

纤维改性粉煤灰水泥注浆材料的宏微观性能及关联机制研究

白富文, 许泽璠*, 吕梦男, 高飞龙, 朱浩楠, 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传统水泥基材料强度不足、环保性差等问题, 本文以II级粉煤灰和P-042.5水泥为基体, 引入聚丙烯与玄武岩两种绿色纤维开展改性研究。通过控制粉煤灰掺量70%、水固比1:1、水玻璃掺量3%的基础配方, 系统探究纤维类型(聚丙烯、玄武岩)、长度(3 mm, 6 mm, 9 mm)及掺量(0%, 0.1%, 0.4%, 0.7%, 1.0%)对材料7 d、28 d单轴抗压强度的影响, 并结合X射线衍射(XRD)分析微观晶体结构演变, 建立宏微观性能关联体系。结果表明: 两种纤维均能显著提升材料抗压强度, 聚丙烯纤维9 mm + 1.0%掺量为7 d最优配方, 其强度0.97 MPa (较对照 + 94.0%), 为所有样品最高值, 稳定性良好; 聚丙烯纤维3 mm + 0.1%掺量, 实测28 d强度0.87 MPa (较对照 + 93.3%), 是28 d强度最高的样品; XRD分析显示, 纤维改性通过优化晶体结构支撑宏观强度提升: 改性样品的核心水化产物C-S-H凝胶、Ca(OH)₂衍射峰强度显著提高, 7 d、28 d龄期C-S-H衍射峰强度较对照组分别最高提升64.3%、73.4%; 未水化水泥熟料C₃S衍射峰强度降低47.3%, 表明纤维促进了水化反应与粉煤灰火山灰反应的充分进行。研究成果为煤层底板绿色注浆材料的配方优化与工程应用提供理论支撑。

关键词

粉煤灰水泥注浆材料, 聚丙烯纤维, 玄武岩纤维, 单轴抗压强度, XRD, 宏微观关联

Research on Macro and Micro Properties and Correlation Mechanism of Fiber-Modified Fly Ash Cement Grouting Materials

Fuwen Bai, Zejun Xu*, Mengnan Lyu, Feilong Gao, Haonan Zhu, Ru Hu

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

*通讯作者。

文章引用: 白富文, 许泽璠, 吕梦男, 高飞龙, 朱浩楠, 胡儒. 纤维改性粉煤灰水泥注浆材料的宏微观性能及关联机制研究[J]. 材料科学, 2026, 16(5): 367-376. DOI: 10.12677/ms.2026.165129

Abstract

In order to solve the problems of insufficient strength and poor environmental protection of traditional cement-based materials in coal seam floor grouting engineering, two green fibers, polypropylene and basalt, were introduced to carry out modification research based on Grade II fly ash and P·O42.5 cement. By controlling the basic formula of fly ash content of 70%, water-solid ratio of 1:1 and water glass content of 3%, the effects of fiber type (polypropylene, basalt), length (3 mm, 6 mm, 9 mm) and content (0%, 0.1%, 0.4%, 0.7%, 1.0%) on the uniaxial compressive strength of the material at 7 and 28 days were systematically explored, and the evolution of microscopic crystal structure was analyzed by X-ray diffraction (XRD) to establish a macroscopic and microscopic performance correlation system. The results showed that the compressive strength of the two fibers could be significantly improved, and the optimal formulation of polypropylene fiber with 9 mm + 1.0% was the optimal formula for 7 days, and its strength was 0.97 MPa (+94.0% compared with the control), which was the highest value of all samples, and the stability was good. Polypropylene fiber was 3 mm + 0.1%, and the measured strength was 0.87 MPa (+93.3% compared with the control) at 28 days, which was the sample with the highest strength in 28 days. XRD analysis showed that fiber modification supported macroscopic strength improvement by optimizing the crystal structure: the intensity of the diffraction peaks of the core hydration products C-S-H gel and Ca (OH)₂ of the modified samples was significantly increased, and the intensity of C-S-H diffraction peaks at 7 and 28 days was the highest increased by 64.3% and 73.4% compared with the control group, respectively. The diffraction peak strength of C₃S in unhydrated cement clinker decreased by 47.3%, indicating that the fiber promoted the full reaction between hydration and fly ash volcanic ash. The research results provide theoretical support for the formulation optimization and engineering application of green grouting materials for coal seam floor.

