

# 固碳轻质土制备方法与物理力学性能研究

刘松玉<sup>1,2</sup>, 张翔<sup>\*1</sup>, 蔡光华<sup>3</sup>, 袁振扬<sup>1</sup>, 安景峰<sup>4</sup>, 陈光伟<sup>4</sup>

(1.东南大学岩土工程研究所, 江苏 南京 211189; 2.南京现代综合交通实验室, 江苏 南京 211100; 3.南京林业大学土木工程学院, 江苏 南京 210037; 4.江苏省交通工程建设局, 江苏 南京 210004)

**摘要:** 为减少碳排放、探寻岩土工程的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)利用技术, 本研究基于氧化镁(MgO)碳化固化原理, 提出了一种固碳轻质土(Carbon sequestration lightweight soil, C-LS)原理, 该原理采用MgO和渣土替代水泥作为固化材料、CO<sub>2</sub>替代空气发泡, 将MgO、粉质黏土、水和CO<sub>2</sub>泡沫按一定比例混合后形成密度<1g/cm<sup>3</sup>的C-LS。通过无侧限抗压强度、扫描电镜和热重等宏观试验, 研究了不同MgO掺量、设计湿密度、水固比与碳化养护条件对C-LS的流值、凝结时间、干密度、强度、碳化产物及固碳能力的影响规律。结果表明: 随MgO掺量和湿密度增加, C-LS流值和凝结时间减小, 抗压强度提高, 同时其固碳量提高。本文确定了C-LS的最优配比, 在自然养护下, 其28d强度可满足高速公路路堤填筑和其它填筑材料要求, 在外部加速碳化条件下, C-LS强度可进一步提高。根据C-LS强度与碳化产物产量及固碳量的内在联系, 研究揭示了C-LS强度形成微观机理。C-LS技术能大量消耗CO<sub>2</sub>和工程渣土, 为岩土工程固碳利用提供了崭新的技术途径。

**关键词:** C-LS; MgO; 二氧化碳泡沫; 制备方法; 物理力学特性

中图分类号: TU

文献标识码:

文章编号:

**作者简介:** 刘松玉 (1963-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事特殊地基处理、原位测试技术等方面的研究工作。E-mail: liusy@seu.edu.cn

## Research on the preparation method and physical-mechanical properties of carbon sequestration lightweight soil

LIU Songyu<sup>1,2</sup>, ZHANG Xiang<sup>\*1</sup>, CAI Guanghua<sup>3</sup>, YUAN Zhenyang<sup>1,2</sup>, AN Jingfeng<sup>4</sup>, CHEN Guangwei<sup>4</sup>

(1. Institute of Geotechnical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189, China; 2. Nanjing Modern Multimodal Transportation Laboratory, Nanjing 211100, China; 3. School of Civil Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China; 4. Jiangsu Provincial Transportation Engineering Construction Bureau, Nanjing 21004, China)

**Abstract:** To reduce carbon emissions and explore carbon dioxide (CO<sub>2</sub>) utilization technologies in geotechnical engineering, this study proposes a novel method for preparing carbon sequestration lightweight soil (C-LS) based on the magnesium oxide (MgO) carbonation mechanism. A mixture of MgO and waste soil is used as a binder instead of cement and CO<sub>2</sub> instead of air for foaming. By mixing MgO, silty clay, water and CO<sub>2</sub> foam in specific proportions, C-LS with a density of less than 1 g/cm<sup>3</sup> is formed. Through unconfined compressive strength tests, scanning electron microscopy (SEM) and thermogravimetric analysis (TGA), the effects of MgO proportions, designed wet densities, water-to-solid ratios and carbonation curing conditions on the fluidity, setting time, dry density, strength, carbonation products and carbon sequestration capacity of C-LS were studied. The results show that with the increase in MgO proportion and wet density, the fluidity and setting time of C-LS decrease, while the strength and carbon sequestration efficiency improve. The optimal mix proportion of C-LS was determined, ensuring that under ambient conditions, its 28-day strength meets the requirements for highway embankment filling and other backfill applications. Under accelerated carbonation conditions, the strength of C-LS can be further improved. Based on the intrinsic relationship between the strength of C-LS, the amount of carbonation product, and the carbon sequestration rate, the study reveals the strength formation mechanism of C-LS and proposes a microscopic model. The C-LS technology can significantly consume CO<sub>2</sub> and engineering waste soil, providing a novel technical approach for CO<sub>2</sub> sequestration in geotechnical engineering.

**Keywords:** C-LS; MgO; CO<sub>2</sub> foam; Preparation method; Physical and mechanical properties

## 1 引言

传统的泡沫轻质土是由水泥、水、气泡按照一定比例混合而成的轻质建筑材料, 具有轻质性、密度和强度可调节、自流平、直立性好、保温隔热性能好和耐久性好等优点<sup>[1-3]</sup>。2002年, 该技术引入中国<sup>[4]</sup>, 用

于改善软土路基沉降、减少自重载荷。经过20年的研

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(42277146); 江苏省研究生科研创新计划(KYCX23\_0287)

收稿日期: 202x-xx-xx

究和推广, 泡沫轻质土已广泛应用于道路工程、桥背回填等工程<sup>[5-7]</sup>。目前泡沫轻质土中最常用的胶凝材料是波特兰水泥, 其生产过程不仅会消耗大量的能源与资源, 还会产生大量的二氧化碳(CO<sub>2</sub>)气体(生产 1t 水泥会排放 0.95t CO<sub>2</sub>)、粉尘、烟尘以及二氧化硫等有毒气体, 是 CO<sub>2</sub> 排放的重要来源<sup>[8]</sup>。

因此, 寻求低碳环保、替代水泥的固化剂来生产泡沫轻质土, 对工程建设低碳化发展具有重要现实意义。MgO 系固化剂与水泥相比具有显著优势, 包括: ①较低的煅烧温度(<900°C); ②能快速吸收 CO<sub>2</sub> 并实现强度的增长; ③对杂质不敏感, 可以结合一定量废弃物和工业副产品<sup>[9-12]</sup>。刘松玉课题组率先将 MgO 应用到土体加固领域并开展了一系列系统性的研究<sup>[13-15]</sup>。易耀林<sup>[16]</sup>对 MgO 碳化固化粉土和砂土进行了初步试验研究, 验证了 MgO 在软土加固方面的优越性。蔡光华<sup>[17]</sup>研究了 MgO 掺量对粉土黏土碳化固化效果的影响, 结果表明 MgO 掺量越高, 碳化加固效果越显著。刘松玉、曹菁菁等<sup>[18]</sup>研究了不同含水率和碳化时间对 MgO 碳化加固粉质黏土的影响, 提出了粉质黏土的碳化反应微观模型, 确定了当碳化时间为 6 h 时可获得最高强度。

