

超高性能纤维粉煤灰混凝土力学特性与微结构影响分析

梁宏斌¹, 解威威²

(1. 广西桂商实业投资有限公司, 南宁 530200; 2. 广西路桥工程集团有限公司, 南宁 530000)

摘要: 为探究粉煤灰掺量对超高性能纤维混凝土多项性能的协同影响, 设计空白组、10%、20%、30%、40%、50% 六组配比, 通过力学、耐久与微观测试系统分析其性能演化规律。结果表明: 力学性能在 20% 掺量时最优, 28 d 抗压强度达 158.2 MPa, 比 UC100 规范限值高出 58.2%; 耐久性能在 30% 掺量时达到峰值, 氯离子扩散系数 $1.17 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、气体渗透系数 $6.7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 、电通量 690 C, 分别较空白组降低 35.7%、31.6%、42.0%。微观结构分析显示, 30% 掺量时 C-S-H 含量峰值为 1.15, 总孔隙率降至 9.5%, 与宏观耐久性最优一致。多性能综合指数与性能平衡指数在 30% 掺量时分别为 0.98、0.95, 拟合度为 0.97, 预测最优掺量区间为 25%~32%。研究揭示了粉煤灰掺量对 UHPFRC “适量优化、过量削弱” 的非线性规律, 为高性能混凝土绿色设计提供量化依据。

关键词: 超高性能纤维混凝土; 粉煤灰; 力学性能; 耐久性; 微观结构; 多性能综合指数; 性能平衡指数
中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249 (2026) 01-0068-08
DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.01.013

Analysis of the Effect of Fly Ash Content on the Mechanical Properties and Microstructure of Ultra-High-Performance Fiber-Reinforced Concrete

LIANG Hongbin¹, XIE Weiwei²

(1. Guangxi Guishang Industrial Investment Co., Ltd., Nanning 530200, China;

2. Guangxi Road and Bridge Engineering Group Co., Ltd., Nanning 530000, China)

Abstract: In order to explore the synergistic effect of fly ash content on multiple properties of ultra-high performance fiber concrete, six groups of ratios were designed, including blank group, 10%, 20%, 30%, 40%, and 50%, and analyzed through mechanics, durability and microscopic testing systems. The results show that the mechanical properties are optimal at 20% of the content, and the 28-day compressive strength reaches 158.2 MPa, which is 58.2% higher than the UC100 specification limit; the durability reaches the peak at 30% of the content. The chloride ion diffusion coefficient is $1.17 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, the gas permeability coefficient is 6.7×10^{-17} , and the electric flux is 690C, which are 35.7%, 31.6% and 42.0% lower than the blank group respectively. Microstructural analysis showed that the peak value of C-S-H content was 1.15 at 30% doping content, and the total porosity dropped to 9.5%, which was consistent with the best advantage of macro durability. The multi-performance comprehensive index and the performance balance index are 0.98 and 0.95 respectively at 30% doping content, the fitness index $R = 0.97$, and the predicted optimal doping range is 25%~32%. The research reveals the nonlinear law of "appropriate optimization and excessive weakening" of fly ash content on UHPFRC, providing a quantitative basis for green

design of high-performance concrete.

Key words: ultra-high-performance fiber-reinforced concrete; fly ash; mechanical properties; durability; microstructure; multi-performance index; balance index

0 引言

超高性能纤维混凝土 (UHPFRC) 以极低水胶比、致密基体和高效纤维增韧为特征, 兼具超高强度与优异耐久性, 广泛应用于桥梁面板、装配式节点及极端荷载防护等结构^[1]。但其高水泥和硅灰用量导致成本高、碳排放大, 不利于绿色可持续发展。为此, 研究者尝试以粉煤灰 (FA) 等矿物掺合料部分替代胶凝材料, 在降低资源消耗和环境负荷的同时, 保持或优化力学与耐久性能, 实现“高性能—低碳化”设计目标^[2]。

