https://doi.org/10.3799/dqkx.2026.166

生物矿化结皮-有机物-固化小球缓释联合改性边坡客土水-力学特性

泮晓华[1],潘广慧[1],唐朝生[1],余航波[2]

1. 南京大学地球科学与工程学院,江苏南京 210023
2. 浙江工正工程管理有限公司宁波高新区分公司,浙江宁波 315000

摘 要: 本论文提出一种基于酶诱导氧化镁碳化(EIMC)技术的复合改性方法,通过室内冲刷试验对比研究了生物矿化结皮、有机物调控、EIMC固化小球缓释三者协同提升生态修复边坡客土水-力学特性的规律与作用机制.以碳化度、冲刷率和累计侵蚀量评估改性与抗侵蚀效果;用扫描电镜和纳米压痕技术分析微观结构和力学特性.结果表明,三者联合改性效果最优,冲刷率比单一EIMC处理降低77.9%,比空白组降低82.4%;在261 mm/24 h降雨、冲刷100 min后,累计侵蚀量最低(9.84 g).红薯淀粉通过调控成核、优化孔隙与稳定水化学环境,使碳化度提升2.5%,弹性模量提高43.4%.固化小球可实现Mg^{2+}缓释,促进深层碳化度提升3.6%,弹性模量提升132.6%.喷洒EIMC浆液使得坡表快速形成致密结皮层,有效阻隔表面冲刷.

关键词: EIMC;生态修复;抗冲刷性能;碳化度;微观结构.

中图分类号: P642.5 **文章编号:** 1000-2383(2026)09-3378-13 **收稿日期:** 2025-08-31

Hydro-Mechanical Properties of Slope External-Soil Modified by Combined Method of Bio-Crust, Organic Matter, and Slow-Release of EIMC Solidified Sand Particle Balls

Pan Xiaohua[1], Pan Guanghui[1], Tang Chaosheng[1], Yu Hangbo[2]

1. *School of Earth Sciences and Engineering, Nanjing University, Nanjing* 210023, *China*
2. *Ningbo High-Tech Zone Branch, Zhejiang Gongzheng Engineering Management Co., Ltd., Ningbo* 315000, *China*

Abstract: This paper proposes a combined modification method based on enzyme-induced magnesium carbonation (EIMC), integrating bio-crust formation, organic matter regulation, and the Mg^{2+} slow-release effect from EIMC solidified balls. Through a standardized indoor erosion experiment, the laws and mechanisms of the three working together to enhance the hydro-mechanical stability of external-soil used in ecological slope restoration were comparatively studied. Carbonation degree, erosion rate, and cumulative erosion amount were quantified to assess both the soil modification and its anti-erosion performance; micro-structural features and micro-scale mechanical properties were characterized using scanning electron microscopy (SEM) coupled with nanoindentation. Experimental results show that the combined modification of the three achieved the best effect. The erosion rate was 77.9% lower than that of the single EIMC treatment and 82.4% lower than that of the blank group. Under the

基金项目: 国家重点研发计划项目(No. 2023YFC3007102);国家自然科学基金项目(Nos. 42477188,41925012,42230710,41902271).

作者简介: 泮晓华(1986-),男,副教授,博士生导师,主要从事工程地质与环境岩石力学研究. ORCID: 0000-0002-2655-6125. E-mail: panxiaohua@nju.edu.cn

引用格式: 泮晓华,潘广慧,唐朝生,余航波,2026.生物矿化结皮-有机物-固化小球缓释联合改性边坡客土水-力学特性.地球科学,51(9):3378-3390.

Citation: Pan Xiaohua, Pan Guanghui, Tang Chaosheng, Yu Hangbo, 2026. Hydro-Mechanical Properties of Slope External-Soil Modified by Combined Method of Bio-Crust, Organic Matter, and Slow-Release of EIMC Solidified Sand Particle Balls. *Earth Science*, 51(9): 3378-3390.

condition of 261 mm/24h rainfall and 100 minutes of erosion, the cumulative erosion amount was the lowest (9.84 g). Sweet potato starch improves carbonation degree by 2.5% and elastic modulus by 43.4% via nucleation regulation, pore structure optimization, and stabilization of the aqueous chemical environment. EIMC solidified ball enables sustained Mg^{2+} release, enhancing deep-layer carbonation degree by 3.6% and elastic modulus by 132.6%. Spray application facilitates rapid in situ formation of a dense, continuous bio-crust layer on the slope surface-effectively suppressing surface rain erosion.

Key words: EIMC; ecological restoration; anti-erosion performance; carbonation degree; microstructure.

近几十年来,随着我国基础设施建设的快速推进,交通工程、水利工程等领域产生了大量裸露岩质边坡.此类边坡不仅存在崩塌、滑坡等工程地质问题隐患(胡新丽等,2011),还对区域生态环境造成了显著破坏(尚生勇等,2020).传统采用的混凝土喷锚、挡土墙等刚性防护措施(陈建平等,2001)虽有效提升了边坡稳定性,但往往以永久性改变地表生态为代价.在生态文明建设持续深化的背景下,以客土喷播为代表的柔性生态修复技术体系正在加速发展,其"工程治理与生态修复协同"的核心理念,为实现边坡稳定与生态功能恢复双重目标提供了新的技术路径(杨生巧等,2024).

客土喷播技术是利用机械动力,将经科学配比的植物生长基质与优选植被种子混合物直接或者以挂网喷射的方式,均匀或者分层覆盖于人工裸露边坡表面,待到种子发芽并形成植被后,实现对坡面的防护和生态恢复功能(章梦涛等,2004).尽管该技术具有施工效率高、成坪速度快等显著优势,其在实际应用中仍面临两大难题:一是客土基质重力稳定性不足,二是抗暴雨冲刷能力较弱(王来永等,2015).针对这些不足,改良喷播基质以适应复杂立地条件已成为当前研究的重要方向.无机类、离子类和有机类等固化剂的研发已取得了显著进展,这些材料可有效提升客土基质的水-力学性能、增强其与坡面附着强度,并优化土壤结构特性(张传耀,2023;刘瑾等,2024;裴向军,2024).然而,多数固化剂在自然环境中降解能力较差,长期残留于土壤中不仅可能造成二次污染,还将加重环境负荷,与边坡生态治理的可持续发展目标相悖.因此,生态友好型土壤固化剂的研发已成为亟待解决的问题.

微生物诱导氧化镁碳化技术(Microbial Induced Magnesia Carbonization,简称MIMC)是近年来新兴的一种生态仿生矿化固土技术(Ruan *et al.*, 2019).该技术的固化胶结过程主要分为两个阶段:首先,氧化镁发生水合反应生成氢氧化镁(公式(1));随后,氢氧化镁与微生物水解尿素产生的碳酸盐发生碳化反应,最终形成水合碳酸镁(HMCs)(公式(2)~(6))(Hoang *et al.*, 2021).众多研究表明,HMCs对多种基质均具有显著固化效果,包括尾矿砂(方祥位等,2019)、黄土(黄涛等,2020)、细砂(Yang *et al.*, 2021)、电解锰渣(陈哲,2021)、建筑垃圾颗粒(Wang *et al.*, 2024)、疏浚污泥(Wang *et al.*, 2023)以及岩砂(Dong *et al.*, 2023)等.为进一步提升材料在存储和运输方面的便利性,Zheng *et al.*(2025)提出了酶诱导氧化镁碳化技术(Enzyme Induced Magnesia Carbonization,简称EIMC),并通过系统的对比试验,深入研究了其对岩砂的固化性能及固化机理.

$$MgO+H_2O \rightarrow Mg(OH)_2\ (B), \tag{1}$$

$$CO(NH_2)_2+H_2O \xrightarrow{Urease} 2NH_3+CO_2, \tag{2}$$

$$Mg(OH)_2+CO_2+2H_2O \rightarrow MgCO_3{\cdot}3H_2O\ (N), \tag{3}$$

$$5Mg(OH)_2+4CO_2+H_2O \rightarrow Mg_5(CO_3)_4(OH)_2{\cdot}5H_2O\ (D), \tag{4}$$

$$5Mg(OH)_2+4CO_2 \rightarrow Mg_5(CO_3)_4(OH)_2{\cdot}4H_2O\ (H), \tag{5}$$

$$Mg(OH)_2+CO_2+3H_2O \rightarrow Mg_2(CO_3)(OH)_2{\cdot}3H_2O\ (A). \tag{6}$$

本论文提出了EIMC结皮-有机物-EIMC固化小球缓释联合改性土体方法,以期为提升客土喷播技术中客土水-力学特性提供新的技术思路.EIMC结皮能够有效提升客土表层的抗冲刷能力,同时通过有机物和EIMC固化小球的缓释作用,实现低镁离子浓度和低pH环境下长期稳定的矿化固土过程,并维持适宜的植物生长环境.通过系统开展室内冲刷模型试验,设置EIMC、EIMC固化小球、有机物三种坡面处理方式,采用碳化度评估EIMC反应程度,结合冲刷率和土壤累计侵蚀量指标表征各处理方式的抗侵蚀性能,并辅以扫描电镜和纳米压痕技术,解析不同处理方式下坡面土体的微观结构以及微观力学特性.最终,基于多维度综合分析,揭示EIMC结皮-有机物-小球缓释联合改性模型土坡水-力学特性的微观机理.

