压强度与氧化镁掺量的关系如图5所示。随着氧化镁掺量的增加, 土体无侧限抗压强度呈现先增大后减小的趋势, 在氧化镁掺量为 8% 时, 土体的无侧限抗压强度达到峰值强度。土体无侧限抗压强度在氧化镁掺量为 4%~8% 提高的原因是低掺量的氧化镁能够更高效地转化水菱镁石等化合物, 在氧化镁掺量增加的过程中, 碳酸化后的生成物逐渐增多, 可以充分填充土体内部孔隙因此土体无侧限抗压强度逐渐升高。土体无侧限抗压强度在氧化镁掺量为 8%~16% 降低的原因是由于氧化镁的存在会抑制大豆脲酶的活性, 因此当氧化镁掺量增大时, 大豆脲

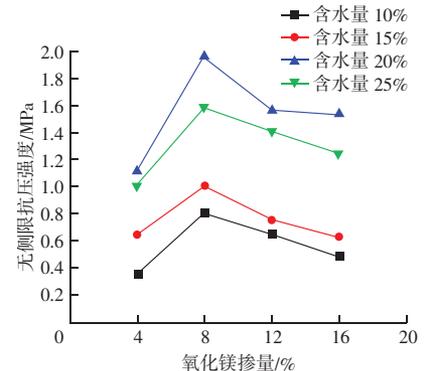


图5 不同含水率下抗压强度与氧化镁掺量的关系

Fig. 5 Relationship between compressive strength and magnesium oxide content under different moisture contents

## 材料科学

酶的活性降低<sup>[23]</sup>, 使得 HMCs 的生成量有所降低, 同时氧化镁掺量增大, 反应过程中体积膨胀, 从而降低无侧限抗压强度。

土体在含水率为 20%, 尿素浓度为 1 mol/L 下经大豆脲酶处理前后的氧化酶掺量与无侧限抗压强度的关系曲线变化如图 6 所示, 大豆脲酶处理前后的无侧限抗压强度曲线的规律基本一致, 随着氧化镁掺量的增大, 土体的无侧限抗压强度先上升后下降, 在氧化酶掺量为 8% 时达到峰值, 经大豆脲酶处理后的土体无侧限抗压强度变化相比处理前的土体无侧限抗压强度变化更加明显, 大豆脲酶处理后的土体在峰值无侧限抗压强度处相比于处理前的无侧限抗压强度提高了 221%。

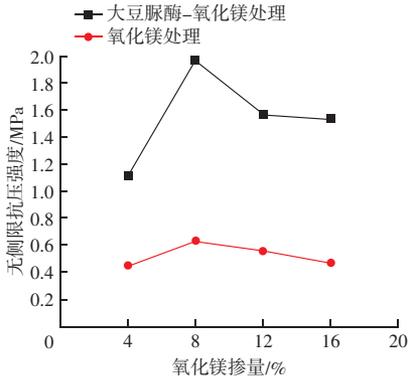
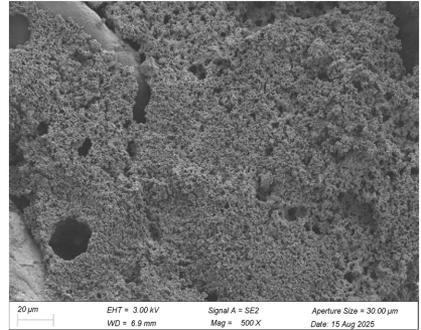


图 6 大豆脲酶改良前后抗压强度对比

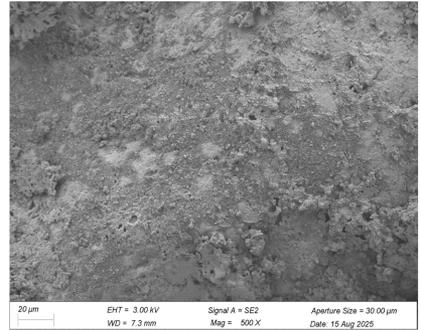
Fig. 6 Comparison of compressive strength before and after soybean urease improvement

