

玻璃纤维增强水泥基充填砂浆的力学特性及机理

曹艳霞¹, 沈纲², 马辉³

(1. 山西职业技术学院, 山西 太原 030006; 2. 太原理工大学, 山西 太原 030024; 3. 滨州学院, 山东 滨州 256600)

摘要: 工业废渣的资源化利用是当前材料工程界的一个热点问题。采用玻璃纤维对水泥基充填砂浆力学性能进行增强, 通过力学性能测试探讨了纤维掺量及长度对试件强度的影响规律, 通过微观实验分析了玻璃纤维的作用机理。实验结果表明, 玻璃纤维在水泥基充填砂浆中起到了加筋作用, 抗压和抗折强度随纤维掺量增加先上升后降低, 掺量为 1.2% 是强度增长的峰值, 中等长度的玻璃纤维对强度的增强最有利; 随着玻璃纤维掺量由 0 增加 1.2%, 试件的抗剪强度提升了 75.7%, 且发生剪切破坏时的脆性程度下降, 结构完整性提高; 玻璃纤维的“桥联作用”增强了水化凝胶体的黏结力和摩擦力, 抑制了破坏裂缝的扩展, 从而促进了力学性能的改善。本研究可为充填采矿工程的安全建设与玻璃废渣的资源化利用提供重要参考。

关键词: 玻璃纤维; 充填砂浆; 力学特性; 破坏模式; 机理

doi:10.12476/kczhly.202211100711

中图分类号: TD989 文献标志码: A 文章编号: 1000-6532 (2025) 03-0033-05

引用格式: 曹艳霞, 沈纲, 马辉. 玻璃纤维增强水泥基充填砂浆的力学特性及机理[J]. 矿产综合利用, 2025, 46(3): 33-37+43.

CAO Yanxia, SHEN Gang, MA Hui. Mechanical properties and mechanism of glass fiber reinforced cement base filling cement mortar[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources, 2025, 46(3): 33-37+43.

工业固体废弃物是一种重要的可回收资源, 在人类生产生活和经济社会发展中发挥着至关重要的作用, 废渣的有效利用率在很大程度上影响着社会的发展^[1-4]。随着现代化进程的快速发展, 废弃玻璃的堆积量日益增多, 大量玻璃废渣尚未得到很好的处置^[5]。玻璃废渣的堆积会析出含重金属的渗透液, 既对生态环境造成危害, 又会浪费大量土地资源^[6]。近年来, 国家实施大量政策促进废弃玻璃循环利用产业的升级^[7]。大量研究表明对废弃玻璃进行纤维化处理以制备抗拉性能良好的纤维材料是一个重要应用方向^[8-10]。

充填采矿法是采矿的必然趋势, 充填砂浆在井下可作为人工矿柱, 发挥控制采场地压、减少矿石损失贫化、支撑顶板冒落等多重作用, 其力

学性能是确保充填采矿作业安全高效实施的重要保障^[11]。然而, 随着时间的延长和深井复杂环境的影响, 充填后的固结体强度出现倒缩, 甚至充填砂浆出现变形开裂, 引发塌陷等灾害^[12]。当前, 很多学者将纤维材料应用于砂浆力学性能和耐久性的改良中。侯永强等^[13]探讨了聚丙烯纤维对充填砂浆的强度与流动性的增益效果, 实验发现纤维掺量越大, 抗压强度和砂浆流动度的变异系数越大。徐文彬等^[14]将聚丙烯纤维掺入到充填砂浆中, 通过开展抗压强度、抗拉应力等实验, 发现纤维对抗压强度和抗弯韧性均具有很好的提升效果。陶博识等^[15]通过改变纤维掺量和种类, 对充填体试件抗压和劈裂强度性能的影响因素进行探究。Xue 等^[16]开展单轴压缩实验和扫描电镜

收稿日期: 2022-11-10

基金项目: 山东省自然科学基金项目 (ZR2019PEE043)

