

粉煤灰掺量对矿用水泥基材料抗压强度的影响研究

杨光¹, 成云海², 顾帅帅¹

¹安徽理工大学矿业工程学院, 安徽 淮南

²山东科技大学资源学院, 山东 泰安

收稿日期: 2025年7月11日; 录用日期: 2025年8月10日; 发布日期: 2025年9月10日

摘要

为探究粉煤灰掺量对矿用水泥基材料抗压强度的影响, 本研究以水胶比、水泥与粉煤灰比值、聚丙烯纤维掺量为变量, 设计正交实验, 对材料抗压强度及流动度结果进行数据整理和绘图。极差分析结果显示, 水胶比是影响抗压强度的关键因素, 低水胶比可显著提升强度; 高水泥占比利于早期强度, 高粉煤灰利于流动度提高和长龄期抗压强度增长; 纤维掺量对抗压强度影响较弱, 中水平掺量时韧性最优。试验中粉煤灰掺量对矿用水泥基材料的影响可为工程应用提供参考。

关键词

矿用水泥基材料, 粉煤灰, 抗压强度, 正交实验

Influence of Fly Ash Content on Compressive Strength of Mining Cement Based Materials

Guang Yang¹, Yunhai Cheng², Shuaishuai Gu¹

¹School of Mining Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan Anhui

²College of Resources, Shandong University of Science and Technology, Tai'an Shandong

Received: Jul. 11th, 2025; accepted: Aug. 10th, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

In order to explore the influence of fly ash content on the compressive strength of mining cement-based materials, the orthogonal experiment was designed with the water binder ratio, the ratio of cement to fly ash, and the content of polypropylene fiber as variables, and the data of the compressive

strength and fluidity of materials were collated and plotted. The range analysis results show that the water binder ratio is the key factor affecting the compressive strength, and low water binder ratio can significantly improve the strength; high cement proportion is beneficial to early strength, and high fly ash is beneficial to the improvement of fluidity and long-term compressive strength; the influence of fiber content on the compressive strength is weak, and the toughness is the best when the fiber content is medium level. The influence of fly ash content on mining cement-based materials in the test can provide reference for engineering application.

Keywords

Mining Cement-Based Materials, Fly Ash, Compressive Strength, Orthogonal Experiment

Copyright © 2025 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

矿用水泥基材料是矿山工程的核心支撑，在巷道支护、采空区充填、围岩加固中扮演着不可替代的角色。巷道支护中，它是抵御围岩地应力、矿山压力及冲击载荷的“骨架”，其抗压与抗折强度直接决定支护结构的承载能力。强度不足可能引发巷道变形、片帮甚至坍塌，严重威胁井下安全与施工进度。采空区充填时，材料强度更是维系采场稳定与控制地表沉降的关键，若充填体强度不足，易导致岩层移动、地表塌陷及矿井涌水，而高强度充填体可有效传递并分散岩层压力，保障生产持续安全。此外，在断层破碎带加固等场景中，材料需兼具早期快速承载能力与后期长期稳定性，以适配矿山工程数十年的服役周期。

为满足矿用水泥基材料的性能需求，学界已展开大量关于掺合料与改性剂的研究。赵灿濠等[1]通过在水泥净浆中掺入矿渣优化力学性能，崔宏瑞[2]等则聚焦粉煤灰在注浆材料中的应用，探究其对工作性能与微观结构的影响，张金虎等[3]关注低温环境下水胶比对水泥净浆强度的调控，温东昌等[4]则研究水化热抑制剂对复合胶凝材料水化反应的影响。这些研究共同指向一个核心：通过材料组分优化，提升矿用水泥基材料的适应性与经济性。在此背景下，粉煤灰作为工业固废的资源化利用成为重要方向。其年排放量巨大，堆存不仅占用土地，还可能引发环境污染，而将其作为水泥基掺合料，既能实现“变废为宝”，又能兼顾环境与经济价值。粉煤灰富含 SiO_2 、 Al_2O_3 等活性成分，可与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次火山灰反应，生成胶凝性 C-S-H 凝胶，替代部分水泥熟料贡献强度，从而减少 20%~30% 的水泥用量，降低对石灰石等不可再生资源的依赖。与此同时，每利用 1 吨粉煤灰可减少约 0.8 吨 CO_2 排放，契合“双碳”目标；其球状颗粒能提升浆体流动性，二次水化产物可细化孔隙结构，增强材料抗渗性与耐腐蚀性，延长服役寿命，完美适配绿色建材发展趋势。

