

纤维增强尾砂充填体强度机制及关键影响因素研究*

齐红霞^{1,2}, 赵庆新³, 张庆超⁴, 冯国力⁴, 严红⁴

(1.江苏建筑职业技术学院 建筑建造学院, 江苏 徐州市 221116;

2.江苏建筑节能与建造技术协同创新中心, 江苏 徐州市 221116;

3.同济大学 土木工程学院, 上海 200092;

4.中国矿业大学 矿业工程学院, 江苏 徐州市 221116)

摘要:为研究纤维增强尾砂充填体强度机制以及长时养护下的关键影响因素,采用室内试验和理论分析方法,测试分析120 d长时养护条件下纤维含量、长度、种类对增强尾砂充填体强度的影响,结合Mohr-Coulomb强度理论分析纤维增强尾砂充填体机制。结果表明:当掺纤维含量较低时,近水平纤维段的拉紧力是增强尾砂充填体强度的内因;随着纤维含量的增加,尾砂充填体试样单轴抗压强度变化特征与纤维长度密切相关,当纤维长度较小时,试样单轴抗压强度呈现先增加后减小的变化特征,当纤维长度较大时,试样单轴抗压强度呈现先减小后增加再减小或先减小后增加的变化过程;随着聚丙烯纤维长度的增加,试样单轴抗压强度变化过程为先增加后降低再增加再降低;纤维种类对尾砂充填体单轴抗压强度和破坏形态影响明显,相较于聚丙烯纤维,掺玻璃纤维更有利于提升尾砂充填体单轴抗压强度,但在提升韧性方面则相对较弱,破坏程度和范围也更大。研究成果对井下采空区掺纤维尾砂膏体充填、深井沿空留巷等具有一定的参考价值。

关键词:尾砂充填体;聚丙烯纤维;玻璃纤维;单轴抗压强度;破坏形态

中图分类号:TD853.34;TU452 **文献标识码:**A

文章编号:1005-2763(2024)06-0121-07

0 引言

我国经济建设发展迅速,对矿业产量需求不断增大,浅部资源在高强度开采下陆续枯竭,导致许多矿山一方面进入深部开采阶段,另一方面采选后地表堆积的矸石、尾砂等固体废弃物大幅增多^[1-2]。深

部开采面临“三高一扰动”的复杂环境,而矿山固体废弃物不仅占用大量土地,污染环境,还易引发溃坝、自燃,甚至爆炸等事故^[3]。尾砂膏体充填开采不仅可以解决矿山地表尾砂堆积问题,还能有效控制岩层移动和地表沉降等危害,是一种安全、绿色、经济的开采方法^[4-6]。传统尾砂充填体脆性较大,充填体易开裂和失稳破坏,而通过掺入纤维可有效提高尾砂充填体的整体强度和韧性^[7-8]。众多学者围绕掺纤维尾砂充填体强度变化特征、机理和破坏形态等方面开展了大量研究。赵康、张志友等^[9-11]采用核磁共振试验发现纤维可减少充填材料初始缺陷,有利于阻滞裂纹扩展;王胜开、严荣富、侯永强等^[12-14]分析了纤维含量、掺量等因素对充填体流动性的作用特征;徐文彬、薛改利、马国伟等^[15-17]利用电镜扫描、工业X射线CT切片扫描和重构方法,发现掺入纤维可有效改变尾砂充填体压缩前的孔隙度,且随着纤维含量的增加,尾砂膏体内孔隙度也不断增加,进而影响了尾砂充填体强度;石静、杨晓炳等^[18-19]通过单轴压缩试验得出随着纤维含量的增加,尾砂充填体抗压强度呈现先增加后降低的变化过程;崔秀丽等^[20]发现掺纤维尾砂胶结体在单轴应力作用下产生的裂纹短而细,整体完整性较好。

然而,目前对于掺纤维增强尾砂充填体强度的机理以及长时养护条件下影响掺纤维尾砂充填体强度的主要因素研究较少,因此,本文对长时养护下纤

* 收稿日期:2023-08-22

基金项目:江苏建筑节能与建造技术协同创新中心青年博士基金项目(SJXTBS2112);江苏建筑职业技术学院博士专项基金项目(JYJBZX20-04)。

作者简介:齐红霞(1984—),女,河北石家庄人,博士,讲师,主要从事大宗固体废物高效安全利用及新型建筑材料研究工作,E-mail:hongxiaqi222@cumt.edu.cn。