作者简介: 曹艳霞 (1980-), 女, 硕士, 讲师, 研究方向为建筑材料科学。

实验,发现纤维种类对水泥充填砂浆的剪切行为和微结构的影响特征,发现不同长度的纤维对尾砂强度的增强效果有较大差异。综上所述,纤维的掺杂改性作用可以有效提高尾砂胶结基体的界面摩擦力,抑制裂纹扩展。然而,目前对玻璃纤维增强水泥基充填砂浆的效果与机理认识尚需深入探究。

本研究采用玻璃纤维作为外掺料进行充填砂浆的改性研制,分析了砂浆强度特性和破坏模式,最后从微观尺度揭示纤维增强机理,研究成果旨在为矿山充填体的稳定性提供重要参考。

1 实 验

1.1 实验材料

实验材料包括铜矿尾砂、水泥、纤维、减水剂和水。采用激光粒度分析仪测试了尾砂的颗粒级配组成见图 1。该尾砂超过 50% 的颗粒粒径小于 40 μm ,细粒尾砂(<20 μm)约 28.3%。尾砂的化学组成成分见表 1,主要化学成分 SiO_2 和 Al_2O_3 含量分别为 64.25% 和 17.39%。胶凝剂选用

普通硅酸盐水泥,标号为 P·O 42.5。实验用水为普通自来水。采用高速空气喷吹结合离心甩丝的方法制备玻璃纤维成品,原料为玻璃废渣。表 2 给出了玻璃纤维的技术指标,可以看出该纤维具有优良的力学性能、延展性能及耐腐蚀性能等。减水剂采用聚羧酸型高效减水剂。

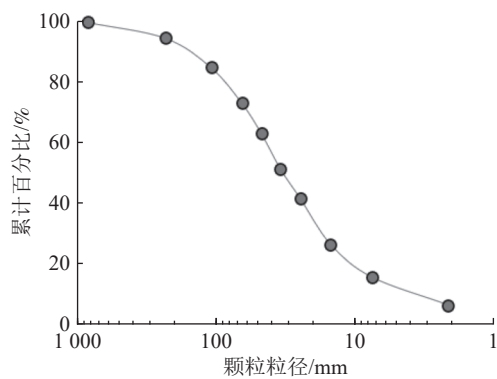


图 1 尾砂粒度分布组成
Fig.1 Particle size distribution of tailings

表 1 尾砂的主要化学成分/% Table 1 Main chemical composition of test tailings							
Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	MgO	CaO	SO_3	SiO_2	TiO_2
18.02	1.61	0.32	1.73	2.62	0.22	62.15	0.26

表 2 玻璃纤维基本物理性质 Table 2 Basic physical properties of glass fibers							
纤维类型	单丝直径/ μm	密度/(g/cm^3)	延伸率/%	弹性模量/ GPa	抗拉强度/ MPa	耐酸碱性	分散性
玻璃纤维	8	2.13	39	5.02	398	强	好

1.2 试件制备

为揭示玻璃纤维增强充填砂浆力学性能的变化规律,以不同玻璃纤维掺量和长度为控制条件。固定充填料浆浓度为 74%,灰砂比为 1:4,纤维长度为 5、10 和 20 mm,设计纤维掺量为 0.3%、0.6%、0.9%、1.2% 和 1.5%,共 15 组配比实验,实验因素水平设计见表 3。

由于玻璃纤维的密度低、漂浮性强且易结团,试件制备过程中采用干拌法添加纤维。首先,按照表 3 的配比称量好原材料;然后,将称量后的尾砂和水泥倒入搅拌机中,将每组纤维分批加入至搅拌机中,干拌 5 min 后注入减水剂与水,继续搅拌 10 min;取下搅拌锅后,将砂浆缓慢浇注至相应模具中,同时用小锤敲打模具侧面至浆体均匀;最后,将试件移至标准恒温恒湿养护箱中,控制温度为 $(25\pm 1)^\circ\text{C}$,湿度为 $(95\pm 2)\%$ 。养护 24 h 后进行拆模,将试块放至养护箱中继续