另一方面，水泥基材料的脆性缺陷在矿山复杂载荷环境中尤为突出，而纤维掺入是破解这一问题的关键。纤维通过“桥接效应”传递应力、“阻裂效应”限制裂缝扩展、“拔出耗能”吸收冲击能量，显著提升材料的变形能力与破坏延性，使其能更好应对爆破冲击等动态载荷。张俊文等[5]学者的研究已证实，不同纤维种类对水泥基材料性能的改善效果显著，采用硅灰、矿粉、橡胶、纤维等材料研制出橡胶取代率为 15%，强度基本可达 30 MPa 的水泥基材料，靳贺松[6]则发现聚丙烯纤维可有效增强材料抗压强度，Keote R [7]等利用机器学习和遗传算法预测粉煤灰基钢纤维增强混凝土的性能；Luo S [8]等

研究了掺粉煤灰的聚甲醛纤维增强 3D 打印高强混凝土的流变和力学性能为矿用材料韧性优化提供了重要参考。

尽管现有研究已验证掺合料与纤维的作用，但针对无骨料矿用水泥基材料中，水胶比、水泥 - 粉煤灰配比、聚丙烯纤维掺量三变量的耦合影响仍缺乏系统分析，难以直接为 C30 强度等级的配合比设计提供依据。基于此，本研究在水泥净浆基础上引入粉煤灰替代部分水泥，辅以聚丙烯纤维改性，通过多变量对比实验，探究三因素对材料抗压强度的影响规律，最终筛选出满足 C30 强度要求的最优配合比，为矿用水泥基材料的性能优化与工程应用提供参考。

2. 试验材料与方法

2.1. 原材料

试验所用水泥为米山牌 P·C42.5 复合硅酸盐水泥；粉煤灰来自白庄煤矿 II 级粉煤灰；聚丙烯纤维直径 30 μm ，长度 12 mm，来自山东某工程材料公司。

2.2. 实验设计

目前，对于粉煤灰水泥基材料配比还未形成统一标准，参考《普通混凝土配合比设计规程》(JGJ55-2011)、《混凝土质量控制标准》(GB50164-2011)、《纤维混凝土应用技术规程》(JGJ/T221-2010)、《混凝土外加剂应用技术规范》(GB50119-2013)，并参考常规 C30 混凝土配合比。经过初步实验，选取水与胶凝物质质量比值即水胶比 3 水平有 0.3、0.35、0.4；水泥与粉煤灰质量比 6:4、5.5:4.5、5:5；纤维掺量：0 g/L、1.5 g/L、3 g/L 外加剂：固定掺量 1.5% (按水泥质量计)。设计 3 因素 3 水平正交实验如表 1 所示。

Table 1. Experimental ratio
表 1. 试验配比表

序号	水胶比	水泥与粉煤灰比值	聚丙烯纤维掺量	外加剂掺量
PF-1	0.3	5:5	0 g	
PF-2	0.3	5.5:4.5	3 g	
PF-3	0.3	6:4	1.5 g	
PF-4	0.35	5:5	3 g	
PF-5	0.35	5.5:4.5	1.5 g	1.5%
PF-6	0.35	6:4	0 g	
PF-7	0.4	5:5	1.5 g	
PF-8	0.4	5.5:4.5	0 g	
PF-9	0.4	6:4	3 g	

2.3. 试件制作

参照《超高性能混凝土基本性能与试验方法》(T/CBMF37-2018)。按照实验配比表，准确称量各组物质胶凝材料 $\pm 1\text{ g}$ ，水 $\pm 0.5\text{ g}$ ，纤维 $\pm 0.1\text{ g}$ ，外加剂 $\pm 0.1\text{ g}$ 。将称量好的水泥、粉煤灰与纤维倒入容器，低速干拌 30 s，使干料混合均匀，纤维初步分散；按设计掺量将外加剂溶于水中搅拌均匀，分次加入干料中，先低速搅拌至材料初步混合，再经静置与高速搅拌确保均匀，总搅拌时长 4 min 30 s；装模时采用 70 mm $\times$

