

MICP 技术修复晋阳古城土遗址根劈裂隙机理研究

尚瑞华^{1,*}, 独学焯², 韩鹏举³, 刘伟伟⁴

(1.太原理工大学建筑学院, 山西省太原市迎泽西大街 79 号 030024; * shangruihua@tyut.edu.cn;

2.太原理工大学材料科学与工程学院, 山西省太原市迎泽西大街 79 号 030024;

3.太原理工大学土木工程学院, 山西省太原市迎泽西大街 79 号 030024;

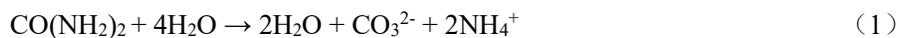
4.太原市文物保护研究院, 山西省太原市晋源区晋祠镇晋祠公园东门北侧约 60 米 030025)

摘要:为探讨 MICP 修复晋阳古城根劈裂隙机理, 本研究采用实验和检测等方法研究了 Ca^{2+} 源、 Ca^{2+} 浓度和混合液添加顺序的影响。结论如下: Ca^{2+} 源对巴氏菌矿化沉积的影响遵循规律为硝酸钙>氯化钙>乙酸钙, Ca^{2+} 源选择高浓度的乙酸钙溶液, 并建议先加入 1M 脲+菌液, 以获得最佳矿化沉积效果。土体中本身存在 CaCO_3 晶体, 巴氏菌矿化产物非外来物质; 巴氏菌矿化产生的 CaCO_3 晶体对土样的胶结与附着作用明显; 土样表面形成的白色团聚状颗粒物多呈针状、矛状、或火焰针、矛状, 白色蓬松状颗粒物多呈蜂窝状, 分子式分别为 CaC_3O_4 和 CaC_3NO_4 ; 真空环境中, 土样表面裂隙随时间推移逐渐增加, 证明空气中的水蒸汽能够有效预防土样表面裂隙增加。该结论为 MICP 技术修复植物根劈裂隙提供了重要参考。

关键词: 修复, MICP, 根劈裂隙, 晋阳古城

引言

目前, 巴氏生孢八叠球菌(简称巴氏菌) [1]修复植物根劈裂隙的优势明显, 是较为理想的根劈裂隙修复方法之一。作为地化循环的主要驱动因子, 巴氏菌属于典型的微生物诱导碳酸盐沉积(Microbial Induced Carbonate Precipitation, 简称 MICP, 图 1)的产脲酶菌 [2], 其矿化沉积 CaCO_3 过程参见公式(1)至(3)。该菌提取于土壤 [3], 后也在石灰岩 [4]等多处被发现, 具有无毒、环境友好、稳定、不易老化等特点, 目前多应用在其胶结性能研究上。



研究表明, 巴氏菌的酶解过程 [5]是通过脲酶加速分解脲为铵根离子(NH_4^+)和碳酸根离子(CO_3^{2-}), 其催化反应速率是不加脲酶的 1014 倍 [2]。具有负电荷特性的巴氏菌对周围环境中的钙离子(Ca^{2+})具有螯合吸附作用, 并决定了沉淀成核的成核点位 [6]。 Ca^{2+} 和 CO_3^{2-} 在巴氏菌周围积累并结合形成碳酸钙(CaCO_3)。当 CaCO_3 在溶液中过度饱和时, 它们在细菌周围形成晶核, 并逐渐生长为晶体。在宏观上, 它表现为絮凝沉淀。矿化过程则需要环境介质中 Ca^{2+} 的参与, 最终产物 CaCO_3 是一种无机化合物, 呈白色微细结晶粉末, 无臭无味, 基本不溶于水。 CaCO_3 晶体的大小完全由脲水解速率控制。微生物产生的脲酶活性越高, 其脲水解速率越快, 沉积 CaCO_3 颗粒越小 [7]。缓慢而稳定的方解石矿化沉积速率更有利于碳酸盐矿化菌的增强作用 [8]。因此, Ca^{2+} 源、 Ca^{2+} 浓度和混合液添加顺序对巴氏菌的酶解矿化作用影响显著。本研究采用对比实验的方法, 探讨了 MICP 修复晋阳古城根劈裂隙的矿化沉积机制。

