

# 高炉矿渣纤维对胶结砂强度与变形特性的影响

官大辉<sup>1</sup>, 陈阳<sup>2</sup>, 张妍<sup>2</sup>

(1. 中铁十八局集团有限公司, 天津 300222; 2. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘要:** 这是一篇矿物陶瓷材料领域的论文。为了增强胶结砂材料的力学性能, 同时提高矿产资源利用率, 将高炉矿渣纤维与河砂、水泥和水混合后压制成加筋胶结砂试样。通过开展无侧限压缩实验研究了高炉矿渣纤维的掺量和长度对加筋试样强度与变形特性的影响规律。结果表明: 随着纤维掺量的增加, 胶结砂试样的无侧限强度呈增长趋势, 但增长幅度在掺量超过 0.3% 后明显降低; 采用 5 mm 和 10 mm 的两种长度纤维进行实验, 在相同掺量条件下, 长纤维对胶结砂强度的增强效果是短纤维的 1.25~1.55 倍左右; 经过微观形态观察, 发现高炉矿渣纤维掺入胶结砂后, 提高了颗粒间的黏结程度和团聚效果, 进而增强了胶结砂的强度和韧性。

**关键词:** 矿渣纤维; 陶瓷及化合物; 胶结砂; 无侧限压缩实验; 强度; 微观形态

doi:10.3969/j.issn.1000-6532.2023.03.014

中图分类号: TD985; TU421 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2023) 03-0082-06

随着自然资源的日渐枯竭, 采用矿物废料改善无机材料力学性能的研究得到广泛关注<sup>[1]</sup>。高炉矿渣是工业生产过程中产生的废渣, 大量矿渣的排放严重占用了土地资源, 污染了土壤和水源, 不仅对土地和生态环境造成影响, 也造成了巨大的资源浪费<sup>[2-3]</sup>。为了实现高炉矿渣的综合利用, 维护生态环境和资源可持续发展, 工业上已经采用高炉矿渣为原料制备纤维状材料进行棉花状短纤维的制备<sup>[4]</sup>。高炉矿渣纤维具有抗拉强度高、稳定性好、耐腐蚀和质量轻等突出优点, 被广泛应用于混凝土、水泥改性土和胶结砂等材料的加筋改性研究中, 并证明了矿渣纤维能够改善材料的力学、耐久性和抗腐蚀等性能<sup>[5-7]</sup>。

在黏土、颗粒土与天然砂掺入水泥或石膏等胶凝材料可以大幅改善材料力学特征参数, 如黏聚力和摩擦角, 因此胶结砂在实际工程中被广泛使用<sup>[8]</sup>。由于胶结砂的压缩性天然砂低, 强度比天然砂高, 可广泛应用于软土的地基加固、挡土墙的回填以及道路和铁路的基层施工<sup>[9]</sup>。然而, 胶结砂的强度虽然较高, 但也具有典型的脆性破坏特征, 随着水泥的增加, 胶结砂的抗压强度显著

提高, 但同时脆性破坏特征也愈发明显, 这对工程的稳定性不利<sup>[10]</sup>。基于此, 一些学者采用纤维对胶结砂进行加筋改性, 提升其韧性, 防止材料发生脆性破坏。很多学者将砂、水泥和纤维与水混合制备加筋土试样, 研究纤维和水泥对砂土或黏土性能的改善效应<sup>[11-12]</sup>。当前, 采用纤维对胶结砂进行改性的研究主要聚焦于掺量对力学指标的影响, 而对纤维长度的关注较少。然而, 前人在研究中发现在实际应用中若不考虑纤维的尺寸, 可能会使得加筋土材料的强度无法达到预期目标, 影响加筋改性效果的进一步提升<sup>[13]</sup>。

## 1 材料与方法

### 1.1 材料

#### 1.1.1 标准砂

本研究采用的砂为福建地区的 ISO 标准砂。该砂为细砂, 颗粒较为均匀, 其石英含量达到 99.5%, 平均干密度为 1.63 g/cm<sup>3</sup>, 细度模数为 2.89。标准砂的颗粒级配分布曲线见图 1, 由计算得到砂的不均匀系数  $C_u$  为 3.78, 曲率系数  $C_c$  为 0.671。

收稿日期: 2021-09-22

基金项目: 国家自然科学基金项目 (52178563); 山西省科技厅指导项目 (2020GGJS285)

