DOI：10.16285/j.rsm.2023.0268

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

闵凡路[1, 2, 3]，申 政[1]，李彦澄[1]，袁大军[2]，陈 健[3]，李 凯[1]

（1. 河海大学 土木与交通学院，江苏 南京 210098；2. 北京交通大学 土木建筑工程学院，北京 100091；
3. 中铁十四局集团有限公司，山东 济南 250014）

摘 要：盾构隧道施工产生的废弃土面临堆放、运输及处理等难题，将原材料丰富、生产耗能少、环境友好的 MgO 用于废弃土固化处理是一个值得探索的方法。通过改变 MgO 掺量 a_m、养护龄期 T、碳化时间 H 研究 MgO 固化−碳化淤泥质废弃黏土界限含水率 w、无侧限抗压强度 q_u、弹性模量 E_{50}，结合微观形貌及矿物成分变化规律探讨其固化−碳化机制。结果表明：MgO 固化−碳化具有明显的加固土体效果，加固效果随 a_m、T 呈先上升后趋于稳定的趋势，随 H 呈先上升后下降的趋势；不同 a_m、T 下，碳化 4 h 会使土体塑性指数 I_P 降低 57%以上，土体可塑性显著下降；不同 a_m 和 T 的固化−碳化土 q_u 均在 H 为 4 h 时取得峰值，最高可达 1.4 MPa，比碳化前强度提升了 220%～350%；固化−碳化反应对土体的 E_{50} 提升受 a_m 影响较大，当 a_m 超过 9%时，碳化 4 h 试样的 E_{50} 增幅在 500%左右；MgO 固化−碳化过程中水化产物、碳化产物不断生成和发育，形成网状、花朵聚集状的形貌，填充土颗粒间的孔隙，增强了土颗粒间的胶结作用，土体结构更为密实。该研究为长三角地区土压盾构产生的淤泥质废弃黏土的固化−碳化处理与再利用提供了思路。

关 键 词：废弃土处理；活性氧化镁；加速碳化；微观形貌；矿物成分；碳化机制

中图分类号：TU 452 **文献标识码：**A **文章编号：**1000－7598 (2024) 02－364－11

Solidification and carbonization experimental study on magnesium oxide in shield waste soil and its carbonization mechanism

MIN Fan-lu[1, 2, 3], SHEN Zheng[1], LI Yan-cheng[1], YUAN Da-jun[2], CHEN Jian[3], LI Kai[1]

(1. College of Civil and Transportation Engineering, Hohai University, Nanjing, Jiangsu 210098, China;
2. School of Civil and Architectural Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100091, China;
3. China Railway 14th Bureau Group Co., Ltd., Jinan, Shandong 250014, China)

Abstract: The waste soil generated during shield tunnel construction poses a challenge in terms of stacking, transportation, and treatment. One promising approach is the use of magnesium oxide (MgO) for the solidification treatment of waste soil, as it is abundant in raw materials, has low production energy consumption, and is eco-friendly. The limit moisture content w, unconfined compressive strength q_u and modulus of elasticity E_{50} of MgO solidified and carbonized mucky waste soil were studied by changing the MgO content a_m, curing age T, and carbonization time H. The solidification and carbonization mechanism of MgO-treated mucky waste soil was discussed in combination with the microstructure and the change rule of mineral composition. The results demonstrate that MgO solidification and carbonization have a significant reinforcing effect on the soil. The reinforcement effect initially increases and then stabilizes with increasing a_m and T, while it shows an initial increase followed by a decrease with H. Carbonization for 4 hours reduces the soil plasticity index (I_P) by more than 57% under different a_m and T conditions, leading to a significant reduction in soil plasticity. The q_u of solidified and carbonized soils reaches a peak value at H of 4 hours, with values up to 1.4 MPa, which is 220%–350% higher than the strength before carbonization. The effect of solidification and carbonization reaction on the increase in E_{50} of the soil mass is greatly influenced by a_m. When a_m exceeds 9%, the E_{50} increase of the sample carbonized for 4 hours exceeds 500%. During the process of MgO solidification and carbonization, hydration products and carbonization products are continuously generated and developed. They form a network and flower-like microstructure, filling the pores between soil particles, enhancing

收稿日期：2023-03-04 录用日期：2023-07-08
基金项目：国家自然科学基金（No. 52078189，No. 52378394）；中央高校基本科研业务费专项资金（No. B230201037）。
This work was supported by the National Natural Science Foundation of China (52078189, 52378394) and the Fundamental Research Funds for the Central Universities of China (B230201037).
第一作者简介：闵凡路，男，1985 年生，博士，教授，主要从事盾构隧道及环境岩土方面的研究与教学工作。E-mail: minfanlu@126.com

cementation between soil particles, and densifying the soil structure. The research provides insights into the efficient and eco-friendly treatment and reuse of mucky waste soil produced by earth pressure shield in the Yangtze River Delta.

Keywords: waste soil treatment; active magnesium oxide; accelerated carbonization; microstructure; mineral composition; carbonation mechanism

1　引　言

目前，地铁隧道建设会产生大量的废弃土，面临着无处堆放、运输困难、安全威胁等问题[1]。地铁建设废弃土主要来自盾构区间渣土，按直径 6.4 m 计算，每千米地铁盾构隧道施工至少产生 4.8 万 m^3 渣土，以苏州市为例，未来工程弃土量将保持在每年 1 300 万 m^3 以上[2-3]。而长三角地区城市地铁隧道大多穿越淤泥质黏土等软弱土层，经盾构施工过程改良后的渣土含水率高达 50%～60%，液限高达 45%～55%，强度低、变形大，无法直接利用[4]。因此，如何经济、环保地处理盾构区间废弃渣土已成为工程界关注的问题。

目前，盾构废弃土的处理方式主要有：物理晾晒或烘干，如通过洗砂、筛分、适当添加增黏剂后用作壁后注浆材料[5-8]；高温烧结，如通过烘干、磨粉、筛分、研磨、烧结后制备复合陶粒等材料[9-11]；由于物理烘干对场地和时间要求较高，高温烧结处理方量较低且对废弃土性质要求较高，因此，这两种方法均无法满足大方量处理废弃土的要求。大方量的盾构渣土处理多选择化学固化，一般是经过沉淀、固液分离后，添加化学固化剂固化后用作路基填料等回填材料[12-14]。传统的固化剂主要是水泥、石灰以及粉煤灰和煤矸石等工业废料，保证碱性环境下提供 Ca^{2+}、Si^{2+}，通过水化反应放热、离子交换起到降低土体含水率、填充孔隙、胶结土颗粒，提高土体强度、承载力，改善土体变形特征的作用[15-24]；也有一些高分子材料，如木质素、发泡聚苯乙烯（expandable polystyrene，简称 EPS）颗粒、吸水树脂等，可以通过水解、质子反应、物理吸水等方式起到降低土体含水率、填充土体骨架的作用[25-26]。

但是水泥和石灰等传统固化剂的生产耗能大且排放大量 CO_2，高分子有机材料生产成本高，固化规模小，国内外学者正探索原材料丰富、耗能少、环境友好的新材料或方式。而 MgO 的生产具有原材料丰富、煅烧温度低的优势，生产过程排放 CO_2 量少，且在碳化过程中可以吸收 CO_2，总体碳排放量更低。自 2003 年澳大利亚科学家 Harrison[27]从环保角度出发发明活性 MgO 水泥并强调其可持续性以来，国内外众多学者已经研究了水泥中 MgO 的膨胀机制、水化特性、应用效果等，证实了使用 MgO 水泥的可行性[28-29]。结合加速碳化技术，CO_2 会与土体中的 Mg^{2+}发生碳酸化反应，生成碳酸镁等碳酸化合物，形成网状、花朵聚集状的微观形貌，具有很高的胶结强度，且碳化反应均为固体体积膨胀的反应，起到填充孔隙、加固土体的作用[28-30]。目前 MgO 固化−碳化技术已在软土地基处理、河道淤泥固化等领域开始进行探索应用，并取得了一定的进展[28-31]。