1 研究方法

1.1 实验设计

研究证实，脲酶活性在非无菌环境中的保持率超过 77% [9]，表明巴氏菌具有较强的工程应用性。由于该项目最终应用于晋阳古城表层修复，且最终工作环境为非无菌环境，因此只需提前对培养基进行消毒即可。在实验中，菌液应与脲溶液混合，菌液量占脲溶液的 5%-10%。

将 Ca^{2+} 源与脲+菌液混合后，将混合物在 KQ250DE CNC 的超声波清洁器中均匀摇晃 2-3 分钟。将混合物放置在实验室中，记录不同时间的菌液浓度和脲酶活性值。对照组的实验参数要求与乙酸钙或氯化钙（50mL、1M）、脲（45mL、1M）+菌液（5mL）的混合物相同。在实验后期，有必要对混合物的上部溶液（简称 US）和下部溶液（简称 LS）进行测试。

1.2 表征参数

1.2.1 Ca^{2+} 源

为了探明巴氏菌菌液在不同 Ca^{2+} 源下的酶活性变化，本研究选择乙酸钙（简称 CA）、氯化钙（简称 CC）和硝酸钙（简称 CN）作为 Ca^{2+} 源。配置 150mL 的 1M 脲溶液，并分装至各锥形瓶中 45mL，测量巴氏菌菌液浓度和脲酶活性值（表 1），筛选出优良种子菌加入锥形瓶中 5mL；配置 50mL、1M 的 CA、CC 和 CN 溶液；混合上述溶液，并静置观察。

表 1 Ca^{2+} 源种子菌筛选表

日期	培养种子菌	培养时间	pH	菌液浓度 ℃	菌液浓度 $10^8\text{cell} \cdot \text{mL}^{-1}$	脲酶活性 $\text{mS} \cdot (\text{cm} \cdot \text{min})^{-1}$	筛选结果
11.28	第三代—I	24h	8.64	31.9	2.04	0.576	第三代—II
	第三代—II		8.73	31.1	2.136	0.622	
	第三代—III		8.65	36.1	1.972	0.254	
	第二代—I		8.66	33.7	1.509	0.184	
	第二代—II		8.76	34.3	2.603	0.207	

1.2.2 Ca^{2+} 浓度

为了探明巴氏菌菌液在不同 Ca^{2+} 浓度下的酶活性变化，本文中的 Ca^{2+} 浓度选用 CA 和 CC，并以溶液方式提供。配置 2300 mL 的 1M 脲溶液，并分装至各锥形瓶中 45mL，测量巴氏菌菌液浓度和脲酶活性值（表 2），筛选出优良种子菌加入锥形瓶中 5mL；分别配置 0M、0.1M、0.2M、0.3M、0.4M、0.5M、0.6M、0.7M、0.8M、0.9M、1M 的 CA、CC 各 50mL；混合上述溶液，并静置观察。

表 2 Ca^{2+} 浓度种子菌筛选表

日期	培养种子菌	培养时间	pH	温度 ℃	浓度 $10^8\text{cell} \cdot \text{mL}^{-1}$	脲酶活性 $\text{mS} \cdot (\text{cm} \cdot \text{min})^{-1}$	筛选结果
11.28	第三代—I	24h	8.64	31.9	2.04	0.576	第三代—II
	第三代—II		8.73	31.1	2.136	0.622	
	第三代—III		8.65	36.1	1.972	0.254	
	第二代—I		8.66	33.7	1.509	0.184	
	第二代—II		8.76	34.3	2.603	0.207	
11.29	第三代—I	39h	8.86	26.9	6.039	0.184	第三代—I
	第三代—II		8.91	26.6	5.944	0.115	
	第二代—II		8.82	26.1	6.199	0.092	

表 2 续

日期	培养种子菌	培养时间	pH	温度 °C	浓度 $10^8\text{cell}\cdot\text{mL}^{-1}$	脲酶活性 $\text{mS}\cdot(\text{cm}\cdot\text{min})^{-1}$	筛选结果
11.30	第三代—I	72h	8.51	18.9	8.418	0.092	第三代—II
	第三代—II		8.53	20.5	9.709	0.143	
	第二代—II		8.78	29.4	6.609	0.069	
12.1	第二代—II	95h	8.57	32.4	11.347	0.184	第二代—II