粉煤灰兼具球形效应与微填充效应, 可改善浆体流动性与颗粒级配, 其潜在火山灰反应可与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成 C-S-H 凝胶, 促进后期致密化与强度增长。李瞳等^[3]通过力学与介质传输试验系统研究了钢渣骨料与粉煤灰对 ECC 性能的影响机理, 发现钢渣可提高抗压和抗渗性能, 而高掺量粉煤灰有助于改善拉伸应变能力; Shaikh 等^[4]指出掺粉煤灰可提升 UHPFRC 延性并优化裂缝分布; Bahedh 等^[5]通过高温蒸压制备掺粉煤灰超高性能混凝土 (UHPC), 证明其可保持较高强度并改善微观结构; 曹润倬等^[6]表明超细粉煤灰能显著优化流变与力学性能; 孙婧等^[7]发现, 适量原状粉煤灰有利于后期强度与耐久性, 高掺量则因活性不足产生稀释效应; 刘雪梅^[8]开展了大掺量粉煤灰与硅灰对高性能自密实混凝土力学及收缩性能的影响研究, 提出 30% 粉煤灰 + 10% 硅灰或 40% 粉煤灰 + 20% 硅灰为最佳配比, 可兼顾强度与抗干缩性能; 杨腾宇等^[9]认为粉煤灰类型、比表面积及玻璃相含量对性能改善作用显著; 胡萍^[10]发现粉煤灰可提升抗裂性; 陈广升^[11]研究了碱激发粉煤灰-高炉矿渣粉固化铸造废砂的性能, 结果表明在 NaOH 激发下, 高炉矿渣粉与粉煤灰能显著提高固化强度和致密性, 为废砂再利用提供可行路径; 王金歌^[12]发现粉煤灰与矿渣复合可降低氯离子扩散系数; 高鹏等^[13]指出适量掺入可减小

气体渗透性, 过量则因未反应颗粒增加形成连通孔道; 刘丹等^[14]、张兴龙^[15]证实高掺量后期强度提升有限且耐久性下降; 丁大伟等^[16]表明粉煤灰与钢纤维复合可增强抗冲磨性能, 但需控制掺量; 刘超群等^[17]提出, 应综合强度与耐久性确定最佳比例; 段玉东等^[18]研究了粉煤灰中不同 CaO 含量对水泥浆体安定性及抗裂性能的影响, 结果表明 CaO 含量升高会导致膨胀值略增、收缩减小, 但高钙灰的体积稳定性仍存在潜在风险。总体而言, 现有研究虽揭示了粉煤灰在 UHPFRC 中的作用机理与性能变化, 但多集中于单一龄期或性能, 缺乏多龄期系统对比, 工程适用性验证不足, 且宏观性能与微结构耦合分析有限, 基于 MPI 等方法定量确定最优掺量的研究仍较少。

基于此, 在保持骨料级配、纤维体积分数及外加剂用量恒定的条件下, 采用单因素法设置粉煤灰掺量 10%~50% 梯度, 系统测试 UHPFRC 的抗压、劈裂抗拉与抗折强度, 并通过氯离子扩散系数、气体渗透系数和电通量评价耐久性能; 结合 MIP 测定总孔隙率与 TGA 定量 C-S-H 含量, 揭示掺量对微结构的影响机制, 引入 MPI 与性能平衡指数 (BI) 构建“掺量—孔隙—输运—强度”一体化评价框架, 提出兼顾强度、耐久性与可持续性的最优掺量区间, 为 UHPFRC 在高应力与高耐久性要求工程的材料设计与规范化应用提供量化依据。

1 材料与试验方法

1.1 原材料

水泥为 P·O 42.5 级普通硅酸盐水泥, 符合 GB 175—2023《通用硅酸盐水泥》^[19]中的相关要求, 其 28 d 抗压强度达到 42.5 MPa, 细度满足规定要求, 比表面积不低于 $300 \text{ m}^2/\text{kg}$, 初凝时间不早于 45 min, 终凝时间不超过 600 min, 具有良好的早期强度发展能力。其主要性能指标和化学成分见表 1~2。

材料科学

表1 水泥主要性能指标

Table 1 Main performance indicators of cement

项目	比表面积/ (m ² /kg)	凝结时间 /min		抗压强度 /MPa	抗折强度 /MPa
		初凝时间	终凝时间	28 d	28 d
实测值	355	320	400	59.7	7.9
规定值	≥300	≥45	≤600	≥42.5	≥6.5

粉煤灰采用Ⅱ级粉煤灰,其粒径分布特征如图1所示,平均粒径为8 μm,比表面积为456 m²/kg,烧失量为1.8%,可充分发挥其微填充效应与二次水化反应活性。化学成分详见表2。