通信作者:赵庆新(2000—),男,山东聊城人,博士研究生,主要从事岩土体材料以及纤维增强材料的力学性质和应用研究,E-mail:2211277@tongji.edu.cn。

维增强尾砂充填体强度试验及主要影响因素进行了深入研究。研究结果对井下采空区掺纤维尾砂膏体充填、深井沿空留巷等具有一定的参考价值。

1 试验材料与方法

试验材料选自某铁矿尾砂,尾砂颗粒粒径集中分布于 50 μm 左右,水泥选用硫铝酸盐水泥,初凝时间为 15 min,水采用自来水。为提高尾砂用量以及保障尾砂充填体的强度和流动性,充填料浆质量浓度为 74.5%,灰砂比为 1:9,水灰比为 3.42。为减小试验误差,增强试验科学性,同一规格的试样为一组,每组包括 3 个试样。

共制作 33 组试验样品,样品制备完毕后放入恒温恒湿标准养护箱中养护,保持养护温度为 20 ℃,湿度为 95%。待养护时间到达 120 d 后,取出试样,采用 WDW-300 万能试验机进行单轴抗压强度测试,加载速率为 1 mm/min,试验主要步骤包括制样、养护、试验机加载标定、试验测试等。综合测试有无纤维、纤维种类、纤维长度和纤维含量对尾砂充填体试样强度的作用特征,试验方案见表 1。

表 1 掺纤维尾砂充填体强度测试试验方案

Table 1 Test schemes for strength test of fiber-mixed tailings filling body

方案	纤维种类	纤维长度 l/mm	纤维含量 P/%	养护时间/d	试样数量
方案 1	无	无	无	120	3
方案 2	玻璃纤维	6	0.25,0.5	120	6
方案 3	聚丙烯纤维	6	0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5	120	18
方案 4	聚丙烯纤维	9	0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5	120	18
方案 5	聚丙烯纤维	12	0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5	120	18
方案 6	聚丙烯纤维	15	0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5	120	18
方案 7	聚丙烯纤维	18	0.25,0.5,0.75,1,1.25,1.5	120	18

2 纤维增强尾砂充填体试样单轴抗压强度试验

2.1 试验结果分析

部分充填体试样的单轴抗压强度试验结果如图 1 所示。由图 1 可知,无纤维时尾砂充填体试样单轴抗压强度为 0.59 MPa;掺入的玻璃纤维长度为 6 mm 含量为 0.25%时,尾砂充填体试样单轴抗压强度达到 1.51 MPa,增幅为 155.93%;掺聚丙烯纤维长度 6 mm 和含量 0.25%、长度 6 mm 和含量 0.5% 的以及长度 15 mm 和含量 0.25%的尾砂充填体试

样单轴抗压强度分别达到了 1.13 MPa、1.22 MPa 和 1.57 MPa,较无纤维时增幅分别为 91.53%、106.78%和 166.1%,说明尾砂胶结体掺入玻璃纤维或聚丙烯纤维后,单轴抗压强度均显著提高。而随着掺入纤维种类、纤维长度、纤维含量因素不同,尾砂充填体单轴抗压强度较无纤维时增幅也出现较大差别。

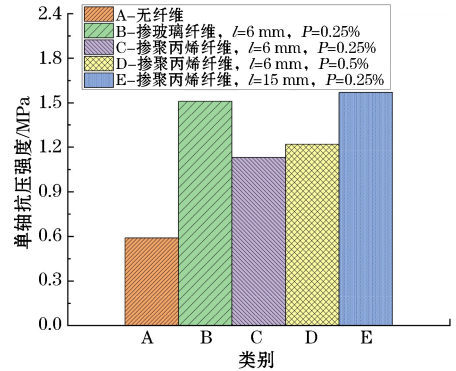


图 1 尾砂充填体试样单轴抗压强度

Fig.1 Uniaxial compressive strength of tailings filling body

2.2 纤维增强尾砂充填体机制

掺纤维尾砂充填体在单轴压缩过程中,纤维的拉紧力在水平分量的作用将增强充填体试样的强度,如图 2 所示,设试样泊松比为 μ,高度为 H (mm),半径为 R (mm),H = 4R;两任意胶结点坐标分别为(x₁, y₁, z₁)和(x₂, y₂, z₂),两胶结点与水平方向的夹角设为 θ(°);设竖直方向位移为 dH,则根据泊松比公式可得,径向伸长量为 0.5μdH。