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

1.1.1 下蜀土 本文所用的下蜀土采于南京市栖霞区，为长江中下游地区典型的晚更新世风成黄土.采集的土壤经实验室风干、研磨后，过2 mm筛备用，其基本物理性质如表1所示.

1.1.2 淀粉 试验所用淀粉为河南省生产的食品级商业红薯淀粉.淀粉中的直链淀粉质量含量为22%，支链淀粉质量含量为78%.按固液比1∶19(w/v)加水，在85 ℃水浴加热30 min，制备成质量分数为5%的淀粉糊，备用.

1.1.3 活性氧化镁 试验所用的氧化镁为一种商用活性氧化镁，其主要理化性质如表2所示(Wang *et al.*, 2022).经柠檬酸中和法测定，其化学活性在12～25 s范围内.

1.1.4 EIMC浆液 EIMC浆液为大豆脲酶和尿素混合后加入氧化镁制得.将大豆粉按1∶10质量比与去离子水均匀混合，经搅拌与过滤后取上清液，作为试验用大豆脲酶溶液.采用电导率法测定，该酶在25 ℃下活性为6 mmol/(L•min).取上述制备的大豆脲酶溶液加入2 mol/L尿素，在室温条件下预水解24 h，最终制得pH值为8.21的碳化溶液.将预水解后的碳化溶液按液固比1∶1.78加入活性氧化镁制得EIMC浆液.

1.2 试样制备及试验方法

1.2.1 冲刷模型制备 土坡冲刷模型制备所用模具是由3.0 mm厚的亚克力板制成的边长为50.0 mm的无顶和无一个侧面的正方体容器(图1a).制样时，先将土和氧化镁按设定比例均匀混合，之后倒入适量的碳化溶液进行搅拌.若是采用淀粉处理方式的试验组，冷却后的淀粉糊先和碳化溶液进行混合，之后混合物代替纯碳化溶液倒入均匀混合的土体和氧化镁中.将均匀搅拌后的混合物装入模具，按照45°倾角分层压实.设置了EIMC固化小球的试验组，沿着坡面等距离埋置4个小球，小球顶部与坡面齐平，小球间距为10 mm.EIMC小球制备流程如下：将粒径0.5～1.0 mm的砂颗粒与占其总质量2%的EIMC浆液混合(配比同1.1.4)置于洁净容器中，机械搅拌5 min至混合均匀.随后称取3.0 g湿混料，在室温下手工塑形为近似球形样品，并立即用保鲜膜完全包裹以抑制水分损失.所有球形样品置于恒温恒湿养护箱中，在(28±1) ℃、相对湿度＞95%条件下静置养护24 h，待获得足够脱模强度后，小心脱模.脱模后样品继续在相同环境下养护6 d，以保证EIMC充分进行碳化胶结作用，最终获得结构稳定的EIMC固化小球.针对坡表EIMC处理试验组，在坡表喷洒含2.0 g氧化镁的EIMC浆液.喷洒完成后，将整套土坡模型用保鲜膜严密包裹，并于恒温恒湿养护箱中进行为期7 d的相同养护(Bachmeier *et al.*, 2002).本研究于同一试验周期内共制备了6组模型(表3)，各组除了处理方式存在差别，其余制备流程和养护环境均严格保持一致.图1b展示了试验组5完成制备与养护流程后所获得的典型模型试样.

1.2.2 碳化度测试 碳化度(DC)是指活性氧化镁在EIMC过程中的碳化程度.本试验采用盐酸酸洗排水法测定碳化度，其基本原理是通过测定生成

表1 下蜀土物理力学性质

Table 1 Index properties of Xiashu soil

液限(%)	塑限(%)	塑性指数	液性指数	最优含水量(%)	最大干密度(g/cm^3)	比重
36.5	19.5	17.0	10.5	16.5	1.7	2.73

表2 活性氧化镁的化学成分和物理性质

Table 2 Chemical composition and physical properties of reactive magnesia cement

化学成分(%)				物理性质	
MgO	CaO	SiO_2	Fe_2O_3	比重	干密度(g/cm^3)
98.09	0.73	1.07	0.11	3.00	3.56

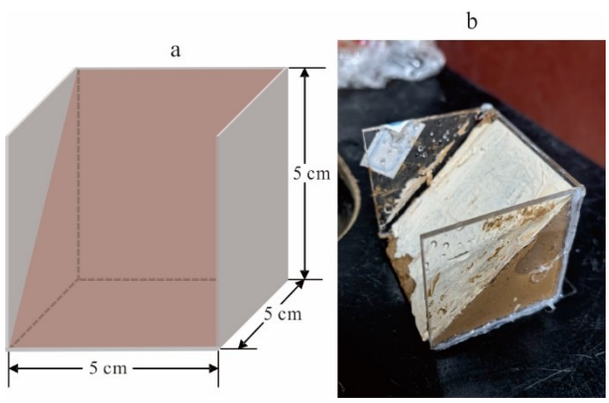


图1 制备土坡冲刷模型的亚力克模具(a)；试验组5土坡冲刷模型实例(b)

Fig.1 Acrylic mold used for preparing the soil slope erosion model (a) and a example of the soil slope erosion model in Group 5 (b)

表 3　冲刷模型处理方式具体信息

Table 3　Specific information on the treatment method of the erosion model

编号	处理方式	MgO 质量含量	含水率	淀粉类型	淀粉掺量	EIMC 固化小球	养护时间
1	无	0%	40%	红薯粉	0%	无	7 d
2	坡体:EIMC	坡体:1%			0%	无	
3	坡体:EIMC+淀粉	坡体:1%			15%	无	
4	坡体:EIMC+淀粉+EIMC 固化小球	坡体:1%			15%	有	
5	坡体:EIMC+淀粉 坡表:EIMC 喷洒	坡体:1% 坡表:2.0 g			15%	无	
6	坡体:EIMC+淀粉+EIMC 固化小球 坡表:EIMC 喷洒	坡体:1% 坡表:2.0 g			15%	有	

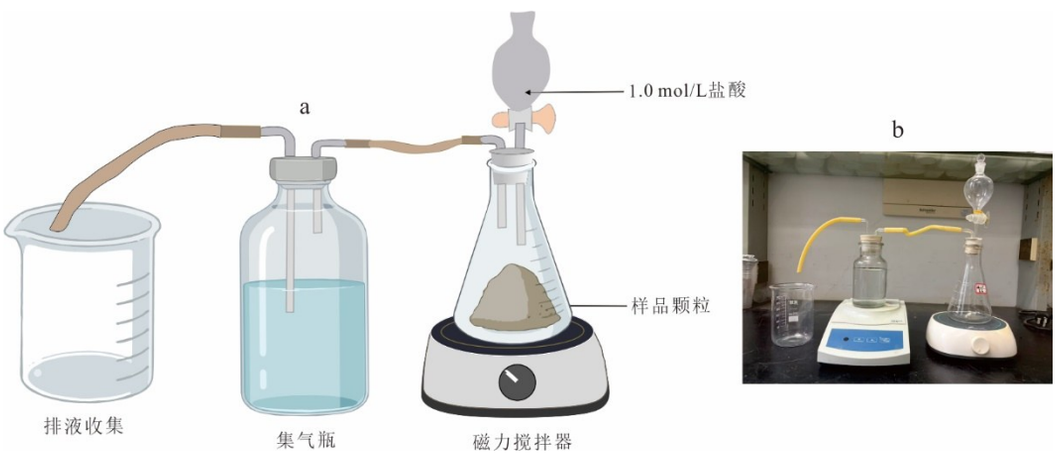


图 2　酸洗排水法测定土样碳化度装置示意图(a);实物图(b)

Fig.2　Schematic diagram of experimental sets for determining the DC of soil samples by acid washing drainage method (a) and physical photos (b)

CO_2的体积来表征土样中发生碳化反应的活性氧化镁的摩尔量(Unluer and Al-Tabbaa, 2014). 试验装置如图 2 所示. 由于试验组 4 和 6 含有小球缓释加固措施,固化效果在深度方向具有不均匀性,分别测其表层、中层和下层的碳化度,其余样品均取其表层以下 5 mm 处的土样进行测试. 土样取得后烘干并进行研磨,取 5 g 粉末样倒入锥形瓶中,加入 30 mL 1.0 mol/L 盐酸溶液浸泡,并用磁力搅拌器搅拌,记录排出水的体积,即为生成CO_2的体积.DC值通过公式(7)进行计算.

$$DC=\frac{M_{CO_2}}{M_{MgO}}, \tag{7}$$

其中,M_{CO_2}表示通过浸渍法测定的样品中含有的二氧化碳的摩尔量;M_{MgO}表示实验中使用的活性氧化镁的摩尔量.

