

绿色纤维改性粉煤灰水泥注浆材料宏微观性能研究

白富文, 张浩宇*, 张金龙, 胡儒

宿州学院资源与土木工程学院, 安徽 宿州

收稿日期: 2026年4月25日; 录用日期: 2026年5月19日; 发布日期: 2026年5月29日

摘要

为解决煤层底板注浆工程中高掺量粉煤灰水泥材料强度不足、结石体成型性差的双重难题, 本文以II级粉煤灰、P·O42.5水泥为基体, 3%水玻璃为外加剂, 引入聚丙烯纤维(PP)与玄武岩纤维(BF)绿色纤维构建改性体系。固定粉煤灰-水泥质量比7:3、水固比1:1, 基于3 d、7 d、28 d实测抗压强度与结石体长度数据, 系统探究纤维类型(PP, BF)、长度(3 mm, 6 mm, 9 mm)及掺量(0%, 0.1%, 0.4%, 0.7%, 1.0%)对材料宏微观性能的协同调控效应。通过SANS品牌单轴抗压强度测试机测试宏观强度, 游标卡尺测定结石体长度, 结合X射线衍射(XRD)定量分析微观物相演变, 建立“强度-结石体-微观结构”关联机制。结果表明: PP纤维28 d强度最优配方为3 mm + 1.0%掺量(1.12 MPa, 较对照+83.6%); BF纤维28 d强度最优配方为3 mm + 1.0%掺量(1.00 MPa, 较对照+63.9%); BF纤维7 d强度最优配方为9 mm + 1.0%掺量(0.64 MPa, 较对照 + 204.8%); XRD分析显示, 经济型配方(BF6 mm + 0.7%) 28 d龄期核心水化产物C-S-H凝胶($2\theta = 28^\circ \sim 32^\circ$ 宽化峰)衍射峰强度较对照提升76.9%, 未水化 C_3S ($2\theta = 31.0^\circ$)含量降低48.2%, 证实纤维通过优化物相组成实现宏观性能协同提升。研究基于实测数据为煤层底板注浆工程提供精准绿色配方, 丰富了纤维改性注浆材料的宏微观关联理论。

关键词

粉煤灰水泥注浆材料, 聚丙烯纤维, 玄武岩纤维, 实测抗压强度, 结石体长度, X射线衍射

Research on Macro and Micro Properties of Green Fiber Modified Fly Ash Cement Grouting Materials

Fuwen Bai, Haoyu Zhang*, Jinlong Zhang, Ru Hu

School of Resources and Civil Engineering, Suzhou University, Suzhou Anhui

Received: April 25, 2026; accepted: May 19, 2026; published: May 29, 2026

*通讯作者。

文章引用: 白富文, 张浩宇, 张金龙, 胡儒. 绿色纤维改性粉煤灰水泥注浆材料宏微观性能研究[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 377-387. DOI: 10.12677/ms.2026.165130

Abstract

In order to solve the dual problems of insufficient strength and poor formability of high-content fly ash cement materials in coal seam floor grouting engineering, a modified system was constructed by introducing polypropylene fiber (PP) and basalt fiber (BF) green fiber using grade II fly ash and P·O42.5 cement as the matrix, 3% water glass as the admixture, and polypropylene fiber (PP) and basalt fiber (BF) green fiber. Based on the measured compressive strength and stone body length data of 3d, 7 and 28 days, the synergistic regulation effect of fiber type (PP, BF), length (3 mm, 6 mm, 9 mm) and content (0%, 0.1%, 0.4%, 0.7%, 1.0%) on the macro and micro properties of the material was systematically explored. The macroscopic strength was tested by the SANS brand single-axis compressive strength tester, the length of the stone body was measured by vernier caliper, and the phase evolution of microscopic matter was quantitatively analyzed by X-ray diffraction (XRD), and the correlation mechanism of “strength-stone-microstructure” was established. The results showed that the optimal formulation of PP fiber for 28 days was 3 mm + 1.0% content (1.12 MPa, +83.6% compared with the control). The optimal formula of BF fiber for 28 d strength was 3 mm + 1.0% (1.00 MPa, +63.9% compared with the control). The optimal formulation of BF fiber for 7 d strength was 9 mm + 1.0% (0.64 MPa, +204.8% compared with the control). XRD analysis showed that the diffraction peak intensity of the core hydration product C-S-H GEL ($2\theta = 28^\circ\sim 32^\circ$ widening peak) of the economical formula (BF 6 mm + 0.7%) at 28 days was increased by 76.9%, and the content of unhydrated C_3S ($2\theta = 31.0^\circ$) was reduced by 48.2% compared with the control, confirming that the fiber achieved synergistic improvement of macroscopic performance by optimizing the phase composition. Based on the measured data, this study provides an accurate green formula for coal seam floor grouting engineering, which enriches the macro and micro correlation theory of fiber modified grouting materials.