石英砂采用三段级配方式,粒径范围为[0.2, 0.4)、[0.4, 0.8)、[0.8, 1.2] mm,按1:1:1质量比例混合使用,细度模数为2.3,级配合理,有利于提高浆体的致密性与力学性能。钢纤维选用铜涂层短切直线型钢纤维,长度为13 mm,直径为0.2 mm,抗拉强度不低于2 500 MPa,体积掺量统一为2%,用于提升UHPFRC的抗裂性能与韧性水平。

表2 水泥和粉煤灰主要化学成分

Table 2 Main chemical properties of cement and fly ash

	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	MgO	SO ₃	K ₂ O	Na ₂ O	TiO ₂	烧失量
水泥	20.3	5.4	3.2	62.5	2.1	2.8	—	0.57	—	2.5
粉煤灰	52.6	25.3	6.8	4.2	1.6	0.9	1.2	0.5	1.1	1.8

1.2 试验设计

采用单因素变量法,系统探讨粉煤灰掺量变化对超高性能纤维增强混凝土(UHPFRC)力学性能与耐久性能的耦合影响规律。试验中设置粉煤灰掺量为10%、20%、30%、40%、50%共5个水平变量,其他材料组分与配比参数保持一致,以排除多因素干扰,确保掺量变化对性能的主导效应得以准确识别,不同粉煤灰掺量下UHPFRC配合比见表3。

表3 不同粉煤灰掺量下UHPFRC配合比

Table 3 Mix proportions of UHPFRC with different fly ash contents

粉煤灰 掺量/%	水泥	粉煤灰	石英砂	钢纤维	水	减水剂
10	783	87	1 050	156	200	26
20	696	174	1 050	156	200	26
30	609	261	1 050	156	200	26
40	522	348	1 050	156	200	26
50	435	435	1 050	156	200	26

试验重点从抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度三项力学指标,以及氯离子扩散系数、气体渗透系数、电通量、总孔隙率与水化产物中C-S-H凝

减水剂为聚羧酸系高性能减水剂,固含量为35%,最大减水率可达30%,具备良好的分散性与保塑性调控能力,有效改善混凝土的工作性能与结构均匀性。所用拌合水为普通自来水,符合JGJ 63—2006《混凝土用水标准》^[20]中的各项质量要求,确保材料性能的可控性与试验数据的有效性。

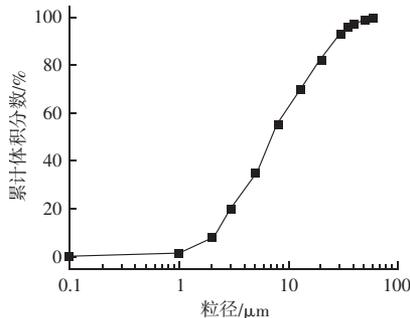


图1 粉煤灰粒径分布曲线

Fig. 1 Particle size distribution curve of fly ash

胶含量等五项耐久与微观指标开展性能评估。通过宏观与微观结合的方式,全面揭示粉煤灰替代对UHPFRC力学行为与耐久性能的影响机制,并为其绿色高性能优化设计提供理论基础与试验支持。

1.3 试件制备与养护

根据配合比计算结果,各组UHPFRC样品按质量分数精确称量,随后选用行星式混合机进行分段混合,拌合顺序为先干拌30 s,再湿拌180 s,以确保钢纤维在基体中均匀分散。拌合物经流动性测试合格后,通过振动台振实后灌入模具,采用振平方式确保成型密实。

试件为150 mm × 150 mm × 150 mm立方体(用于抗压和劈裂抗拉强度测试)和100 mm × 100 mm × 400 mm棱柱体(用于抗折强度测试)。试件脱模后,置于标准养护室中(温度为20 ± 2 °C,相对湿度不低于95%)进行养护,养护龄期设为3、7、28 d。

1.4 试验与方法

力学性能测试参照 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》进行。抗压强度测试采用边长为 150 mm 的立方体试件，加载方式为恒速加载，加载速率控制在 0.5 MPa/s；劈裂抗拉强度采用相同尺寸立方体，在两对角线间施加轴向拉应力，计算强度；抗折强度测试则采用 100 mm × 100 mm × 400 mm 棱柱体，按三点弯曲加载方式进行，测定其破坏荷载并计算折断面模量。

