

电石渣-风积沙体系微生物矿化加固特性研究

冀芳灿¹, 陈 辉^{1,2*}, 张军辉^{1,2*}, 宋德焱³

¹新疆大学地质与矿业工程学院 新疆乌鲁木齐市

²新疆矿产资源绿色开发与生态修复协同创新中心 新疆乌鲁木齐市

³玛纳斯县天欣煤业有限公司 新疆昌吉

【摘要】为解决电石渣和风积沙两种固体废弃物的资源化利用问题,本研究将电石渣作为辅助钙源材料引入微生物诱导碳酸钙沉淀(Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP)技术,探究其对风积沙加固效果的影响规律。采用单因素变量法,设置5%、10%、15%、20%四个电石渣掺量梯度,通过无侧限抗压强度试验系统评估不同掺量条件下试件的力学性能。试验结果显示,当电石渣掺量从0%增至15%时,试件强度由0.37 MPa提升至0.65 MPa,增幅达75.7%;但当掺量增至20%时,强度下降至0.46 MPa。研究表明,15%为最优掺量,此时电石渣的高钙含量和适度碱性环境协同作用,使碳酸钙沉淀效率达到峰值;过量掺入则因强碱性环境抑制微生物活性而导致强度下降。本研究为固体废弃物资源化利用和 MICP 技术的工程应用提供了理论依据和技术参考。

【关键词】微生物诱导碳酸钙沉淀(MICP); 电石渣; 风积沙; 固体废弃物资源化; 无侧限抗压强度

【收稿日期】2025 年 9 月 19 日 **【出刊日期】**2025 年 10 月 13 日 **【DOI】**10.12208/j.sdr.20250233

Study on microbial mineralization reinforcement of aeolian sand-carbide slag system

Fangcan Ji¹, Hui Chen^{1,2*}, Junhui Zhang^{1,2*}, Deyao Song³

¹School of Geology and Mining Engineering, Xinjiang University, Urumqi, Xinjiang

²Xinjiang Collaborative Innovation Center for Green Development and Ecological Restoration of Mineral Resources, Urumqi, Xinjiang

³Manas County Tianxin Coal Co., Ltd., Changji, Xinjiang

【Abstract】 To address the resourceization of two types of solid wastes, carbide slag and aeolian sand, this study introduces carbide slag as a supplementary calcium source material into Microbially Induced Carbonate Precipitation (MICP) technology and investigates its influence on the reinforcement effectiveness of aeolian sand. Using a single-factor variable method, four carbide slag content gradients of 5%, 10%, 15%, and 20% were established, and the mechanical properties of specimens under different content conditions were systematically evaluated through unconfined compressive strength tests. The experimental results show that when the carbide slag content increases from 0% to 15%, the specimen strength rises from 0.37 MPa to 0.65 MPa, representing an increase of 75.7%; however, when the content increases to 20%, the strength decreases to 0.46 MPa. The study demonstrates that 15% is the optimal content, at which the high calcium content and moderate alkaline environment of carbide slag synergistically contribute to peak carbonate precipitation efficiency; excessive addition leads to strength reduction due to the inhibition of microbial activity by the strongly alkaline environment. This research provides theoretical foundation and technical reference for solid waste resourceization and engineering applications of MICP technology.

【Keywords】 Microbially induced carbonate precipitation (MICP); Carbide slag; Aeolian sand; Solid waste resource utilization; Unconfined compressive strength

*通讯作者: 陈辉, 张军辉

1 引言

随着经济和工业化的快速发展, 固体废弃物的大量产生对土地资源、生态环境、人们的生活和生命健康构成威胁^[1]。聚氯乙烯是一种有广泛用途的化工材料, 主要应用于家具、医疗产品、建筑材料等方面^[2]。目前我国制备聚氯乙烯的方法主要为煤基电石法(利用煤炭和石灰石, 以电热的方式制备电石)^[3]。资料显示, 国内制备 1 t 聚氯乙烯会产生 1.4 t-1.8 t 的电石渣^[4]。电石渣主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 故它有一定的使用价值。但其具有很强的碱性, pH 达 12 以上, 另外电石渣含有一些硫化物、磷化物等有毒物质^[5]。如若将电石渣进行长期堆放积累或掩埋, 不仅会破坏周边的生态环境, 还会使得土壤变质, 农作物品质下降等; 电石渣中的有害物质还可通过空气、食物等多种途径进入人体, 会对人体呼吸道产生刺激, 会对多种器官和生理功能造成不同程度的影响^[6]。与电石渣类似, 风积沙也是一种亟待解决的环境问题。我国荒漠化土地面积广阔, 风积沙分布广泛, 特别是在西北干旱、半干旱地区。风积沙颗粒细小、质地松散、保水性差, 不仅威胁生态环境, 还会引发沙尘暴等自然灾害。然而, 风积沙颗粒均匀、化学性质稳定, 也具有作为建筑材料的潜力。如何有效利用这两种固体废弃物, 实现“变废为宝”, 以及加强对固废电石渣和风积沙的综合利用, 对环境保护、节约能源、响应国家可持续发展政策具有重大意义。

