

纤维增强粉煤灰加筋混凝土抗压强度性能研究

Research on the Compressive Strength Performance of Fiber-Reinforced Fly Ash Reinforced Concrete

陆进保

(乌鲁木齐职业大学 应用工程学院, 乌鲁木齐 830002)

摘要: 为分析纤维在粉煤灰加筋混凝土中的最佳应用方案, 从抗压强度性能角度开展其研究。以 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, I 级 FA 和不同长度的 PVA 纤维作为主要试验材料, 构建了三因素四水平正交试验组, 配合 GFRP 筋生成 100 mm × 100 mm × 100 mm 的试样。对不同配比组试件进行抗压性能测试, 通过极差分析法优化参数组合。结果表明: PVA 纤维在 30~40 mm 长度区间时试件抗压性能达到峰值; 当纤维体积掺量由 0.1% 增至 0.3% 时, 材料强度呈现显著协同效应。当 PVA 纤维为 30~40 mm 长度区间、FA 掺量为 15.0% 和 PVA 纤维体积掺量为 0.3% 时, 可以在基体中形成有效三维乱向支撑体系, 提升结构承载力, 具有较优的抗压强度, 为该材料在工程应用中的优化设计提供了关键依据。

关键词: 纤维增强粉煤灰加筋混凝土; 抗压强度; 纤维长度; 体积掺量

中图分类号: TU528.572

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2025) 05-0020-05

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.05.004

LU Jinbao

(School of Applied Engineering, Urumqi Vocational University, Urumqi 830002, China)

Abstract: To analyze the optimal application scheme of fibers in fiber-reinforced fly ash reinforced concrete, research is conducted from the perspective of compressive strength performance. A three factor four level orthogonal experimental group was constructed using P·O 42.5 ordinary Portland cement, grade I FA, and PVA fibers of different lengths as the main experimental materials. Samples of 100 mm × 100 mm × 100 mm were generated using GFRP reinforcement. Using the WAW-1000 electro-hydraulic servo test system, compressive performance tests were conducted on specimens with different ratios under constant loading rate conditions, and parameter combinations were optimized through range analysis. The results showed that the compressive performance of PVA fibers reached its peak in the length range of 30-40mm; When the fiber volume fraction increases from 0.1% to 0.3%, the material strength exhibits a significant synergistic effect. when the PVA fiber is in the length range of 30-40mm, the FA content is 15.0%, and the PVA fiber volume content is 0.3%, an effective three-dimensional random support system can be formed in the matrix, which can improve the structural bearing capacity and have better compressive strength. This provides a key basis for the optimization design of the material in engineering applications.

Key words: fiber reinforced coal ash reinforced concrete; compressive strength; fiber length; volume incorporation dosage

0 引言

粉煤灰具有一定的火山灰活性, 将其掺入混凝土中, 不仅可以改善混凝土的工作性能^[1]、提高后期强度, 还能减少水泥用量, 降低生产成本, 具有显著的经济和环境效益^[2]。因此, 纤维增强粉煤灰

作者简介: 陆进保 (1982—), 男, 硕士, 副教授, 研究方向: 建筑工程教学工作, 建筑工程设计、施工。

收稿日期: 2025-04-02

加筋混凝土作为一种兼具资源循环利用和性能提升优势的新型建筑材料，受到了广泛关注^[3]。然而，纤维的种类、长度、体积掺量等因素均会对混凝土的抗压强度等性能产生显著影响^[4]。