70 mm × 70 mm 塑料试模，将浆料分两层装入，每层插捣次数不少于 12 次，确保密实；养护成型后 24 h 拆模，表面贴标签，随后置于标准养护环境(温度 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度 $\geq 95\%$)中养护至规定龄期。

2.4. 性能测试方法

(1) 流动度测试：使用金属截顶圆锥试模(70 mm * 60 mm * 100 mm)测水泥浆体的流动度。将水泥浆体倒入试模，使其顶部刚好装满。竖直提起试模，记录 15 s 后水泥浆体横向和纵向的扩散直径，记录两者的平均值，即为水泥浆体的流动度。

(2) 抗压强度测试：依据《混凝土物理力学性能试验方法标准》(GB/T50081-2019)，《水泥胶砂强度检验方法》(GB/T17671-2021)；使用砂纸对受压面进行打磨，确保受压面平整度 $\leq 0.05\text{ mm}$ ，保证测试结果的准确性。将预处理后的试件置于压力机压板中心，确保试件受压均匀，避免偏心受压；控制加载速率为 $0.5\sim 1.0\text{ MPa/s}$ (换算为力值：70.7 mm² 试件对应约 2.5~5.0 kN/s)，加载过程应均匀、连续，避免冲击加载。记录峰值荷载(kN)。其试件制备及试验过程如图 1 所示。