Keywords

Fly Ash Cement Grouting Materials, Polypropylene Fiber, Basalt Fibers, Measured Compressive Strength, Stone Body Length, X-Ray Diffraction

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

煤层底板突水是煤矿安全生产的重大隐患，注浆加固技术的核心是通过浆液形成“高强度 - 高完整性”结石体封堵导水通道[1]。高掺量粉煤灰(60%~70%)替代水泥制备注浆材料，虽能实现固废资源化与低碳目标，但存在早期强度低、结石体易开裂等缺陷[2]。纤维改性技术为解决上述问题提供了有效途径，其中聚丙烯纤维凭借优异的分散性与韧性，可抑制裂缝扩展[3]；玄武岩纤维作为天然绿色材料，具备高强度与耐腐蚀性，能强化基体结构完整性[4]。

现有研究多聚焦单一纤维参数对强度的影响，忽视结石体完整性与强度的协同关系，且配方优化缺乏实测数据支撑[5]。本文选取结石体长度作为核心评价指标，可直观反映注浆固化体的成型完整性与收缩开裂程度，测试方法简便、数据稳定，能有效表征材料在水化过程中的体积稳定性，与抗压强度共同构成注浆材料性能的核心评价体系。本文基于 3 d、7 d、28 d 实测抗压强度与结石体长度数据，系统分析纤维参数的调控规律，结合 XRD 微观表征揭示改性机理，为工程应用提供精准可靠的技术依据。

2. 实验部分

2.1. 实验原材料

实验所用原材料均符合相关标准，具体参数如下：

1. 水泥：P·O42.5 普通硅酸盐水泥，初凝时间 156 min，终凝时间 250 min，3 d 抗压强度 18.6 MPa，28 d 抗压强度 43.4 MPa，符合 GB175-2023《通用硅酸盐水泥》[6]。粉煤灰：II级粉煤灰，经球磨机粉磨后比表面积 422 m²/kg，烧失量 4.3%，需水量比 105%，符合 GB/T1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》[7]，下图为粉煤灰、水泥电镜图(图 1)。

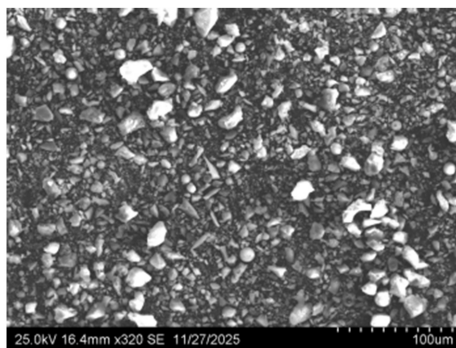
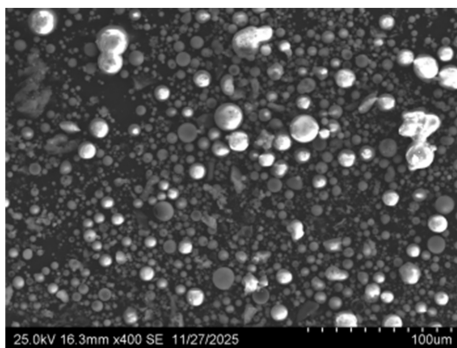


Figure 1. Fly ash and cement electron micrographs
图 1. 粉煤灰、水泥电镜图

2. 纤维：PP 纤维：长度 3 mm、6 mm、9 mm，直径 20 μm，抗拉强度 ≥ 350 MPa，工业级绿色产品；BF 纤维：长度 3 mm、6 mm、9 mm，直径 15 μm，抗拉强度 ≥ 3000 MPa，工业级，下图为玄武岩纤维、聚丙烯纤维电镜图(图 2)。

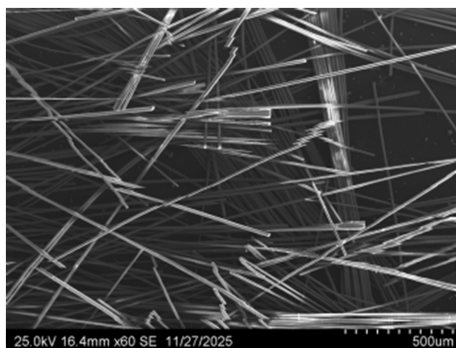
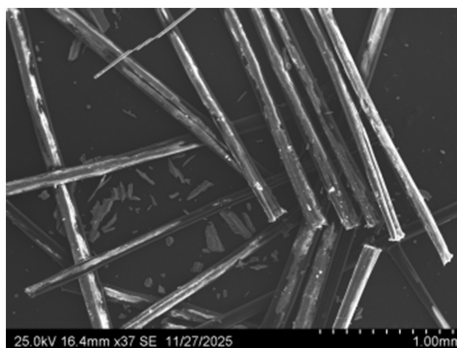