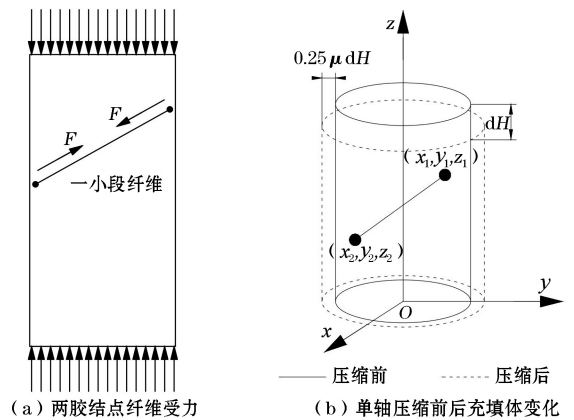


图 2 掺纤维尾砂充填体单轴加载过程中试样变形示意
Fig.2 The deformation of the sample during the uniaxial loading process of the fiber tailings filling body

为使纤维在压缩过程中发挥积极作用,即处于伸长状态,则:

$$\begin{aligned}
 &(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2+(z_1-z_2)^2 < \\
 &(x_1-x_2)^2\left(\frac{\mu dH}{4R}+1\right)^2 + \\
 &(y_1-y_2)^2\left(\frac{\mu dH}{4R}+1\right)^2 + \\
 &(z_1-z_2)^2\left(1-\frac{dH}{H}\right)^2 \quad (1)
 \end{aligned}$$

化简并去除二阶无穷小量,可得:

$$\frac{(z_1-z_2)^2}{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2} < \frac{\frac{\mu dH}{2dH}}{\frac{2dH}{H}} = \frac{\mu H}{4R} = \mu \quad (2)$$

又由于:

$$\tan\theta = \frac{z_1-z_2}{\sqrt{(x_1-x_2)^2+(y_1-y_2)^2}} \quad (3)$$

综合可得:

$$\tan^2\theta < \mu \quad (4)$$

当 $\mu=0.2$ 时,则可解得 θ 的范围为 0° 到 24.1° ,即当纤维段与水平面夹角在 0° 到 24.1° 的范围内时,纤维对尾砂充填体的强度才有增强效果。纤维增强尾砂充填体可以近似等同为内聚力变化的结果,结合 Mohr-Coulomb 强度理论,如图 3 所示,莫尔圆 1 表征无纤维试样,莫尔圆 3 则可以表征掺纤维试样。为定性描述掺入纤维的意义,将纤维拉紧力的水平分力视为试样的“围压”,则可认为由莫尔圆 1 转换得到莫尔圆 2,且限于 θ 的范围,纤维拉紧力垂直分力的影响较有限。综合可得,纤维增强尾砂充填体强度的内因是近水平纤维段拉紧力的水平分力。

在试验过程中,掺入纤维后,试样内摩擦角也有所改变,对此可认为是纤维拉紧力的垂直分力与水平分力共同作用的结果。此处理论分析仅适用于纤维含量较低的情况,当纤维含量较大时,膏体浆液流动性下降,结块性增强,易造成裂隙发育扩展等问题,从而导致膏体凝结后强度下降。