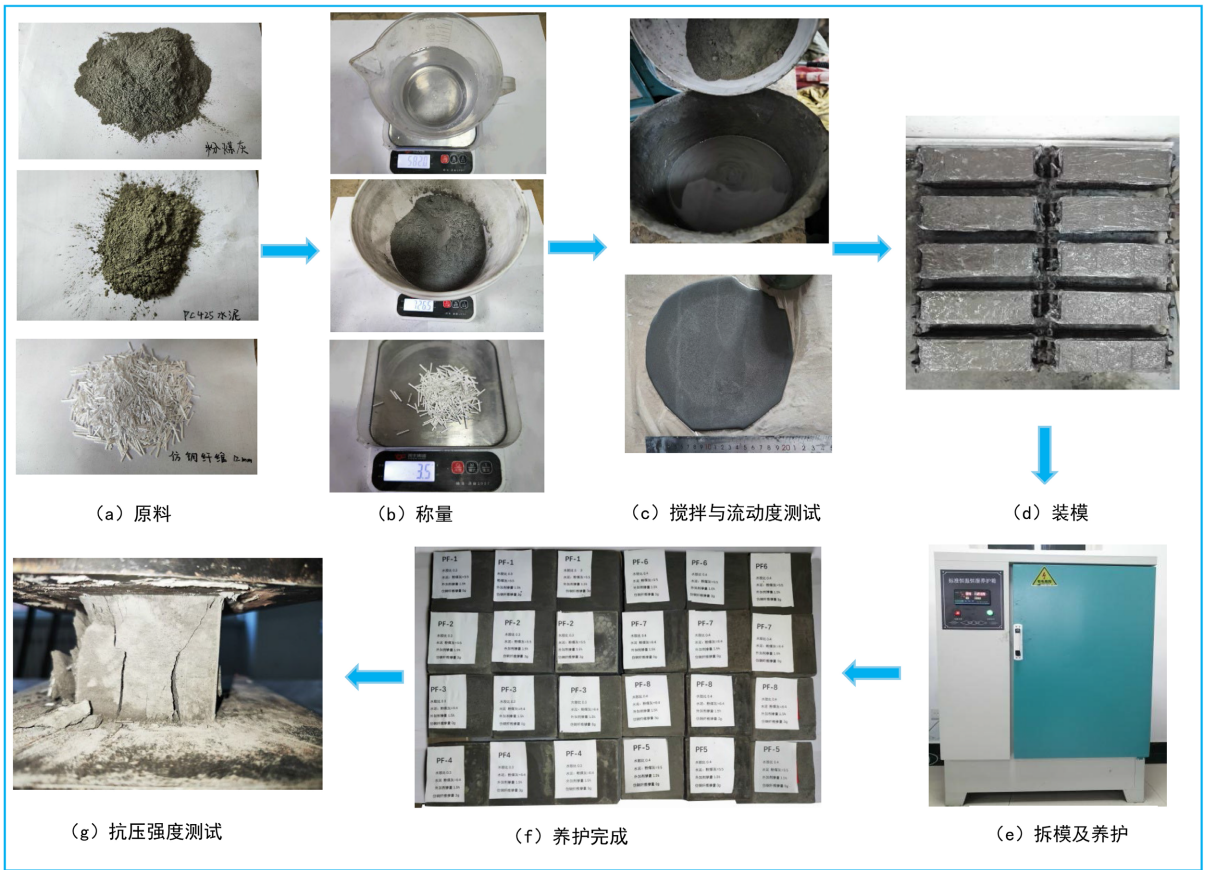


Figure 1. Schematic diagram of test procedures
图 1. 试验步骤图

3. 实验结果与分析

根据记录的峰值荷载，受压面积为 $70.7 \times 70.7\text{ mm}^2$ ，计算抗压强度。
对一组中三个试件，3 组数据中有试件偏离均值 15%，取剩余两值平均；有 2 个偏离，则废弃该组试件。实验所得各组流动度与抗压强度如表 2 所示。

Table 2. Table of test results
表 2. 试验结果表

序号	水胶比	水泥与粉煤灰比值	聚丙烯纤维掺量	外加剂掺量	7 d 强度 (Mpa)	14 d 强度 (Mpa)	28 d 强度 (Mpa)	流动度 /mm
PF-1	0.3	5:5	0 g		15.70	18.23	25.39	225
PF-2	0.3	5.5:4.5	3 g		18.96	22.16	28.42	189
PF-3	0.3	6:4	1.5 g		20.81	23.68	29.31	185
PF-4	0.35	5:5	3 g		15.42	20.21	25.26	174
PF-5	0.35	5.5:4.5	1.5 g	1.5%	17.23	21.2	26.18	228
PF-6	0.35	6:4	0 g		19.22	21.96	27.45	224
PF-7	0.4	5:5	1.5 g		14.28	18.76	23.42	236
PF-8	0.4	5.5:4.5	0 g		16.23	19.92	24.93	213
PF-9	0.4	6:4	3 g		17.58	20.08	25.12	192

3.1. 流动度分析

根据表 2 数据绘制流动度分布图，折线图和三维映射图如图 2 所示。

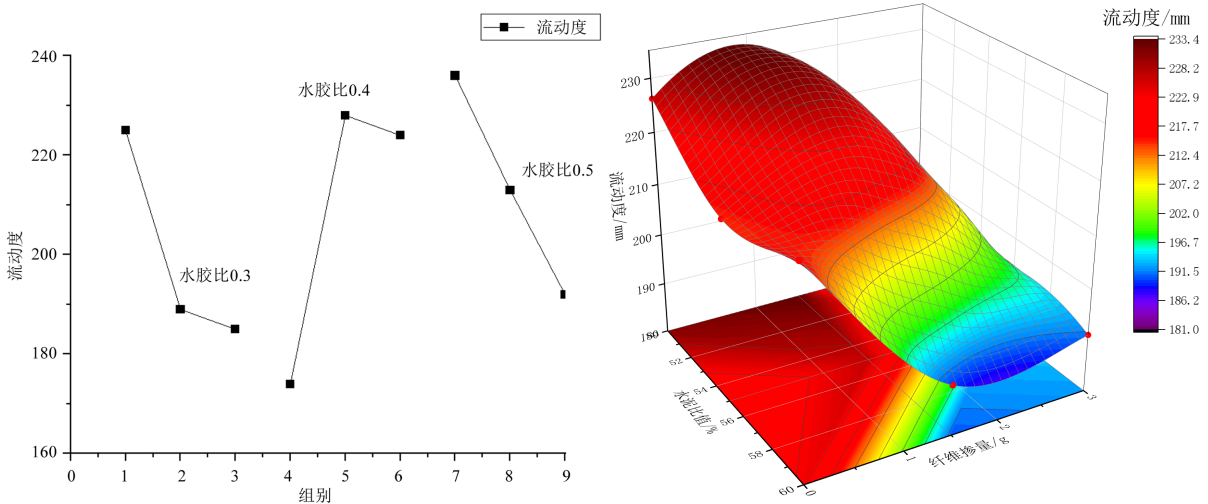


Figure 2. Diagram of fluidity changes
图 2. 流动度分布图

观察折线图发现水胶比较高的组别因其水含量更大，其流动度更高；据三维映射图发现，低水泥与粉煤灰比值、纤维掺量低的组别其流动度普遍较高。核心在于粉煤灰颗粒较水泥颗粒粒径更小，因其滚珠效应，随掺量增加可显著提高流动度；而纤维因体积大小掺入会一定程度上抑制其流动度的增长。