### 2.3 SEM 试验结果分析

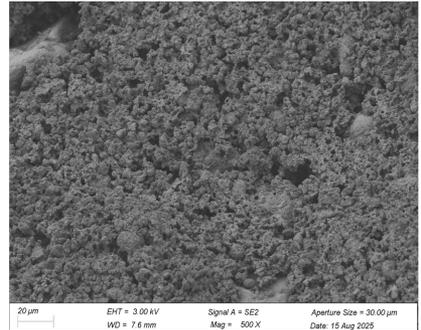
图 7 是不同处理方式下放大 500 倍的扫描电镜照片。由图 (a)、(b) 可知, 仅氧化镁处理的土体有较多孔隙, 经大豆脲酶联合氧化镁碳化后的土体孔隙明显减少。对于氧化镁碳化试样, 由于大豆脲酶催化尿素水解产生碳酸根离子, 碳酸根离子与氢氧化镁 (密度  $3.58 \text{ g/cm}^3$ ) 发生反应生成密度更小 HMCs (密度为  $1.69 \sim 2.25 \text{ g/cm}^3$ ), 从而将颗粒直剪的孔隙更好的胶结填充。由图 (b)、(c)、(d) 可知, 氧化镁碳化试样从氧化镁掺量 4%~8% 时, 土体孔隙较少, 氧化镁掺量从 8%~16% 时, 土体孔隙增多。随着氧化镁掺量的增大, HMCs 生成量增多, 进一步填充孔隙, 因此土体孔隙减少, 无侧限抗压强度增大, 当氧化镁掺量超过 8% 时, 大豆脲酶活性受到抑制, 同时碳化反应过程中产生密度较小的 HMCs 使得土体膨胀, 因此孔隙增加。



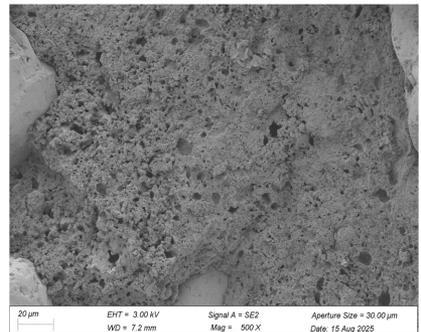
(a) 氧化镁掺量 8% 未碳化试样



(b) 氧化镁掺量 8% 碳化试样



(c) 氧化镁掺量 4% 碳化试样



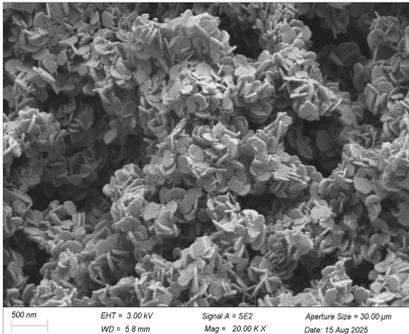
(d) 氧化镁掺量 16% 碳化试样

图 7 不同处理方式下 500 倍放大微观图

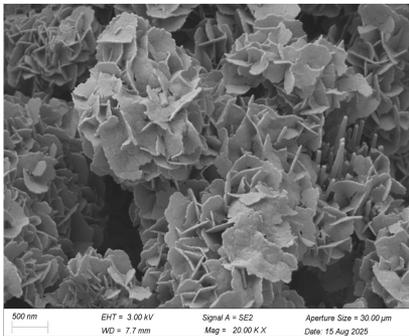
Fig. 7 Micrograph at 500x magnification under different treatment methods

图 8 是不同处理方式下放大 20 000 倍的扫描电镜照片。图 (a) 为氧化镁处理未碳化的试样, 土颗

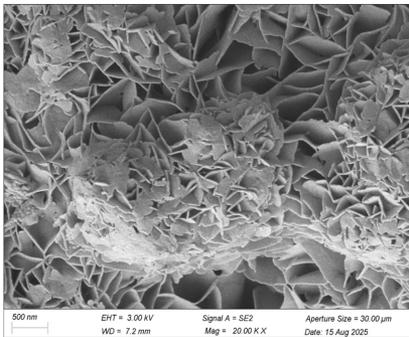
粒表面被六方片状的氢氧化镁晶体覆盖, 图 (b) 可以看出土颗粒表面基本由薄片状 HMCs 覆盖, 图 (c)



