

# 水泥稳定石墨尾矿砂的路用性能试验研究

李智民, 徐钦, 王泽磊, 李思瑶, 王福彤\*

(黑龙江大学 建筑工程学院, 黑龙江 哈尔滨 150080)

**摘要:** 石墨尾矿大量堆积引发了一系列的危害, 包括环境污染、水资源受损以及地质灾害风险增加等。使用水泥稳定石墨尾矿砂作为路基材料, 不仅可以提高石墨尾矿砂的综合利用率, 还可以降低施工成本。本文探讨了水泥掺量对水泥稳定石墨尾矿砂抗压强度和抗冻性能的影响。结果表明: 水泥稳定石墨尾矿砂试件的抗压强度随着水泥掺量的增加而增加; 当水泥掺量为7%时, 水泥稳定石墨尾矿砂试件7d龄期的抗压强度达到了2.61 MPa; 随着冻融循环次数的增加, 水泥稳定石墨尾矿砂试件的质量损失率逐渐增大, 抗压强度逐渐减小; 水泥掺量越大, 水泥稳定石墨尾矿砂试件抵抗冻融的能力就越强。研究结果可为中国东北地区使用水泥稳定石墨尾矿砂作为路基材料提供参考。

**关键词:** 石墨尾矿砂; 水泥; 路基材料; 含水率; 强度性能; 冻融循环

中图分类号: U416

文献标识码: A

文章编号: 2096-7195(2024)S1-0001-06

## Experimental research on road performance of graphite tailings sand stabilized with cement

LI Zhi-min, XU Qin, WANG Ze-lei, LI Si-yao, WANG Fu-tong\*

(School of Civil Engineering, Heilongjiang University, Harbin 150080, Heilongjiang, China)

**Abstract:** The accumulation of graphite tailings has brought a series of hazards, including environmental pollution, water resource damage, and increased risk of geological disasters. Using cement-stabilized graphite tailings sand as a subgrade material not only enhances the comprehensive utilization of graphite tailings sand, but also reduces construction costs. This study investigates the impact of cement content on the compression strength and freeze-thaw resistance of cement-stabilized graphite tailings sand. The results show that the compression strength of cement-stabilized graphite tailings sand specimens increases with the cement content. When the cement content is 7%, the 7-day compression strength of the cement-stabilized graphite tailings sand specimens reaches 2.61 MPa. With the increase of freeze-thaw cycles, the mass loss rate of the cement-stabilized graphite tailings sand specimens gradually increases, while their compression strength gradually decreases. The higher the cement content, the stronger the freeze-thaw resistance of the cement-stabilized graphite tailings sand specimens. The research findings can serve as a reference for using cement-stabilized graphite tailings sand as a subgrade material in Northeast China.

**Key words:** graphite tailings sand; cement; subgrade material; water content; strength properties; freeze-thaw cycles

## 0 引言

石墨尾矿是石墨矿选矿工艺后产生的固体废弃物。据统计, 每开采1t石墨就会产生10~15t石墨尾矿<sup>[1]</sup>。由于石墨矿开采量逐年增加, 导致产生了大量的石墨尾矿。石墨尾矿的传统处置措施是将它们堆放在尾矿库中。石墨尾矿大量堆积不仅污染环境, 还侵占了大量的耕地, 给周围的水域生态带

来了一定的安全隐患。因此, 石墨尾矿的环保处理和综合利用方法逐渐成为研究重点。

目前, 石墨尾矿综合利用的主流研究方向是利用石墨尾矿制备建筑材料。例如, 白志民等<sup>[2]</sup>开展了利用石墨尾矿制备烧结砖的相关实验, 对其烧成收缩率与制品吸水率、抗压强度的关系以及烧结机理进行了总结分析。张卫卫等<sup>[3]</sup>将石墨尾矿作为主要原料, 辅以适量黏土和煤泥制备烧结砖, 对烧结砖泛

收稿日期: 2024-05-01

作者简介: 李智民(1999—), 男, 吉林白山人, 硕士研究生, 助理工程师, 主要从事环境岩土工程方向的研究工作。E-mail: 2222760@s.hjju.edu.cn。

\*通信作者: 王福彤(1972—), 男, 黑龙江七台河人, 博士, 教授, 主要从事岩土工程方向的研究工作。E-mail: wangfutong@hjju.edu.cn。