3.2. 水胶比影响

根据表 2 抗压强度与组别关系绘制抗压强度分布图，柱状图和三维映射图如图 3 所示。

对比水胶比 0.3 (PF-3)、0.35 (PF-5)、0.4 (PF-7) 的 28 d 强度：水胶比 0.3 时，28 d 强度 29.31 MPa；水胶比 0.35 时，28 d 强度 26.18 Mpa (下降 10.7%)；水胶比 0.4 时，28 d 强度 23.42 Mpa (较 0.3 下降 20.1%)。

机理分析：水胶比强度直接关联试件的抗压强度。水胶比增大时，多余水分在水化反应后以游离水形式残留，蒸发后形成连通孔隙，导致材料密实度下降。孔隙率的差异直接导致强度衰减。此外，低水胶比下，水泥与粉煤灰的水化反应更充分，C-S-H 凝胶交织更致密，进一步强化结构整体性。

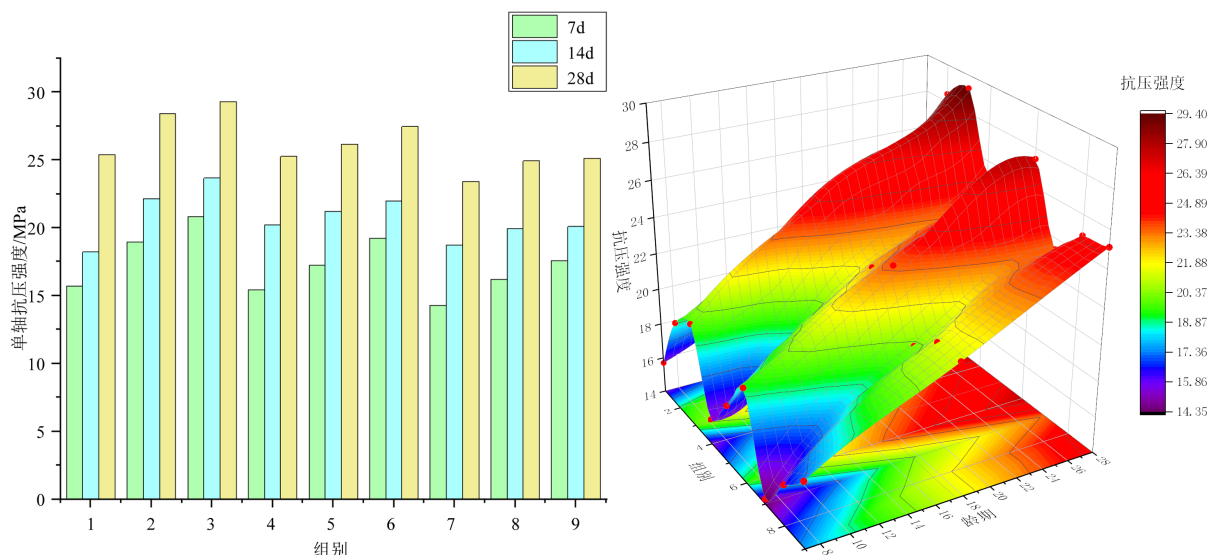


Figure 3. Compressive strength distribution

图 3. 抗压强度分布图

3.3. 水泥 - 粉煤灰比影响

对比水泥与粉煤灰比值 5:5 (PF-1 组)、5.5:4.5 (PF-2 组)、6:4 (PF-3 组) 的 28 d 抗压强度可见：5:5 配比时强度为 25.39 MPa；5.5:4.5 配比时强度提升至 28.42 MPa，较 5:5 组增长 11.9%；6:4 配比时强度进一步升至 29.31 MPa，较 5:5 组增长 15.4%。

这一规律的核心机理在于水泥与粉煤灰的水化特性差异：水泥作为主要胶凝材料，其水化反应迅速，能在早期(3~7 d)生成大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 和 C-S-H 凝胶，直接为材料提供强度支撑。因此，当水泥占比提高(从 5:5 到 6:4)，早期水化产物的生成量增加，材料密实度提升，强度随之增长。