1.2.3 原状土样试验

在修复工艺上,部分学者采用浸泡工艺 [10]完成试件表面形成方解石的修复目的,但该方法并不适用于基于现场的原位修复要求。还有部分学者采用流动菌液多次重复喷涂工艺 [11],使其逐步渗入试件表层及孔隙中进行修复,但该工艺的喷涂有效滞留量、喷涂时间等问题亟待解决。还有学者将菌株以孢子形态预埋到材料中,一旦材料开裂,随着氧气与水分的渗入,使其复壮,恢复其新陈代谢与酶解能力,在裂缝中矿化沉积出方解石,主动修复裂缝,形成微生物自修复材料。基于土体不适用浸泡修复工艺,本组实验采用流动菌液多次重复喷涂修复工艺。

实验前分别对各实验组土体表面进行土样筛选进行密封袋封存,并将其置入冰箱中冷藏,冷藏温度设置为 3—5°C,为后期土样 SEM、EDS 和 XRD 检测实验做准备。

本组实验为正交实验,共计滴加 4 次:脲浓度统一为 1M,需提前添加菌液,菌液选择标准为实验前每次测量的最优值(表 3);脲+菌液的每次取液量为 15mL; Ca^{2+} 源为 CA,每次取液量为 15mL,浓度根据实验需要进行设计。其中:组 1—组 4 共计滴加 4 次;组 5—组 8 共计滴加 1 次。

表 3. 原状土试验种子菌筛选表

日期	培养种子菌	培养时间	pH	温度 °C	菌液浓度 $10^8\text{cell}\cdot\text{mL}^{-1}$	脲酶活性 $\text{mS}\cdot(\text{cm}\cdot\text{min})^{-1}$	筛选结果
11.29	第三代—I	39h	8.86	26.9	6.039	0.184	第三代—I
	第三代—II		8.91	26.6	5.944	0.115	
	第二代—II		8.82	26.1	6.199	0.092	
12.1	第二代—II	95h	8.57	32.4	11.347	0.184	第二代—II
	第三代—I		8.71	31.6	2.747	0.3	
12.7	第三代—II	24h	8.66	32.9	2.669	0.161	第三代—I
	第三代—III		8.77	32.9	2.599	0.115	
	第二代—I		8.76	32	2.733	0.138	
	第二代—II		8.73	31.4	2.752	0.23	
12.9	第三代—I	72h	8.72	32.9	4.818	0.23	第三代—I
	第三代—II		8.68	32.8	3.515	0.138	
	第三代—III		8.83	33	3.894	0.184	

本研究共有三个方案。方案 1 是先加入脲+菌液,再加入 Ca^{2+} 源。方案 2 为先加入 Ca^{2+} 源,再加入脲+菌液。方案 3 是先将脲+菌液和 Ca^{2+} 源混合,土样上直接加入混合液。

1.3 表征参数

1.3.1 指标参数法

巴氏菌细胞浓度,以未接种的培养基作空白对照,在 600nm 波长下进行光电比浊法测定,由光密度值(OD600)进行表征,测量仪器为 UV-1800 型紫外光分光光度计,见公式(1)。

$$X = 3.283 \times D - 0.053 \quad (1)$$

式中：X 指菌液绝对浓度，单位 $10^8 \text{cell} \cdot \text{mL}^{-1}$ ；D 指菌液于 600nm 测得的光密度 OD 值。

研究显示：巴氏菌脲酶在分解脲时会增加菌液中离子浓度，进而导致菌液的电导率增长。这里可以通过测定菌液中电导率的增长速率来表征脲酶分解脲的速率，即脲酶活性。电导率值测量仪器为 DZS-708L 型多参数测量仪，见公式 (2) [12]。

$$UA = \frac{\sigma_1 - \sigma_2}{t} \times 11.5249 \quad (2)$$

式中：UA 指脲酶活性，单位 $\text{mS} \cdot (\text{cm} \cdot \text{min})^{-1}$ ； σ_1 指初始电导率值， σ_2 指第 t 分钟后的电导率值，单位 $\text{mS} \cdot \text{cm}^{-1}$ 。

2.3.2. 显微镜观察方法

采用 XRD 图谱结合 SEM+EDS 技术对 CaCO_3 的含量进行表征；利用 XRD 技术分析了 CaCO_3 样品的物理成分和晶体结构，计算其原子百分比。