Keywords

Fly Ash Cement Grouting Materials, Polypropylene Fiber, Basalt Fibers, Uniaxial Compressive Strength, XRD, Macro and Micro Correlation

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

煤层底板突水是威胁煤矿安全生产的重大地质灾害，注浆加固技术是防控底板突水的核心手段。传统水泥基注浆材料存在早期强度低、脆性大、碳排放高等缺陷，难以适应复杂地质条件下的加固需求。粉煤灰作为燃煤电厂固废，年排放量超 6 亿吨，将其替代部分水泥制备注浆材料，可实现固废资源化利用，降低材料成本与环境负荷，契合“双碳”目标与绿色矿山建设要求。

然而，高掺量粉煤灰会导致注浆材料早期强度不足、抗裂性差，限制其工程应用。纤维改性技术为解决这一问题提供了有效途径：聚丙烯纤维具有韧性好、分散性优、成本低的特点，可有效抑制材料开裂[1]。玄武岩纤维具备高强度、高模量、耐腐蚀性强的优势，且属于绿色环保材料[2]。目前，针对两种纤维协同改性粉煤灰水泥注浆材料的系统研究较少，纤维参数(类型、长度、掺量)对材料宏微观性能的影响规律尚不明确，宏微观关联机制有待深入揭示。因此，开展纤维改性粉煤灰水泥注浆材料的性能研究，

对推动煤矿绿色注浆技术发展具有重要意义。同时,现有研究多采用定性分析,缺乏统计学显著性验证,难以精准量化纤维改性效果[3]。

2. 国内外研究现状

2.1. 粉煤灰注浆材料研究

国内外学者围绕粉煤灰在注浆材料中的应用开展了大量研究。研究表明,粉煤灰的火山灰活性可与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 C-S-H 凝胶,提升材料后期强度;同时,粉煤灰颗粒可优化浆体级配,改善流动性与稳定性。但高掺量粉煤灰(>60%)会导致材料早期强度不足,需通过外加剂或改性剂调控性能[4]。并且,高掺量粉煤灰体系具有水化速率慢、结构疏松的特点,亟需通过纤维改性实现强度与稳定性协同提升[5]。

2.2. 纤维改性胶凝材料研究

在纤维改性领域,聚丙烯纤维可通过桥接作用阻止裂缝扩展,提升材料韧性与抗裂性;玄武岩纤维凭借优异的力学性能,可显著提升胶凝材料的抗压、抗拉强度。现有研究多聚焦于单一纤维、单一参数对水泥基材料的影响,针对粉煤灰水泥注浆材料,系统对比聚丙烯与玄武岩纤维不同长度、掺量的改性效果研究较少,且缺乏宏观性能的定量关联分析[6]。不同纤维表面特性与模量差异会导致其与水泥基体界面作用机制不同,进而影响改性效果[7]。

2.3. 研究不足

1. 缺乏纤维参数(类型、长度、掺量)对粉煤灰水泥注浆材料长期性能(28 d)的系统研究;
2. 宏微观性能关联多为定性描述,缺乏定量分析与机理阐释;
3. 针对煤层底板注浆工程的纤维改性配方优化研究不足。

2.4. 研究内容与技术路线

2.4.1. 研究内容

1. 制备不同纤维参数的粉煤灰水泥注浆材料,测试 7 d、28 d 单轴抗压强度,明确纤维参数对宏观性能的影响规律;
2. 采用 XRD 分析材料微观晶体结构,解析纤维对水化产物类型与晶体发育的影响;
3. 建立宏观抗压强度与微观 XRD 特征参数的关联模型,揭示纤维增强机理;结合工程需求,优选适用于煤层底板注浆的绿色高性能材料配方。