而粉煤灰的强度贡献依赖于火山灰反应，需消耗水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，才能缓慢生成 C-S-H 凝胶，这一过程存在“反应滞后性”。当粉煤灰掺量过高(5:5 组)时，早期(7 d)可用于火山灰反应的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 不足，导致 7 d 强度仅为 15.70 MPa，仅为 6:4 组(PF-3 组，20.81 MPa)的 75.4%，早期强度明显偏低。但随着龄期延长(14 d 后)，粉煤灰的二次水化逐渐充分：5:5 组 14 d 到 28 d 的强度增长率达 39.3% (从 18.23 MPa 升至 25.39 MPa)，显著高于 6:4 组的 23.8% (从 23.68 MPa 升至 29.31 MPa)。这表明粉煤灰在后期能持续补充 C-S-H 凝胶，细化孔隙结构，体现出长期强度增长优势，适合对后期强度稳定性要求较高的场景。

3.4. 极差分析

以水胶比和水泥与粉煤灰比值为因素绘制抗压强度映射图如图 4，观察发现低水胶比和高水泥与粉煤灰比值条件下，抗压强度在各龄期普遍偏高。

对 7 d 的各组抗压强度数据进行极差分析如表 3。

主对 7 d 强度的影响中，水泥与粉煤灰比值是最关键因素，随水泥占比提高，7 d 强度显著提升，体

现水泥早期水化对强度的主导作用。水胶比影响次之，低水胶比更有利于 7 d 强度发展。

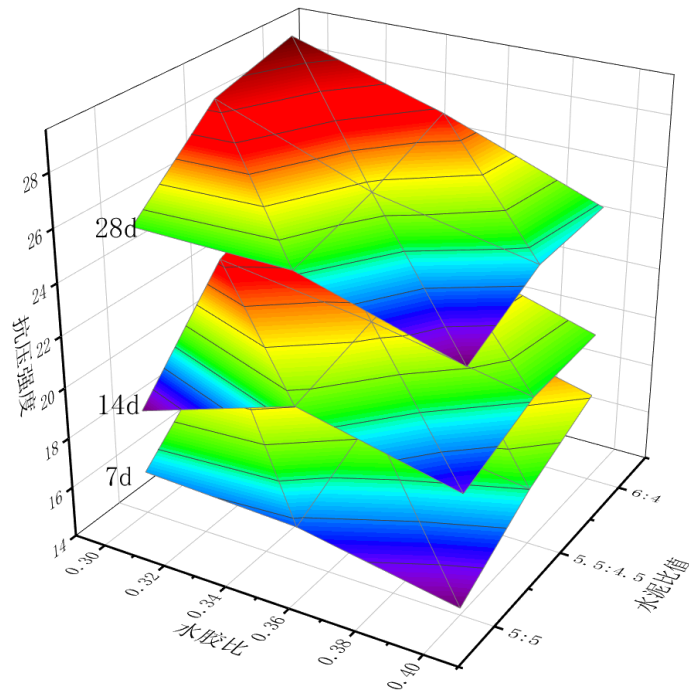


Figure 4. Distribution of two-factor compressive strength
图 4. 两因素抗压强度分布图

Table 3. 7-day range analysis
表 3. 7 d 极差分析表

因素	水平	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差 R
水胶比(A)	1~3	55.47	51.87	48.09	18.49	17.29	16.03	2.46
水泥/粉煤灰(B)	1~3	45.4	52.45	57.61	15.13	17.47	19.20	4.07
仿钢纤维掺量(C)	1~3	51.15	52.32	51.96	17.05	17.44	17.32	0.39

对 28 d 的各组抗压强度数据进行极差分析，结果如表 4。

Table 4. 28-day range analysis
表 4. 28d 极差分析表

因素	水平	K1	K2	K3	k1	k2	k3	极差 R
水胶比(A)	1~3	83.12	78.87	73.47	27.71	26.29	24.49	3.22
水泥/粉煤灰(B)	1~3	81.87	79.53	74.07	27.29	26.51	24.69	2.60
聚丙烯纤维掺量(C)	1~3	78.9	78.81	77.76	26.30	26.27	25.92	0.38

各因素对 28 d 强度的影响显著性为：水胶比 > 水泥与粉煤灰比值 > 聚丙烯纤维掺量。其中，水胶比的极差最大，是调控强度的核心因素；纤维掺量极差最小，主要影响材料韧性而非强度。