2 实验结果与分析

2.1 Ca^{2+} 源

2.1.1 现场实验观察

通过 Ca^{2+} 源现场实验观察发现 (图 1)：溶液混合后，0.5h 左右能够形成 90% 以上的 CaCO_3 沉淀。



图 1. Ca^{2+} 源影响对比实验

2.1.2 实验数据分析

通过对比不同 Ca^{2+} 源不同时间菌液浓度和脲酶活性 (图 2) 发现：菌液浓度在 0.5h 时遵循规律为 $\text{XCA} > \text{XCN} > \text{XCC}$ ，在 10.5h 时遵循 $\text{XCC-LS} > \text{XCN-LS} > \text{XCC-US} > \text{XCN-US} > \text{XCA}$ ；脲酶活性在 0.5h 时遵循 $\text{UACN} > \text{UACA} > \text{UACC}$ ，在 10.5h 时遵循 $\text{UACN-LS} > \text{UACC-LS} > \text{UACA-LS} > \text{UACC-US} > \text{UACN-US} > \text{UACA-US} = 0$ 。

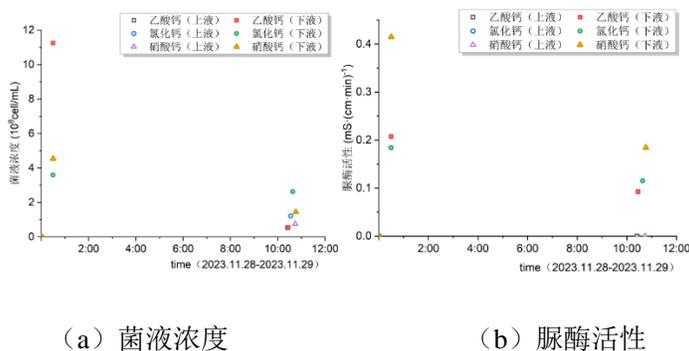


图 2 不同 Ca^{2+} 源菌液浓度及脲酶活性分布图

换句话说： Ca^{2+} 源和脲+菌液的各混合液中菌液浓度随时间推移呈递减状态发展， Ca^{2+} 源对巴氏菌菌液浓度的影响在 0.5h 时遵循 $\text{XCA} > \text{XCN} > \text{XCC}$ ，且在 10.5h 以后，CA 菌液浓度最低； Ca^{2+} 源对巴氏菌脲酶活性的影响在 0.5h 时遵循 $\text{UACN} > \text{UACA} > \text{UACC}$ ，10.5h 以后遵循 $\text{UACN} > \text{UACC} > \text{UACA}$ ，上液基本无脲酶活性。

可见：实验初期，乙酸钙更利于巴氏菌细胞浓度的增长，硝酸钙次之，氯化钙较弱；硝酸钙更利于巴氏菌脲的酶解，氯化钙次之，乙酸钙较弱。综合判定， Ca^{2+} 源对巴氏菌矿化沉积的影响遵循规律为硝酸钙 $>$ 氯化钙 $>$ 乙酸钙。基于硝酸钙存在易爆炸特性，不建议在后续工作中继续研究。这里建议选择乙酸钙和氯化钙作为钙源进行后续研究。

2.2 Ca^{2+} 浓度

2.2.1 现场实验观察

通过 Ca^{2+} 浓度现场实验观察发现：0.5h 时，混合液在底部均形成不同程度的絮状沉淀，且 Ca^{2+} 浓度越低，上液越浑浊，底部形成的沉淀越少。可见， Ca^{2+} 浓度越高，其形成 CaCO_3 沉淀所需的时间越短。

2.2.2 实验数据分析

对比不同 Ca^{2+} 源混合液菌液浓度随时间变化规律：随着时间的推移，CC 和 CA 菌液浓度均呈递减规律；高浓度时的 CC 和 CA 比低浓度时菌液浓度值略高；同浓度时 CC 和 CA 菌液浓度遵循 $\text{XCA} > \text{XCC}$ 。

对比不同 Ca^{2+} 源混合液脲酶活性随时间变化规律：高浓度的 CA 脲酶活性随着时间的推移呈先递增后递减的规律，低浓度的 CA 脲酶活性随时间推移变化不大，但整体值偏低；CC 脲酶活性随着时间的推移呈逐渐递增规律，且高浓度的 CC 比低浓度时脲酶活性值偏高。

