硅酸钠协同巴氏芽孢杆菌加固铀尾砂的试验研究*

刘天明[1,2],伍琴琴[3],黄爱武[1,2],焦文磊[1,2],汪雨婷[1,2],胡林[1,2],伍玲玲[1,2],喻清[1,2]

(1.南华大学 资源环境与安全工程学院, 湖南 衡阳市 421001;
2.铀矿冶生物技术国防重点学科实验室, 湖南 衡阳市 421001;
3.湖南高速铁路职业技术学院 铁道工程学院, 湖南 衡阳市 421002)

摘要:为探究硅酸钠协同巴氏芽孢杆菌加固铀尾砂的协同机理,以某铀尾砂为研究对象,通过测定巴氏芽孢杆菌在含有硅酸钠环境中的*OD*值和pH,分析不同模数、不同质量分数硅酸钠溶液对巴氏芽孢杆菌生长规律的影响。基于微生物诱导碳酸钙沉淀技术(MICP),开展硅酸钠协同巴氏芽孢杆菌加固铀尾砂柱的试验,对比分析各组铀尾砂柱的无侧限单轴抗压强度。结果表明,适当质量分数和模数的硅酸钠能显著提高铀尾砂柱的无侧限抗压强度,其中模数为2.3,质量分数为5%的硅酸钠溶液的效果最佳,对应尾砂柱的无侧限抗压强度达284 Pa,相较于单一巴氏芽孢杆菌加固组的254 Pa增幅达11.8%。X射线衍射(XRD)试验结果表明,所有试验组生成的沉淀均以碳酸钙晶体为主,相较于巴氏芽孢杆菌对照组,其生成的方解石晶体占比更高,结晶热力学稳定性更好。扫描电镜(SEM)图像结合能谱分析(EDS)结果进一步证实,加入硅酸钠溶液后,生成了更多的碳酸钙结晶,且晶体表面更加光滑平整,结构更加致密。研究结果对完善铀尾矿库的加固技术提供了理论指导。

关键词:铀尾砂;硅酸钠;巴氏芽孢杆菌;协同机理;加固技术

中图分类号:TD853.37 **文献标识码**:A **文章编号**:1005-2763(2026)02-0251-09

Experimental Study on Uranium Tailings Reinforced by Sodium Silicate Synergized with *Sporosarcina Pasteurii*

LIU Tianming[1,2], *WU Qinqin*[3], *HUANG Aiwu*[1,2], *JIAO Wenlei*[1,2], *WANG Yuting*[1,2], *HU Lin*[1,2], *WU Lingling*[1,2], *YU Qing*[1,2]

(1.School of Resources Environment and Safety Engineering, University of South China, Hengyang, Hunan 421001, China;
2.Key Discipline Laboratory for National Defense for Biotechnology in Uranium Mining and Hydrometallurgy, Hengyang, Hunan 421001, China;
3.College of Railway Engineering, Hunan Technical College of Railway High-Speed, Hengyang, Hunan 421002, China)

Abstract: To investigate the synergistic mechanism of uranium tailings reinforced by sodium silicate synergized with *Sporosarcina pasteurii*, a uranium tailings was taken as the research object. By measuring the *OD* value and pH of *Sporosarcina pasteurii* in the environment containing sodium silicate, the effects of sodium silicate solutions with different modulus and different mass fraction on the growth law of *Sporosarcina pasteurii* were analyzed. Based on the microbial induced carbonate precipitation (MICP) technology, the experiment of uranium tailings column reinforced by sodium silicate synergized with *Sporosarcina pasteurii* was carried out, and the unconfined uniaxial compressive strength of uranium tailings columns in each group was compared and analyzed. The results show that sodium silicate with an appropriate mass fraction and modulus can significantly improve the unconfined uniaxial compressive strength of uranium tailings columns. The effect of sodium silicate solution with a modulus of 2.3 and a mass fraction of 5% is the best, and the corresponding unconfined uniaxial compressive strength of the uranium tailings column reaches 284 Pa, which is 11.8% higher than that of the single *Sporosarcina pasteurii* reinforcement group of 254 Pa. The results of X-ray diffraction (XRD) show that the precipitates formed in all experimental groups are mainly calcium carbonate crystals. Compared with the single *Sporosarcina pasteurii* control group, the calcite crystals formed therein have a higher proportion and better crystallization thermodynamic stability. Scanning electron microscopy (SEM) images combined with energy dispersive spectroscopy (EDS) results further confirm that after the addition of sodium silicate solution, more calcium carbonate crystals are formed, the

* **收稿日期**:2025-03-04
基金项目:国家自然科学基金项目(52474134);湖南省教育厅重点项目(22A0291)
作者简介:刘天明(1995—),男,广东梅州人,硕士研究生,主要从事微生物加固技术的研究。E-mail:1204807781@qq.com
通信作者:喻清(1984—),男,江西临川人,博士,副教授,主要从事矿山工程灾害控制理论和技术研究。E-mail:ckyuqingk@126.com

crystal surface are smoother and flatter, and the structure is more compact. The research results provide theoretical guidance for improving the reinforcement technology of uranium tailings reservoir.