表 3 试件的配合比设计 Table 3 Sample mix ratio design		
实验编号	纤维长度/mm	纤维掺量/%
F 1	5	0.3
F 2		0.6
F 3		0.9
F 4		1.2
F 5		1.5
F 6	10	0.3
F 7		0.6
F 8		0.9
F 9		1.2
F 10		1.5
F 11	20	0.3
F 12		0.6
F 13		0.9
F 14		1.2
F 15		1.5

养护至龄期 28 d。

1.3 实验方法

1.3.1 力学性质测定

采用 WAW-1000B 型微机控制电液伺服万能试验机检测水泥基充填砂浆试块抗压强度和抗折强度，以 0.5 mm/min 加载速率施加载荷，每组强度实验包含三个试件。

1.3.2 扫描电镜测试

采用 SEM 扫描电子显微镜观察试块微观结构形貌，在试块中心部位取 5 mm×5 mm 薄片状试样，将样品放至无水乙醇中浸泡 24 h 终止其水化反应，然后观察其微观结构形貌。

2 实验结果与讨论

2.1 抗压与抗折强度结果

由实验获得了不同种类纤维和掺量下充填砂浆试件抗压强度和抗折强度测试结果。由强度直方图呈现了充填砂浆的抗压强度和抗折强度随纤维掺量和种类变化的结果。从图 2 可以看出，不同长度纤维对充填砂浆强度性能均有增益效果，中等长度的玻璃纤维对抗压的改性效果最佳，长纤维次之，短纤维最差。中等长度玻璃纤维在充填体内部更容易与水化产物接触，能够承受更大的压应力。中等长度纤维和长纤维对抗折强度的增益效果明显高于短纤维，这是由于纤维需要达到一定长度后，才能使水化产物间的“桥联”作用充分发挥。因此，采用中等长度 (10 mm) 的纤维可以使充填砂浆的强度增益效果达到最佳。

充填砂浆的强度随着纤维掺量的增加表现为先上升后降低的趋势。纤维掺量为 1.2% 是强度变化的转折点。这是因为随着纤维掺量增加，砂浆内部三维空间网状结构形成几率越高，纤维与砂浆及水化产物间的粘合力和机械咬合力越大，增加了充填体的加筋效果。但当纤维掺量过高时，纤维之间互相干扰，交联缠结成团，增加了纤维聚集区的孔隙率，削弱了材料整体承载性能。相较于实验基准组的抗压强度和抗折强度 (14.25 MPa 和 2.25 MPa)，在养护 28 d 后，掺中等纤维充填砂浆的抗压和抗折强度最大增幅为 19.3% 和 50.2%，说明玻璃纤维对抗折强度的加筋增强效果明显高于抗压强度。