本文在已有研究基础上, 提出固碳轻质土(C-LS)技术, 以 MgO 和渣土完全替代水泥作为固化材料, 采

用 CO<sub>2</sub> 发泡代替空气发泡制备 C-LS。通过室内试验, 对其物理力学特性进行了研究, 分析了 MgO 掺量、水固比及湿密度对其流值、干密度、无侧限抗压强度和变形模量的影响, 提出了 C-LS 的最佳设计配比及最佳养护条件; 通过扫描电镜试验 (Scanning Electron Microscopy, SEM)和热重试验 (Thermogravimetric and Differential Thermogravimetric Analysis, TGA-DTG), 揭示了 C-LS 的微观机制。

## 2 试验材料和方法

### 2.1 试验材料

C-LS 的制备材料主要包括 MgO、渣土(粉质黏土)、CO<sub>2</sub> 泡沫和水。通过 X 射线荧光光谱仪对土样和 MgO 的化学成分及含量进行分析, 如表 1 所示。试验所用胶凝材料 MgO 为河北邢台镁神科技有限公司生产的轻质低活性 MgO, 试验用土为江苏扬州某基坑场地所用工程废弃渣土, 其主要物理性质指标见表 1。其中含水率、比重、液塑限指标参照《公路土工试验规程》(JTGE40-2007)规范<sup>[19]</sup>测定, 通过《土的工程分类标准》(GB/T 50145-2007)可确定试验用土为粉质黏土。CO<sub>2</sub> 气体购自南京文达特种气体有限公司, 来源于自发电厂捕集的废气, 发泡剂为山东威海中盛建材有限公司生产的填充专用水泥发泡剂, 为阴离子表面活性剂。

表 1 MgO 和土的化学成分、物理指标 (单位: %)

	化学成分								物理指标				
	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	含水率 w/%	比重 G <sub>s</sub>	液限 L <sub>L</sub> /%	塑限 P <sub>L</sub> /%	塑性指数 I <sub>p</sub>
土	3.03	65.85	16.99	3.43	5.11	1.47	0.17	2.62	22.3	2.71	35.5	19.8	15.7
MgO	98.68	0.49	0.07	0.06	0.10	0.38	0.14	0.01	/	/	/	/	/

### 2.2 配合比设计

C-LS 原料用量按公式(1)、公式(2)和公式(3)计算:

$$\frac{m_m}{\rho_m} + \frac{m_s}{\rho_s} + \frac{m_f}{\rho_f} + \frac{m_w}{\rho_w} = 1 \quad (1)$$

$$m_m + m_s + m_f + m_w = 1 \times \rho_L \quad (2)$$

$$m_f = \left(1 - \frac{m_m}{\rho_m} - \frac{m_s}{\rho_s} - \frac{m_w}{\rho_w}\right) \times \rho_f \quad (3)$$

式中:  $m_m$ 、 $m_s$ 、 $m_f$ 、 $m_w$  分别指每 m<sup>3</sup>C-LS 的 MgO 用量 (kg)、土用量(kg)、CO<sub>2</sub> 泡沫用量(kg)和用水量(kg);  $\rho_m$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_f$ 、 $\rho_w$  分别指 MgO 密度(kg/m<sup>3</sup>)、土密度(kg/m<sup>3</sup>)、CO<sub>2</sub> 泡沫密度(kg/m<sup>3</sup>)和水密度(kg/m<sup>3</sup>), 其中  $\rho_m$ 、 $\rho_s$ 、 $\rho_f=50 \text{ kg/m}^3$ 、 $\rho_w=1000 \text{ kg/m}^3$ ;  $\rho_L$  为 C-LS 设计湿密度 (kg/m<sup>3</sup>), 取 600、800、1000kg/m<sup>3</sup>。

每 m<sup>3</sup> C-LS 的用水量按式(4)计算:

$$m_w = \frac{W}{S}(m_m + m_s) \quad (4)$$

式中:  $\frac{W}{S}$  为每 m<sup>3</sup>C-LS 的水固比(Water/Solid), 取 0.55、0.60、0.65。

根据 MgO 掺量对碳化效果的研究成果<sup>[20]</sup>, 采用三种 MgO 掺量 (40、50、60%)、三种设计湿密度 (600、800、1000kg/m<sup>3</sup>)、三种水固比 (0.55、0.60、0.65)以及三个碳化时间 (0、3、5 天), 各成分比例设计如表 2 所示。以试样编号 M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>5</sub> 为例, M<sub>40</sub> 指 MgO 掺量 40%MgO 与 MgO 和土的质量比, W<sub>55</sub> 指的是水固比 0.65 (water-to-solid ratio, 水与 MgO 和土的质量比), D<sub>800</sub> 指设计湿密度 800kg/m<sup>3</sup>, C<sub>5</sub> 指 C-LS 脱模后碳化 5 天。

表 2 C-LS 配合比和碳化养护设计表

Table 2 Components (per m<sup>3</sup>) and curing conditions (first 7-day age) of C-LS samples

序号	影响因素	编号	MgO 掺量	水固比	湿密度	碳化时间	各组分用量 (kg/m <sup>3</sup> )
----	------	----	--------	-----	-----	------	----------------------------

			(%)	(/)	(kg/m <sup>3</sup> )	(d)	MgO	土	水	CO <sub>2</sub> 泡沫
1	MgO 掺量	M <sub>40</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	40	0.65	800	0	188	282	305	25
2		M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	50				235	235	305	25
3		M <sub>60</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	60				282	188	305	25
4	水固比	M <sub>50</sub> W <sub>55</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	50	0.55	600	0	250	250	275	25
5		M <sub>50</sub> W <sub>60</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>		0.60			242	242	291	25
6	湿密度	M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>600</sub> C <sub>0</sub>	50	0.65	600	3	176	176	230	18
7		M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>1000</sub> C <sub>0</sub>			1000		294	294	382	30
8	碳化时间	M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>3</sub>	50	0.65	800	3	235	235	305	25
9		M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>5</sub>				5	235	235	305	25

### 2.3 制样及养护流程

制样流程如图 1 示：①试验前将土晒干、粉碎和烘干，将 MgO 和干土按照称量好的比例搅拌均匀，按 0.65 水固比添加自来水至固体混合物中，搅拌至混合均匀制成浆液。②同时制备 CO<sub>2</sub> 泡沫，用改装的空压机与 CO<sub>2</sub> 气瓶相连接，将发泡剂与水按 1:40 的比例混合，制备泡沫，CO<sub>2</sub> 泡沫密度设定为 48~52 kg/m<sup>3</sup>。③将 CO<sub>2</sub> 泡沫加入浆液中直至达到设计的湿密度，制备 C-LS 浆液。④将 C-LS 浆液浇筑入三立方体模具（尺寸为 70.7×70.7×70.7 mm）和圆柱模具（直径 50mm×高 50mm）中，制样完毕后 48 小时之后脱模，然后按照设计时间进行养护。