Key words: Uranium tailings, Sodium silicate, *Sporosarcina pasteurii*, Synergistic mechanism, Reinforcement technology

0 引言

近年来,尾矿库溃坝事故及尾矿中污染物向周边环境泄漏等安全事故频发,不仅严重威胁了人民群众的生产生活,也对生态环境造成了严重破坏。据不完全统计,中国铀矿山和水冶厂目前共有废石场和尾矿库150多处,绝大部分废石和尾矿基本分布在人口密集的湘、赣、粤地区。因此,加强铀尾矿库的加固研究具有重要意义。目前,国内外学者主要采用化学、微生物诱导碳酸钙沉淀技术(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP技术)等手段[1]对铀尾矿库进行加固研究,上述方法虽然在一定程度上能有效加固铀尾矿库,但化学方法在加固铀尾砂时存在凝结时间快、耐碱性差等不足;微生物加固技术则存在均匀性差、碳酸钙结构强度低、加固周期长等缺点[2]。此外,在成分复杂、重金属离子浓度高的环境下,采用MICP技术会抑制细菌的生长繁殖能力和胶结效果[3]。对此,部分学者通过引入外加剂来改善MICP技术,如崔秀丽等[4]、朱文羲等[5]分别引入生物炭、沸石改善MICP技术,王保权等[6]引入纤维改善MICP技术,均取得了较好的胶结性能。

目前,MICP技术中外加剂的添加主要围绕两个方向展开[7]。其一,通过添加钙、镁离子或天然多糖、纤维素等外加剂对碳酸钙晶体的结构、晶型等进行调控,促使其形成更为稳定的结构[8],从而提高其力学性能,如IMRAN M A等[9]引入黄麻纤维材料、XIONG Y等[10]引入火山灰材料、LI Y等[11]引入生物炭材料后,均提高了MICP技术的固菌率和试样的抗压强度;王布康等[12]引入氧化镁、张建伟等[13]引入脱脂奶粉后,可调控碳酸钙晶型,进一步提高试样的力学性能。其二,基于MICP固化原理,通过添加外加剂提高碳酸钙生成量或者优化反应环境,以增加碳酸钙结晶产出,强化加固效果,如梁仕华等[14]通过添加蛋壳和贝壳,使试样抗压强度提升超2倍;YUE J W等[15]引入糯米浆材料、ZHANG Z J等[16]筛选出最优有机外加剂蛋清,均能促进$CaCO_3$生成,显著提高了试样的力学性能。

硅酸钠是一种常用的胶凝材料,单液硅化法是一种以水玻璃为主要材料的化学加固方法,李夏等[17]、肖尊群等[18]使用新型酸性水玻璃作为注浆材料,发现硅酸钠在碱性环境下也能促进$CaCO_3$、$Mg(OH)_2$等固体颗粒凝聚,具有较好的助凝效果。此外,低质量分数的硅酸钠溶液具有环境污染小、细菌毒性小等优点。因此,本文引入硅酸钠作为外加剂,协同巴氏芽孢杆菌对铀尾砂进行加固,分析不同模数与质量分数的硅酸钠溶液协同巴氏芽孢杆菌对铀尾砂柱加固性能的影响,进一步验证该协同体系的可实践性。研究结果对完善铀尾矿库的加固技术具有理论指导价值。

1 试验方案

1.1 材料制备

1.1.1 尾砂选取

选择某铀尾矿库中的尾砂作为研究对象,其化学成分见表1。

表1 铀尾砂样品的主要化学成分

Table 1 Main chemical composition of uranium tailings samples %

SiO_2	Fe_2O_3	Al_2O_3	MgO	MnO	CaO	P_2O_5	FeO	K_2O	U
85.25	1.63	3.18	0.078	0.007	0.16	0.028	0.36	3.18	0.006

由表1可知,该铀尾砂的化学组成主要是SiO_2,占比为85.25%;含有少量Al_2O_3、K_2O、Fe_2O_3等,三者占比为7.99%;微量的铀元素占比为0.006%。

1.1.2 巴氏芽孢杆菌的驯化培养

试验选用美国菌种保藏中心的编号为ATCC11859的巴氏芽孢杆菌菌种,其繁殖能力较强,在适宜条件下(如37 ℃好氧环境)培养24~48 h可形成直径为1~2 mm的菌落,且该菌株表现出耐盐和耐碱特性,在极端环境下仍能高效产生脲酶,并利用脲酶水解尿素,以此提高环境中的碳酸根离子浓度,适用于微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)。为提高该菌种在硅酸钠溶液环境中的耐受性,分别将2.3模数(模数为硅酸钠化学式$Na_2O \cdot nSiO_2$的n

值,其中 n 为二氧化硅和氧化钠的摩尔数比值)和3.3模数的硅酸钠溶液与液体培养基溶液以1∶20的比例混合,并在混合环境下进行十次传代选育,其中,第一次不加入硅酸钠溶液,之后每增加一次传代,硅酸钠的质量分数增加1%,以此类推,培育出具有良好硅酸钠溶液适应性的优势菌种。所用液体培养基为锥形瓶液体培养基:酪蛋白胨3 g,大豆蛋白胨1 g,氯化钠1 g,尿素4 g,去离子水200 mL,pH=7.3。培养基配制好后,经高压灭菌、接种处理,放入转速为180 r/min、温度为30 ℃的恒温振荡培养箱中的弹簧床上培养24 h,经过10次传代培养驯化后的菌种即为后续试验所用菌种[19]。

1.1.3 硅酸钠溶液配制

选用2.3模数和3.3模数的 Na_2SiO_3 溶液,每种模数溶液按50倍(8%质量分数)、80倍(5%质量分数)、160倍(2%质量分数)3个梯度进行稀释。当硅酸钠溶液的稀释倍数继续缩小到25倍时,硅酸钠溶液与菌液的混合液会产生胶凝现象,考虑在MICP注浆试验中诱导碳酸钙沉淀的时间较长,胶凝现象会显著影响菌液的流动性,故本文将硅酸钠溶液稀释至50倍,用于后续协同巴氏芽孢杆菌对铀尾砂柱进行加固试验。