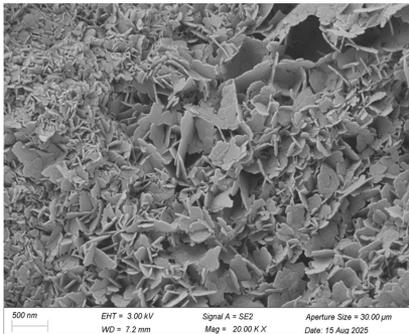
(a) 氧化镁掺量 8% 未碳化试样



(b) 氧化镁掺量 4% 碳化试样



(c) 氧化镁掺量 8% 碳化试样



(d) 氧化镁掺量 16% 碳化试样

图 8 不同处理方式下 20000 倍放大微观图

Fig. 8 Micrograph at 20000x magnification under different treatment methods

薄片状 HMCs 产物继续增加, 图 (d) 中有大量未反应的氢氧化镁晶体。由于氧化镁掺量增大, 碳化产物增多, 当氧化镁掺量过多时, 大豆脲酶活性降低, 碳化产物减少, 因此图 (d) 中有大量未反应的氢氧化镁。

### 3 结论

通过液体反应动力学试验和砂柱无侧限抗压强度试验研究了大豆脲酶碳化氧化镁固化反应过程及其对砂土的加固效果。通过试验结果, 得到以下结论:

(1) 大豆脲酶浓度与尿素浓度对氧化镁碳化效率具有显著影响。当脲酶浓度为 60 g/L、尿素浓度为 1 mol/L 时, 氧化镁转化率达 85% 以上, 且反应速率与材料经济性达到最优平衡。尿素浓度超过 1 mol/L 时, 高盐碱环境抑制脲酶活性, 导致转化率下降。

(2) 无侧限抗压强度受含水率影响显著, 含水率为 20% 无侧线抗压强度达到峰值, 此时 HMCs 可有效填充砂土孔隙, 提升密度。

(3) 无侧限抗压强度受氧化镁掺量影响显著, 氧化镁掺量为 8% 时无侧限抗压强度达到峰值, 掺量过高时因脲酶活性受到抑制及部分氧化镁未反应导致强度下降。

(4) 大豆脲酶碳化氧化镁固化砂相较于氧化镁固化砂无侧限抗压强度有显著提升。

(5) 通过 SEM 分析, 大豆脲酶碳化氧化镁试样碳化产物为薄片状晶体, 可以有效填充土体孔隙, 提高土体强度。

### 参 考 文 献

- [1] 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.
- [2] HAMDAN N, KAVAZANJIAN E. Enzyme - induced carbonate mineral precipitation for fugitive dust control [ J/OL ]. Géotechnique, 2016, 66 (7): 546-555.
- [3] 吴敏, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积与黄原胶联合防风固沙室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (10): 1914-1921.
- [4] 孙磊. 大豆脲酶诱导沉积碳酸钙修复混凝土高温损伤试验研究 [D]. 太原: 太原理工大学, 2021.
- [5] 杨沛东. 脲酶诱导碳酸钙沉积 (EICP) 修复混凝土裂缝试验研究 [D]. 西安: 西京学院, 2023.