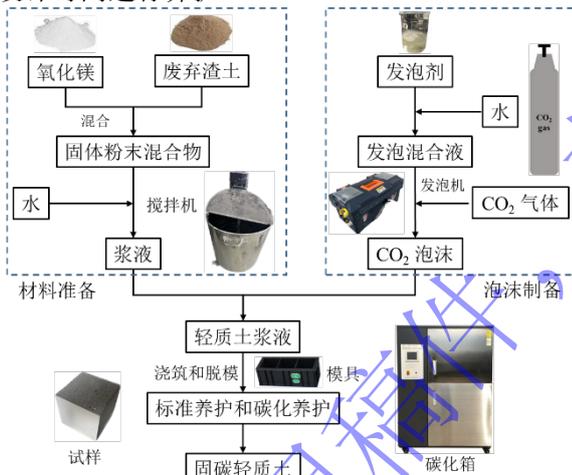


图 1 制样流程示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the preparation process

为了探究养护条件对 C-LS 的影响规律，设置了不同的养护条件，分为自然养护（温度 20℃，相对湿度 95%）和加速碳化养护<sup>[21,22]</sup>（温度 20℃，相对湿度 75%，CO<sub>2</sub> 浓度 20%），按不同的养护时长共设置了 8 种养护条件组合。脱模前的 2 天分为：①自然养护 2 天，②碳化养护 2 天。脱模后的 5 天分为：①自然养护 5 天，碳化养护 0 天；②自然养护 4 天，碳化养护 1 天；③自然养护 2 天，碳化养护 3 天；④自然养护 0 天，碳化养护 5 天。养护完成后，按照规定龄期：7d、14d 和 28d，对不同养护条件下的 C-LS 进行宏观行为和微观结构试验。

### 2.4 试验方法

(1) 流值：参照《现浇泡沫轻质土技术规程》

(CECS 249: 2008)开展试验。使用内径 8cm、净高 8cm、壁厚 0.2cm 的硬质塑料圆筒与边长 30cm、厚度 1cm 的正方形塑料平板，将圆筒放置于平板上；向筒内倒入制备好的 C-LS 浆液直至浆液略高出筒口，使用刮刀刮平圆筒口，使轻质土浆液与筒口齐平；将圆筒提起直至筒内所有浆液落在平板上形成圆饼，同时使用秒表开始计时；当计时达到 1 分钟后，使用游标卡尺测量平板上的圆饼直径，即为 C-LS 的流值。

(2) 凝结时间：使用维卡仪测量 C-LS 的初凝时间和终凝时间，使用达到设计湿密度的浆液进行测试，以三次试验结果的算术平均值作为轻质土的凝结时间。

(3) 干密度：取一组标准试样，在试样龄期的 7d、14d 和 28d，分别量取试样的长度、宽度与高度，计算体积、称取质量，计算出试样的干密度，并取三块标准试件干密度的算术平均值作为 C-LS 的干密度。

(4) 吸水率：参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969-2020)开展试验。取一组标准试样，在试样 28d 龄期时，将试样放入水温为 20℃的恒温水槽内，然后加水至试样高度的 1/3，浸泡 24h，再加水至试样高度的 2/3，再浸泡 24h，加水至高出试样 30mm，保持 24h。最后将试样从水中取出并称重。吸水率  $W_a$  (Water absorption)为：

$$W_a = \frac{m_w - m_0}{m_0} \quad (5)$$

式中： $m_w$  为 C-LS 浸泡后的质量， $m_0$  为 C-LS 浸泡前的质量。

(5) 无侧限抗压强度：参照《气泡混合轻质土填筑技术规程》(CJJ/T 177-2012)，在试样龄期的第 7 天、14 天和 28 天，对 C-LS 试样开展无侧限抗压试验，试样尺寸为 70.7mm×70.7 mm×70.7 mm 的立方体，使用仪器为 100kN 微机控制电子万能试验机，型号为 UTM5105，轴向加载速率为 2.5kN/s。

(6) SEM，扫描电镜试验：用于鉴定 C-LS 中的产物，采用扫描电子显微镜，取无侧限抗压强度试验后的破碎试样，试样使用经过冻干的新鲜断裂试块，试验前对试样进行喷金，防止试样表面因过量电荷积累而产生放电影响最终成像。

(7) TG-DTA，热重试验：用于分析 C-LS 有因

碳酸盐相分解造成的质量损失,从而定量分析 C-LS 试样的 CO<sub>2</sub> 吸收量, 试验前将含新鲜断面约 1 cm<sup>3</sup> 的试块用冻干机进行冷冻烘干, 然后将试块磨碎为粒径 ≤0.075mm (200 目) 的粉末, 试验测试条件为: 温度范围 50°C~950°C, 升温速率为 10°C/min。

### 3 试验结果

#### 3.1 C-LS 物理特性

##### (1) 流值和凝结时间

流值和凝结时间是 C-LS 浆液(未掺泡沫)的性质。图 2~4 为不同的 MgO 掺量、设计湿密度及水固比条件下的流值-凝结时间变化图。由图可见, 流值与凝固时间呈现一致的变化趋势。随着 MgO 掺量与设计湿密度的增加, 流值与凝固时间减小, 随着水固比的增加, 流值与凝固时间增大。MgO 的水化能力较强, 随着 MgO 掺量的增加, 水化反应增强, 与水固比的减小效果一致, 因此 MgO 掺量的增加与水固比的提高呈现出对流值-凝结时间一致的影响效果。湿密度对 C-LS 的凝结时间的影响较为显著, 当湿密度为 600kg/m<sup>3</sup>, C-LS 的流值达到最大为 226mm, 《现浇泡沫轻质土技术规程》(CECS 249: 2008)中对轻质土流值的检验合格标准为 160mm~200mm。因此, 试样 M<sub>60</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>0</sub>、M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>600</sub>C<sub>0</sub>、M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>1000</sub>C<sub>0</sub>、M<sub>50</sub>W<sub>55</sub>D<sub>800</sub>C<sub>0</sub> 不满足轻质土施工过程质量检验的要求。

