

西峪煤矿井下玻璃纤维增强注浆材料的强度性能研究*

王晓林¹, 周凯^{1,2}

(1. 太原学院 建筑与环境工程系, 山西 太原 030032;

2. 太原理工大学 土木工程学院, 山西 太原 030024)

摘要: 为了提升矿用堵水注浆材料的力学性能, 提出采用废弃玻璃纤维进行材料改性。通过开展单轴压缩试验探究了注浆体强度受纤维长度、掺量和养护时间的影响规律, 结合损伤分析和微观图像对废弃玻璃纤维的增强机理进行探讨。结果表明: 掺入玻璃纤维使注浆体的抗压强度和延性显著提高; 抗压强度的增长速度随养护时间增加而下降, 3 d内增长速率较快, 3 d后趋于稳定; 玻璃纤维长度对强度影响显著, 短切纤维对强度增长贡献值最高; 随着纤维掺量增加, 强度指标呈先增后减的变化规律, 当纤维掺量为0.3%~0.4%时达到最大; 纤维在水泥胶砂中的桥接效应可抑制压缩裂缝的扩展, 对试件破坏起到缓冲作用; 当玻璃纤维的长度过大或掺量过高时会增加局部区域的孔隙率, 使矿用堵水注浆体的变形和强度性能发生弱化。

关键词: 玻璃纤维; 矿山防治水; 注浆材料; 注浆体强度; 微观机理

中图分类号: TD528 **文献标识码:** A

文章编号: 1005-2763(2024)03-0220-05

0 引言

山西省西峪煤矿矿区煤直接顶的岩层主要为泥质灰岩, 局部石膏胶结体的力学性能较差, 易引发局部区域的断层^[1]。在复杂环境因素与外部荷载影响下, 矿区内的围岩支护结构在服役过程中出现强度倒缩, 甚至发生开裂变形的现象, 对矿井的安全生产造成严重影响^[2]。井下涌水是西峪煤矿开采过程中遇到的一种危害极大的自然灾害^[3]。为了维持支护结构的稳定性, 采用水泥基注浆材料对围岩的裂缝进行及时修补是一项重要工作^[4]。矿用堵水注浆材料在井下水害预防和治理过程中具有广泛应用, 在迅速封堵裂隙、支承外部荷载和限制结构损伤增长等方面具有重要作用, 修补效果在很大程度上取决于堵水注浆材料的力学性能^[5]。

近年来, 大量学者通过将不同类别和掺量的纤维掺入水泥速凝注浆材料中以提高材料强度, 取得了良好的效果^[6-7]。随着我国固废资源化利用产业的升级, 广大从业者对废弃玻璃渣材料中蕴藏的回收价值愈发重视^[8]。在1450℃左右的熔融温度下可以将玻璃废渣熔制成液态, 排除气泡后输送至多孔板, 经高速离心拉丝法制成纤维^[9]。目前, 玻璃纤维在水泥基材料中的应用已经取得了诸多成果。高永红等^[10]研究了玻璃纤维增强混凝土的力学行为, 发现纤维的掺杂对试件抗拉强度的提升效果显著。陈祎等^[11]将高钛玻璃纤维掺入到水泥砂浆中, 发现纤维掺量对流动性、抗压强度、弹性模量等材料参数有显著影响。ZHOU等^[12]开展压缩试验获得了玻璃纤维增加混凝土强度的规律, 通过微观图像揭示了纤维的加筋机理。XUE等^[13]探讨了玻璃纤维对矿山充填料浆的力学行为和微观形态的影响, 发现掺量和养护时间对强度增幅存在较大差异。前人的研究表明纤维改性作用可有效提升水泥砂浆的黏结程度, 提高胶砂的界面附着力, 抑制裂纹的扩展, 进而充分发挥承载性能^[14-16]。然而, 目前对废弃玻璃纤维增加矿用堵水注浆材料强度的影响因素考虑得还不充分, 关于注浆材料胶结机理的研究成果也亟待丰富。