霜现象进行了研究。陈宝海等<sup>[4]</sup>研究了温度对以黑龙江石墨尾矿为主要原料的陶瓷砖性能的影响。吴建锋等<sup>[5]</sup>利用石墨尾矿为主要原料制备太阳能热发电中温储热陶瓷,对其吸水率、抗折强度以及抗热震性等进行了试验研究。刘洪波等<sup>[6]</sup>将石墨尾矿掺到混凝土中,制备智能混凝土,对其压敏特性进行了试验研究。陶冬冬<sup>[7]</sup>研究了钢纤维对石墨尾矿混凝土基本力学性能的影响,进一步通过冻融试验研究了钢纤维石墨尾矿混凝土的抗冻性。孙小巍等<sup>[8]</sup>利用石墨尾矿作为硅质材料制备石墨尾矿蒸压加气混凝土,对其干密度、抗压强度以及微观形貌进行了相关试验研究。利用石墨尾矿代替部分砂制备石墨尾矿混凝土<sup>[9-14]</sup>是目前比较热门的研究,这无疑是减少环境危害的有效途径。这些研究多以石墨尾矿替代砂的置换率等影响因素导致石墨尾矿混凝土的力学性能变化为切入点,同时揭示了石墨尾矿替代砂的机理,为环保混凝土中的其他尾矿提供了新的分析思路。特别的, XUE 等<sup>[1]</sup>研究了不同影响因素对石墨尾矿混凝土电阻率的影响,他们的试验结果表明,外加电压、测量电极和固化时间均对电阻率的测量结果有显著影响。

然而,目前利用石墨尾矿作为道路基础替代材料的相关报道较少。已有研究表明,很多类型的尾矿都可以作为道路基础替代材料,例如菱镁尾矿<sup>[15]</sup>、铁尾矿<sup>[16]</sup>、磷尾矿<sup>[17]</sup>等。使用石墨尾矿作为道路基础替代材料,不仅可以提高石墨尾矿的综合利用率,又可以解决公路修筑时原材料的来源,降低公路造价。

本文将通过击实试验、无侧限抗压强度试验、冻融循环试验研究水泥掺量对水泥稳定石墨尾矿砂强度性能的影响。研究结果可为使用水泥稳定石墨尾矿砂作为路基材料提供参考。

## 1 材料与方法

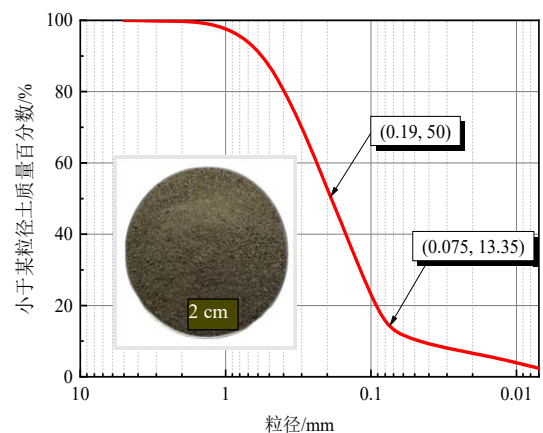
### 1.1 试验材料

试验材料包括石墨尾矿砂、水泥和自来水。试验所用石墨尾矿砂来自黑龙江省鸡西市某石墨尾矿库。根据我国现行的《公路土工试验规程》(JTG 3430—

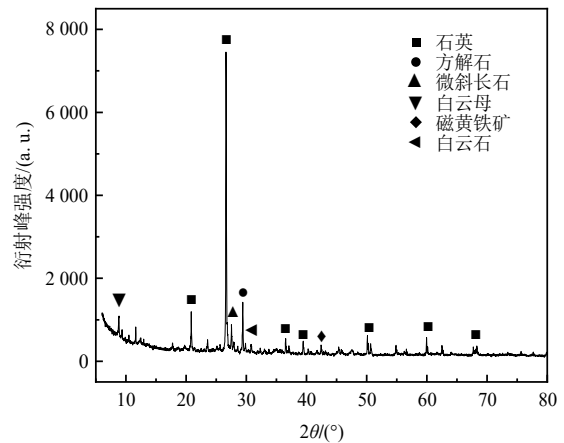
2020)<sup>[18]</sup>,测试了该石墨尾矿砂的物理性质,结果如表 1 所示。采用激光粒度分析测定了石墨尾矿砂的颗粒级配,结果如图 1(a)所示;使用 X 射线衍射(XRD)对石墨尾矿砂进行了物相和定量分析,结果如图 1(b)所示。试验所用水泥为普通硅酸盐水泥(P.O 42.5)。通过 X 射线荧光光谱对石墨尾矿砂和水泥的化学成分进行分析,结果如表 2 所示。