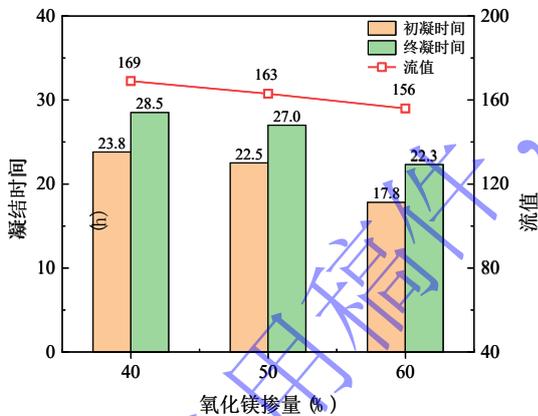


图 2 流值-凝结时间与 MgO 掺量的关系

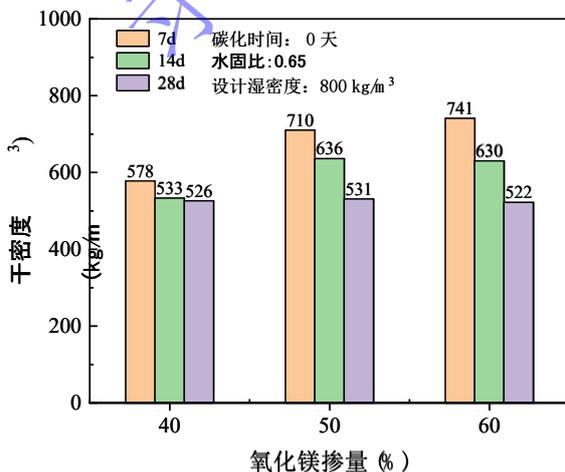


图 3 流值-凝结时间与设计湿密度的关系

图 3 Relationship between fluidity-setting time and wet density

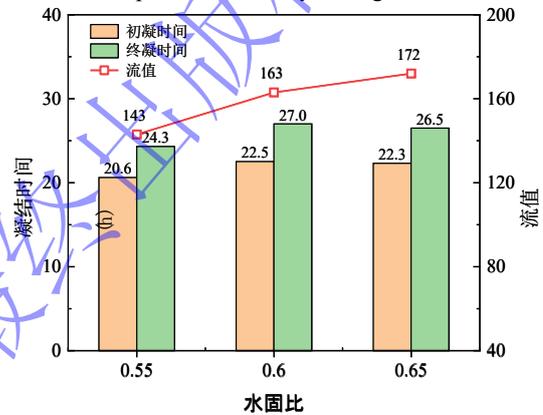
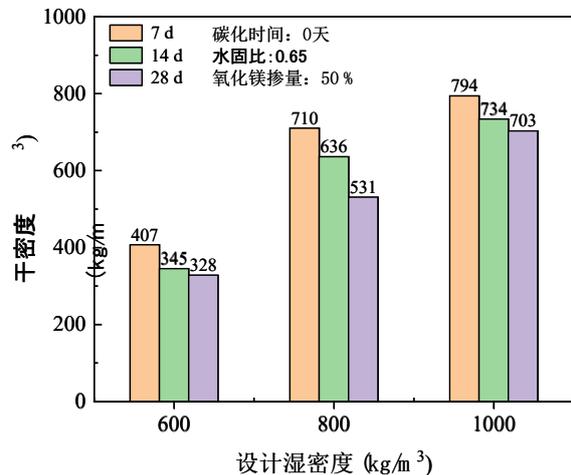


图 4 流值-凝结时间与水固比的关系

Fig. 4 Relationship between fluidity-setting time and water-to-solid ratio

##### (2) 干密度

图 5 为不同的 MgO 掺量、设计湿密度、水固比与湿密度条件下的 C-LS 不同龄期下的干密度。可以看出, 随着龄期的增加, 由于试样内部水分的逐渐逸散, 不同配比条件下的 C-LS 干密度相对于设计湿密度都呈现出明显的下降趋势, 28d 的下降幅度为 54.7%~87.9%。随着湿密度的增加, 对应的 C-LS 干密度逐渐增大。随着碳化时间的延长, C-LS 干密度逐渐提升, 28 天干密度可增加 17.7%。



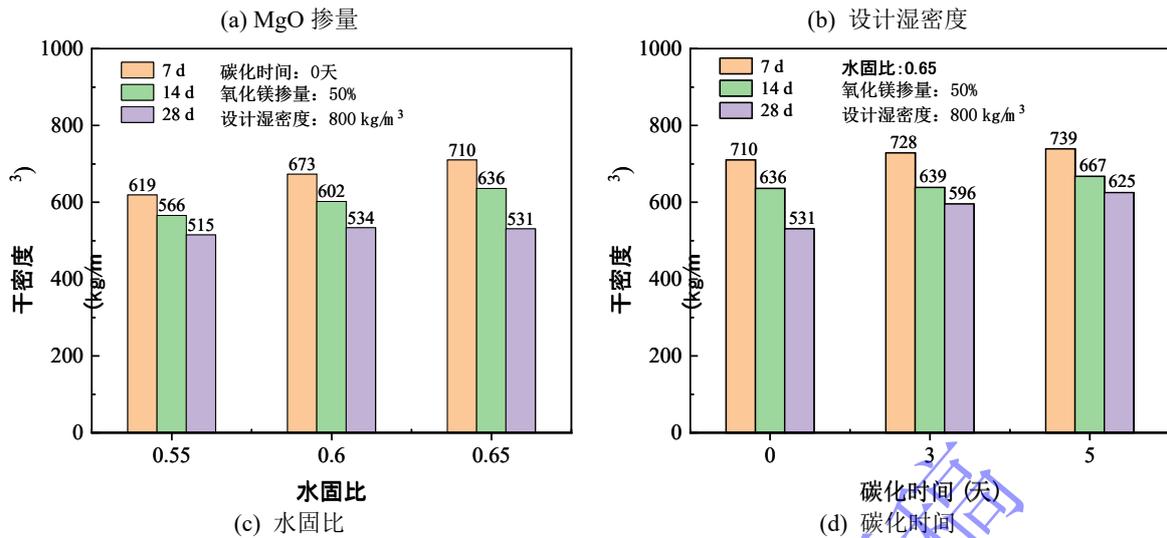


图 5 不同组分条件下 C-LS 的干密度

Fig. 5 Dry densities of C-LS with varying components

### 3.2 C-LS 力学特性

#### (1) 无侧限抗压强度

图 6 (a)~(d) 分别为不同的 MgO 掺量、设计湿密度、水固比与碳化时间的 CLS 无侧限抗压强度变化。可以看出, C-LS 在未进行碳化养护时, 无侧限抗压强度随龄期也逐渐增长, 28 d 强度最小可达到 0.96 MPa (湿密度 600 kg/m<sup>3</sup>), 这主要是 C-LS 内部 CO<sub>2</sub> 气泡碎裂发生碳化反应的结果。增大湿密度可以显著提高 C-LS 的抗压强度, 湿密度增大的实质是增加固体材料的相对用量和减少 CO<sub>2</sub> 泡沫的相对用量, 当湿密度由 600 kg/m<sup>3</sup> 增大至 1000 kg/m<sup>3</sup>, C-LS 28d 抗压强度可达 1.96 MPa。随着 MgO 掺量的增加, 无侧限抗压强度增大, 随着碳化时间的增加, 无侧限抗压强度进一步提高, 湿密度 800kg/m<sup>3</sup> 时, 其最高可达 1.86 MPa。

