

电石渣/矿粉泡沫轻质土性能研究

刘杰民¹, 殷现宾², 张宝华¹, 杨青原¹, 李辉³, 谭飞¹

¹济青高速铁路有限公司, 山东 济南

²中铁上海工程局集团有限公司第七分公司, 陕西 西安

³山东大学齐鲁交通学院, 山东 济南

收稿日期: 2023年5月30日; 录用日期: 2023年6月20日; 发布日期: 2023年6月30日

摘要

泡沫轻质土作为一种轻质填料, 广泛应用于交通工程。为解决水泥能源消耗高, 碳排放量大的问题, 以电石渣/矿粉胶凝材料取代水泥制备泡沫轻质土。研究了电石渣/矿粉泡沫轻质土的抗压强度、弯拉强度、抗冻融性能以及水化产物。结果表明: 电石渣/矿粉泡沫轻质土抗压强度满足工程需要, 且高于水泥泡沫轻质土; 各湿密度电石渣/矿粉泡沫轻质土在30次冻融循环内强度损失均小于25%, 质量损失均小于5%, 抗冻融性能良好。

关键词

泡沫轻质土, 矿粉, 电石渣, 抗压强度

Study on the Properties of Carbide Slag/Ground Granulated Blast Furnace Slag Foam Concrete

Jiemin Liu¹, Xianbin Yin², Baohua Zhang¹, Qingyuan Yang¹, Hui Li³, Fei Tan¹

¹Jiqing High Speed Railway Co., Jinan Shandong

²The 7th Branch of China Railway Shanghai Engineering Bureau Group Co., Xi'an Shaanxi

³School of Qilu Transportation, Shandong University, Jinan Shandong

Received: May 30th, 2023; accepted: Jun. 20th, 2023; published: Jun. 30th, 2023

Abstract

Foam concrete is widely used in transportation engineering as a light weight filler. To solve the problems of high energy consumption and carbon emission of cement, Carbide Slag/Ground Gra-

nulated Blast Furnace Slag cementitious material was used to replace cement to prepare foam concrete. The compressive strength, flexural tensile strength, freeze-thaw resistance and hydration products of Carbide Slag/Ground Granulated Blast Furnace Slag foam concrete were studied. It is found that the compressive strength of Carbide Slag/Ground Granulated Blast Furnace Slag foam concrete meets the engineering needs and is higher than that of cement foam concrete; the strength loss of Carbide Slag/Ground Granulated Blast Furnace Slag foam concrete is less than 25% and the mass loss is less than 5% in 30 freeze-thaw cycles for each wet density, and the freeze-thaw resistance is good.

Keywords

Foam Concrete, Ground Granulated Blast Furnace Slag, Carbide Slag, Compressive Strength

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

本泡沫轻质土是采用物理方法将发泡剂制备成泡沫，再将泡沫加入到由胶凝材料、水、掺合料制备成的混合浆料中搅拌均匀，经养护后形成的一种含有大量均匀封闭微气孔的轻质材料。泡沫轻质土具有质轻高强、强度可调节、硬化后自立性好、耐久性良好等优点，能够缩短工期，是交通基础设施中常用的一种轻质路基填料[1] [2] [3]。

水泥是泡沫轻质土最常使用的胶凝材料。但水泥生产存在资源需求大、能源消耗高、碳排放量高及经济成本高的问题。此外，矿粉、电石渣等工业固废的堆存占用了大量的土地资源并对环境造成污染。采用矿粉和电石渣作为胶凝材料替代水泥制备泡沫轻质土能够有效解决上述问题。矿粉是在高炉炼铁过程中的副产品，具有微弱水硬性。电石渣是聚氯乙烯(PVC)生产中的电石水解生成乙炔气后的废渣，具有高碱性(pH > 12)，长期堆放会严重侵蚀土壤并且会污染水源。目前已有研究表面，电石渣可以激发矿粉形成具有一定强度的胶凝材料[4] [5]，并有应用于固化软土[6]，稳定黏土[7]，疏浚稳定污泥[8]，作回填料[9]等研究，然而关于使用电石渣激发矿粉取代水泥制备泡沫轻质土还未有相关研究的报道。