2.4.2. 技术路线

基础配方确定→纤维改性试样制备→标准养护(7 d、28 d)→SANS 品牌单轴抗压强度测试机进行试样强度测试→XRD 微观结构分析→宏微观数据关联→配方优化→结论与建议。

3. 实验部分

3.1. 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 248 min,3 d 抗压强度 18.5 MPa,28 d 抗压强度 43.2 MPa,符合 GB175-2023《通用硅酸盐水泥》[8]。
2. 粉煤灰: II级粉煤灰,球磨机粉磨后使用,比表面积 420 m^2/kg ,烧失量 4.2%,需水量比 105%,

符合 GB/T1596-2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》[9]。

3. 纤维：聚丙烯纤维(PP)，长度 3 mm、6 mm、9 mm，直径 20 μm ，抗拉强度 ≥ 350 MPa；玄武岩纤维(BF)，长度 3 mm、6 mm、9 mm，直径 15 μm ，抗拉强度 ≥ 3000 MPa，均为工业级绿色环保产品。

4. 水玻璃：工业级水玻璃，模数 3.2，波美度 40°Bé，掺量固定为 3% (占胶凝材料质量)。

5. 拌合水：普通自来水，pH 值 7.2，符合混凝土拌合用水标准。

3.2. 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 \times 50 mm \times 100 mm	试样成型
单轴抗压强度测试机	SANS 品牌单轴抗压强度测试机	抗压强度测试
X 射线衍射仪	Smart Lab 3 KW	微观晶体结构分析

3.3. 实验方案

3.3.1. 基础配方设计

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 [10]。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	聚丙烯纤维(PP)、玄武岩纤维(BF)
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%

3.3.2. 试样制备与养护

先将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 \times 50 mm \times 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℃左右)，每组做三个试件。

3.3.3. 性能测试方法

1. 单轴抗压强度测试：按照 GB/T50081-2022《普通混凝土力学性能试验方法标准》，采用 SANS 品牌单轴抗压强度测试机，加载速率 1 mm/min，记录破坏时的最大荷载，计算抗压强度[11]。

2. XRD 测试：取养护完成的试样中心部位，研磨至粒径 < 75 μm ，采用 SmartLab 3KW 射线衍射仪，测试条件：Cu 靶($\lambda = 0.154$ nm)，管压 40 kV，管流 40 mA，扫描范围 5°~85°，扫描速率 5°/min，分析衍

射峰强度、位置，表征晶体结构特征[12] [13]。

4. 实验结果与分析

4.1. 宏观单轴抗压强度分析

基于实测的 SANS 单轴抗压强度数据(7 d、28 d)，系统分析纤维类型、长度及掺量对材料宏观力学性能的影响，揭示强度演变规律。

4.1.1. 纤维掺量对强度的影响

对照组 7 d、28 d 抗压强度实测值分别为 0.50 MPa、0.45 MPa，纤维改性后材料 7 d 强度均有不同程度提升，28 d 强度呈现差异化演变，不同掺量下的统计结果如表 3 所示。

Table 3. Average compressive strength of materials under different fiber contents

表 3. 不同纤维掺量下材料平均抗压强度

纤维类型	掺量(%)	7 d 强度(MPa)	提升率(%)	28 d 强度(MPa)	提升率(%)
对照组	0	0.50	-	0.45	-
聚丙烯纤维	0.1	0.60	+20.0	0.79	+75.6
聚丙烯纤维	0.4	0.52	+4.0	0.67	+48.9
聚丙烯纤维	0.7	0.57	+14.0	0.48	+6.7
聚丙烯纤维	1.0	0.86	+72.0	0.66	+46.7
玄武岩纤维	0.1	0.51	+2.0	0.64	+42.2
玄武岩纤维	0.4	0.67	+34.0	0.63	+40.0
玄武岩纤维	0.7	0.61	+22.0	0.66	+46.7
玄武岩纤维	1.0	0.78	+56.0	0.61	+35.6