微生物诱导碳酸钙沉淀 (Microbially Induced Carbonate Precipitation, MICP) 技术可以利用微生物代谢作用矿化形成碳酸钙, 这一现象即为微生物矿化沉积作用^[7], 具有操作简单、成本低廉、绿色环保等优势。近年来, 研究者们开始探索将固体废弃物应用于 MICP 技术中。电石渣作为二次资源^[8], 其高钙含量恰好可以为 MICP 反应提供充足的钙源, 而风积沙则可作为良好的胶结介质。将电石渣与风积沙联合应用于 MICP 实验中, 不仅可以解决这两种固废大量堆积存放的问题, 减少对土地资源的占用和环境污染, 还能降低 MICP 技术中传统钙源(如氯化钙)的使用成本, 实现废弃物的循环利用。这种“以废治废”的创新思路, 对于推动绿色建材发展、加强固废综合利用、响应国家可持续发展战略具有重大的理论意义和应用价值。因此, 本研究旨在探

讨电石渣-风积沙体系在 MICP 技术中的应用效果, 为固体废弃物资源化利用提供新的途径。

2 原材料与试验方法

2.1 原材料

2.1.1 风积沙

试验所用风积沙采集自新疆维吾尔自治区吐鲁番市。通过颗粒分析的结果表明该风积沙粒径分主要分布在 2~500 μm 范围内, 呈现明显的细粒化特征, 根据《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 进行级配参数计算, 得到不均匀系数 (C_u)=2.14 (< 5), 曲率系数 (C_c)=1.10, 均不满足良好级配的判定标准, 表明该风积沙属于级配不良的典型单一粒径砂土。

2.1.2 电石渣

本研究所用电石渣取自山东鲁泰环保建材有限公司, 为乙炔生产过程中产生的工业固体废弃物。采用 X 射线荧光光谱仪 (XRF, Thermo Fisher Scientific) 对电石渣样品进行化学成分分析。

XRF 测试结果表明, 电石渣化学成分以 CaO 为主, 含量高达 91.55% (质量分数), 次要成分包括 SiO_2 (3.54%)、 Al_2O_3 (1.65%)、 Na_2O (1.17%) 等, 显示出典型的高钙特征。电石渣中极高的 CaO 含量可为 MICP 过程提供充足的 Ca^{2+} 离子, 其强碱性环境 (pH 12-13) 有利于脲酶催化反应和碳酸钙沉淀, 是理想的 MICP 钙源材料。

表 1 电石渣化学成分组成

化合物	含量 (wt%)	元素	含量 (wt%)
CaO	91.55	Ca	65.46
SiO_2	3.54	Si	1.66
Al_2O_3	1.65	Al	0.873
Na_2O	1.17	Na	0.870
SO_3	0.699	S	0.280
Cl	0.553	Cl	0.553
MgO	0.369	Mg	0.239
Fe_2O_3	0.255	Fe	0.178
其他	<0.1	其他	<0.1

2.1.3 菌液、胶结液

试验采用的巴氏芽孢杆菌 (*Sporosarcina pasteurii*) 菌株编号为 ATCC 11859, 由广东省微生

物菌种保藏中心提供。该菌种是一种革兰氏阳性产芽孢需氧菌, 具有高产脲酶的特性, 在自然环境中分布广泛^[9,10]。该菌株在微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 过程中表现出优异的矿化能力和环境适应性。实验采用改良 LB 培养基进行菌株培养, 主要包含尿素、酪蛋白胨、大豆蛋白胨、NaCl 及琼脂等成分。菌液浓度通过紫外分光光度计检测显示, 对数生长后期菌液的 OD600 值稳定在 1.65±0.1 区间。胶结液为尿素和 CaCl₂ 混合溶液, 其中尿素与 CaCl₂ 的摩尔浓度比 1:1 (浓度均为 1 mol/L)。