本文以矿粉和电石渣为材料制备泡沫轻质土，揭示了湿密度对其无侧限抗压强度、弯拉强度的影响规律，研究了冻融循环条件下泡沫轻质土的强度及质量损失规律。研究结果为电石渣-矿粉泡沫轻质土的应用与推广提供理论基础。

2. 实验

2.1. 原材料与配合比

本原材料包括 S95 级矿粉和电石渣。按照《用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T18046-2017) [10]试验测得了矿粉的技术指标(见表 1)。电石渣在真空烘箱中以 105℃烘干 24 h，研磨后过 325 目筛备用。采用 XRF 试验得到矿粉和电石渣的元素含量(见表 2)，采用 X 射线衍射分析(XRD)得到两种原材料的 X 射线衍射图谱(见图 1)。可见，电石渣的主要成分为 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，矿粉中含有玻璃体成分，具有一定活性。

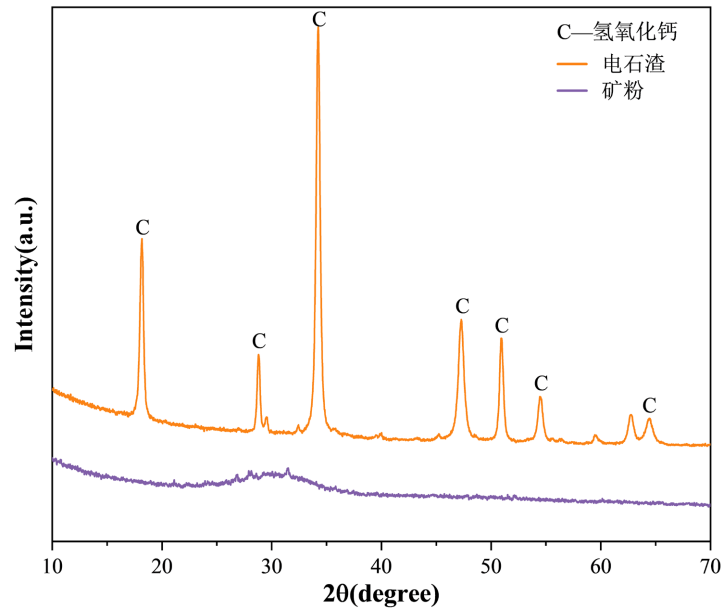
使用复合型发泡剂，稀释倍率 50，发泡倍率 800~1000 倍，标准泡沫密度为 40 kg/m^3 。

Table 1. Technical index of GGBFS**表 1.** 矿粉技术指标

密度(g/cm ³)	比表面积(m ² /kg)	含水量(%)	三氧化硫(%)	流动度比(%)	烧失量	7 d 活性指数	28 d 活性指数
2.86	427	0.02	0.22	98	0.05	92	101

Table 2. Chemical composition of GGBFS and CS**表 2.** 矿粉和电石渣化学组成

化学成分(wt%)	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	SO ₃	Fe ₂ O ₃	K ₂ O	Na ₂ O	其它
矿粉	39.06	31.83	14.7	8.72	2.83	0.4	0.38	0.31	1.77
电石渣	88.09	3.13	1.91	0.21	5.77	0.44	0.03	-	0.42

**Figure 1.** X-ray diffraction patterns of GGBFS and CS**图 1.** 矿粉和电石渣 X 射线衍射图谱

试验设置电石渣与矿粉的质量分数为 1:9, 按照《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T177-2012) [11] 设计了 4 组不同湿密度的配合比, 各材料成分比例如表 3 所示。