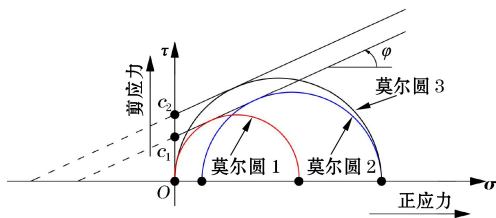


图 3 纤维增强尾砂充填体的莫尔圆转换示意

Fig.3 Mohr's circle conversion of fiber reinforced tailings filling body

3 纤维增强全尾砂充填体强度的关键影响因素

3.1 纤维含量对尾砂充填体强度的影响

为了综合分析纤维含量对尾砂充填体试样强度的作用特征,选择掺入纤维种类为常用的聚丙烯纤维,长度分别为 6 mm、9 mm、12 mm、15 mm 和 18 mm,纤维含量分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.25% 和 1.5%,掺纤维尾砂充填体试样单轴抗压强度结果如图 4 所示。由图 4 可知,纤维含量对尾砂充填体试样单轴抗压强度影响显著,掺聚丙烯纤维长度为 12 mm,当纤维含量为 0.25% 时,试样单轴抗压强度为 1.2 MPa;当纤维含量增至 0.5% 时,试样单轴抗压强度值增加至 1.73 MPa,增幅为 44.17%;当纤维含量增加至 1% 时,试样单轴抗压强度为 0.91 MPa,较纤维含量为 0.5% 时下降了 47.39%。随着纤维含量的增加,尾砂充填体试样单轴抗压强度变化特征又与纤维长度密切相关,当纤维长度较小,即纤维长度 $l=6$ mm 时,尾砂充填体单轴抗压强度呈现先增加后减小的变化特征;当纤维长度从 9 mm 到 18 mm 时,除纤维长度为 12 mm 时,尾砂充填体单轴抗压强度为先增加后减小再小幅增加再减小的变化外,其余均为先减小后增加再减小或先减小后增加的变化过程。说明通过掺同类纤维增强尾砂充填体单轴抗压强度时,不仅需要考虑掺入纤维的含量,也需要结合纤维的长度,根据不同纤维长度的情况,确定合理的纤维含量值,进而有效保障掺纤维尾砂充填体的单轴抗压强度。

3.2 纤维长度对尾砂充填体强度的影响

为综合分析纤维长度对尾砂充填体试样单轴抗压强度的作用特征,选择的纤维种类为常用的聚丙烯纤维,含量分别为 0.25%、0.5%、0.75%、1%、1.25% 和 1.5%,纤维长度分别为 6 mm、9 mm、12 mm、15 mm 和 18 mm,掺纤维尾砂充填体试样单轴抗压强度结果如图 5 所示。由图 5 可知,纤维长度对掺纤维尾砂充填体单轴抗压强度影响显著,选择聚丙烯纤维含量 0.5% 进行说明,当纤维长度为 6 mm 时,尾砂充填体试样单轴抗压强度为 1.22 MPa;当纤维长度增加至 9 mm 时,对应的试样单轴抗压强度减小至 1.16 MPa,降幅为 4.92%;当纤维长度增加至 12 mm 时,试样单轴抗压强度增加至 1.73 MPa,较纤维长度为 6 mm 时单轴抗压强度增

幅达 41.8%；当纤维长度增加至 18 mm 时，试样单轴抗压强度减小至 1.01 MPa，较纤维长度为 6 mm 时单轴抗压强度降幅为 17.21%。随着聚丙烯纤维长度增加，尾砂充填体试样单轴抗压强度变化特征与纤维含量密切相关，当纤维含量较低，即 $P = 0.25\%$ 时，随着聚丙烯纤维长度的增加，试样单轴抗压强度变化过程为先增加后降低再增加再降低；当纤维含量为 $0.50\% \sim 1.00\%$ 时，随聚丙烯纤维长度的增加，试样单轴抗压强度变化过程为先减小再增加再减小；当纤维含量超过 1% 时，随着聚丙烯纤维长度的增加，试样单轴抗压强度整体较低，且变化幅度也较小。

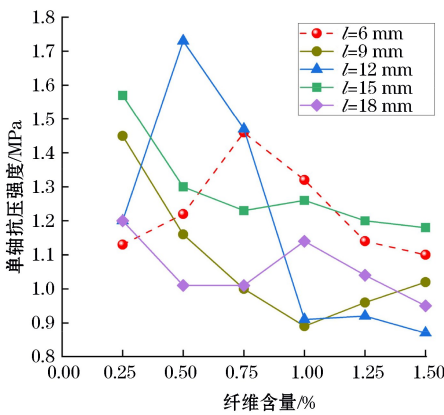


图 4 不同纤维长度下随纤维含量增加掺纤维尾砂充填体试样单轴压缩强度试验结果

Fig.4 Uniaxial compression strength test results of fiber-mixed tailings filling body samples with increasing fiber content at different fiber lengths