针对盾构隧道废弃土处理面临的难题，在碳达峰、碳中和背景下，使用高活性 MgO 作为固化剂，结合加速碳化技术可以达到较好的处理效果。因此，有必要探索不同 MgO 掺量 a_m、养护龄期 T、碳化时间 H 下 MgO 固化−碳化效果，并从微观形貌和矿物成分变化角度揭示其作用机制。研究可以为盾构废弃土的环保处理及资源化利用提供新思路。

2　试验材料与仪器

2.1　试验材料

试验用淤泥质废弃黏土取自苏州地铁某区间，参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123－2019）[32]测试其基本物理性能指标，干密度为 1.66 g/cm^3，土粒相对密度 G_s 为 2.71，天然孔隙比 e_0 为 0.72，含水率 w_0 为 55.61%，塑限 w_{P0} 为 16.57%，液限 w_{L0} 为 52.34%，塑性指数 I_P 为 35.77。

图 1 是试验用淤泥质废弃黏土级配曲线，可知其黏粒及粉粒含量高达 98%，同时可以计算出其不均匀系数 C_u 为 7.5，曲率系数 C_c 为 1.2，表明该废弃土具有高含水率、高液限、粗骨料缺失、黏粒含量高等特点，工程中无法直接利用。图 2 是其矿物成分组成，主要由石英、伊利石、蒙脱石组成。

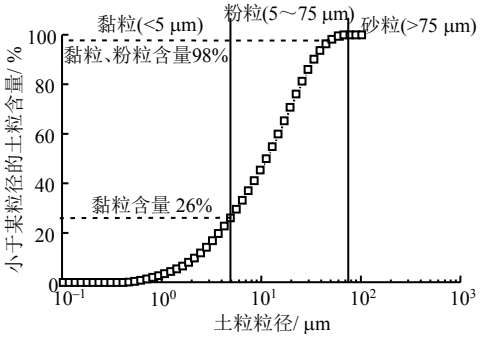


图 1　淤泥质废弃黏土级配曲线

Fig.1　Grading curve of muddy waste soil

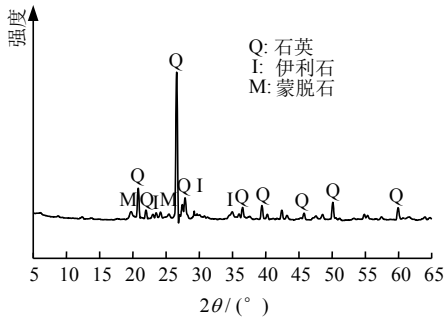


图 2 淤泥质废弃黏土矿物成分组成

Fig.2 Mineral composition of muddy waste soil

试验选用产自辽宁海城的 MgO 作为固化剂，其外观呈淡黄色，极细状粉末。通过 X 射线荧光光谱全元素、半定量检测 MgO 主要化学成分含量见表 1，其中 MgO 含量达 87.44%，IL 为灼烧减量（ignition loss）。根据《轻烧氧化镁化学活性测定方法》（YB/T 4019－2006）[33]，通过柠檬酸中和法测定 MgO 的活性值为 75 s，属于高活性氧化镁。试验选用的 CO_2 气体，由工业法生产，纯度高达 99.5%。

表 1 MgO 主要化学成分含量

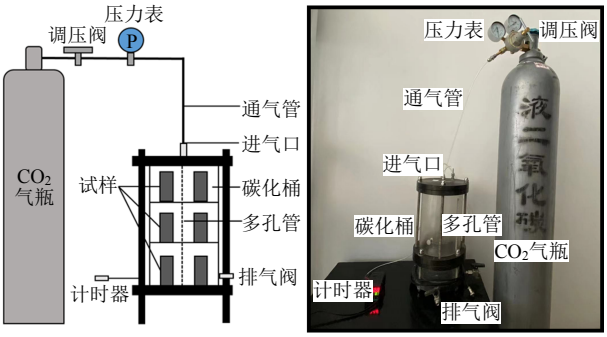
Table 1 Contents of main chemical components of MgO

成分	MgO	SiO_2	IL	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3
含量/%	87.44	4.92	4.32	2.18	0.67	0.47

2.2 试验装置与方法

参考曹菁菁[29]和蔡光华[30]研究所用碳化装置，图 3 是本研究自制碳化养护装置模型图及实物图[30]，其主要由碳化腔、高压气瓶和计时器 3 部分组成，碳化腔为内径 140 mm、高 260 mm 的有机玻璃柱。碳化腔内设有 3 层铁架，每层可放置 5 个试样，同时设有多孔管保证每个试样离 CO_2 气源的距离相同，上部进气口通过塑料软管连通二氧化碳加压气瓶，下部排气阀用于卸压。气瓶内充满 99.5%的高纯液态 CO_2，碳化压力通过调压阀和压力表控制，始终保持在设定压力，可设定压力范围为 0～0.5 MPa，当气压小于设定值时气瓶会自动补气。为了便于对比现有研究结果[29-30]，本文试验中碳化压力设定为 0.2 MPa。计时器在设定好碳化时间后会进行倒计时，碳化时间完成后响铃提醒。

进行碳化试验时，碳化试样参照无侧限抗压强度试样制备方法制备；称重后，包一层吸水薄膜放入碳化腔，拧紧法兰盘螺母；关闭排气阀，打开加压气瓶阀门，检查碳化腔气密性；确保无漏气和异响后，打开排气阀将碳化桶内的空气排尽；关闭排气阀，将调压阀设定为预期的碳化压力，同时在计时器上设定碳化时间，加速碳化试验开始；碳化完成后，测定碳化试样的物理性质指标。



(a) 装置模型图 (b) 实物图

图 3 自制碳化养护装置模型图及实物图

Fig.3 Model drawing and physical drawing of self-made carbonization curing device

2.3 试验方案

实际工程中通常采用界限含水率及无侧限抗压强度作为判定土体性质好坏的参考指标。参照《土工试验方法标准》（GB/T 50123－2019）[32]及《公路土工试验规程》（JTG 3430－2020）[34]，采用分层压样法进行试样制备，然后开展界限含水率、无侧限抗压强度试验、电镜扫描（scanning electron microscope，简称 SEM）试验、矿物成分分析（X-ray diffraction，简称 XRD）试验。参考现有试验结果[29-30]，SEM 试验选择 5 000、10 000、20 000、50 000 放大倍数可以较好地观察到产物微观形貌。XRD 试验的具体参数为：C_u 靶，额定输出功率为 3 kW，步长为 0.02°，扫描范围为 5°～65°，扫描速度为 5(°)/min。

试验设置 7 种不同氧化镁掺量（0%、3%、5%、7%、9%、12%、15%）、5 种养护龄期（1、3、7、14、28 d）、7 种碳化时间（0、1、2、3、4、6、8 h），针对具体试验内容设置不同变量取值，具体试验方案如表 2 所示。试验过程保证变量唯一，同时每组试样设置 3 个平行样，取平均值作为最终结果，以减小试验误差。