Table 3. Mix proportion of CS/GGBFS foam concrete**表 3.** 电石渣/矿粉泡沫轻质土配合比

设计湿密度(kg/m ³)	矿粉用量(kg/m ³)	电石渣用量(kg/m ³)	水用量(kg/m ³)	泡沫用量(kg/m ³)
600	304.0	33.8	236.5	25.7
700	369.0	41.0	266.5	23.5
800	431.3	47.9	299.6	21.2
900	495.6	55.1	330.4	18.9

2.2. 试件制备

首先, 将试验用水和电石渣加入搅拌机内, 搅拌均匀, 随后边搅拌边加入矿粉, 整个过程低速搅拌,

并在 90 s 内完成；加料完成后，高速搅拌 90 s；将发泡剂与水按 1:50 比例稀释，并利用发泡机发泡；向浆体中加入泡沫，掺加泡沫过程中低速搅拌；待所需泡沫全部加入后，再低速搅拌 30 s；将浆料倒入模具中成型，用塑料薄膜覆盖住模具顶面，放置于标准养护室中养护 48 h。脱模后将泡沫轻质土试块密封并放置到标准养护室中养护直至试验龄期。

2.3. 试验方法

参考《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T177-2012)，泡沫轻质土浆料倒入模具前，测量浆料的流动度及湿密度，测量三次并取平均值作为泡沫轻质土的湿密度。采用万能试验机以 (2.0 ± 0.5) kN/s 的加载速率测试不同龄期下试块的无侧限抗压强度，以 (0.20 ± 0.05) kN/s 的加载速率测试四点弯拉强度，并分别取 3 块试块强度值的算术平均值作为对应的无侧限抗压强度和四点弯拉强度。

取抗压强度测试后较为完整的碎块，将其敲碎后选取内部少许小块，用研钵加异丙醇溶液研磨，研磨后置于真空烘箱中以 40℃ 保存，取试样粉末过 180 目筛，进行 TGA 测试。采用德国耐驰 STA 499C 热重分析仪以 10℃/min 的速率加热分析，测试范围 30℃~1000℃。

冻融循环试验共制备了 24 个试块，其中 3 块在未进行冻融循环试验时烘干至恒质后测其干密度及无侧限抗压强度，其余的放入冻融箱分别进行 5、10、15、20、25、30 次冻融循环，留有 3 块备用，冻融试验参照《蒸压加气混凝土性能试验方法》(GB/T 11969-2008) [12] 进行。首先将试块浸入水温为 (20 ± 5) ℃ 的恒温水槽中，保持 48 h，取出试块用湿布抹去表面水分，放入预先降温至-15℃ 以下的低温箱中，试块间距不小于 20 mm；当温度降至-18℃ 时立即记录时间，在 (-20 ± 2) ℃ 下冻 6 h 取出，放入水温为 (20 ± 5) ℃ 的恒温水槽中，融化 5 h，以上为一次冻融循环，直至达到冻融循环次数为止，将试块放入电热鼓风干燥箱内，在 (60 ± 5) ℃ 下保温 24 h，然后在 (80 ± 5) ℃ 下烘干至恒质。试块冷却至室温后，立即称取质量及外观尺寸，冻融过程中若发现试块呈明显的破坏，应停止冻融试验并记录冻融次数。将经干燥处理后的冻融试块进行抗压强度试验。

3. 结果与讨论

3.1. 电石渣/矿粉泡沫轻质土工作性能

流动度和湿密度试验结果见表 4。由表可知，各设计湿密度下泡沫轻质土的流动度均在 160~200 mm 之间，满足《气泡混合轻质土填筑工程技术规程》(CJJ/T177-2012) 的要求，其流动度表现为随着湿密度的增加而增大，这是因为泡沫不利于浆体的流动，随湿密度增大，泡沫量减少。实测湿密度与设计湿密度的误差均小于±3%，说明泡沫轻质土制备过程中未出现严重的消泡和离析[13]。