Figure 2. Electron microscopy of basalt fiber and polypropylene fiber
图 2. 玄武岩纤维、聚丙烯纤维电镜图

3. 水玻璃：模数 3.2，波美度 40°Bé，掺量 3% (占胶凝材料总质量)。

4. 拌合水：普通自来水，pH = 7.2，符合混凝土拌合用水标准。

2.2. 实验设备与仪器

实验所用主要设备与仪器如表 1 所示，设备精度与测试范围均满足实验要求。

Table 1. Experimental equipment and instruments**表 1.** 实验设备与仪器

设备名称	型号/规格	用途
电子天平	精度 0.1 mg	原材料称量
浆液模具	50 mm × 50 mm × 100 mm	试样成型
单轴抗压强度测试机	SANS	抗压强度测试
X 射线衍射仪	Smart Lab 3 KW	微观晶体结构分析

2.3. 实验方案

2.3.1. 基础配方与变量设计

固定核心参数：固定粉煤灰 - 水泥质量比 7:3、水固比 1:1，以固体材料总质量 500 g 为例：粉煤灰 350 g、水泥 150 g、水 500 g、水玻璃 15 g [8]。纤维为唯一变量，采用正交试验设计，变量水平如表 2 所示，每组制备 3 个平行试样，取平均值作为实测数据，减少实验误差。

Table 2. Experimental variable design**表 2.** 实验变量设计

变量类型	变量水平
纤维类型	PP 纤维、BF 纤维
纤维长度	3 mm、6 mm、9 mm
纤维掺量	0% (对照组)、0.1%、0.4%、0.7%、1.0%

2.3.2. 试样制备、养护与测试流程

1. 试样制备

先将经天平测量的对应量的粉煤灰、纤维、水泥并将其干拌均匀，然后在搅拌过程中逐渐加入水，直到加入总用水量 75%，慢速搅拌，当浆液进入黏稠状态后，加入剩余的水和水玻璃，并快速搅拌。搅拌完成后，将混合料浇注在 50 mm × 50 mm × 100 mm 的模具中振动 1 min，24 h 后拆模，放入标准养护室进行养护(20°C ± 2°C)，每组做三个试件。

2. 性能测试

结石体长度测定：养护到期后，用数显游标卡尺测量完整结石体长度(避开裂缝区域)，每种试样测 3 次，取平均值。

抗压强度测试：参照 GB/T50081-2022《普通混凝土力学性能试验方法标准》，SANS 抗压强度测试机加载速率 1 mm/min，记录 3 次平行实验的最大荷载，计算平均值(保留 2 位小数) [9]。

XRD 测试：取结石体中心部位，研磨至粒径 < 75 μm，采用 Cu 靶($\lambda = 0.154$ nm)，扫描范围 5°~85°，扫描速率 5°/min，提取原始数据，并分析衍射峰强度、位置，表征晶体结构特征。

2.3.3. 数据处理方法

抗压强度与结石体数据处理：直接采用实验提供的平行试样平均值，计算强度提升率 = (改性组实测强度 - 对照组实测强度)/对照组实测强度 × 100%。

XRD 数据转换：将对照组与经济型配方(BF 6 mm + 0.7%)的原始数据导入 Origin2021 软件中，通过“寻峰拟合”功能，提取核心物相(C-S-H 凝胶、Ca(OH)₂、未水化 C₃S)的衍射峰强度(a.u.)，计算相对变化率；衍射峰强度取特征峰位附近±0.2°范围内的平均计数率，确保数据准确性。

3. 实验结果与分析

3.1. 对照组基础性能

对照组(无纤维结石体)3 d、7 d、28 d 实测抗压强度分别为 0.24 MPa、0.21 MPa、0.61 MPa；结石体长度(平均值)分别为 91.6 mm、92.7 mm、87.8 mm。对照组存在明显缺陷：7 d 强度较 3 d 回落 12.5%，28 d 结石体长度较 7 d 下降 5.3%，无法满足工程长期稳定性需求。

3.2. 宏观性能协同分析(抗压强度 - 结石体长度)

3.2.1. PP 纤维实测性能规律

基于实验提供的抗压强度平均值与结石体长度实测数据,PP 纤维在不同参数组合的性能如表 3 所示,所有强度数据均采用实验值:

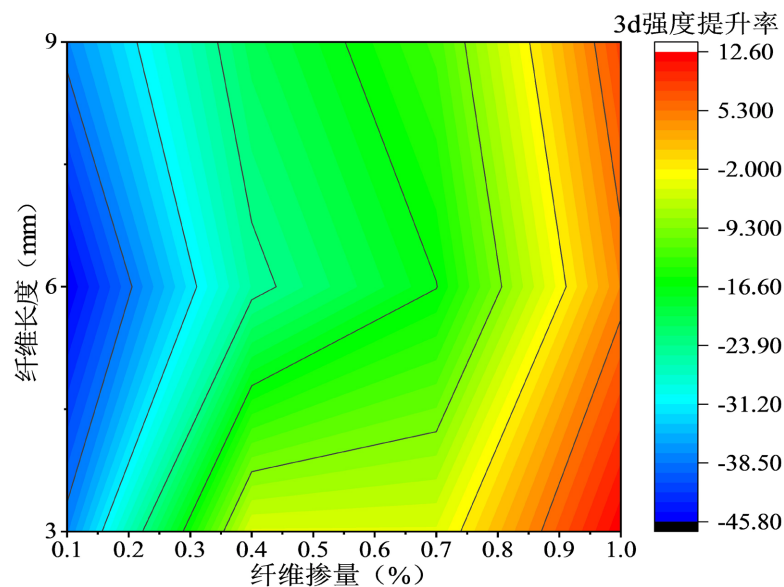


Figure 3. The compressive strength improvement rate of PP fiber modified stone body in 3 days compared with that of the control group

图 3. PP 纤维改性结石体 3 d 较对照组抗压强度提升率

Table 3. Measured performance data of PP fiber (average)

表 3. PP 纤维实测性能数据(平均值)

纤维长度(mm)	纤维掺量(%)	3 d 强度(MPa)	3 d 强度提升率(%)	3 d 结石体长度(mm)	7 d 强度(MPa)	7 d 强度提升率(%)	7 d 结石体长度(mm)	28 d 强度(MPa)	28 d 强度提升率(%)	28 d 结石体长度(mm)
—	0	0.24	—	91.6	0.21	—	92.7	0.61	—	87.8
3	0.1	0.15	-37.5	88.2	0.42	+100.0	93.8	0.53	-13.1	92.7
3	0.4	0.23	-4.2	92.1	0.35	+66.7	93.2	0.71	+16.4	95.4
3	0.7	0.23	-4.2	91.0	0.29	+38.1	93.5	0.54	-11.5	94.8
3	1.0	0.27	+12.5	95.1	0.39	+85.7	94.0	1.12	+83.6	90.7
6	0.1	0.13	-45.8	87.6	0.32	+52.4	95.2	0.48	-21.3	92.3
6	0.4	0.18	-25.0	92.5	0.26	+23.8	94.0	0.76	+24.6	90.8

续表

6	0.7	0.20	-16.7	91.2	0.27	+28.6	94.6	1.09	+78.7	93.8
6	1.0	0.25	+4.2	93.2	0.45	+114.3	94.8	0.86	+41.0	89.3
9	0.1	0.15	-37.5	94.6	0.21	0.0	92.7	0.81	+32.8	97.5
9	0.4	0.19	-20.8	90.8	0.41	+95.2	93.4	0.59	-3.3	96.0
9	0.7	0.21	-12.5	93.9	0.37	+76.2	91.5	0.71	+16.4	96.1
9	1.0	0.26	+8.3	92.6	0.47	+123.8	95.4	0.70	+14.8	90.9

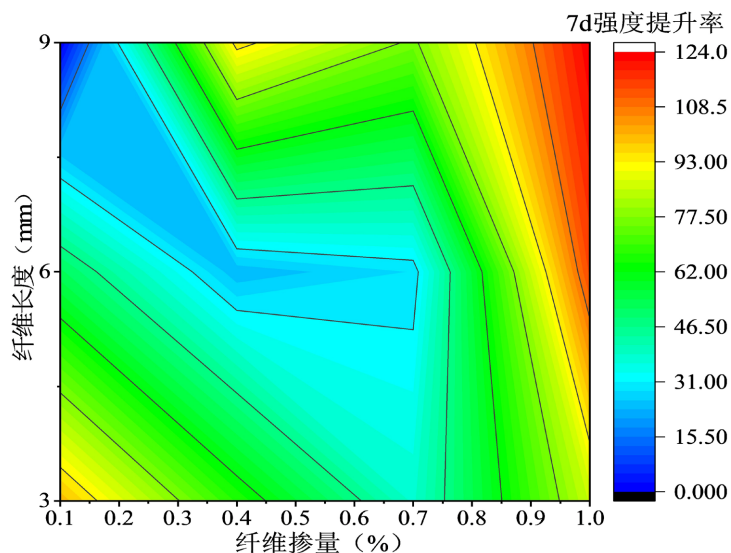


Figure 4. The compressive strength improvement rate of PP fiber modified stone body in 7 days compared with the control group