本研究基于西峪煤矿的工程背景, 将玻璃纤维作为外掺料制备了矿用注浆试件, 讨论了不同养护时间、纤维长度、掺量对注浆体力学性能的影响, 结合微观图像揭示了纤维增强机理, 以期为研制新型矿用注浆材料提供参考。

1 工程概况

玻璃纤维增强注浆材料是一种重要的复合材

* 收稿日期: 2023-05-09

基金项目: 山西省高等学校教学改革创新项目(J2021773); 太原学院院级科研项目(21TKQ17)。

作者简介: 王晓林(1988—), 女, 山西太原人, 硕士, 讲师, 主要从事土木工程材料改性的研究, E-mail: ruide15@126.com。

料,基体材料主要起到黏结和传递剪力作用,现已应用于西峪煤矿井下的建设。本项目洞门的横向剖面如图 1 所示。钢筋格栅喷射混凝土厚度为 350 mm,内衬墙体为现浇 C40 钢筋混凝土防渗结构。在西峪煤矿的洞门掌子面开挖工程中,采用了钢筋格栅喷射混凝土作为初期支护结构,后期需采用玻璃纤维增强注浆材料进行筋后置换施工。

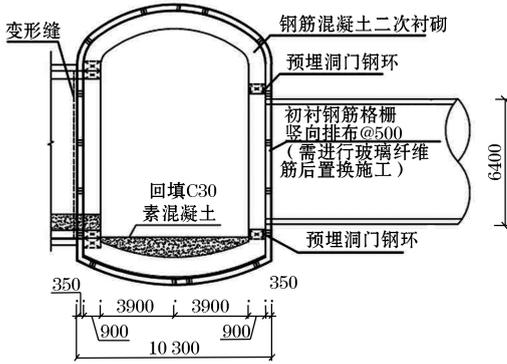


图 1 洞门的横向剖面(单位:mm)

2 试样制备与试验方法

2.1 矿用堵水注浆材料制备

注浆的原材料包括含硫细铁尾砂、水泥、粉煤灰和玻璃纤维。经检测,细尾砂的堆积密度为 1.91 g/cm^3 ,干密度为 2.73 g/cm^3 。细尾砂的粒度分布结果表明尾砂粒径主要集中在 $0.1 \sim 1.0 \text{ mm}$ 之间。由 XFD 分析结果得到了尾砂的化学成分,结果见表 1,可以看出细尾砂颗粒主要化学成分为 SiO_2 ,具有作为骨料的有益条件。使用的粉煤灰材料来自燃煤发电厂,粉煤灰颗粒的比表面积为 $350 \text{ m}^2/\text{kg}$,密度为 1.89 g/cm^3 ,用小型球磨机将粉煤灰磨细。胶凝材料采用硫铝酸盐水泥,主要矿物组成以硅酸二钙和无水硫铝酸钙为主。该水泥颗粒的比表面积为 $349.5 \text{ m}^2/\text{kg}$,终凝时间为 90 min ,远低于常规的硅酸盐水泥,是一种高效的速凝剂。采用的玻璃纤维相关技术指标见表 2,该纤维具有优质的延展、力学和耐腐蚀的性能。

注浆材料制备过程中先把称量好的纤维、细尾砂、水泥和粉煤灰分批次倒进搅拌机中;开启搅拌机干拌 2 min 后再加入一定质量的水湿拌 5 min ;然后停止搅拌,并将料浆注入模具,同时用橡胶锤敲打模具使料浆更加均匀;最后,将模具放入养护室中进行养护,1 d 后拆模并继续养护至一定时间。

表 1 细尾砂化学成分

SiO_2	CaO	Al_2O_3	Fe_2O_3	MnO	其他
88.6	2.6	2.2	2.1	0.2	4.3

表 2 玻璃纤维的技术指标

纤维长度/mm	单丝直径/ μm	密度/ (g/cm^3)	延伸率/%	弹性模量/GPa	抗拉强度/MPa	耐酸碱碱性	分散性
3~20	10	2.33	29	12.02	948	强	好