Table 4. Determination of working properties of CS/GGBFS foam concrete

表 4. 电石渣/矿粉泡沫轻质土工作性能测定

设计湿密度(kg/m ³)	实测湿密度(kg/m ³)	误差(%)	流值(mm)
600	609	1.5	167
700	691	-1.29	171
800	801	0.13	179
900	890	-1.11	188

3.2. 无侧限抗压强度

电石渣/矿粉泡沫轻质土的无侧限抗压强度试验结果如图 2 所示。泡沫轻质土 28 d 无侧限抗压强度最

小值为 2.76 MPa，最大值可达到 5.59 MPa。与硅酸盐水泥泡沫轻质土[2]对比发现，相同设计湿密度材料的抗压强度相差不大，但矿粉和电石渣具有更好的经济性和环境友好性。

可以看出，泡沫轻质土在各龄期下的无侧限抗压强度与湿密度呈一次函数关系，即随湿密度增大，无侧限抗压强度增长。这是因为湿密度较小时，泡沫轻质土的孔隙率较大，且内部多为孔径较大的连通孔隙，受压时孔隙容易破坏，致使抗压强度较低。而随着湿密度的增大，泡沫轻质土内部孔隙减少且孔径较小，孔隙分布均一密实，抗压强度也相应较大。随着龄期的延长，拟合曲线越陡，而随着密度的增大，各龄期的无侧限抗压强度相差越大，表明泡沫轻质土的密度越低，其强度发展越快，即早期强度越高。

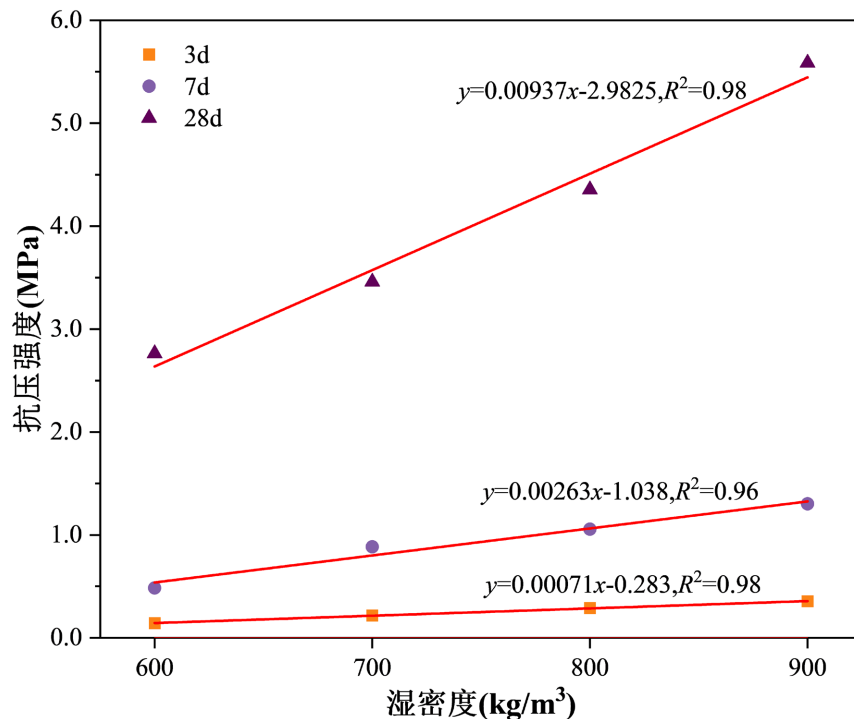


Figure 2. Relationship between wet density and compressive strength of foam concrete
图 2. 湿密度与泡沫轻质土无侧限抗压强度关系