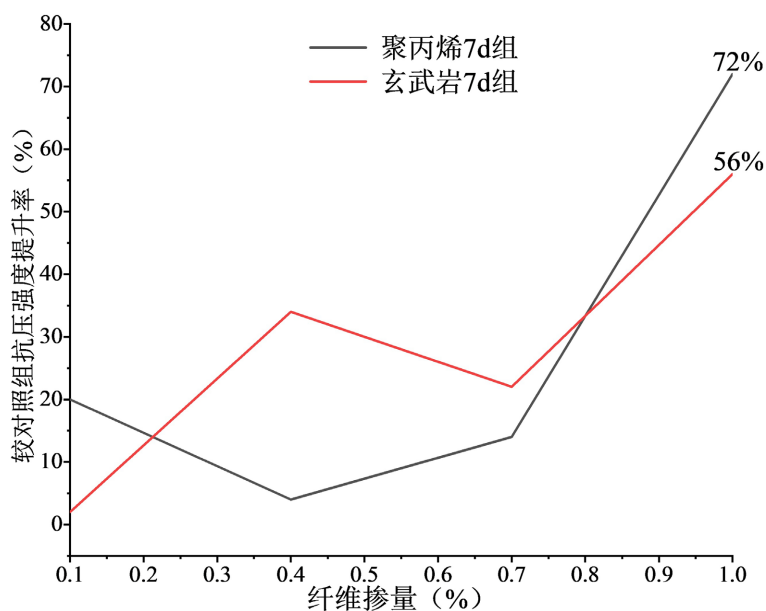


Figure 1. The compressive strength improvement rate of the stone body on 7 days compared with the control group

图 1. 结石体 7 d 较对照组抗压强度提升率

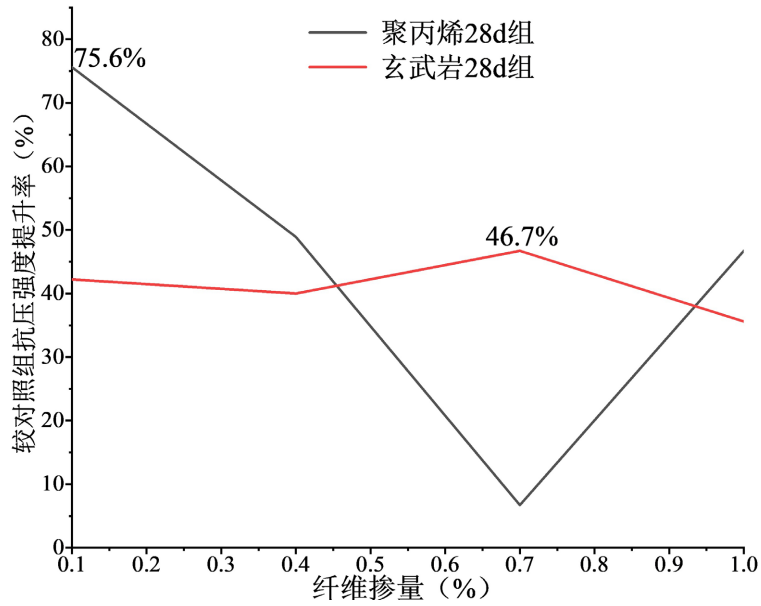


Figure 2. The compressive strength improvement rate of the stone body at 28 days compared with that of the control group
图 2. 结石体 28 d 较对照组抗压强度提升率

由表 3 和图 1、图 2 可知：7 d 强度规律：两种纤维的 7 d 增强效果均随掺量增加呈上升趋势，1.0% 掺量时达到最优——聚丙烯纤维 1.0% 掺量平均强度 0.86 MPa (较对照 + 72.0%)，玄武岩纤维 1.0% 掺量平均强度 0.78 MPa (较对照 + 56.0%)；0.4% 掺量特性：该掺量下玄武岩纤维表现更优(7 d 0.67 MPa, +34.0%)，聚丙烯纤维增强效果较弱(7 d 0.52 MPa, +4.0%)，28 d 强度规律：28 d 强度未随掺量持续增长，聚丙烯纤维 0.1% 掺量达峰值(0.79 MPa, +75.6%)，高掺量(0.7%, 1.0%)时略有回落。