《公路路基设计规范》(JTG D30-2015)<sup>[23]</sup> 中规定, 用于公路路基的泡沫轻质土 7d 和 28d 无侧限抗压强

度应满足表 3 的规定, 可见 C-LS 均满足路基填筑路堤和路床强度要求。

表 3 规范对轻质土强度要求

Table 3 Strength requirement for lightweight soil

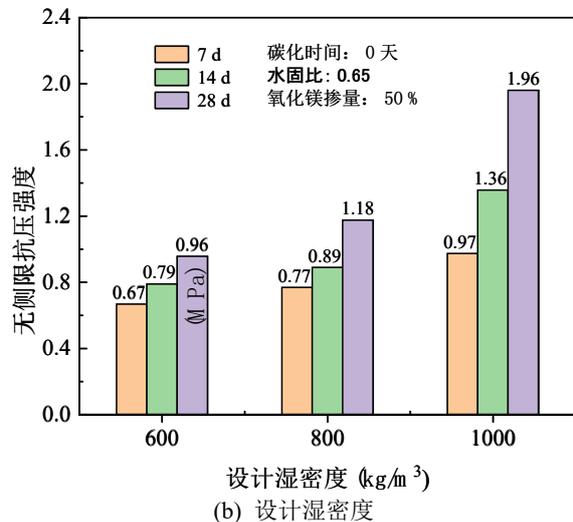
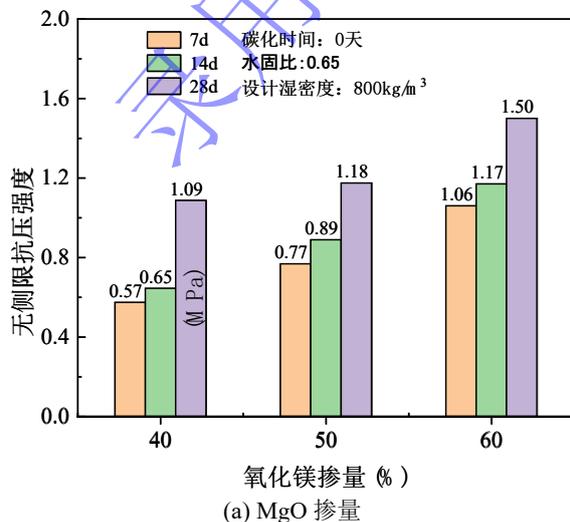
填筑部位	龄期	无侧限抗压强度 (MPa)	满足要求
路床	7d	≥0.5	是
	28d	≥1.0	是
路堤	7d	≥0.3	是
	28d	≥0.6	是

#### (2) 28d 强度预测

设置 C-LS 的 28d 无侧限抗压强度  $q_u$  与 MgO 掺量  $M$ 、设计湿密度  $D$ 、水固比  $W$ 、碳化时间  $C$  的回归模型为  $q_u = a + b_1M + b_2D + b_3W + b_4C$ , 其中  $a$ 、 $b_1$ 、 $b_2$ 、 $b_3$ 、 $b_4$  为回归参数。经过分析, 回归公式如下:

$$q_u = -2.3665 + 0.0205M + 1.0027D + 0.0025W + 0.1073C \quad (6)$$

强度模型预测值与实际值如图 7 所示, 可以发现, 强度公式的预测值与实际值较为接近, R 平方为 0.87, 可见回归公式的预测效果良好。



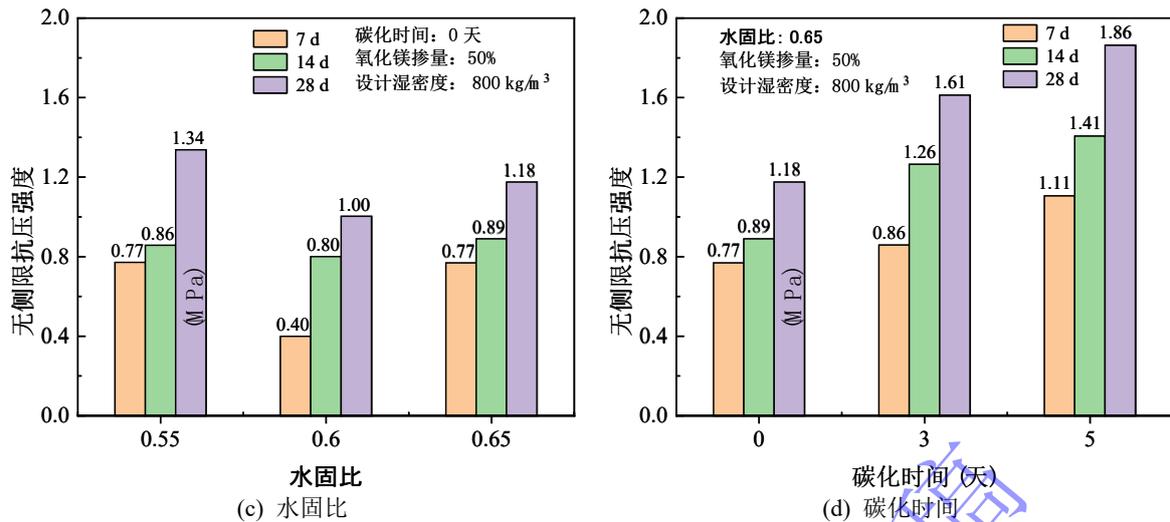


图 6 不同组分条件下 C-LS 的无侧限抗压强度

Fig. 6 Unconfined compressive strengths of C-LS with varying components

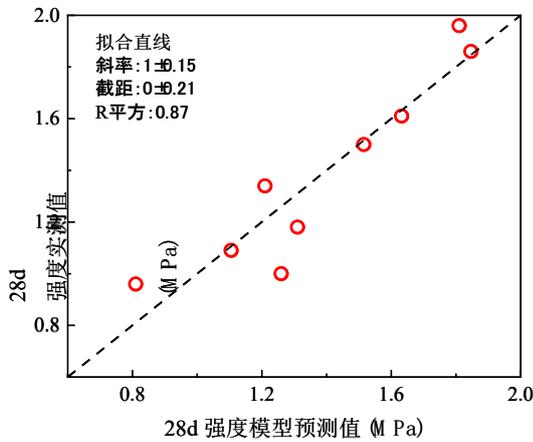


图 7 C-LS 强度公式预测值与实际值对比

Fig. 7 Comparison between the predicted strength and the actual strength of C-LS

### (3) 变形模量

如公式(6)所示,通过计算破坏应变( $\sigma_{1/2}$ )的一半应力与破坏应变( $\epsilon_f$ )之比,计算 C-LS 的变形模量  $E_{50}$ :

$$E_{50} = \frac{\sigma_{1/2}}{\epsilon_f} \quad (6)$$

$E_{50}$  与 28d 无侧限抗压强度的关系,如图 8 所示。可以看出,当湿密度从  $800 \text{ kg/m}^3$  增大至  $1000 \text{ kg/m}^3$  时, C-LS 的变形模量增大较为显著,而水固比与碳化时间对变形模量影响较小。