作者简介: 官大辉 (1982-), 男, 高级工程师, 主要研究方向为隧道施工技术。

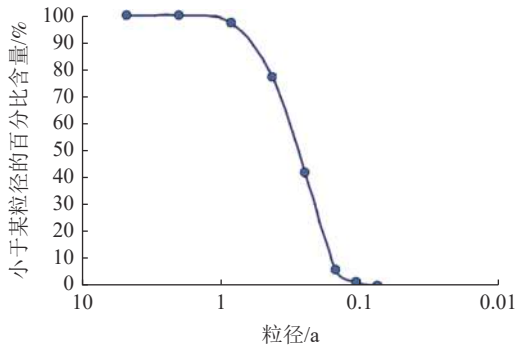


图1 标准砂的颗粒级配分布曲线

Fig.1 Particle size distribution of the standard sand

### 1.1.2 水泥熟料

制备胶结砂的水泥熟料采用芜湖海螺水泥有限公司生产的复合硅酸盐水泥，标号P.C 42.5，比表面积为 325 m<sup>2</sup>/kg，初凝时间约为 50 min，终凝时间 720 min。

### 1.1.3 高炉矿渣纤维

高炉矿渣纤维材料以工业生产过程中的高炉废渣为基础原料，经过熔融、调质与离心喷吹等工序，制备成一种生态环保的新型无机纤维，该类型纤维的密度比水低，耐久性、耐化学腐蚀性和抗拉强度均较好。本研究所用的高炉矿渣纤维的化学成分与基本性能指标见表1、2。本研究采用两种长度的纤维进行实验，平均长度分别为 10 mm 和 5 mm，直径均为 0.1 mm。

表1 高炉矿渣纤维的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of slag fiber

| CaO  | SiO <sub>2</sub> | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | MgO | K <sub>2</sub> O | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | 其他  |
|------|------------------|--------------------------------|-----|------------------|--------------------------------|--------------------------------|-----|
| 32.5 | 40.7             | 12.2                           | 7.5 | 1.2              | 2.0                            | 1.8                            | 2.1 |

表2 高炉矿渣纤维的基本技术指标

Table 2 Basic technical index of slag fiber

| 密度/(g·cm <sup>-3</sup> ) | 平均直径/μm | 抗拉强度/MPa | 断裂拉伸率/% |
|--------------------------|---------|----------|---------|
| 0.65                     | 5.5     | 55       | 6.2     |

## 1.2 试样制备

本研究使用的水泥掺量（即水泥占总砂和水泥总质量的比例）为 5%，同时选取 5 种不同掺量（0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5%）的高炉矿渣纤维进行胶结砂的加筋改性。首先将干砂和水泥进行混合并搅拌均匀，再按照较佳含水量（15%）向混合料中加入水；然后将标准砂按质量等分成 5 份，在每一份混合料加入预先确定质量的纤维混合均匀；最后将等质量的混合料分五次击实成型，并在标准环境（温度 25℃，相对湿度 75%）的条件下养护 28 d，得到直径 50 mm，高度 100 mm

的加筋胶结砂试样。

## 1.3 无侧限压缩实验

本研究开展无侧限压缩实验评价材料的力学特性，通过 YAW III-S200 型液晶全自动无侧限压缩仪对胶结砂圆柱样加载至试样发生破坏，在实验中控制加载速率为 1 kPa/s，由数显读数仪记录加载过程的压力和位移，并换算为应力-应变曲线，通过取应力-应变曲线中的峰值应力作为无侧限抗压强度  $q_u$ ，峰值应力对应的轴向应变为破坏应变  $\epsilon_m$ 。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 破坏特征与应力-应变曲线

采用两组不同长度（5 mm 和 10 mm）的高炉矿渣纤维制备加筋胶结砂试样，每组试样的掺量  $c_f$  为 0.1%、0.2%、0.3%、0.4% 和 0.5%，同时以纤维含量为 0 的胶结砂为对照组。根据无侧限压缩实验的结果研究了加筋胶结砂强度和变形特性受纤维长度和掺量两种变量的影响规律。由实验结果可知不同纤维含量的胶结砂试样在荷载作用下出现了多条贯通的裂缝，并有少许胶结砂颗粒脱离试样，说明胶结砂的破坏具有显著的脆性特征。另外，从实验中还观察到未经高炉矿渣加筋的胶结砂试样脆性破坏特征较显著，采用长纤维（长度为 10 mm）加筋加筋的试样比采用短纤维（长度为 5 mm）加筋的试样脆性破坏程度更低，抗拉韧性更强。