2.2 纤维增强注浆材料的设计配比

为获得玻璃纤维增强注浆材料的最优配比,采用 3 种不同长度和 5 种掺量的干燥纤维材料作为测试条件。采用力学测试获得注浆材料单轴抗压强度为考察指标,砂浆固定水固比为 0.55,灰砂比为 $1:2$,纤维长度分别取为 5 mm 、 10 mm 和 15 mm ,记为短切、中切和长切纤维,采用 0.1% 、 0.2% 、 0.3% 、 0.4% 和 0.5% 共 5 种纤维掺量制备注浆试件,测试的 16 组因素水平设计见表 3, F_0 为基准参照组。

表 3 试验因素水平设计

试验编号	纤维类型	纤维掺量/%
F_0	无	0
F_1, F_2, F_3, F_4, F_5	长	$0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$
$F_6, F_7, F_8, F_9, F_{10}$	中	$0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$
$F_{11}, F_{12}, F_{13}, F_{14}, F_{15}$	短	$0.1, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5$

2.3 试验方法

2.3.1 强度测试

使用单轴压缩试验机开展强度测试,试验机的加载速率设为 0.25 mm/min ,试验前先进行预加载以消除承压板和试件之间的空隙。试件破坏后采用高清摄像机进行记录,分析不同条件下注浆试件在压缩载荷下的损伤特征。用于压缩的试件直径为 50 mm ,高度为 100 mm ,压缩速率为 0.5 mm/min 。

2.3.2 扫描电镜试验

注浆试件的微观结构形貌通过扫描电子显微镜得到的 SEM 图像进行观察。试验前,在试块中心部位取 $5 \text{ mm} \times 5 \text{ mm} \times 2 \text{ mm}$ 薄片状样品,将样品放至无水乙醇中浸泡 24 h ,对薄片进行镀金处理后放至扫描电镜观察切片的形貌。

3 结果分析与讨论

3.1 应力-应变曲线

对注浆试件开展单轴压缩试验,使其在荷载作用下发生破坏。通过试验得到了不同玻璃纤维掺量条件下的应力-应变关系和压裂破坏形态。以养护

时间为 7 d、纤维长度为 5 mm 的试件为例,不同玻璃纤维掺量下应变曲线如图 2 所示。由图 2 可以看出:随着竖向应变的增长,注浆材料大致经历了初始压密、弹性上升和峰后应力跌落 3 个阶段。掺入玻璃纤维后,试件的峰值应力及其对应的竖向应变均增大。该现象说明纤维加筋作用使试件的塑性变形性能优于普通注浆材料,掺入适量玻璃纤维不仅能提高强度,还可以改善材料的延性。

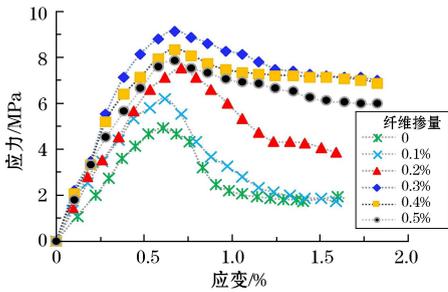


图 2 注浆试件的应力-应变曲线

整个压缩破坏的过程可划分为 3 个主要阶段,并与应力-应变曲线的变化规律相对应。初始压缩阶段会对试件内部的原生孔隙进行压缩,竖向应力随应变的增加而缓慢上升,试件的破坏区域出现了斜向的微小裂隙。损伤发展阶段中试件发生塑性变形,竖向应力随着应变的增加而迅速提高,压缩裂隙向试件的边缘发展,形成斜向的破坏裂缝,并伴有少量颗粒从试件表面脱落。在压裂阶段中,随着竖向应力的增大,中部的压缩裂缝发展愈来愈宽,大量颗粒纷纷掉落,此阶段的竖向应力迅速跌落,试件发生明显的脆性破坏。

3.2 养护时间、纤维长度和掺量对强度的影响

由单轴压缩试验获得了不同纤维长度、掺量条件下注浆材料的应力-应变曲线,从曲线中提取峰值应力作为单轴抗压强度以衡量试件的静力学性能,结果如图 3 所示。从图 3(a)至图 3(c)可以看出,养护时