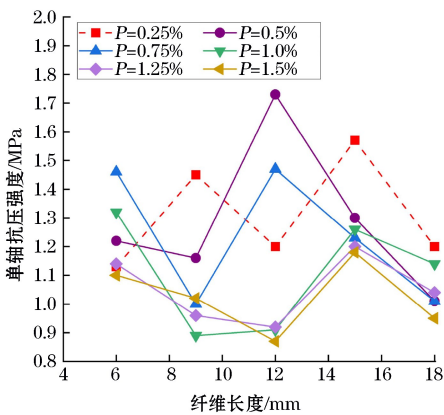


图 5 不同纤维含量下随纤维长度增加掺纤维尾砂充填体试样单轴压缩强度试验结果

Fig.5 Uniaxial compression strength test results of fiber-mixed tailings filling body samples with increasing fiber length at different fiber contents

为分析单轴加载过程中不同纤维长度下掺纤维尾砂充填体试样的变化特征，选择聚丙烯纤维含量为 0.5% 时进行分析，不同纤维长度下掺纤维尾砂充填体应力-应变曲线如图 6 所示。由图 6 可知，除纤维长度为 12 mm 外，其余纤维长度下试样单轴压缩应力峰后曲线变化均较平缓，说明纤维改进了试样的脆性破坏特征，增强了试样的韧性；纤维长度为 18 mm 时，单轴抗压强度最低，应力峰值区域不明显；当纤维长度为 12 mm 时，试样单轴抗压强度值达到最大，应力峰值区域显著。

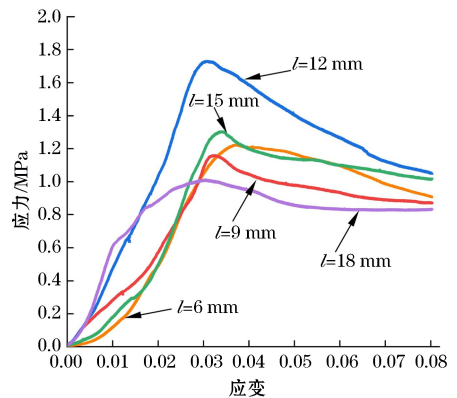


图 6 不同纤维长度下掺纤维尾砂充填体试样单轴压缩应力-应变曲线

Fig.6 Uniaxial compressive stress-strain curves of fiber tailings filling body samples at different fiber lengths

3.3 纤维种类对尾砂充填体强度的影响

为综合测试纤维种类对尾砂充填体试样单轴抗压强度的作用特征，选择对掺入玻璃纤维和聚丙烯纤维的尾砂充填体试样进行分析，其中玻璃纤维和聚丙烯纤维长度均为 6 mm，纤维含量为 0.25% ，掺不同纤维尾砂充填体单轴加载过程中应力-应变曲线如图 7 所示，纤维含量分别为 0.25% 和 0.5% 时掺入聚丙烯纤维和玻璃纤维尾砂充填体单轴应力强度结果比较如图 8 所示。由图 7 和图 8 可知，在纤维长度及含量相同的情况下，掺入玻璃纤维尾砂充填体试样的单轴抗压强度较掺入聚丙烯纤维高。掺入玻璃纤维后，纤维含量为 0.25% 和 0.5% 的尾砂充填体试样单轴压缩强度分别为 1.51 MPa 和 1.46 MPa，分别是掺入相同比例聚丙烯纤维试样的 1.34 和 1.2 倍。相较于掺入聚丙烯纤维尾砂充填体，掺入玻璃纤维尾砂充填体试样的单轴压缩残余应力曲线下降速度显著增加，表明在改善尾砂充填体脆性方面，聚丙烯纤维优于玻璃纤维。

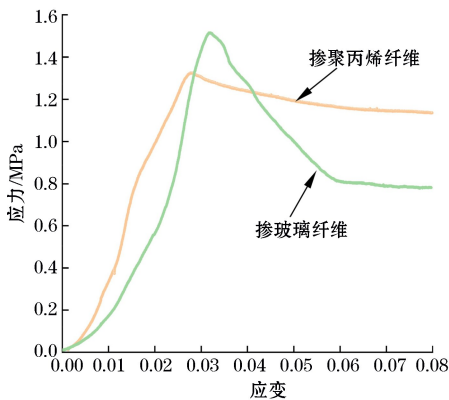


图7 不同纤维类别掺纤维尾砂充填体试样单轴压缩应力-应变曲线

Fig.7 Uniaxial compressive stress-strain curves of fiber tailings filling body samples at different fiber types