4. 讨论

本研究关键发现与现有研究既有共识，亦有因研究条件差异产生的独特性。

水胶比的主导作用与张金虎等[3]研究一致,均表明其通过调控密实度和水化程度影响强度。但本研究在标准养护下,水胶比从 0.3 增至 0.4 时 28 d 强度下降 20.1%,较[3]低温环境下的降幅小,因低温延缓水化放大了水胶比的影响,提示矿用材料在高寒矿区需更严格控制水胶比。

粉煤灰的双重效应与崔宏瑞等[2]结论吻合,高掺量虽降低早期强度,但通过二次水化提升长龄期强度并改善流动度。不过[2]注浆材料因泵送需求,粉煤灰最优掺量更高,且复合添加剂使其强度增幅更大,本研究则需平衡早期承载与施工性,掺量上限为 5:5。

聚丙烯纤维对强度影响弱、中掺量韧性优的结果,与张俊文等[5]、靳贺松[6]研究一致,印证其核心作用为改善韧性。但[5]关注抗折强度,[6]涉及抗冻性,本研究聚焦抗压强度,提示需结合具体工况综合评估纤维作用。

综上,本研究量化了三变量耦合影响,为矿用材料配合比设计提供参考,弥补了现有研究在多变量协同分析上的不足。

5. 结论与展望

(1) 各因素影响规律:水胶比是强度最关键因素,低水胶比显著提升强度;水泥与粉煤灰比次之,提高水泥占比利于早期强度,粉煤灰则贡献长期增长;聚丙烯纤维掺量对强度直接影响较弱,中水平掺量时韧性改善最优,过高易团聚。

(2) 综合强度与工作性,满足 C30 强度要求的最优配合比为:水胶比 0.3、水泥与粉煤灰比 6:4、聚丙烯纤维掺量 1.5 g/L,其 28 d 抗压强度达 29.31 MPa,流动度 185 mm,兼顾承载能力与施工可操作性。

(3) 矿用水泥基材料的强度发展源于水泥早期水化与粉煤灰后期火山灰反应的协同作用。粉煤灰二次水化反应周期长,可开展更长期龄期抗渗性、抗冲击性等指标测试。也可引入矿粉、硅灰等复合掺料,进一步提升材料强度与韧性的协同效应,补充 SEM、XRD 等微观测试,全面评估材料在矿山复杂环境中的服役性能。

参考文献

- [1] 赵灿濠,李犇,徐虎,等.耦合激发炉渣基水泥净浆力学性能研究[J].材料研究与应用,2024,18(5):841-848.
- [2] 崔宏瑞,孟祥瑞,程详,等.水玻璃-膨胀剂-粉煤灰水泥基复合注浆材料研发与试验[J].中国矿业,2025,34(8):169-177.
- [3] 张金虎,代金鹏,王起才,等.低温环境下不同低气压及水胶比对水泥净浆强度及水化性能的影响[J].四川水泥,2025(1):10-13.
- [4] 温东昌,曾柯林,杨蓉,等.水化热抑制剂对水泥-粉煤灰-矿粉复合胶凝材料水化反应的影响[J].混凝土与水泥制品,2024(12):9-13+28.
- [5] 张俊文,吴少康,宋治祥,等.纤维种类及橡胶含量对矿用水泥基材料性能影响研究[J].采矿与岩层控制工程学报,2024,6(5):42-56.
- [6] 靳贺松.聚丙烯纤维增强水泥基复合材料抗(盐)冻性及力学性能研究[D]:[硕士学位论文].成都:西南交通大学,2019.
- [7] Keote, R., Keote, M., Balpande, R.S., Masram, B., Dubey, P., Pinjarkar, L., et al. (2024) An Integrated Machine Learning and Genetic Algorithm Approach for Properties Prediction of Fly Ash-Based Steel Fiber-Reinforced Concrete. *Asian Journal of Civil Engineering*, **26**, 1175-1191. <https://doi.org/10.1007/s42107-024-01244-0>
- [8] Luo, S., Jin, W., Wu, W. and Zhang, K. (2024) Rheological and Mechanical Properties of Polyformaldehyde Fiber Reinforced 3d-Printed High-Strength Concrete with the Addition of Fly Ash. *Journal of Building Engineering*, **98**, Article 111387. <https://doi.org/10.1016/j.jobe.2024.111387>