2.2 抗剪强度与剪切破坏特征

以中等长度纤维为外掺料的充填砂浆为例，

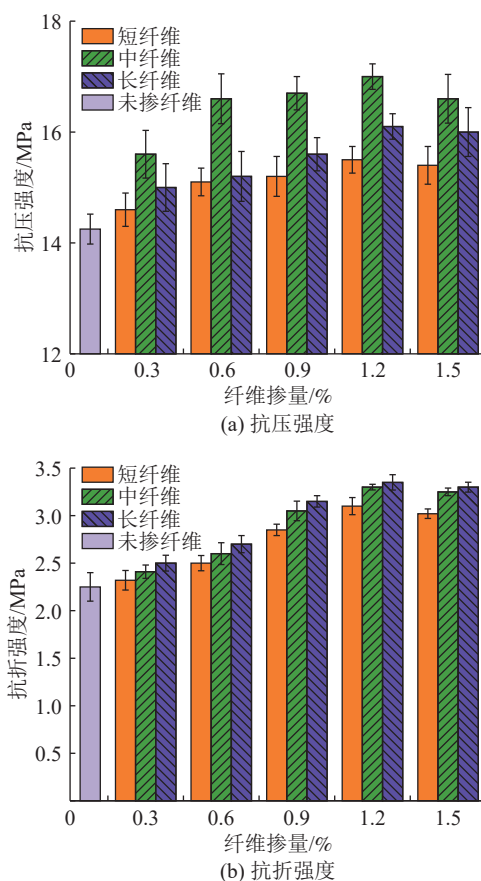


图2 玻璃纤维改性试件的强度测试结果
Fig.2 Strength of fiber modified specimens

开展单轴剪切实验获得了试件破坏形态与应力-应变关系曲线，结果见图 3。无纤维试件破坏过程中出现一条平行于荷载方向的主裂纹，并贯穿了试件，试件中部膨胀，侧面区域出现明显的开裂现象，整体性较差。经过玻璃纤维的加筋作用，充填砂浆的剪切破坏行为发生明显变化。随着掺量增加至 1.2% 时，主裂缝未贯穿，宽度明显减小，试件中部出现多条剪切裂纹；当掺量大于 1.2%

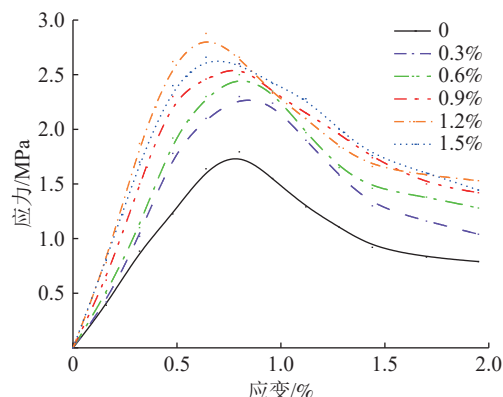


图3 充填砂浆试件的单轴应力-应变曲线
Fig.3 Stress-strain curves of filling mortar specimens

时, 试件出现一条斜向主裂纹, 裂纹底端伴生多条次生裂纹, 试件的破坏沿斜截面展开, 说明试件模式为剪切型破坏, 即剪应力达到抗剪极限造成破坏。

根据单轴应力-应变曲线, 充填砂浆破坏过程可分为弹性变形、裂纹扩展和破坏发展三个主要阶段。当应变处于 $0 \sim 0.5\%$ 之间, 应力-应变曲线基本直线上升, 充填砂浆所受的荷载不足以促使试件出现新裂纹, 力学行为表现为线弹性特征。当应变处于 $0.5\% \sim 1.0\%$ 之间时, 裂纹开始扩展, 在持续增长的荷载作用下, 砂浆内结微裂纹不断产生和扩张, 应力-应变曲线呈上凸趋势。当应变超过 1% 以后, 结构破坏程度迅速发展, 裂纹数量急剧增多, 逐渐衍生为贯通试件的主裂纹, 此阶段的应力随应变不断下降, 变形过程中的应变能快速释放, 加剧了试件的进一步破裂。以应力-应变曲线中的峰值应力作为试件的破坏强度。随着玻璃纤维掺量由 0 增加至 1.2% , 充填砂浆的破坏强度显著提高。当纤维掺量为 1.2% 时, 充填砂浆抗剪强度提升了 75.7% , 高于抗压和抗折强度。说明玻璃纤维与水泥基砂浆结构具有较强的黏结力和摩擦力, 大幅提高充填砂浆试件抵抗剪切开裂的能力。

2.3 砂浆微观结构形态

为了探究玻璃纤维增强充填砂浆的作用机制, 以中等长度纤维为外掺料的充填砂浆为例, 开展扫描电镜实验得到了破坏前后的砂浆微观形态。由图 4(a) 可知, 充填砂浆中的水化产物以凝胶体为主, 且覆盖和包裹了部分尾砂晶体, 玻璃纤维分布在水泥砂浆基体中, 与水泥砂浆的结合较为紧密。由图 4(b) 可知, 玻璃纤维表面附着了大量水化凝胶, 相互交织形成网状结构。图 4(c) 和 (d) 所示的是剪切破坏后的砂浆断面形貌, 可以看出发生剪切破坏时, 部分玻璃纤维从砂浆中拔出, 在水化凝胶体中留下了空洞, 纤维发生断裂的现象较为明显。微观图像表明玻璃纤维发挥“桥联”作用, 增加了砂浆结构之间机械咬合力, 抑制了破坏裂缝的扩展。微观形貌特征也为图 3 中的剪切破坏形态作出了侧面解释。