由无侧限压缩实验获得了不同加筋条件下的加筋胶结砂的应力-应变关系曲线，结果见图 2。从图 2 可以看出，不同组别胶结砂关系曲线均表现为加载初始阶段应力快速上升→应力增速变缓→出现峰值应力→应力跌落→残余变形。另外，还从图 2 中观察到未经纤维加筋的胶结砂试样的应力跌落幅度明显高于加筋试样，破坏后的残余应力较小。高炉矿渣纤维的掺量与长度均对胶结砂试样的峰值应力及其对应的破坏应变存在显著影响，具体影响规律将在下文进行详细分析。

### 2.2 无侧限抗压强度与破坏应变

根据不同试样组别的胶结砂应力-应变关系曲线提取了材料的力学参数，以峰值应力作为无侧限抗压强度  $q_u$ ，以峰值应力相应的轴向应变作为破坏应变  $\epsilon_m$ 。图 3(a) 给出了不同胶结砂试样的无侧限抗压强度随高炉矿渣纤维掺量增加的变化曲线。实验结果加筋胶结砂的无侧限抗压强度明显高于普通胶结砂，说明纤维加筋作用大幅提高了胶结砂的强度与变形特性。另一方面，高炉矿渣

纤维的掺量对材料力学参数的影响也比较明显。在纤维掺量处于 0.1%~0.3% 之间时,  $q_u$  上整体随纤维掺量增加呈线性递增趋势, 其中短纤维加筋试样的强度值从 620 kPa 增至 830 kPa 左右, 而长纤维加筋试样的强度约为短纤维的 1.2~1.35 倍, 纤维掺量超过 0.4% 后, 两种长度纤维加筋试样的强度均处于平稳状态。

图 3(b) 给出了不同加筋条件下胶结砂破坏应变  $\epsilon_m$  随纤维掺量的变化曲线。由 3(b) 可知, 胶结

砂试样的  $\epsilon_m$  随掺量增加的变化趋势与强度值类似。首先, 高炉矿渣纤维改善了材料的韧性, 且长纤维的改良效果更好。其次,  $\epsilon_m$  随纤维掺量提高呈增加趋势, 当纤维长度为 10 mm 时, 掺量为 0.3% 的加筋试样破坏应变达到峰值, 为 3.6%; 当纤维长度为 5 mm 时, 掺量为 5 mm 时, 掺量为 0.3% 的加筋试样破坏应变达到峰值, 为 3.2%。由此可见, 当高炉矿渣纤维掺量为 0.3%~0.4% 时, 加筋胶结砂的变形性能改善较明显。

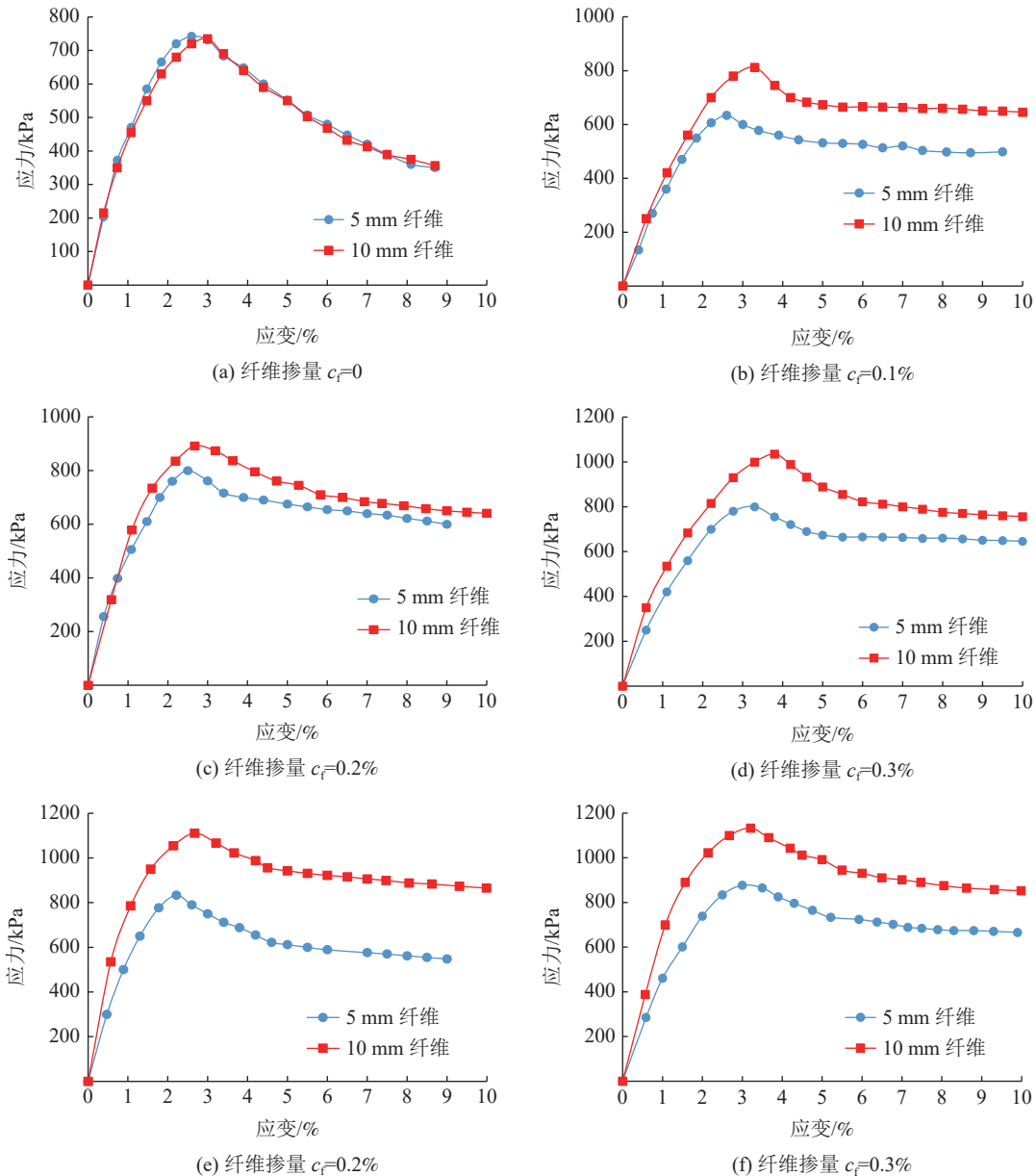


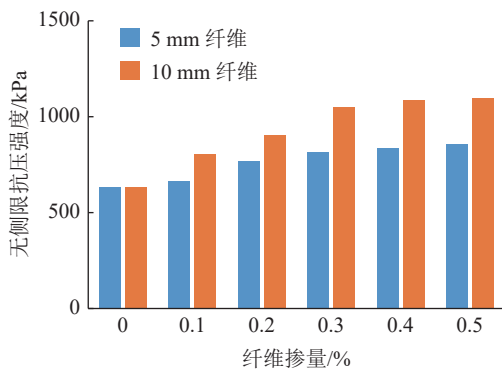
图 2 加筋胶结砂试样的应力-应变曲线  
Fig.2 Stress - strain curves of reinforced cemental sand samples

### 2.3 加筋机理分析

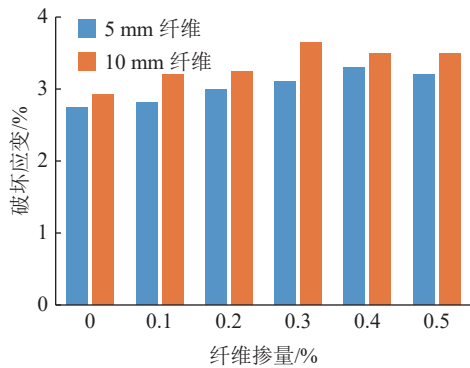
本研究给出了掺量  $c_f$  为 0.5% 的长纤维加筋胶

结砂在破坏前后的显微观测图片 (图 4)。破坏前, 高炉矿渣纤维与胶结砂颗粒之间形成了良好的黏

结结构，水泥凝胶体与纤维共同起到连接砂骨料的作用。破坏后砂颗粒之间发生了明显的位移，形成了裂隙，但纤维仍存在于试样内部起到连接胶结砂颗粒的作用。究其原因，当剪切力作用于试样时，胶结砂与纤维间位移受到约束，限制了试样的整体变形；纤维与砂颗粒间的胶结强度与界面摩擦力提高，增强胶结砂的黏结效果。因此，经过纤维加筋改性的胶结砂可以更均匀地抵抗外荷载作用，抗拉韧性增强，使得发生剪切破坏时的裂缝宽度明显减小。