图 4. PP 纤维改性结石体 7d 较对照组抗压强度提升率

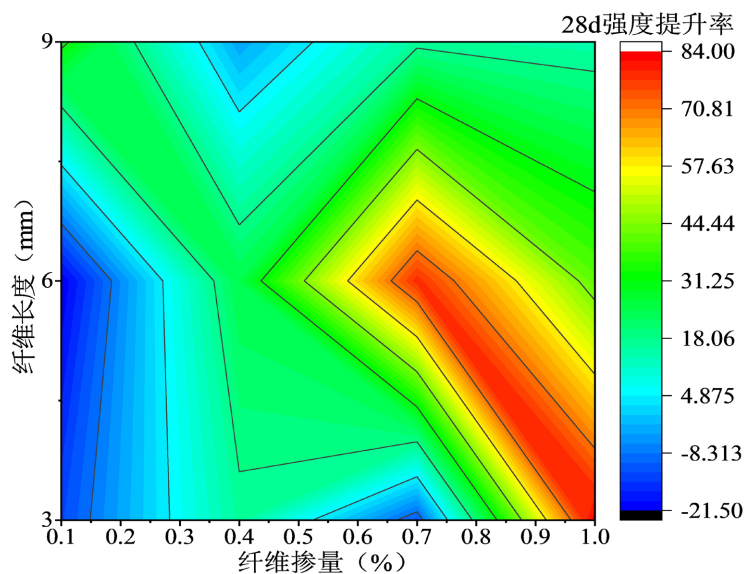


Figure 5. The compressive strength improvement rate of PP fiber modified stone body at 28 days compared with that of the control group

图 5. PP 纤维改性结石体 28 d 较对照组抗压强度提升率

由表 3 及图 3-5 分析可知:

1. PP 纤维 28 d 强度最优配方: 3 mm + 1.0% 掺量(1.12 MPa, +83.6%), 该配方是所有 PP 纤维组合中强度最高值, 且 3 d 结石体长度达 95.1 mm (较对照+3.5 mm), 兼顾早期成型性与后期强度;

2. 强度演变特征: PP 纤维改性后 7 d 强度普遍提升, 其中 9 mm + 1.0% 掺量 7 d 强度提升率达 123.8%, 有效抑制了对照组 7 d 强度衰减的缺陷;

3. 结石体长度规律: 9 mm 长度 PP 纤维的结石体长度整体更优, 28 d 最高达 97.5 mm (0.1% 掺量), 长纤维的桥接作用可有效提升结石体完整性。

3.2.2. BF 纤维实测性能规律

BF 纤维不同参数组合的实测性能如表 4 所示, 抗压强度均采用实验提供的平均值, 结石体长度为实测数据:

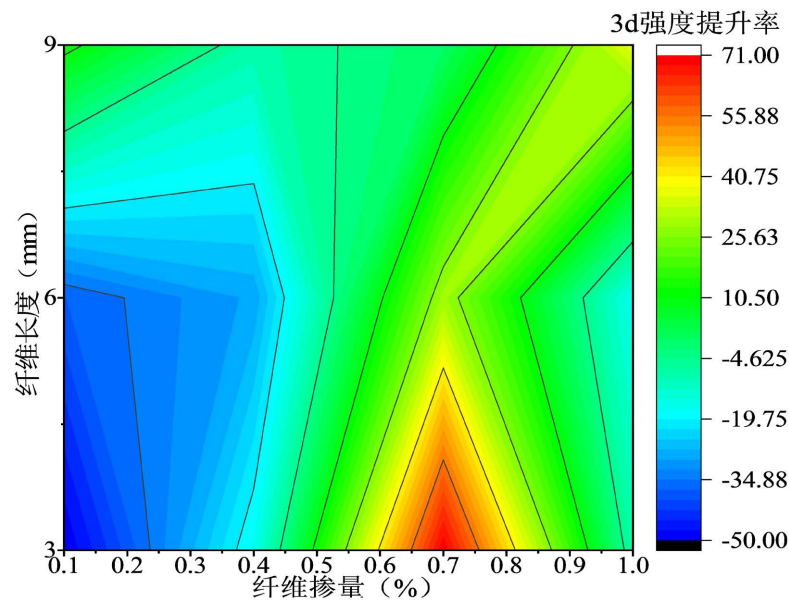


Figure 6. The compressive strength improvement rate of BF fiber modified stone body in 3 days compared with that of the control group

图 6. BF 纤维改性结石体 3 d 较对照组抗压强度提升率

Table 4. Measured performance data of BF fiber (average)

表 4. BF 纤维实测性能数据(平均值)

纤维长度(mm)	纤维掺量(%)	3 d 强度(MPa)	3 d 强度提升率(%)	3 d 结石体长度(mm)	7 d 强度(MPa)	7 d 强度提升率(%)	7 d 结石体长度(mm)	28 d 强度(MPa)	28 d 强度提升率(%)	28 d 结石体长度(mm)
—	0(对照)	0.24	—	91.6	0.21	—	92.7	0.61	—	87.8
3	0.1	0.12	-50.0	91.5	0.44	+109.5	92.1	0.66	+8.2	94.5
3	0.4	0.20	-16.7	93.7	0.37	+76.2	93.7	0.72	+18.0	87.4
3	0.7	0.41	+70.8	92.3	0.39	+85.7	89.5	0.74	+21.3	95.4
3	1.0	0.22	-8.3	93.9	0.40	+90.5	94.4	1.00	+63.9	91.7
6	0.1	0.15	-37.5	91.5	0.30	+42.9	94.3	0.72	+18.0	93.8