间、纤维掺量、纤维长度对试件抗压强度测试结果均存在显著影响。随着养护时间的增加,不同组的水泥砂浆抗压强度均不断增长,且在养护时间 1~3 d 内的强度增长速率较快,7~14 d 内的强度增长趋于稳定。说明矿用堵水注浆材料的早期强度较高,在养护龄期为 3 d 的条件下即可达到较高的强度等级,有利于在实际工程中开展裂缝的快速修补^[17]。

在不同养护龄期条件下,注浆材料强度随纤维掺量的提高先增大后减小,纤维掺量 0.3%~0.4% 是注浆材料抗压强度变化的转折点。纤维长度对抗压强度有显著影响,中切纤维的加筋效果最佳,短切纤维与长切纤维的效果相近。这是因为 5 mm 长度的玻璃纤维单丝最易与水化胶凝产物接触,从而能承受更大的压应力。试件的破坏伴随着能量的迁移和转化,破坏裂纹的产生是表面能积聚并释放的具体结果体现。试件在压缩破坏时产生的表面能越高,压裂损伤程度越大。对于未掺入纤维的试件而言,在载荷作用下的裂隙不断演化发展,压裂损伤区的范围较大;随着纤维掺量增加,注浆试件的压缩损伤程度减小,但当纤维的长度过长时,容易交织、结节,局部区域变形性能变差,使得增强效果受到影响。

注浆材料增强效果随纤维掺量增加呈先增后减的趋势,说明过多地掺入纤维可能造成强度衰减。抗压强度增幅在纤维掺量为 0.3%~0.4% 之间达到最优状态,超过最优掺量后逐渐下降。这是因为硬化后的注浆体是脆性材料,在废弃玻璃纤维掺入后形成三维网状结构,增强水化物的机械咬合力和黏结力,从而提高注浆体的承载性能^[18]。但在废弃玻璃纤维长度过长或掺量过高的条件下,玻璃纤维之间相互纠缠,形成局部的空隙,进而削弱了试件抵抗变形的特性。

综合考虑经济性和注浆效果,经过影响因素试验对比得到玻璃纤维最优掺量为 0.3%,最优长度为 5 mm。

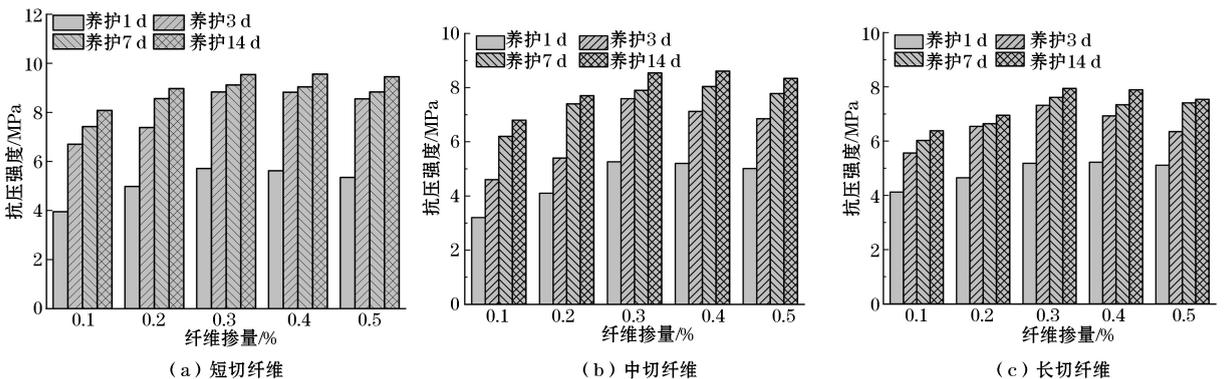
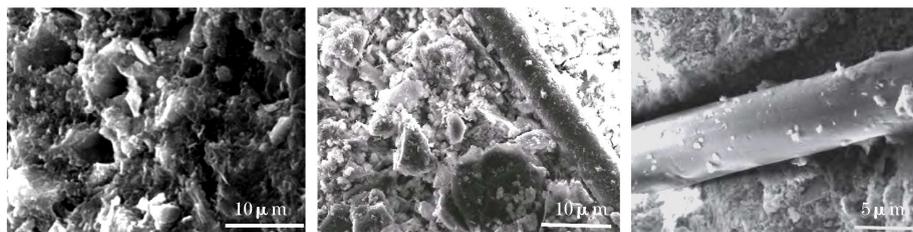