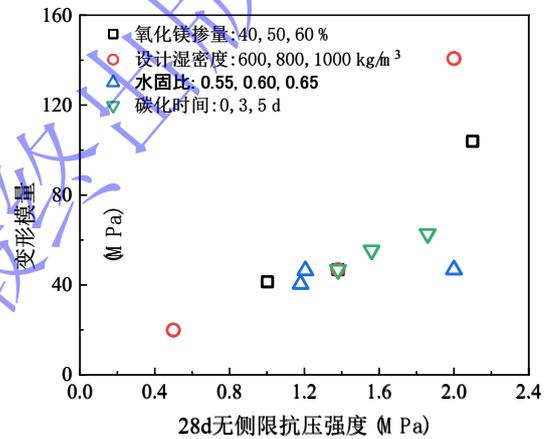


图 8 不同组分条件下的 C-LS 变形模量

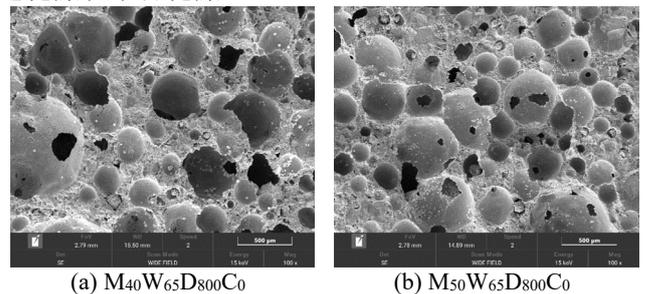
Fig. 8 Deformation modulus  $E_{50}$  of C-LS with varying components

### 3.3 微观试验

综合考虑 C-LS 的工程性能,包括流值、凝固时间以及无侧限抗压强度,重点研究了湿密度为  $800 \text{ kg/m}^3$  试样的微观结构特征,包括  $M_{40}W_{65}D_{800}C_0$ 、 $M_{50}W_{65}D_{800}C_0$ 、 $M_{50}W_{65}D_{800}C_3$ 、 $M_{50}W_{65}D_{800}C_5$ 。

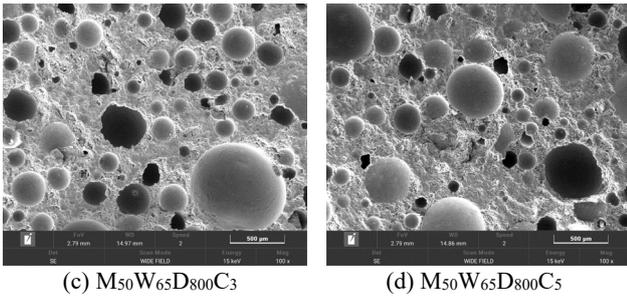
#### 3.3.1 SEM 试验

图 9(a)~(f)为 28d 龄期时 C-LS 在不同组分条件下的 SEM 孔隙结构低倍扫描图(放大 50 倍)。从图中可以看出,随着碳化时间和 MgO 掺量的增加, C-LS 试样中的孔隙分布变得更加密集和均匀,而水固比为 0.55 的试样中则可见  $\text{CO}_2$  泡沫破碎和聚合形成的连通孔隙和聚合孔隙。



(a)  $M_{40}W_{65}D_{800}C_0$

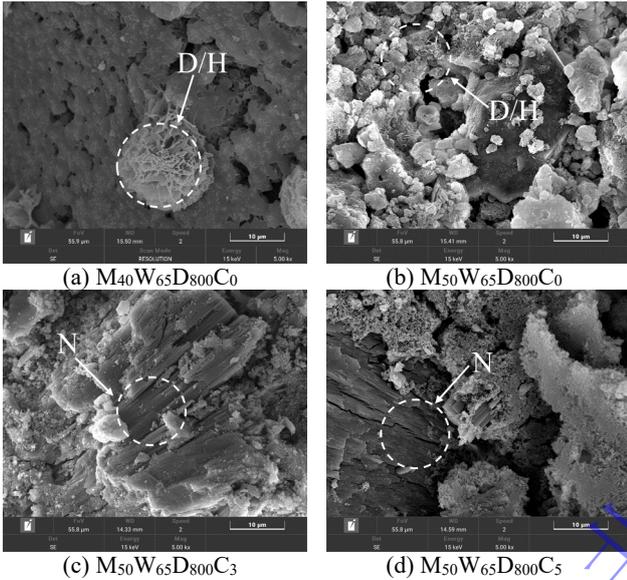
(b)  $M_{50}W_{65}D_{800}C_0$



(c) M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>3</sub> (d) M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>5</sub>

图 9 不同养护条件下的 C-LS 孔隙结构扫描电镜图

Fig. 9 SEM images of pore structures of C-LS samples under varying curing conditions



(a) M<sub>40</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>0</sub> (b) M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>0</sub>  
(c) M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>3</sub> (d) M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>5</sub>

D/H, dypingite/hydromagnesite: 水碳镁石和球碳镁石; N, nesquehonite: 三水碳镁石

图 10 不同组分条件下的 C-LS 碳化产物扫描电镜图

Fig. 10 SEM images of carbonation products of C-LS samples with varying components

图 10(a)~(d)为 28d 龄期 C-LS 不同碳化养护条件下的 SEM 碳化产物高倍扫描图(放大 2000 倍), SEM 图中的玫瑰花状产物为水碳镁石和球碳镁石, 棱柱状的碳化产物为三水碳镁石。可以看出, 在未经过加速碳化的 C-LS 试样中, 碳化产物主要以水碳镁石和球碳镁石为主, 这些碳化产物通过胶结作用将 C-LS 中的土颗粒、孔隙结构较为紧密地联结在一起。随着碳化时间增加, 固碳化产物的数量显著增加, 且碳化产物由水碳镁石/球碳镁石向三水碳镁石发生转化, 孔隙数量减少, 结构更为致密, 促进其强度不断提高。