1.2.3　冲刷试验　对各组处理和养护完成后的模型开展模拟降雨冲刷试验. 试验前将模型固定于冲刷槽,喷头垂直安装于坡面上方 30 cm 处. 采用圆形喷头喷水模拟降雨,喷水设定流量为 18 L/h(图 3). 按照中国水利部关于降水等级强度的划分,该条件下的 24 h 降水量为 261 mm,属于特大暴雨级别(24 h 降水量≥250 mm). 每组试样的冲刷时间为 60 min,每 10 min 收集一次冲刷物. 冲刷结束后将收集的冲刷物放入烘箱烘干至恒重,按公式(8)计算其冲刷率(V).

$$V=\frac{M_{2n}}{M_1}, \tag{8}$$

其中,M_1表示初始土质量;M_{2n}表示不同时间收集的冲刷物的质量.

1.2.4　纳米压痕试验　基于自主研发的微观工程地质力学系统中的纳米压痕模块,系统评估了试验组 2、3、4 表层典型区域(距 EIMC 固化小球底部 1 cm 处)和试验组 5、6 表层典型区域(表层 EIMC 结皮层以及距 EIMC 固化小球底部 1 cm 处)的微纳米力学性能,重点对比分析淀粉与 EIMC 固化小球的

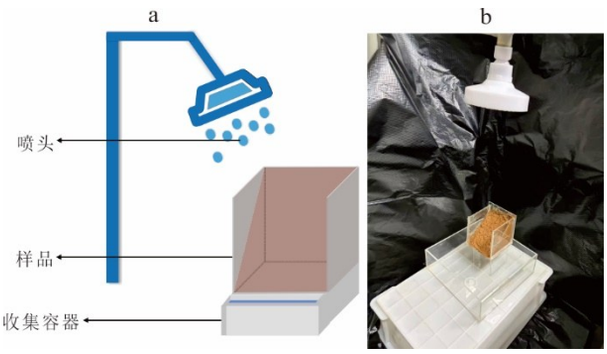


图 3 冲刷试验装置示意图(a);实物图(b)

Fig.3 Schematic diagram of experimental set for erosion test (a) and physical photo (b)

胶结效能差异.EIMC 固化小球底部 1 cm 处作为代表性测试点的依据如下:Mg^{2+}扩散浓度梯度及剖面碳化度测试结果表明,距小球表面约 1 cm 位置处于离子扩散有效作用范围且该区域碳化反应趋于稳定,能降低不同试验组中扩散梯度对固化效果造成的影响.

样品制备流程包括:首先获取尺寸为 1 cm×1 cm×0.5 cm 的原位样品,随后在真空环境下采用环氧树脂浸泡法进行固化处理并静置 24 h;接着将固化后的样品切割成约 100 μm 的薄片,通过精密抛光至测试所需的表面平整度.图 4a 展示了试验组 4 的典型纳米压痕试样.在纳米压痕测试阶段,将制备完成的标准化试样置于微观工程地质力学系统纳米压痕模块载物台(图 4b),通过精密位移控制系统实现对纳米级压入深度的实时监测.测试过程中,仪器自动记录材料在典型加载-恒载-卸载循环全过程中的荷载-位移响应数据,并同步生成特征性 P-h 曲线.基于国际通用的 Oliver-Pharr 分析方法(Oliver and Pharr, 1992),通过解构曲线关键参数(最大荷载 P_{max}、最大压入深度 h_{max}、接触深度 h_c、残余深度 h_p 及弹性接触刚度 S),获得样品胶结材料的压痕硬度 HIT 和弹性模量等微纳米力学参数.

1.2.5 SEM 微观结构表征 采用扫描电镜(SEM)技术对试验组 2 与试验组 3 的微观结构特征进行系统对比分析.样品制备流程如下:首先将试样置于 105 ℃烘箱中进行干燥处理,烘干至恒重.随后从表面精密切割出尺寸为 5 mm×5 mm×1 mm(长×宽×高)的适合观测的片状样品,之后按照 SEM 标准制样方法进行制样.测试过程中,分别对试样的表面和内部进行多区域扫描,通过高分辨率成像技术全面表征材料表面形貌与内部微结构的差异特征.

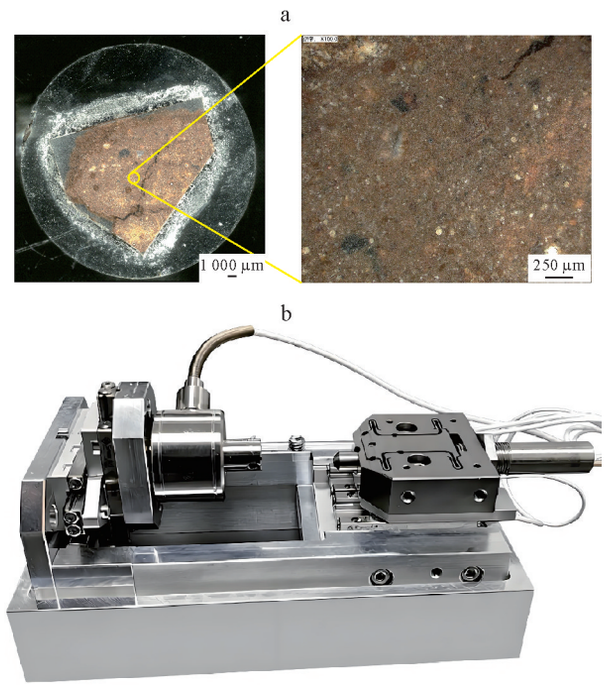


图 4 试验组 4 典型纳米压痕试样(a);微观工程地质力学测试系统纳米压痕模块装置(b)

Fig.4 Typical nanoindentation specimens of test group 4 (a); diagram of the nanoindentation module of the micro-engineering geomechanics testing system (b)

2 结果与分析

2.1 冲刷表观特征

图 5 展示了不同处理方式下土样在模拟降雨冲刷过程中的表观特征演变规律.空白组 1 在冲刷初期(10 min)即表现出显著的水蚀现象,雨滴冲击与坡面径流共同作用形成初始坑洞结构,随着时间推移(至 100 min),水流沿坑洞持续下切发育出细密冲刷沟道,同时土体因吸水饱和导致颗粒间粘结力弱化,最终呈现明显的侵蚀痕迹.试验组 2 和 3 在同等时长冲刷后同样出现显著侵蚀,而改良试验组 4~6 的侵蚀控制效果呈现显著差异:试验组 4 固化小球样品在 60 min 时出现局部保护失效(小球周边土壤剥离),导致后期侵蚀速率与空白组趋同;试验组 5 没有固化小球但是有坡表 EIMC 硬化壳的样品则呈现阶段性保护特征,前 60 min EIMC 硬壳有效阻隔水流侵蚀,60 min 后随着涂层逐渐剥蚀,下层土壤才开始流失;试验组 6 复合了淀粉、固化小球和坡表 EIMC 硬化壳的样品展示了最优抗侵蚀作用,不仅初

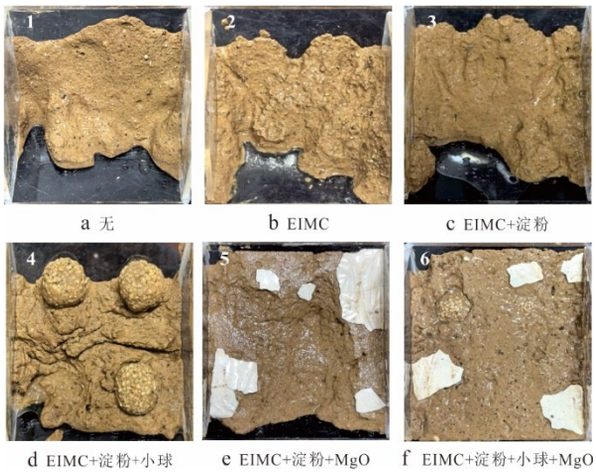


图 5　降雨冲刷后土坡模型的表观特征

Fig.5　Appearances of the soil slope erosion models subjected to rainfall erosion tests

期侵蚀量最低,后期即使涂层剥落失效后仍能通过固化小球结构阻控水流侵蚀,最终保持样品表面完整性最优.