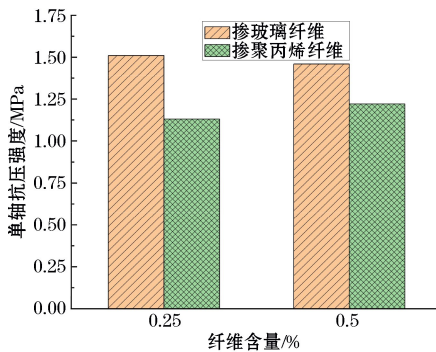


图8 纤维含量0.25%和0.5%时掺入聚丙烯纤维和玻璃纤维尾砂充填体单轴抗压强度结果比较

Fig.8 Comparison of uniaxial stress strength results of tailings filling body of polypropylene fiber and glass fiber filled bodies with 0.25% and 0.5% fiber contents

3.4 掺纤维尾砂充填体单轴压缩破坏形态特征

为分析随纤维含量、长度、种类影响因素的变化,掺纤维尾砂充填体单轴压缩破坏形态变化特征,分别选择掺入聚丙烯纤维和玻璃纤维两种类别,纤维含量包括0.25%、0.5%、1.5%,纤维长度包括6 mm、15 mm和18 mm,掺纤维充填体单轴压缩破坏形态如图9所示。由图9可知,在纤维含量和纤维长度相同的情况下,较掺入聚丙烯纤维,掺入玻璃纤维尾砂充填体的破坏程度更大,尤其是纤维含量较低时,掺玻璃纤维尾砂充填体试样上表面区域完全破坏,整体破坏范围大,并形成沿试样轴向的贯穿大裂缝。对于掺聚丙烯纤维尾砂充填体,在纤维长度相同的情况下,随纤维含量的增加,单轴压缩破坏后试样裂隙发育和破坏程度均有改善;纤维含量较低时,增加纤维长度,显著抑制了裂缝的形成和扩展,

试样整体完整性明显提高。另外,纤维长度和纤维含量均较大时,宏观大裂隙和裂缝较少,试样完整性也相对较好。



图9 掺纤维尾砂充填体试样单轴压缩破坏形态

Fig.9 Uniaxial compression damage patterns of fiber tailings filling body samples

4 结论

(1) 尾砂充填体掺入纤维后,单轴抗压强度均显著提高,并随着掺入纤维种类、纤维长度、纤维含量不同,尾砂充填体单轴抗压强度较无纤维时增幅也出现显著差别。

(2) 纤维含量较低时,纤维增强尾砂充填体强度机制为近水平纤维段拉紧力的水平分力作用。

(3) 随着纤维含量的增加,尾砂充填体试样单轴抗压强度变化特征与纤维长度密切相关,当纤维长度较小时,尾砂充填体试样单轴抗压强度呈现先增加后减小的变化特征;当纤维长度较大时,尾砂充填体试样单轴抗压强度呈现先减小后增加再减小或先减小后增加的变化过程。

(4) 随着聚丙烯纤维长度的增加,试样单轴抗压强度变化过程为先增加后降低再增加再降低;当纤维含量相对较高时,随着聚丙烯纤维长度的增加,试样单轴抗压强度变化特征为先减小再增加再减小。

(5) 在纤维长度及含量相同的情况下,较掺入聚丙烯纤维,掺入玻璃纤维的尾砂充填体单轴抗压

强度更大,但在提升韧性方面则相对较弱,破坏程度和范围更大,改善尾砂充填体脆性的效果更弱。

参考文献(References):