图 3 废弃玻璃纤维增强注浆试件的单轴抗压强度

3.3 矿用堵水注浆材料的微观分析

采用扫描电镜图像来观测矿用堵水注浆材料改性机理,以养护 7 d、纤维掺量 0.3%、纤维长度 5 mm 的试件为例。图 4 所示是初始状态和破坏后的注浆体微观形貌。如图 4(a)所示,破坏前的矿用堵水注浆材料包含水化硅酸钙(C-S-H)和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,细尾砂颗粒被水化硅酸钙紧密包裹、覆盖与结合,孔隙较少。从图 4(b)可以看出,水化硅酸钙凝胶物质在玻璃纤维表面附着,提升了胶砂



(a) 初始状态的水化物

(b) 初始状态的纤维

(c) 破坏状态

图 4 矿用注浆体微观形貌

3.4 玻璃纤维筋后置换施工效果

在工作面顶板上布置高清摄像头以观察井下涌水与料浆堆积的实时情况,进而对工程稳定性进行评价。在施工初期采用普通料浆进行注浆作业,由于料浆浓度较低,且未采用玻璃纤维进行注浆材料强化,导致注浆效果差,底板存在大量涌流;当采用掺入玻璃纤维改性后的高浓度料浆进行后置换施工后,注浆施工的强化效果明显增强,掌子面的底板在注浆施工 72 d 内达到了稳定状态。此外,洞门施工完成后至注浆强度达到设计要求的进程中,掌子面各测点的位移监测数据基本稳定。通过对现场观测,发现在开采期间连续安全施工 14 个月内,经过注浆后的围岩未出现渗漏、裂缝与鼓包等现象。相比未采用玻璃纤维注浆料进行后置换施工的区域,掺入玻璃纤维改性后的注浆区域地表变形量平均下降了 2.13 mm,表明玻璃纤维增强注浆的现场施工效果良好。综上所述,在掌子面开挖的初期支护结构中,采用玻璃纤维注浆作业可为矿井建设工程提供一种新的技术思路。

4 结论

(1) 废弃玻璃纤维增强作用使注浆试件的塑性变形性能提高,改善了注浆材料的强度和延性。纤维长度对其强度有显著影响,短切纤维的砂浆增强效果最佳,中切纤维和长切纤维的效果次之。

的机械咬合力与黏结力。如图 4(c)所示,发生破坏后的注浆体微观形貌发生明显变化,玻璃纤维未断裂,而是在水泥胶砂中发生拉拔现象,即纤维相对于初始位置发生位移或转动。微观图像说明废弃玻璃纤维抗拉性能高,在细尾砂胶结颗粒间中发挥桥接作用,有效抑制了压缩裂缝扩展和新裂缝产生,并使裂缝向玻璃纤维的两侧扩散,进而对试件整体变形和破裂起到缓冲作用,提升力学性能。

(2) 增加纤维掺量对强度指标的影响呈现先增后减的效果,综合考虑强度增益效果和工程经济性,确定 0.3% 的掺量为最优配比。玻璃纤维掺量过高和长度过长导致纤维之间相互交联缠结成团,增加纤维聚集区的孔隙率,削弱试件抵抗荷载和变形的能力。

(3) 废弃玻璃纤维在注浆试件中发挥了桥接作用,有利于抑制压缩裂缝的扩展和新裂缝的产生,废弃玻璃纤维与水化凝胶的协同作用是矿用堵水注浆材料变形与强度性能改善的本质机理。

(4) 由工程实例发现洞门施工完成后的位移监测数据基本稳定,经过玻璃纤维增强注浆后的围岩未出现渗漏、裂缝与鼓包等现象,表明施工效果良好。

参考文献(References):

- [1] 武志高,郭爱军,邓越萍,等.带压开采底板突水有效阻水系数法评价在西峪煤矿的应用研究[J].能源与环境,2018,40(3):1-6.
- [2] 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.
- [3] 李庆华,张逸风,徐世焱,等.喷射 UHTCC 与混凝土界面的 II 型断裂试验研究[J].水利学报,2018,49(7):831-839.
- [4] 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.
- [5] 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研究[J].矿业研究与开发,2022,42(3):94-101.