2.2　冲刷率和累计侵蚀量

图 6 系统对比了不同处理方式下模型土样的抗冲刷性能.图 6a 展示了六组样品冲刷 100 min 后的冲刷率.从冲刷率指标来看,未经处理的试验组 1 样品在 100 min 冲刷后达到 43.36% 的冲刷率.值得注意的是,坡表喷洒 EIMC 的试验组 5 和试验组 6 样品展现出最优异的防护效果,其中试验组 6 复合处理样品(坡表 EIMC 喷涂+固化小球埋置)的冲刷率较试验组 2 坡体 EIMC 处理样品降低 77.9%,较空白组降低 82.4%,验证了表面防护与深层改良的协同增效机制.在深层改良方面,对比试验组 3(淀粉处理)与试验组 4(淀粉+固化小球)的样品抗冲刷性能可发现,固化小球的引入能有效提升深层土壤的抗侵蚀性能;而对比试验组 4、试验组 5 和试验组 6 样品的抗冲刷结果,则进一步证实 EIMC 表面处理对提升表层抗冲刷性能具有决定性作用.这些数据充分说明,复合处理方案通过多层级防护机制显著提升了侵蚀控制效果.

累计侵蚀量分析(图 6b)进一步揭示了各处理机制的动态特征:空白组试验组 1 样品呈现线性侵蚀增长趋势,EIMC 处理组(试验组 2 样品)虽能延缓侵蚀进程,但保护效果有限.当引入淀粉改良(试验组 3 样品)时,侵蚀控制效果得到提升,而加入固化小球的试验组 4 样品在 60 min 后出现保护失效现象,导致侵蚀速率陡增.坡面 EIMC 处理组(试验组 5 样品)表现出明显的阶段性保护特征——前 60 min 累计侵蚀量极低,60 min 后随着硬化壳保护层逐渐剥蚀,侵蚀量开始加速增长.综合性能最优的试验组 6 样品通过多重防护机制,在 100 min 测试周期内累计侵蚀量始终维持在最低水平(9.84 g),其防护效果是纯 EIMC 处理的 7 倍,充分验证了复合改良策略的优越性.

2.3　碳化度

图 7a 系统展示了六组样品的碳化程度分布特征.试验结果表明:未添加 EIMC 的空白对照组(试验组 1)未检出碳酸盐矿物生成,DC 值为 0;其余各组 DC 值均稳定于 0.19～0.21 区间,表明 EIMC 体系在标准养护条件下具备碳化胶结能力.添加淀粉的改性组(试验组 3～6)DC 平均值较未添加淀粉的基准组(试验组 2)显著提升.该增强效应主要归因于淀粉中支链淀粉分子的高度分支化结构可作为高效异相成核位点,能显著降低水镁石($Mg(OH)_2$)结晶的成核能垒,从而加速初始晶核形成并提升整体碳化反应动力学效率.

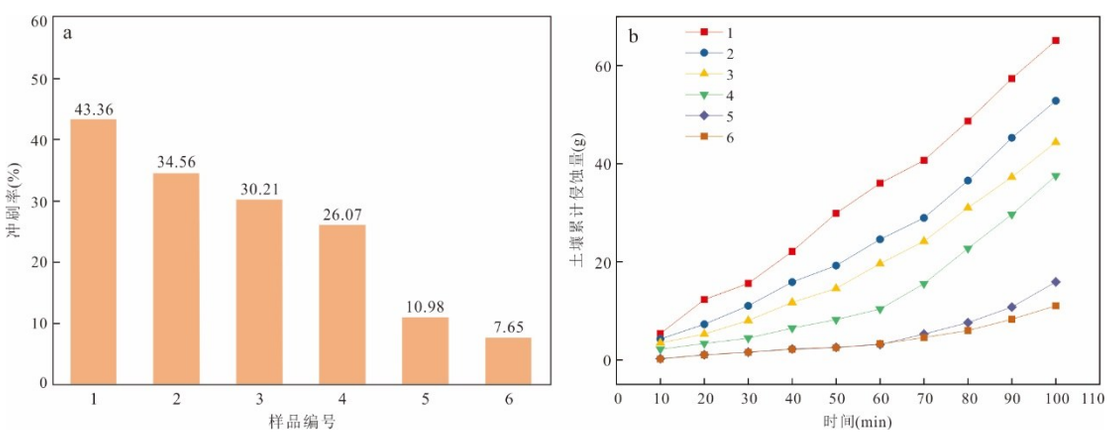


图 6　6 组模型试验的土壤冲刷率(a);6 组模型试验的土壤累计侵蚀量(b)

Fig.6　Erosion rate of 6 sets of models (a); cumulative soil erosion of 6 sets of models (b)

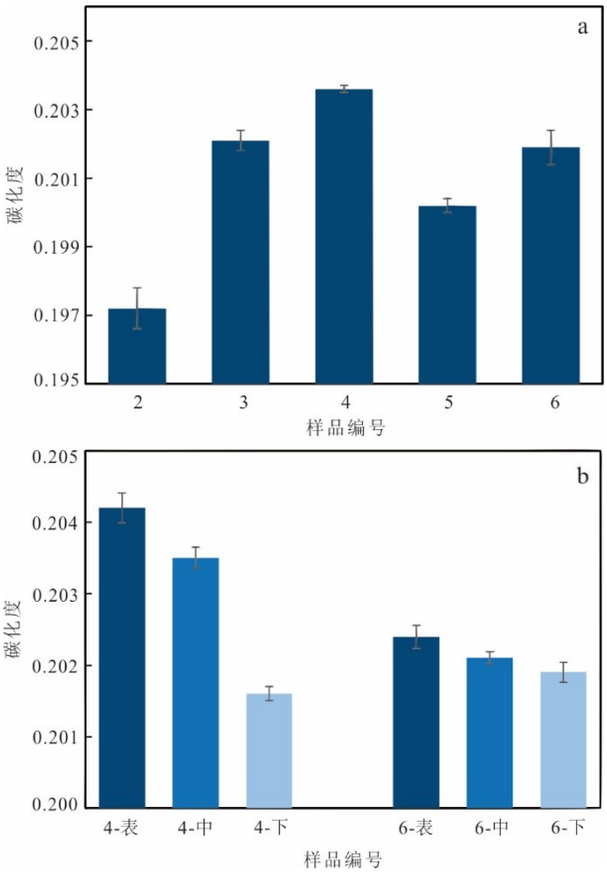


图 7 6 组样品表层碳化度(a);试验组 4 和试验组 6 样品表层、中层和下层碳化度(b)

Fig.7 Carbonization degree of sub-samples of 6 group models on surface (a); and sub-samples of groups 4 and 6 on the surface, middle and bottom parts (b)

图 7b 对比了试验组 4 与试验组 6 样品在不同深度土层的碳化度分布特征.结果表明,两试验组的碳化度均呈现垂直分异特征:随土层深度增加,碳化度呈递减趋势,且试验组 4 的垂直梯度更为明显.该差异主要源于 EIMC 碳化胶结机制的差异:在碳化反应中,参与反应的碳酸根离子不仅来源于尿素水解,还包括空气中 CO_2 溶解于水后形成的碳酸根.试验组 6 在坡面喷洒 EIMC 浆液后,表层迅速形成致密胶结层,显著抑制了大气 CO_2 向深层的扩散与溶解;与此同时,浆液中早期生成的碳酸钙在重力与毛细作用下发生向下迁移,为坡体中下部提供了持续的碳化反应物,从而部分补偿了表层 CO_2 受限所导致的碳化度衰减.

2.4 微纳米力学特性

图 8 展示了试验组 2 至试验组 6 样品的纳米压痕荷载-位移曲线.所有测点曲线均呈现典型的三阶段变形特征:初始线性弹性响应阶段、非线性塑性变形阶段以及卸载回弹阶段.