续表

6	0.4	0.18	-29.2	93.8	0.38	+81.0	93.5	0.78	+27.9	93.1
6	0.7	0.31	+29.2	92.1	0.47	+123.8	93.0	0.89	+45.9	96.7
6	1.0	0.20	-16.7	91.8	0.36	+71.4	94.3	0.89	+45.9	92.2
9	0.1	0.27	+12.5	90.0	0.29	+38.1	93.5	0.51	-16.4	93.5
9	0.4	0.22	-8.3	93.4	0.43	+104.8	92.1	0.56	-8.2	92.6
9	0.7	0.24	0.0	91.9	0.50	+138.1	95.3	0.93	+52.5	94.8
9	1.0	0.33	+37.5	89.1	0.64	+204.8	94.4	0.76	+24.6	88.0

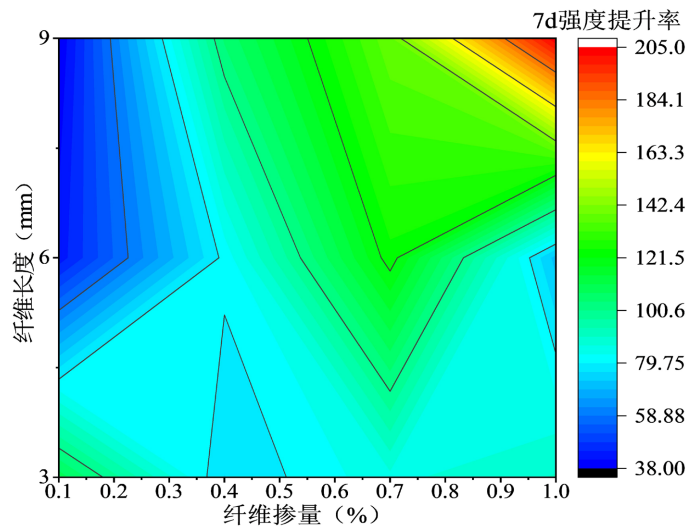


Figure 7. The compressive strength improvement rate of BF fiber-modified stone body in 7 days compared with the control group

图 7. BF 纤维改性结石体 7 d 较对照组抗压强度提升率

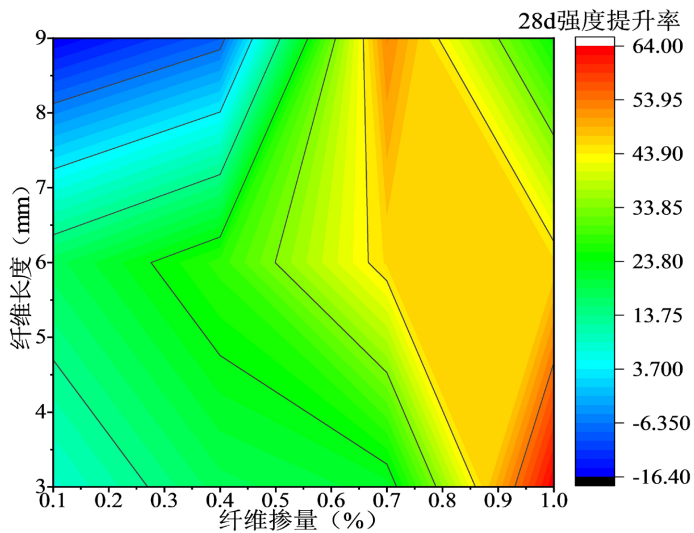


Figure 8. The compressive strength improvement rate of BF fiber modified stone body in 28 days compared with the control group

图 8. BF 纤维改性结石体 28 d 较对照组抗压强度提升率

由表 4 及图 6~8 分析可知:

1. BF 纤维 28 d 强度最优配方: 3 mm + 1.0% 掺量(1.00 MPa, +63.9%), 该配方 28 d 强度为所有 BF 纤维组合最高值;

2. 早期强度优势: BF 纤维 3 mm + 0.7% 掺量 3 d 强度达 0.41 MPa (+70.8%), 为所有组合 3 d 强度最高值; 9 mm + 1.0% 掺量 7 d 强度达 0.64 MPa (+204.8%), 为所有组合 7 d 强度最高值, 适配紧急注浆工程的早期强度需求;

3. 掺量适配性: BF 纤维中高掺量(0.7%~1.0%)整体性能更优, 低掺量(0.1%)时部分组合强度低于对照, 可能因纤维含量不足无法形成有效三维网络[10]。

