

DOI:10.11784/tdxbz202512001

高掺量 MgO 碳化固化高含水率滩涂淤泥的 胶结-损伤竞争机制研究

卢 辉^{1,2}, 邵泽宇^{1,3}, 张齐尧³, 白志霄^{1,3}, 郭力玮^{1,4}, 李二兵^{1,3}

(1. 陆军工程大学爆炸冲击防灾减灾全国重点实验室, 南京 210007;

2. 陆军工程大学野战工程学院, 南京 210007;

3. 陆军工程大学国防工程学院, 南京 210007; 4. 东南大学土木工程学院, 南京 211189)

摘 要: 针对高含水率滩涂淤泥难以快速硬化的工程难题, 传统水泥固化技术因早期强度低而难以满足军事及应急场景下“小时级”快速构筑临时通路的严苛要求。为此, 本研究聚焦高掺量活性 MgO 碳化固化的短期强度发展机制, 通过无侧限抗压强度(UCS)试验, 并结合 X 射线衍射(XRD)、热重(TG)分析、扫描电镜(SEM)与压汞法(MIP)等多尺度微观表征手段, 系统揭示了 MgO 掺量、初始含水率与碳化时间对碳化产物演化及孔隙结构的耦合效应。结果表明: 高初始含水率严重抑制 CO₂ 扩散, 使碳化反应滞留于胶结能力较弱的水镁石阶段; 而高掺量 MgO 可通过构建局部高反应势能区, 有效补偿水分稀释效应, 驱动水镁石持续转化为三水硬镁石等强胶结相, 使试样在 2.0 h 内 UCS 突破 5 MPa, 满足基本承载需求。然而, 当 MgO 掺量超过 45% 时, 三水硬镁石晶体在受限孔隙内爆发式生长, 产生显著结晶压力, 引发微裂隙扩展与孔隙结构劣化, 导致宏观强度不升反降。本文首次揭示并阐明了高掺量 MgO 碳化固化过程中的胶结-损伤竞争机制, 并据此建立了融合物相含量、孔隙填充效率、含水率抑制因子与结晶损伤指数的多因素耦合强度模型, 可以为滩涂地带快速构筑临时通路提供依据, 并为 MgO 碳化固化掺量设计提供参考。

关键词: 滩涂淤泥; 高掺量; 高含水率; 碳化时间; 物相演化; 胶结结构; 孔隙重构

中图分类号: U419.8

文献标志码: A

文章编号: 0493-2137(2026)10-1066-11

Cementation-Damage Competition Mechanism in High-Dosage MgO Carbonation and Stabilization of High-Water-Content Tidal Mud

Lu Hui^{1,2}, Shao Zeyu^{1,3}, Zhang Qiyao³, Bai Zhixiao^{1,3}, Guo Liwei^{1,4}, Li Erbing^{1,3}

(1. State Key Laboratory of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact,

Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

2. College of Field Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

3. College of Defense Engineering, Army Engineering University of PLA, Nanjing 210007, China;

4. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China)

Abstract: The conventional cement-based stabilization is inadequate for rapidly hardening high-water-content tidal mud due to its low early strength and failure to meet the stringent “hour-scale” requirements for the rapid construction of temporary access routes in military and emergency scenarios. This study therefore investigates the short-term strength development mechanism of carbonation and stabilization using high dosages of reactive MgO. The unconfined compressive strength(UCS) tests coupled with multiscale microstructural characterization techniques, which

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-01-18.

作者简介: 卢 辉 (1992—), 男, 硕士研究生, 讲师, luh007hero@126.com.

通信作者: 李二兵, lebingest@126.com.

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52578492); 江苏省基础研究专项基金资助项目(KYFYGKQTSZ25002); 陆军工程大学青年自主创新基金资助项目.

Supported by the National Natural Science Foundation of China(No. 52578492), the Jiangsu Provincial Fundamental Research Program(No. KYFYGKQTSZ25002), the Youth Independent Innovation Fund of Army Engineering University of PLA.

include X-ray diffraction (XRD), thermogravimetric (TG) analysis, scanning electron microscopy (SEM), and mercury intrusion porosimetry (MIP), systematically elucidate the coupled effects of MgO dosage, initial water content of the sample, and carbonation duration on the evolution of carbonation products and pore structure. The results show that high initial water content severely impedes CO_2 diffusion, arresting carbonation at the brucite stage with limited cementing capacity. By contrast, a high MgO dosage creates localized zones of elevated reaction potential, effectively counteracting the dilution effect of excess water and promoting the continuous conversion of brucite into strongly cementing phases such as nesquehonite. Consequently, the UCS exceeds 5 MPa within 2.0 h, meeting the minimum load-bearing requirement. However, when the MgO dosage exceeds 45%, explosive growth of nesquehonite crystals within confined pores generates substantial crystallization pressure, triggering microcrack propagation and pore structure degradation. This damage ultimately leads to a decrease, rather than an increase, in macroscopic strength. For the first time this study identifies and elucidates a cementation-damage competition mechanism governing high-dosage MgO carbonation and stabilization. Based on this mechanism, a multi-factor coupled strength model is developed that integrates phase content, pore-filling efficiency, a water-content inhibition factor, and a crystallization-induced damage index. The proposed model provides a theoretical basis for the rapid deployment of temporary access routes on tidal flats and offers practical guidance for optimizing MgO dosage in carbonation and stabilization.

Keywords: tidal mud; high dosage; high water content; carbonation duration; phase evolution; cemented micro-structure; pore structure reconfiguration

滩涂淤泥作为典型的软黏土,广泛分布于三角洲、滨海滩涂等沉积环境中,其高孔隙比、低渗透性和缓慢固结特性常导致工程地基沉降大、稳定性差等问题^[1-2]。登陆载具(如两栖车辆、气垫船)易陷入淤泥土中停滞不前,大幅迟滞进攻速度;人员与装备在泥泞地表机动困难,极易暴露于敌方火力之下;后续快速构筑临时工事、铺设机动通路亦面临地基松软、难以稳定的难题。这种“时间敏感+地质条件恶劣”的组合,使得快速克服滩涂淤泥成为必然选择。

传统水泥固化因水化慢、早期强度低,难以满足此“时间-强度”高要求^[3-8]。活性 MgO 碳化技术凭借小时级强度增长优势成为潜在解决方案^[9-11]。Yi 等^[12]的研究表明,活性 MgO 通过大量吸收 CO_2 进行固化,能在几小时内使处理后的土体强度接近 28 d 养护期的波特兰水泥稳定土的强度水平;刘松玉等^[11]通过一系列室内试验,从多个角度分析了活性 MgO 掺量及其活性对碳化固化效果的影响,实验结果显示,随 MgO 掺量增加,碳化土的强度显著提升,且优于同等条件下水泥固化土 28 d 后的强度。闵凡路等^[13]采用高活性 MgO 作为固化剂,并结合加速碳化技术,探讨了淤泥质废弃黏土物理力学特性的改善情况。研究表明,强度随 MgO 掺量与养护龄期呈现先上升后趋于稳定的趋势,而随碳化时间变化则表现出先上升后下降的趋势,在碳化 4 h 达到最佳效果(1.5 MPa)。刘松玉等^[14]针对活性 MgO 碳化固化的粉质黏土展开研究,提出了一种粉质黏土碳化反应的微观模型,并指出活性 MgO 固化粉质黏土在碳化约 6 h 时能达到最高 3.5 MPa。陈学军等^[15]应用活性