## 材料科学

- [6] 邓英华. 脲酶诱导矿化提高弱胶结砂岩力学与抗渗特性研究 [D]. 重庆: 重庆交通大学, 2024.
- [7] 梁仕华, 牛九格, 房采杏, 等. 微生物固化砂土的研究进展 [J]. 工业建筑, 2018, 48 (7): 1-9, 15.
- [8] 吴敏, 高玉峰, 何稼, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙沉积与黄原胶联合防风固沙室内试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (10): 1914-1921.
- [9] GAO Y F, HE J, TANG X, 等. Calcium carbonate precipitation catalyzed by soybean urease as an improvement method for fine-grained soil [J/OL]. Soils and Foundations, 2019, 59 (5): 1631-1637.
- [10] 李文涛, 孙章皓, 庄妍, 等. 氧化镁复合水泥固化硫酸盐渍土的力学、膨胀性能及微观机理 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (9): 1840-1848.
- [11] 陆加越, 白坤, 张成君, 等. 氧化镁矿粉复配加固砂土的强度特性 [J]. 土木与环境工程学报 (中英文), 2025, 47 (3): 36-40.
- [12] 袁建议, 袁建华, 吴成皓, 等. 活性氧化镁固化软土的微观机理分析 [J]. 湖北理工学院学报, 2020, 36 (5): 28-32, 39.
- [13] WU H L, FEI J, DU Y J. 干湿循环作用下氧化镁激发矿渣-膨润土竖向隔离墙耐久特性研究 (英文) [J]. Journal of Zhejiang University-Science A (Applied Physics & Engineering), 2019, 20 (12): 948-960.
- [14] XIAO X, GOH L X, UNLUER C, et al. Bacteria-induced internal carbonation of reactive magnesia cement [J/OL]. Construction and Building Materials, 2021, 267: 121748.
- [15] TUNG H, NGUYEN T D, UNLUER C, 等. Use of microbial carbonation process to enable self-carbonation of reactive MgO cement mixes [J/OL]. Cement and Concrete Research, 2021, 143: 106391.
- [16] 王布康, 贾苍琴, 王贵和, 等. 氧化镁-微生物与微生物诱导碳酸盐沉淀固化尾矿砂效果的试验研究 [J]. 工业建筑, 2022, 52 (11): 79-83.
- [17] YANG Y, RUAN S, WU S, et al. Biocarbonation of reactive magnesia for soil improvement [J/OL]. Acta Geotechnica, 2021, 16 (4): 1113-1125.
- [18] 朱明琴. 微生物固化技术改良砂土性能研究进展 [J]. 青海交通科技, 2024, 36 (2): 71-75.
- [19] HE J, GAO YF, GU Z, et al. Characterization of Crude Bacterial Urease for CaCO<sub>3</sub> Precipitation and Cementation of Silty Sand [J/OL]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2020, 32 (5): 04020071.
- [20] 董旭光, 方礼鑫, 马渊博, 等. 大豆脲酶诱导碳酸钙固化黄土的强度试验研究 [J]. 地震工程学报, 2024, 46 (5): 1009-1020.
- [21] 亓永帅, 高玉峰, 何稼, 等. 可溶性大豆多糖对大豆脲酶诱导碳酸钙沉积固化风积沙效果的影响研究 [J]. 岩土工程学报, 2024, 46 (4): 823-832.
- [22] 吴林玉, 缪林昌, 孙满昊, 等. 植物源脲酶诱导碳酸钙固化砂土试验研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (4): 714-720.
- [23] 赵志峰, 王俊杰. MICP 与 MgO 联合加固粉土试验 [J]. 林业工程学报, 2024, 9 (6): 173-179.

(上接第 77 页)

- [5] 张彪, 郑光亚, 刘家宁, 等. 减水剂对磷石膏基建筑石膏性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2020, 39 (5): 1540-1546.
- [6] 王健. 发泡磷石膏轻质材料的制备与基本性能 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2016.
- [7] 丁建文, 万星, 高洪梅, 等. 赤泥磷石膏与水泥协同固化淤泥的力学特性与微观机理 [J/OL]. 岩土工程学报, 1-10 [2025-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/32.1124.TU.20250418.1435.002.html>.
- [8] 马彦涛, 房小健, 黄绪泉, 等. 矿渣-硅灰-磷石膏基骨料的制备及性能 [J]. 化工环保, 2025, 45 (2): 255-260.
- [9] 赵丽华, 张家豪, 高奥东, 等. 基于硅酸钠与熟石灰改性的水泥稳定磷石膏性能研究 [J]. 四川水泥, 2025 (2): 4-7.
- [10] 沈雪坤, 蔡巍, 杨博雯, 等. 钢渣粉掺量对超硫磷石膏矿渣胶凝材料性能的影响 [J]. 四川水泥, 2025 (1): 29-32.
- [11] 黄盛龙. 石膏矿渣水泥微结构演化机理与强化机制研究 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2024.
- [12] 付汝松. 磷石膏基胶凝材料耐久性能研究 [D]. 贵阳: 贵州大学, 2023.
- [13] 苗训. 轻质泡沫磷石膏复合材料制备与性能研究 [D]. 贵州大学, 2022.
- [14] 程树范, 曾卫新, 殷源, 等. 大掺量改性磷石膏基层材料路用性能试验研究 [J/OL]. 武汉理工大学学报 (交通科学与工程版), 1-7 [2025-04-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/42.1824.U.20250319.1745.026.html>.
- [15] 薛凯喜, 司鹏超, 王天源, 等. 磷石膏基发泡建筑石膏的热传导与强度特性研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (12): 4416-4426.