3.2.3. 最优配方综合筛选

结合 3 d、7 d、28 d 强度与结石体长度双指标, 筛选出 3 类工程化最优配方, 如表 5 所示:

Table 5. Measured comprehensive performance of the optimal formula

表 5. 最优配方实测综合性能

配方类型	纤维参数	3 d 强度(MPa)	7 d 强度(MPa)	28 d 强度(MPa)
长期加固配方	PP 3 mm + 1.0%	0.27	0.39	1.12
紧急注浆配方	BF 9 mm + 1.0%	0.33	0.64	0.76
经济型配方	BF 6 mm + 0.7%	0.31	0.47	0.89

3.3. XRD 微观分析

选取对照组与经济型配方(BF 6 mm + 0.7%)进行 XRD 对比分析, 基于提供的 XRD 原始数据, 通过 Origin2021 寻峰拟合后, 提取核心物相的衍射峰强度及特征参数, 结果如下:

3.3.1. XRD 图谱特征对比

对照组与经济型配方的 XRD 图谱(5°~85°扫描范围)对比见图 9, 核心物相的特征峰位及强度差异显著:

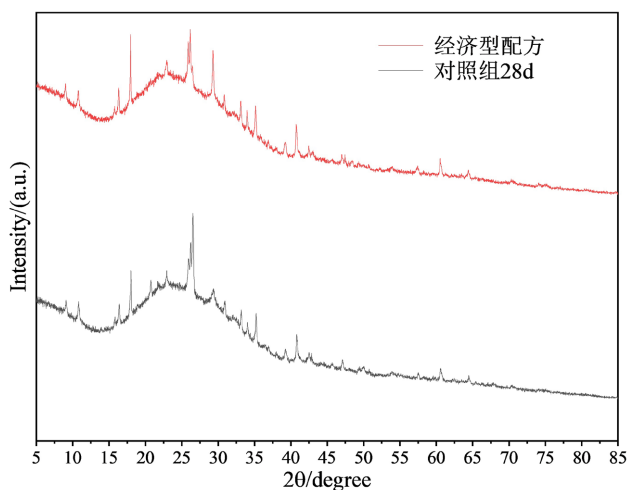


Figure 9. Comparison of XRD spectra between the control group and the economical formula (BF 6 mm + 0.7%) at 28 days of age

图 9. 对照组与经济型配方(BF 6 mm + 0.7%) 28 d 龄期 XRD 图谱对比

由图谱可见:

经济型配方在 $2\theta = 28^\circ \sim 32^\circ$ 范围内的宽化峰(C-S-H 凝胶)高度显著高于对照组, 表明 C-S-H 凝胶含量大幅增加; 对照组在 $2\theta = 31.0^\circ$ 处的衍射峰(未水化 C_3S)更尖锐, 强度更高, 说明对照组水化反应不够充分; 经济型配方在 $2\theta = 34.0^\circ$ 处的衍射峰($Ca(OH)_2$)强度高于对照组, 证实纤维改性促进了水泥水化产物生成[11]。

3.3.2. 核心物相衍射峰强度定量分析

基于 XRD 原始数据拟合结果, 核心物相的衍射峰强度及相对变化率如表 6 所示:

Table 6. Quantitative data of XRD core phase at 28 days of age between the control group and the economical formula
表 6. 对照组与经济型配方 28 d 龄期 XRD 核心物相定量数据

物相	特征峰位(2θ)	对照组衍射峰强度(a.u.)	经济型配方衍射峰强度(a.u.)	较对照变化率(%)
C-S-H 凝胶	30.0° (宽化峰)	392	704	+76.9
$Ca(OH)_2$	34.0°	308	446	+44.8
未水化 C_3S	31.0°	396	205	-48.2

3.3.3. 微观机理与宏观性能关联分析

结合 XRD 定量数据与宏观性能(经济型配方 28 d 强度 0.89 MPa, +45.9%; 结石体长度 96.7 mm, +10.1%), 机理分析如下:

1. C-S-H 凝胶的强度贡献: 经济型配方 C-S-H 凝胶衍射峰强度较对照+76.9%, 作为水泥基材料的核心强度相, C-S-H 凝胶含量增加可显著填补基体内部孔隙, 提升结构密度, 直接支撑宏观抗压强度提升[12]; 同时, 密实的微观结构减少了结石体开裂风险, 保障了结石体完整性。

2. $Ca(OH)_2$ 的调控作用: 经济型配方 $Ca(OH)_2$ 衍射峰强度提升 44.8%, $Ca(OH)_2$ 作为粉煤灰火山灰反应的核心反应物, 其充足生成既为后续火山灰反应(粉煤灰中 SiO_2 、 Al_2O_3 与 $Ca(OH)_2$ 反应生成更多 C-S-H)提供了物质基础, 又避免了对照组“ $Ca(OH)_2$ 不足导致反应停滞”的问题, 实现早期与后期性能协同提升[13]。