表 2 试验方案

Table 2 Test scheme

试验内容	MgO 掺量 a_m/%	养护龄期 T/d	碳化时间 H/h	试验组数
界限含水率	0, 3, 5, 7, 9, 12, 15	7	4	7
无侧限抗压强度	0, 3, 5, 7, 9, 12, 15	1, 3, 7, 14, 28	0, 1, 2, 3, 4, 6, 8	245
弹性模量	0, 3, 5, 7, 9, 12, 15	7, 28	0, 4	28
微观形貌	0, 9, 12	0, 7	0, 2, 4	18
矿物成分	0, 7, 9, 12, 15	0, 7	0, 2, 4, 8	40

3　固化-碳化效果及影响因素研究

为探索 a_m、T、H 3 种条件的改变对 MgO 固化-碳化废弃黏土 w、q_u、E_{50} 的影响规律，根据表 2 所列方案开展试验。结果表明，MgO 掺量和养护龄期的影响类似，二者的增大会导致土体的液限降低、塑限上升、塑性指数降低、q_u 增大、E_{50} 增大；而随着碳化时间的延长，土体可塑性不断下降、q_u 先上升后下降、E_{50} 不断提升。《公路路面基层施工技术细则》（JTG/T F20－2015）[35]中建议采用 7 d 龄期 q_u 作为无机结合料稳定材料施工质量控制的主要指标，且在试验过程中发现，不同 MgO 掺量、养护龄期的试样均在 $H=4$ h 时取得峰值强度。因此，下面分别以 7 d 养护龄期、4 h 碳化时间作为控制变量来讨论 MgO 固化-碳化废弃黏土物理力学性质变化规律。

3.1　MgO 固化碳化废弃黏土界限含水率变化规律

图 4 是 $T=7$ d、$H=4$ h 条件下，固化土的界限含水率和塑性指数随 a_m 的变化曲线。由图可以看出，经过 MgO 固化-碳化后的土体塑限有所提高，且随着 a_m 的增大而不断增大，由初始塑限 $w_{P0}=16.57\%$增长至 $w_P=22.11\%$，表明掺加 MgO 后，土体可塑性下降[36]。

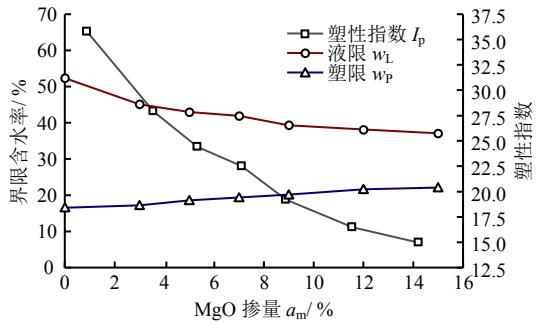


图 4　T=7 d，H=4 h 时土体 w_L、w_P、I_P 随 a_m 变化规律
Fig.4　Variations of w_L, w_P, I_P with a_m under T=7 d, H=4 h condition

塑限的上升表明土体中固态或半固态含水率上限上升，含水率升高对于土体结构影响减小，土体水稳定性上升，土体结构更稳定，土体塑限虽然随 a_m 增加而增加，但始终稳定在 $w_P=20\%$左右，表明土体固态、半固态的含水率上限值随着 a_m 值的变化而达到稳定，即土体的固相性质趋于稳定。

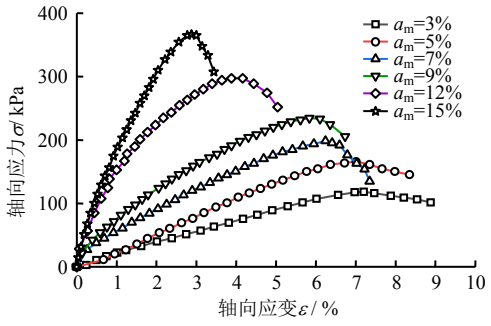
土体液限随着 a_m 的增大明显降低，由初始液限 $w_{L0}=52.34\%$最低降至 $w_L=37.07\%$，且随着 a_m 的增加，液限 w_L 呈下降趋势，曲线始终低于初始液限 w_{L0}。这表明掺入 MgO 会使得土体可塑态上限含水率持续下降，即土体对水分的吸收能力显著降低。

此外，随着 a_m 的增加，土体液限 w_L 持续下降，塑限 w_P 不断上升，塑性指数 I_P 显著下降，由初始的 35.77 不断降低至 14.96，下降了约 58%。这表明土体可塑性不断下降，土体结构更加稳定，利于运输和击实。

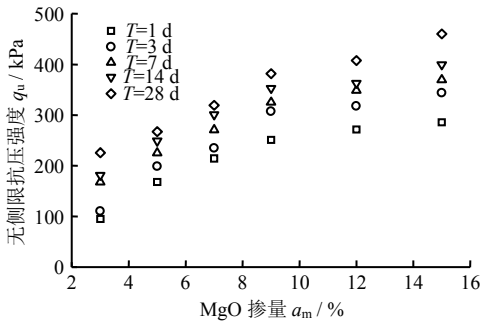
3.2　MgO 固化-碳化废弃黏土无侧限抗压强度变化规律

图 5(a)是在 $T=7$ d 时，不同 a_m 下固化土试样的应力-应变曲线。由图可以看出，MgO 固化土试样的破坏形态主要分为 3 个阶段：①线性阶段，试样受力过程中，应力-应变曲线接近直线，在此阶段，试样内部结构不发生破坏，只发生弹性变形，微裂纹不发生扩展；②非线性强化阶段，试样受力过程中，应力-应变曲线开始呈非线性增长，变形速率越来越大，裂纹逐渐扩张；③应变软化阶段，试样达到极限强度后，所能承受的应力逐渐降低，而应变仍在增加，应力-应变关系呈软化曲线，表明土体内部裂纹急剧扩展，试样发生破坏。

此外，随着 a_m 上升，试样的破坏形态不断变化，自 $a_m=7\%$开始出现应力峰值，应力-应变曲线逐渐由“矮胖型”变为“高瘦型”，破坏形式由延性破坏逐渐转变为脆性破坏，且试样的破坏应变逐渐减小。同时，试样的 q_u 不断增大，当 $a_m=15\%$时，强度达到最大值 366 kPa。



(a) T=7 d 时不同 a_m 下试样的应力-应变曲线



(b) 不同 T、a_m 下试样的 q_u

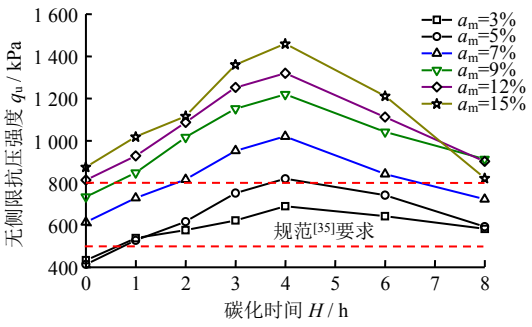
图 5　MgO 固化土应力-应变曲线及 q_u 变化规律
Fig.5　Stress-strain curves and variation of q_u of soil solidified by MgO

图 5(b)是不同 a_m、T 下固化土试样的 q_u 汇总。由图可以看出，同一龄期下，固化土的 q_u 均随着 a_m 的增大呈近似线性增长规律，在 $a_m=15\%$、$T=28$ d 时达到强度最大值 466 kPa；$T=28$ d 时的强度较 $T=7$ d 时明显增长，且随着掺量的不断增大，土体的强度呈加速增长趋势。同时，$q_{u(7\%,28\ d)} \approx q_{u(9\%,7\ d)} \approx q_{u(12\%,3\ d)}$，表明大掺量短期养护效果可达到小掺量长期养护效果。