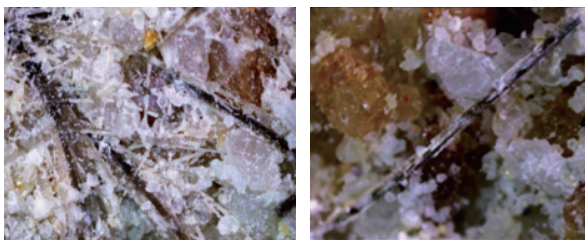
(a) 无侧限抗压强度



(b) 破坏应变

图3 不同加筋条件下胶结砂的力学指标

Fig.3 Mechanical indexes of cemental sand under different reinforcement conditions



(a) 破坏前

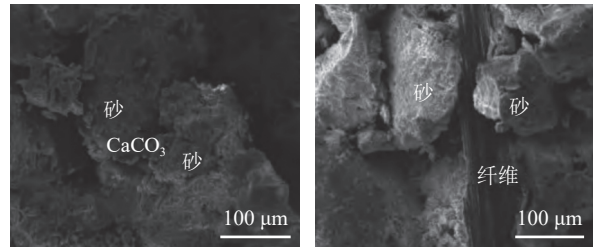
(b) 破坏后

图4 加筋胶结砂破坏前后的显微观测图片

Fig.4 Microscopic pictures of reinforced cemental sand before and after failure

为了进一步探讨高炉矿渣的加筋改性机理，

采用扫描电子显微镜 (SEM) 图像观测了普通胶结砂和纤维加筋胶结砂 (掺量为 0.5%，纤维长度为 10 mm) 的微观形态，结果见图 5。根据图 5 (a) 可以看出：胶结砂经水泥水化反应生成的  $\text{CaCO}_3$  包裹在标准砂的颗粒表面，试样内部的原始孔隙被一部分  $\text{CaCO}_3$  填充，水化物胶结程度较高，结构较为密实，但仍观察到一些小孔隙存在于砂颗粒之间。从图 5(b) 可以看出：在水泥胶结砂中掺入一定数量的纤维后，纤维表面也附着了大量  $\text{CaCO}_3$  沉淀物，起到“纤维桥接”作用<sup>[4]</sup>。当高炉矿渣纤维的掺量较高时，大量纤维交织在胶结砂内部，纤维桥接效应使得试样内同时出现单纤维的一维加筋和纤维网三维加筋作用，进而使得胶结砂的脆性破坏特征减弱，塑性变形性能增加。



(a) 纤维掺量 0%

(b) 纤维掺量 0.5%

图5 胶结砂的 SEM

Fig.5 SEM of cemented sand

然而，当高炉矿渣纤维掺量过多时，纤维桥接效应对胶结砂的黏结作用达到极值，胶结砂整体的黏结程度的进一步提高被限制，三维纤维网趋于稳定状态。此外，长纤维与胶结砂块体有更大的接触面积，通过纤维桥接效应使更多的砂颗粒发生黏结，形成更长的传力体系。因此，当高炉矿渣纤维掺量相同时，长纤维的加筋效果明显强于短纤维。在本研究中，胶结砂较佳加筋条件为 10 mm 的长度与 3% 的掺量。

#### 2.4 较优加筋条件

综合对比不同纤维长度和掺量条件下胶结砂试样的强度与变形参数，得出高炉矿渣纤维的较优条件为纤维长度 10 mm，纤维掺量为 0.3%。较优加筋条件的试样与普通胶结砂试样的力学参数见表 3，其中无侧限抗压强度的增幅为 66.1%，破坏应变的增幅为 29.1%，说明采用掺量 3%，长度为 10 mm 的高炉矿渣纤维对胶结砂进行加筋改性时，可以使得试样的强度和变形特性得到明显提升。综上所述，将高炉矿渣纤维用于胶结砂的改性，不仅可以减少资源浪费，而且能够大幅提高建筑材料的工作性能，对资源可持续发展和材料的工程性能均有利。

表3 加筋前后的力学参数及增幅度  
Table 3 Mechanical parameters and amplitude increase before and after reinforcement

| 名称   | 无侧限抗压强度/kPa | 增幅/% | 破坏应变/% | 增幅/% |
|------|-------------|------|--------|------|
| 加筋试样 | 1052.8      |      | 2.85   |      |
| 普通试样 | 634.2       | 66.1 | 3.68   | 29.1 |