3.3. 弯拉强度

电石渣/矿粉泡沫轻质土的弯拉强度试验结果如图 3 所示。28 d 弯拉强度均大于 0.32 MPa，弯拉强度与湿密度呈线性关系，随着设计湿密度的增大而增大，湿密度为 700 kg/m³、800 kg/m³、900 kg/m³ 时 28 d 弯拉强度分别是湿密度为 600 kg/m³ 抗压强度的 1.070 倍、1.116 倍、1.256 倍。

3.4. 抗冻融性能

图 4 为 30 次冻融循环条件下电石渣/矿粉泡沫轻质土的质量变化情况，各设计湿密度的试件在 30 次冻融循环内的质量损失均保持在 5% 以内。试件的质量损失主要表现为试块表面的剥落，不同湿密度的泡沫轻质土的抗冻融性能良好。

图 5 所示为 30 次冻融循环条件下电石渣/矿粉泡沫轻质土的抗压强度变化情况，湿密度为 600 kg/m³、700 kg/m³、800 kg/m³ 的试件在 30 次冻融循环内其强度损失都在 25% 以内，900 kg/m³ 的试件抗压强度整体上呈现增长趋势。随着湿密度的增大，抗压强度的损失减小，这可能是因为泡沫轻质土湿密度较大时

其孔隙率较小，结构较为致密，另一方面泡沫轻质土强度仍在发展，其强度增长的部分抵消了冻融循环的影响。综合强度变化和质量损伤，所设计的不同湿密度的泡沫轻质土 30 次冻融后均满足规范要求，具有良好的抗冻性。

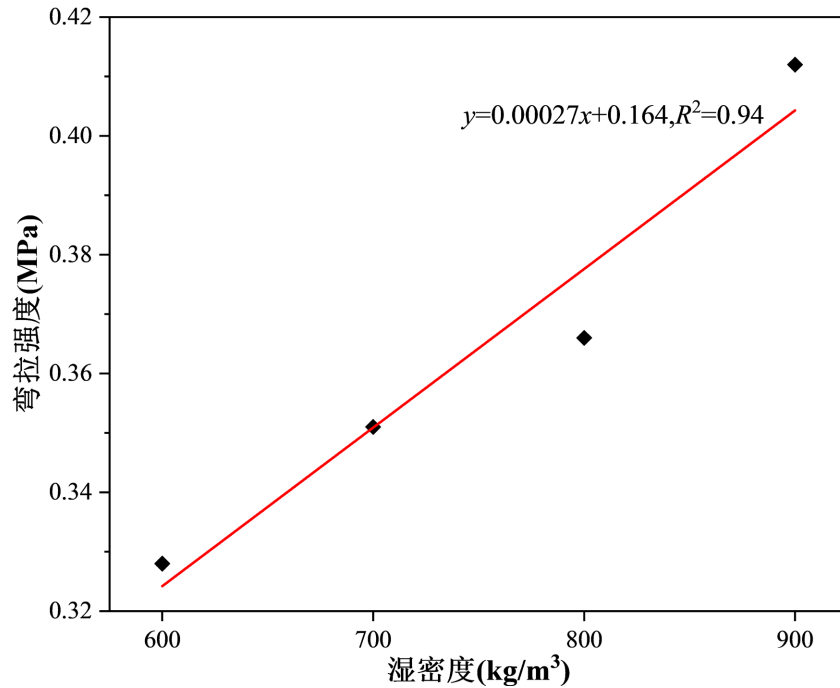


Figure 3. Relationship between wet density and flexural strength of foam concrete