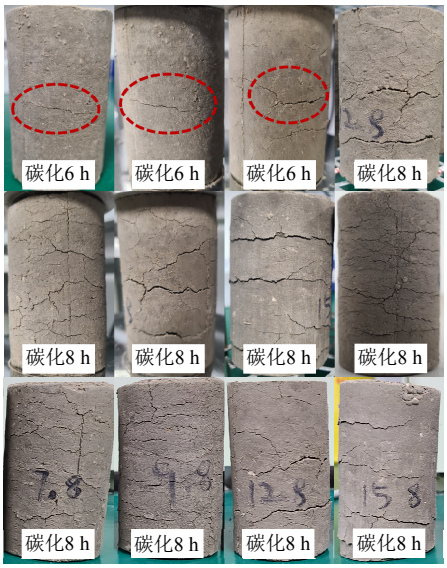
相比之下，只掺加 MgO 的固化效果不如水泥，且固化土的最大 q_u 不能满足《公路路面基层施工技术细则》[35]中规定的二级及以下公路底基层土 7 d 龄期 q_u 标准值 500 kPa，试样的破坏形式虽然开始由延性破坏逐渐向脆性破坏转变，但仍然存在较大的破坏应变，不满足工程使用要求。

图 6(a)是 $T=28$ d 时，不同 a_m、H 下固化-碳化废弃黏土 q_u 的变化规律。由图可以看出，同一掺量下，随着 H 的增长，试样的 q_u 先增长后下降，各掺量下固化-碳化土均在 $H=4$ h 时达到峰值强度。

图 6(b)是 H 超过 4 h 后，试样表面出现不同程度的开裂现象，导致强度有所下降，这是因为碳化是放热反应，试样表面水分蒸发程度较高，土体过于干燥导致皲裂，表面出现裂缝；且碳化产物在局部快速积累，阻碍了 CO_2 向试样内部扩散，长时间的碳化导致碳酸镁盐层胀裂，甚至消耗已有的碳化产物，导致强度下降，说明碳化时间并不是越长越好。这一结论可以进一步通过 XRD 微观试验解释。



(a) T=28 d 时不同 H 下试样的 q_u 变化曲线



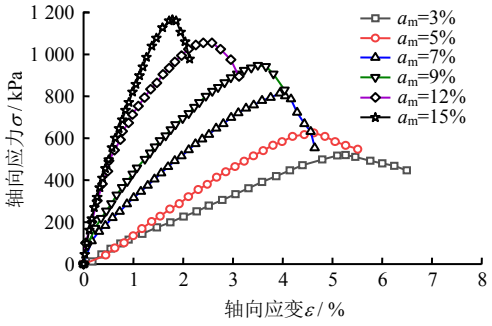
(b) T=28 d，H=6、8 h 试样表面开裂现象

图6 T=28 d不同H下MgO固化-碳化废弃黏土q_u变化规律

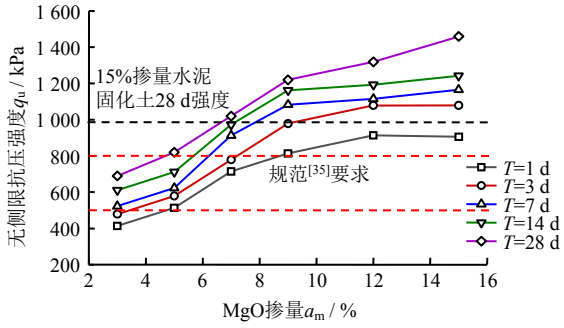
Fig.6 Variation of q_u of MgO solidified-carbonized waste soil under different H when T=28 d

需要说明的是，本研究中土体强度下降是以无侧限试样来评判的，所以试样的强度下降并不意味着土体本身强度下降，实际上随着碳化时间的增长，土体本身性质、强度都会越来越好，这类淤泥质黏土也会更趋向于粉土化或砂化。因此，碳化反应对于土体本身的性质影响规律还应进一步探讨[37]。

图 7(a)为在 $T=7$ d、$H=4$ h 时，不同 a_m 下固化-碳化土试样的应力-应变曲线。由图可以看出，随着 a_m 上升，试样的破坏强度大幅提升，脆性更加明显，除 a_m 为 3%和 5%之外，其余试样的应力-应变曲线均表现为“高瘦型”，破坏应变均小于 4%。



(a) T=7 d，H=4 h 时不同 a_m 下试样的应力-应变曲线



(b) H=4 h 时不同 T、a_m 下试样的 q_u 变化规律

图 7 MgO 固化-碳化土应力-应变曲线及 q_u 变化规律

Fig.7 Stress-strain curves and variation of q_u of MgO solidified-carbonized soil

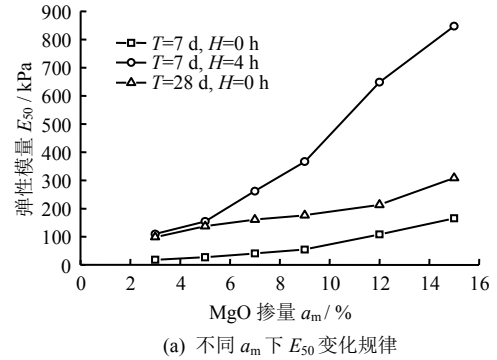
图 7(b)为 $H=4$ h 时不同 a_m、T 下固化-碳化土试样的 q_u 汇总。由图可以看出，同一龄期下，固化-碳化土的 q_u 有大幅提升，增幅在 220%～350%，但随着 a_m 的增大不再呈线性增长规律，而是增长速度不断加快。此外，$H=4$ h 时，$a_m=3\%$、5%试样的

q_u 已经满足《公路路面基层施工技术细则》[35]中规定的二级及以下公路底基层土 7 d 龄期 q_u 标准值 500 kPa 的要求，a_m > 5%试样的 q_u 已经满足高速公路及一级公路基层土 7 d 龄期 q_u 标准值 800 kPa 的要求，且试样的破坏应变均满足工程要求。固化-碳化土 q_u 最高可达 1.4 MPa，是同掺量水泥固化土 28 d 强度的 1.2 倍。

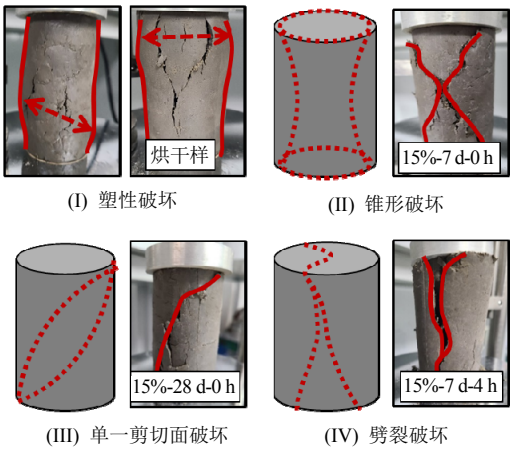
3.3　MgO 固化-碳化废弃黏土弹性模量变化规律

图 8(a)是在不同 T、H 条件下，固化-碳化土的 E_{50} 随 a_m 的变化规律。由图可以看出，随着 a_m 增大，试样的 E_{50} 不断增大，抵抗变形的能力不断增强；仅将养护龄期由 7 d 增大至 28 d，试样的 E_{50} 变化曲线呈现整体增大的规律，但 E_{50} 最大为 308 kPa，说明仅延长养护龄期对土体抵抗变形能力的提升有限。仅将碳化时间由 0 h 增大至 4 h，试样的 E_{50} 在低掺量时增速较缓，当掺量超过 7%之后，试样的 E_{50} 出现急剧增大的现象，整体增幅达 300%以上，尤其在 a_m = 12%、15%时，试样的 E_{50} 增幅在 500%左右。