可见：高浓度的乙酸钙和氯化钙比低浓度时更利于巴氏菌细胞浓度的增长，并且 $\text{XCA} > \text{XCC}$ ；高浓度的乙酸钙和氯化钙比低浓度时更利于巴氏菌脲酶活性变化，并且 $\text{UACC} > \text{UACA}$ 。综合判定， Ca^{2+} 源对巴氏菌矿化沉积的影响遵循规律为 $\text{CC} > \text{CA}$ 。基于氯化钙增加了土体中 Cl^- 浓度，会提高土壤的腐蚀性，不利于土遗址保护。建议选择高浓度的乙酸钙作为 Ca^{2+} 源进行后续研究工作。

2.3 原状土样实验

2.3.1 现场观察

观察土样表面形成白色粉状情况显示，矿化产物生成效果组 4 $>$ 组 3 $>$ 组 2 $>$ 组 1，组 5 $>$ 组 7 $>$ 组 6 $>$ 组 8。

(1) 已知，组 1—组 4 的 Ca^{2+} 浓度低于或等于脲+菌液浓度 (1M)，结合矿化产物的作用可知：1M 的 Ca^{2+} 浓度生成的 CaCO_3 矿化产物优于 0.5M 的 Ca^{2+} 浓度；当 Ca^{2+} 浓度低于或等于脲+菌液浓度时，方案 1 中 CaCO_3 的晶体结构效果优于方案 2。

(2) 已知，组 5—组 8 的 Ca^{2+} 浓度高于脲+菌液浓度 (1M)，结合矿化产物生成效果，可知：1.5M 的 Ca^{2+} 浓度生成的 CaCO_3 矿化产物优于 2M 的 Ca^{2+} 浓度；当 Ca^{2+} 浓度高于脲+菌液浓度时，方案 2 中产生的 CaCO_3 的晶体结构优于方案 1。

当 Ca^{2+} 的浓度等于脲+细菌溶液浓度时，方案 1 中产生的 CaCO_3 晶体结构最好。如果 Ca^{2+} 浓度小于脲+细菌溶液浓度，则方案 1 中产生的 CaCO_3 晶体结构更好。如果 Ca^{2+} 浓度大于脲+细菌溶液浓度，则方案 2 中产生的 CaCO_3 晶体结构更好。综上所述，建议先加入 1M 脲+细菌溶液，再加入 1M Ca^{2+} 源，以产生最佳矿化产物。

2.3.2 土样微观观察

2023 年 12 月 28 日 (第 30 天)，对实验前冷藏土样和实验后反应土样进行 SEM、EDS 和 XRD 检测，结论如下。

(1) 原状土检测

放大 1 号原始土样的柱状晶体 (图 3) 发现：该柱状晶体长约 $10 \mu\text{m}$ ，宽约 $1 \mu\text{m}$ ；通过原子百分比研究，Ca:C:O 基本接近 1:1:3，其原子百分比占到 90%以上，可以确定该柱状体为 CaCO_3 晶体。可见，土体中本身存在 CaCO_3 晶体，巴氏菌矿化产物非外来物质。初步推断，上述晶型可能为柱状文石结晶或柱状方解石结晶，