为增强粉煤灰混凝土抗压强度，国内外均开展了相关研究。李松涛等^[5]通过氯盐渗透试验发现，混杂纤维粉煤灰混凝土的氯离子扩散系数与孔结构分形维数呈负相关，纤维掺量优化可细化孔隙结构；邵善庆等^[6]研究表明，玄武岩纤维混杂掺入能通过孔隙分散效应和“桥接”作用显著提升粉煤灰混凝土的抗冻性，300 次冻融循环后损伤程度降低；丁大伟等^[7]发现钢纤维与粉煤灰复配使超高性能混凝土（UHPC）抗冲磨强度提升 58%，且粉煤灰可降低最可几孔径，优化微观结构；杨圣飞等^[8]通过正交试验证实，0.3% 玄武岩纤维与 5% 粉煤灰复掺可使陶粒混凝土抗折强度提升 34.9%，纤维体积率为关键影响因素；万聪聪等^[9]指出聚丙烯纤维存在最优掺量（0.2%），过量会导致泡沫混凝土强度下降，而粉煤灰掺量需控制在 45% 以内；Sarma 等^[10]和 Sobuz 等^[11]分别验证了粉煤灰与矿渣复掺可提升再生骨料混凝土力学性能，20%~30% 再生骨料替代率为适宜范围；Asadi 等^[12]基于 CEN/TS 12390-9 盐冻试验指出，混凝土内部开裂会增大胶层裂应力 14%，但湿冻融循环中液体吸收（LU）作用使冰层厚度减少 1~2 mm，导致胶层剥落应力降低 34%~65%，强调建模时需同时考虑 LU 效应和内部开裂引发的热膨胀系数变化；Nis 等^[13]发现 1% 钢纤维与 15% 橡胶颗粒协同作用可使混凝土冲击能量提高 30 倍；Sherwani 等^[14]研究了再生骨料自密实地聚合物混凝土的可行性，采用粉煤灰-矿渣（70/30 和 50/50）作为胶凝材料，再生骨料替代率（0~100%）为变量。结果表明，再生骨料和矿渣会降低和易性；柴明明等^[15]研制出含 15% 粉煤灰和适量聚丙烯纤维的湿喷混凝土，回弹量控制在 12% 以下。

这些研究共同表明，纤维-粉煤灰协同改性可显著改善混凝土的力学性能、耐久性和施工性能，但需严格控制掺量和配合比设计以实现性能优化。因此，在上述研究的基础上，选用 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥、I 级 FA 和不同长度的 PVA 纤维作为主要试验材料，构建三因素四水平正交试验组，配合 GFRP 筋制成特定尺寸试样。通过对不同配比组试件

进行抗压性能测试，以期为该材料在工程应用中的优化设计提供参考。

1 主要原材料选取

水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥，其化学组成及技术指标见表 1~表 2。粉煤灰采用 I 级 FA，其成分构成及具体表征见表 3。聚乙烯醇纤维（PVA 纤维）性能指标及具体表征见表 4。

表 1 水泥化学组成

Table 1 Chemical composition of cement /%							
SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	烧失量	其他
24.59	8.24	4.01	51.06	3.77	2.52	3.06	2.75

表 2 试验用水泥技术指标

Table 2 Cement technical indicators								
密度 /(kg/m ³)	初凝时间 /min	终凝时间 /min	抗压强度/MPa			抗折强度/MPa		
			3 d	7 d	28 d	3 d	7 d	28 d
3 112	168	230	27.5	29.6	33.2	5.5	6.8	10.2

表 3 粉煤灰成分

Table 3 Composition of fly ash /%						
细度	烧失量	含水量	CaO	SO ₃	活性组分	其他
9.02	1.88	0.12	1.56	1.59	84.83	1.00

表 4 PVA 纤维性能参数

Table 4 Performance parameters of PVA fibers						
纤维 性状	长度 /mm	直径 /μm	密度 /(kg/m ³)	断裂延伸 率/%	抗拉强度 /MPa	弹性模量 /GPa
束状单丝	10.0~50.0	32.0	1 320.0	5.6	1 706	35.0

2 正交试验设计

采用正交试验方法将 FA 掺量、PVA 纤维长度和 PVA 纤维体积掺量作为正交因素，具体的正交试验因素水平见表 5，正交实验组，见表 6（未添加任何试验因素的组为空白组，即编号为 A00 的组）。

表 5 正交试验因素水平设置

Table 5 Orthogonal test factor level setting			
水平	FA 掺量/%	PVA 纤维长度/mm	PVA 纤维体积掺量/%
1	5.0	[10, 20]	0.1
2	10.0	(20, 30]	0.2
3	15.0	(30, 40]	0.3
4	20.0	(40, 50]	0.4