- [1] 张吉雄,张强,周楠,等.煤基固废充填开采技术研究进展与展望[J].煤炭学报,2022,47(12):4167-4181.
ZHANG Jixiong, ZHANG Qiang, ZHOU Nan, et al. Research progress and prospect of coal based solid waste backfilling mining technology [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4167-4181.
- [2] 郭利杰,刘光生,马青海,等.金属矿山充填采矿技术应用研究进展[J].煤炭学报,2022,47(12):4182-4200.
GUO Lijie, LIU Guangsheng, MA Qinghai, et al. Research progress on mining with backfill technology of underground metalliferous mine [J]. Journal of China Coal Society, 2022, 47(12): 4182-4200.
- [3] 何满潮,谢和平,彭苏萍,等.深部开采岩体力学研究[J].岩石力学与工程学报,2005(16):2803-2813.
HE Manchao, XIE Heping, PENG Suping, et al. Study on rock mechanics in deep mining engineering [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2005 (16): 2803-2813.
- [4] 孙希奎.“三下”采煤膏体充填开采技术研究[J].煤炭科学技术,2021,49(1):218-224.
SUN Xikui. Research on paste backfilling mining technology of coal mining under buildings, water bodies and railways [J]. Coal Science and Technology, 2021, 49(1): 218-224.
- [5] 程海勇,吴爱祥,吴顺川,等.金属矿山固废充填研究现状与发展趋势[J].工程科学学报,2022,44(1):11-25.
CHENG Haiyong, WU Aixiang, WU Shunchuan, et al. Research status and development trend of solid waste backfill in metal mines [J]. Chinese Journal of Engineering, 2022, 44(1): 11-25.
- [6] 王永岩,于卓群,崔立桩.不同含水率膏体充填材料的单轴压缩试验研究[J].煤炭科学技术,2022,50(6):219-224.
WANG Yongyan, YU Zhuoqun, CUI Lizhuang. Experimental study on compressive behavior of cemented paste backfill material with different water contents [J]. Coal Science and Technology, 2022, 50(6): 219-224.
- [7] 张建鹏.自密实玄武岩纤维渣混凝土性能研究[D].石河子:石河子大学,2017.
ZHANG Jianpeng. The study on performance of self-compacting basalt fiber reinforced slag concrete [D]. Shihezi: Shihezi University, 2017.
- [8] 李江.强韧性胶结充填材料承载特性研究及应用[D].徐州:中国矿业大学,2021.
LI Jiang. Research and application of load-bearing characteristics of strong and tough cemented filling materials [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021.
- [9] 赵康,何志伟,严雅静,等.纤维增强超细尾砂充填体微观破坏机制[J].岩石力学与工程学报,2022,42(增刊1):3010-3020.
ZHAO Kang, HE Zhiwei, YAN Yajing, et al. Microscopic failure mechanism of fiber reinforced ultra-fine tailings backfill [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 42(S1): 3010-3020.
- [10] 赵康,宋宇峰,于祥,等.不同纤维作用下尾砂胶结充填体早期力学特性及损伤本构模型研究[J].岩石力学与工程学报,2022,42(2):282-291.
ZHAO Kang, SONG Yufeng, YU Xiang, et al. Study on early mechanical properties and damage constitutive model of tailing-cemented backfill with different fibers [J]. Chinese Journal of Rock Mechanics and Engineering, 2022, 42(2): 282-291.
- [11] 张志友,甘德清,薛振林,等.基于NMR技术的孔隙结构与充填体强度关联机制[J].工程科学与技术,2022,54(4):121-128.
ZHANG Zhiyou, GAN Deqing, XUE Zhenlin, et al. Correlation mechanism between pore structure and backfill strength based on NMR technology [J]. Advanced Engineering Sciences, 2022, 54(4): 121-128.
- [12] 王胜开,朱志根,刘家明.聚丙烯纤维对膏体充填料流动性影响的分析[J].矿业研究与开发,2022,42(3):102-108.
WANG Shengkai, ZHU Zhigen, LIU Jiaming. Analysis on the influence of polypropylene fiber on the flowability of paste slurry [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(3): 102-108.
- [13] 严荣富,尹升华,刘家明,等.掺聚丙烯纤维粗骨料膏体流变性能及计算模型[J].中南大学学报(自然科学版),2022,53(4):1450-1460.
YAN Rongfu, YIN Shenghua, LIU Jiaming, et al. Rheological properties and calculation models of coarse aggregate paste with polypropylene fiber [J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(4): 1450-1460.
- [14] 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 Yongqiang, YIN Shenghua, ZHAO Guoliang, et al. Study on the mechanical and flow properties of polypropylene fiber reinforced tailing sand cemented tailings backfill [J]. Materials Reports, 2021, 35(19): 19030-19035.
- [15] 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 Wenbin, LI Qianlong, TIAN Mingming. Strength and deformation properties of polypropylene fiber-reinforced cemented tailings backfill [J]. Chinese Journal of Engineering, 2019, 41(12): 1618-1626.
- [16] 薛改利.掺纤维尾砂充填体多尺度力学特性及损伤演化机理研究[D].北京:北京科技大学,2020.
XUE Gaili. Research on multi-scale mechanical properties and failure evolution mechanism of fiber reinforce cemented tailings backfill [D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing, 2020.
- [17] 马国伟,李之建,易夏玮,等.纤维增强膏体充填材料的宏微观试验[J].北京工业大学学报,2016,42(3):406-412.