具体晶型还需 XRD 结合 SEM 进一步确认。

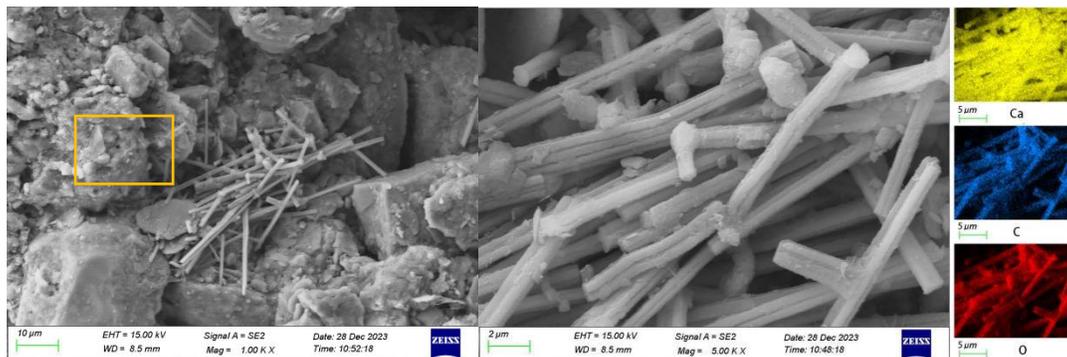


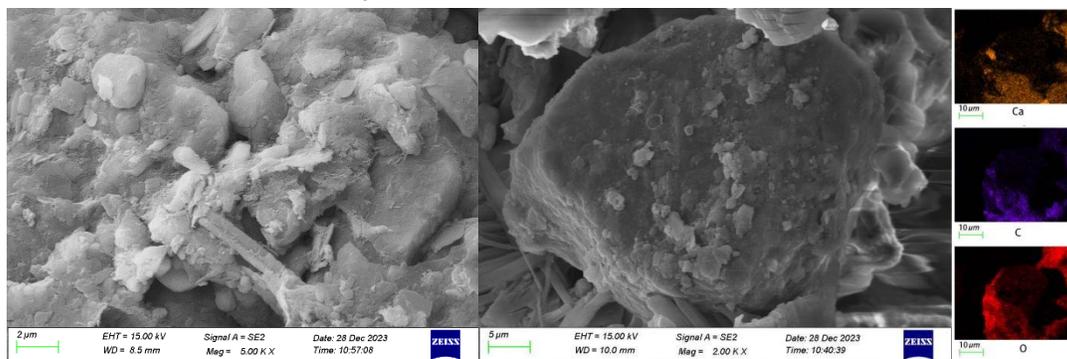
图 3 1-1 号原始土样

表 4 1-1 号土样文石晶体的元素分布表

元素	Ca	C	O	总计
原子百分比 (%)	20.64	16.66	55.43	92.73
重量百分比 (%)	38.50	9.31	41.28	89.09

(2) CaCO₃ 与土样胶结

巴氏菌矿化产生的 CaCO₃ 晶体对土样的胶结及附着作用明显。图 4 (a) 即为 CaCO₃ 胶粘土样实例，图 4 (b) 为大颗粒土样外侧逐渐富集 CaCO₃ 实例。



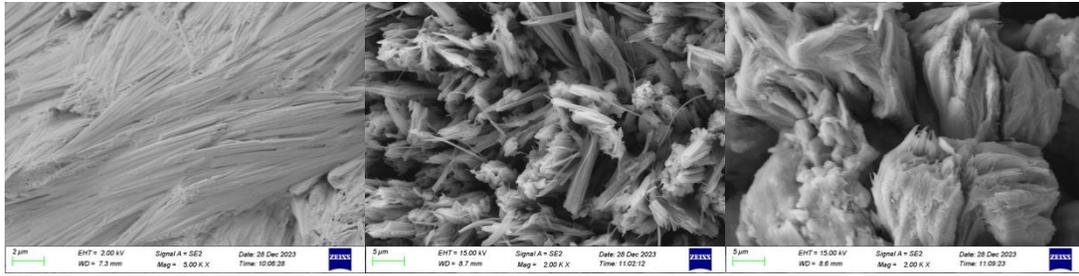
(a) 1-2 号土样 CaCO₃ 晶体胶结大颗粒土壤 (b) 3-2 号土样 CaCO₃ 晶体附着在大颗粒土壤周边

图 4 不同土样与 CaCO₃ 胶结关系图

(3) 土体表面白色颗粒分析

基于实验过程中的滴加方案较为粗放，导致土样表面还易形成白色团聚状或蓬松状颗粒物质，并且白色蓬松状颗粒明显比白色团聚状颗粒酥脆，强度极低，一碰就碎。对此，专门对上述白色颗粒进行研究。

通过对各土样表面白色团聚状颗粒物质进行 SEM 分析 (图 5) 可知，这些白色团聚状颗粒多呈针状、矛状、或火焰针、矛状；通过对各土样表面白色团聚状颗粒进行 EDS 分析 (表 5) 可知，这些白色团聚状颗粒中，各元素比例 Ca:C:O 基本接近 1:3:4，其原子百分比占 90% 以上，可见这些白色粉末分子式为 CaC₃O₄。具体材料晶型还需 XRD 结合 SEM 进一步确认。