在分析不同试验组纤维增强粉煤灰加筋混凝土的抗压强度性能时，引入极差分析法，以此确定试验因素的最优水平以及最佳组合。具体的计算方式可以表示为：

$$R_i = \max(\bar{K}_{in}) - \min(\bar{K}_{in}) \tag{1}$$

式中： R_i 表示第 i 列因素水平变化对应混凝土抗压强

表 6 正交实验组设计

Table 6 Orthogonal experimental group design			
试验组 编号	FA 掺量 水平	PVA 纤维长度 水平	PVA 纤维体积 掺量水平
A00			
X00	1		
X01	1	1	1
X02	1	2	2
X03	1	3	3
X04	1	4	4
X10	2		
X11	2	1	2
X12	2	2	1
X13	2	3	4
X14	2	4	3
X20	3		
X21	3	1	3
X22	3	2	4
X23	3	3	1
X24	3	4	2
X30	4		
X31	4	1	4
X32	4	2	3
X33	4	3	2
X34	4	4	1

度参数变动幅度,该参数值越大, i 列因素对混凝土抗压强度性能的影响越大; $\bar{K}_m$ 表示 i 列因素 n 水平对应混凝土抗压强度参数的均值,利用其判断 n 水平指标是否为 i 列因素的最优水平。

3 试样制备

对纤维增强粉煤灰加筋混凝土进行搅拌,其中,不同组别的基础原料的配合比均为水:水泥:砂子:石子:凝胶材料为161:310:695:1183:0.52,GFRP筋的直径均为12.0 mm。充分混匀混凝土材料后,填充至尺寸为100 mm×100 mm×100 mm的试验模具中,填充体积为1/2。在振捣至模具内无气泡的前提下,中心位置放置长度为80.0 mm的GFRP筋,并填充剩余1/2混凝土。室内养护24 h后对试件进行拆模处理,按照正交试验组编号标注后养护28 d。

4 试件抗压强度结果及分析

4.1 试样抗压破坏形态分析

对空白试验组以及PVA纤维长度因素最低水平和PVA纤维体积掺量最高水平的试样抗压破坏形态的表征进行分析,如图1所示。

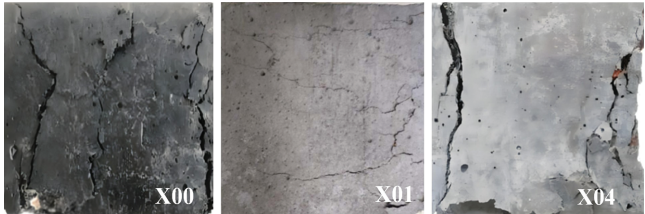


图 1 试样抗压破坏形态的表征

Fig.1 Characterization of the compression morphology of the specimen

与空白组(X00)相比,X01试样在破坏后仍保持较好的整体性,表面裂缝数量较少且发展受限;X04试样虽有一定改善,但整体破坏形态与空白组较为接近。结果表明,适量纤维的掺入能够在一定程度上抑制裂缝的发展,对提升抗压性能具有积极作用,但纤维长度与掺量的组合效果需进一步优化。

4.2 不同长度PVA纤维试件抗压强度分析

以PVA纤维长度因素为基准,对比分析了不同水平试件的抗压强度,对应的数据结果如图2所示,PVA纤维长度数据见表7。

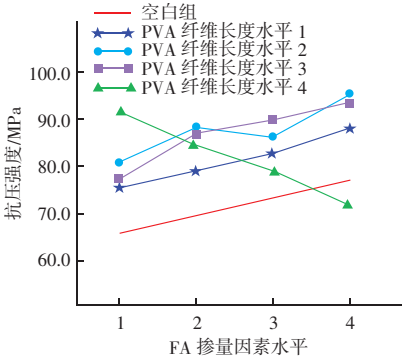


图 2 不同长度PVA纤维试件抗压强度

Fig.2 Compressive strength of PVA fiber specimens of different lengths

表 7 PVA 纤维长度 $\bar{K}_m$ 值

Table 7 PVA fiber length values				
$\bar{K}_{21}$	$\bar{K}_{22}$	$\bar{K}_{23}$	$\bar{K}_{24}$	R_1
80.26	83.79	86.72	78.33	5.46