表 1 石墨尾矿砂的物理性质指标

表观密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	堆积密度/ (kg/m <sup>3</sup> )	24 h 吸 水率/%	细度 模量	pH 值	不均匀 系数 C <sub>u</sub>	曲率系 数 C <sub>c</sub>
2 855	1 540	36.7	0.90	10.0	5.2	1.3



(a) 颗粒级配



(b) XRD 图谱

图 1 石墨尾矿砂的颗粒级配曲线和 XRD 图谱

Fig. 1 Particle size distribution and XRD patterns of graphite tailings sand

表 2 石墨尾矿砂和水泥的化学成分

Table 2 Chemical composition of graphite tailings sand and cement

类别	不同化学成分含量/%							
	CaO	SiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	SO <sub>3</sub>	K <sub>2</sub> O	其它
石墨尾矿砂	15.55	62.50	5.07	10.21	2.33	0.54	2.26	1.54
水泥	59.64	22.68	4.07	4.70	4.03	3.08	1.15	0.65

## 1.2 试验方法

### (1) 试样配合比设计

本试验的目的是为了研究水泥掺量对水泥稳定石墨尾矿砂强度性能的影响。试验由 4 个小组组成。根据预试验结果, 本试验选择的水泥掺量分别为 4%、5%、6% 和 7%, 试验设计如表 3 所示。在每个小组中, 制备了 6 个平行试件。

表 3 试验设计表

Table 3 Experimental design table

小组	水泥掺量/%	含水率/%	养护龄期/d	冻融循环次数
H01	4	3.83	7	5
L01	4	9.37	7	2
H02	5	6.78	7	8
L02	5	10.15	7	8
H03	6	6.24	7	8
L03	6	10.16	7	8
H04	7	5.14	7	8
L04	7	9.60	7	8

### (2) 试样制备

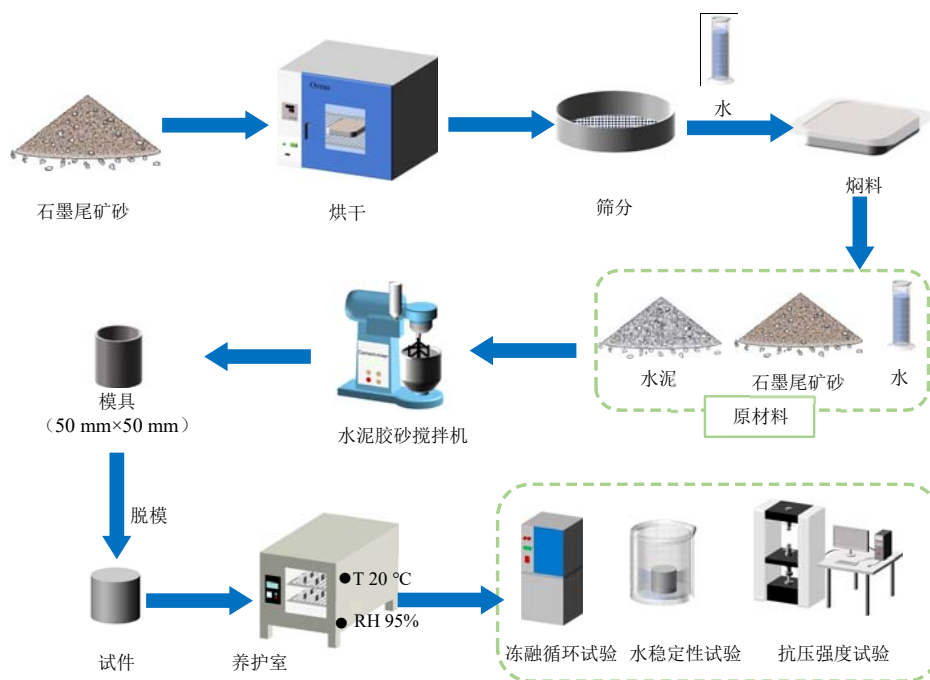


图 2 水泥稳定石墨尾矿砂试样制备及试验流程示意图

Fig. 2 Preparation and testing process of cement-stabilized graphite tailings sand samples