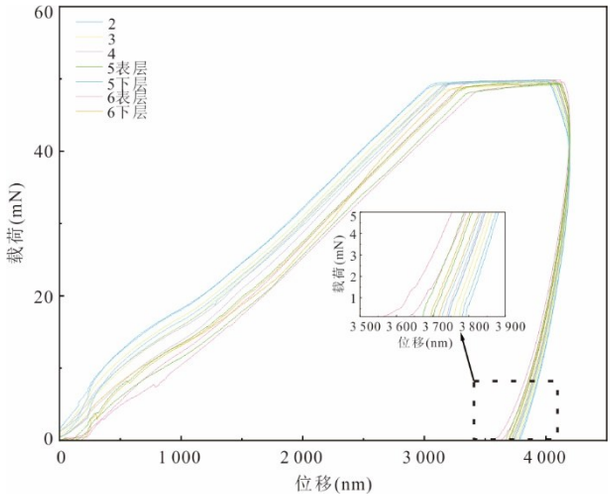


图 8 试验组 2、3、4、5、6 样品纳米压痕荷载-位移曲线

Fig.8 Load-displacement curves of nanoindentation tests of groups 2, 3, 4, 5 and 6

然而,各组样品在加载段与卸载段的初始斜率存在显著差异,表明其微观弹性模量具有明显差异;该差异主要源于不同碳化产物物质成分与微观结构在胶结特性上的本质区别.此外,各组样品的残余压痕深度亦表现出系统性差异.残余深度被定义为纳米压痕测试中卸除全部外加载荷后材料表面所保留的永久压入深度,是表征材料塑性变形能力的关键力学参数.其中,试验组 3 的残余深度介于试验组 2(最小)与试验组 4(最大)之间,说明淀粉掺入与固化小球添加均可有效提升 EIMC 固化土体的抗塑性变形能力.

为进一步揭示氧化镁表面强化处理对材料力学行为的影响机制,本研究对试验组 5(在试验组 3 基础上实施 EIMC 表层喷洒)与试验组 6(在试验组 4 基础上实施 EIMC 表层喷洒)分别开展了分层取样分析,获取其表层与下层试样的纳米压痕响应.结果表明:在抗塑性变形性能方面,各处理组间存在显著梯度差异.试验组 6 下层试样表现最优,其次为试验组 6 表层,再次为试验组 5 表层.试验组 6 下层优异的塑性抵抗能力可归因于 EIMC 表层喷洒后,其与深层渗透的胶结溶液充分发生碳化反应,形成连续、致密且界面结合良好的碳化产物过渡层,从而显著提升了材料整体的结构刚度与变形协调能力.上述结果证实,EIMC 表面强化处理不仅可增强材料宏观尺度的变形抗力,亦能优化微观尺度的结构稳定性.进一步分析表明,各组性能差异与氧化镁在土体中的渗透深度分布、碳化反应的空间完整性(即

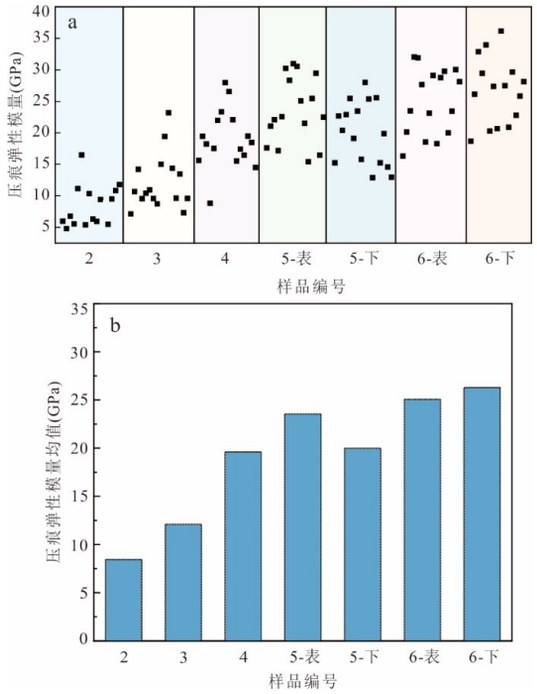


图 9　试验组 2、3、4 样品弹性模量(a);每组样品弹性模量平均值(b)

Fig.9　Elastic modulus of all points in different groups (a); average elastic modulus of each group (b)

反应程度与均匀性),以及界面过渡区碳化产物的形貌、厚度与胶结连续性等多因素密切相关.

图 9 展示了各组样品全部测试点的弹性模量分布及其组内平均值.弹性模量是表征材料在纯弹性变形阶段抵抗形变能力的核心力学参数,直接反映其宏观刚度特性.由图 9b 可见,试验组 2 的弹性模量均值最低(19.42 GPa),试验组 4 最高(30.58 GPa),二者相差 11.16 GPa,相对增幅达 57.0%.该趋势与前述纳米压痕荷载-位移曲线中观测到的残余深度变化规律高度一致:残余深度越小,对应弹性恢复能力越强、弹性模量越高.微观机制分析表明,试验组 2 因孔隙率高、矿物沉淀呈离散状分布且原子/离子键合强度弱,导致整体结构刚度偏低;试验组 3 引入淀粉后,其孔隙通道在高分子链桥接作用下被部分填充,基体连续性与应力传递效率得到了提升;样品 4 则在淀粉改性的基础上,借助固化小球的缓释胶结效应,实现了多轮次、空间均匀的碳酸盐矿物沉积,最终构建出致密、连通且界面结合牢固的三维矿物网络,显著增强了材料的弹性承载能力.

为系统阐明 EIMC 表面强化处理对土体刚度特性的调控机制,对试验组 5(基于试验组 3 实施 EIMC 表层喷洒)与试验组 6(基于试验组 4 实施氧化镁表层喷洒)开展了分层弹性模量测试与对比分析.结果表明,各组试样呈现清晰的垂直方向刚度梯度:试验组 6 下层弹性模量最高(32.71 GPa),其次为试验组 6 表层(31.05 GPa),再次为试验组 5 表层(27.89 GPa);而试验组 5 下层(20.13 GPa)与未施加表面处理的试验组 3(20.06 GPa)数值基本相当.该刚度排序与前述抗塑性变形能力的优劣序列完全一致,进一步证实 EIMC 表面处理可通过增强碳化反应深度与结构致密度,协同提升材料的弹性响应能力与整体刚度水平.其中,试验组 6 下层的优异表现源于 EIMC 颗粒经表层喷洒后,在毛细作用与浓度梯度驱动下实现深层渗透,并与胶结溶液发生充分、持续的碳化反应,从而在下层区域形成高结晶度、低孔隙率且界面过渡平滑的强化碳化层;相比之下,试验组 5 因基体初始密实度较低(仅含淀粉)、胶结网络发育不充分,导致氧化镁渗透受阻、反应局限于近表层,下层区域未能得到有效强化,故其刚度提升效果有限.综上,弹性模量的空间异质性不仅取决于 EIMC 的添加方式与渗透深度,更受到碳化产物空间分布均匀性、胶结网络结构完整性及微观界面连续性等多重因素的协同调控.

2.5　微观结构特征

图 10 展示了经 7 d 标准养护后,EIMC 单一处

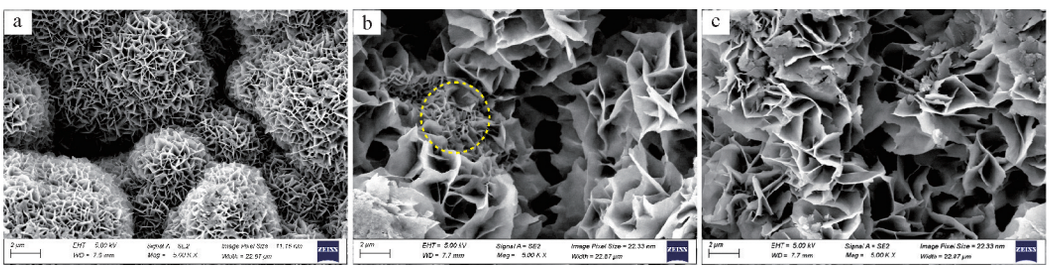


图 10　不同处理方式下的 SEM 结果

Fig.10　SEM results of samples under different treatment methods

a. 试验组 2;b. 试验组 3;c. 试验组 4

理组(组2)、EIMC-淀粉复合改性组(组3)和EIMC-淀粉-EIMC固化小球复合改性组(组4)样品的扫描电子显微镜(SEM)微观结构特征.在EIMC单一处理组中(图10a),碳化产物呈现典型的三维球状网络构型,构成贯穿土体的连续胶结骨架.该网络由直径集中于2~5 μm的规则球形或类球形颗粒组成,颗粒表面密布枝晶状纳米突起.颗粒间界面清晰,内部及颗粒间隙中广泛分布着大量不规则、相互连通的微米级孔隙.该高孔隙率、开放连通的多孔结构,结合晶体表面显著的纳米级粗糙度,表明在脲酶持续催化下,Mg^{2+}与CO_3^{2-}的界面反应动力学充分,晶体生长基本未受空间限制,得以沿热力学有利方向自由发育.