### 3.3.2 TG-DTG 试验

图 11 为 C-LS 在不同组分条件下的热重曲线图。C-LS 的质量损失主要是由于脱水、脱羟基和脱碳导致的<sup>[24]</sup>, C-LS 随温度的分解主要分为 3 个阶段<sup>[25]</sup>: ① 50~300°C: 碳化产物(水碳镁石、球碳镁石和三水碳镁石)中自由水和结合水的脱水; ② 300~500°C: 碳化产物的脱羟基和初步脱碳; ③ 500~900°C: 碳化产

物的完全脱碳。C-LS 吸收的 CO<sub>2</sub> 量主要由 300~900°C 热分解量计算得出。

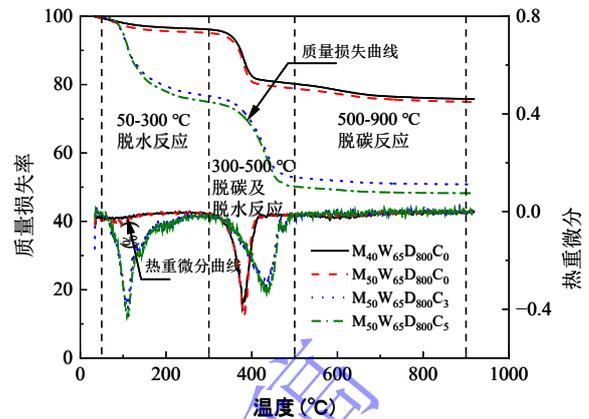


图 11 C-LS 质量损失和热重曲线

Fig. 11 Mass loss and DTG curves of C-LS

表 4 为 C-LS 在不同养护条件下的各阶段的质量损失及固碳量。C-LS 消耗和固化的 CO<sub>2</sub> 主要由两部分组成: ①制样过程中消耗的 CO<sub>2</sub> 泡沫; ②浇筑后养护过程中吸收的 CO<sub>2</sub>。考虑到水镁石 (Mg(OH)<sub>2</sub>) 的脱羟基温度和碳化产物 (HMCs) 的脱碳温度存在部分重合, 因此使用 origin 软件用高斯反卷积方法来准确计算 C-LS 中碳化产物的脱碳量<sup>[10, 26]</sup>。结果表明: 以试样 M<sub>50</sub>W<sub>65</sub>D<sub>800</sub>C<sub>0</sub> 为例, C-LS 在环境条件下至少可固碳约 65 kg/m<sup>3</sup>; 在碳化时间延长至 5 天的情况下, C-LS 试样的 CO<sub>2</sub> 固碳量显著提高, 最多可固碳约 160 kg/m<sup>3</sup>, 证明 C-LS 在环境条件下可大量固碳。热重计算出的固碳量结果与 SEM、强度结果显示出的规律较为一致。随着碳化时间的延长, 固碳量显著提升, 证明了 C-LS 的固碳潜力。

表 4 C-LS 的质量损失和固碳量

试样分类	各阶段质量损失率 (%)			总计	m <sub>CO<sub>2</sub></sub> (kg/m <sup>3</sup> )
	50-300°C	300-500°C	500-900°C		
M <sub>40</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	3.9	15.9	4.4	24.2	55
M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>0</sub>	4.8	16.1	4.1	25.0	60
M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>3</sub>	23.2	23.8	2.0	49.0	130
M <sub>50</sub> W <sub>65</sub> D <sub>800</sub> C <sub>5</sub>	24.2	25.6	2.4	52.2	160

## 4 C-LS 强度影响规律及形成机理

上述试验结果表明湿密度对 C-LS 的干密度和强度有显著的影响(见图 6)。随着湿密度从 600 kg/m<sup>3</sup> 增加至 1000 kg/m<sup>3</sup>, 强度呈显著增长(约 3 倍), 干密度也随之增加。这是因为湿密度直接决定了浆体的初始固体含量, 从而影响水化和碳化产物的体积与分布。MgO 含量的变化显著影响强度形成机制。适量的 MgO 掺量可有效促进碳化产物的生成, 而过高或过低的 MgO 含量都会降低碳化效率, 从而影响强度表现(见图 6)。水固比对流值的影响最为显著, 但其对密度和

强度的影响则较为复杂（见图 4~6）。水固比的最佳范围为 0.55~0.65，这既保证了良好的流动性，又避免了因水分过多导致的结构松散和强度降低。碳化时间主要影响碳酸镁产物的类比与生成量（见图 10、11），进而影响强度。延长碳化时间有助于提高强度，但影响程度相较于湿密度和 MgO 含量略低。

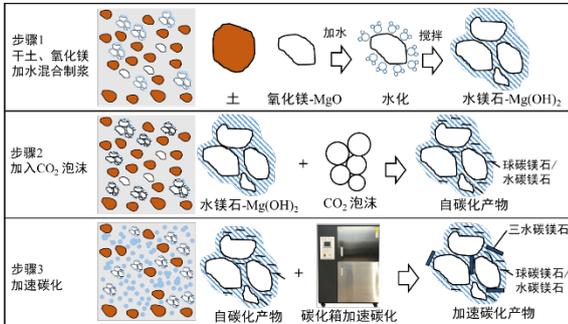


图 12 C-LS 的微观模型示意图

Fig. 12 Schematic diagram of microstructure model of C-LS

图 12 为 C-LS 的微观结构模型示意图。MgO、土和水混合后，MgO 发生水化反应，生成氢氧根离子 (OH<sup>-</sup>)，形成碱性环境；随后加入 CO<sub>2</sub> 泡沫，CO<sub>2</sub> 泡沫遇水溶解生成碳酸根离子 (CO<sub>3</sub><sup>2-</sup>)；由于酸碱中和反应，碱性环境会促进碳酸根离子的生成，提高 CO<sub>2</sub> 泡沫的溶解度，使镁离子 (Mg<sup>2+</sup>) 与碳酸根离子充分发生碳化反应，生成一系列碳化产物，包括水碳镁石、球碳镁石和三水碳镁石；此外，MgO 为内部的碳化反应提供了活性位点，可以使得 C-LS 内部的碳化反应持续发生。与传统的 MgO 碳化固化技术相比，C-LS 内部 CO<sub>2</sub> 泡沫的碎裂即可以发生碳化反应，形成 C-LS 强度。外部加速碳化可以进一步提高 C-LS 的强度。

## 5 结论

本文以 C-LS 为研究对象，探讨了 MgO 掺量、设计湿密度、水固比及碳化时间对其性能的影响，并测试了其流值、凝结时间、无侧限抗压强度、微观结构、碳化产物和固碳量，揭示了 C-LS 的物理力学性能和微观机制，可以得到以下结论：