2.4 玻璃纤维的作用机理

当充填砂浆试件发生结构变形时, 玻璃纤维增强效果受到水泥砂浆和纤维的摩擦与黏结作用

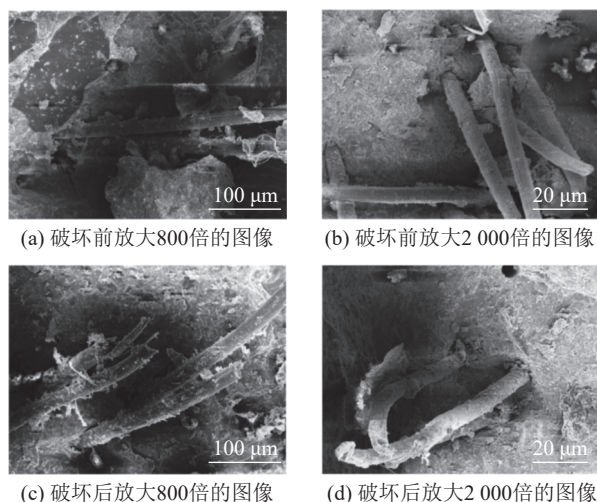


图 4 充填砂浆试件的微观图像

Fig.4 Microstructure morphology of specimens

所控。充填砂浆—纤维界面间的作用见图 5。由于水泥水化产物的胶结作用, 使裂缝两侧的玻璃纤维形成“锚固”区域。随着外载荷增长, 形成的拉应力继续增加。砂浆内部的裂缝逐渐扩展, 纤维承担相应拉应力, 同时通过纤维将拉应力传递到硬化砂浆中, 降低了裂缝两端的抗拉强度。因此, 玻璃纤维增强作用有效地抑制了新生裂缝的形成和扩张, 尤其是张拉裂缝沿原破裂面发生了扩展。当拉应力超过界面摩擦力时, 纤维将会从基体中拔出, 导致砂浆结构破损。综上, 水化胶凝与纤维的协同作用改善充填砂浆的力学性能, 尤其是抗剪强度得到了显著增强。

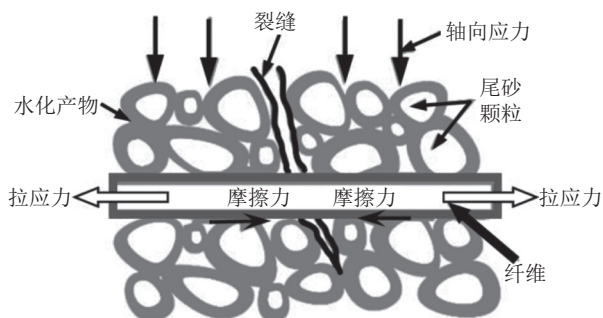


图 5 玻璃纤维改性机理

Fig.5 Modification mechanism of glass fiber

3 结 论

(1) 研究了不同长度的玻璃纤维对充填砂浆强度的影响规律, 发现中等长度的玻璃纤维对抗压的改性效果较佳, 短纤维对抗折强度的增益效果明显弱于中等长度纤维和长纤维。

(2) 充填砂浆的强度随着玻璃纤维掺量的增加先上升后降低, 纤维掺量为 1.2% 是强度增长的峰值, 纤维加筋作用对抗折强度的增强效果明显强于抗压强度。

(3) 随着玻璃纤维掺量由 0 增加至 1.2%, 充填砂浆的破坏强度显著提高。纤维对充填砂浆抗剪强度高于抗压、抗折强度, 说明玻璃纤维能够大幅提高充填砂浆的抗剪切性能。