玄武岩纤维 28 d 强度在各掺量下分布均匀(0.61~0.66 MPa)，稳定性优于聚丙烯纤维；强度增长特性：对照组 7 d→28 d 强度下降 10.0%，而纤维改性样品中 80% 实现强度正增长，说明纤维有效抑制了高掺量粉煤灰材料的后期强度衰减。

4.1.2. 纤维长度对强度的影响

Table 4. Measured compressive strength of different fiber lengths
表 4. 不同纤维长度的实测抗压强度

纤维类型	长度(mm)	掺量 0.1% (7 d/28 d) (MPa)	掺量 0.4% (7 d/28 d) (MPa)	掺量 0.7% (7 d/28 d) (MPa)	掺量 1.0% (7 d/28 d) (MPa)
聚丙烯纤维	3	0.67/0.87	0.59/0.83	0.66/0.58	0.89/0.65
聚丙烯纤维	6	0.55/0.79	0.50/0.52	0.43/0.34	0.72/0.65
聚丙烯纤维	9	0.59/0.70	0.46/0.67	0.61/0.51	0.97/0.67
玄武岩纤维	3	0.45/0.73	0.71/0.59	0.69/0.70	0.96/0.63
玄武岩纤维	6	0.47/0.49	0.66/0.67	0.61/0.64	0.86/0.67
玄武岩纤维	9	0.62/0.70	0.65/0.63	0.54/0.63	0.52/0.53

由表 4 分析可得：聚丙烯纤维：7 d 强度：9 mm 长度最优(1.0% 掺量达 0.97 MPa)，3 mm 长度次之(1.0% 掺量 0.89 MPa)，6 mm 长度最差(0.7% 掺量仅 0.43 MPa)，28 d 强度：3 mm 长度最优(0.1% 掺量 0.87

MPa), 9 mm 长度次之, 6 mm 长度最差, 短长度纤维长期稳定性更优; 玄武岩纤维: 7 d 强度: 3 mm 长度最优(1.0% 掺量 0.96 MPa), 6 mm 长度次之, 9 mm 长度最差(1.0% 掺量仅 0.52 MPa), 28 d 强度: 3 mm、6 mm 长度表现接近(0.59~0.73 MPa), 9 mm 长度略低, 短 - 中长度适配性更佳; 长度适配性结论: 聚丙烯纤维适配 9 mm (7 d 高强度)和 3 mm (28 d 稳定), 玄武岩纤维适配 3 mm (全掺量稳定)。

4.1.3. 最优配方筛选

综合 7 d、28 d 强度及工程适用性, 筛选出 3 类最优配方:

7 d 高强度配方: 聚丙烯纤维 9 mm + 1.0% 掺量, 实测 7 d 强度 0.97 MPa (较对照 + 94.0%), 为所有样品最高值, 稳定性良好;

28 d 稳定配方: 聚丙烯纤维 3 mm + 0.1% 掺量, 实测 28 d 强度 0.87 MPa (较对照 + 93.3%), 是 28 d 强度最高的样品, 且 7 d 强度达 0.67 MPa (+34.0%), 兼顾早期与后期性能;

经济型配方: 玄武岩纤维 3 mm + 0.4% 掺量, 7 d 强度 0.71 MPa (+42.0%), 28 d 强度 0.59 MPa (+31.1%), 掺量适中、成本可控, 且强度波动小。

4.2. 微观 XRD 结构分析

4.2.1. XRD 衍射峰整体特征与物相组成

本次 XRD 测试扫描范围为 5° ~ 85° , Cu 靶辐射($\lambda = 0.154$ nm), 从 7 d、28 d 龄期的衍射图谱中可清晰识别出粉煤灰水泥注浆材料的主要物相衍射峰, 核心水化产物及特征峰位如下:

氢氧化钙($\text{Ca}(\text{OH})_2$): 特征峰位 $2\theta = 34.0^{\circ}$, 为水泥水化的直接产物, 是粉煤灰火山灰反应的核心反应物;