### 3 结 论

(1) 高炉矿渣纤维加筋作用提高了胶结砂的强度和韧性, 当纤维掺量为 0 至 0.3% 范围内时, 无侧限抗压强度和破坏应变随掺量增加显著提高, 且长纤维加筋效果明显强于短纤维。

(2) 通过胶结砂微观形态的观察, 纤维加筋作用能够增强胶结砂颗粒的黏结性能, 一定程度上改善了材料韧性, 提高了材料强度, 同时使得试样脆性破坏特征减弱。

(3) 当加筋条件为纤维长度 10 mm, 纤维掺量 0.3% 时, 胶结砂的强度值提高 66.1%, 破坏应变提高了 29.1%。因此在该条件下, 高炉矿渣纤维制备胶结砂可以大幅提高材料的实际工作性能。

### 参考文献:

- [1] 高洋. 高钛高炉渣综合利用现状及展望[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):6-10.
- GAO Y. Present situation and prospect of comprehensive utilization of high titanium blast furnace slag[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):6-10.
- [2] 严照照, 张淑会, 董晓旭, 等. 高炉渣的化学成分对其微观结构影响的研究现状[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):22-27.
- YAN Z Z, ZHANG S H, DONG X X, et al. Research status of the influence of blast furnace slag chemical composition on its microstructure[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):22-27.
- [3] 易耀林, 卿学文, 庄焱, 等. 粒化高炉矿渣微粉在软土固化中的应用及其加固机理[J]. *岩土工程学报*, 2013, 35(S2):829-833.
- YI Y L, QING X W, ZHUANG Y, et al. Application of granulated blast furnace slag powder in soft soil solidification and its reinforcement mechanism[J]. *Chinese Journal of Geotechnical Engineering*, 2013, 35(S2):829-833.
- [4] 孙晓刚, 赵英良, 邢军, 等. 碱激发高炉矿渣-粉煤灰制备充填胶凝材料[J]. *金属矿山*, 2016(11):189-192.
- SUN X G, ZHAO Y L, XING J, et al. Alkali-activated blast furnace slag-fly ash to prepare filling cementitious materials[J]. *Metal Mine*, 2016(11):189-192.
- [5] 张遵乾, 邢宏伟, 张玉柱. 熔渣离心成纤及纤维拉伸变形研究[J]. *矿产综合利用*, 2018(5):138-142+146.
- ZHANG Z Q, XING H W, ZHANG Y Z. Study on the

centrifugal fiber formation of molten slag and fiber tensile deformation[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2018(5):138-142+146.

[6] 唐续龙, 邢修君. 高炉渣和粉煤灰制备矿渣纤维实验研究[J]. *环境工程*, 2020, 38(11):180-186.

TANG X L, XING X J. Experimental research on preparation of slag fiber from blast furnace slag and fly ash[J]. *Environmental Engineering*, 2020, 38(11):180-186.

[7] 范剑明, 李娜, 冯鑫国. 粉煤灰/矿渣复合基沙土固化剂的制备及固化性能研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(6):105-109.

FAN J M, LI N, FENG X G. Study on preparation and curing performance of fly ash/slag-based soil stabilizer[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(6):105-109.

[8] Erhan G, Yahya R. Atewi, Mustafa F. Hasan. Fresh and rheological properties of glass fiber reinforced self-compacting concrete with nanosilica and fly ash blended[J]. *Construction and Building Materials*, 2019, 211:349-362.

[9] 宁波, 闫艳, 左夏伟, 等. 铁尾矿砂混凝土力学特性实验研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(4):159-164.

NING B, YAN Y, ZUO X W, et al. Experimental study on mechanical properties of iron tailings concrete[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(4):159-164.

[10] 梁仕华, 曾伟华, 肖雪莉, 等. 纤维长度对微生物胶结砂力学性能的影响[J]. *工业建筑*, 2019, 49(10):136-140.

LIANG S H, ZENG W H, XIAO X L, et al. The effect of fiber length on the mechanical properties of microbial cemented sand[J]. *Industrial Construction*, 2019, 49(10):136-140.

[11] 李博, 陈宇龙. 颗粒破碎条件下的胶结砂力学行为[J]. *西南交通大学学报*, 2016, 51(4):729-735.

LI B, CHEN Y L. Mechanical behavior of cemented sand under the condition of particle crushing[J]. *Journal of Southwest Jiaotong University*, 2016, 51(4):729-735.