当PVA纤维处于水平3时,试件的抗压强度最高,这是因为在混凝土中,在PVA纤维的桥接作用下,与水泥基材构成了稳固的基体结构,有效减少了裂缝的扩展程度。而过长的纤维(水平4)可能导致纤维在混凝土中的分散性变差,使得纤维与水泥基材之间的黏结度降低。可能导致纤维在受力过程中更容易被拔出或拔断,从而降低了混凝土的抗压强度。

4.3 不同体积 PVA 纤维试件抗压强度分析

以 PVA 纤维体积掺量因素为基准，对比分析了不同水平试件的抗压强度，对应的数据结果如图 3 所示，PVA 体积掺量见表 8。

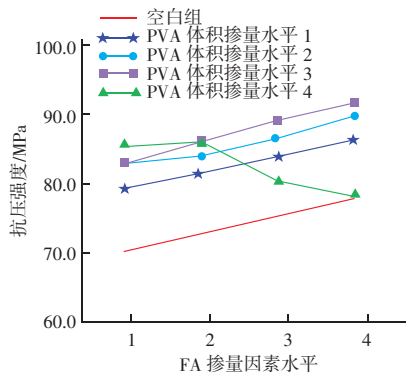


图 3 抗压强度测试结果

Fig. 3 Results of the compressive strength test

表 8 PVA 体积掺量 $\bar{K}_{in}$ 值

Table 8 PVA volume incorporation values

$\bar{K}_{21}$	$\bar{K}_{22}$	$\bar{K}_{23}$	$\bar{K}_{24}$	R_2
82.79	85.96	89.37	80.75	5.21

当 PVA 纤维体积掺量由水平 1 (0.1%) 增至水平 3 (0.3%) 时，试件的抗压强度表现出了相对稳定的协同增长趋势。表明此时 PVA 纤维能够在混凝土中形成三维乱向分布，利用桥接作用减少裂缝的扩展，进而与水泥基材构成稳固基体，使得混凝土在受压时，纤维能够承担部分压力，并通过其桥接作用将压力分散到更大的区域，提高了混凝土的抗压强度。但是当 PVA 纤维掺量继续增加至水平 4 (0.4%) 时，过量的纤维会降低混凝土的流动性，使得试件在搅拌和浇注过程中产生孔隙和缺陷的可能性增加，并成为试件的薄弱点，在受压时更容易引发裂缝的扩展和破坏，从而导致抗压强度相对较低。

5 结论

研究围绕纤维增强粉煤灰加筋混凝土抗压强度性能展开，通过构建三因素四水平正交试验组，取得主要结论：

(1) PVA 纤维长度为 (30, 40] mm (水平 3) 时试件抗压强度最高，体积掺量从 0.1% (水平 1) 增加至 0.3% (水平 3) 时试件抗压强度呈稳定协同增长趋势。

(2) 适当长度和体积掺量的纤维能在混凝土内

形成有效三维乱向分布，提高混凝土抗压强度；而过长纤维或过量体积掺量会降低在混凝土中的分散性，增强效果不明显。

此研究为确定纤维在纤维增强粉煤灰加筋混凝土中的最佳应用方案提供了科学依据，对提升该类混凝土的抗压性能、推动其在工程领域的合理应用具有重要意义。

参 考 文 献

[1] 鲍俊立, 武东亚, 刁飞, 等. 低电阻率、高耐久性碳纤维导电混凝土性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (1): 69–73, 79.

[2] 花蕾. 玄武岩纤维混掺聚乙醇醇纤维水泥基复合材料性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 14–18.

[3] 胡庭婷. 粉煤灰回填双层结构地基建筑极限承载力计算 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (6): 54–58.

[4] 文安飞, 张政, 霍志强, 等. 级配再生细骨料及粉煤灰掺量对活性粉末混凝土性能影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (5): 17–21.

[5] 李松涛, 肖东, 刷秀梅, 等. 基于分形维数的纤维混凝土孔结构与氯盐渗透关系 [J]. 水电能源科学, 2024, 42 (11): 103–106.

[6] 邵善庆, 龚爱民, 罗加辉, 等. 混杂玄武岩纤维混凝土孔隙结构及抗冻性 [J]. 水力发电学报, 2025, 44 (2): 116–124.

[7] 丁大伟, 郭子涵, 张伟, 等. 粉煤灰和钢纤维对超高性能混凝土抗冲磨性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (10): 3585–3594.