图 3. 湿密度与泡沫轻质土弯拉强度关系

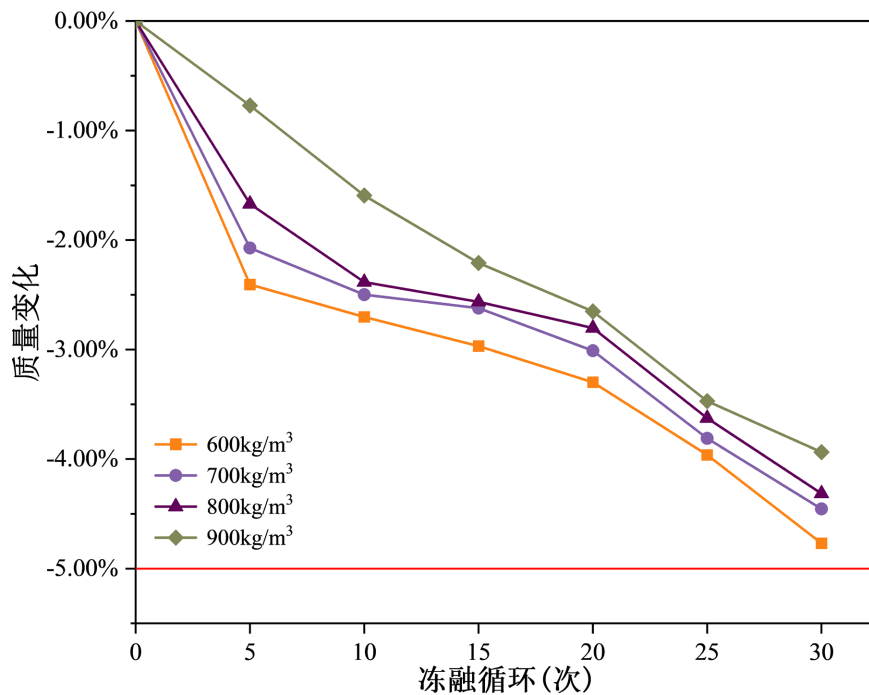


Figure 4. Relationship between the number of freeze-thaw cycles and mass loss of foam concrete

图 4. 冻融循环次数与泡沫轻质土质量变化关系

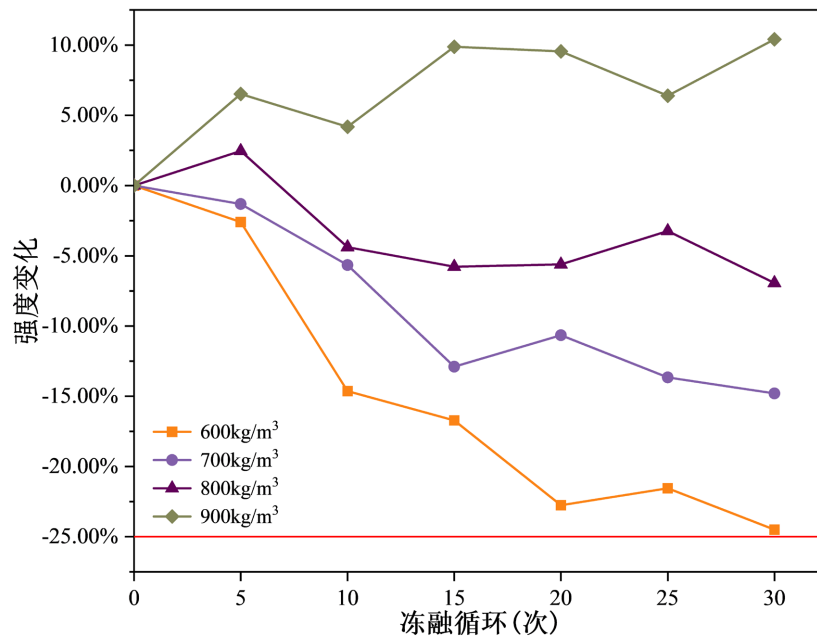


Figure 5. Relationship between the number of freeze-thaw cycles and strength loss of foam concrete
图 5. 冻融循环次数与泡沫轻质土强度变化关系

3.5. 热重分析

图 6 是电石渣/矿粉泡沫轻质土 7 d 和 28 d 的 TG-DTG 曲线。可以观测到两个质量损失峰: 50℃~500℃ 为钙矾石和水化硅酸钙的质量损失峰; 350℃~500℃ 代表氢氧化钙的质量损失峰。28 天的水化产物含量明显高于 7 天。同时, 水化产物峰值随水化天数增加向高温偏移, 化学结合水与水化产物的结合更加稳固, 说明水化产物的结构更加稳定。基于 Karen 等[14]提出的计算方法对主要水化产物结合水含量及 Ca(OH)₂ 含量进行计算(见式(1)、式(2)), 其计算结果如表 5 所示, 当水化至 28 d 时, 矿粉与电石渣反应生成产物的化学结合水含量比 7 d 多 1.44%, Ca(OH)₂ 含量比 7 d 时多 0.51%, 表明水化产物增多。

主要水化产物结合水含量 H_2O_{bound}

$$H_2O_{\text{bound}} = W_{50^\circ\text{C}} - W_{500^\circ\text{C}} \quad (1)$$

式中, H_2O_{bound} ——硬化浆体中水化产物结合水的含量, %; $W_{50^\circ\text{C}}$ ——试样在 50℃ 时的质量分数, %; $W_{500^\circ\text{C}}$ ——试样在 500℃ 时的质量分数, %。

$$W_{\text{CH}} = \frac{WL_{\text{CH}} \times \frac{74}{18}}{\left[(1 - H_2O_{\text{bound}}) \times (1 + w/c) \right]} \quad (2)$$

式中, W_{CH} ——硬化浆体中 Ca(OH)₂ 的含量, %; WL_{CH} ——Ca(OH)₂ 分解引起的失重, %; w/c ——水胶比。

Table 5. The content of chemical bonding water and Ca(OH)₂ in CS/GGBFS hardened pastes at 7 d and 28 d
表 5. 电石渣/矿粉水化 7 d 和 28 d 的化学结合水和 Ca(OH)₂ 含量

龄期	化学结合水含量(%)	Ca(OH) ₂ 含量(%)
7 d	7.99	6.58
28 d	9.43	7.09

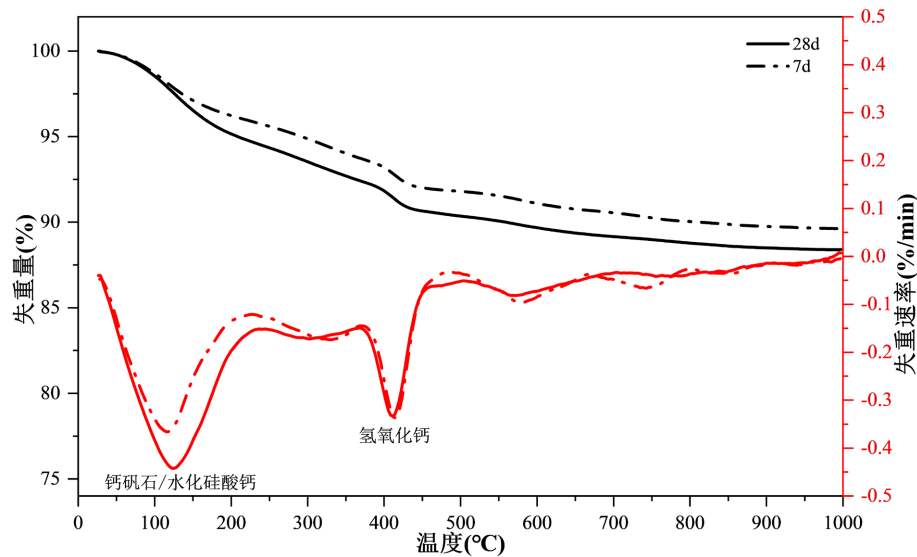


Figure 6. TG-DTG curves of CS/GGBFS hardened pastes at 7 d and 28 d

图 6. 电石渣/矿粉水化 7 d 和 28 d 的 TG-DTG 曲线

4. 结论

1) 电石渣/矿粉泡沫轻质土的流动度随着湿密度的增大而增大, 无侧限抗压强度与弯拉强度均随湿密度的增大而增大, 呈线性相关, 28 天抗压强度介于 2.76 MPa~5.59 MPa, 满足规范要求。