选择原状土烘干至含水率为 25%、15%-7 d-0 h（表示 a_m=15%，T=7 d，H=0 h，下同）、15%-28 d-0 h、15%-7 d-4 h 4 个试样的破坏模式进行对比。图 8(b)是试样破坏模式的变化情况，从图中可以看出，仅将原状土烘干至含水率为 25%时制成的试样，破坏时仍然出现较大的变形，呈现明显的塑性破坏，说明降低含水率可以提高土体的可塑性，但土体的抵抗变形能力远远达不到工程要求；15%-7 d-0 h、15%-28 d-0 h、15%-7 d-4 h 3 个试样对应的 E_{50} 分别为 165、308、847 kPa，而破坏模式也呈现由锥形破坏逐渐转变为单一剪切面破坏，最终出现劈裂破坏的变化规律[38-39]。



(a) 不同 a_m 下 E_{50} 变化规律



(b) 试样破坏特征变化

图 8　MgO 固化-碳化土变形特性变化规律

Fig.8　Deformation of MgO solidified-carbonized soil

4　MgO 固化-碳化土微观机制分析

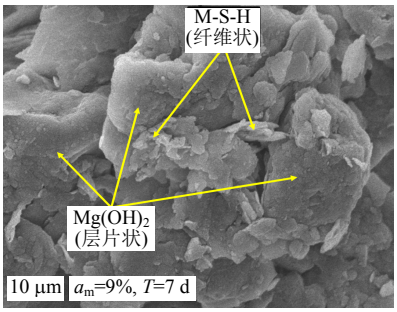
4.1　MgO 固化-碳化废弃黏土微观形貌变化规律

为进一步解释不同 a_m、H 下固化-碳化对废弃黏土物理力学性质改善的微观机制，结合 MgO 固化-碳化试验结果，选取 T=7 d 下废弃黏土、9%-7 d-0 h、9%-7 d-2 h、12%-7 d-2 h、9%-7 d-4 h 5 组试样，观察其微观形貌变化，土体在碳化前呈现稀疏多孔的黏土基质结构，MgO 掺入后发生水化反应，生成层片状的 $Mg(OH)_2$ 晶片，层片状的晶片不断堆叠形成晶体，体积不断增大，填充颗粒间的孔隙，如图 9(a)所示。

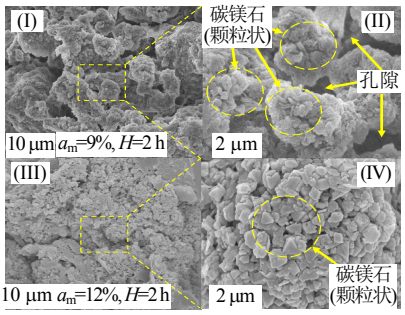
从图 9(b)中Ⅰ和Ⅱ可以看出，H = 2 h 的加速碳化反应使得水化反应生产的 $Mg(OH)_2$ 在高浓度 CO_2 条件下迅速反应，生成颗粒状的碳镁石（$MgCO_3$）晶体，通过填充孔隙、包裹胶结等方式将土颗粒聚集起来。从图 9(b)中Ⅲ和Ⅳ可以看出，提高 a_m，同样经过 2 h 加速碳化反应，颗粒状的碳镁石（$MgCO_3$）晶体覆盖土颗粒表面，颗粒之间的孔隙数量明显减少，土体结构变得更为致密，表明碳化产物主要来自水化产物 $Mg(OH)_2$，提高 a_m 有利于碳化反应进行。随着 a_m 的增大，土体内 MgO 及其水化产物的含量，碳化反应原料就越多，碳化程度越高，土体的结构变化越明显，这也就解释了为什么在碳化作用下土体强度随 a_m 的增大不再呈线性增长而是增速越来越快。

从图 9(c)中可以看出，随着加速碳化时间的增长，碳化产物变得更为复杂，除颗粒状的碳镁石（$MgCO_3$）晶体外，还出现了棱柱状、针棒状的三水碳镁石（$MgCO_3 \cdot 3H_2O$）、纤水菱镁石（$Mg_2CO_3(OH)_2 \cdot 3H_2O$）、薄片聚集成花朵状的球碳镁石（$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 5H_2O$）和水碳镁石（$Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O$）。这些碳化产物会吸收大量水分，形成胶结能力强的网状结构，大大填充颗粒间的孔隙，使得土体骨架更密实、土体结构更为牢固，以此提高土的力学强度，改善土的变形特性。这也就从微观结

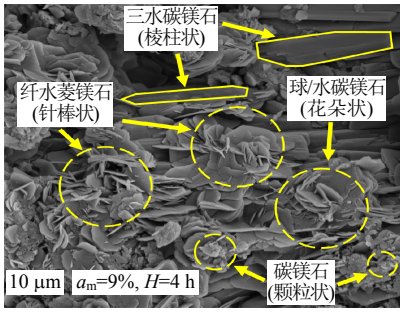
构的角度解释了为什么土体在 MgO 固化−碳化作用下可塑性降低，土性趋向于粉土化或砂化，土体无侧限抗压强度和弹性模量大幅提高，抵抗变形能力显著增强，脆性明显。



(a) 氧化镁固化水化产物微观形貌



(b) 碳化 2 h 碳镁石颗粒填充包裹土颗粒



(c) 碳化 4 h 各碳化产物形成网状微观形貌

图 9 MgO 固化−碳化土微观形貌变化图

Fig.9 Microstructure of MgO solidified-carbonized soil

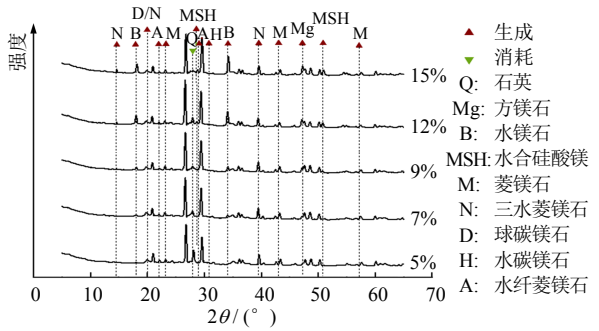
4.2 MgO 固化−碳化废弃黏土矿物成分变化规律

为研究 a_m 对固化−碳化效果的影响，图 10(a)是以 $H=2$ h 为例，不同 a_m 试样的 XRD 图谱。从图中可以看出，在 0.2 MPa 的碳化压力下碳化 2 h，不同 a_m 下土体内的 $Mg(OH)_2$ 均参与了加速碳化反应，生成了新的矿物结晶，改变了土体的结构。