MgO 碳化固化技术处理红黏土,发现能在 1.5 h 内显著提升土体强度,且试样表现出脆性变形特征。然而,现有研究多聚焦于低-中掺量($\leq 20\%$)与低含水率($< 30\%$)条件,最大强度通常小于 4 MPa。而军事机动保障要求 2 h 内地基承载力 ≥ 0.5 MPa(对应无侧限抗压强度(UCS)约为 4 MPa)^[16-17],且常面临含水率 $> 30\%$ 甚至超过 100%的滩涂环境,现有技术难以兼顾“快”与“强”,亟需探索高掺量路径。

为此,本研究弱化经济性约束,开展高含水率、高掺量 MgO 碳化滩涂淤泥试验,并结合 X 射线衍射(XRD)、热重(TG)分析、扫描电镜(SEM)和压汞法(MIP)等微观表征手段,系统分析碳化试样的物相演化、微观形貌及孔隙结构特征,建立“参数-结构-性能”关联强度模型,为快速实施机动工程保障提供碳化固化技术方案与理论依据。

1 试验材料与方法

1.1 试验材料

试验土样取自浙江省宁波市象山海岸。试样制备参照《土工试验方法标准》(GB/T 50123—2019)^[18]与《公路土工试验规程》(JTG 3430—2020)^[19],采用分层静压法成型。测定结果显示,淤泥质土样的含水率为 42.0%,土粒相对密度为 2.74,干密度为 1.26 g/cm^3 ,孔隙比为 1.16,液限和塑限分别为 37.3% 和 23.8%。采用 X 射线荧光光谱仪(XRF)^[20]测定土样的成分及其含量,结果见表 1。

本试验采用河北邢台镁神化工有限公司生产的

高活性 MgO, 白色轻烧粉状, MgO 含量不低于 91.6%, CaO 含量不超过 0.4%, 且通过 75 μm 标准筛的筛余量小于 0.01%。按照轻烧氧化镁化学活性测定相关规范, 测定了其水化活性时间、比表面积、堆积

密度、吸碘值及中值粒径等物理化学参数, 结果见表 2。CO₂ 气体是由盐城市广源气体有限公司提供, 纯度达 99% 以上。

表 1 土样 XRF 氧化物含量测试结果

Tab.1 Oxide composition of the soil sample determined using XRF

质量分数/%						
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	TiO ₂	MgO	其他
69.88	15.11	7.05	2.67	1.26	1.23	2.80

表 2 高活性 MgO 的物理性质及活性指标

Tab.2 Physical properties and reactivity indices of high-activity MgO

水化活性 时间/s	比表面积/ (m ² /g)	堆积密度/ (g/mL)	吸碘值/ (mg/g)	中值粒径 D ₅₀ / μm
25	128.24	0.36	181	11.6

1.2 试验装置与方法

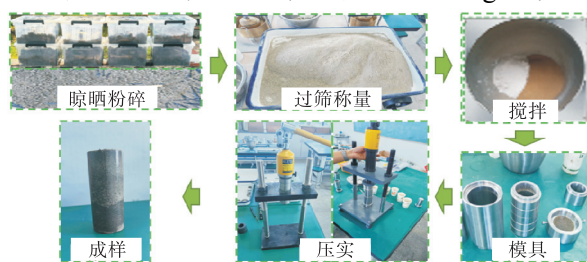
MgO 碳化固化淤泥质土属于无机结合料稳定土, 已有研究表明, 其强度发展受 MgO 掺量 (m)、初始含水率 (w) 和碳化时间 (t) 等多种因素影响^[10, 21-22]。为系统研究各因素对碳化土力学性能的影响, 制定碳化试验方案(表 3), 其中通气压力与压实度依据工程实际工况及文献[11, 13-14]成熟方案设定, 分别为 200 kPa 和 $(89 \pm 2)\%$ 。

表 3 试验方案

Tab.3 Experimental design

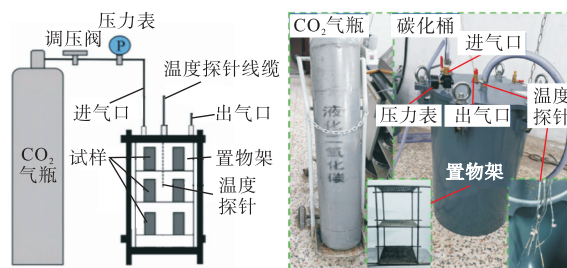
MgO 掺量 $m/\%$	碳化时间 t/h	初始含 水率 $w/\%$	温度/ $^{\circ}\text{C}$	试样 个数
5, 10, 15, 20, 25, 30	2.0, 4.0	30, 42	室温	72
35, 40, 45, 50	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 4.0			120

将现场采集的土样进行自然风干、碾碎及过筛(筛孔尺寸 2 mm)等预处理, 根据预设的 MgO 掺量



(a) 试样制备流程

与初始含水率计算各组所需质量。按计算值称取干土、MgO 及水。先在搅拌钵中将干土与 MgO 粉末充分混合均匀, 随后缓慢加入水并持续搅拌至形成均匀混合料。将均匀混合料分层填入内径 39.1 mm、高 80 mm 的不锈钢模具(内壁涂覆薄层凡士林)中, 采用油压千斤顶进行静压成型; 随后将模具置于脱模器上, 利用千斤顶将试样顶出。脱模时应保持模具与脱模器轴线对齐, 匀速顶出试样。制样完成后, 对试样的直径、高度及质量进行测量校核, 确认符合要求后, 将制备好的不同掺量与初始含水率的试样置于样品架上, 关闭盖门并确保密封; 开启 CO₂ 气源, 按设定压力注入气体, 并设定碳化时间, 整个碳化过程在恒压条件下通过动态通气维持。碳化至预定时间后, 关闭 CO₂ 气源, 打开排气阀排出箱内气体, 待排尽后方可开启盖门取出试样。碳化完成后立即进行 UCS 试验。试验采用卓致力天 TP-CTS-01 型动三轴试验系统, 压力传感器精度为 0.1% F.S., 加载速率为 1 mm/min。选取碳化时间 2 h 和 4 h 的试样进行 XRD、TG、SEM 和 MIP 测试。试样制备及碳化流程如图 1 所示。



(b) 试样碳化装置

图 1 试样制备及碳化流程

Fig.1 Specimen preparation and carbonation procedure

2 结果与分析

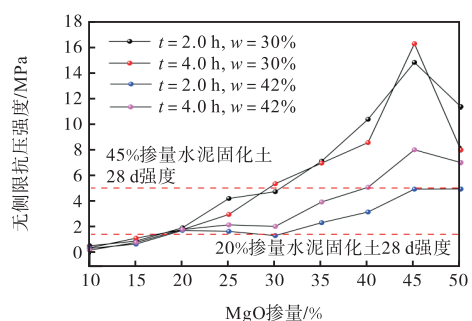
2.1 强度发展规律

图 2 展示了不同工况条件下的 UCS 测试结

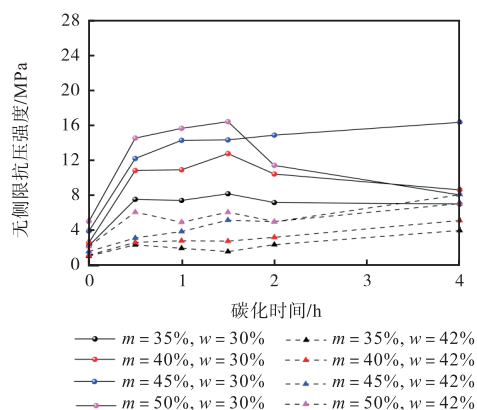
果。MgO 碳化固化的关键强度来源是水碳镁石晶体, 这些晶体通过致密胶结形态包裹土颗粒、连接骨架并填充孔隙^[23]。图 2(a) 显示, 所有曲线呈现出“先增后减”的特性, 表明存在一个最优掺量阈值。在 MgO 掺量为 10% ~ 45% 范围内, 试样 UCS 随掺量增