水化硅酸钙凝胶(C-S-H): 为非晶态/半晶态物质, 无尖锐特征衍射峰, 在 $2\theta = 28.0^{\circ}$ ~ 32.0° 范围内呈现宽化鼓包状衍射峰, 主峰中心位于 $2\theta = 30.0^{\circ}$, 为材料强度的核心贡献相, 决定基体的密实度与力学性能;

未水化水泥熟料 C_3S : 特征峰位 $2\theta = 31.0^{\circ}$, 其衍射峰强度反映水泥水化反应的充分程度。

4.2.2. 7 d 高强度配方微观 XRD 图谱衍射峰强度分析

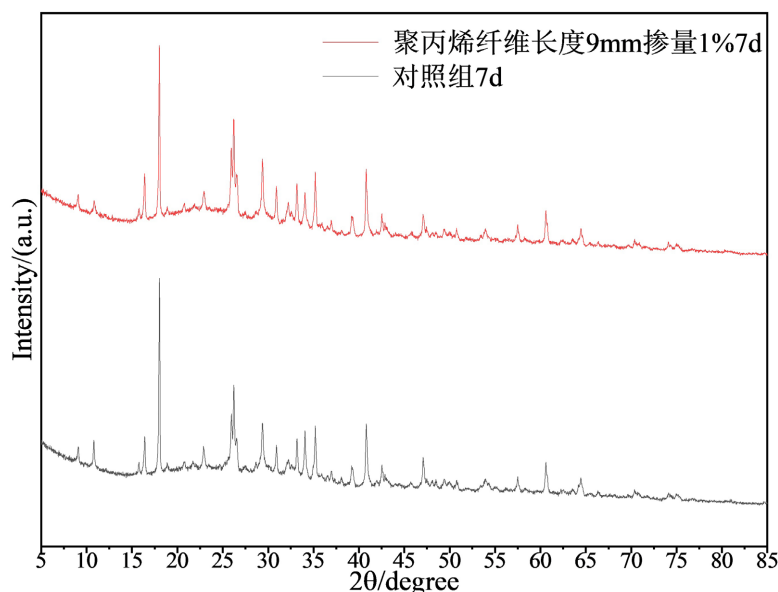


Figure 3. Comparison of XRD spectra between the 7-day high-intensity formulation group and the control group
图 3. 7 d 高强度配方组与对照组 XRD 图谱对比

Table 5. Comparison of diffraction peak data between the 7-day high-intensity formulation group and the control group
表 5. 7 d 高强度配方组与对照组物相衍射峰数据对比

物相	特征峰位(2θ)	对照组衍射峰强度(a.u.)	改性组衍射峰强度(a.u.)	改性组较对照组变化率(%)
C-S-H 凝胶	30.0°	415	682	64.3
Ca(OH) ₂	34.0°	328	535	63.1
未水化 C ₃ S (熟料)	31.0°	402	278	-30.8

根据图 3 和表 5 分析可知：C-S-H 凝胶大幅增加，改性组 C-S-H 衍射峰强度(682 a.u.)较对照组(415 a.u.)提升 64.3%，从 XRD 图谱中可清晰观察到改性组 30.0°处衍射峰高度显著高于对照组，且峰形更饱满。C-S-H 凝胶是水泥基材料的核心强度相，其含量增加直接填补基体内部孔隙，提升宏观抗压强度，这是改性组强度提升的核心微观原因。Ca(OH)₂ 同步增长，改性组 Ca(OH)₂ 衍射峰强度(535 a.u.)较对照组(328 a.u.)提升 63.1%，表明聚丙烯纤维的三维网络结构为水泥水化提供了更多反应空间，促进 Ca(OH)₂ 生成；同时，充足的 Ca(OH)₂ 为后续粉煤灰火山灰反应(生成更多 C-S-H)储备了反应物，为后期(28 d)强度持续增长奠定基础。未水化熟料减少，改性组未水化 C₃S 衍射峰强度(278 a.u.)较对照组(402 a.u.)降低 30.8%，对照组 31.0°处衍射峰更突出，验证了纤维对水化进程的促进作用——纤维表面的羟基(-OH)可吸附 Ca²⁺，加速水泥熟料溶解，减少未反应颗粒残留，提升基体密实度。