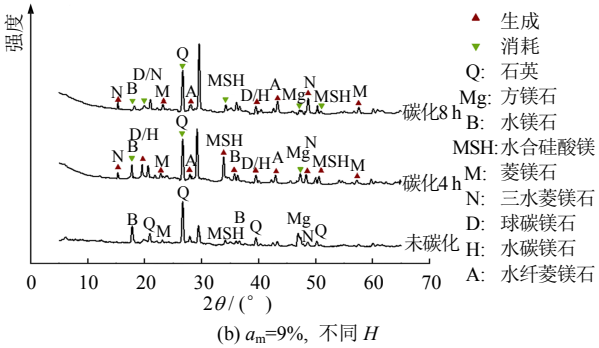
当 $a_m=9\%$时，土体内代表 MgO 的特征峰基本无法检测到，且代表 $Mg(OH)_2$ 的特征峰也并不明显，这表明土体内的 MgO 已经发生了充分的水化反应，生成的水化产物 $Mg(OH)_2$ 被加速碳化反应消耗生成碳化产物；而当 $a_m\geqslant 12\%$时，土体内 MgO 特征峰逐渐凸显，且 $Mg(OH)_2$ 的特征峰也明显增长，这表明 9%以上的掺量由水化反应生成的 $Mg(OH)_2$ 已达到饱和状态，$Mg(OH)_2$ 以晶体形态析出，且 2 h 内并未被完全碳化。

此外，随着 a_m 的不断增大，土体内的 SiO_2 峰值强度明显降低，在碳化 2 h 后的 9%和 12%改性土内还检测到水合硅酸镁（$MgSiO_3\cdot nH_2O$，简称 M-S-H）的特征峰。结合未碳化试样的 XRD 图谱可知，M-S-H 特征峰是在加速碳化反应后逐渐形成的，这表明一定程度的加速碳化反应不仅能够加速碳化产物生成，同时还能够促进 M-S-H 凝胶的成核结晶[40-42]，为土体强度增长持续做出贡献，当孔隙填满后，多余的结晶态产物会起到骨架作用，进一步维持提高土体抵抗变形的能力。这也就从矿物成分变化的角度解释了为什么土体在 MgO 固化−碳化作用下可塑性降低，土体性质趋向于粉土化或砂化，土体无侧限抗压强度和弹性模量显著增强。

为研究碳化时间对固化−碳化效果的影响，图 10(b)是以 $a_m=9\%$为例，不同碳化时间试样的 XRD 图谱。由图可知，在 $a_m=9\%$时，随着 H 的延长，土体内的矿物成分发生了明显的变化。碳化 2 h 后，土体内 M-S-H、各碳化产物的特征峰出现了明显的增长，MgO 和 SiO_2 的特征峰下降，表明土体内不仅发生了过程复杂的碳化反应，生成了多种碳化产物，还可以促进以 MgO 为原料的水化反应和以游离 SiO_2 为原料的火山灰反应，促进土体内凝胶态水化产物 M-S-H 和结晶态水化产物 $Mg(OH)_2$ 的生成，作为原料进一步促进碳化反应。



(a) H=2 h, 不同 a_m



(b) a_m=9%, 不同 H

图 10 MgO 固化−碳化土 XRD 图谱

Fig.10 XRD spectra of MgO solidified-carbonized soil

根据微观试验结果，固化−碳化化学反应过程主要是 MgO 掺入土体后会立即与土中的水发生水化反应生成 $Mg(OH)_2$，以 Mg^{2+}和 OH^-的形式存在（见式（1）），$Mg(OH)_2$ 作为主要的碳化反应原材料，其直接碳化产物主要是 $MgCO_3$、$MgCO_3 \cdot 3H_2O$（见式（2）、（3））。

$$Mg(OH)_2+CO_2 \longrightarrow MgCO_3+H_2O \quad (1)$$

$$MgO+H_2O \longrightarrow Mg(OH)_2 \longrightarrow Mg^{2+}CC \longrightarrow 3OH^- \quad (2)$$

$$Mg(OH)_2+CO_2+2H_2O \longrightarrow MgCO_3 \cdot 3H_2O \quad (3)$$

由于碳化是放热反应，随着碳化时间的延长，温度不断上升，而三水菱镁石、水纤菱镁石作为碳化反应的中间产物，稳定性较差，在 50 ℃温度以上会逐渐转化为水碳镁石，最终转化为球碳镁石，这一反应同时伴有 CO_2 和 H_2O 生成（见式（4））。

$$5MgCO_3 \cdot 3H_2O \longrightarrow Mg_5(CO_3)_4(OH)_2 \cdot 4H_2O+CO_2+10H_2O \quad (4)$$

同时，土体内 $Mg(OH)_2$、MgO 和 M-S-H 的特征峰明显下降，这表明长时间的碳化作用不仅会不断消耗土体内的 $Mg(OH)_2$ 和 MgO，还会消耗土体内的 M-S-H，破坏土体的凝胶结构，这也从矿物成分变化的角度解释了图 6 中出现的长时间碳化会削弱土体强度。

5　结论与展望

在本研究试验条件与设定变量取值下，MgO 固化−碳化处理可以有效改善盾构淤泥质废弃黏土的物理力学性质，使其界限含水率、塑性指数、无侧限抗压强度均能满足公路路基规范建议值，具体结论如下：

（1）MgO 固化−碳化对盾构淤泥质废弃黏土物理力学性质的改善效果与 MgO 掺量 a_m、养护龄期 T 呈先上升后稳定趋势，随 H 呈先上升后下降的趋势，本研究试验条件下在 $H=4$ h 时效果最佳。

（2）随着 MgO 掺量 a_m 的增大，土体塑限涨幅最大为 33.43%，液限降幅最大为 29.17%，I_P 降低了约 58%，土体可塑性显著下降；MgO 固化−碳化土无侧限抗压强度 q_u 最高可达 1.4 MPa，比碳化前强度增加了 220%～350%；7 d 养护龄期试样的弹性模量 E_{50} 增幅在 300%～500%。

（3）固化−碳化过程中，MgO 参与水化反应，生产有一定胶结作用的胶凝态水化产物，而水化产物充分发育有利于碳化反应进行，碳化产物以多种形态附着、包裹土颗粒，形成胶结能力极强的网状结构，填充土体孔隙，使土体骨架更为密实。

（4）长时间的碳化会破坏土体的凝胶结构，消耗热稳定性较差的碳化产物，宏观结果表现为导致试样的无侧限抗压强度出现不同程度的下降。

而碳化作用对土体本身的加固作用，还需要进一步通过更多样的指标和方法进行验证。同时，本研究尚处于室内试验阶段，以探索不同影响因素对氧化镁固化−碳化效果的影响规律以及最佳碳化条件为主，还需要进一步考虑工程实际应用情况。

参 考 文 献

[1] 《中国公路学报》编辑部. 中国交通隧道工程学术研究综述·2022[J]. 中国公路学报, 2022, 35(4): 1-40.
Editorial Department of China Journal of Highway and Transport. Review on China's traffic tunnel engineering research: 2022[J] **China Journal of Highway and Transport**, 2022, 35(4): 1-40.

[2] 中国城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2021 年度统计和分析报告[EB/OL]. (2022-04-22)[2023-03-02]. https://www.camet.org.cn/tjxx.
China Urban Rail Transit Association. 2021 Annual statistics and analysis report of urban rail transit[EB/OL]. (2022-04-22)[2023-03-02]. https://www.camet.org.cn/tjxx.

[3] 陈湘生, 徐志豪, 包小华, 等. 中国隧道建设面临的若干挑战与技术突破[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 1-14.
CHEN Xiang-sheng, XU Zhi-hao, BAO Xiao-hua, et al. Challenges and technological breakthroughs in tunnel construction in China[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(12): 1-14.

[4] 郭陕云. 我国隧道及地下工程的历史机遇、发展困局及若干建议[J]. 隧道建设(中英文), 2019, 39(10): 1545-1552.
GUO Shan-yun. Historic opportunity, development predicament and some suggestions for tunnel and underground works in China[J]. **Tunnel Construction**, 2019, 39(10): 1545-1552.