耐久性能测试包含多项指标：氯离子扩散系数 (DRCM) 参照 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》^[21]，采用非稳态电迁移方法，通过预设电压作用下的氯离子渗透深度计算扩散系数；电通量测试根据 ASTM C1202 标准^[22]执行，施加 60 V 直流电压 6 h，记录通过电流随时间变化积分得出电通量，以表征离子通透性。

微观结构方面，总孔隙率通过压汞法 (MIP) 测定；C-S-H 凝胶含量则通过差热-热重联用分析 (TGA/DTA) 技术，在设定升温程序下获取样品失重曲线，从而估算主导水化产物的含量。这些指标共同构建了材料多尺度性能表征体系，为粉煤灰掺量对 UHPFRC 性能演化机制的探讨提供试验支撑。

2 力学性能分析

2.1 抗压强度

由图 2 可知，3、28 d 龄期的抗压强度均随粉煤灰掺量的增加呈现“先升后降”的变化规律，说明适量粉煤灰可显著提升混凝土强度性能，而超出临界掺量后则会产生不利影响。当粉煤灰掺量为 20% 时，28 d 抗压强度达到峰值 158.2 MPa，较空白组 (151.4 MPa) 提升约 4.5%；3 d 抗压强度亦在该掺量下达到最大值 96.9 MPa，较空白组提高 8.3%。这表明，在合理控制粉煤灰掺量的条件下，材料体系能够实现早期与后期强度的协同优化。

当粉煤灰掺量超过 30% 后，抗压强度出现显著下降：28 d 强度分别降至 155.3 (30%)、148.7 (40%) 及 139.6 MPa (50%)；3 d 强度则由 94.5 MPa 降至 88.1、79.8 MPa。造成这一趋势的主要原因在于，高掺量粉煤灰虽可在后期改善水化产物致密性，但其

活性较低且早期水化反应速率缓慢，削弱了水泥熟料有效占比，导致胶凝体系整体反应活性不足，形成“稀释效应”，从而抑制了强度发展。

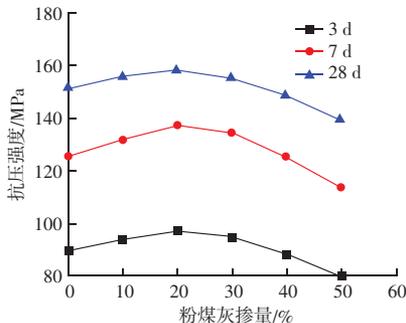


图 2 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的抗压强度

Fig. 2 Compressive strength of UHPFRC with different fly ash contents

根据 GB/T 31387—2025《超高性能混凝土》^[23]中对 UC100 等级混凝土的要求，立方体抗压设计强度 ≥ 100 MPa。由图 2 可知，试验中所有配比在 28 d 龄期的抗压强度均远高于规范限值，其中 20% 掺量组较规范门槛值高出约 58.2%，显示出良好的工程应用潜力，尤其适用于承载力要求高、耐久性控制严格的装配式结构或桥梁高应力区段构件。

2.2 抗折强度

由图 3 可知，UHPFRC 抗折强度随粉煤灰掺量的增加呈“先升后降”趋势，其中 20% 掺量组在 3、28 d 龄期均表现出最优性能，28 d 抗折强度达 21.7 MPa，较空白组提升近 11.9%。适量粉煤灰可优化浆体与钢纤维的界面结合，增强纤维桥联裂缝的能力，从而提升抗弯韧性；但高于 30% 后，因胶凝活性下降与黏结性能减弱，强度明显回落。总体而言，20% 掺量兼顾早期强度与后期韧性，具备良好的抗裂与结构适应性能。

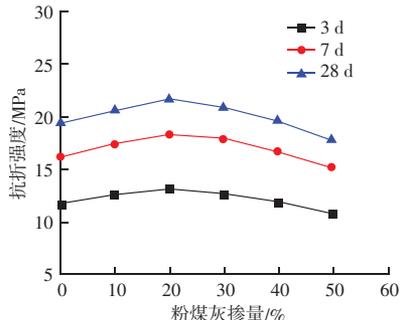


图 3 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的抗折强度

Fig. 3 Flexural strength of UHPFRC with different fly ash contents

材料科学

2.3 劈裂抗拉强度

由图 4 可知, 劈裂抗拉强度变化规律, 与抗压、抗折性能一致, 均在 20% 掺量处达到峰值 (28 d 为 12.3 MPa), 随后随掺量增加而下降, 表现出良好的相关性。适量掺加粉煤灰能提升界面黏结力与微结构致密性, 有助于增强裂缝扩展阻力; 而过量掺入则削弱浆体强度与纤维锚固性能, 降低抗裂能力。