### (4) 无侧限抗压强度试验

采用无侧限抗压强度试验测定水泥稳定石墨尾矿砂试件的抗压强度。该试验是采用电子万能试验机 (WDW-100E) 进行的, 采用位移控制加载<sup>[19]</sup>, 加载速率设定为 1 mm/min, 并记录试件破坏时的最大压力  $P$ 。

水泥稳定石墨尾矿砂试样制备及试验流程示意图如图 2 所示。首先, 将从室外取回的石墨尾矿砂在 50 °C 的烘箱中烘干 6 h。然后, 将烘干的石墨尾矿砂通过 2 mm 标准筛。根据试验设计比例, 在石墨尾矿砂中加入相应掺量的水, 充分混合后, 将其放入塑料袋中焖料 4 h。在试件制备前 1 h, 在混合物中加入设计掺量的水泥和水, 以达到最优含水率。根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)<sup>[19]</sup>, 试件应为直径和高度均为 50 mm 的圆柱体。试件采用静压法制备成型。脱模后, 将试件放入温度为 (20±2) °C、相对湿度为 95% 以上的标准养护室中, 养护 7 d。

### (3) 击实试验

通过击实试验研究水泥稳定石墨尾矿砂的最优含水率和最大干密度, 从而确定后续试验的水泥稳定石墨尾矿砂配合比。本试验选用甲类击实方法<sup>[19]</sup>, 击实锤质量为 4.5 kg, 直径为 5.0 cm, 落高为 45 cm, 每层击实 27 次, 击实试筒内径为 10 cm、高为 12.7 cm, 容积为 997 cm<sup>3</sup>。

试件的无侧限抗压强度按照式 (1) 计算:

$$R_c = \frac{P}{A} \quad (1)$$

式中:  $R_c$  为试件的无侧限抗压强度, MPa;  $P$  为试件破坏时的最大压力, N;  $A$  为试件的截面积, mm<sup>2</sup>。

### (5) 冻融循环试验

冻融循环试验采用低温箱和控温水槽进行, 试验程序遵循《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024) [19]。取一组水泥稳定石墨尾矿砂试件, 按照编号放入低温箱开始冻融循环试验。低温箱温度设置为 $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$ , 冻结时间为 $16\text{ h}$ 。试件放置时, 保证试件周围至少留有 $2\text{ cm}$ 空隙, 以利于冷空气流通。冻结试验结束后, 将试件置于 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 水槽中进行融化试验, 水槽中水面高出试件表面 $2.5\text{ cm}$ , 融化时间为 $8\text{ h}$ 。融化完毕后, 将试件取出使用软布轻轻擦干。至此, 一次冻融循环试验结束。

## 2 试验结果分析

### 2.1 最优含水率和最大干密度

图3展示了石墨尾矿砂以及水泥掺量为4%、5%、6%和7%的水泥稳定石墨尾矿砂试件的击实曲线。由图3可知, 石墨尾矿砂及不同掺量水泥稳定石墨尾矿砂的击实曲线均为双峰值曲线。这是由于当含水率较低时, 石墨尾矿砂颗粒间摩擦阻力较大, 击实作用难以克服大部分颗粒间的阻力, 无法破坏颗粒松散堆积的一些大空隙结构, 所以干密度较低。当含水率稍高时, 石墨尾矿砂颗粒间的水膜起到了润滑的作用, 减小了颗粒间的摩擦阻力, 原本的松散结构被压密, 石墨尾矿砂颗粒重新排列密实, 由此导致了击实曲线第一峰值的出现。

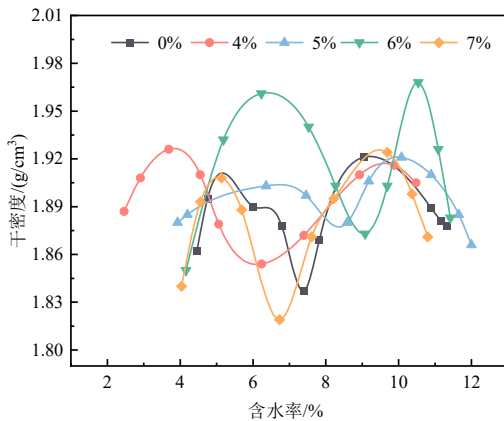


图3 不同掺量水泥稳定石墨尾矿砂试件的击实曲线

Fig. 3 Compaction curves of graphite tailings sand stabilized with different content of cement

然而由于石墨尾矿砂中含有60%左右的石英, 而水对石英类矿物的表面具有降低润滑性作用。随着含水率的增加, 水膜的润滑作用逐渐降低, 而且毛细管应力阻碍了石墨尾矿砂颗粒的移动, 这就导致了干密度的减小。

当含水率继续增大时, 石墨尾矿砂颗粒表面的结合水增多, 颗粒间距离由于结合水膜变厚而增大, 此时水对于石墨尾矿砂颗粒间的润滑作用反而增加, 颗粒间内摩擦力的降低使石墨尾矿砂颗粒更容易重新排列紧密, 细小颗粒填充大颗粒孔隙后密实度增加, 同时适当的自由水在移动时会帮助挤出空气, 减小试样内空气体积, 进一步促进干密度增加至第二峰值处的最大干密度。当含水率超过第二峰值处的含水率后, 空气体积已经被压缩至最小, 水分的体积无法压缩且持续增大, 所以石墨尾矿砂的击实曲线出现下降的趋势。

### 2.2 抗压强度

不同掺量水泥稳定石墨尾矿砂试件7d龄期的无侧限抗压强度如图4所示。根据击实试验结果, 各组的击实曲线均出现了两个峰值, 这里将第一峰值称之为低含水率, 第二峰值称之为高含水率。从图4中可以看出, 同一水泥掺量下, 高含水率试件的抗压强度明显高于低含水率试件。这是因为这部分水促进了水泥水化, 生成了更多的胶凝物质。

两种含水率下, 随着水泥掺量的增加, 试件的无侧限抗压强度均逐渐增大。低含水率时, 相比于4%水泥掺量的试件, 5%、6%和7%水泥掺量试件的无侧限抗压强度分别提高了8.62%、96.55%和102.59%。高含水率时, 相比于4%水泥掺量的试件, 5%、6%和7%水泥掺量试件的无侧限抗压强度分别提高了45.19%、89.64%和93.33%。对比可以看出, 相比于6%水泥掺量, 7%水泥掺量下试件抗压强度的提升并不明显。考虑到成本问题, 实际工程应用中可选择6%水泥掺量。

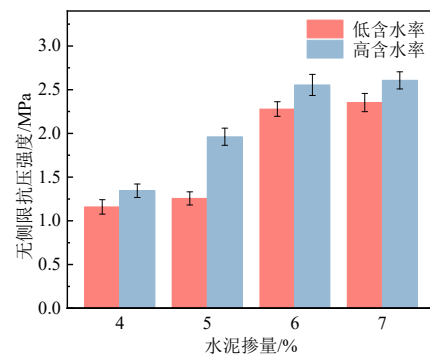


图4 不同掺量水泥稳定石墨尾矿砂试件7d龄期的无侧限抗压强度

Fig. 4 Unconfined compression strength of graphite tailings sand stabilized with different content of cement at 7 days of age

根据《公路路面基层施工技术细则》(JTG/T F20—2015) [20] 中水泥稳定材料的7d龄期无侧限



抗压强度标准, 4%水泥掺量的水泥稳定石墨尾矿砂可用作承受中、轻交通荷载的二级及二级以下公路的底基层材料 (1.0~3.0 MPa); 6%水泥掺量的水泥稳定石墨尾矿砂可用作承受中、轻交通荷载的二级及二级以下公路的基层材料 (2.0~4.0 MPa)。

### 2.3 抗冻性能

根据《公路工程无机结合料稳定材料试验规程》(JTG 3441—2024)<sup>[19]</sup>, 质量损失率  $D_n$  计算公式如下所示:

$$D_n = \frac{m_0 - m_n}{m_0} \times 100\% \quad (2)$$

式中:  $D_n$  为第  $n$  次冻融循环后质量损失百分率;  $m_0$  为冻融前试件的质量, g;  $m_n$  为第  $n$  次冻融循环后的质量, g。