(4) 玻璃纤维在充填砂浆中发挥“桥联”作用, 与水化胶凝的协同作用提升了砂浆抗压、抗折和抗剪强度, 在剪切破坏过程中有效抑制了砂浆内部裂缝的扩展。

参考文献:

[1] 马爱元, 郑雪梅, 李松, 等. 含锌钢铁冶金渣尘处理技术现状[J]. *矿产综合利用*, 2020(4):1-7.
MA A Y, ZHENG X M, LI S, et al. Current status of metallurgical slag dust treatment technology for Zn-containing iron and steel[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2020(4):1-7
[2] 柳晓娟, 侯华丽, 孙映祥, 等. 关于中国绿色矿业内涵与实现路径的思考[J]. *矿业研究与开发*, 2021, 41(10):180-186.
LIU X J, HOU H L, SUN Y X, et al. Thinking on the connotation and realization path of green mining in China[J]. *Mining Research and Development*, 2021, 41(10):180-186.
[3] 刘强, 周飞, 张俊瑾, 等. 硅锰渣-固硫灰复合辅助性胶凝材料水化机理研究[J]. *硅酸盐通报*, 2022, 41(5): 1715-1723.
LIU Q, ZHOU F, ZHANG J J, et al. Study on hydration mechanism of silicon-manganese slag and sulfur-fixing ash composite auxiliary cementing material [J]. *Chinese Bulletin of Ceramics*, 2012, 41(5): 1715-1723.
[4] 张遵乾, 宫娟, 龙跃. 流变特性对冶金渣纤维化过程的影响机理研究[J]. *矿产综合利用*, 2021(6):7-10+80.
ZHANG Z G, GONG J, LONG Y. Study on the mechanism of rheological properties on the process of metallurgical slag fibrosis[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2021(6):7-10+80.
[5] CHEN T, LEI C, YAN B, et al. Metal recovery from the copper sulfide tailing with leaching and fractional precipitation technology[J]. *Hydrometallurgy*, 2014, 147:178-182.
[6] 张少辉, 王艳, 牛荻涛. 废旧纤维在水泥基材料中的应用研究进展[J]. *材料导报*, 2020, 34(23): 23042-23050.
ZHANG S H, WANG Y, NIU D T. Research progress of waste fiber in cement-based materials[J]. *Materials Review*, 20,

34(23): 23042-23050.

[7] 冯驿, 何亚群, 王海锋, 等. 废旧线路板非金属组分中玻璃纤维的脱除研究[J]. *矿产综合利用*, 2019(1):102-105.
FENG Y, HE Y Q, WANG H F, et al. Study on removal of glass fiber from nonmetallic components of waste circuit boards[J]. *Multipurpose Utilization of Mineral Resources*, 2019(1):102-105.
[8] 于伯和, 徐立新, 杨国斌, 等. 温压法制备碱矿渣复合摩擦材料性能研究[J]. *非金属矿*, 2021, 44(2):53-56.
YU B H, XU L X, YANG G B, et al. Study on properties of alkali slag composite friction materials prepared by warm pressing method[J]. *Non-metallic Ores*, 2021, 44(2):53-56.
[9] 辛鑫, 谭泽馨, 赵俊学, 等. 硅锰渣一步法制备微晶铸石的热处理工艺及性能[J]. *硅酸盐学报*, 2022, 50(6):1677-1684.
XIN X, TAN Z X, ZHAO J X, et al. Heat treatment technology and properties of microcrystalline cast stone prepared by one-step method with silicon-manganese slag[J]. *Journal of the Chinese Ceramic Society*, 2022, 50(6):1677-1684.
[10] BEHERA S K, GHOSH C N, MISHRA D P, et al. Strength development and microstructural investigation of lead-zinc mill tailings based paste backfill with fly ash as alternative binder[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2020, 109.
[11] FALL M, POKHAREL M. Coupled effects of sulphate and temperature on the strength development of cemented tailings backfills: Portland cement-paste backfill[J]. *Cement and Concrete Composites*, 2010, 32(10):819-828.
[12] 马国伟, 李之建, 易夏玮, 等. 纤维增强砂浆充填材料的宏细观试验[J]. *北京工业大学学报*, 2016, 42(3):406-412.
MA G W, LI Z J, YI X W, et al. Macro and micro test of fiber reinforced mortar filling material[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 2016, 42(3):406-412.
[13] 侯永强, 尹升华, 赵国亮, 等. 聚丙烯纤维增强尾砂胶结充填体力学及流动性能研究[J]. *材料导报*, 2021, 35(19):19030-19035.
HOU Y Q, YIN S H, ZHAO G L, et al. Study on the mechanics and flow properties of polypropylene fiber reinforced cemented tailings filling[J]. *Materials Review*, 2021, 35(19):19030-19035.
[14] 徐文彬, 李乾龙, 田明明. 聚丙烯纤维加筋固化尾砂强度及变形特性[J]. *工程科学学报*, 2019, 41(12):1618-1626.
XU W B, LI G L, TIAN M M. Strength and deformation characteristics of reinforced polypropylene fiber cured tailings[J]. *Chinese Journal of Engineering Science*, 2019, 41(12):1618-1626.