1.2 试验方案

1.2.1 巴氏芽孢杆菌生长曲线的测定方法

将驯化后的菌株接种到7组90 mL液体锥形瓶培养基中,各参数见表2。A组为对照组,不添加硅酸钠溶液;B~G组分别为加入10 mL模数为3.3或2.3的不同质量分数梯度的硅酸钠溶液。将驯化后的菌株接种到培养液中,置于30 ℃、150 r/min条件下恒温培养20 h,每隔2 h取样,使用Eppendorf BiopHotometer OD计测定混合液的 OD 值,得出巴氏芽孢杆菌在不同试验组中的生长曲线。

表2 不同试验分组中硅酸钠溶液的参数

Table 2 Parameters of sodium silicate solution in different test groups

试验分组	硅酸钠模数	硅酸钠质量分数/%
A组	—	—
B组	3.3	8
C组	3.3	5
D组	3.3	2
E组	2.3	8
F组	2.3	5
G组	2.3	2

1.2.2 硅酸钠协同巴氏芽孢杆菌对铀尾砂的注浆试验

注浆试验设置同表2,分别是加入菌液-胶结液的A组(对照组);加入菌液-硅酸钠溶液-胶结液的B~G组。每个试验组均做3个试样,每个试验组的单轴抗压强度结果取3个试样的平均值。

具体操作如下:将铀尾砂装入41 mm×41 mm×120 mm的圆柱体微生物注浆模具中,振动压实,顶层放置3层纱布,防止浆液对铀尾砂表面产生腐蚀。底层放置3层纱布并用橡皮塞塞住底部,防止注浆时胶结液和菌液混合液因流速过快而从柱体底部流出。首次注浆时应先关闭橡皮塞阀门,往铀尾砂柱中加入过量的去离子水,使尾砂饱和,静置24 h后开始第一次注浆试验,采用自下而上的方式注入胶结液(见图1),胶结液(营养液)配制方法:0.5 mol/L的尿素和1 mol/L的 $CaCl_2$ 溶液等体积混合。向注浆烧杯中倒入50 mL胶结液,打开铀尾砂柱下方橡皮塞阀门。由于烧杯与砂柱存在高度差,胶结液可以从尾砂柱底部缓慢渗入砂柱中,多余的液体则会从顶部溢出。当注浆烧杯中还剩下20 mL胶结液时关闭橡皮塞阀门,1 h后再打开橡皮塞阀门,使砂柱内多余的胶结液缓慢从底部流出至废液收集装置,同时参考彭劼等[20]提出的带有注浆孔的注浆管,用注射器吸入10 mL菌液和1 mL的硅酸钠溶液混合液,将注射器长针头插入铀尾砂底部,缓慢注射菌液或菌液和硅酸钠的混合液,同时向上提升注射器代替注浆孔,尽量使浆液充分浸入铀尾砂的颗粒间隙。注浆试验装置如图2所示,每隔12 h重复上述的两种注浆过程,直至试样堵塞无法注浆为止,7组试验的注浆过程耗时10 d。

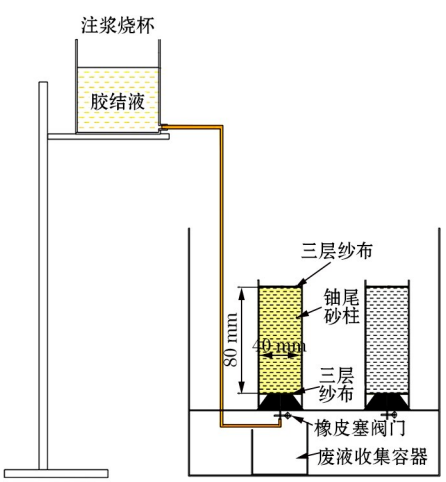


图1 注入胶结液示意

Fig.1 Schematic diagram of cementing fluid injection

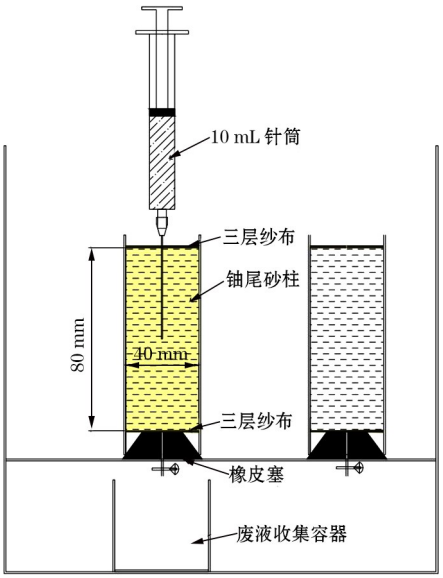


图 2 注浆试验装置

Fig.2 Grouting test device

2 试验结果分析

2.1 硅酸钠溶液对巴氏芽孢杆菌生长曲线的影响

为了探究不同模数、不同质量分数的硅酸钠溶液对巴氏芽孢杆菌生长曲线的影响,分别对 7 组试样培养 20 h 的各个时间段的生长曲线进行测定,结果如图 3、图 4 所示。从图 3、图 4 可以看出,所有加入硅酸钠溶液的试样中,巴氏芽孢杆菌的光密度(*OD* 值)曲线均呈“S”形变化,符合细菌正常的生长曲线,且培养 20 h 后,*OD* 值都能稳定在 1.9。