图 5 为不同冻融循环次数下试件的质量损失率。由图 5 可知, L01、H01、L02 和 H02 组的累计质量损失率逐渐增大, 且增长趋势相似。尤其是 L01 组在第 4 次冻融循环后试件表面出现块状脱落现象, 质量损失率达到了 7.18%, 大于试件初始质量的 5%, 故只记录了 L01 组冻融循环 2 次的质量损失情况。H01 组在第 8 次冻融循环时, 质量损失率达到 5.42%, 超过试件初始质量的 5%, 故只记录了 H01 组冻融循环 5 次的质量损失情况。而 L03 组、H03 组、L04 组和 H04 组的质量损失率始终在 0% 左右波动。这主要是由于前期冻融循环试件的表面和内部均未发生破坏, 水分进入试件内部导致试件质量增加, 后期冻融循环时试件发生轻微破坏导致一定的质量损失, 总的质量基本维持不变。此外, 从图 5 中还可以看出, 在同一冻融循环次数下, 水泥掺量越大, 试件的质量损失率越小。这是因为水泥掺量越大, 生成的水化产物就越多, 试件的强度也就越大, 这点可以从图 4 中得到证实。

不同冻融循环次数下试件的抗压强度如图 6 所示。由图 6 可知, 随着冻融循环次数的增加, 试件的抗压强度均逐渐下降。L02、H02、L03、H03、L04 和 H04 组在第 8 次冻融循环后的抗压强度损失率分别为 29.6%、13.8%、14.9%、15.5%、7.9% 和 13.4%。由 L03、H03、L04 和 H04 组试件冻融循环后的抗压强度结果可知, 高含水率试件的抗压强度损失率低于低含水率试件的抗压强度损失率, 这是因为, 含水率高的试件内部水泥水化效果更好, 抵抗冻融的效果也就更好。

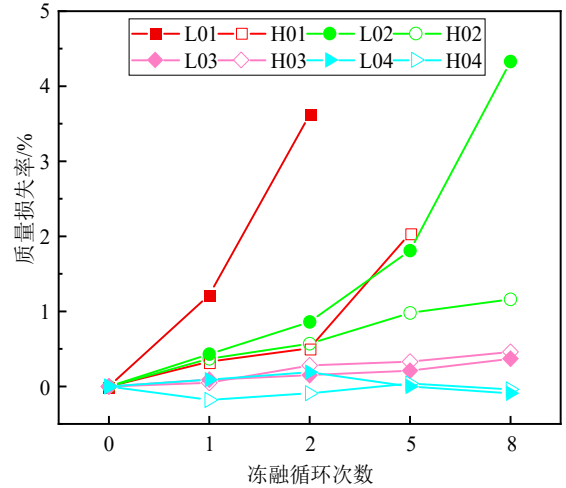


图 5 不同冻融循环次数下试件的质量损失率

Fig. 5 Mass loss rate of specimens under different numbers of freeze-thaw cycles

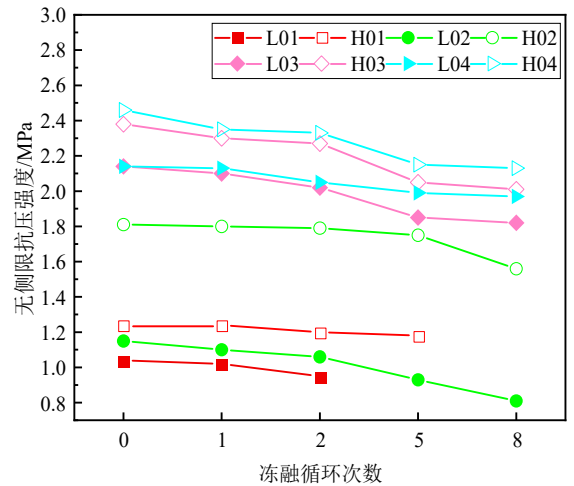


图 6 不同冻融循环次数下试件的抗压强度

Fig. 6 Compression strength of specimens under different numbers of freeze-thaw cycles

## 3 结 论

本文研究了水泥稳定石墨尾矿砂的强度性能和抗冻性能, 得到主要结论如下:

(1) 击实试验结果表明, 石墨尾矿砂及水泥稳定石墨尾矿砂的击实曲线均为双峰值曲线。

(2) 无侧限抗压强度试验结果表明, 水泥稳定石墨尾矿砂试件的抗压强度随着水泥掺量的增加而增加。

(3) 冻融循环试验结果表明, 水泥掺量越高, 水泥稳定石墨尾矿砂的质量损失率越小。此外, 高含水率试件的抗压强度损失率低于低含水率试件的抗压强度损失率。

综上, 水泥稳定石墨尾矿砂作为一种新型的路基材料, 兼具环保效益和经济效益, 符合可持续发

展的要求。通过科学的配比和合理的施工工艺,可以有效提升其力学性能和耐久性,广泛应用于道路建设中。未来,可加强技术研发、政策支持和应用推广,推动这种新型材料的普及和应用,实现资源的高效利用和环境保护的双重目标。

## 参考文献

- [1] XUE J, WANG X M, WANG Z R, et al. Investigations on influencing factors of resistivity measurement for graphite tailings concrete[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2021, 123: 104206.
- [2] 白志民, 廖立兵. 石墨尾矿烧结砖制备工艺及性能研究[J]. *矿物岩石地球化学通报*, 1999, 18(4): 221-225.  
BAI Zhi-min, LIAO Li-bing. Preparation of sintering brick from graphite tailing and the performances of products[J]. *Bulletin of Mineralogy, Petrology and Geochemistry*, 1999, 18(4): 221-225.
- [3] 张卫卫, 左然芳, 郭伟娟, 等. 利用石墨尾矿制备烧结砖中泛霜性能的调控技术研究[J]. *非金属矿*, 2013, 36(6): 28-30.  
ZHANG Wei-wei, ZUO Ran-fang, GUO Wei-juan, et al. Study on efflorescence suppression of sintered bricks from graphite tailings[J]. *Non-Metallic Mines*, 2013, 36(6): 28-30.
- [4] 陈宝海, 杜高翔, 廖立兵, 等. 利用石墨尾矿制备建筑陶瓷[J]. *非金属矿*, 2011, 34(6): 45-47.  
CHEN Bao-hai, DU Gao-xiang, LIAO Li-bing, et al. Preparation of building ceramic tiles from graphite tailings[J]. *Non-Metallic Mines*, 2011, 34(6): 45-47.
- [5] 吴建锋, 刘溢, 徐晓虹, 等. 利用石墨尾矿研制太阳能中温储热陶瓷及抗热震性[J]. *武汉理工大学学报*, 2015, 37(8): 12-17.  
WU Jian-feng, LIU Yi, XU Xiao-hong, et al. Preparation and thermal shock resistance of the medium temperature thermal storage ceramic from graphite tailings[J]. *Journal of Wuhan University of Technology*, 2015, 37(8): 12-17.
- [6] 刘洪波, 张大双, 刘晓丽, 等. 石墨尾矿混凝土压敏性能研究[J]. *黑龙江大学工程学报*, 2015, 6(1): 22-27.  
LIU Hong-bo, ZHANG Da-shuang, LIU Xiao-li, et al. Research on pressure-sensitivity of graphite tailings concrete[J]. *Journal of Engineering of Heilongjiang University*, 2015, 6(1): 22-27.
- [7] 陶冬冬. 石墨尾矿钢纤维混凝土力学与抗冻性能研究[D]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2019.
- TAO Dong-dong. Research on the mechanics and frost resistance of graphite tailings steel fiber concrete[D]. Harbin: Heilongjiang University, 2019.
- [8] 孙小巍, 张雯琪, 杨林, 等. 石墨尾矿蒸压加气混凝土性能研究[J]. *非金属矿*, 2022, 45(5): 92-96.  
SUN Xiao-wei, ZHANG Wen-qi, YANG Lin, et al. Study on properties of graphite tailings autoclaved aerated concrete[J]. *Non-Metallic Mines*, 2022, 45(5): 92-96.
- [9] LIU H B, LIU K, LAN Z, et al. Mechanical and electrical characteristics of graphite tailing concrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2018, 2018: 9297628.
- [10] LIU H B, LI B, XUE J, et al. Mechanical and electroconductivity properties of graphite tailings concrete[J]. *Advances in Materials Science and Engineering*, 2020, 2020(1): 9385097.
- [11] LIU H B, XUE J, LI B, et al. Effect of graphite tailings as substitute sand on mechanical properties of concrete[J]. *European Journal of Environmental and Civil Engineering*, 2022, 26(7): 2635-2653.
- [12] FENG B Y, ZHU X G, XIA H C, et al. Flexural behavior of graphite tailings RC beams in chloride environment[J]. *Advances in Civil Engineering*, 2023, 2023: 1427007.
- [13] DUAN H R, LIU H B, LI B C, et al. Mechanical properties and mechanism analysis of graphite tailings environment-friendly concrete[J]. *Materials*, 2022, 15(24): 8870.
- [14] ZHANG C, LI B, WU F H, et al. Research on modification of mechanical properties of recycled aggregate concrete by replacing sand with graphite tailings[J]. *Reviews on Advanced Materials Science*, 2022, 61(1): 493-512.
- [15] 杨步仁, 王军保. 菱镁矿尾矿制备水泥路面基层材料的路用性能研究[J/OL]. *矿产综合利用*, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231122.1351.011.html>.  
YANG Bu-ren, WANG Jun-bao. Study on pavement performance of cement pavement base material prepared from magnesite tailings[J/OL]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2023. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1251.TD.20231122.1351.011.html>.
- [16] 李长雨, 徐明杨, 武晓伟, 等. 季冻区铁尾矿砂改良路基土动强度特性分析[J]. *辽宁工程技术大学学报(自然科学版)*, 2023, 42(4): 438-443.

- Changsha University of Science & Technology (Natural Science), 2023, 20(6): 17-26.
- [18] 师丽. 纳米 SiO<sub>2</sub> 增强聚氨酯注浆材料的制备与性能研究[J]. 功能材料, 2022, 53(8): 8221-8225.
- SHI Li. Preparation and properties of nano-SiO<sub>2</sub> reinforced polyurethane grouting material[J]. Journal of Functional Materials, 2022, 53(8): 8221-8225.
- [19] 李雅迪, 李嘉晋, 陈丁丁, 等. 纳米二氧化硅原位增强亲水性聚氨酯注浆材料的制备与性能研究[J]. 岩土工程学报, 2016, 38(增刊 1): 83-86.
- LI Ya-di, LI Jia-jin, CHEN Ding-ding, et al. Properties of nanosilica-reinforced polyurethane by in-situ preparation and its application in polyurethane grouting[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering, 2016, 38(S1): 83-86.
- [20] 陈忠清, 高彦斌, 吕越, 等. 碱渣-粉煤灰基地聚合物固化软黏土的强度及渗透性研究[J]. 地基处理, 2024, 6(2): 134-145.
- CHEN Zhong-qing, GAO Yan-bin, LV Yue, et al. Study on strength and permeability of soft clay stabilized by fly ash based geopolymer with soda residue[J]. Journal of Ground Improvement, 2024, 6(2): 134-145.
- 
- （上接第 6 页）
- LI Chang-yu, XU Ming-yang, WU Xiao-wei, et al. Analysis of dynamic strength characteristics of iron tailings sand improved road base in seasonal frost zone[J]. Journal of Liaoning Technical University (Natural Science), 2023, 42(4): 438-443.
- [17] 任园, 邵静. 黏土改良磷尾矿砂用作路基填料的研究与应用[J]. 公路, 2018(11): 46-49.
- REN Yuan, SHAO Jing. Study and application of clay modified phosphorus tailings used as embankment filler[J]. Highway, 2018(11): 46-49.
- [18] 中华人民共和国交通运输部. 公路土工试验规程: JTG 3430—2020[S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Soils for Highway Engineering: JTG 3430—2020[S]. Beijing: China Communication Press, 2020.
- [19] 中华人民共和国交通运输部. 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG 3441—2024[S]. 北京: 人民交通出版社, 2024.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Test Methods of Materials Stabilized with Inorganic Binders for Highway Engineering: JTG 3441—2024[S]. Beijing: China Communication Press, 2024.
- [20] 中华人民共和国交通运输部. 公路路面基层施工技术细则: JTG/T F20—2015[S]. 北京: 人民交通出版社, 2015.
- Ministry of Transport of the People's Republic of China. Technical Guidelines for Construction of Highway Roadbases: JTG/T F20—2015[S]. Beijing: China Communication Press, 2015.