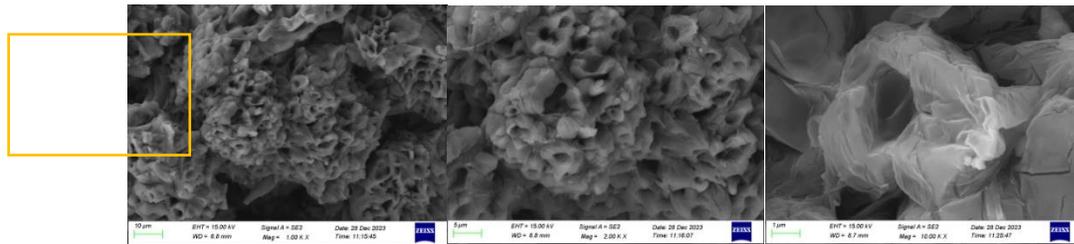
(a) 4-2 号土样呈火焰胶着状 (b) 6-2 号土样呈针状、矛状 (c) 6-3 号土样呈火焰针、矛状

图 5 不同土样表面白色团聚状颗粒 SEM 图

表 5 土样白色颗粒晶体的元素分布表

土样	原子百分比 (%)			总计
	Ca	C	O	
4-2	13.3	38.1	48.1	99.5
6-2	13.9	36.6	48.3	98.8
6-3	12.38	32.86	46.15	91.39

通过对各土样表面白色蓬松状颗粒物质进行 SEM 分析 (图 6) 可知, 这些白色蓬松状颗粒物质多呈蜂窝状; 通过对各土样表面白色蓬松状颗粒进行 EDS 分析 (表 6) 可知, 这些白色蓬松状颗粒中, 各元素比例 Ca:C:O:N 基本接近 1:3:4:1, 其原子百分比占 90% 以上, 可见这些白色蓬松状颗粒分子式为 CaC_3NO_4 。初步判定该蜂窝状形态与微生物活动有关。基于 N 成分所占比重很高, 具体材料晶型还需 XRD 结合 SEM 进一步确认。



(a) 2-2 号土样呈蜂窝状 (b) 3-2 号土样呈蜂窝状

图 6 不同土样表面白色蓬松状颗粒 SEM 图

表 6 土样白色颗粒晶体的元素分布表

土样	原子百分比 (%)				总计
	Ca	C	O	N	
2-2	10.81	32.82	42.46	13.37	99.46
3-2	7.29	35.81	40.73	14.52	98.35

(4) 水蒸气对土壤表面裂隙影响

由于 SEM 测量过程中, 土样前期预处理时要求进行真空处理。在真空环境中, 随着时间的推移, 土样表面裂隙逐渐增加 (图 7)。短短一个小时的检测时间, 裂隙分布逐渐增多, 这也间接证明空气中的水蒸气能够

有效预防土样表面裂隙增加。

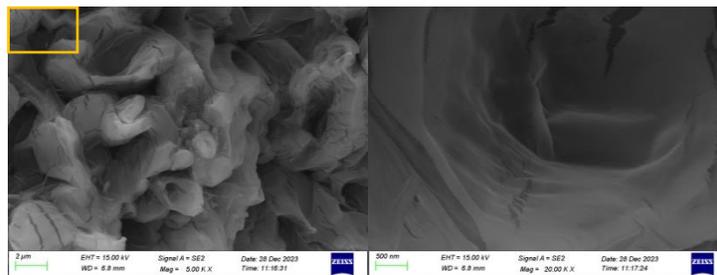


图7 2-2号土样表面白色蓬松状颗粒表面裂隙图

3 结论

本文研究了 Ca^{2+} 源、 Ca^{2+} 浓度及混合液添加顺序调控矿化沉积 CaCO_3 机理，并通过土样实验研究 Ca^{2+} 源浓度及添加顺序对矿化沉积 CaCO_3 过程的影响。具体结论如下：

(a) 溶液混合后，0.5h 左右能够形成 90% 以上的 CaCO_3 沉淀； Ca^{2+} 源+脲+菌液的各混合液中菌液浓度随时间推移呈递减状态发展， Ca^{2+} 源对巴氏菌菌液浓度的影响在 0.5h 时遵循乙酸钙 > 硝酸钙 > 氯化钙，且在 10.5h 以后，乙酸钙的菌液浓度最低； Ca^{2+} 源对巴氏菌脲酶活性的影响在 0.5h 时遵循硝酸钙 > 乙酸钙 > 氯化钙，10.5h 以后遵循硝酸钙 > 氯化钙 > 乙酸钙，上液基本无脲酶活性。