[12] Hadi Abioghli, Amir Hamidi. A constitutive model for evaluation of mechanical behavior of fiber-reinforced cemented sand[J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2019, 11(2):200-209.

[13] 姜屏, 杨建冬, 李娜, 等. 纤维改性水泥稳定铁尾矿砂的无侧限抗压性能研究[J]. *复合材料科学与工程*, 2021(8):73-79.

JIANG P, YANG J D, LI N, et al. Study on unconfined compressive performance of fiber-modified cement stabilized iron tailings[J]. *Composite Materials Science and Engineering*, 2021(8):73-79.

[14] 张广泰, 耿天娇, 鲁海波, 等. 冻融循环下沙漠砂纤维混凝土损伤模型研究[J]. *硅酸盐通报*, 2021, 40(7):2225-2231.

ZHANG G T, GENG T J, LU H B, et al. Research on damage model of desert sand fiber concrete under freeze-thaw cycles[J]. *Bulletin of the Chinese Ceramic Society*, 2021, 40(7):2225-2231.

## Effect of Furnace Slag Fiber on Strength and Deformation Characteristics of Cemental Sand

Gong Dahui<sup>1</sup>, Chen Yang<sup>2</sup>, Zhang Yan<sup>2</sup>

(1.China Railway 18th Bureau Group Co. Ltd , Tianjin , China; 2.School of Resources and Civil Engineering, Northeastern University, Shenyang, Liaoning, China)

**Abstract:** This is a paper in the field of mineral ceramic materials. In order to enhance the mechanical properties of cemental sand materials and improve the utilization rate of mineral resources, the reinforced samples were made by mixing blast furnace slag fiber with river sand, cement and water. The effects of the content and length of furnace slag fibers on the strength characteristics of reinforced specimens were studied by unconfined compression tests. The results show that the unconfined strength of cemental sand samples increases with the increase of the content of furnace slag fiber, but the increase rate decreases obviously when the content of fiber reaches 0.3%. Using 5 mm and 10 mm fiber length to modify the cemented sand, the strengthening effect of the long fiber on the strength of the cemented sand is 1.25~1.55 times that of the short fiber under the condition of the same dosage. Through the microscopic morphology observation, it is found that the addition of furnace slag fibers to the cemental sand can improve the degree of adhesion between particles and agglomeration effect, and then enhance the strength and toughness of the cemented sand.

**Keywords:** Slag fiber; Ceramics and composite; Cemental sand; Unconfined compression experiment; Strength; Microstructure



(上接第 81 页)

## Process Optimization on Preparation of Composite Portland Cement with Low-grade Pyrite Cinder

Li Yonghui<sup>1,2</sup>, Xian Yuanhua<sup>1,2</sup>, Chen Dexia<sup>3</sup>, Zhong Yi<sup>1</sup>, Wu Xiujie<sup>1</sup>

(1.Yibin Vocational & Technical College, Yibin, Sichuan, China; 2.Sichuan Province Key Laboratory of Higher Education Institutions for Comprehensive Development and Utilization of Industrial Solid Waste in Civil Engineering, Panzhihua, Sichuan, China; 3.Chongqing Economy and Trade Secondary Vocational School, Chongqing, China)

**Abstract:** This is a paper in the field of mineral materials. In order to seek for a new feasible way to utilize low-grade pyrite cinder under local conditions, to solve bottleneck problems of large reserves, and to relieve soil and water pollution, a research on the process optimization on preparation of composite portland cement with low-grade pyrite cinder was conducted. Pyrite cinder as a special kind of industrial solid waste with higher iron content, was used as additive, and was incorporated with portland cement clinker, flue gas desulfurization gypsum and fly ash to prepare composite portland cement. Their efficacy was compared by testing the compressive strength and flexural strength of composite portland cement, based on the analysis of physical indices, and then orthogonal tests were carried out to optimize the preparation. The results showed that the optimum preparation conditions were: mass fraction of portland cement clinker of 55%, Ca to Si ratio of 2.5, fly ash to pyrite cinder ratio of 1.0, and water to material ratio of 0.4. And then, 28-day compressive strength was 43.9 MPa. According to the national standard named as Common Portland Cement, the cement mark can reach the level of P·C 42.5.

**Keywords:** Pyrite cinder; Composite portland cement; Recycling of solid wastes; Orthogonal test; Synergistic utilization of waste slag; Mineral materials