由图 3 可知,前 6 h 中,对照组 *OD* 值呈现出快速增长的趋势,而加入 3.3 模数硅酸钠溶液的 BCD 组和加入 2.3 模数硅酸钠溶液的 EFG 组 *OD* 值的增长速度慢于对照组,且同一模数下,硅酸钠溶液质量分数越高,增长速度越缓慢,试验组与对照组 *OD* 值的差值随时间延长逐渐扩大。在 6～12 h 内,各试验值的 *OD* 值进入迅速增长阶段,与对照组的 *OD* 值差距逐渐缩小,直至几乎相等。在 12～20 h 内,B～G 试验组 *OD* 值的增长趋势与对照组基本同步。综上所述,硅酸钠溶液对巴氏芽孢杆菌的生长抑制作用主要体现在前 6 h,且同一模数下,硅酸钠溶液质量分数越高,对巴氏芽孢杆菌的抑制效果越明显。在 6～12 h 内,巴氏芽孢杆菌迅速适应环境,*OD* 值增长趋势显著快于对照组;在 12 h 之后,所有试验组与对照组的 *OD* 值迅速趋于同步,生长曲线几乎完全重合。

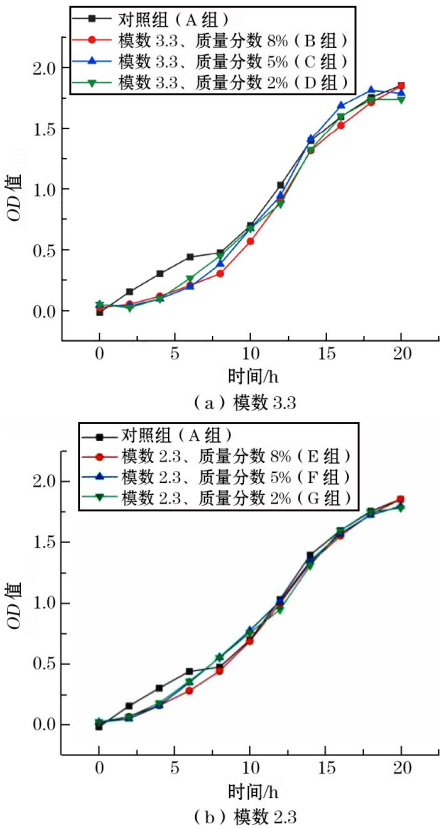
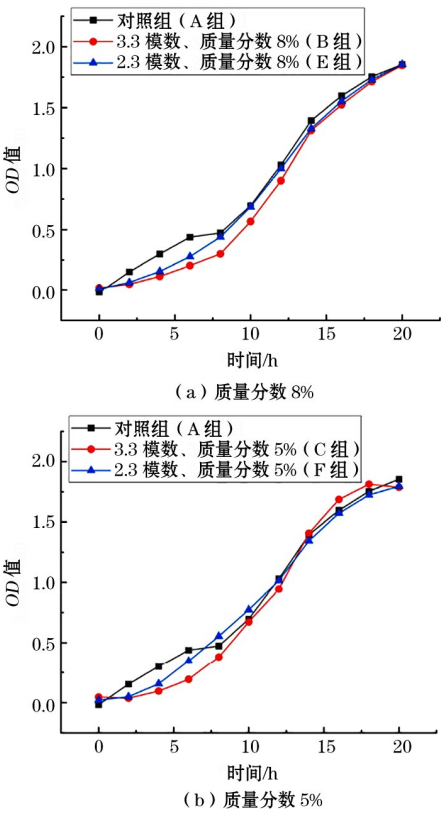


图 3 巴氏芽孢杆菌在不同质量分数硅酸钠溶液中的前 20 h 的生长曲线

Fig.3 Growth curves of *Sporosarcina pasteurii* in the first 20 h under different mass fractions of sodium silicate solution



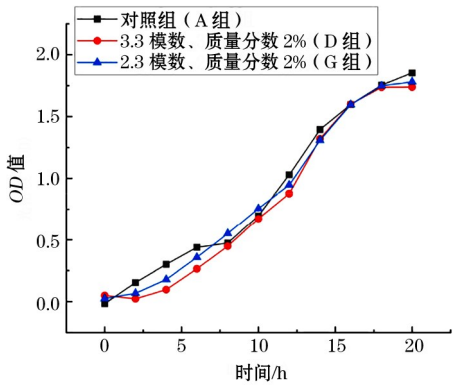


图 4　巴氏芽孢杆菌在不同模数硅酸钠溶液中的前 20 h 的生长曲线

Fig.4　Growth curves of *Sporosarcina pasteurii* in the first 20 h under different modulus of sodium silicate solution

由图 4 可知，前 6 h 各硅酸钠溶液试验组的 *OD* 值低于对照组，且硅酸钠溶液模数越高，*OD* 值增长越缓慢。因此，在硅酸钠溶液质量分数相同的条件下，硅酸钠溶液模数越高，对巴氏芽孢杆菌的抑制效果越明显。

2.2　加入硅酸钠溶液后混合液的 pH 变化

微生物矿化是一项复杂的生物化学反应过程，其矿化产物的粒径、形态和结晶度易受菌液浓度、胶结液浓度、钙源浓度、尿素浓度、pH 等诸多因素影响。为确保该协同体系加固铀尾砂及固化铀试验中环境条件的一致性，在保证不同试验组菌液浓度、胶结液浓度、钙源浓度、尿素浓度相同的前提下，同步测量巴氏芽孢杆菌在硅酸钠溶液中的 pH 变化，如图 5 所示。

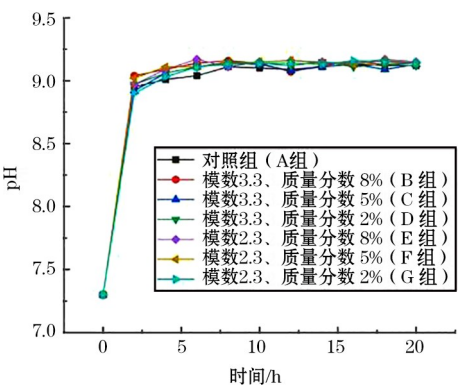


图 5　巴氏芽孢杆菌在不同硅酸钠溶液中的 pH 变化曲线

Fig.5　Variation curves of pH of *Sporosarcina pasteurii* in different sodium silicate solutions