[8] 杨圣飞, 李海艳, 向杰. 玄武岩纤维粉煤灰增强陶粒混凝土力学性能试验研究 [J]. 中国测试, 2022, 48 (4): 166–172.

[9] 万聪聪, 姜天华, 余意. 基于正交试验的聚丙烯泡沫混凝土基本力学性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (10): 3518–3529.

[10] SARMA V V S, ALISHA S S, VIJAY K, et al. Mechanical performance enhancement of recycled aggregate concrete using GGBS and fly ash for sustainable construction [J]. Multiscale and Multidisciplinary Modeling, Experiments and Design, 2024, 7 (3): 1693–1700.

[11] SOBUZ M H R, JABIN J A, ASHRAF J, et al. Enhancing Sustainable Concrete Production by Utilizing Fly Ash and Recycled Concrete Aggregate with Experimental Investigation and Machine Learning Modeling [J]. Journal of Building Pathology and Rehabilitation, 2024, 9 (2): 1. 1–1. 20.

[12] ASADI I, SKJLSVOLD O, KANSTAD T, et al. Frost – salt Testing Non – air Entrained High – Performance Fly – ash Concrete. Part I: Relations Liquid uptake – Internal Cracking Scaling [J]. Nordic Concrete Research, 2024, 70 (1): 25–42.

材料科学

[11] BANDOPADHYAY A, GIRI D. Improvement of expansive soils mixed with red mud and phosphogypsum [J]. Arabian Journal of Geosciences, 2023, 16 (5): 322.

[12] WANG S, CHEN Z, JIANG H, et al. Strength performance and enhancement mechanism of silty sands stabilized with cement, red mud, and phosphogypsum [J]. Journal of Building Engineering, 2023, 73: 106762.

[13] DO T M, KANG G, VU N, et al. Development of a new cementless binder for marine dredged soil stabilization; Strength behavior, hydraulic resistance capacity, microstructural analysis, and environmental iMPact [J]. Construction and Building Materials, 2018, 186 (OCT. 20): 263–275.

[14] 谷雷雷, 王盛年, 张梅, 等. 水泥赤泥磷石膏复合固化粉砂土力学特性研究 [J]. 人民长江, 2024, 55 (增刊 2): 232–238.

[15] 沈君, 程寅, 金小平, 等. 废渣基地聚物稳定粉黏土性能试验研究 [J]. 岩土力, 2024, 45 (增刊 1): 147–156.

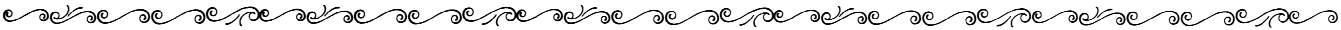
[16] 张亭亭, 李江山, 王平, 等. 磷酸镁水泥固化铅污染土的应力–应变特性研究 [J]. 岩土力学, 2016, 37 (增刊 1): 215–225.

[17] 公路土工试验规程: JTG3430—2020 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2020.

[18] 公路工程无机结合料稳定材料试验规程: JTG E51—2009 [S]. 北京: 人民交通出版社, 2009.

[19] WAN X, DING J, WANG J, et al. Evolution in macro–micro properties of cement–treated clay with changing ratio of red mud to phosphogypsum [J]. Construction and Building Materials, 2023, 392: 131972.

[20] 王伟, 罗霄, 陈超, 等. 层状岩石不排气三轴压缩力学特性试验研究 [J/OL]. 岩土力学, 2024, 45 (5): 1334–1342.



(上接第 23 页)

[13] NIS A, EREN N A, CEVIK A. Effects of recycled tyre rubber and steel fibre on the impact resistance of slag–based self–compacting alkali–activated concrete [J]. European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2023, 27 (1/3): 519–537.

[14] SHERWANI A F H, YOUNIS K H, ARNDT R W, et al. Influence of slag and recycled concrete aggregates contents on the performance of fly ash based self compacted geopolymer concrete [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2024, 9 (8): 331.

[15] 柴明明, 李世佳, 杨飞雄, 等. 粉煤灰和聚丙烯纤维对喷射混凝土性能影响研究 [J]. 公路交通科技, 2022, 39 (增刊 2): 119–124.