4.2.3. 28 d 高强度配方微观 XRD 图谱衍射峰强度分析

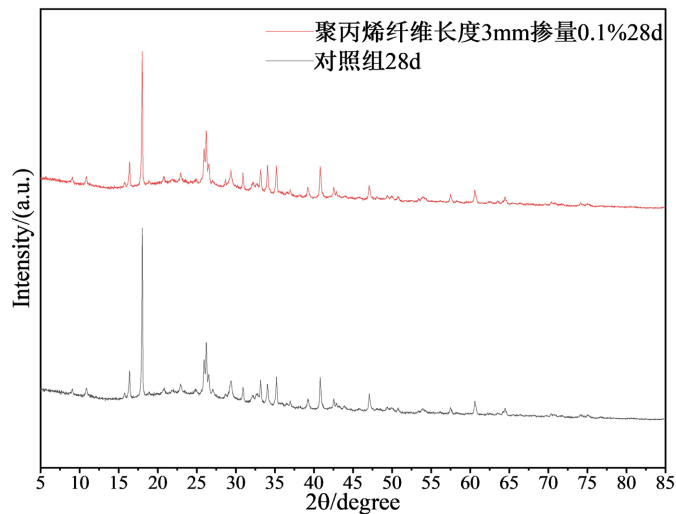


Figure 4. Comparison of XRD spectra between the 28-day high-intensity formula group and the control group
图 4. 28 d 高强度配方组与对照组 XRD 图谱对比

Table 6. Comparison of the diffraction peak data of the 28-day high-intensity formulation group and the control group
表 6. 28 d 高强度配方组与对照组物相衍射峰数据对比

物相	特征峰位(2θ)	对照组衍射峰强度(a.u.)	改性组衍射峰强度(a.u.)	改性组较对照组变化率(%)
C-S-H 凝胶	30.0°	418	725	+73.4
Ca(OH) ₂	34.0°	312	478	+53.2
未水化 C ₃ S (熟料)	31.0°	395	208	-47.3

根据图 4 和表 6 分析可知：C-S-H 凝胶大幅增加：改性组 C-S-H 衍射峰强度(725 a.u.)较对照组(418 a.u.)提升 73.4%，XRD 图谱显示：改性组 30.0°处衍射峰高度显著高于对照组，且峰形更饱满。C-S-H 是水泥基材料的核心强度相，其含量增加直接填补基体孔隙——28 d 龄期粉煤灰火山灰反应充分，短纤维为反应提供“三维支撑骨架”，促进 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 与粉煤灰中的 SiO_2 、 Al_2O_3 反应生成更多 C-S-H 凝胶，为宏观强度提升提供核心物质基础，这也是改性组 28 d 强度无衰减反而增长的关键微观原因。 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量平衡增长：改性组 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度(478 a.u.)较对照组(312 a.u.)提升 53.2%，既避免了对对照组“ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成不足导致火山灰反应停滞”的问题，又未出现“ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 过量堆积导致微观裂缝”的缺陷。这种平衡源于 3 mm 短纤维的“晶体调控作用”——纤维表面活性基团引导 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 有序生长，同时为火山灰反应持续提供反应物，实现“生成 - 消耗”动态平衡，支撑后期强度稳定增长。未水化熟料显著减少：改性组未水化 C_3S 衍射峰强度(208 a.u.)较对照组(395 a.u.)降低 47.3%，图谱中对照组 31.0°处衍射峰更突出，表明短纤维的引入打破了对对照组“后期水化停滞”的困境：纤维在基体中形成的微通道促进水分传输，加速未水化熟料溶解，使水化反应持续至 28 d，减少未反应颗粒残留，提升基体密度。