加而提升,其中,在 10%~20% 掺量区间内,试样强度增幅较小,在 25%~45% 区间内增长显著;当 MgO 掺量达到 45% 时,曲线均达到峰值;超过 50%,则观察到强度降低,这可能是由于过度固化或孔隙结构破坏导致。在碳化 2.0 h、初始含水率为 42% 的条件下, MgO 掺量为 20% 和 45% 的试样的 UCS 与相同掺量的 28 d 水泥固化土相当。值得注意的是,在 20%~50% 掺量范围内,初始含水率对 UCS 的影响较碳化时间更为显著。

图 2(b) 显示,在 MgO 掺量为 35%~50%、初始含水率为 30% 的条件下,UCS 随碳化时间大体上表现出先快速上升,后趋于峰值,最终缓慢下降的非线性趋势,反映出碳化过程中胶结增强与结构损伤的动态竞争。在碳化初期(0.5~1.0 h),MgO 与 CO_2 迅速反应生成大量胶结晶体,使 UCS 急剧增长,其中 50% 掺量、30% 含水率的试样在 1.0 h 内强度即达 15.7 MPa。然而,随着碳化时间延长至 2.0~4.0 h,过量碳化产物在受限孔隙内持续结晶,产生显著结晶压力,诱发微裂纹扩展与孔隙结构劣化,导致强度回落,尤以 50% 掺量试样最为明显,其 4.0 h 强度较峰值下降逾 50%。相比之下,45% 掺量试样不仅峰值强度高(14.9 MPa),且未有衰减,表现出更优的结构稳定性,印证其为胶结与损伤平衡的最优阈值。



(a) MgO 掺量的影响



(b) 碳化时间的影响

图 2 不同工况条件下的无侧限抗压强度

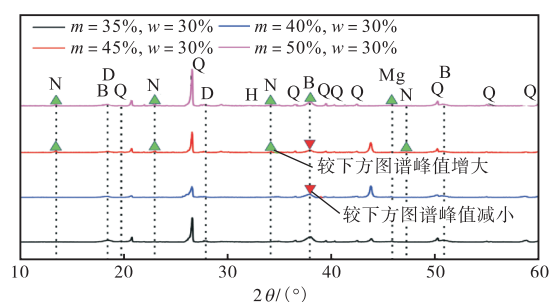
Fig.2 UCS under various testing conditions

需要指出的是,高初始含水率(42%)显著抑制整个碳化进程,各掺量下 UCS 均远低于 30% 初始含水率条件,且增长平缓,主要原因在于:试样内部孔隙被自由水大量填充,阻碍了 CO_2 的快速、均匀扩散。此外,高初始含水率导致反应体系中水分过量,使土颗粒分散,碳化产物呈分散、疏松状分布,难以形成致密胶结。尽管如此,在 45% 掺量下,即使初始含水率达 42%,试样在 2.0 h 内仍可获得 5.1 MPa 的强度,满足军事工程对“小时级快速硬化”的基本要求。

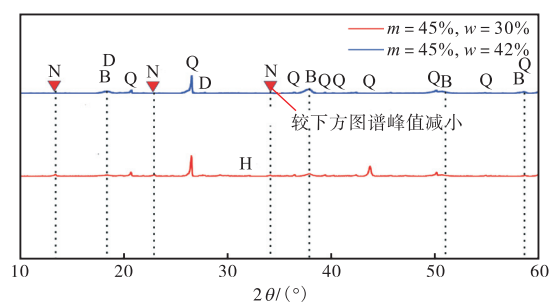
2.2 微观机制解析

2.2.1 物相演化

XRD 与 TG 结果共同揭示了高掺量 MgO 在高初始含水率条件下驱动碳化反应的动态过程。图 3 显示经过 2.0 h 碳化,碳化产物以水镁石(B: $\text{Mg}(\text{OH})_2$)和三水碳镁石(N: $\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$)为主,部分试样中还检测到更稳定的终产物水菱镁石(H: $\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)^[24]。



(a) MgO 掺量的影响



(b) 初始含水率的影响

Q—石英(SiO_2);Mg—方镁石(MgO);B—水镁石($\text{Mg}(\text{OH})_2$);N—三水碳镁石($\text{MgCO}_3 \cdot 3\text{H}_2\text{O}$);D—球碳镁石($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$);H—水菱镁石($\text{Mg}_5(\text{CO}_3)_4(\text{OH})_2 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$)

图 3 不同工况条件下的 XRD 图谱

Fig.3 XRD patterns under various testing conditions

鉴于某些晶相发育不良引起 XRD 衍射峰明显展宽,甚至被背景噪音覆盖,产生所谓的“XRD 隐形”,遂通过 Jade 9 软件进行了半定量分析(表 4)。随着 MgO 掺量的增加($\leq 45\%$),三水碳镁石峰强逐渐增强,其物相含量由 7.5%升至 26.3%,表明提高 MgO 掺量能显著提升碳化反应的程度。然而,当掺量增至

50%时,三水碳镁石峰强异常下降(物相含量降至18.2%),同时水镁石峰强度增加(从10.7%增至12.1%),且出现未反应方镁石(MgO)的衍射峰,表明过量MgO可能导致表面快速碳化形成致密层,阻碍CO₂向内部扩散,从而抑制整体碳化效率。由于水镁石胶结能力远弱于三水碳镁石^[25],此物相组成劣化可能是50%掺量试样强度下降的直接原因。

表 4 碳化产物的 XRD 物相含量

Tab.4 Phase content of carbonation products as determined by XRD

工况条件	质量分数/%		
	MgCO ₃ ·3H ₂ O	SiO ₂	Mg(OH) ₂
<i>m</i> = 35%, <i>w</i> = 30%	7.5	57.1	21.2
<i>m</i> = 40%, <i>w</i> = 30%	10.1	47.7	22.4
<i>m</i> = 45%, <i>w</i> = 30%	26.3	51.7	10.7
<i>m</i> = 45%, <i>w</i> = 42%	10.2	51.6	25.4
<i>m</i> = 50%, <i>w</i> = 30%	18.2	58.5	12.1

图 4 展示了碳化 2.0 h 条件下的 TG 与 DTG 曲线,试样在加热过程中呈现两个主要失重阶段:第 1 阶段为 50~250 °C (低温区),主要归因于三水碳镁石中结晶水和结合水的脱除;第 2 阶段失重峰出现在 320~500 °C (高温区),对应水镁石的脱羟基反应^[26]。低、高温区失重率值见表 5。图 4(a) 显示,低温区失重率不断增加,侧面反映 MgO 增加加速了碳化反应,三水碳镁石等碳化产物增多;在高温区各组分的

表 5 不同工况条件下低、高温区失重率

Tab.5 Mass loss rate in low- and high-temperature zones under various testing conditions