- MA Guowei, LI Zhijian, YI Xiawei, et al. Macro-meso experiment of fiber-reinforced cement paste filling material[J]. Journal of Beijing University of Technology, 2016, 42(3): 406-412.
- [18] 石静,王强.玻璃纤维增强水泥基尾砂胶结充填体力学性能试验研究[J].矿业研究与开发, 2022, 42(10): 51-57.
- SHI Jing, WANG Qiang. Experimental study on mechanical properties of glass fiber reinforced cement-based tailings cemented backfill[J]. Mining Research and Development, 2022, 42(10): 51-57.
- [19] 杨晓炳,侯永强,尹升华,等.纤维增强含硫尾砂胶结充填体的力学性能及能量分配演化特征[J].中南大学学报(自然科学版), 2022, 53(11): 4435-4448.
- YANG Xiaobing, HOU Yongqiang, YIN Shenghua, et al. Mechanical properties and energy distribution evolution characteristics of fiber-reinforced cemented sulfur tailings backfill[J]. Journal of Central South University (Science and Technology), 2022, 53(11): 4435-4448.
- [20] 崔秀丽,刘庆,李广洲.聚丙烯纤维对水泥基充填复合材料强度性能及破坏形态的影响[J].矿业研究与开发, 2022, 42(8): 119-124.
- CUI Xiuli, LIU Qing, LI Guangzhou. Study of strength properties and damage morphology of polypropylene fibers on cement-based composite filling materials [J]. Mining Research and Development, 2022, 42(8): 119-124.

Study on the Mechanism and Key Influencing Factors of Tailings Filling Body Strength Reinforced by Fiber

QI Hongxia^{1,2}, ZHAO Qingxin³, ZHANG Qingchao⁴, FENG Guoli⁴, YAN Hong⁴

(1.School of Architectural Construction, Jiangsu Vocational Institute of Architectural Technology,

Xuzhou, Jiangsu 221116, China; 2.Jiangsu Collaborative Innovation Center for Building

Energy Saving and Construction Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China;

3.College of Civil Engineering, Tongji University, Shanghai 200092, China;

4.School of Mines, China University of Mining and Technology, Xuzhou, Jiangsu 221116, China)

Abstract: In order to study the mechanism of tailings filling body strength reinforced by fiber and the key influencing factors under long-term curing, the effects of fiber content, length and type on reinforcing the strength of tailings filling body under 120 days long-term curing conditions were tested and analyzed by laboratory test and theoretical analysis. The mechanism of tailings filling body strength reinforced by fiber was analyzed by Mohr-Coulomb strength theory. The results show that when the fiber content is low, the tensile force of the near-horizontal fiber segment is the internal cause to enhance the strength of the tailings filling body. With the increase of fiber content, the variation characteristics of uniaxial compressive strength of tailings filling body sample are closely related to the fiber length. When the fiber length is small, the uniaxial compressive strength of the sample increases first and then decreases. When the fiber length is large, the uniaxial compressive strength of the sample decreases first and then increases and then decreases or decreases first and then increases. With the increase of polypropylene fiber length, the uniaxial compressive strength of the sample increases first, then decreases, then increases and then decreases. The fiber type has a significant effect on the uniaxial compressive strength and failure mode of tailings filling body. Compared with polypropylene fiber, glass fiber is more conducive to improving the uniaxial compressive strength of tailings filling body, but it is relatively weak in improving toughness, and the degree and scope of damage are greater. The research results have certain reference value for the filling of fiber tailings paste in underground goaf and the gob-side entry retaining in deep wells.

Key words: Tailings filling body, Polypropylene fiber, Glass fiber, Uniaxial compressive strength, Failure mode