在EIMC-淀粉复合改性组中(图10b),微观结构发生系统性重构:原有规则球状碳化网络完全消失,取而代之的是尺度异质、边界模糊的片状聚集体.该聚集体由厚度不均、横向尺寸跨度大(从亚微米级薄片至数微米级团簇)的层状单元构成,边缘普遍呈现卷曲、折叠或波纹状褶皱.其表面宏观趋于平滑,但微观可见周期性起伏纹理,该褶皱特征与淀粉分子链在晶体生长前沿的吸附取向及受限结晶行为密切相关.孔隙结构同步演化:连通性微米孔数量显著减少,残余孔隙以孤立或半封闭状存在,平均孔径增大,但总孔隙率下降,整体结构致密度明显提升.该形貌转变源于淀粉对矿化过程的三重协同调控:其一,淀粉分子通过羟基/羧基官能团优先吸附于水镁石基面,产生强空间位阻效应,抑制晶体的各向同性生长;其二,淀粉水化凝胶相原位填充粗粒级孔隙,并通过片状产物的面-面堆叠进一步压缩剩余空间,实现从"球状开放网络"到"片状致密聚集体"的跨尺度结构变化.EIMC-淀粉-EIMC固化小球复合改性组(图10c)与EIMC-淀粉复合改性组的微观结构相似,但由于EIMC固化小球Mg^{2+}的缓释和进一步的碳化反应使得结构更加致密.

3 讨论

3.1 淀粉促进EIMC胶结特性机理

试验结果证实,红薯淀粉的引入能显著提升酶诱导氧化镁碳化(EIMC)改性土体的水力学性能和结构强度,其作用机制主要体现在以下三个方面:晶体成核与生长调控、孔隙结构优化和水化学环境调控.

在晶体成核与生长调控方面,图10显示,未添加淀粉的EIMC样品中碳化产物主要为直径为2~5 μm的规则球形或类球形颗粒,表面分布枝状纳米突起,整体构成上具有高孔隙率和开放连通特征的珊瑚礁状多孔结构(图10a).该形貌与氢氧化镁在无外源调控条件下自由结晶所形成的典型水镁石($Mg(OH)_2$)衍生结构高度吻合.已有研究表明,天然多糖分子可通过其丰富的羟基官能团与矿物离子发生配位作用,调控无机晶体的成核与生长过程.Pach *et al.*(1996)发现,马铃薯淀粉胶体添加剂可使方解石的成核频率提升约10 000倍,并能显著改变矿物晶体形貌.赵东方等(2022)进一步揭示,多糖类物质可通过氢键吸附于碳酸盐矿物表面,削弱Mg^{2+}的水合层,从而降低其进入晶格的能垒.在添加淀粉后(图10b),碳化产物形貌发生显著重构:规则球形颗粒完全消失,取而代之的是尺寸不均、边界模糊的片状聚集体,其表面宏观趋于平滑,微观可见周期性褶皱纹理.该转变源于淀粉分子对结晶过程的多重协同调控作用:一方面,其分子链上密集分布的羟基(-OH)与少量氧化引入的羧基(-COOH)可与溶液中游离Mg^{2+}发生配位络合,降低自由成核能垒,增加有效成核位点密度,从而加速初始晶核形成;另一方面,淀粉分子优先吸附于晶体特定晶面,通过空间位阻与界面能调控效应抑制各向同性生长,诱导晶体沿层状方向择优扩展,最终形成热力学更稳定的片状或准二维聚集构型.此类有机模板导向生成的片状/层状碳化产物,不仅具备更高的比表面积,且因表面官能团丰富、界面粗糙度增大,显著增强了其与土颗粒及胶结相之间的物理锚固与化学键合能力.

在孔隙结构优化方面,对比图10a与10b可见,淀粉的引入显著重构了固化体系的孔隙层级分布.未添加淀粉的样品中,球形碳化颗粒呈松散堆积,颗粒间以大量直径>1 μm的连通孔隙为主,整体孔隙率高、骨架连续性差;而添加淀粉后,片状聚集体通过面-面堆叠与边缘嵌合形成更为致密的三维网络,大孔(>1 μm)数量锐减,介孔(2~50 nm)比例上升,孔径分布趋于窄化且连通性降低.钟怡江等(2022)的研究表明,多糖类物质在常温碳酸镁沉淀过程中可显著促进无定形前驱体的形成与转化.该结构演变表明,淀粉兼具"化学成核调控剂"与"物理结构填充剂"的双重功能:其水化后形成的三维亲水凝胶网络可原位填充粗粒级孔隙;同时,其所诱导生成的片状碳化产物凭借几何适配性可实现高效密实堆积,显著减少颗粒间无效空

腔.这种跨尺度(微米至纳米)的孔隙结构协同优化,可在保障必要水分迁移通道与气体扩散路径的前提下,有效降低宏观渗透系数,从而同步提升土体的抗渗性、持水稳定性及力学承载能力.

在水化学环境调控方面,淀粉对碳化反应体系的微环境具有系统性缓冲与稳定作用.首先,其强亲水性促使淀粉分子在土颗粒表面形成稳定、连续的水化吸附层,不仅延长了局部反应区域的水分滞留时间,缓解了干燥环境下反应中断的风险,还为Mg^{2+}迁移与CO_3^{2-}扩散提供了持续的液相传输介质;其次,在土壤微生物群落作用下,淀粉发生可控降解,释放乙酸、乳酸等弱有机酸中间体,将局部微环境pH动态缓冲于8.5～9.5区间.该pH窗口具有双重优化效应:既可避免过高pH(>10)引发氢氧化镁过早、过量沉淀并包裹未反应氧化镁颗粒,阻碍后续碳化反应进行;又能维持脲酶(urease)的最适活性(pH=7.5～9.0),保障尿素持续水解生成NH_4^+与HCO_3^-,进而通过碳酸平衡反应稳定供应CO_3^{2-}(Ruan *et al.*, 2019).该缓冲机制直接促进了碳化反应的空间均匀性与反应深度,与本研究中淀粉掺入组碳化度系统性提高(图6a)的实验结果形成有力互证.

综上所述,淀粉通过"成核-结构-环境"三位一体的物化生协同调控机制:在晶体尺度上引导片状碳化产物定向生长,在孔隙尺度上驱动多级结构致密化,在反应微环境尺度上构建pH与水分双稳态,从而全面提升EIMC固化土体的力学性能、耐久性及水力响应特性.

3.2　固化小球缓释过程及促进EIMC胶结特性机理

冲刷模型试验与纳米压痕力学表征的协同分析表明,EIMC固化小球可通过"镁离子缓释-扩散"与"孔隙调控-再胶结"双重机制,实现对周边未固化土体的动态、可控再矿化加固.具体缓释-促胶结机理如下:经EIMC处理形成的小球具备良好的结构完整性与初始力学强度,从而在维持球体宏观形态稳定的同时,保留了贯通性微米级孔隙网络.该孔隙体系不仅为水分及离子传输提供了有效通道,亦为后续水化反应预留了反应空间.在短期养护条件下,小球内部仍存留一定量未完全水化的氧化镁颗粒;当小球置于含碳化溶液的水环境中时,残留MgO在毛细吸力与浓度梯度驱动下发生持续、缓慢的水化反应,生成Mg^{2+}并沿孔隙通道向周边土体定向扩散.扩散至界面区域的Mg^{2+}与土体孔隙水中已存在的CO_3^{2-}发生原位EIMC碳化反应,生成无定形水镁石及碱式碳酸镁等胶结相,逐步填充周边土体颗粒间孔隙并强化颗粒接触点.该再胶结过程的发生起始时间、反应速率及空间扩展深度,均可通过调控环境水文条件实现调控.相关研究表明,酶辅助氧化镁碳化体系中,水合碳酸镁等碳化产物的形成能够有效填充土体孔隙并胶结相邻颗粒,从而构建稳定的空间胶结网络(何稼等,2024).此外,外加添加剂或载体可进一步调控碳化反应的进程与空间分布,提升深层固化效果(Wang *et al.*,2025).

3.3　EIMC结皮-有机物-固化小球缓释联合改性土体水-力学特性机理

EIMC生物胶结过程是一个多阶段、多机制耦合的复杂矿化体系,其技术路径可系统划分为三个依次衔接且相互反馈的关键阶段:尿素预水解、氧化镁水化及水镁石碳化.