2.2 试验方法

2.2.1 试验方案

为探究电石渣作为钙源材料对微生物诱导碳酸钙沉淀 (MICP) 加固风积沙效果的影响规律, 本

研究采用单因素变量法, 以电石渣掺量为唯一变量, 系统设计了不同电石渣掺量的对比试验。试验分为两大类: (1) 对照组 (CG): 采用传统 MICP 加固方法, 不参加电石渣, 使用常规钙源溶液 (氯化钙溶液) 进行微生物诱导固化处理, 作为基准参照, 用于评估电石渣掺入对加固效果的影响程度; (2) 实验组 (TG): 在 MICP 加固体系中掺入不同比例的电石渣替代部分传统钙源, 根据预试验结果和文献调研, 设置电石渣掺量梯度为 5%、10%、15%、20%四个水平, 通过系统对比不同掺量条件下的加固效果, 分析电石渣掺量与试件强度之间的关系。为确保试验数据的可靠性和统计学意义, 每组试验均设置 3 个平行样本, 各组具体实验参数设计详见表 2。

表 2 试验分组参数设计

组别	编号	电石渣掺量 (%)	钙源种类	胶结液浓度 (mol/L)
对照组	CG	0	氯化钙	1.0
	TG-5	5		
试验组	TG-10	10	氯化钙+电石渣	1.0
	TG-15	15		
	TG-20	20		

2.2.2 无侧限抗压强度试验

无侧限抗压强度试验按照《土工试验方法标准》(GB/T 50123-2019) 相关规定进行。使用 SANS 电子万能试验机进行单轴抗压强度测试。试验时, 将试样放置于试验机下承压板上, 对尺寸为 Φ50 mm×H100 mm 的圆柱体试样施加轴向荷载, 加载速率控制在 1 mm/min, 直至试样破坏。记录破坏荷载, 得出单轴抗压强度。

3 结果与分析

从实验数据可以观察到, 随着电石渣掺量的变化, MICP 试件强度呈现出先增后减的非线性变化趋势, 这一现象与电石渣的强碱性和高钙含量特性密切相关。如图 1 所示, 当电石渣掺量从 0%增加至 5%时, 试件强度由 0.37 MPa 显著提升至 0.56 MPa, 增幅达 51.40%。这一阶段的强度提升主要归因于电石渣中 Ca(OH)₂ 的双重作用: 一方面, 电石渣溶解释放的 Ca²⁺为微生物诱导碳酸钙沉淀反应提供了充足的钙源, 增加了碳酸钙晶体的生成量, 从而增强了颗粒间的胶结作用; 另一方面, 适度的碱性环境

(pH 值升高) 促进了脲酶活性, 加速了尿素水解产生 CO₃²⁻的过程, 有利于 CaCO₃沉淀反应的进行。在 5-15%掺量区间内, 强度维持在较高水平, 其中 15%掺量时达到最大强度 0.65 MPa, 相比 5%掺量进一步提高 16.10%。此阶段电石渣的钙离子供应充分, 且碱性环境维持在微生物可耐受的适宜范围内, 使得碳酸钙晶体生成速率与数量达到峰值, 晶体在孔隙中的分布更加均匀致密, 形成了最优的胶结结构。值得注意的是, 10%掺量时强度 0.51 MPa, 略有回落但仍保持在中等水平, 这可能与该掺量下钙源供应与碱度平衡的微妙变化有关。然而, 当掺量超过 15%增至 20%时, 强度明显下降至约 0.46 MPa, 降幅达 29.20%。这一强度衰减现象主要由电石渣过量引起的负面效应导致: 过高的 Ca(OH)₂ 含量使体系 pH 值显著升高 (可能超过 pH 12), 超出了脲酶产生菌的最适生长范围 (通常为 pH 8-10), 强碱性环境抑制了微生物的代谢活性甚至导致菌体失活, 从而降低了碳酸钙的生成效率; 同时, 过量的 Ca(OH)₂ 可能在孔隙中形成松散的氢氧化钙沉积物, 干扰了