(下转第 43 页)

Abstract: The continuous growth of graphite consumption in China has led to the continuous increase of the total amount of graphite solid waste, which will not only occupy space, but also cause damage to the environment. In order to help solve this problem, electric heating plates were prepared by using different forms and proportions of graphite solid waste, including mining waste rock and spherical graphite tailings, which provided a new idea for the selection of raw materials for electric heating plates. Through experiments, the variation law of heating performance of electric heating plates prepared by graphite solid waste with input voltage and graphite tailings content was preliminarily obtained, and the reliability of its long-term work was verified. The test results show that the heating performance of the electric heating plate is better when the input voltage is greater than 24 V. The higher the spherical graphite tailings are, the higher the output power of the electric heating plate is. After 270 cycles of heating, the volume resistivity of the heating plate still changed little, which shows that it can be used for a long time.

Keywords: graphite solid waste; spherical graphite tailings; electrothermal plate; electrothermal performance

[15] 陶博识, 刘卫星. 掺纤维加筋水泥基充填材料力学性能及流动性能研究[J]. 矿业研究与开发, 2022, 42(3): 94-101.
TAO B S, LIU W X. Study on mechanical properties and flow properties of fiber-doped reinforced cement base filling material [J]. Mining Research and Development, 2012, 42(3):

94-101.

[16] XUE G L, YILMAZ E, SONG W D, et al. Influence of fiber reinforcement on mechanical behavior and microstructural properties of cemented tailings backfill[J]. [Construction and Building Materials](#), 2019, 213:275-285.

Mechanical Properties and Mechanism of Glass Fiber Reinforced Cement Base Filling Cement Mortar

CAO Yanxia¹, SHEN Gang², MA Hui³

(1. Shanxi Vocational and Technical College, Taiyuan, Shanxi 030006, China; 2. Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China; 3. Binzhou University, Binzhou, Shandong 256600, China)

Abstract: The resource utilization of industrial waste slag is a hot issue in the field of material engineering. Glass fiber was used to enhance the mechanical properties of cement based filling mortar. Mechanical tests were carried out to explore the influence of fiber content and length on strength and the mechanism of glass fiber was analyzed through microscopic tests. The results show that the compressive and flexural strength of cement-based filling mortar first increases and then decreases with the increasing fiber content due to its reinforcement. The peak value of strength increase is 1.2%, and the middle length of glass fiber is the most beneficial to the strength enhancement. When the glass fiber content increases from 0 to 1.2%, the shear strength of the specimen increases by 75.7%, and the brittleness decreases when shear failure occurs, and the structural integrity is improved. The "bridging effect" of glass fiber enhances the adhesion force and friction force of hydration gel, inhibits the propagation of failure crack, and promotes the improvement of mechanical properties. This study can provide an important reference for the safe construction of backfill mining engineering and the resource utilization of glass waste residue.

Keywords: glass fiber; backfilling mortar; mechanical properties; failure mode; mechanism