- [6] YAN R F, LIU J M, YIN S H, et al. Effect of polypropylene fiber and coarse aggregate on ductility and fluidity of cemented tailings backfill[J]. Journal of Central South University, 2022, 29(2): 515-527.
- [7] 向忆寒, 陈旭浩, 邓永杰, 等. 涂层对速凝 3D 打印水泥砂浆力学性能的影响[J]. 硅酸盐通报, 2022, 41(5): 1547-1553.
- [8] 张聪, 曹明莉. 多尺度纤维增强水泥基复合材料力学性能试验[J]. 复合材料学报, 2014, 31(3): 661-668.
- [9] 吕鹏程, 谢友均, 龙广成, 等. 高温干燥下速凝剂对水泥净浆性能的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2022, 19(8): 2295-2304.
- [10] 高永红, 彭梦蜜, 金清平. 温度对玻璃纤维增强聚合物筋与混凝土黏结性能影响试验研究[J]. 中国塑料, 2022, 36(9): 16-23.
- [11] 陈祎, 王骁帆, 周舟. 连续玻璃纤维筋水泥混凝土路面结构设计研究[J]. 公路, 2022, 67(10): 68-74.
- [12] ZHOU J J, PAN J L, LEUNG C K Y. Mechanical behavior of fiber-reinforced engineered cementitious composites in uniaxial compression [J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2015, 27(1): 04014111.
- [13] XUE G L, YILMAZ E, SONG W D, et al. Influence of fiber reinforcement on mechanical behavior and microstructural properties of cemented sand backfill [J]. Construction and Building Materials, 2019, 213: 275-285.
- [14] 王飞, 欧忠文, 罗伟, 等. 织物增强混凝土的设计探究[J]. 合成纤维, 2022, 51(6): 43-46.
- [15] LI V C, LEUNG C K Y. Theory of steady state and multiple cracking of random discontinuous fiber reinforced brittle matrix composites[J]. ASCE Journal of Engineering Mechanics, 1992, 118(11): 2246-2264.
- [16] 赵康, 赵康奇, 严雅静, 等. 不同含量玻璃纤维尾砂充填体损伤规律与围岩匹配关系[J]. 岩石力学与工程学报, 2023, 42(1): 144-153.
- [17] 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.
- [18] 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.

Research on the Strength Performance of Underground Grouting Material Reinforced by Glass Fiber in Xiyu Coal Mine

WANG Xiaolin¹, ZHOU Kai²

(1. Department of Architecture and Environmental Engineering, Taiyuan University, Taiyuan, Shanxi 030032, China;

2. School of Civil Engineering, Taiyuan University of Technology, Taiyuan, Shanxi 030024, China)

Abstract: For improving the mechanical properties of waterproof grouting material, waste glass fiber was proposed to modify the material. Through uniaxial compression test, the law of the strength of the grouting body affected by fiber length, fiber content and curing time was investigated. The strengthening mechanism of waste glass fiber was discussed by combining damage analysis and microscopic images. The results show that the addition of glass fiber significantly improves the compressive strength and ductility of the grouting body. The growth rate of strength decreases with the increase of curing time, the growth rate is fast within 3 days, and tends to be stable after 3 days. The glass fiber length has a significant effect on the strength, and the short fiber has the highest contribution to the strength growth. With the increase of fiber content, the strength index increases first and then decreases, and reaches the maximum when the fiber content is 0.3%-0.4%. The bridge effect of fiber in cement mortar can inhibit the expansion of compression cracks and buffer the failure of specimens. When the length of glass fiber is too large or the content is too high, the porosity of local area will be increased, and the deformation and strength of mine water plugging and grouting will be weakened.

Key words: Glass fiber, Prevention and control of mine water, Grouting material, Strength of grouting body, Microscopic mechanism