[5] 叶飞, 王斌, 韩鑫, 等. 盾构隧道壁后注浆试验与浆液扩散机理研究进展[J]. 中国公路学报, 2020, 33(12): 92-104.
YE Fei, WANG Bin, HAN Xin, et al. Review of shield tunnel backfill grouting tests and its diffusion mechanism[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2020, 33(12): 92-104.

[6] MIN F L, ZHU W, CHENG L, et al. Opening the excavation chamber of the large-diameter size slurry

shield: a case study in Nanjing Yangtze River tunnel in China[J]. **Tunnelling and Underground Space Technology**, 2015, 46(2): 18-27.

[7] 姜腾, 姚占虎, 闵凡路. 废弃黏土在泥水盾构泥浆配制中的再利用研究[J]. 隧道建设, 2014, 34(12): 1148-1152.
JIANG Teng, YAO Zhan-hu, MIN Fan-lu. Study on cyclic use of waste clay in preparing slurry for slurry shield boring[J]. **Tunnel Construction**, 2014, 34(12): 1148-1152.

[8] 张宁, 朱伟, 闵凡路. 南京纬三路过江通道泥水盾构泥浆配制试验研究[J]. 隧道建设, 2015, 35(10): 1022-1027.
ZHANG Ning, ZHU Wei, MIN Fan-lu. Experimental study on preparation of slurry for slurry shields: case study on Weisanlu Yangtze River tunnel in Nanjing[J]. **Tunnel Construction**, 2015, 35(10): 1022-1027.

[9] 姜军, 尹宝党. 盾构渣土制作新型墙材研究探析[J]. 砖瓦, 2019(3): 45-48.
JIANG Jun, YIN Bao-dang. Research on development of new wall materials by shield muck[J]. **Brick Tile**, 2019(3): 45-48.

[10] 张磊, 张鸿飞, 荣辉, 等. 700～900 密度等级渣土陶粒的研制及其性能[J]. 建筑材料学报, 2018, 21(5): 803-810.
ZHANG Lei, ZHANG Hong-fei, RONG Hui, et al. Fabrication and performance of 700-900 density grade muck ceramsite[J]. **Journal of Building Materials**, 2018, 21(5): 803-810.

[11] 高瑞晓, 荣辉, 王海良, 等. 800 密度等级的渣土陶粒制备及性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(5): 1646-1650.
GAO Rui-xiao, RONG Hui, WANG Hai-liang, et al. Preparation and performance of 800 density grades muck-ceramsite[J]. **Bulletin of the Chinese Ceramic Society**, 2017, 36(5): 1646-1650.

[12] 詹良通, 郭淇萌, 吴林波, 等. 城市工程渣土消纳处置及资源化利用途径探讨——以温州市为例[J]. 环境卫生工程, 2021, 29(2): 1-9.
ZHAN Liang-tong, GUO Qi-meng, WU Lin-bo, et al. Discussion on the approaches of disposal and resource utilization of the waste soils from urban construction: a case study of Wenzhou[J]. **Environmental Sanitation Engineering**, 2021, 29(2): 1-9.

[13] 石振明, 薛丹璇, 彭铭, 等. 泥水盾构隧道废弃泥浆改性固化及强度特性试验[J]. 工程地质学报, 2018, 26(1): 103-111.
SHI Zhen-ming, XUE Dan-xuan, PENG Ming, et al. Experiment on modified-curing and strength properties of waste mud from slurry shield tunnel[J]. **Journal of Engineering Geology**, 2018, 26(1): 103-111.

[14] 朱瑜星, 卞怡, 闵凡路, 等. 地铁盾构渣土改良为流动化土进行应用试验研究[J]. 土木工程学报, 2020, 53(增刊 1): 245-251.
ZHU Yu-xing, BIAN Yi, MIN Fan-lu, et al. Improvement of metro shield muck to controlled low strength material[J]. **China Civil Engineering Journal**, 2020, 53(Suppl.1): 245-251.

[15] MOHAMMED A, VIPULANANDAN C. Testing and modeling the short-term behavior of lime and fly ash treated sulfate contaminated CL soil[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2015, 33(4):1099-1114.

[16] ZHANG F, PEI X, YAN X. Physicochemical and mechanical properties of lime-treated loess[J]. **Geotechnical & Geological Engineering**, 2018, 36(1): 685-696.

[17] 于爱民. 路用石灰土强度机制研究[D]. 长春: 吉林建筑大学, 2018.
YU Ai-min. Study on the strength mechanism of lime soil for road use[D]. Changchun: Jilin Jianzhu University, 2018.

[18] 胡再强, 梁志超, 郭婧, 等. 非饱和石灰改良黄土的渗水系数预测[J]. 岩土工程学报, 2020, 42(增刊 2): 26-31.
HU Zai-qiang, LIANG Zhi-chao, GUO Jing, et al. Prediction of permeability coefficient of unsaturated lime-improved loess[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2020, 42(Suppl.2): 26-31.

[19] 牛晨亮, 黄新, 李战国, 等. 利用工业废渣固化软土的试验研究[J]. 环境工程学报, 2009, 3(10): 1871-1874.
NIU Chen-liang, HUANG Xin, LI Zhan-guo, et al. Experimental research on utilization of industrial wastes to stabilize soft soil[J]. **Chinese Journal of Environmental engineering**, 2009, 3(10): 1871-1874.

[20] 秦玲. 水泥基材料早期碳化反应动力学和长期性能研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2021.
QIN Ling. Carbonation kinetics and long term performance investigation of early carbonated cement-based materials[D]. Harbin: Harbin University of Technology, 2021.

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

HUANG Tao, FANG Xiang-wei, ZHANG Wei, et al. Experimental study on solidified loess by microbes and reactive magnesium oxide[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2020, 41(10): 3300-3306, 3316.

[22] 李丽华, 黄畅, 李文涛, 等. 稻壳灰-矿渣固化膨胀土力学与微观特性研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2821-2832, 2842.
LI Li-hua, HUANG Chang, LI Wen-tao, et al. Study on mechanical and microscopic characterization of expansive soil solidified by rice husk ash-granulated blast furnace slag[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(10): 2821-2832, 2842.

[23] 郎瑞卿, 裴璐熹, 孙立强, 等. 新拌不同液限淤泥固化土流动性试验研究[J]. 岩土力学, 2023, 44(10): 2789-2797.
LANG Rui-qing, PEI Lu-xi, SUN Li-qiang, et al. Experimental study on the flowability of freshly mixed solidified muds with different liquid limits[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2023, 44(10): 2789-2797.

[24] 肖涵, 董超强, 章荣军, 等. 生石灰对理化复合法处理淤泥浆效率的影响研究[J]. 岩土力学, 2022, 43(增刊 2): 214-222, 230.
XIAO Han, DONG Chao-qiang, ZHANG Rong-jun, et al. Effect of quicklime on solidification efficiency of mud slurry treated by physicochemical composite method[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2022, 43(Suppl.2): 214-222, 230.

[25] 刘松玉, 张涛, 蔡国军. 工业废弃木质素固化改良粉土路基技术与应用研究[J]. 中国公路学报, 2018, 31(3): 1-11.
LIU Song-yu, ZHANG Tao, CAI Guo-jun. Research on technology and engineering application of silt subgrade solidified by lignin-based industrial by-product[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2018, 31(3): 1-11.