(1) 提出了 C-LS 的制备方法及其最佳配比：采用 MgO 及渣土作为固体原料，CO<sub>2</sub> 作为发泡气体进行制备；最佳配比为 MgO 掺量 50%、湿密度 800kg/m<sup>3</sup>、水固比 0.65。

(2) MgO 掺量、湿密度的增加会提高 C-LS 的凝结时间和流值，而水固比的提高会起到相反的效果；MgO 掺量为 50% 时，C-LS 在自然环境下养护，28d 强度可达到 1.18MPa，随着碳化时间增加至 5 天其强度可进一步增长，最高可达 1.86MPa。

(3) 扫描电镜结果表明，C-LS 内部主要碳化产物是三水碳镁石、水碳镁石和球碳镁石，随着碳化时间增加，C-LS 碳化程度越高，生成的碳化产物越多，

水碳镁石和球碳镁石向三水碳镁石的转化率越高。碳化时间的延长会促进 C-LS 孔隙变得更加致密，宏观表现为强度提高。

(4) 热重试验结果表明，最优配比的 C-LS 在环境条件下 28d 龄期可固碳 65kg/m<sup>3</sup>，而在用加速碳化条件模拟长期养护的情况下最多可固碳 160kg/m<sup>3</sup>，具有很大的固碳潜力。

## 参考文献：

- [1] YOUSSEF M B, LAVERGNE F, SAB K, et al. Upscaling the elastic stiffness of foam concrete as a three-phase composite material [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 110: 13-23.
- [2] YUANLIANG X, CHAO Z, CHUN C, et al. Effect of superabsorbent polymer on the foam-stability of foamed concrete [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2022, 127: 104398.
- [3] ZHOU D, GAO H, LIAO H, et al. Enhancing the performance of foam concrete containing fly ash and steel slag via a pressure foaming process [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 329: 129664.
- [4] 陈忠平, 王树林. 气泡混合轻质土及其应用综述 [J]. *中外公路*, 2003(5): 117-20. (CHEN Zhongping, WANG Shulin. Foamed cement banking soil and its application [J]. *Journal of China & Foreign Highway*, 2003, 23(5): 117-120. (in Chinese))
- [5] YANG S, YAO X, LI J, et al. Preparation and properties of ready-to-use low-density foamed concrete derived from industrial solid wastes [J]. *Constr Build Mater*, 2021, 287: 122946.
- [6] MALAI A, YOUWAI S, WATCHARASAWA K, et al. Bridge approach settlement mitigation using expanded polystyrene foam as light backfill: Case study and 3D simulation [J]. *Transportation Geotechnics*, 2022, 35: 100794.
- [7] SHI X, HUANG J, SU Q. Experimental and numerical analyses of lightweight foamed concrete as filler for widening embankment [J]. *Constr Build Mater*, 2020, 250: 118897.
- [8] 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 Guanghua. Experimental and application studies on soft soil carbonated and stabilized by reactive magnesia [D]. Nanjing: Southeast University, 2017. (in Chinese))
- [9] DUNG N T. Development of MgO concrete with enhanced hydration and carbonation mechanisms [J]. *Cement and Concrete Research*, 2018, 103: 160-9.
- [10] DUNG N T, UNLUER C. Carbonated MgO concrete with improved performance: The influence of temperature and

- hydration agent on hydration, carbonation and strength gain [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2017, 82: 152-64.
- [11] ZHANG R, ARRIGONI A, PANESAR D K. Could reactive MgO cement be a green solution? The effect of CO<sub>2</sub> mineralization and manufacturing route on the potential global warming impact [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 124: 104263.
- [12] HARRISON J, PTY T, LTD, et al. The Case for and Ramifications of Blending Reactive Magnesia with Portland Cement The Case for and Ramifications of Blending Reactive Magnesia with Portland Cement [J]. 2002.
- [13] 刘松玉, 蔡光华. 碳化固化软弱土理论与技术 [M]. 北京: 科学出版社, 2021. (LIU Songyu, CAI Guanghua. *The Theory and Technology of Carbonation and Solidification for Soft Soils*[M]. Beijing: Science Press, 2021. (in Chinese))
- [14] 郑旭, 刘松玉, 蔡光华, 等. 活性 MgO 碳化固化土的干湿循环特性试验研究 [J]. *岩土工程学报*, 2016, 38(2): 297-304. (ZHENG Xu, Liu Songyu, CAI Guanghua, et al. Experimental study on drying-wetting properties of carbonated reactive MgO-stabilized soils[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2016, 38(2): 297-304. (in Chinese))
- [15] 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): 148-55. (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))
- [16] 易耀林. 基于可持续发展的搅拌桩新技术与理论 [D]. 南京: 东南大学, 2013. (Yi yaolin. *Sustainable novel deep mixing methods and theory*[D]. Nanjing: Southeast University, 2013. (in Chinese))
- [17] Cai G, Liu S, Du yan, et al. Strength and deformation characteristics of carbonated reactive magnesia treated silt soil [J]. *Journal of Central South University*, 2015, (5): 1859-1868.
- [18] 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): 1543-1563. (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))
- [19] 公路土工试验规程: JTG E40-2007 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2007. (Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG E40-2007 [S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [20] 曹菁菁. 活性氧化镁碳化固化土微观机理及应用研究 [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))
- [21] HAY R, CELIK K. Accelerated carbonation of reactive magnesium oxide cement (RMC)-based composite with supercritical carbon dioxide (scCO<sub>2</sub>) [J]. *Journal of Cleaner Production*, 2020, 248: 119282.
- [22] LEI W, LIANG C, PROVIS J L, et al. Accelerated Carbonation of Reactive MgO and Portland Cement Blends Under Flowing CO<sub>2</sub> Gas [J]. *Cement and Concrete Composites*, 2019, 106.
- [23] 公路路基设计规范: JTG D30-2015 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2015. (Specifications for Design of Highway Subgrades: JTG D30-2015[S]. Beijing: China Communications Press, 2015. (in Chinese))
- [24] HOANG T, DUNG N T, UNLUER C, et al. Use of microbial carbonation process to enable self-carbonation of reactive MgO cement mixes [J]. *Cement and Concrete Research*, 2021, 143: 106391.
- [25] DUNG N T, UNLUER C. Performance of reactive MgO concrete under increased CO<sub>2</sub> dissolution [J]. *Cement and Concrete Research*, 2019, 118: 92-101.
- [26] LI Z, HUA Y, CHANG Z, et al. Hydration, carbonation and strength development of reactive MgO cement blended with lime (CaO) under different curing conditions [J]. *J Build Eng*, 2023, 76: 1070