2) 不同设计湿密度的电石渣/矿粉泡沫轻质土在 30 次冻融循环内强度损失均小于 25%, 质量损失均小于 5%, 抗冻融性能良好; 随着湿密度增大其质量损失与强度损失减小。

3) 电石渣与矿粉的反应产物是水化硅酸钙、钙矾石、氢氧化钙, 随水化时间增加, 水化产物增多。

参考文献

- [1] 欧孝夺, 彭远胜, 莫鹏, 等. 掺铝土尾矿泡沫轻质土的物理力学及水力特性研究[J]. 材料导报, 2020, 34(S1): 241-245.
- [2] Jiang, N.D., et al. (2022) Experimentally Validated Meso-Scale Fracture Modelling of Foamed Concrete. *Theoretical and Applied Fracture Mechanics*, **122**, Article ID: 103631. <https://doi.org/10.1016/j.tafmec.2022.103631>
- [3] Shi, X., Huang, J. and Su, Q. (2020) Experimental and Numerical Analyses of Lightweight Foamed Concrete as Filler for Widening Embankment. *Construction and Building Materials*, **250**, Article ID: 118897. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2020.118897>
- [4] Li, W. and Yi, Y. (2020) Use of Carbide Slag from Acetylene Industry for Activation of Ground Granulated Blast-Furnace Slag. *Construction and Building Materials*, **238**, Article ID: 117713. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117713>
- [5] 万宗华, 张文芹, 刘志超, 等. 电石渣-矿渣复合胶凝材料性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1704-1714.
- [6] Yi, Y.L., et al. (2015) Alkali-Activated Ground-Granulated Blast Furnace Slag for Stabilization of Marine Soft Clay. *Journal of Materials in Civil Engineering*, **27**, Article ID: 04014146. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)MT.1943-5533.0001100](https://doi.org/10.1061/(ASCE)MT.1943-5533.0001100)
- [7] Li, W.T., Yi, Y.L. and Puppala, A.J. (2022) Comparing Carbide Sludge-Ground Granulated Blastfurnace Slag and Ordinary Portland Cement: Different Findings from Binder Paste and Stabilized Clay Slurry. *Construction and Building Materials*, **321**, Article ID: 126382. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2022.126382>
- [8] Lang, L., Chen, B. and Li, N. (2020) Utilization of Lime/Carbide Slag-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag for Dredged Sludge Stabilization. *Marine Georesources & Geotechnology*, **39**, 659-669. <https://doi.org/10.1080/1064119X.2020.1741050>
- [9] Feng, Y.B., et al. (2022) Mechanical Properties and Microstructure of Iron Tailings Cemented Paste Backfills Using

Carbide Slag-Activated Ground Granulated Blast-Furnace Slag as Alternative Binder. *Minerals*, **12**, Article No. 1549.
<https://doi.org/10.3390/min12121549>

- [10] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 18046-2017 用于水泥、砂浆和混凝土中的粒化高炉矿渣粉[S]. 北京: 中国质检出版社, 2017: 16.
- [11] 广东冠生土木工程技术有限公司, 等. CJJ/T 177-2012 气泡混合轻质土填筑工程技术规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2012: 92P, B5.
- [12] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局. GB/T 11969-2008 蒸压加气混凝土性能试验方法[S]. 北京: 中国质检出版社, 2008: 20
- [13] 袁化强, 朱登元, 张宏庆, 等. 三轴应力条件下泡沫轻质土压缩特性[J]. 硅酸盐通报, 2020, 39(10): 3379-3385.
- [14] Scrivener, K., Snellings, R. and Lothenbach, B. (2016) A Practical Guide to Microstructural Analysis of Cementitious Materials. CRC Press, Boca Raton.