(b) Ca^{2+} 浓度越高，其形成 CaCO_3 沉淀所需的时间越短；高浓度的乙酸钙和氯化钙比低浓度时更利于巴氏菌细胞浓度的增长，并且乙酸钙 > 氯化钙；高浓度的乙酸钙和氯化钙比低浓度时更利于巴氏菌脲酶活性变化，并且氯化钙 > 乙酸钙。

(c) Ca^{2+} 源对巴氏菌矿化沉积的影响遵循规律为硝酸钙 > 氯化钙 > 乙酸钙。基于硝酸钙存在易爆炸特性，而氯化钙会提高土壤的腐蚀性，本项目建议选择高浓度的乙酸钙作为 Ca^{2+} 源进行后续研究工作。

(d) Ca^{2+} 源浓度及添加顺序建议先滴加 1M 脲+菌液、1M Ca^{2+} 源产生的矿化产物生成效果最佳；若 Ca^{2+} 浓度 < 脲+菌液浓度，方案 1 中产生的 CaCO_3 晶体结构效果较好；若 Ca^{2+} 浓度 > 脲+菌液浓度，方案 2 中产生的 CaCO_3 晶体结构效果较好。

(e) 土体中本身存在 CaCO_3 晶体，巴氏菌矿化产物非外来物质；巴氏菌矿化产生的 CaCO_3 晶体对土样的胶结与附着作用明显；土样表面形成的白色团聚状颗粒物质多呈针状、矛状、或火焰针、矛状，分子式为 CaC_3O_4 ；土样表面形成的白色蓬松状颗粒物质多呈蜂窝状，分子式为 CaC_3NO_4 ；实验真空环境中，土样表面裂隙随时间推移逐渐增加，这也间接证明空气中的水蒸汽能够有效预防土样表面裂隙增加。

基金项目

山西省基础研究计划资助项目（202303021212060）；山西省文物科技资助项目（2023KT15）

参考文献

- [1] 王瑞兴. 微生物调控碳酸钙形成及其在水泥基材料缺陷修复中的应用 [D]. 南京: 东南大学, 2009.
- [2] Whiffin, V S., vail Paassert, L., Harkes, M. P. Microbial carbonate precipitation as a soil improvement technique [J]. Geomicrobiol. J., 2007, 24: 417-423.
- [3] 武发思, 张永, 苏敏, 贺东鹏, 李洁, 冯虎元. 生物技术在文物保护修复中的应用研究进展 [J]. 文物保护与考古科学, 2022, (1): 133-143.
- [4] Xiaobo Liu, Han Meng, Yali Wang, Yoko Katayama, Ji-Dong Gu. Water is a critical factor in evaluating and assessing microbial colonization and destruction of Angkor sandstone monuments [J]. International Biodeterioration and Biodegradation, 2018, 133: 9-

16.

- [5] 许燕波, 钱春香, 陆兆文. 甘油提高巴氏芽孢杆菌脲酶的热稳定性 [J]. 东南大学学报(自然科学版), 2013, 43(01): 147-151.
- [6] Chunxiang, Q., Jianyun, W., Ruixing, W., et al. Corrosion protection of cement-based building materials by surface deposition of CaCO_3 by *Bacillus pasteurii* [J]. *Mater. Sei. Eng.*, 2009, 29(4): 1273-1280.
- [7] 孙潇昊. 微生物矿化机理与混凝土裂缝修复应用研究 [D]. 南京: 东南大学, 2019.
- [8] Wei H, Fan Y, Sun L, Du H, Liang R. Experimental Study on High-Temperature Damage Repair of Concrete by Soybean Urease Induced Carbonate Precipitation [J]. *Materials*, 2022, 15(7): 2436.
- [9] 樊亚男. 生物矿化修复混凝土火灾损伤机制及多尺度性能研究 [J]. 太原: 太原理工大学, 2022.
- [10] Cappiteili, F., Zanardini, E., Ranalli, G., et al. Improved methodology for bioremoval of black crusts on historical stone artworks by use of sulfate-reducing bacteria [J]. *Appl. Environ. Microbiol.*, 2006, 72(5): 3733-3737.
- [11] Shirakawa, M., Cincotto, M., Dias, C., et al. Influence of carbonation in accelerated chamber previous to biocalcification on fiber cement surface [R]. In: 1 st BioGeoCivil Engineering Conference, Delft, 2008.
- [12] 魏宏. 混凝土高温损伤的微生物矿化修复试验研究及机理分析 [D]. 太原: 太原理工大学, 2023.