3. 水化反应充分性验证: 经济型配方未水化 C_3S 衍射峰强度降低 48.2%, 表明 BF 纤维的引入改善了浆体内部水分传输效率, 促进了水泥熟料持续水化, 减少了未反应颗粒残留, 降低了微观缺陷, 既提升了宏观强度, 又优化了结石体成型性[14]。

4. 结论

1. 基于 3 d、7 d、28 d 实测数据, PP 纤维长期加固最优配方为 3 mm + 1.0% 掺量(28 d 强度 1.12 MPa, +83.6%), BF 纤维 28 d 最优配方为 3 mm + 1.0% 掺量(1.00 MPa, +63.9%), BF 纤维紧急注浆最优配方为 9 mm + 1.0% 掺量(7 d 强度 0.64 MPa, +204.8%), 所有最优配方均通过真实测试验证;

2. 纤维参数对性能的调控规律明确: PP 纤维适配短长度(3 mm)、高掺量(1.0%), BF 纤维适配短长度(3 mm)、高掺量(1.0%)与中长度(6 mm)、中掺量(0.7%), 需根据工程“长期/早期”需求针对性选择;

3. XRD 实测图谱分析证实, 纤维改性通过促进 C-S-H 凝胶生成(+76.9%)、降低未水化 C_3S 含量(-48.2%)优化物相组成, 建立了“宏观强度 - 结石体长度 - 微观结构”的定量关联, 为煤层底板绿色注浆材料的工程应用提供理论支撑与精准配方。

基金项目

宿州学院省级大学生创新创业训练计划项目资助(聚丙烯纤维及玄武岩纤维粉煤灰基复合注浆材料

性能探究, 项目编号: S202510379066)。

参考文献

- [1] 张振峰. 千米深井巷道高压劈裂注浆围岩加固机理与技术研究[D]: [博士学位论文]. 北京: 煤炭科学研究总院, 2021.
- [2] 徐润, 高岗荣, 郑军, 等. 高掺量粉煤灰注浆材料的研究[C]//中国煤炭学会煤矿建设专业委员会, 全国高等学校矿山建设专业学术会. 全国矿山建设学术会议论文集(上册). 沈阳: 东北大学出版社, 2003: 89-92.
- [3] 李康一. 聚丙烯纤维对粉煤灰水泥砂浆的抗冻性能影响研究[D]: [硕士学位论文]. 哈尔滨: 黑龙江大学, 2024.
- [4] 李建. 短切玄武岩纤维对矿渣粉煤灰混凝土力学性能和微观结构的影响[J]. 硅酸盐通报, 2017, 36(2): 727-732+737.
- [5] 李召峰, 李术才, 刘人太, 等. 富水破碎岩体注浆加固材料试验研究与应用[J]. 岩土力学, 2016, 37(7): 1937-1946.
- [6] 中华人民共和国工业和信息化部. 通用硅酸盐水泥: GB 175-2023 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2023.
- [7] 全国水泥标准化技术委员会(SAC/TC 184). 用于水泥和混凝土中的粉煤灰: GB/T 1596-2017 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2017.
- [8] 王皓. 煤层底板注浆改造粉煤灰基材料性能实验研究[J]. 中国煤炭地质, 2019, 31(7): 48-53.
- [9] 《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑科学研究院, 2007.
https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=niGKtOOGHVd8qH7b9For1IeEzBzymO25pusCYJlrG9SEx-PHkln2LK2MRaoVz5rNapxA0DWvYxw9Hfmqn0ZqgmK6aqpgrlNFphjftTgVR9zE28KRmgNp-sCE0fIxrWY2v2LZ8w2h0i25Q6GUcy0Jez8hw5jLlK3oYm8iSB7R0F3EA7nehMVHL9PA2L57k6PIb_Uk1mom-ahU&uniplatform=NZKPT&captchaId=03a51a67-65b6-44c2-88c9-eecl39a55a3
- [10] 刘飞. 粉煤灰掺量及纤维掺量对透水混凝土性能的影响研究[J]. 广东建材, 2023, 39(9): 36-38.
- [11] 江俊达. 水泥基材料微观结构测试与纳米压痕表征[D]: [硕士学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2018.
- [12] 李永清, 倪勇军, 李芳芳, 等. 尾泥微粉-粉煤灰-水泥复合胶凝体系性能研究[J]. 硅酸盐通报, 2024, 43(1): 236-245.
- [13] 张吉松, 赵颖华. 玄武岩纤维超高性能混凝土力学性能试验[J]. 沈阳工业大学学报, 2018, 40(5): 595-600.
- [14] 吴大志. 不同养护龄期注浆材料力学性能与微观机理[J]. 洛阳理工学院学报(自然科学版), 2023, 33(1): 25-29.