碳酸钙晶体的有序生长, 削弱了胶结质量; 此外, 高碱度还可能改变溶液的离子强度和渗透压, 不利于微生物的正常生理活动, 最终导致试件整体强度下降。

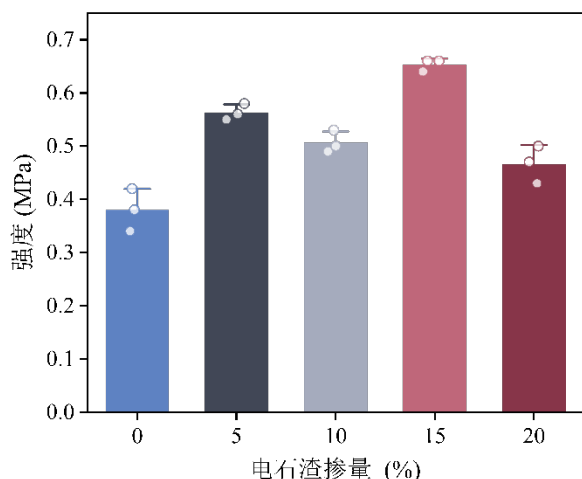


图1 不同电石渣掺量下试件无侧限抗压强度

对比分析显示, 未掺入电石渣的对照组试件强度为约 0.37 MPa, 这反映了纯 MICP 处理在仅依靠外加钙源(如氯化钙溶液)条件下的基础固化能力。此时体系中的钙离子浓度和 pH 值完全由培养液组成决定, 微生物诱导矿化反应受到钙源供应和碱度条件的双重限制。掺入电石渣后, 试件力学性能获得了显著改善, 这主要源于电石渣强碱性和高钙含量的协同增强效应。15%掺量组强度达 0.65 MPa, 相比基准组提升 75.7%, 表明在该掺量下, 电石渣释放的 Ca^{2+} 有效补充了矿化反应所需的钙源, $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解产生的 OH^- 提高了溶液 pH 值, 为尿素水解和碳酸根生成创造了有利条件, 两者协同作用使碳酸钙沉积效率达到最优, 形成了致密的胶结网络。在 5-15%掺量区间内的试件强度均维持在 0.51-0.65 MPa 范围, 明显高于基准组, 强度提升幅度在 37.80%-75.70%之间。这一区间内, 电石渣的碱性和钙含量保持在平衡状态: 足够的钙离子浓度保证了矿化反应的物质基础, 适宜的碱度范围 (pH 9-11) 既促进了 CO_3^{2-} 的生成又不抑制微生物活性, 实现了微生物代谢与矿化沉积的最佳耦合。值得关注的是, 即使在 20%高掺量条件下, 试件强度为 0.46 MPa, 仍略高于基准组 24.3%, 这说明尽管过量电石渣的强碱性对微生物活性产生了显著抑制作用, 但其提供的大量钙源仍能通过化学沉淀途径产生部分碳酸

钙胶结, 使强度仍保持一定增长, 但已偏离了 MICP 生物矿化的最优机制, 强度增益明显低于中等掺量组。

综合实验数据分析表明, 电石渣作为同时具有强碱性和高钙含量特性的辅助材料, 对 MICP 试件强度的影响呈现出典型的剂量依赖性双相效应。在本实验条件下, 15%左右的电石渣掺量能够实现碱度-钙源的最优平衡, 此时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 溶解产生的 Ca^{2+} 浓度充足, 满足了大量碳酸钙晶体生成的需求; 同时碱性环境控制在微生物可耐受的适宜范围内, 既促进了脲酶催化尿素水解产生 CO_3^{2-} , 又不抑制菌体的正常代谢活性, 使得微生物诱导矿化反应达到最高效率, 形成了强度最优的胶结结构。建议在工程应用中根据具体施工条件、微生物种类特性和土质条件精确调控电石渣掺量, 应严格避免过量使用导致的强碱性抑制效应, 以充分发挥电石渣改性 MICP 材料的技术优势, 实现强度提升与成本控制的双重目标。

参考文献

- [1] 常睿卿, 杨俊杰, 武亚磊, 等. Cgf 固化/稳定化复合重金属污染土强度及浸出特性[J]. 中国环境科学, 2024.
- [2] 张杨, 李远勋. 分析电石渣的综合利用[J]. 中国金属通报, 2022(8): 237-239.
- [3] 马涛, 段树涛, 曹智慧, 等. 电石生产过程降低碳排放的措施研究[J]. 中国氯碱, 2022(12): 49-53.
- [4] 阳小东, 李进. 电石渣的综合利用[J]. 聚氯乙烯, 2017, 45(9): 1-4.
- [5] 高智. 水泥工业“十二五”发展思路[J]. 21 世纪建筑材料, 2010, 2(4): 1-5.
- [6] Zhang J, Gong X, Wang Z, et al. Inducible regulation of spherical CaO particle for the recycling of carbide slag[J]. Powder Technology, 2020, 362: 671-679.
- [7] 梅冥相. 微生物碳酸盐岩分类体系的修订: 对灰岩成因结构分类体系的补充[J]. 地学前缘, 2007(5): 222-234.
- [8] 王会昌, 贾晓伟, 沈小宁, 等. 电石渣的综合利用[J]. 聚氯乙烯, 2021, 49(11): 37-42.
- [9] Wong L S. Microbial cementation of ureolytic bacteria from the genus bacillus: A review of the bacterial

application on cement-based materials for cleaner production[J]. Journal of Cleaner Production, 2015, 93: 5-17.

- [10] Martin D, Dodds K, Ngwenya B T, et al. Inhibition of *sporosarcina pasteurii* under anoxic conditions: Implications for subsurface carbonate precipitation and remediation via ureolysis[J]. Environmental Science &

Technology, 2012, 46(15): 8351-8355.

版权声明: ©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS