

引文格式: 祁立柱, 董晓强, 崔德超, 等. 冻融-干湿循环下碳化多源固废流态固化土耐久性及劣化机理[J]. 太原理工大学学报, 2026, 57(4): 683-698.

QI Lizhu, DONG Xiaoqiang, CUI Dechao, et al. Durability and deterioration mechanisms of carbonation-cured flowable solidified soil prepared from multiple industrial solid wastes during freeze-thaw and wet-dry cycles[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2026, 57(4): 683-698.

冻融-干湿循环下碳化多源固废流态固化土 耐久性及劣化机理

祁立柱¹, 董晓强^{1,2,3}, 崔德超¹, 张倓嘉¹, 殷军练⁴, 薛生国⁵

(1. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原; 2. 土木工程防灾与控制山西省重点实验室, 山西 太原;

3. 太原科技大学 应用科学学院, 山西 太原; 4. 煤炭工业太原设计研究院集团有限公司, 山西 太原;

5. 中南大学 冶金环境学院, 湖南 长沙)

摘 要:【目的】为提高赤泥、电石渣等工业固废在工程材料中的利用水平。【方法】以赤泥、电石渣、偏高岭土和镁渣为主要原料制备多源固废流态固化土, 设置碳化与未碳化两类试样, 分别开展冻融循环和干湿循环试验, 分析其宏观形貌、质量损失率、线收缩率、无侧限抗压强度、pH值及电阻率变化, 并结合SEM和FTIR结果讨论其结构变化。【结果】结果表明: 冻融循环和干湿循环均会导致流态固化土劣化, 其中冻融循环下强度持续下降, 干湿循环下强度呈先增后降变化。碳化处理可改善试样初始结构, 在冻融循环初期减小质量损失和收缩变形, 并提高早期强度, 但后期作用减弱; 干湿循环作用下, 碳化组在中后期的质量损失与线收缩累积值整体高于未碳化组, 表明碳化处理对材料长期干湿交替稳定性的改善有限。不同配比中, 镁渣掺量为30%时试样在两类环境作用下均表现出较好的稳定性。两类环境作用下, pH值整体下降, 电阻率与无侧限抗压强度呈正相关关系。微观结果表明, 循环过程中凝胶产物减少, 孔隙和微裂缝增多, 胶凝结构逐步劣化。

关键词: 赤泥; 流态固化土; 碳化; 耐久性; 劣化机理

中图分类号: TU528 **文献标识码:** A

DOI: 10.16355/j.tyut.1007-9432.20260193

文章编号: 1007-9432(2026)04-0683-16

Durability and Deterioration Mechanisms of Carbonation-Cured Flowable Solidified Soil Prepared from Multiple Industrial Solid Wastes During Freeze-Thaw and Wet-Dry Cycles

QI Lizhu¹, DONG Xiaoqiang^{1,2,3}, CUI Dechao¹, ZHANG Tanjia¹, YIN Junlian⁴, XUE Shengguo⁵

(1. College of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 2. Shanxi Provincial Key Laboratory of Civil Engineering Disaster Prevention and Control, Taiyuan, Shanxi, China; 3. School of Applied Science, Taiyuan University of Science and Technology, Taiyuan, Shanxi, China; 4. Coal Industry Taiyuan Design and Research Institute Group Co., Ltd., Taiyuan, Shanxi, China; 5. School of Metallurgy and Environment, Central South University, Changsha, Hunan, China)

Abstract: 【Purposes】To promote the use of industrial solid wastes such as red mud and carbide

收稿日期: 2026-04-14; 修回日期: 2026-05-22

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52378360, 51978438), 三晋英才计划科技创新领军人才项目

第一作者: 祁立柱, 博士研究生, 主要从事环境岩土研究, (E-mail) qlzxcig@163.com

通信作者: 董晓强, 博士, 教授, 主要从事环境岩土研究, (E-mail) dongxiaoqiang@tyut.edu.cn

slag in engineering materials, a multi-source solid waste flowable solidified soil is prepared by using red mud, carbide slag, metakaolin, and magnesium slag as main constituents. **【Methods】** Carbonated and non-carbonated specimens were produced and subjected to freeze-thaw cycles and wet-dry cycles, separately. Changes in macroscopic appearance, mass loss rate, linear shrinkage, unconfined compressive strength, pH value, and electrical resistivity were examined, and the associated structural evolutions were analyzed with SEM and FTIR. **【Results】** The results indicate that both freeze-thaw cycling and wet-dry cycling lead to deterioration of the flowable solidified soil. During freeze-thaw cycles, the strength decreases continuously, whereas during wet-dry cycles it increases first and then declines. Carbonation improves the initial structure of the specimens. At the early stage of freeze-thaw cycling, mass loss and shrinkage reduce while early strength increases; however, this beneficial effect becomes less evident with increasing cycle number. During wet-dry cycles, the carbonated specimens show comparatively larger mass loss and shrinkage at later stages. Among different mixtures, the specimen containing 30% magnesium slag shows better stability with both environmental conditions. In both cases, the pH value decreases overall, and electrical resistivity shows a positive correlation with unconfined compressive strength. Microscopic observations further show that gel products gradually decrease during cyclic exposures, while pores and microcracks continue to develop, leading to progressive degradation of cementitious structure.

Keywords: red mud; flowable solidified soil; carbonation; durability; deterioration mechanism

随着工业固废排放量持续增长,赤泥、电石渣等大宗固废长期堆存所带来的占地与环境风险日益突出。将此类固废用于工程材料制备,是实现资源化利用的重要途径。流态固化土因流动性较好、充填方便、施工适应性强,在基坑回填、管沟填筑及软弱地基处理等工程中具有较好的应用前景^[1-3]。

多源固废组分之间的匹配关系对流态固化土的结构形成和工程性能具有直接影响。赤泥、电石渣、偏高岭土和镁渣等固废材料具有一定反应活性,可作为流态固化土的原料。赤泥可提供碱性环境及部分活性硅铝组分,电石渣可提供钙源,偏高岭土富含活性 SiO_2 和 Al_2O_3 , 镁渣可参与形成含镁胶凝产物并影响结构致密程度^[4-7]。在碱性条件下,各组分通过水化反应和火山灰反应生成 C-S-H、C-A-S-H 及 M-S-H 等胶凝产物,使颗粒间逐步形成连续胶结结构。

工程应用条件下,流态固化土常受到冻融作用或干湿作用影响。冻融循环过程中,孔隙水反复冻结和融化,易引起孔壁破坏与裂隙扩展,进而导致质量损失、结构松散和强度下降^[8,9]。干湿循环过程中,水分迁移、蒸发收缩及可溶组分的溶解与再析出,会改变孔隙结构和颗粒间胶结状态,使材料产生开裂、收缩及承载能力衰减^[10,11]。已有研究对固化土在冻融或干湿条件下的性能变化进行了讨论,但针对多源固废流态固化土的耐久性研究仍相对

不足,尤其是碳化处理后材料在不同环境作用下的性能演变规律,还缺少较系统的试验分析。

碳化养护可通过 CO_2 与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及部分含钙凝胶反应生成 CaCO_3 ,在一定程度上改善材料早期结构密实性和强度^[12,13]。但碳化同时会降低体系碱度,改变原有胶凝相的稳定条件,使部分 C-S-H 等产物发生脱钙或结构调整,从而影响材料后期耐久性^[14,15]。因此,碳化处理对流态固化土的作用并非单一强化,其影响需结合环境作用条件加以分析。

除宏观损伤外,流态固化土在环境作用下还伴随孔隙结构演化、离子迁移和胶凝相变化。pH 值可反映体系碱度变化,电阻率与孔隙连通状态及离子传输能力密切相关,二者可用于辅助判断材料内部状态^[16,17]。基于此,本文以赤泥、电石渣、偏高岭土和镁渣构建四元固废流态固化土体系,设置碳化与未碳化对照,分别开展冻融循环和干湿循环试验,系统分析宏观损伤、质量损失、线收缩、无侧限抗压强度、pH 值及电阻率的演化规律,并结合 SEM 与 FTIR 揭示其结构劣化特征。研究重点在于:阐明碳化处理对材料初始致密化及后期耐久性的差异化影响;对比冻融循环与干湿循环两类环境作用下的损伤演变规律;识别不同镁渣掺量中的较优配比,为多源固废流态固化土在复杂服役环境中的应用提供依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料及其基本性质

本文选用赤泥、电石渣、偏高岭土、镁渣和P·O 42.5普通硅酸盐水泥作为原材料。各原材料外观形貌见图1。赤泥呈红褐色颗粒状,电石渣和偏高岭土为浅色粉体,镁渣呈灰白色粉体,水泥为灰色粉状材料。不同材料在颜色、颗粒形态和均匀性方面存在差异。

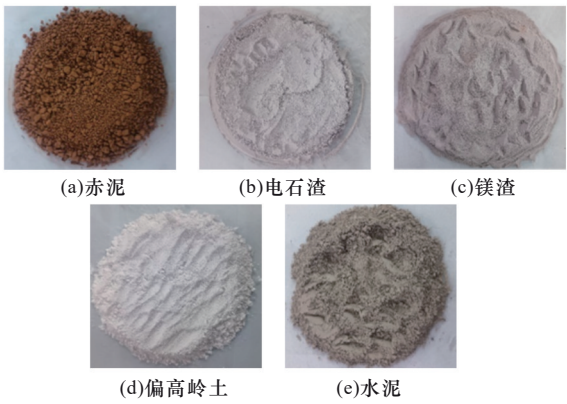


图1 原材料外观形貌:(a)水泥;(b)赤泥;(c)电石渣;
(d)偏高岭土;(e)镁渣

Fig. 1 Morphology of raw materials: (a) cement; (b) red mud; (c) carbide slag; (d) metakaolin; (e) magnesium slag

原材料主要化学成分见表1。赤泥中 Al_2O_3 、 SiO_2 和 Na_2O 含量较高,具备一定碱性和活性;电石渣中 CaO 含量较高,可提供主要钙源;偏高岭土中 SiO_2 和 Al_2O_3 含量较高;镁渣中含有一定量 CaO 、 SiO_2 和 MgO ;水泥主要提供早期胶结能力。

表1 原材料主要化学组成

Table 1 Major chemical compositions of raw materials

原材料	XRF, wt. %					
	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	MgO	Na ₂ O
水泥	44.63	37.06	5.01	2.43	1.65	0.11
赤泥	18.26	20.17	24.34	9.40	1.26	9.61
电石渣	64.52	3.05	1.15	—	—	0.25
镁渣	57.51	29.43	0.52	2.49	3.78	—
偏高岭土	0.07	54.83	42.15	0.37	0.02	0.24

原材料的矿物组成和微观形貌见图2。赤泥以团聚状颗粒为主,电石渣呈片状堆叠,镁渣多为粗糙块状团聚体。颗粒级配曲线见图3。赤泥和偏高岭土颗粒较细,电石渣和镁渣相对较粗,其中镁渣粗颗粒占比较高。细颗粒有利于填充孔隙,粗颗粒可起到一定骨架作用。原材料在化学组成和颗粒级配上的差异,为多源固废体系结构形成提供了条件。

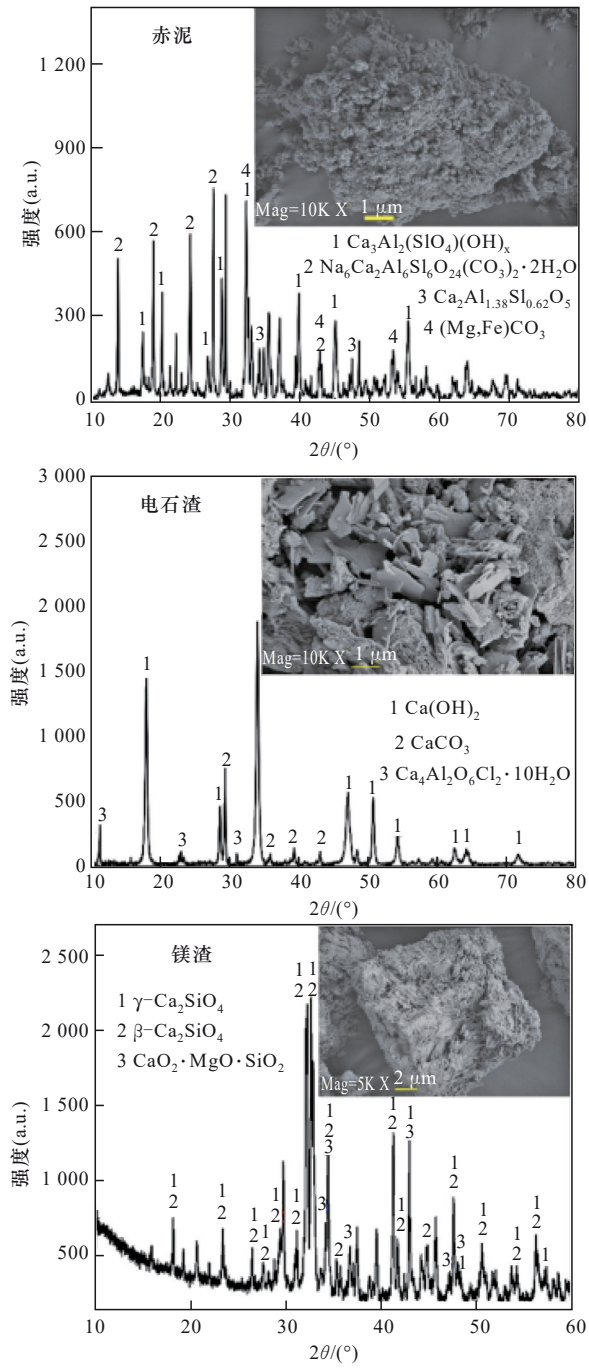


图2 原材料的矿物成分和微观形貌

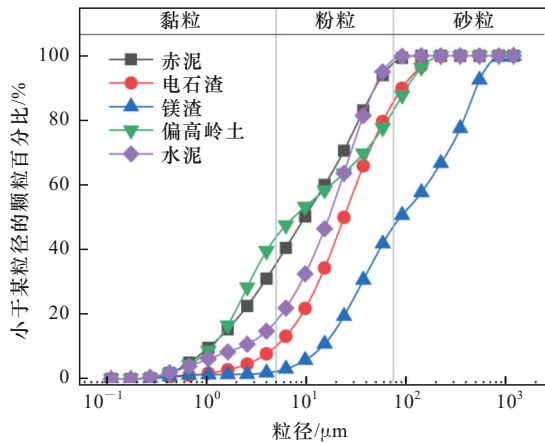
Fig. 2 Mineral compositions and microstructures of raw materials

1.2 配比设计

根据前期配比筛选结果,选取3组配比开展耐久性试验。赤泥掺量固定为76%,胶凝材料总掺量为19%,水泥掺量为5%;电石渣与偏高岭土质量比固定为6:4,镁渣掺量分别取20%、30%和40%,对应配比一、配比二和配比三。前期试配表明,水固比取0.8时浆体状态较稳定,可满足拌和和灌模要求。

为评价浆体施工适应性,对各配比新拌浆体进行流动度测试。每组试样连续测试3次,取其平均

值作为该组流动度结果。



(测试方法:激光粒度分析;结果为3次平行测试平均值。)

图3 原材料的颗粒级配曲线

Fig. 3 Particle size distribution curves of raw materials

1.3 试样制备与养护

按设计配比称取各组材料,先将固体组分干混均匀,再按水固比0.8加入拌合水,采用强制搅拌方式拌和至浆体均匀。随后将浆液注入内径5 cm、高5 cm圆柱形模具中,高径比为1.0。适度振动后刮平表面。试样室温静置1 d后脱模并编号。脱模后,碳化组试样先在标准养护条件下预养护1 d,以保证试样具备基本成型强度并减少碳化阶段表层失稳。随后将其置于高压反应釜中进行加速碳化,碳化条件为CO₂浓度80%、温度60℃、相对湿度80%、压力0.2 MPa,持续2 h。碳化结束后,试样继续在标准养护条件下养护至28 d;未碳化组在脱模后直接于相同标准养护条件下养护至28 d。

1.4 冻融循环与干湿循环试验

冻融循环中,试样在-18±2℃条件下冻结12 h,再转入标准养护室融化12 h,作为1个循环周期,共进行12次。干湿循环中,试样先在60℃烘箱中干燥24 h,再浸没于20℃去离子水中并置于标准养护室养护24 h,作为1个循环周期,共进行12次。

在第2、4、6、8、10和12次循环后,取平行试样测定质量损失率、线收缩率、无侧限抗压强度、pH值和电阻率,并记录宏观形貌。抗压试验后取代表性试样进行SEM和FTIR分析。

各循环节点每组每项指标均设置3个平行试样,测试结果取算术平均值;质量损失率、线收缩率、无侧限抗压强度、pH值与电阻率均基于同批次平行样统计分析。

1.5 测试指标与方法

无侧限抗压强度试验依据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTGE51—2009)^[18]进行,加

载速率为1.5 mm/min。pH测试参照《危险废物鉴别标准 腐蚀性鉴别》(GB5085.3—2007)^[19]进行,测试时,将破碎并过筛后的试样与去离子水按液固比5:1混合,室温下磁力搅拌10 min后静置30 min,测定上清液pH值。电阻率采用交流阻抗法测定,测试前试样表面擦除自由水并保持饱和状态,在试样上下端面放置导电电极,通过LCR数字电桥测定交流电阻值。用于分析材料孔隙连通状态和离子迁移能力。质量损失率和线收缩率分别反映试样表层剥蚀和体积稳定性变化。SEM和FTIR主要用于分析微观形貌和胶凝产物变化。

2 结果与讨论

2.1 宏观形貌演化

冻融循环过程中,试样表面形貌随循环次数增加逐步劣化如图4所示。循环初期,试样整体外形基本完整,仅在局部边缘出现轻微剥蚀;随着循环继续进行,表面裂缝逐渐增多并向内部发展,边角部位开始发生剥落;进入中后期后,部分试样出现裂缝贯通和局部片状脱落。未碳化组在相同循环

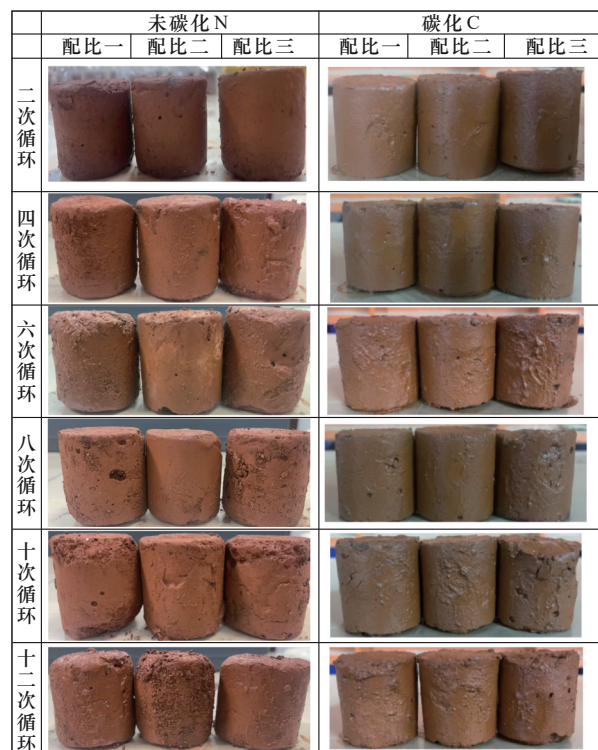


图4 冻融循环作用下试样宏观形貌(配比一、配比二、配比三分别对应镁渣掺量20%、30%和40%;N表示未碳化,C表示碳化;数字表示循环次数)

Fig. 4 Macroscopic morphology of specimens during freeze-thaw cycles (Mixture I, II, and III correspond to magnesium slag contents of 20%, 30%, and 40%, respectively; N denotes non-carbonated specimens, C denotes carbonated specimens; the numbers indicate cycle numbers)

次数下破坏更早、程度更重,8次循环后已可观察到较明显的贯通裂缝。碳化组前期表观较完整,表层损伤相对较轻,说明碳化处理对试样早期结构有一定改善作用^[20,22]。

不同配比之间也存在明显差异。配比二在冻融循环全过程中外观保持较好,裂缝扩展较慢,边角破损较轻;配比三损伤最早,循环后期边缘剥蚀和表层开裂最为明显。这表明镁渣掺量对试样冻融稳定性影响较大,适量掺入有利于维持结构完整,掺量过高则不利于后期稳定^[22,23]。

干湿循环条件下,试样宏观形貌变化主要表现为表层开裂、边缘松散和后期崩解如图5所示。前4次循环内,各组试样外观变化不大;至6次循环后,表面开始出现明显裂缝;继续循环后,裂缝不断扩展,部分试样边角破损并出现崩解。未碳化组中,配比一和配比三损伤发展较快,配比二整体较为完整。碳化组前期形貌变化同样较小,但中后期裂缝扩展和表层破损有所加重^[23,24]。

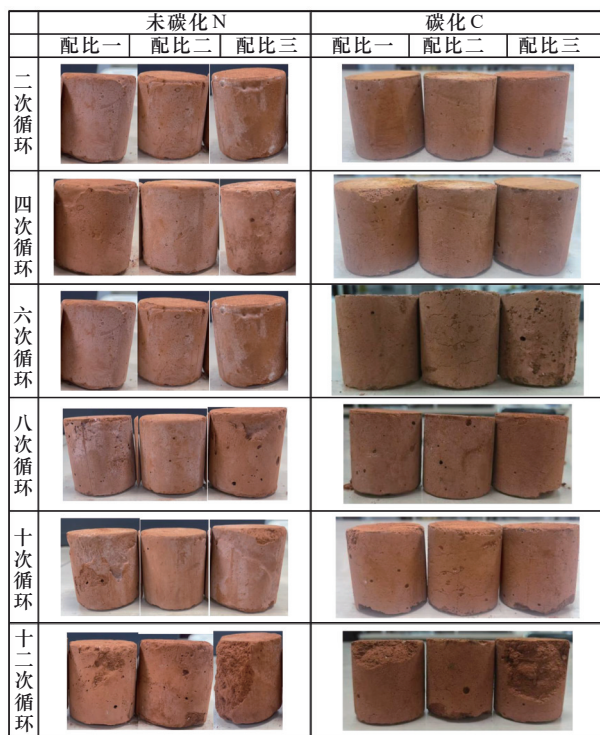


图5 干湿循环作用下试样宏观形貌(配比一、配比二、配比三分别对应镁渣掺量 20%、30% 和 40%;N 表示未碳化,C 表示碳化;数字表示循环次数)

Fig. 5 Macroscopic morphology of specimens during wet-dry cycles (Mixture I, II, and III correspond to magnesium slag contents of 20%, 30%, and 40%, respectively; N denotes non-carbonated specimens, C denotes carbonated specimens; the numbers indicate cycle numbers)

2.2 质量损失与收缩变形

2.2.1 冻融循环

冻融循环过程中,各组试样质量损失率均随循环次数增加而增大,但增长过程并不一致如图6所示。未碳化组前4次循环内质量损失较小,说明此阶段损伤主要集中在表层;6—8次循环后,裂缝逐渐扩展,局部开始出现片状剥落,质量损失率明显增加;10次以后,部分试样边角破坏加重,配比三在12次循环后的质量损失率约为15%,高于其余两组。配比二在整个冻融过程中质量损失始终较小,表现出较好的抗冻融能力^[25]。

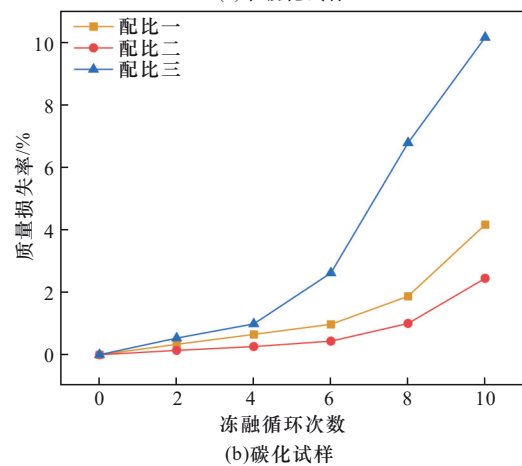
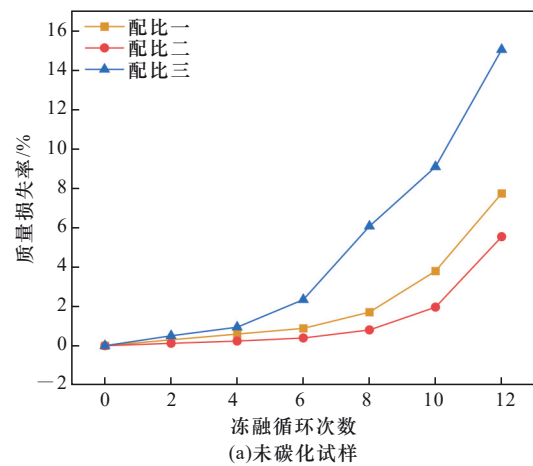


图6 冻融循环作用下质量损失率变化

Fig. 6 Variations in mass loss rate of specimens during freeze-thaw cycles

碳化组在前期冻融循环中的质量损失率明显低于未碳化组。前4次循环内,各组试样质量损失率均控制在较低范围内;随着循环次数增加,质量损失逐渐加快,其中配比三增幅最为明显,配比二仍保持最低水平。说明碳化处理有利于减轻冻融初期的表层剥蚀,但进入中后期后,这种作用逐步减弱^[24,25]。

线收缩率结果与质量损失率变化基本一致如图 7 所示。未碳化组线收缩率随循环次数持续增大, 配比一和配比三在高循环次数下收缩较大, 说明反复冻胀与融沉导致内部孔隙结构不断调整并趋于压密。碳

化组整体收缩小于未碳化组, 表明碳化形成的较致密结构在一定程度上减轻了冻融变形, 但不同配比之间仍存在明显差异, 其中配比二最小, 配比三最大^[25,26]。

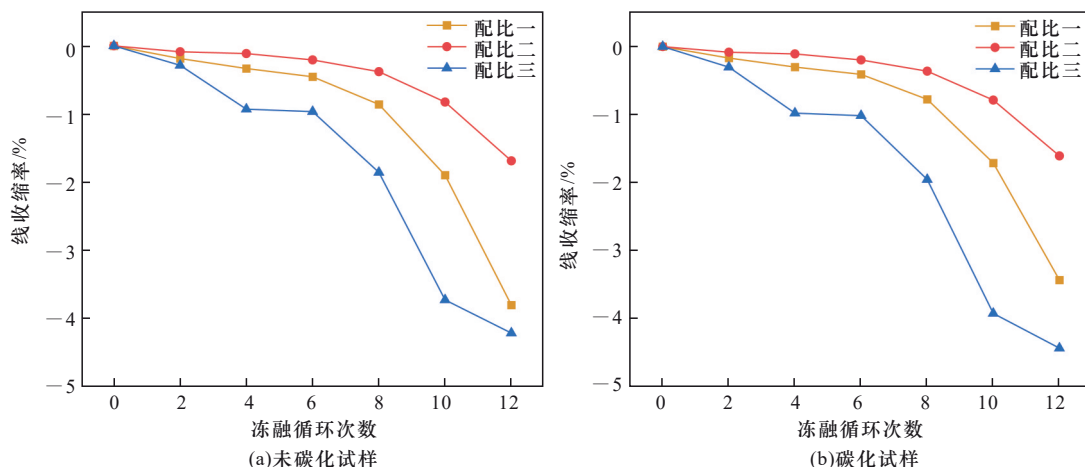


图 7 冻融循环作用下线收缩率变化

Fig. 7 Variations in linear shrinkage of specimens during freeze-thaw cycles

2.2.2 干湿循环

干湿循环下, 质量损失率同样随循环次数增加而增大如图 8 所示。前 4 次循环内, 各组试样质量变化较小; 进入中后期后, 增幅明显加快。未碳化组中, 配比二质量损失率始终最低, 配比一和配比

三较高, 尤其配比三后期损伤更为突出。碳化组质量损失率变化趋势与未碳化组基本一致, 但整体水平偏高, 说明碳化处理并未改善材料在干湿交替条件下的长期稳定性^[23,26]。

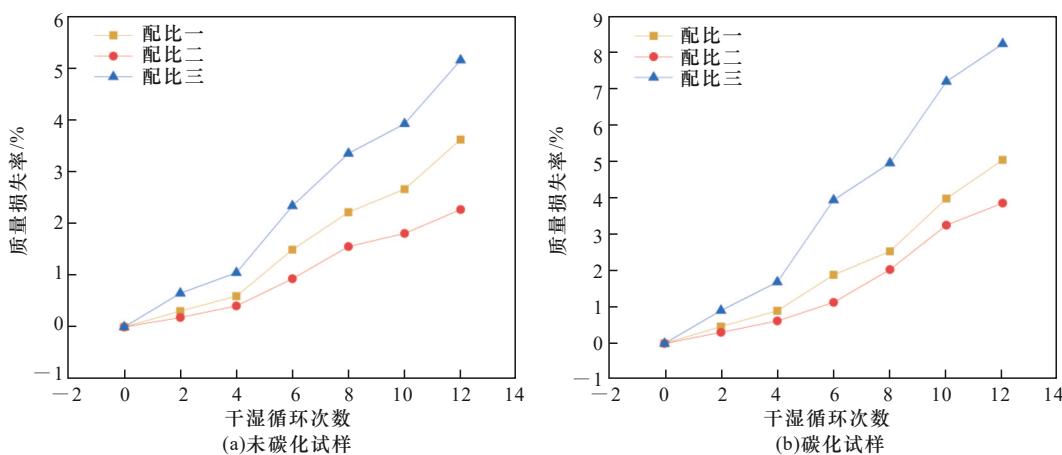


图 8 干湿循环作用下质量损失率变化

Fig. 8 Variations in mass loss rate of specimens during wet-dry cycles

如图 9 所示线收缩率结果表明, 未碳化组随镁渣掺量增加呈先减小后增大的变化规律, 配比二收缩最小, 配比三最大。适量镁渣有利于改善颗粒间胶结和结构连续性, 而掺量过高后, 体系内部更易出现微裂纹, 后续干燥收缩随之加剧。碳化组的变化规律与未碳化组基本一致, 但整体收缩更大, 说明碳化后的结构在干湿交替环境中更容易发生累积变形^[21,26]。

2.3 力学性能退化

2.3.1 冻融循环下的 UCS 变化

冻融循环作用下, 各组试样无侧限抗压强度随循环次数增加持续下降, 如图 10 所示。未碳化组中, 配比二在各循环阶段均保持较高强度, 配比一次之, 配比三最低。前 6 次循环内, 强度下降较快; 后续虽然仍继续衰减, 但降幅有所放缓^[25]。

碳化组在冻融初期表现出较高的强度水平。2

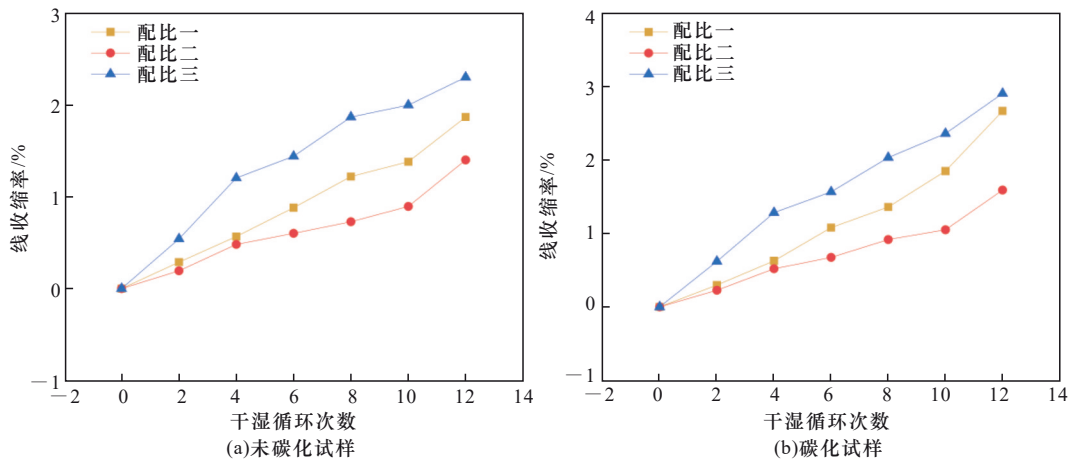


图9 干湿循环作用下线收缩率变化

Fig. 9 Variations in linear shrinkage of specimens during wet-dry cycles

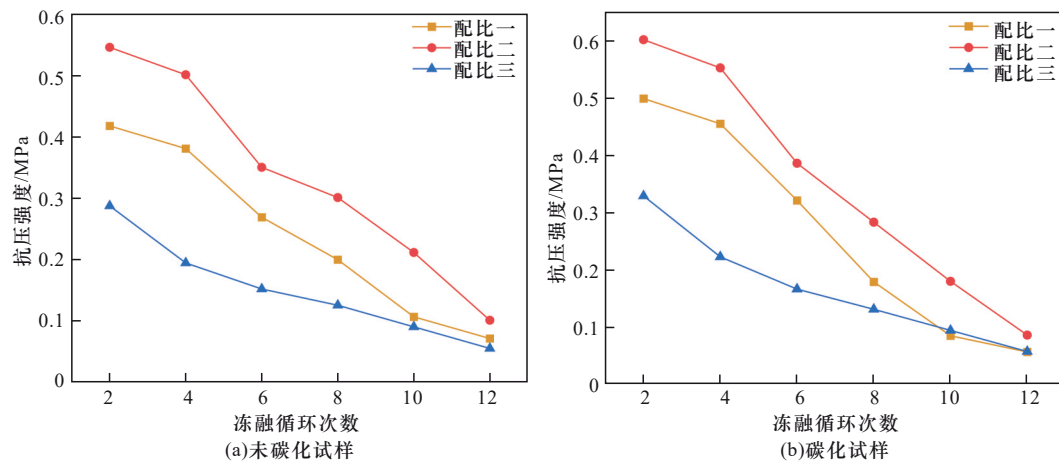


图10 冻融循环作用下未碳化与碳化流态固化土的无侧限抗压强度

Fig. 10 Variations in unconfined compressive strength of specimens during freeze-thaw cycles

次循环后,各配比碳化试样强度均高于未碳化组,说明碳化处理提高了早期结构致密性。随着循环继续进行,碳化组强度同样持续下降,中后期降幅较大,到12次循环后,碳化组与未碳化组残余强度差别已明显缩小^[24,25]。

2.3.2 干湿循环下的 UCS 变化

干湿循环条件下,UCS随循环次数变化呈现先升后降的特点如图11所示。前4次循环内,试样强度逐渐增大,主要原因在于:一方面,试样内部未完全反应的活性组分在湿循环阶段继续发生水化反应和火山灰反应,进一步生成C-S-H、C-A-S-H及M-S-H等胶凝产物;另一方面,干燥阶段促使部分孔隙水蒸发,凝胶产物进一步沉积于孔隙和颗粒接触界面,使内部结构趋于致密。因此,该阶段试样孔隙连通性降低、电阻率上升,并表现出一定的强度增长。随着循环次数进一步增加,干湿交替所引起的损伤逐渐累积并占主导作用。湿循环过程中,水分反复进入孔隙内部,促进可溶性组分迁移与溶

出;干燥阶段则由于失水收缩和毛细张力作用,在颗粒接触界面及胶凝相内部产生收缩应力。当循环次数增加后,内部逐渐形成并扩展微裂缝,孔隙结构由封闭状态向连通状态发展,导致胶结连续性下降。同时,部分凝胶产物在低碱度环境下稳定性减弱,结构逐渐松散。SEM结果中观察到的孔隙粗化和裂缝扩展,以及FTIR中Si-O-T特征峰减弱现象,均验证了该阶段胶凝结构持续劣化。因此,中后期试样强度逐渐下降^[23,26]。

不同配比中,配比二在整个干湿循环过程中仍保持较高强度,配比三最低。碳化组在前期同样具有一定强度优势,但后期衰减更为明显^[24,26]。

2.4 pH值与电阻率变化

2.4.1 pH值变化

pH值能够反映流态固化土孔隙溶液的碱性环境,对分析胶凝相稳定性和环境作用下的化学变化具有参考意义。冻融循环作用下,未碳化组试样的pH值整体呈下降趋势,如图12所示。初始阶段,赤

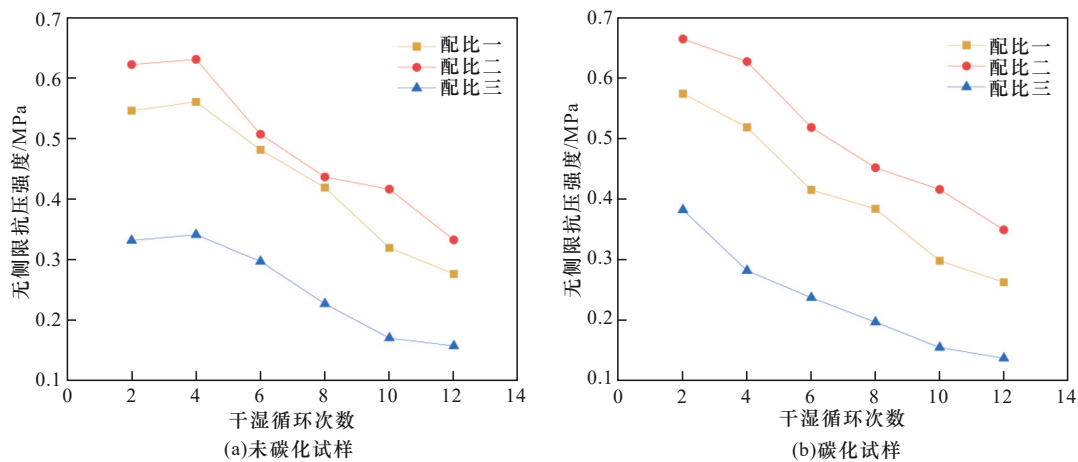


图 11 干湿循环作用下流态固化土无侧限抗压强度

Fig. 11 Variations in unconfined compressive strength of specimens during wet-dry cycles

泥中的可溶性碱金属离子以及电石渣水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 使体系保持较高碱度;随着循环次数增加,孔隙水不断迁移,部分碱性组分逐步溶出并流失,同时 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 持续发生碳酸化反应,因而 pH 值

逐渐降低。不同配比中,配比二下降幅度较小,配比三下降较快,说明适中的组分配比有利于维持较稳定的碱性环境,而高镁渣掺量下孔隙连通性较强,碱性离子更易迁移和流失。

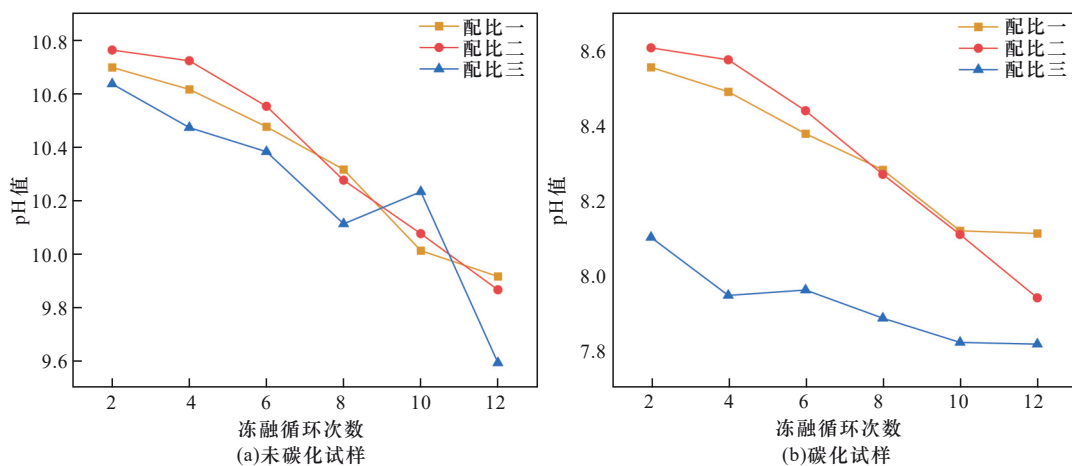


图 12 冻融循环作用下流态固化土的 pH 值变化

Fig. 12 Variations in pH value of flowable solidified soil during freeze-thaw cycles

碳化组的初始 pH 值低于未碳化组,这与碳化阶段 CO_2 消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及部分 OH^- 有关。进入冻融循环后,碳化组 pH 值继续下降,但整体降幅小于未碳化组,这主要是由于碳化阶段已消耗部分 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 及可溶性碱,使后续循环过程中可迁移碱性组分储量减少,因此碳化组 pH 值进一步下降的幅度相对较缓。说明碳化处理虽然降低了初始碱度,但后续碱度衰减相对平缓。

干湿循环条件下, pH 值同样随循环次数增加而降低,如图 13 所示。湿循环阶段,孔隙水进入试样内部,促进可溶性碱性组分溶出;干循环阶段,水分蒸发又使孔隙液重新分配,反复作用后 pH 值持续下降。未碳化组中,配比二变化较缓,配比三下降更快,说明不同配比下内部结构对离子迁移的约束

程度存在差异。碳化组初始 pH 值仍低于未碳化组,后续变化规律与冻融循环条件下基本一致。

从两类环境作用结果看,配比二在冻融和干湿循环中均表现出较好的 pH 保持能力,说明该配比在化学环境稳定性方面更为有利;配比三下降幅度最大,与其宏观损伤较重和强度衰减较快的结果一致^[30,31]。

2.4.2 电阻率变化及其与 UCS 的关系

电阻率能够反映孔隙结构、孔隙液离子浓度以及传输通道的变化。冻融循环作用下,未碳化组试样电阻率随循环次数增加持续降低如图 14 所示。初始阶段,配比二电阻率较高,说明其内部结构较为致密,连通孔较少;配比三电阻率最低,说明其孔隙较粗、导电通道较多。随着冻融循环进行,冰胀

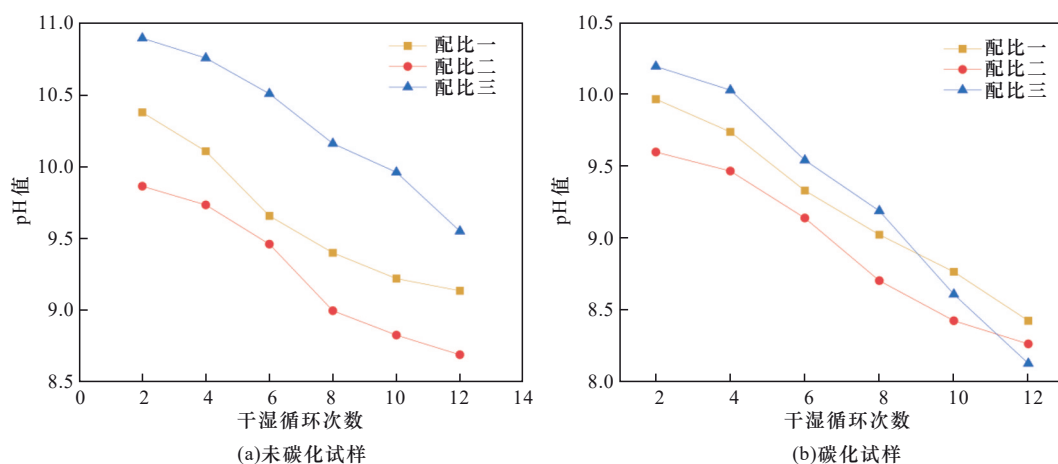


图13 干湿循环作用下流态固化土pH值变化

Fig. 13 Variations in pH value of flowable solidified soil during wet-dry cycles

作用使微裂缝逐渐发展,连通孔比例增加,孔隙液中离子迁移增强,电阻率随之下降。碳化组初始电阻率整体高于未碳化组,表明碳酸盐产物对孔隙具

有一定填充作用;但在高循环次数下,裂缝不断扩展,碳化组与未碳化组之间的差异逐渐缩小。

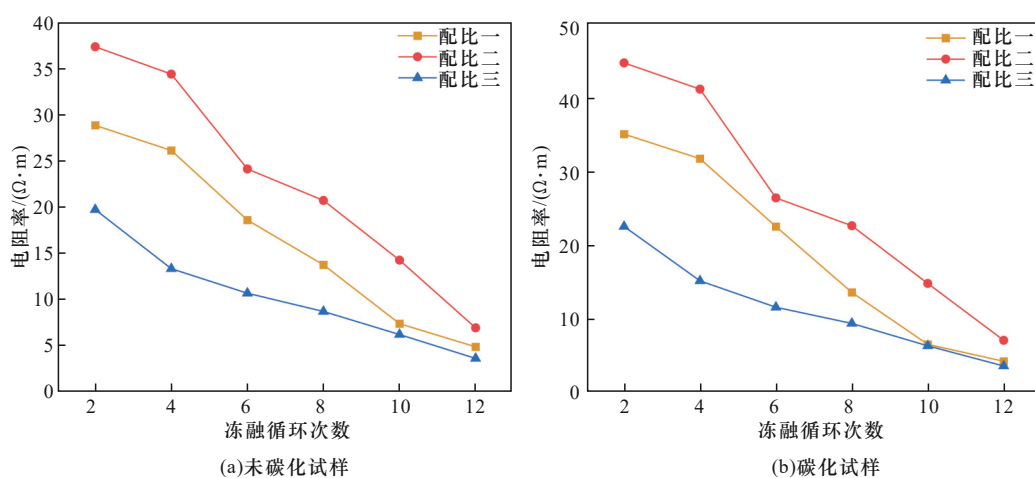


图14 冻融循环作用下流态固化土电阻率变化

Fig. 14 Variations in electrical resistivity of flowable solidified soil during freeze-thaw cycles

干湿循环条件下,电阻率变化呈现出先升高后降低的特征如图15所示。前4次循环内,试样内部

仍存在后续水化和火山灰反应,部分导电离子被进一步固定,且新生成凝胶对孔隙具有填充作用,因

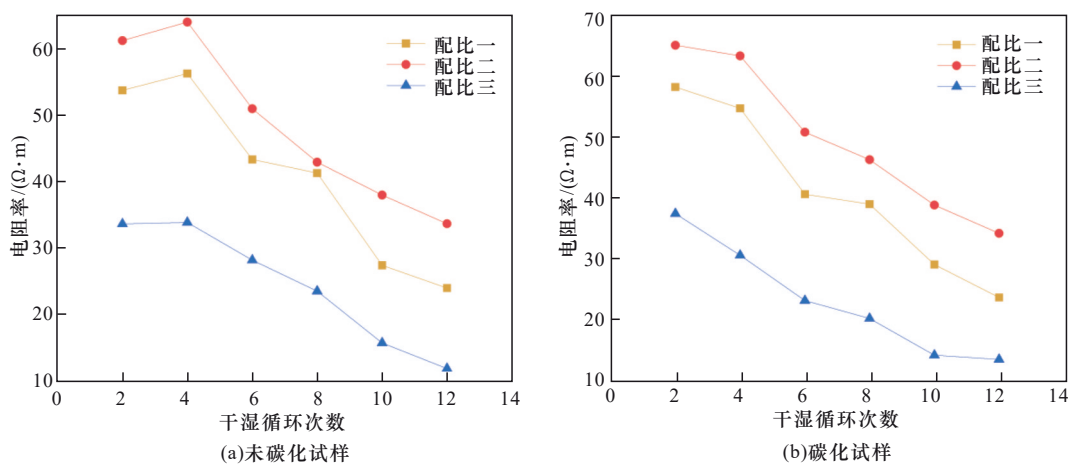


图15 干湿循环作用下流态固化土电阻率变化

Fig. 15 Variations in electrical resistivity of flowable solidified soil during wet-dry cycles

此电阻率有所增大;继续循环后,试样内部逐渐形成并扩展微裂缝,孔隙液通道趋于连通,电阻率开始下降。不同配比中,配比二始终保持较高电阻率,说明其内部结构较为完整。碳化组的变化趋势与未碳化组一致,但其初始电阻率更高,后期随结构损伤累积而逐渐下降。

无论是冻融循环还是干湿循环,电阻率与无侧限抗压强度之间均呈较好的正相关关系如图 16 和图 17。随着孔隙率增大、孔径粗化和裂缝连通程度

增强,材料内部胶结减弱,UCS 下降;与此同时,离子迁移路径增多,电阻率也随之降低。因此,电阻率可作为评价流态固化土内部结构变化和力学退化程度的辅助指标。

综合 pH 值和电阻率结果可见,配比二在两类环境作用下均保持了较高的结构稳定性和较缓的化学环境变化;配比三变化最为明显,说明高镁渣掺量不利于耐久性保持^[32,33]。

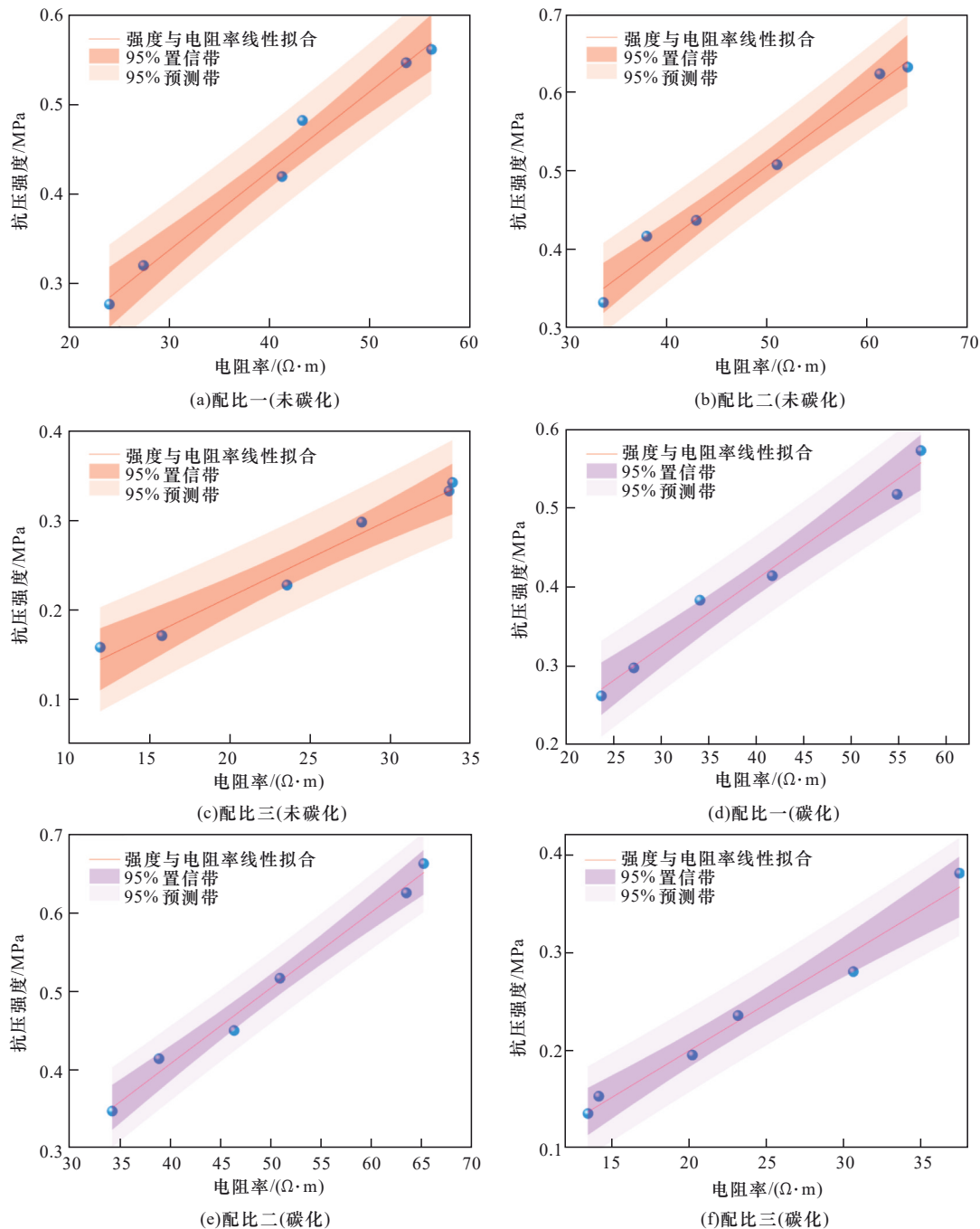


图 16 冻融循环作用下电阻率与无侧限抗压强度关系

Fig. 16 Relationships between electrical resistivity and unconfined compressive strength of specimens during freeze-thaw cycles

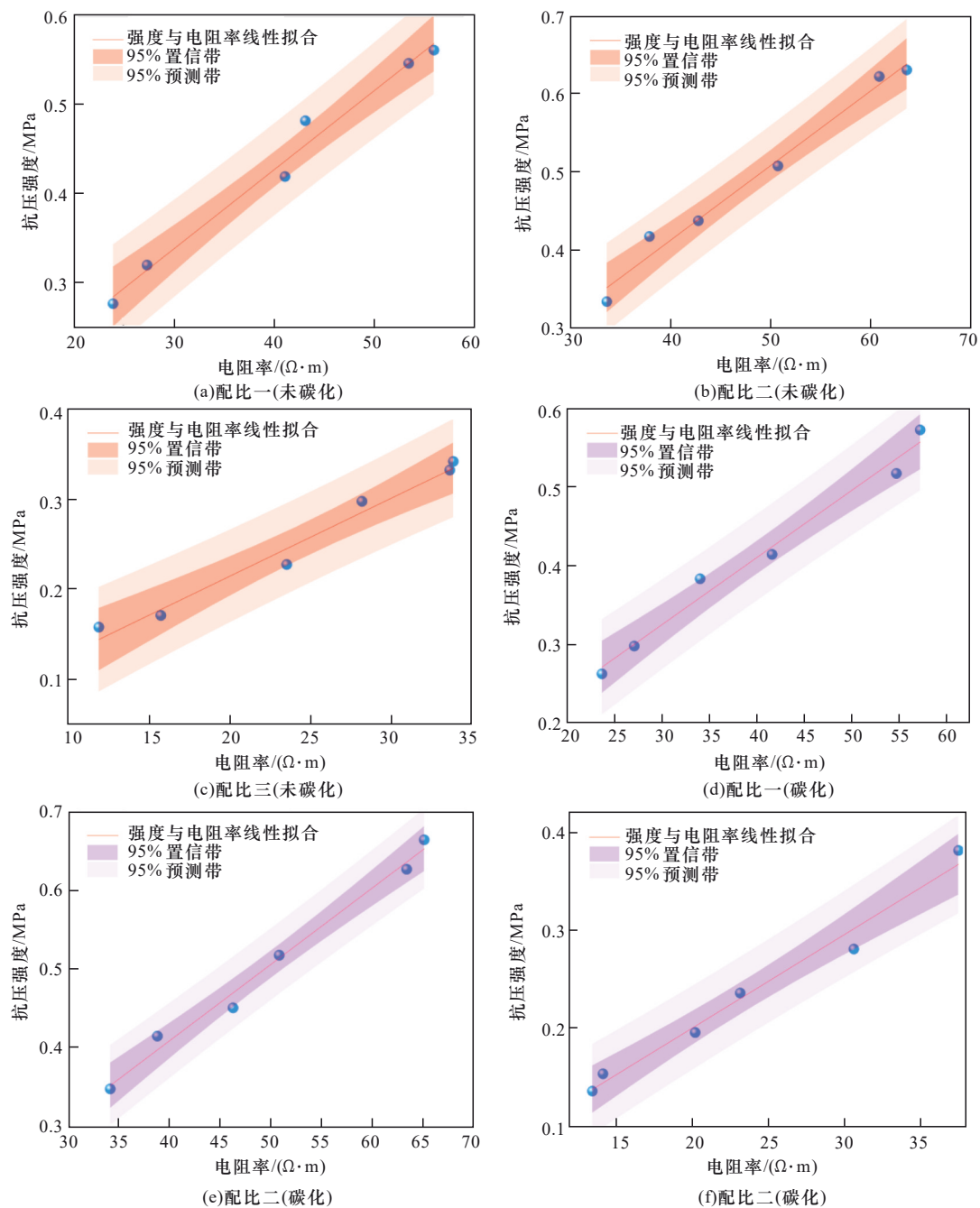


图 17 干湿循环作用下电阻率与无侧限抗压强度关系

Fig. 17 Relationships between electrical resistivity and unconfined compressive strength of specimens during wet-dry cycles

鉴于电阻率测试具有快速、相对无损和便于连续监测的特点,当其与无侧限抗压强度建立稳定相关关系后,可作为流态固化土耐久状态与结构劣化程度的辅助评价指标,为材料服役期质量巡检和早期预警提供参考。

2.5 微观结构变化

2.5.1 SEM 分析

SEM结果表明,冻融循环和干湿循环都会使流态固化土内部结构由较致密状态逐步转为松散状态如图 18 所示。冻融循环条件下,未碳化组配比二

在较低循环次数时仍可观察到较多絮状凝胶产物,颗粒间胶结较为紧密,孔隙较少;随着循环次数增加,凝胶数量逐渐减少,孔隙和微裂缝不断增多,结构连续性下降。碳化组前期结构更为致密,说明碳化产物对孔隙具有一定填充作用;但在较高循环次数下,同样可见裂缝扩展和局部松散现象。

干湿循环下,SEM图像同样表现出由致密向松散发展的趋势,但其损伤更集中地体现为收缩开裂和孔隙粗化如图 19 所示。以配比二为例,在较低循环次数下,试样内部仍保持较连续的凝胶网络;当

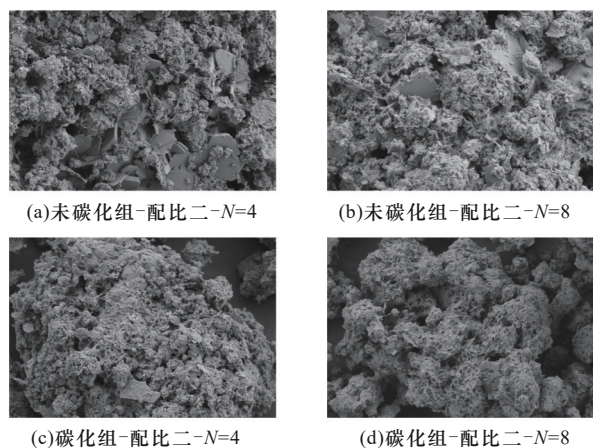


图 18 不同冻融循环次数下流态固化土 SEM 图像

Fig. 18 SEM images of flowable solidified soil with different freeze-thaw cycle numbers

循环次数增加后,C-S-H等凝胶产物明显减少,结构连续性变差,孔隙增多,局部微裂缝逐渐扩展。碳化组前期仍表现出一定致密性,但在后期同样出现胶结破坏和结构松散。说明干湿循环通过水分反复迁移和收缩应力持续作用于孔隙壁和胶结界面,最终导致结构劣化。

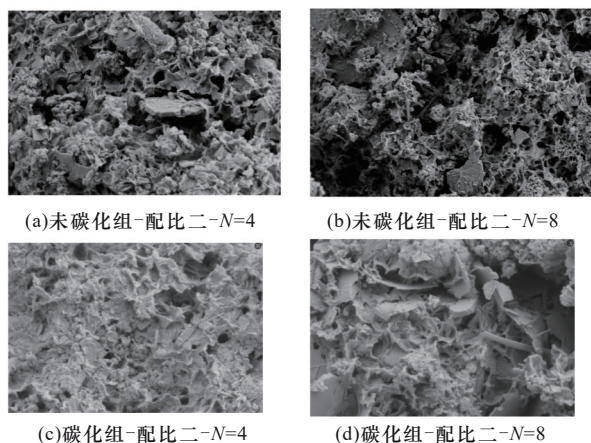


图 19 不同干湿循环次数下流态固化土 SEM 图像

Fig. 19 SEM images of flowable solidified soil with different wet-dry cycle numbers

从两类环境作用下的SEM结果看,碳化处理对初始结构有一定改善作用,但随着循环次数增加,裂缝仍不断发展;适量镁渣有助于形成较稳定的胶结骨架,而掺量过高则更易引起后期结构破坏^[34]。

2.5.2 FTIR 分析

FTIR结果反映了环境循环过程中胶凝相和官能团结构的变化。冻融循环条件下,1 000~900 cm⁻¹区域的Si-O-T特征峰在循环初期略有增强,说明部分未反应活性组分继续参与后续反应,促使C-S-H、C-A-S-H及含镁凝胶生成;随着循环次数增加,该峰逐渐减弱并变宽,说明原有凝胶结构发生调整和

劣化。碳化组在1 400~1 500 cm⁻¹区域出现更明显的碳酸根特征峰,说明碳化产物参与了初始结构形成,但其后期稳定性受环境循环影响较大如图20所示。

干湿循环条件下,FTIR图谱同样呈现前期增强、后期减弱的变化过程如图21。循环初期,Si-O-T特征峰有所增强,说明干湿交替条件下未完全反应的活性组分继续发生反应;随着循环次数增加,特征峰逐渐减弱并变宽,说明胶凝相结构逐步松散,原有硅氧骨架稳定性下降。碳化组中碳酸根相关特征峰更为明显,表明碳化生成的CaCO₃等产物参与了初期结构构建;但在后续低碱度环境中,原有凝胶产物稳定性下降,碳化带来的结构优势逐渐减弱。

FTIR结果与SEM观察结果相一致,这也进一步解释了干湿循环条件下UCS“先增后降”的演化规律,即前期以后续反应致密化为主,后期则以裂缝扩展和胶凝结构退化为主。环境循环初期,后续反应仍可补充部分胶凝产物;当循环继续进行后,裂缝发展和孔隙重构逐渐占主导,凝胶结构持续衰减,宏观上表现为质量损失增加、收缩变形发展和强度下降。

结合冻融循环和干湿循环两类环境作用下的SEM与FTIR结果可以看出,流态固化土的损伤过程都与孔隙扩展、裂缝发展以及胶凝产物变化密切相关。冻融循环主要通过孔隙水相变引起体积扰动和局部应力集中,进而促使裂缝萌生和扩展;干湿循环则主要通过水分迁移、蒸发收缩和毛细应力破坏胶结界面。碳化处理改善了前期致密性,但随着循环次数增加,裂缝持续累积,结构损伤仍不断发展如图22所示。

2.6 工程适用性讨论

从现有试验结果看,该材料在沟槽回填、地下空洞充填及一般非结构性回填场景中具有一定应用潜力。然而,考虑到原料中包含赤泥、电石渣和镁渣等工业副产物,工程推广前仍需进一步核验环境安全性与长期体积稳定性。后续宜针对较优配比试样开展重金属浸出试验,并结合90 d至180 d体积稳定性测试,建立流动性、耐久性与环境安全性相结合的综合评价框架。在上述验证完成前,本文对其工程适用性的讨论应限定于中低强度、非结构承载、常规地下回填等场景,不宜直接外推至强侵蚀、高冻融等级或长期浸水环境。

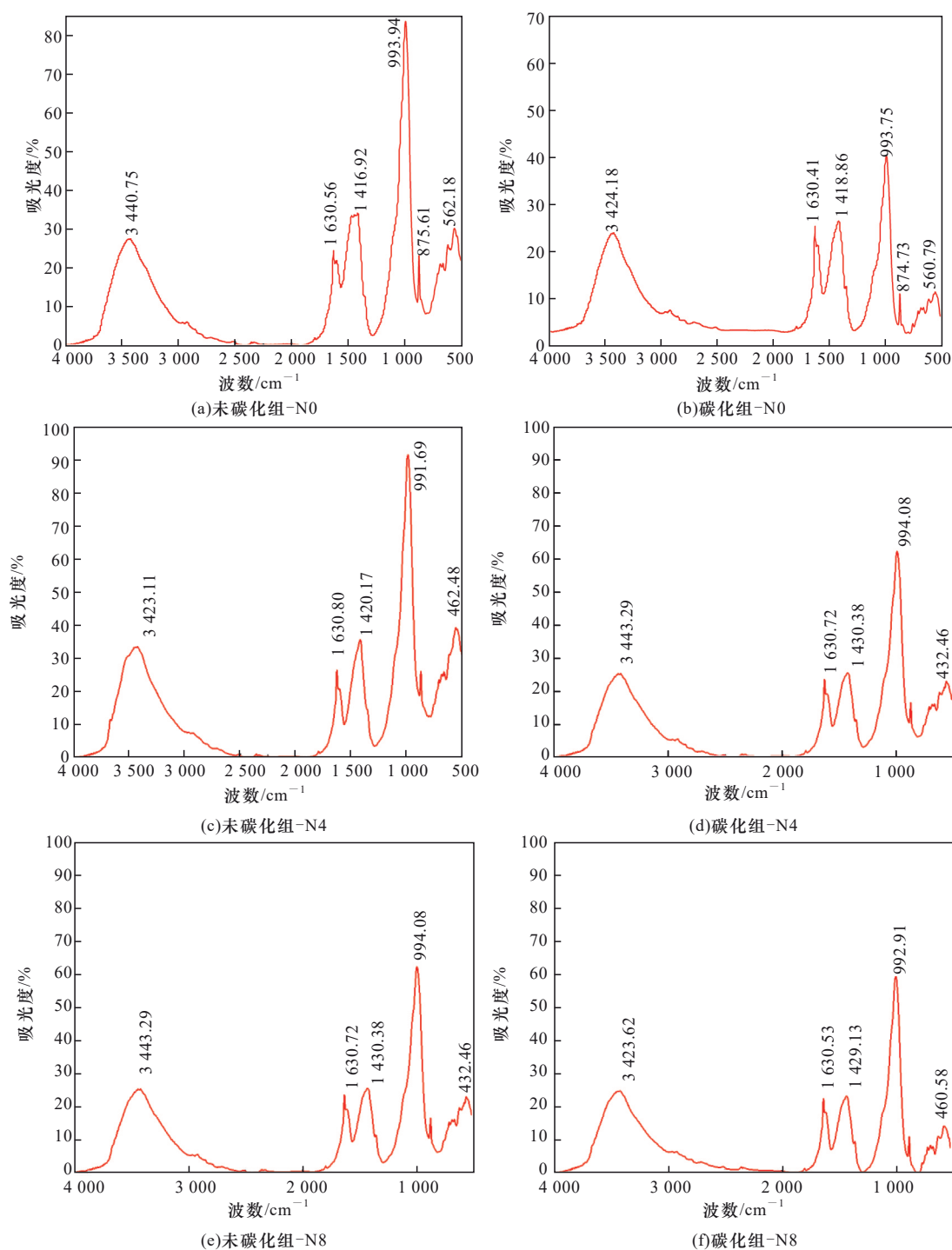


图20 不同冻融循环次数下流态固化土 FTIR 图谱

Fig. 20 FTIR spectra of flowable solidified soil with different freeze-thaw cycle numbers

3 结论

本文的主要工作体现在以下3个方面:构建四元多源固废流态固化土体系,建立冻融循环与干湿循环条件下的碳化对照试验框架,并从电阻率-强度关联角度对材料耐久状态进行综合分析。根据试验结果,可得到以下结论:

1)在本研究循环范围内,冻融循环主要导致边角剥蚀、裂缝扩展和强度持续衰减;干湿循环则以收缩开裂和后期表层破损为主要特征,UCS随循环次数呈先升后降规律。

2)碳化处理改善了试样初始孔结构,使冻融循环早期的质量损失、线收缩和强度衰减得到一定控制;但在干湿循环后期,碳化组的体积变形与表层

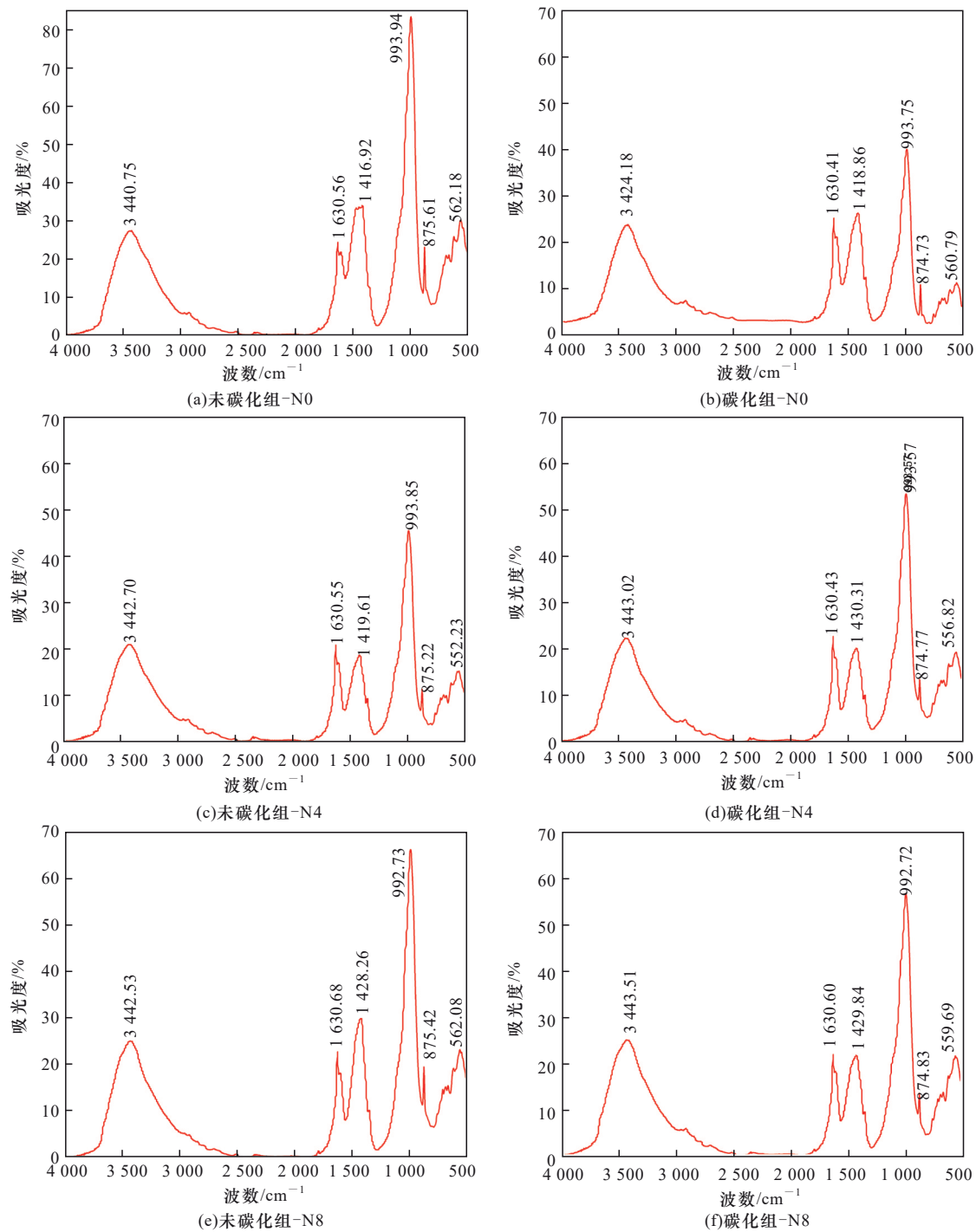


图 21 不同干湿循环次数下流态固化土 FTIR 图谱

Fig. 21 FTIR spectra of flowable solidified soil with different wet-dry cycle numbers

损伤加重,表明碳化致密化作用难以持续抵消降碱与收缩累积带来的不利影响。

3)在本文所考察的镁渣掺量范围内,30%组在两类环境作用下均表现出较好的质量稳定性、体积稳定性与强度保持能力,可视为本体系的较优掺量。

4)pH值、电阻率及微观表征结果共同表明,材料耐久性衰减与碱度降低、孔隙连通增强、凝胶相

减少及裂缝扩展密切相关;其中,电阻率具有快速、无损的测试特点,可作为该类流态固化土耐久状态的辅助评价指标。在满足环境安全与长期体积稳定性要求的前提下,该体系可为沟槽回填、空洞充填等中低强度流态填筑场景提供材料参考。

本研究目前主要针对四元固废体系内部的配比优化及碳化耐久性差异展开分析,尚未设置纯水泥基对照组。因此,关于该体系相对于传统水泥基

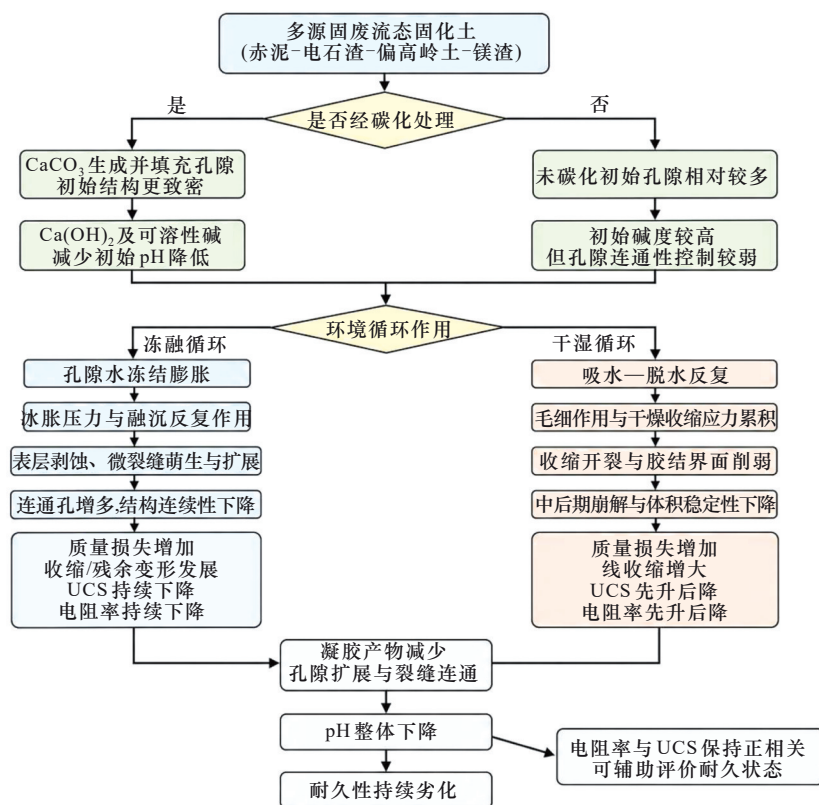


图22 碳化多源固废流态固化土在冻融循环与干湿循环作用下的劣化机理示意图

Fig. 22 Schematic illustration of the deterioration mechanism of carbonated flowable solidified soil prepared from multi-source solid-waste during freeze-thaw and wet-dry cycles

流态填筑材料在性能、成本与碳排放方面的优势, 置等胶凝材料总量和相近流动度条件的纯水泥对照尚不能在本文中作为实证结论给出, 后续将通过设置对照组进行补充验证。

参考文献:

- [1] 冯继军, 张双艺, 马梦媛. 高炉矿渣基流态固化土工程性能分析[J]. 土木工程, 2024, 13(10): 1997-2007.
- [2] 王聪聪, 刘茂青, 宋红旗, 等. 赤泥-钢渣粉-水泥固化流态土性能试验研究[J]. 硅酸盐通报, 2023, 42(7): 2488-2496.
- [3] Ji J, Liang B, Han B Y, et al. Review on soil solidified technologies in road engineering in China[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2023, 23(2): 47-66.
- [4] Parhi S K, Dwibedy S, Panda S, et al. A comprehensive study on controlled low strength material[J]. Journal of Building Engineering, 2023, 76: 107086.
- [5] Wang C, Li Y, Wen P, et al. A comprehensive review on mechanical properties of green controlled low strength materials[J]. Construction and Building Materials, 2023, 363: 129611.
- [6] Lee J, Baek C. Study on controlled low-strength materials using ultra-rapid-hardening cement and stone sludge for backfill and subbase application in road excavation and restoration work[J]. Buildings, 2024, 14(1): 46.
- [7] Xiao R, Nie Q, Dai X, et al. Developing alkali-activated controlled low-strength material (CLSM) using urban waste glass and red mud for sustainable construction[J]. Journal of Building Engineering, 2024, 98: 111202.
- [8] Cui X, Zhang Y, Liu J, et al. Development, performance, and mechanism of fluidized solidified soil using multi-source industrial solid waste cementitious materials[J]. Buildings, 2025, 15(6): 864.
- [9] Ma T, Dong Y, Lin H. Red mud-based all-solid-waste cementitious materials: A review of synthesis, heavy metals immobilization and feasibility application[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(5): 117999.
- [10] Cui W, Dong X, Duan W, et al. Design of all solid waste red mud-based cementitious materials based on the simplex centroid method[J]. Construction and Building Materials, 2024, 418: 135439.
- [11] Segura I P, Ranjbar N, Damo A J, et al. A review: Alkali-activated cement and concrete production technologies available in the industry[J]. Heliyon, 2023, 9(7): e15718.
- [12] Liang C, Li B, Guo M Z, et al. Effects of early-age carbonation curing on the properties of cement-based materials: A review

- [J].Journal of Building Engineering,2024,84:108495.
- [13] Lamaa G,Duarte A P C,Silva R V,et al.Carbonation of alkali-activated materials:A review[J].Materials,2023,16(9):3326.
- [14] Huang M,Bao S,Zhang Y,et al.Durability of alkali-activated cementitious materials at freeze-thaw environment:Damage and protection mechanism[J].Construction and Building Materials,2025,487:142102.
- [15] Liao L,Zhang Z,Wang Y,et al.Impact of steel slag ratio on strength and durability of flowable waste soil for foundation pit backfill[J].Buildings,2025,15(12):2057.
- [16] Sang Y,Wang H,Zhao X,et al.Electrical resistivity of plain cement-based materials based on ionic conductivity:A review of applications and conductive models[J].Journal of Building Engineering,2022,45:103480.
- [17] Piro N S,Mohammed A S,Hamad S M.Electrical resistivity measurement,piezoresistivity behavior and compressive strength of concrete:A comprehensive review[J].Materials Today Communications,2023,36:106573.
- [18] JTG E51—2009 公路工程无机结合料稳定材料试验规程[S].
- [19] GB 5085.3—2007 危险废物鉴别标准腐蚀性鉴别[S].
- [20] 梁飞.CO₂碳化水泥土抗压强度与微观机制研究[J].人民长江,2023,54(9):199-205.
- [21] 刘瑾,车文玥,郝社锋,等.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[J].岩土工程学报,2024,46(5):1119-1126.
- [22] 陈宾,黄旭华,胡杰铭,等.干湿循环作用下水泥-CCCW 改性红层残积土表面裂隙及剪切特性研究[J].工程地质学报,2025,33(5):1942-1955.
- [23] 李向阳,吕琨,杨旭,等.冻融循环下不同材料流态固化土微观结构分析[J].岩土工程技术,2026,40(1):141-150.
- [24] 边汉亮,吕文瑞,吴振宇,等.复合絮凝-碳化固化处理工程废弃泥浆试验研究[J].复合材料学报,2025,43(9):5811-5821.
- [25] Rauf A,Moon S W,Satyanaga A,et al.Assessing durability and stability of calcium sulfoaluminate cement-stabilized soils under cyclic wet-dry conditions[J].Buildings,2025,15(2):228.
- [26] Xiang G,Shao F,Zhang H,et al.Analysis on durability of bentonite slurry-steel slag foam concrete under wet-dry cycles[J].Buildings,2025,15(19):3550.
- [27] Gholampoor M,Dahlin T,Lumetzberger M,et al.Correlation between electrical resistivity and compressive strength of stabilized dredged sediment for early quality control[J].Transportation Engineering,2024,18:100280.
- [28] Ackah F S,Owusu R,Xiao Y,et al.Prediction and optimization of electrical resistivity and unconfined compressive strength of cement-treated subgrade soil using I-optimal response surface methodology[J].Engineering Science and Technology, an International Journal,2024,60:101878.
- [29] Yu L,Fan Q,Meng D,et al.Application and mechanism study on optimal design of cement-based building materials based on polymer binder[J].Buildings,2025,15(17):3192.
- [30] Pan B,Lv Y,Zhang B,et al.Enhancing carbonation resistance of alkali-activated fly ash-slag pastes:Role of albite and dolomite additives[J].Environmental Research,2025,285:122600.
- [31] Tu C,Li Y,Wang C,et al.Evaluation of electrical resistivity of lead-contaminated soils stabilized by electrolytic manganese residue-based binder[J].Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering,2025,17(10):6621-6635.
- [32] Du J,Zhang L,Hu Q,et al.Characterization of controlled low-strength materials from waste expansive soils[J].Construction and Building Materials,2024,411:134690.
- [33] Hateu E B,Hosoda A,Phan T N,et al.Development of excavatable and eco-friendly controlled low-strength material fully utilizing recycled fresh concrete waste and by-products[J].Case Studies in Construction Materials,2026,24:e05791.
- [34] Yin W,Li X,Sun T,et al.Force-electric characteristics of cement-based materials with silica fume and fly ash during uniaxial compression[J].Journal of Materials Research and Technology,2023,24:290-302.

(编辑:万 佳)