试验在对 7 组试样培养 20 h 的同时，每隔 2 h 进行 pH 测定。由图 5 可知，7 组试样 pH 的变化曲线基本一致，最终维持在 9.3 左右，即加入不同模数、不同质量分数硅酸钠溶液并不会对混合液的最终 pH 产生影响。因此，pH 不是加固试验中碳酸钙结晶类型发生改变的原因[21]。

2.3　注浆后柱体抗压强度分析

注浆试验完成后，将整个注浆模具放入烘干箱中烘干 12 h，直至柱体含水量为 10%左右，拆除柱体外部注浆模具，将柱体放入无侧限压缩仪上进行抗压强度测试，荷载的速率为 0.5 mm/min，记录每个柱体的轴向应力峰值[22]，结果如图 6 所示。

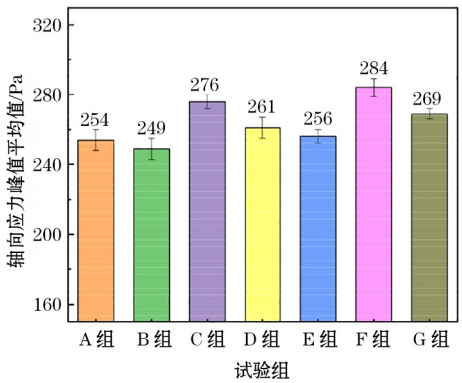


图 6　加入硅酸钠溶液后柱体的轴向应力峰值

Fig.6　The peak axial stress of the column after adding sodium silicate solution

由图 6 可知，除了 B 组以外，其余试验组加入硅酸钠溶液后，柱体的抗压强度相比 A 组均有不同程度的提高，其中 F 组（2.3 模数，5%质量分数）抗压强度平均值提升幅度最大，与 A 组相比提升了 11.8%；对比 C 组和 D 组、F 组和 G 组，当硅酸钠溶液质量分数为 0～5%时，随着质量分数提高，柱体抗压强度的提升效果优于单一巴氏芽孢杆菌加固组；对比 C 组和 F 组、D 组和 G 组可知，当硅酸钠溶液质量分数相同时，低模数硅酸钠溶液可使柱体轴向应力峰值更高。因此，硅酸钠溶液质量分数相同时，较低模数硅酸钠溶液更有利于提升柱体的单轴抗压强度；当硅酸钠溶液模数相同时，硅酸钠溶液质量分数提高对柱体单轴抗压强度的影响呈现出先促进后抑制的变化趋势。

2.4　XRD 分析

将无侧限压缩仪压缩后的柱体研磨至小颗粒状砂体，放入烘干箱中 12 h 至水分完全烘干，分别取 2.3 小节中结果最好的 F 组（2.3 模数，5%质量分数）和 A 组，放入 XRD 衍射仪中进行分析，衍射角

度为 5°～90°,扫描速率为 10°/min,使用 Jade 6 软件对扫描结果进行分析,结果如图 7 所示。

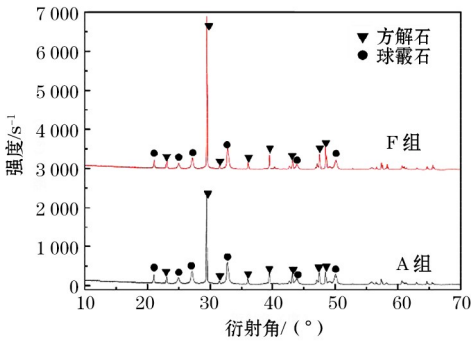


图 7 A 组和 F 组中碳酸钙晶体的 XRD 图谱

Fig.7 XRD patterns of calcium carbonate crystals in group A and group F

由图 7 可以看出,A 组和 F 组中碳酸钙晶体衍射角峰均与方解石和球霰石的标准衍射卡片相符,但未出现硅酸钙晶体的衍射角峰,表明产物中不含硅酸钙晶体。对比两组衍射角的峰值强度可以发现,当衍射角为 29.4°时,F 组的方解石峰值强度为 3 893 s^{-1},高于 A 组峰值强度(2 274 s^{-1});当衍射角为 27°、24.9°和 32.7°时,F 组球霰石的峰值强度和面积均小于 A 组。可以推断出硅酸钠溶液与巴氏芽孢杆菌协同作用的 F 组,既能促进矿化过程中碳酸钙的生成,又能促使生成的碳酸钙晶体向热力学稳定的方解石转化,使其内部结构更加整齐稳定。

2.5 碳酸钙生成量测定

取 200 g 烘干后的砂体,用过量稀盐酸溶解至不再产生气泡,将剩余的固液混合物进行过滤、洗涤、烘干和称重,计算砂体溶解前后的固体质量差,即为各个试验组产生的碳酸钙固体含量,计算结果见表 3。

由表 3 可知,砂体溶解前后的固体质量差与 2.3 小节中各组轴向应力峰值基本保持一致,B 组和 E 组中,硅酸钠溶液质量浓度较高,产生的固体反而比其他几组更少,可见占主导作用的并非硅酸钙结晶,而是碳酸钙结晶。对于硅酸钠溶液质量分数为 2% 的 D 组和 G 组,产生的固体与 A 组加固后产生的固体质量接近;对于硅酸钠溶液质量分数为 5% 的 C 组和 F 组,其产生的固体质量显著高于 A 组,其中 F 组增加最多,比 A 组提高 4.57%。因此,适当模数、质量分数的硅酸钠溶液协同巴氏芽孢杆菌加固体系,有利于碳酸钙晶体的生成。

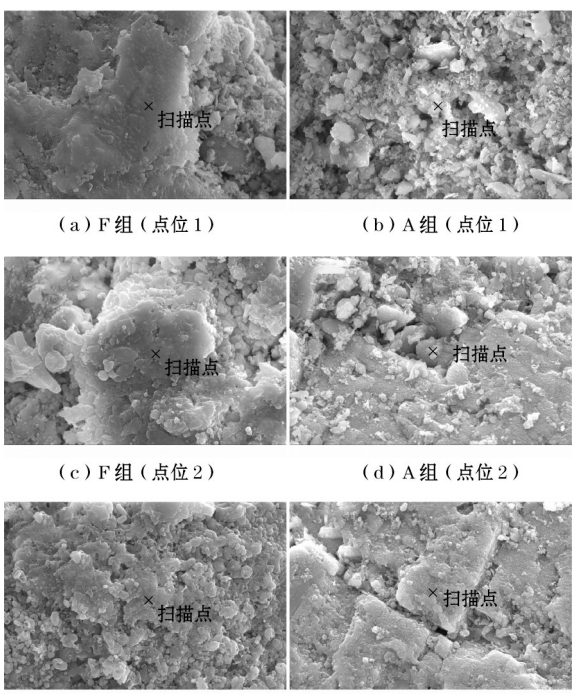
表 3 砂体溶解前后的固体质量差

Table 3 The solid quality difference of sand bodies before and after dissolution

试验组	试验值/g	平均值/g
A 组(对照组)	3.760 0 3.720 1 3.714 2	3.731 4
B 组(3.3 模数,8%质量分数)	3.606 0 3.564 0 3.609 2	3.593 0
C 组(3.3 模数,5%质量分数)	3.833 3 3.845 0 3.785 1	3.821 1
D 组(3.3 模数,2%质量分数)	3.705 2 3.764 8 3.747 3	3.739 1
E 组(2.3 模数,8%质量分数)	3.548 0 3.599 4 3.590 6	3.578 7
F 组(2.3 模数,5%质量分数)	3.910 0 3.955 2 3.840 0	3.901 8
G 组(2.3 模数,2%质量分数)	3.814 2 3.725 5 3.744 5	3.761 4

2.6 扫描电镜、能谱分析

将效果最好的 F 组(2.3 模数,5%质量分数)和 A 组中的白色结晶放入能谱分析仪中,随机选取 3 个点位进行扫描分析。图 8 为两个试验组中,随机选取的 3 个点位的扫描电镜图,图 9 为各个点位的 EDS 能谱图。



(a) F 组(点位 1) (b) A 组(点位 1)

(c) F 组(点位 2) (d) A 组(点位 2)

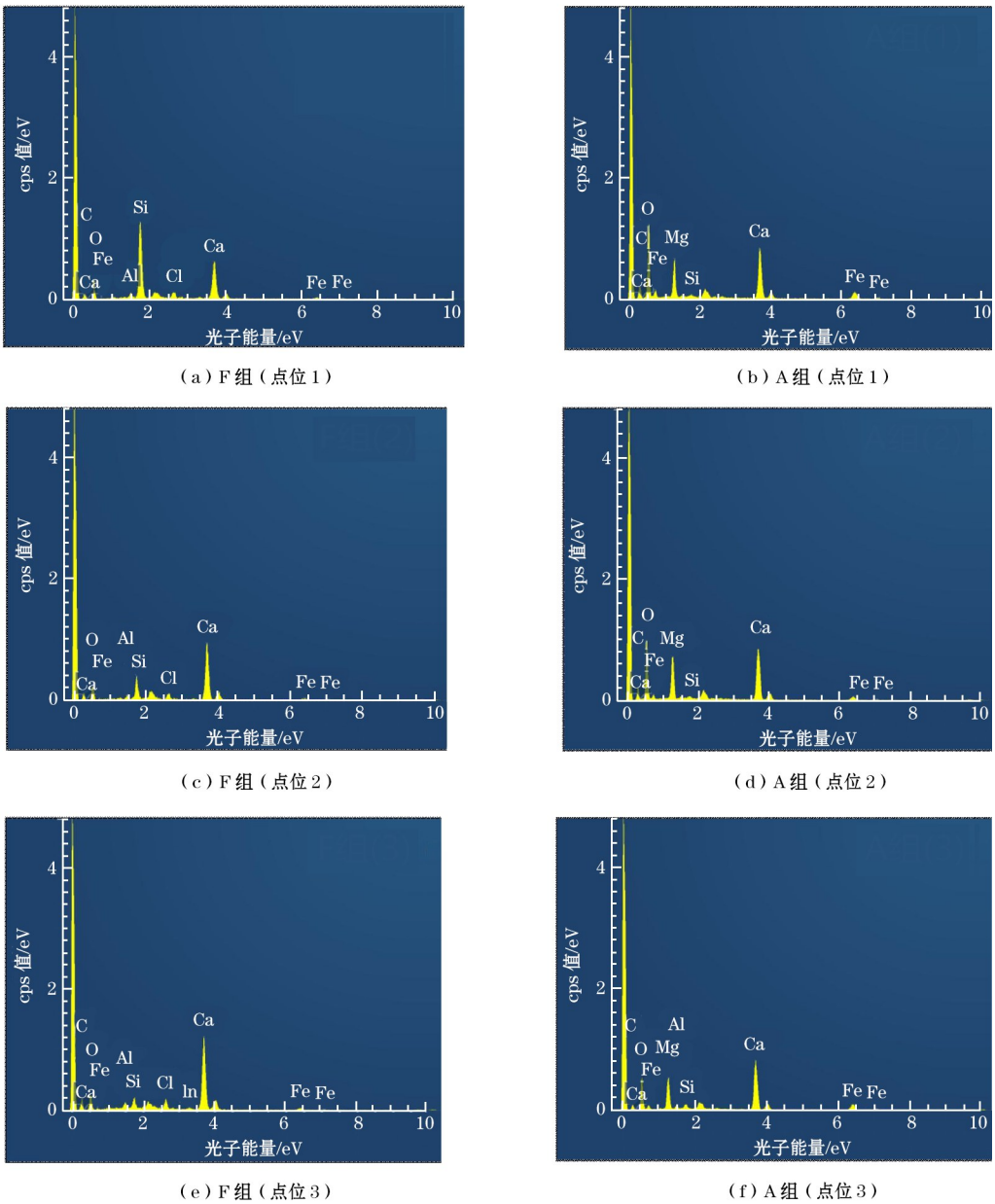
(e) F 组(点位 3) (f) A 组(点位 3)

图 8 F 组和 A 组中 3 个点位的扫描电镜图

Fig.8 SEM images of three points in group F and group A

由图 8 可知,F 组晶体结构较 A 组更加紧密规则,排列更加整齐,表面更加光滑,不规则形状的颗粒数量也更少,结合碳酸钙结晶中方解石常呈菱面体或六面体形态,球霰石易形成针状或球形结构的晶体学特征,可以推断出硅酸钠溶液协同巴氏芽孢杆菌进行加固的 F 组中生成方解石晶体的占比更高,热稳定性更好,而单一巴氏芽孢杆菌产生的碳酸钙晶体中,以热力学不稳定的球霰石为主。

由图 9 可知,F 组中 Ca 元素的质量分数分别为 16%、22%和 29%,A 组对照组中 Ca 元素的质量分数分别为 10%、11%和 15%。表明硅酸钠溶液协同巴氏芽孢杆菌进行加固的 F 组生成的碳酸钙晶体更多,从而更有利于提高尾砂柱体加固效果,验证了 2.4小节中碳酸钙生成量测定的结论。



(a) F 组(点位 1) (b) A 组(点位 1)

(c) F 组(点位 2) (d) A 组(点位 2)

(e) F 组(点位 3) (f) A 组(点位 3)

图 9 F 组和 A 组中 3 个点位的 EDS 能谱图

Fig.9 EDS spectras of three points in group F and group A

3 结论

(1) 不同模数、不同质量分数的硅酸钠溶液在前 6 h 均会抑制巴氏芽孢杆菌的生长,且硅酸钠溶液模数或质量分数越高,抑制效果越明显,在第 12 h 之后,不同试验组与对照组中巴氏芽孢杆菌生长曲线基本重合。

(2) 与单一巴氏芽孢杆菌加固的铀尾砂柱无侧

限抗压强度相比,当硅酸钠溶液模数为 2.3、质量分数为 5%时,其对应的铀尾砂柱无侧限抗压强度提升最大,增幅达 11.8%。

(3) 硅酸钠溶液模数为 2.3、质量分数为 5%的试验组中,以碳酸钙沉淀为主,表明该加固体系不仅有利于碳酸钙晶体的生成,还有助于将碳酸钙结晶转化为热力学稳定性更好的方解石。

(4) 该加固体系基于化学与生物协同机制,采用工业副产品硅酸钠与微生物加固技术相结合的手段,在满足加固强度需求的同时,又符合"以废治废"的理念,契合环保政策对固废资源化、无害化的要求,有望推广至现场应用中。

参考文献(References):

[1] 王楠,王琼,叶为民,等.微生物加固技术研究进展[J].水文地质工程地质,2024,51(5):231-244.
WANG Nan, WANG Qiong, YE Weimin, et al. Research progress of microbial reinforcement technology [J]. Hydrogeology & Engineering Geology, 2024, 51(5): 231-244.

[2] 江昭明,陈永贵,文子豪,等.pH 值对 MICP 固化修复镉污染尾矿的影响研究[J].岩土工程学报,2025,47(1):38-47.
JIANG Zhaoming, CHEN Yonggui, WEN Zihao, et al. Effects of pH on MICP curing of cadmium-contaminated tailings[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2025,47(1):38-47.

[3] 李智民,王洪国,王福彤,等.微生物诱导碳酸钙沉淀技术在尾矿综合利用中的研究现状[J/OL].矿产综合利用:1-14[2025-03-01]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20240726.1400.008.
LI Zhimin, WANG Hongguo, WANG Futong, et al. Research status of microbially induced calcium carbonate precipitation technology in comprehensive utilization of tailings [J/OL]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources: 1-14[2025-03-01]. https://link.cnki.net/urlid/51.1251.TD.20240726.1400.008.

[4] 崔秀丽,李佳禧,谢佳旻,等.生物炭联合微生物矿化技术改善软土力学性能试验研究[J].水利水电技术(中英文),2024,55(7):134-146.
CUI Xiuli, LI Jiaxi, XIE Jiamin, et al. Enhancement of shear strength of soft soil using MICP combined with biochar[J]. Water Resources and Hydropower Engineering, 2024,55(7):134-146.

[5] 朱文羲,邓华锋,李建林,等.沸石增强砂土微生物固化效果研究[J].辽宁工程技术大学学报(自然科学版),2024,43(3):304-309.
ZHU Wenxi, DENG Huafeng, LI Jianlin, et al. Study on the effect of zeolite-enhanced sand microbial solidification [J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science),2024,43(3):304-309.

[6] 王保权,谢嘉恒,郭亮,等.微生物结合纤维加筋黄土坡面抗侵蚀性能试验研究[J/OL].土木与环境工程学报(中英文):1-11[2025-03-01].https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20240417.0851.002.
WANG Baoquan, XIE Jiaheng, GUO Liang, et al. Experimental study on erosion resistance of soil slope reinforced by microbial fiber[J/OL]. Journal of Civil and Environmental Engineering: 1-11 [2025-03-01]. https://link.cnki.net/urlid/50.1218.TU.20240417.0851.002.

[7] GHODALO A O, TARIQ O, FIKRI H B, et al. Heavy metal immobilisation with microbial-induced carbonate precipitation: a review[J]. Geotechnical Research,2024,11(4):188-212.

[8] BIAN Z F, MIAO X X, LEI S G, et al. The challenges of reusing mining and mineral-processing wastes[J]. Science, 2012,337(6095):702-703.

[9] IMRAN M A, GOWTHAMAN S, NAKASHIMA K, et al. The influence of the addition of plant-based natural fibers (Jute) on biocemented sand using MICP method [J]. Materials,2020,13(18):4198.

[10] XIONG Y, DENG H F, LI J L, et al. Experimental study of MICP-treated sand enhanced by pozzolan[J]. Rock and Soil Mechanics,2022,43(12):3403-3415.

[11] LI Y, ZHANG M L, WANG X B, et al. Synergistic enhancement of cadmium immobilization and soil fertility through biochar and artificial humic acid-assisted microbial-induced calcium carbonate precipitation [J]. Journal of Hazardous Materials,2024,476:135140.

[12] 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.
WANG Bukang, JIA Cangqin, WANG Guihe, et al. Study on cementation effect of tailing sand by magnesium oxide combined with microorganism or by MICP[J]. Industrial Construction,2022,52(11):79-83.

[13] 张建伟,黄小山,边汉亮,等.基于脱脂奶粉联合诱导碳酸钙沉淀技术的古建筑修复加固[J].中国科技论文,2021,16(10):1035-1053.
ZHANG Jianwei, HUANG Xiaoshan, BIAN Hanliang, et al. Restoration and reinforcement of ancient buildings based on the combined induced calcium carbonate precipitation technology of skimmed milk powder [J]. China Sciencepaper,2021,16(10):1035-1053.

[14] 梁仕华,陈俊涛,牛九格,等.厨余垃圾蛋壳与贝壳在 MICP 技术中的应用研究[J].环境科学与技术,2019,42(8):7-12.
LIANG Shihua, CHEN Juntao, NIU Jiuge, et al. Study on utilization of eggshell and scallop shellin microbial induced calcium carbonate precipitation[J]. Environmental Science & Technology,2019,42(8):7-12.

[15] YUE J W, ZHAO L M, ZHANG B X, et al. Effect of glutinous rice slurry on the reinforcement of silt in the Yellow River Basin by Micro ially Induced Carbonate Precipitation (MICP): mechanical property and microcosmic structure [J]. Advances in Materials Science and Engineering, 2021, 2021(1): 5539854.

[16] ZHANG Z J, TONG K W, HU L, et al. Experimental study on solidification of tailings by MICP under the regulation of organic matrix[J]. Construction and building materials, 2020, 265: 120303.

[17] 李夏,徐军哲,刘人太,等.新型酸性水玻璃注浆材料的研究与应用[J].隧道建设,2017,37(10):1296-1302.
LI Xia, XU Junzhe, LIU Rentai, et al. Study and application of a new acid water glass grouting material[J]. Tunnel Construction, 2017, 37(10): 1296-1302.

[18] 肖尊群,刘宝琛,乔世范,等.新型酸性水玻璃-碳酸钙注浆材料试验研究[J].岩土力学,2010,31(9):2829-2834.
XIAO Zunqun, LIU Baochen, QIAO Shifan, et al. Experimental research on new grouting materials of acidic water glass-calcium carbonate[J]. Rock and Soil Mechanics, 2010, 31(9): 2829-2834.

[19] 李揽月,伍玲玲,胡林,等.关于两种微生物协同加固铀尾砂及防止铀元素迁移的试验研究[J].矿业研究与开发,2022,42(9):138-145.
LI Lanyue, WU Lingling, HU Lin, et al. Experimental study on synergistic reinforcement of uranium tailings by two microorganisms and prevention of uranium migration[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(9): 138-145.

[20] 彭劼,黄慕凡,谢高强,等.微生物诱导碳酸钙沉积加固土体的注浆方法[J].河海大学学报(自然科学版),2019,47(3):259-264.
PENG Jie, HUANG Mufan, XIE Gaoqiang, et al. Grouting method of MICP-treated soil [J]. Journal of Hohai University (Natural Sciences), 2019, 47(3): 259-264.

[21] 李芳芳.微生物诱导碳酸钙沉淀影响因素研究进展[J].青海交通科技,2023,35(4):140-145.
LI Fangfang. Research progress on influencing factors of calcium carbonate precipitation induced by microorganisms [J]. Qinghai Transportation Science and Technology, 2023, 35(4): 140-145.

[22] 彭成,李佳宝,刘宵凌,等.微生物诱导碳酸钙沉淀提高红砂岩堆石料无侧限抗压强度的试验研究[J].南华大学学报,2023,37(1):40-46.
PENG Cheng, LI Jiabao, LIU Xiaoling, et al. Experimental study on improving unconfined compressive strength of red sandstone rockfill by microorganism induced calcium carbonate precipitation[J]. Journal of University of South China, 2023, 37(1): 40-46.