4.2.4. 纤维增强机理阐释

结合宏观分析结果，纤维对粉煤灰水泥注浆材料的增强机理可概括为以下三点：桥接强化作用：纤维在基体中形成三维网络结构，当材料受压力作用产生微裂缝时，纤维通过桥接作用传递应力，阻止裂缝扩展，提升宏观韧性与强度；晶体调控作用：纤维表面的羟基基团可与水泥水化产物形成化学键合，为晶体生长提供位点，促进 C-S-H 凝胶与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 有序排列，提升微观晶体完整性。密实填充作用：纤维颗粒可填充基体内部孔隙，减少缺陷，改善微观结构密度，同时抑制粉煤灰颗粒的二次团聚，优化浆体级配。

5. 结论

本研究以Ⅱ级粉煤灰和 P·O42.5 水泥为基体，引入聚丙烯与玄武岩两种绿色纤维，针对煤层底板注浆工程需求开展改性研究，系统探究纤维参数对材料 7 d、28 d 宏微观性能的影响规律，建立宏微观关联体系，主要结论如下：

1. 纤维改性可显著提升粉煤灰水泥注浆材料的宏观抗压强度并抑制后期强度衰减。两种纤维中，聚丙烯纤维的增强效果更突出，其中聚丙烯纤维 9 mm + 1.0% 掺量为 7 d 高强度最优配方，7 d 抗压强度达 0.97 MPa，较对照组提升 94.0%；聚丙烯纤维 3 mm + 0.1% 掺量为 28 d 高稳定最优配方，28 d 抗压强度达 0.87 MPa，较对照组提升 93.3%，且 7 d→28 d 强度实现 31.7% 的正增长，有效解决了高掺量粉煤灰材料后期强度衰减的问题；玄武岩纤维 3 mm + 0.4% 掺量为经济型最优配方，兼顾强度与成本，适用于常规注浆工程。

2. 纤维参数对宏观强度的影响存在显著规律：纤维掺量与 7 d 强度呈正相关，1.0% 掺量时早期增强效果最佳；28 d 强度中，聚丙烯纤维呈“低掺量峰值、高掺量回落”特征，玄武岩纤维各掺量下强度分布均匀，稳定性更优。长度适配性差异明显，聚丙烯纤维 9 mm 适配早期高强度需求、3 mm 适配后期高稳定需求，玄武岩纤维 3 mm 为全掺量适配长度，短 - 中长度更契合粉煤灰水泥注浆材料的性能需求。

3. XRD 微观分析表明，纤维改性通过优化晶体结构支撑宏观强度提升：改性样品的核心水化产物 C-S-H 凝胶、 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 衍射峰强度显著提高，7 d、28 d 龄期 C-S-H 衍射峰强度较对照组分别最高提升 64.3%、73.4%；未水化水泥熟料 C_3S 衍射峰强度降低 47.3%，表明纤维促进了水化反应与粉煤灰火山灰反应的充分进行。

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] 曾熙文, 王艳芬, 赵光明, 等. 聚丙烯纤维改性超细水泥复合注浆材料性能研究[J]. 煤炭科学技术, 2024, 52(7): 57-67.
- [2] 吴晗晗. 玄武岩纤维混凝土宏观性能的试验研究[D]: [硕士学位论文]. 呼和浩特: 内蒙古农业大学, 2021.
- [3] 尹贻观, 张庆, 杨懿鹏, 等. 聚丙烯纤维增强水泥基复合材料的基本力学性能研究[J]. 江西建材, 2024(3): 14-16.
- [4] 魏芳, 宋慧平, 周建军, 等. 粉煤灰基注浆材料的研究进展[J]. 应用化工, 2024, 53(3): 673-676.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] 王宣. 玄武岩-聚丙烯纤维混凝土力学特性研究[D]: [硕士学位论文]. 湘潭: 湖南科技大学, 2025.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 中国建筑科学研究院. 《普通混凝土力学性能试验方法标准》GB/T50081-2002 [S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007.
- [12] 严咸通. 碳纳米管及碳纤维改性水泥基材料力学性能研究[D]: [硕士学位论文]. 深圳: 深圳大学, 2018.
- [13] 李华, 孙伟, 刘加平. XRD-Rietveld 法用于水泥基材料物相的定量分析[J]. 混凝土, 2013(1): 1-5.