[26] 孙健峰, 李明东, 潘耀森, 等. 石灰-EPS 颗粒复合改良膨胀土的膨胀性研究[J]. 水力发电, 2022, 48(6): 109-112, 118.
SUN Jian-feng, LI Ming-dong, PAN Yao-sen, et al. Study on the expansion of lime-EPS particles composite modified expansive soil[J]. **Hydropower**, 2022, 48(6): 109-112, 118.

[27] HARRISON J. New cements based on the addition of reactive magnesia to Portland cement with or without added pozzolan[C]//Proceedings of the CIA Conference: Concrete in the Third Millennium. Brisbane, Australia: CIA, 2003.

[28] 王东星, 肖杰, 肖衡林, 等. 武汉东湖淤泥碳化-固化试验研究[J]. 岩土力学, 2019, 40(5): 1805-1812.
WANG Dong-xing, XIAO Jie, XIAO Heng-lin, et al. Experimental study of carbonated-solidified sludge in East Lake, Wuhan[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2019, 40(5): 1805-1812.

[29] 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 Jing-jing. The application and micro-mechanism of carbonated reactive magnesia solidified soils[D]. Nanjing: Southeast University, 2016.

[30] 蔡光华. 活性氧化镁碳化加固软弱土的试验与应用研究[D]. 南京: 东南大学, 2017.
CAI Guang-hua. Experimental and application studies on soft soil carbonated and stabilized by reactive magnesia[D]. Nanjing: Southeast University, 2017.

[31] 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 Dong-xing, XIAO Jie, LI Li-hua, 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.

[32] 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 People's Republic of China. GB/T 50123－2019 Standard for geotechnical testing method[S]. Beijing: China Planning Press, 2019.

[33] 中钢集团洛阳耐火材料研究院. YB/T 4019－2006 轻烧氧化镁化学活性测定方法[S]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.
Sinosteel Luoyang Institute of Refractories Research. YB/T 4019－2006 Test methods for chemical activity of caustic burned magnesia[S]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.

[34] 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 Test methods of soils for highway engineering[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.

[35] 交通运输部公路科学研究院. JTG/T F20－2015 公路路面基层施工技术细则[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
Research Institute of Highway Ministry of Transport. JTG/T F20－2015 Technical guidelines for Construction

of highway roadbases[S]. Beijing: China Communications Press, 2020.

[36] 卢全中, 陈树峰, 彭建兵, 等. 三轴压缩条件下裂隙性黄土应力−应变特性及变形破坏机制[J]. 中国公路学报, 2015, 28(1): 8-16.
LU Quan-zhong, CHEN Shu-feng, PENG Jian-bing, et al. Stress strain features and deformation failure mechanisms of fissured loess under triaxial compression[J]. **China Journal of Highway and Transport**, 2015, 28(1): 8-16.

[37] 王东星, 何福金, 朱加业. CO_2 碳化矿渣-CaO-MgO 加固土效能与机制探索[J]. 岩土工程学报, 2019, 41(12): 2197-2206.
WANG Dong-xing, HE Fu-jin, ZHU Jia-ye. Performance and mechanism of CO_2 carbonated slag-CaO-MgO-solidified soils[J]. **Chinese Journal of Geotechnical Engineering**, 2019, 41(12): 2197-2206.

[38] 王丽丽, 李宁, 何敏, 等. 基于一种重塑性制样方法的节理黄土力学特性试验研究[J]. 防灾减灾工程学报, 2020, 40(1): 35-42.
WANG Li-li, LI Ning, HE Min, et al. Experimental study on mechanical properties of jointed loess based on a remouldling sample method[J]. **Journal of Disaster Prevention and Mitigation Engineering**, 2020, 40(1): 35-42.

[39] 周葆春, 孔令伟, 郭爱国. 石灰改良膨胀土的应力−应变−强度特征与本构描述[J]. 岩土力学, 2012, 33(4): 999-1005.
ZHOU Bao-chun, KONG Ling-wei, GUO Ai-guo. Stress-strain-strength behaviour and constitutive description of lime-treated expansive soil[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2012, 33(4): 999-1005.

[40] 林宗寿. 胶凝材料学[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2018: 196-209.
LIN Zong-shou. Cementitious material science[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2018: 196-209.

[41] 杨永, 张树青, 荣辉, 等. 石灰基材料对生土改性效果及机制研究[J]. 功能材料, 2019, 50(4): 4067-4073.
YANG Yong, ZHANG Shu-qing, RONG Hui, et al. Study on modification effect and mechanism of lime-based materials on raw soil[J]. **Functional Materials**, 2019, 50(4): 4067-4073.

[42] 袁士才, 田宗坤, 张开发, 等. 掺和料对改良土液塑限影响试验研究[J]. 低温建筑技术, 2017, 39(1): 84-85.
YUAN Shi-cai, TIAN Zong-kun, ZHANG Kai-fa, et al. Research on effect of admixture on liquid limit and plastic limit of improved soil[J]. **Low Temperature Architecture Technology**, 2017, 39(1): 84-85.

上接第 363 页

[31] ABED A A, SOŁOWSKI W T. Estimation of water retention behaviour of bentonite based on mineralogy and mercury intrusion porosimetry tests[J]. **Géotechnique**, 2021, 71(6): 494-508.

[32] 黎澄生, 孔令伟, 柏巍, 等. 土−水特征曲线滞后阻塞模型[J]. 岩土力学, 2018, 39(2): 598-604.
LI Cheng-sheng, KONG Ling-wei, BAI Wei, et al. Hysteresis model of soil-water characteristic curve[J]. **Rock and Soil Mechanics**, 2018, 39(2): 598-604.

[33] LEONG E C, TRIPATHY S, RAHARDJO H. Total suction measurement of unsaturated soils with a device using the chilled-mirror dew-point technique[J]. **Géotechnique**, 2003, 53(2): 173-182.

[34] NAM S, GUTIERREZ M, DIPLAS P. Comparison of testing techniques and models for establishing the SWCC of riverbank soils[J]. **Engineering Geology**, 2009, 110: 1-10.

[35] LI H, LI T L, LI P, et al. Prediction of loess soil-water characteristic curve by mercury intrusion porosimetry[J]. **Journal of Mountain Science**, 2020, 17(9): 2203-2213.

[36] ADAMSON A, GAST A. Physical chemistry of surfaces[M]. New Jersey: John Wiley & Sons, 1997.

[37] BACHMANN J, HORTON R, PLOEG R R V D, et al. Modified sessile drop method for assessing initial soil water contact angle of sandy soil[J]. **Soil Science Society of America Journal**, 2000, 64(2): 564-567.

[38] ZHANG C, LIU Z, DENG P. Contact angle of soil minerals: a molecular dynamics study[J]. **Computers and Geotechnics**, 2016, 75: 48-56.

[39] ZHANG S, PEI H. Rate of capillary rise in quartz nanochannels considering the dynamic contact angle by using molecular dynamics[J]. **Powder Technology**, 2020, 372: 477-485.

[40] ZHANG S, PEI H. Determining the bound water content of montmorillonite from molecular simulations[J]. **Engineering Geology**, 2021, 294: 106353.

[41] WANG J C, XING Y W, GUI X H, et al. Experimental and molecular dynamics simulation study on wetting interaction between water droplets and kaolinite surface[J]. **Chemical Physics Letters**, 2022, 800: 139659.

[42] SONG X Y, ZHANG Z. Determination of clay-water contact angle via molecular dynamics and deep-learning enhanced methods[J]. **Acta Geotechnica**, 2022, 17(2): 511-525.