在尿素预水解阶段,为规避后续氧化镁水化引发的pH骤升对脲酶活性的抑制效应,本研究采用预先添加尿素并启动酶促水解的策略,确保在氧化镁引入前已积累足量NH_4^+与HCO_3^-,进而通过碳酸平衡反应持续供应CO_3^{2-},为后续碳化反应奠定离子基础.在氧化镁水化阶段,MgO与溶液中水分子发生放热反应,生成水镁石($Mg(OH)_2$).该过程伴随体系pH快速上升,直接抑制脲酶催化效率.自然条件下形成的水镁石多呈结晶完好的六方晶系结构,其层状堆叠特征导致层间结合力弱、比表面积小,胶凝活性受限;而在有机分子(如淀粉)存在时,Mg^{2+}成核受其官能团配位调控,倾向于形成热力学亚稳态的无定形水镁石.该非晶相富含表面羟基与缺陷位点,可通过氢键、范德华力及配位键形成三维交联网络,显著提升初始胶结体的致密度与界面结合强度.在水镁石碳化阶段,前期生成的无定形水镁石作为高反应活性前驱体,与溶液中CO_3^{2-}发生固-液界面反应,逐步转化为碱式碳酸镁(Hydromagnesite, HMCs).相较于水镁石,HMCs具有更高密度及更复杂的层状-柱状复合晶体结构,其纳米片层可定向堆叠并填充砂粒间孔隙,与无定形水镁石协同构成"刚性骨架+柔性界面"的双模胶结体系,有效桥接土颗粒、封闭连通孔道,最终形成力学稳定、水力阻隔性强的空间胶结网络.

淀粉与EIMC体系存在多重协同机制:其一,淀粉降解产生的有机酸可缓冲局部pH于8.5～9.5区间,既维持脲酶活性,又促进无定形水镁石向HMCs

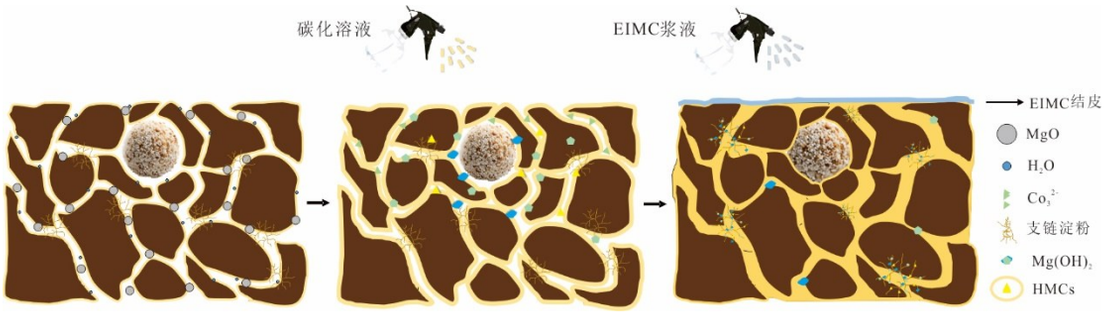


图 11 EIMC 结皮–有机物–固化小球缓释联合改性土体水–力学特性流程及机理

Fig.11 The synergistic mechanism of sustained-release microspheres and sprayed magnesium oxide

的有序转化;其二,淀粉水化凝胶网络可优化孔隙层级分布,为微生物群落定殖提供适宜微生境;其三,淀粉分子在土颗粒表面形成的吸附膜兼具力学保护与离子缓释功能——既可抵抗雨滴击溅与径流剪切应力,延缓表层颗粒剥离,又可通过羟基配位吸附 Mg^{2+},减缓其淋失速率,延长碳化反应时间.三者共同构成正向反馈循环,强化整体固化效能.

固化小球的引入进一步拓展了该体系的时间–空间调控维度.其作为 Mg^{2+} 缓释载体,可在水分入渗驱动下实现离子的梯度释放与深度渗透,突破传统 EIMC 中 MgO 一次性掺入导致的 pH 局部过高、胶结层脆化及植被抑制等瓶颈.通过调控小球粒径及布设间距,可精准匹配不同边坡的水文响应周期与生态恢复需求,在保障深层碳化充分性的同时,预留适宜孔隙率与 pH 缓冲区间,为植物根系萌发与定植创造有利条件.由于本试验中的模型尺寸较小,研究主要针对 EIMC 固化小球缓释 Mg^{2+} 与促进小球邻近土体的再次碳化胶结作用的可行性和效果,未考虑模型试验的尺寸效应.未来将会对尺寸效应开展更系统的研究.

坡表 EIMC 喷洒处理则构成表层快速防护的最后屏障.该过程利用高浓度 Mg^{2+} 溶液在数小时内诱导表层快速碳化,生成一定厚度、致密连续的碳酸盐结皮层.该结皮不仅可即时抵御雨滴动能冲击与地表径流剪切力,大幅降低入渗速率;更通过“浓度驱动”机制克服 Mg^{2+} 扩散动力学限制,促使 CO_3^{2-} 在近表层高效就地反应,避免因离子迁移不足导致的碳化不均.淀粉的共存进一步强化此效应:其分子链上丰富的羟基可同步吸附游离 Mg^{2+} 并提供异相成核位点,双重提升表层碳化反应速率与产物致密性.由此,表层结皮–中层淀粉改性–深层固化小球缓释共同构建起“瞬时封固–持续强化–长效支撑”的三维立体防护体系,实现抗冲刷性能、生态兼容性与结构耐久性的协同统一(图 11).

4 结论

本研究通过系统开展室内模拟降雨冲刷模型试验,对比评估了三种坡面改良策略——单一 EIMC 坡内搅拌处理、EIMC 表面结皮与 EIMC 固化小球缓释协同处理,以及有机物(红薯淀粉)掺入改性处理——对模型土坡抗冲刷性能的影响,并进一步整合碳化程度定量分析、微纳米压痕力学表征及多尺度微观结构观测结果,深入揭示了 EIMC 结皮–有机物–固化小球缓释协同改性提升模型土坡水–力学耦合性能的作用机制.主要结论如下:

(1)EIMC 结皮–固化小球缓释协同改性技术具有显著工程可行性与抗侵蚀效能.在 261 mm 累计降雨量与 100 min 持续径流冲刷条件下,联合改性样品的单位面积冲刷率较单一 EIMC 处理组降低 77.9%,较空白对照组降低 82.4%;其 24 h 累计侵蚀量仅为 9.84 g,为各组中最低值,证实该策略可有效抑制表层土壤颗粒剥离与输运过程.

(2)红薯淀粉作为生物基功能添加剂,通过晶体成核调控、孔隙结构优化及水化学微环境缓冲三重协同机制,显著提升 EIMC 体系的碳化反应效率与产物力学性能.相较于单一 EIMC 处理组,淀粉改性组碳化度提高 2.5 个百分点,弹性模量提升 43.4%,表明其在增强胶结相结晶完整性与界面结合强度方面具有明确正向效应.

(3)EIMC 固化小球作为可控释放载体,可在水分入渗驱动下实现 Mg^{2+} 的梯度缓释与空间延时供给,从而有效维持深层土体中碳化反应的持续性与均匀性.相较于单一 EIMC 处理组,固化小球改性组碳化度提高 3.6 个百分点,弹性模量大幅提升 132.6%,凸显其在拓展碳化

反应深度、强化骨架刚度方面的关键作用.

(4)坡表EIMC喷洒处理可于数小时内快速形成连续、致密且具有一定厚度的碳酸盐结皮层,显著提升表层抗雨滴击溅与径流剪切能力;而固化小球与淀粉则分别从深层反应供给与微环境稳定维度提供支撑.三者构成"表层快速封固-中层结构强化-深层持续胶结"的立体化、时序化抗侵蚀体系,不仅提升了整体碳化效率,更有效延缓了活性离子(Mg^{2+})的淋失速率,实现了水-力-化多场景耦合条件下的长效防护.

References

Bachmeier, K. L., Williams, A. E., Warmington, J. R., et al., 2002. Urease Activity in Microbiologically-Induced Calcite Precipitation. *Journal of Biotechnology*, 93(2): 171－181. https://doi. org/10.1016/S0168 - 1656(01)00393-5

Chen, J. P., Tang, H. M., Li, X. D., 2001. Some Problems on anchor-Shotcrete Reinforcement Application in Rockslop. *Earth Science*, 26(4): 357－360 (in Chinese with English abstract).

Chen, Z., 2021. Study on Microbial Remediation and Solidification for Electrolytic Manganese Residue with Reactive Magnesia (Dissertation). Chongqing University, Chongqing (in Chinese with English abstract).

Dong, Z. H., Pan, X. H., Tang, C. S., et al., 2023. An Efficient Microbial Sealing of Rock Weathering Cracks Using Bio-Carbonation of Reactive Magnesia Cement. *Construction and Building Materials*, 366: 130038. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.130038

Fang, X. W., Fang, Y. F., Yang, Y., et al., 2019. Method and Product for Microbial Solidification of Tailings Sand Based on Reactive Magnesia. CN110204289A, 2019－09－06, Chongqing (in Chinese).