工况条件	失重率/%	
	50~250 °C	320~500 °C
<i>m</i> = 35%, <i>w</i> = 30%	4.9	15.7
<i>m</i> = 40%, <i>w</i> = 30%	4.8	14.0
<i>m</i> = 45%, <i>w</i> = 30%	9.9	14.9
<i>m</i> = 45%, <i>w</i> = 42%	4.7	14.7
<i>m</i> = 50%, <i>w</i> = 30%	9.3	15.4

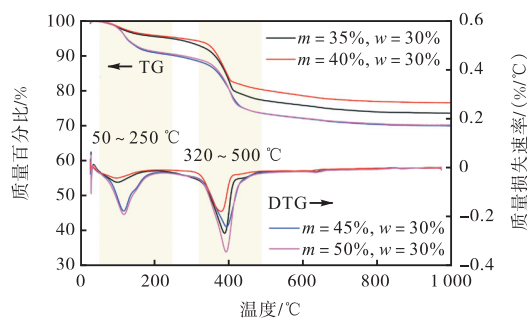
失重率大体一致,虽然高掺量试样中生成的水镁石相对较低(表 4),但球碳镁石和水菱镁石在高温下的分解可作为水镁石的补充^[27],这解释了为何高温区失重率差异不大的原因。

值得注意的是,在 45%MgO 掺量的情况下,当初始含水率从 30%上升至 42%,三水碳镁石物相含量迅速下降(从 26.3%降至 10.2%),而水镁石物相含量则显著增加(从 10.7%增至 25.4%)。由图 4(b)也可以看出当初始含水率从 30%上升至 42%,低温失重率从 9.9%降低至 4.7%。这些结果表明,高含水率显著抑制了水镁石向三水碳镁石的转化效率,使整个反应体系更多停留在水化而非理想的碳化阶段,水镁石造成大量积累,从而导致 UCS 下降。

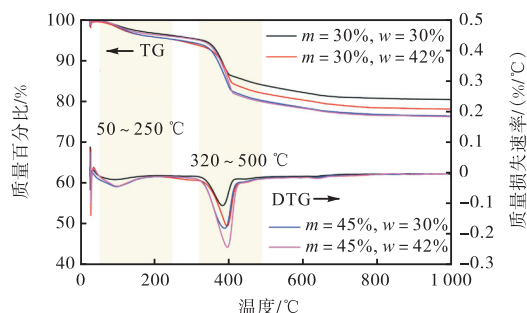
2.2.2 胶结结构

图 5 展示了不同工况条件下的 SEM 图像,可直观反映土颗粒表面碳酸盐矿物的生成特征及其胶结形态。为确保观测代表性,SEM 样品均沿径向剖面切割,并聚焦于颜色明显变白(指示碳化完成)的表层区域。由图 5(a)~(h)可见,碳化产物形貌多样,包括絮状、花朵状、片状及纤维状交织结构,局部呈团聚块状。随着碳化进程推进,上述产物有效填充土体孔隙并胶结颗粒,显著提升试样强度。XRD 分析结果表明,三水碳镁石与水镁石峰强较为显著。结合已有研究^[28-30],在 MgO 掺杂碳化体系中,SEM 观测到的片状与花朵状产物主要为三水碳镁石或球碳镁石,而棱柱状结晶对应水菱镁石。尽管体系中仍存在部分中间产物(如未完全转化的水镁石及少量次生碳酸盐),但随反应时间延长,三水碳镁石逐步转化为更稳定的水菱镁石。图 5(e)和(f)显示,在初始含水率为 30%的条件下,MgO 掺量为 45%的试样经 2.0 h 碳化后,颗粒表面已形成致密的碳酸盐胶结相,有效包裹并连接土颗粒,显著提高整体结构密实度。相比之下,MgO 掺量为 50%的试样虽有更多 MgO 参与反应,但因局部反应过饱和,导致产物聚集黏结,呈块状分布。

综上,MgO 掺量对碳化土强度发展具有显著影响:在低掺量条件下,碳化反应物供给不足,难以形



(a) MgO 掺量的影响



(b) 初始含水率的影响

图 4 不同工况条件下的 TG 与 DTG 曲线

Fig.4 TG and DTG curves under various testing conditions

成连续胶结网络,产物多以花朵状或片状附着于土颗粒表面,并在颗粒间遗留较多孔隙(图 5(a));随着 MgO 掺量增加,碳化产物逐渐增多,逐步构建起连接土颗粒的连续胶结骨架(图 5(e)),有效填充孔隙并增强颗粒间咬合作用,从而显著提升强度;然而,当 MgO 掺量增至 50%时(图 5(f)),胶结结构产生劣化:碳酸盐产物分布不均,在局部区域剧烈聚集并黏连成块,形成尺寸达数微米的致密团簇;团簇之间则存在明显空隙或薄弱界面。更重要的是,团簇边缘及颗粒接触区可见微米级裂缝(宽度约 $0.5\ \mu\text{m}$),表明内部存在应力集中。此现象源于结晶压力效应:过量 MgO 在短时间内生成大量三水碳镁石,其在受限孔隙内生

长产生的体积膨胀受到周围颗粒约束,从而在胶结体内部诱发拉应力,最终导致微裂纹萌生。该微观结构特征合理解释了宏观力学行为:尽管 50%试样含有更多 MgO,但其胶结相分布高度不均,且存在预存微缺陷,在荷载作用下易沿弱面扩展,导致整体强度低于 45%试样。该结果印证了第 2.1 节关于“结构劣化效应已超过胶结增强效应”的论断。

此外,当碳化时间由 2.0 h 延长至 4.0 h 时,碳化产物进一步聚集,形成更大尺度的块状结构(图 5(c)、(g))。然而,大范围 SEM 图像(图 5(h))显示,此类块状聚集体周围常伴随微裂纹发育,暗示持续碳化可能加剧局部应力集中,进而削弱胶结体完整性。

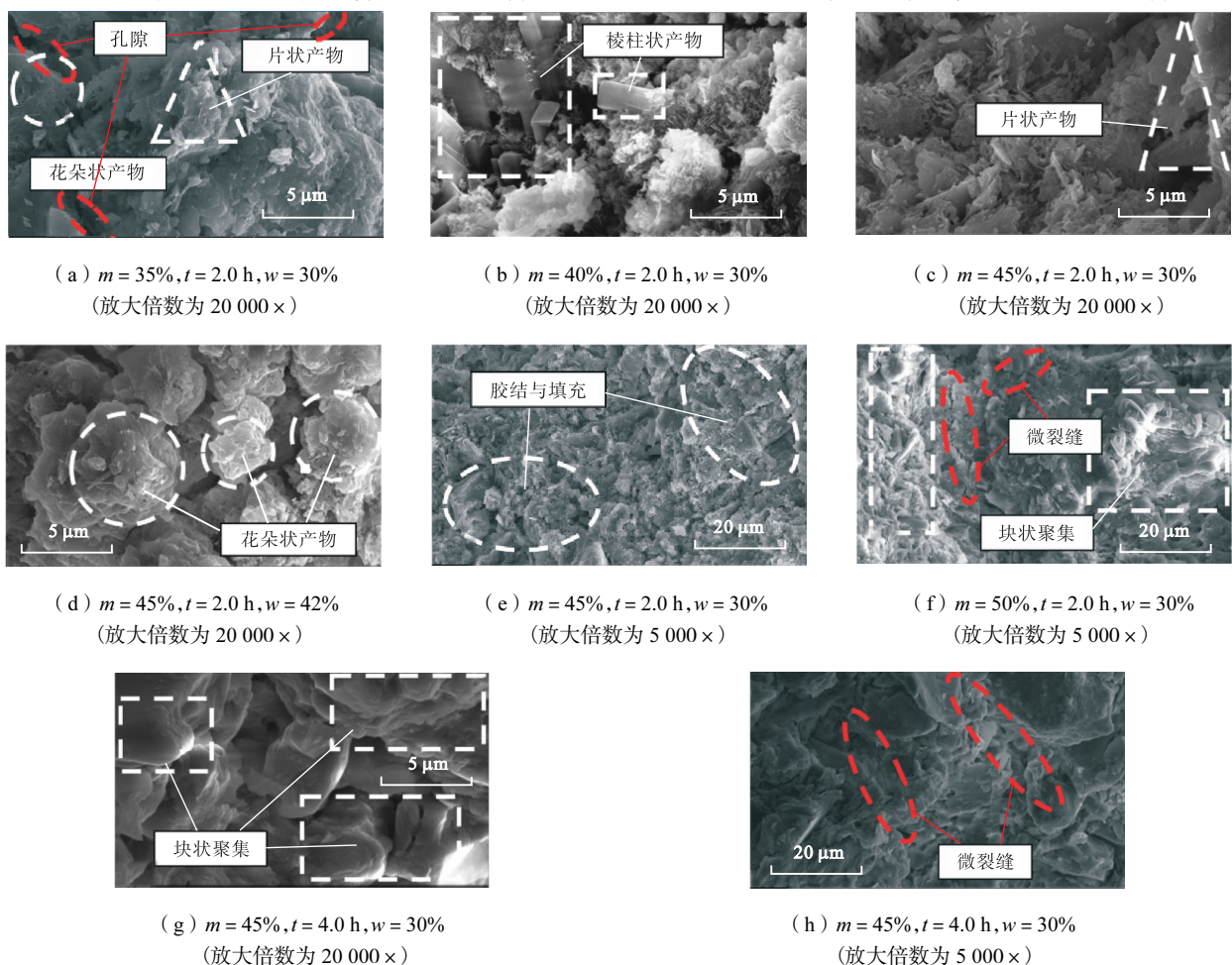
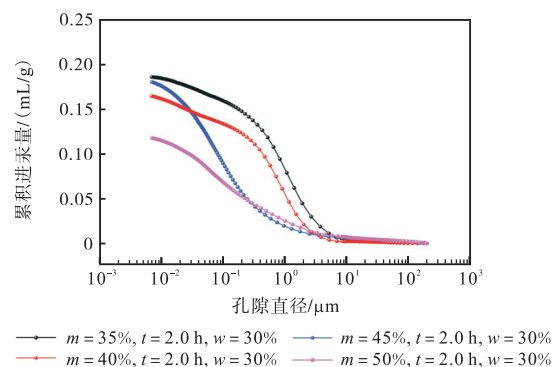


图 5 不同工况条件下的 SEM 图像
Fig.5 SEM images under various testing conditions

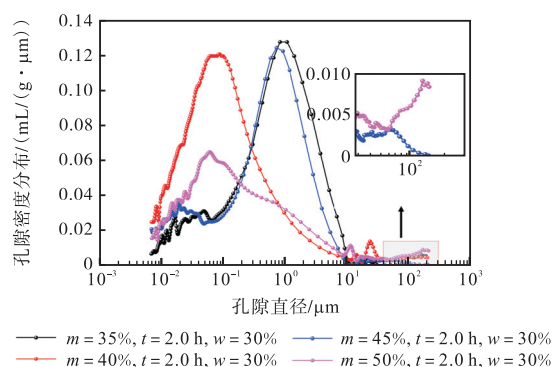
2.2.3 孔隙重构

图 6 展示了不同工况条件下的孔隙特征。由图 6(a)和(b)可见,随着 MgO 掺量增加($< 45\%$),孔隙总体积呈下降趋势,最可几孔径逐渐减小且主峰向左移动,表明中孔隙($0.40\ \mu\text{m} < d \leq 4.00\ \mu\text{m}$)、大孔隙($4.00\ \mu\text{m} < d \leq 40.00\ \mu\text{m}$)得到有效填充,小孔隙($0.04\ \mu\text{m} < d \leq 0.40\ \mu\text{m}$)及细微孔隙($d \leq 0.04\ \mu\text{m}$)^[25]所占比

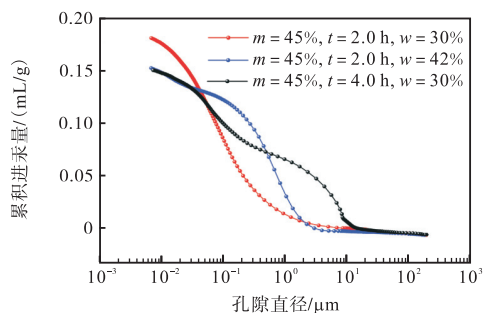
例上升,土体密实度显著提升。这一现象从微观孔隙结构角度解释了随着 MgO 掺量的增加试样强度逐步提高的现象。然而,当 MgO 掺量进一步增至 50%时,虽然最可几孔径大致与 45%掺量相当,但峰值明显降低,超大孔隙($d > 40.00\ \mu\text{m}$)增加(图 6(b)),导致结构劣化。其原因为:在有限的初始含水率和碳化时间内,过量的 MgO 引发复杂的连锁反应,导致局部反



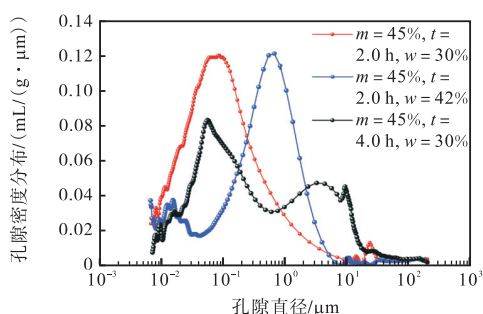
(a) 累积进水量曲线-MgO 掺量的影响



(b) 微分分布曲线-MgO 掺量的影响



(c) 累积进水量曲线-初始含水率的影响



(d) 微分分布曲线-初始含水率的影响

图 6 不同工况条件对碳化土孔隙特征影响

Fig.6 Impact of various testing conditions on the pore characteristics of carbonated soil

应剧烈,生成产物迅速沉积,堵塞孔隙通道,阻碍 CO_2 进一步扩散,致使碳化反应不完全且分布不均.此外,高掺量 MgO 在单位时间内水化生成大量水镁石,并迅速与 CO_2 反应生成大量水碳镁石晶

体.这些晶体在原有孔隙空间内快速生长并相互挤压,产生显著的结晶压力,使得已形成的碳化结构被撑开,原本细小的孔隙扩大,导致最可几孔径增大.在固定初始含水率的情况下,反应后期系统整体缺水,试样发生干燥收缩,产生的收缩应力在土体内形成拉应力,可能导致大孔隙再次显现.

图 6(c)和(d)显示,在碳化 2.0 h 条件下,当初始含水率由 30%增至 42%时,尽管试样的总孔隙体积减少,但小孔隙、中孔隙孔径范围内的孔隙 ($0.10 \sim 1.00 \mu\text{m}$) 数量增加,裂缝宽度扩大,孔隙结构劣化明显.其主要原因在于:较高的 MgO 含量促使反应消耗更多水分,42%的初始含水率恰能满足其充分水化与碳化需求,因此碳化产物生成更为充分,孔隙充填更加密实.然而,即便如此,过高的含水率仍可能导致局部反应滞后,影响整体孔隙结构优化效果,最可几孔径略有增大.因此,初始含水率与 MgO 掺量之间的匹配关系显著影响碳化反应的进程及其产物的空间分布特征.

此外,随着碳化时间从 2.0 h 延长至 4.0 h(图 6(c)和(d)),也呈现出总孔隙体积减少但最可几孔径产生双峰的现象,结合图 5(c)、(g)分析可知,随碳化时间延长,碳化产物逐渐富集,导致局部应力集中并产生微小裂缝,微观上表现为中孔隙、大孔隙数量增加,而宏观上则表现为 UCS 降低(图 2(b)).这种现象归因于结晶压力效应:随着碳化反应持续进行,碳化产物在受限空间内生长,引起体积膨胀并对周围颗粒施加拉应力,从而诱发微裂纹萌生.这不仅削弱了胶结体的整体完整性,也解释了为何较高含水率或更长碳化时间下尽管形成了更多胶结物质,但材料的力学性能并未相应提升反而可能出现下降的原因.

3 讨论

3.1 胶结-损伤竞争机制

以往 MgO 碳化固化研究多关注胶结相的生成及其对强度的正向贡献,而忽视高掺量条件下可能诱发的结构劣化效应.本文通过多尺度表征发现,在高含水率滩涂淤泥中采用高掺量 MgO 时,碳化土的强度发展并非单调增加,而是受控于胶结增强与结晶诱导损伤两类相互竞争的物理化学过程,其动态平衡决定了宏观力学性能的演化路径.

1) 胶结增强过程:反应补偿驱动致密骨架形成

在初始含水率 30%的条件下,土体饱和度较高,自由水严重阻碍 CO_2 气体的扩散与溶解,导致碳化反应速率显著降低. XRD 与 TG 结果表明,35%掺量

试样中水镁石大量残留(物相含量达 21.2%), 而有效胶结相三水碳镁石生成量有限(仅 7.5%)。当初始含水率进一步提升至 42%时, 颗粒间更难以形成连续胶结网络, UCS 难以突破 4 MPa。

然而, 当 MgO 掺量提升至 45%时, 体系内 Mg^{2+} 浓度显著增加, 在局部微区形成高反应势能环境。尽管整体水分稀释了 CO_2 浓度, 但高浓度水镁石仍能与缓慢扩散进入的 CO_2 持续反应, 推动三水碳镁石不断生成(含量升至 26.3%)。SEM 图像清晰显示, 这些产物以片状、花朵状形态均匀包裹土颗粒, 并在颗粒间搭接成致密胶结骨架; MIP 结果进一步证实, 总孔隙率下降, 大孔隙 ($> 1.00 \mu m$) 基本消失, 孔隙结构向小、细微孔主导转变。这种由充分胶结相填充与连接所形成的整体性结构, 是强度显著提升的根本原因。

此过程可概括为反应补偿效应: 高掺量 MgO 通过提供过量反应物, 在热力学(化学平衡)和动力学(反应速率)上补偿高含水率造成的传质阻力与反应物稀释, 从而维持碳化反应的有效进行。

2) 结晶诱导损伤过程: 过饱和反应引发微观结构劣化

当 MgO 掺量进一步增至 50%时, 体系进入反应过饱和状态。一方面, 单位体积内可参与反应的 MgO 远超孔隙空间所能容纳的极限; 另一方面, 高活性 MgO 在短时间内迅速水化并碳化, 导致水碳镁石晶体在有限孔隙内爆发式成核与生长。

晶体生长需占据空间, 而在受限孔隙中, 这种体积膨胀受到周围土颗粒的约束, 从而在晶体-颗粒界面处产生显著的结晶压力(可达数兆帕至数十兆帕)^[26], 足以撑开原有胶结结构或诱发新生微裂隙。SEM 图像(图 5(f))中可见产物呈块状聚集、局部黏连, 缺乏与土颗粒的有效咬合, 并且产生微裂缝; MIP 曲线(图 6(b))亦显示, $8.00 \sim 11.00 \mu m$ 范围的孔径反常增大, 且超大孔隙峰($100.00 \sim 200.00 \mu m$)重现, 表明孔隙连通性增加、结构完整性受损。

此外, XRD 图谱(图 3(a))中 50%掺量试样的三水碳镁石(N)衍射峰强度明显弱于 45%掺量试样, 同时水镁石(B)峰强增加, 并出现未反应方镁石峰, 说明过快的表面反应在试样表层形成致密碳酸盐壳层, 反而阻碍 CO_2 向内部扩散, 导致整体碳化不均、反应效率下降。

因此, 50%掺量下的强度下降并非因胶结相总量不足, 而是源于微观结构的非均匀性与损伤累积, 即结构劣化效应已超过胶结增强效应。

综上, 高掺量 MgO 碳化固化的无侧限抗压强度

q_u 演化可归结为

$$q_u \propto \underbrace{\text{胶结相生成速率} \times \text{分布均匀性}}_{\text{胶结强度}} - \underbrace{\text{结晶压力} \times \text{孔隙约束度}}_{\text{结构损伤}}$$

在本试验条件下 ($w = 30\%、42\%, t = 2.0 h$), 45%掺量恰处于胶结增强与结构损伤的临界平衡点: 一旦超过此阈值, 损伤项迅速增长, 导致净强度下降。这一发现不仅解释了为何 45%是最优掺量的原因, 更揭示了高掺量碳化技术的内在物理极限。

3.2 多因素耦合强度模型

现有研究多采用经验回归方法描述 MgO 碳化土强度与掺量、含水率等参数的关系, 但此类模型无法揭示高含水率下强度发展的内在制约机制, 亦难以解释最优掺量与过量劣化等非线性现象。为此, 本文基于前述胶结-损伤竞争机制, 构建一个融合物相演化、孔隙结构与反应环境的多因素耦合强度模型, 其核心思想是 UCS 由有效胶结贡献与结构损伤削弱共同决定。

$$q_u = k_1 (C_N P)^{k_2} e^{-k_3 R_w} - k_4 D \quad (1)$$

式中: $k_1、k_2、k_3、k_4$ 为相关系数, 通过试验数据标定; C_N 为有效胶结相含量, 以水碳镁石质量分数表征; P 为孔隙填充效率, 反映胶结相对孔隙空间的占据能力; R_w 为含水率抑制因子, 量化水分对碳化反应的阻碍程度; D 为结晶压力诱导的损伤指数。

1) 有效胶结相含量 C_N

三水碳镁石是早期碳化阶段最主要的胶凝性产物, 具有强包裹性与填充能力^[21]。本文通过 XRD 图谱结合 Jade 9 软件进行半定量分析, 获得碳化产物的物相含量(表 4)。在 $w = 30\%$ 条件下, $m = 45\%$ 试样的 $C_N = 26.3\%$, 显著高于 $m = 35\%$ 时的 7.5%, 与强度提升趋势一致。

2) 孔隙填充效率 P

胶结相需有效填充孔隙才能发挥增强作用, 总孔隙率越低, 表明固体相(包括土颗粒与碳化产物)占比越高, 胶结网络越连续。本文采用 MIP 测得累积进汞量代表总孔隙体积, 再结合试样的总体积计算总孔隙率(ϕ), 将总孔隙率的倒数作为 P 的表征指标:

$$P = 1/\phi \quad (2)$$

由图 6(a) 积分求得, $m = 45\%$ 试样总孔隙率约 24%, 对应 $P \approx 4.1$, 而 $m = 50\%$ 时试样总孔隙率降至约 17%, 可能因为 MIP 仅能测得汞可侵入的连通孔隙, 封闭孔隙无法被汞浸入, 导致测量值低于真实总孔隙率。

3) 含水率抑制因子 R_w

高含水率通过抑制孔隙水阻碍 CO_2 扩散并稀释 CO_2 溶解浓度, XRD 结果表明, 水分越多, 未反应的水镁石残留量越高. 因此, 定义:

$$R_w = \frac{[\text{Mg}(\text{OH})_2]_w}{[\text{Mg}(\text{OH})_2]_{w=30\%}} \quad (3)$$

即以 $w = 30\%$ 为基准, 量化高含水率下的反应抑制程度, 指数衰减项表明, 随着 R_w 增大, 有效胶结效率呈非线性下降, 符合化学反应动力学规律.

4) 结晶损伤指数 D

当 MgO 掺量超过临界值(45%), 结晶压力引发结构劣化. 由于直接测量结晶压力困难, 本文采用过量掺量阈值法定义损伤指数, 即

$$D = \max(0, m - 45\%) \quad (4)$$

该简化假设基于以下观察: $m \leq 45\%$ 时, SEM 与 MIP 未见明显损伤证据, $D = 0$; $m > 45\%$ 时, 损伤效应随掺量线性加剧.

5) 模型验证与参数标定

首先以 $w = 30\%$ 条件为例, 进行示意性标定, 通过 MATLAB 最小二乘法拟合得: $k_1 \approx 2.251 \text{ MPa}/\%$, $k_2 \approx 0.509$, $k_3 \approx 0.479$, $k_4 \approx 0.727 \text{ MPa}/\%$. 代入式(1)计算, 35%~50%掺量试样的 UCS 分别为 7.878 MPa、9.728 MPa、15.101 MPa、11.434 MPa, 模型预测值与实测值决定系数 $R^2 = 0.96$, 平均绝对误差为 0.420 MPa, 最大绝对误差为 0.772 MPa ($m = 40\%$ 时); 然后, 再将 $w = 42\%$ 的数据代入进行验证, 得到 UCS 为 5.112 MPa, 与实测值误差小于 3%.

本模型(表 6)相较于传统经验公式, 每一项均有明确的物理化学含义, 可追溯至微观测试数据, 能合理复现 45%掺量时强度最高(因 C_N 最优)和 50%掺量时强度下降(因 $D = 5\%$)等情况, 能定量回答为何高掺量在高含水率下仍有效以及为何存在最优掺量等关键问题.

表 6 强度模型多因素计算数值

Tab.6 Multi-factor calculated values of the strength model

$w/\%$	$m/\%$	q_u/MPa	$C_N/\%$	$\phi/\%$	P	R_w	$D/\%$
30	35	7.2	7.5	25.0	4.0	1.0	0
	40	10.5	10.1	22.3	4.5	1.0	0
	45	14.9	26.3	24.4	4.1	1.0	0
	50	11.4	18.2	17.0	5.9	1.0	5
42	45	5.1	10.2	21.4	4.7	2.4	0

4 结 论

(1) 高掺量 MgO 可有效突破高含水率对碳化反应的抑制. 当初始含水率达 42% 时, 常规低掺量 ($\leq 30\%$) 难以生成足量胶结相, 强度普遍低于 4 MPa; 而将 MgO 掺量提升至 45%, 可在 2.0 h 内实现 UCS 达 5.1 MPa, 满足军事机动保障对“小时级”快速硬化的基本承载要求. 其关键在于高掺量构建局部高反应势能区, 补偿水分稀释效应, 驱动水镁石持续转化为具有强胶结能力的三水碳镁石.

(2) 存在明确的最优掺量阈值(约 45%), 超过该阈值将引发结构劣化. 当 MgO 掺量增至 50% 时, 受限孔隙内三水碳镁石晶体爆发式生长, 产生显著结晶压力, 诱发微裂隙扩展与孔隙结构破坏. SEM 与 MIP 结果表明, 此时胶结相呈块状聚集、分布不均, 孔隙连通性增加, 导致宏观强度不升反降.

(3) 揭示并验证了胶结-损伤竞争机制, 并据此构建了有效胶结相含量、孔隙填充效率、含水率抑制因子与结晶损伤指数的多因素耦合强度模型. 该模

型不仅物理意义明确、可解释性强, 且能定量预测不同工况下的强度响应, 为高含水率软土快速碳化固化工程提供了理论依据, 并为 MgO 碳化固化掺量设计提供参考.

综上, 高掺量 MgO 碳化技术在本试验条件下(掺量 $\approx 45\%$ 、碳化时间 $\approx 2.0 \text{ h}$), 可实现高含水率滩涂淤泥的高效快速加固, 兼具“快”与“强”的双重优势, 具备在应急抢修、临时通路构筑等军事与民用场景中的应用潜力.

参考文献:

- [1] 王祥秋, 罗晓栋, 郑土永. 珠三角地区典型淤泥质土硬化土本构模型参数研究[J]. 中国港湾建设, 2024, 44(10): 44-50.
Wang Xiangqiu, Luo Xiaodong, Zheng Tuyong. Study on constitutive model parameters of hardening soil for typical silt soil in the Pearl River Delta region[J]. China Harbour Engineering, 2024, 44(10): 44-50 (in Chinese).
- [2] 黄晓鹏. 加载方式对淤泥质土固结特性影响试验研究

- [J]. 北方建筑, 2025, 10(2): 123-126.
- Huang Xiaopeng. Experimental study on the influence of loading methods on consolidation characteristics of muddy soil[J]. Northern Building, 2025, 10(2): 123-126(in Chinese).
- [3] 孙海超. 低水泥掺量淤泥固化土力学性能及微观结构特征研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2020.
- Sun Haichao. Study on Mechanical Properties and Microstructure Characteristics of Low Content Solidified Silt[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2020(in Chinese).
- [4] 徐日庆, 朱坤垵, 黄 伟, 等. 淤泥质土固化及路用性能试验研究[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2022, 49(3): 167-174.
- Xu Riqing, Zhu Kunlong, Huang Wei, et al. Experimental study on solidification and road performance of mucky soil[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2022, 49(3): 167-174(in Chinese).
- [5] Sukmak P, de Silva P, Horpibulsuk S, et al. Sulfate resistance of clay-Portland cement and clay high-calcium fly ash geopolymers[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(5): 04014158.
- [6] 谈云志, 柯 睿, 陈君廉, 等. 偏高岭土增强石灰-水泥固化淤泥的耐久性研究[J]. 岩土力学, 2020, 41(4): 1146-1152.
- Tan Yunzhi, Ke Rui, Chen Junlian, et al. Enhancing durability of lime-cement solidified sludge with metakaolin[J]. Rock and Soil Mechanics, 2020, 41(4): 1146-1152(in Chinese).
- [7] 郭 印. 淤泥质土的固化及力学特性的研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2007.
- Guo Yin. Study on Stabilization of Muddy Soil and Mechanical Properties of Stabilized Soil[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2007(in Chinese).
- [8] 郑晨晖, 蔡光华, 钟煜清, 等. 碳化条件下电石渣-氧化镁固化淤泥土的试验研究[J]. 科技和产业, 2023, 23(9): 233-238.
- Zheng Chenhui, Cai Guanghua, Zhong Yuqing, et al. Experimental study of carbide slag-MgO stabilized mud under carbonation condition[J]. Science Technology and Industry, 2023, 23(9): 233-238(in Chinese).
- [9] 曹伟达, 杨全兵. 碳化养护对钢渣-熟石灰固碳砖耐久性的影响[J]. 建筑材料学报, 2023, 26(3): 324-331.
- Cao Weida, Yang Quanbing. Effect of carbonation curing on durability of carbon fixing steel slag-slaked lime brick[J]. Journal of Building Materials, 2023, 26(3): 324-331(in Chinese).
- [10] 蔡光华, 刘松玉, 曹菁菁. 活性氧化镁碳化加固粉土微观机理研究[J]. 土木工程学报, 2017, 50(5): 105-113, 128.
- Cai Guanghua, Liu Songyu, Cao Jingjing. Research on micro-mechanism of carbonated reactive MgO-stabilized silt[J]. China Civil Engineering Journal, 2017, 50(5): 105-113, 128(in Chinese).
- [11] 刘松玉, 李 晨. 氧化镁活性对碳化固化效果影响研究[J]. 岩土工程学报, 2015, 37(1): 148-155.
- Liu Songyu, Li Chen. Influence of MgO activity on stabilization efficiency of carbonated mixing method[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2015, 37(1): 148-155(in Chinese).
- [12] Yi Y L, Liska M, Unluer C, et al. Carbonating magnesia for soil stabilization[J]. Canadian Geotechnical Journal, 2013, 50(8): 899-905.
- [13] 闵凡路, 申 政, 李彦澄, 等. 盾构淤泥质废弃黏土氧化镁固化-碳化试验及碳化机制研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(2): 364-374.
- Min Fanlu, Shen Zheng, Li Yancheng, et al. Solidification and carbonization experimental study on magnesium oxide in shield waste soil and its carbonization mechanism[J]. Rock and Soil Mechanics, 2024, 45(2): 364-374(in Chinese).
- [14] 刘松玉, 曹菁菁, 蔡光华. 活性氧化镁碳化固化粉质黏土微观机制[J]. 岩土力学, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563.
- Liu Songyu, Cao Jingjing, Cai Guanghua. Microstructural mechanism of reactive magnesia carbonated and stabilized silty clays[J]. Rock and Soil Mechanics, 2018, 39(5): 1543-1552, 1563(in Chinese).
- [15] 陈学军, 班如龙, 宋 宇, 等. 初始含水率对活性 MgO 碳化红黏土特性的影响[J]. 中国科技论文, 2022, 17(12): 1317-1324.
- Chen Xuejun, Ban Rulong, Song Yu, et al. Effect of initial water content on characteristics of reactive MgO carbonated red clay[J]. China Sciencepaper, 2022, 17(12): 1317-1324(in Chinese).
- [16] 中国人民解放军总后勤部. GJB 3501—1998 军用道路工程技术标准[S]. 1998.
- General Logistics Department of the People's Liberation Army. GJB 3501—1998 Technical Standard of Military Road Engineering[S]. 1998(in Chinese).
- [17] 中国人民解放军总后勤部. GJB 3364—1995 军用机场水泥混凝土道面使用质量评定标准[S]. 1995.
- General Logistics Department of the People's Liberation Army. GJB 3364—1995 Standard for Service Quality Evaluation of Cement Concrete Pavements in Military Airfields[S]. 1995(in Chinese).

- [18] 中华人民共和国水利部. GB/T 50123—2019 土工试验方法标准[S]. 北京: 中国计划出版社, 2019.
Ministry of Water Resources of the People's Republic of China. GB/T 50123—2019 Standard for Geotechnical Testing Method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019(in Chinese).
- [19] 交通运输部公路科学研究院. JTG 3430—2020 公路土工试验规程[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Research Institute of Highway, Ministry of Transport. JTG 3430—2020 Specifications for Highway Geotechnical Testing[S]. Beijing: China Communications Press, 2020(in Chinese).
- [20] 陈双影, 张旭良, 郭福水, 等. X 射线荧光光谱仪的介绍及应用[J]. 广东化工, 2024, 51(19): 195-196.
Chen Shuangying, Zhang Xuliang, Guo Fushui, et al. Introduction and application of X-ray fluorescence spectrometer[J]. Guangdong Chemical Industry, 2024, 51(19): 195-196(in Chinese).
- [21] 蔡光华, 刘松玉, 曹菁菁. 初始含水率对 MgO 碳化粉土强度和电阻率的影响[J]. 中国公路学报, 2017, 30(11): 18-26.
Cai Guanghua, Liu Songyu, Cao Jingjing. Influence of initial water content on strength and electrical resistivity of MgO-carbonated silt[J]. China Journal of Highway and Transport, 2017, 30(11): 18-26(in Chinese).
- [22] 曹菁菁. 活性氧化镁碳化固化土微观机制及应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2016.
Cao Jingjing. The Application and Micro-Mechanism of Carbonated Reactive Magnesia Solidified Soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2016(in Chinese).
- [23] 王东星, 肖杰, 李丽华, 等. 基于碳化-固化技术的武汉东湖淤泥耐久性演变微观机制[J]. 岩土力学, 2019, 40(8): 3045-3053.
Wang Dongxing, Xiao Jie, Li Lihua, et al. Micro-mechanism of durability evolution of sludge dredged from East Lake, Wuhan based on carbonation-solidification technique[J]. Rock and Soil Mechanics, 2019, 40(8): 3045-3053(in Chinese).
- [24] 李听, 陈德平, 贾盼亚. 三水碳酸镁向水菱镁石转变的影响因素[C]//第十届全国成矿理论与找矿方法学术讨论会论文摘要集. 西安, 中国, 2023: 412-413.
Li Ting, Chen Deping, Jia Panya. Factors influencing the transformation of nesquehonite to hydromagnesite [C]//Proceedings of the 10th National Symposium on Metallogenic Theory and Mineral Exploration Methods. Xi'an, China, 2023: 412-413(in Chinese).
- [25] 孔祥辉, 梁允鹏, 崔帅, 等. 活性 MgO 碳化固化疏浚底泥的影响因素及作用机理[J]. 建筑材料学报, 2024, 27(7): 620-628.
Kong Xianghui, Liang Yunpeng, Cui Shuai, et al. Influencing factors and mechanism of dredged sediment carbonated and solidified with reactive MgO[J]. Journal of Building Materials, 2024, 27(7): 620-628(in Chinese).
- [26] Unluer C, Al-Tabbaa A. Enhancing the carbonation of reactive MgO cement porous blocks through improved curing conditions[J]. Cement and Concrete Research, 2014, 59: 55-65.
- [27] Unluer C, Al-Tabbaa A. Characterization of light and heavy hydrated magnesium carbonates using thermal analysis[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2014, 115(1): 595-607.
- [28] Liska M. Performance of Reactive Magnesia Cement and Porous Construction Products[D]. Cambridge: University of Cambridge, 2009.
- [29] 易耀林. 基于可持续发展的搅拌桩系列新技术与理论[D]. 南京: 东南大学, 2013.
Yi Yaolin. Sustainable Novel Deep Mixing Methods and Theory[D]. Nanjing: Southeast University, 2013(in Chinese).
- [30] 吴丹, 王玉琪, 武海虹, 等. 三水碳酸镁合成与形态演变过程研究[J]. 人工晶体学报, 2014, 43(3): 606-613.
Wu Dan, Wang Yuqi, Wu Haihong, et al. Research on preparation and morphology evolution of magnesium carbonate tri-hydrate[J]. Journal of Synthetic Crystals, 2014, 43(3): 606-613(in Chinese).

(责任编辑: 田军)