He, J., Qu, S. Y., Hang, L., et al., 2024. Experimental Study on Enzyme Enhanced Magnesia Carbonation Process for Soil Stabilization. *Journal of Civil and Environmental Engineering*, 46(5): 101－108 (in Chinese with English abstract).

Hoang, T., Dung, N. T., Unluer, C., et al., 2021. Use of Microbial Carbonation Process to Enable Self - Carbonation of Reactive MgO Cement Mixes. *Cement and Concrete Research*, 143: 106391. https://doi. org/10.1016/j.cemconres.2021.106391

Hu, X. L., Tang, H. M., Zhu, L. X., 2011. Collapse Mode and Mechanism of High Magmatite Rock Slope in Wenchuan Epicentral Area. *Earth Science*, 36(6): 1149－1154 (in Chinese with English abstract).

Huang, T., Fang, X. W., Zhang, W., et al., 2020. Experimental Study on Solidified Loess by Microbes and Reactive Magnesium Oxide. *Rock and Soil Mechanics*, 41(10): 3300－3306, 3316 (in Chinese with English abstract).

Liu, J., Che, W. Y., Hao, S. F., et al., 2024. Deterioration Mechanism of Mechanical Properties and Microstructure in Xanthan Gum-Reinforced Soil under Wetting-Drying Cycles Based on CT Scanning Technology. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 46(5): 1119－1126 (in Chinese with English abstract).

Oliver, W. C., Pharr, G. M., 1992. An Improved Technique for Determining Hardness and Elastic Modulus Using Load and Displacement Sensing Indentation Experiments. *Journal of Materials Research*, 7(6): 1564－1583. https://doi.org/10.1557/JMR.1992.1564

Pach, L., Duncan, S., Roy, R., et al., 1996. Morphological Control of Precipitated Calcium Carbonates and Phosphates by Colloidal Additives. *Journal of Materials Science*, 31(24): 6565－6569. https://doi. org/10.1007/BF00356263

Pei, X. J., 2024. Mechanisms of Geological Environment Disturbance and Ecological Restoration Technical Systems for Major Engineering Projects on the Tibetan Plateau. *Journal of Engineering Geology*, 32(5): 1737－1758 (in Chinese with English abstract).

Ruan, S. Q., Qiu, J. S., Weng, Y. W., et al., 2019. The Use of Microbial Induced Carbonate Precipitation in Healing Cracks within Reactive Magnesia Cement-Based Blends. *Cement and Concrete Research*, 115: 176－188. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2018.10.018

Shang, S. Y., Sun, J., Li, S. C., et al., 2020. Evaluation of Ecological Restoration Technology of Typical Road Slope in Mentougou Area of Beijing. *Technical Supervision in Water Resources*, (2): 269－272 (in Chinese with English abstract).

Unluer, C., Al-Tabbaa, A., 2014. Enhancing the Carbonation of MgO Cement Porous Blocks through Improved Curing Conditions. *Cement and Concrete Research*, 59: 55－65. https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2014.02.005

Wang, D. L., Tang, C. S., Pan, X. H., et al., 2022. Construction and Demolition Waste Stabilization through a Bio-Carbonation of Reactive Magnesia Cement for Underwater Engineering. *Construction and Building Materials*, 335: 127458. https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.127458

Wang, D. L., Tang, C. S., Pan, X. H., et al., 2024. A

Novel Bio-Carbonation Method of Reactive Magnesia with Urea Pre-Hydrolysis for Geomaterial Stabilisation. *Géotechnique*, 74(13): 1634－1648. https://doi. org/10.1680/jgeot.22.00301

Wang, H. X., Tong, T. Z., Sun, X. H., et al., 2025. Low-Carbon and Highly Efficient Sand Solidification Based on the Combined Bio-Carbonation of Reactive Magnesia and Enzymatically Induced Carbonate Precipitation. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 13(2): 115670. https://doi.org/10.1016/j.jece.2025.115670

Wang, L. Y., Zhang, X. X., Gao, X. B., et al., 2015. The Application Progress of Spraying Foreign Soils Technique for Engineering of Ecological Protection. *Shanxi Architecture*, 41(27): 191－192 (in Chinese with English abstract).

Wang, R., Tang, C. S., Pan, X. H., et al., 2023. Stabilization of Dredged Sludge Using Bio-Carbonation of Reactive Magnesia Cement Method. *Acta Geotechnica*, 18(3): 1529－1541. https://doi. org/10.1007/s11440-022-01683-6

Yang, S. Q., Yang, M. L., He, M. X., et al., 2024. Review of Researches in Ecological Restoration of High and Steep Rock Slope of Mine. *Environmental Ecology*, 6(2): 95－100, 152 (in Chinese with English abstract).

Yang, Y., Ruan, S. Q., Wu, S. F., et al., 2021. Biocarbonation of Reactive Magnesia for Soil Improvement. *Acta Geotechnica*, 16(4): 1113－1125. https://doi. org/10.1007/s11440-020-01093-6

Zhang, C. Y., 2023. The Effect of Adhesive Type and Admixture on Physical Properties and Shear Resistance of the Spray-Seeding Substrat (Dissertation). Beijing Forestry University, Beijing (in Chinese with English abstract).

Zhang, M. T., Qiu, J. D., Yan, D., 2004. Application of External-Soil Spray Seeding Technique to Slopes Natural Eco-Restoration and Protection. *Science of Soil and Water Conservation*, 2(3): 10－12 (in Chinese with English abstract).

Zhao, D. F., Tan, X. C., Luo, B., et al., 2022. A Review of Microbial Dolomite: Advances and Challenges. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(2): 335－349 (in Chinese with English abstract).

Zheng, C. T., Pan, X. H., Li, X. Z., et al., 2025. Practical Bio-Healing of Rock Weathering Cracks Using an Enzyme-Induced Magnesia Carbonization. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 17(6): 3662－3675. https://doi.org/10.1016/j.jrmge.2025.01.004

Zhong, Y. J., Wen, H. G., Chen, H. D., et al., 2022. The Role of Extracellular Polymeric Substances in Cyanobacterial Calcification and Its Geological Significance. *Acta Sedimentologica Sinica*, 40(1): 88－105 (in Chinese with English abstract).

中文参考文献

陈建平, 唐辉明, 李学东, 2001. 岩质边坡锚喷加固应用中的几个问题. 地球科学, 26(4): 357－360.

陈哲, 2021. 电解锰渣的氧化镁微生物修复固化试验研究(硕士学位论文). 重庆: 重庆大学.

方祥位, 方艺霏, 杨阳, 等, 2019. 基于活性氧化镁微生物固化尾矿砂的方法及其产品. 重庆: CN110204289A, 2019－09－06.

何稼, 屈思源, 杭磊, 等, 2024. 生物酶辅助氧化镁碳化过程砂土加固试验研究. 土木与环境工程学报(中英文), 46(5): 101－108.

胡新丽, 唐辉明, 朱丽霞, 2011. 汶川震中岩浆岩高边坡破坏模式与崩塌机理. 地球科学, 36(6): 1149－1154.

黄涛, 方祥位, 张伟, 等, 2020. 活性氧化镁-微生物固化黄土试验研究. 岩土力学, 41(10): 3300－3306, 3316.

刘瑾, 车文越, 郝社锋, 等, 2024. 基于CT技术的黄原胶加固土干湿循环条件下力学性能和微观结构劣化机制研究. 岩土工程学报, 46(5): 1119－1126.

裴向军, 2024. 青藏高原重大工程地质环境扰损机制及生态修复技术体系. 工程地质学报, 32(5): 1737－1758.

尚生勇, 孙嘉, 李世春, 等, 2020. 北京门头沟地区典型道路边坡生态修复技术评价. 水利技术监督, (2): 269－272.

王来永, 张秀省, 高祥斌, 等, 2015. 客土喷播技术在生态防护工程中的应用进展. 山西建筑, 41(27): 191－192.

杨生巧, 杨蒙岭, 贺明星, 等, 2024. 矿山高陡岩石边坡生态修复技术研究进展. 环境生态学, 6(2): 95－100, 152.

张传耀, 2023. 黏合剂种类及掺量对喷播基质抗剪性能及物理性质的影响(硕士学位论文). 北京: 北京林业大学.

赵东方, 谭秀成, 罗冰, 等, 2022. 微生物诱导白云石沉淀研究进展及面临的挑战. 沉积学报, 40(2): 335－349.

章梦涛, 邱金淡, 颜冬, 2004. 客土喷播在边坡生态修复与防护中的应用. 中国水土保持科学, 2(3): 10－12.

钟怡江, 文华国, 陈洪德, 等, 2022. 胞外聚合物在蓝细菌钙化过程中的作用及其地质意义. 沉积学报, 40(1): 88－105.