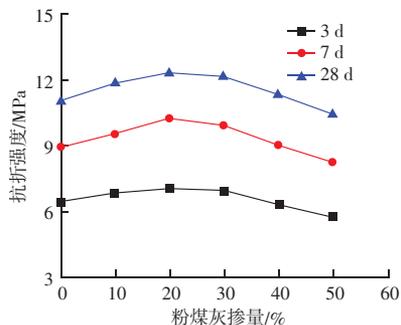


图 4 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的劈裂抗拉强度
Fig. 4 Splitting tensile strength of UHPFRC with different fly ash contents

3 耐久性能分析

3.1 氯离子扩散系数

由图 5 可知, 扩散系数总体呈现“先降后升”的趋势, 在 30% 掺量处达到最低值 $1.2 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 较未掺组降低 35.7%, 说明适量掺加粉煤灰能够显著提升材料的抗氯离子渗透能力。这主要得益于粉煤灰的二次水化反应生成更多 C-S-H 凝胶, 填充孔隙、细化孔径, 从而改善混凝土致密性。超过 30% 后, 扩散系数回升, 表明过量掺入反而削弱致密结构, 降低耐久性。根据 GB/T 50476—2019 《混凝土结构耐久性设计标准》^[24] 规定, 设计使用年限 100 年的扩散系数小于 $4.0 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$, 图中所有掺量组均满足要求, 尤其 30% 掺量表现出最优耐氯性能。

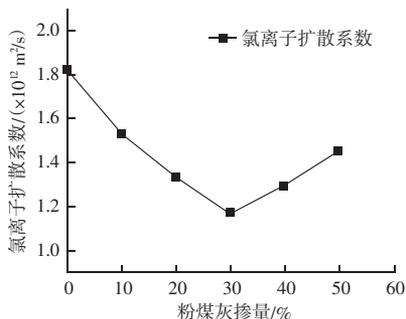


图 5 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的氯离子扩散系数
Fig. 5 Chloride ion diffusion coefficient of UHPFRC with different fly ash contents

3.2 气体渗透系数和孔隙致密化率 DCR

由图 6 可知, 气体渗透系数与 DCR 呈明显的反比关系, 30% 掺量时气体渗透系数最低, 仅为 $6.7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$, 对应的 DCR 达到 34.3%, 为所有组别中最优。这表明适量粉煤灰通过火山灰效应产生更多次生 C-S-H 凝胶, 填充毛细孔并细化孔径结构, 从而显著增强材料的气密性和致密性。掺量超过 30% 后, 渗透系数开始回升 (如 50% 掺量时达 $9.2 \times 10^{-17} \text{ m}^2$), DCR 降至 9.8%, 原因在于过高的粉煤灰比例稀释水泥基体活性成分, 导致微结构致密化不足。

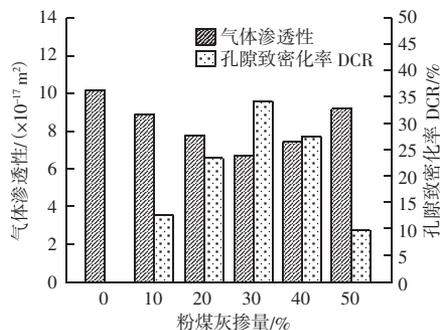


图 6 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的气体渗透系数与孔隙致密化率 (DCR)

Fig. 6 Gas permeability coefficient and pore densification rate (DCR) of UHPFRC with different fly ash contents

3.3 总孔隙率与 C-S-H 变化趋势

由图 7 可知, 粉煤灰掺量对孔隙结构的影响具有双重性: 一方面通过二次水化生成 C-S-H 凝胶, 填充孔隙并提升致密性; 另一方面掺量过高则稀释水泥活性组分, 削弱结构骨架强度。

具体来看, 在掺量为 30% 时 C-S-H 含量达到峰值 1.15, 相应的总孔隙率最小, 仅为 9.5%, 与图

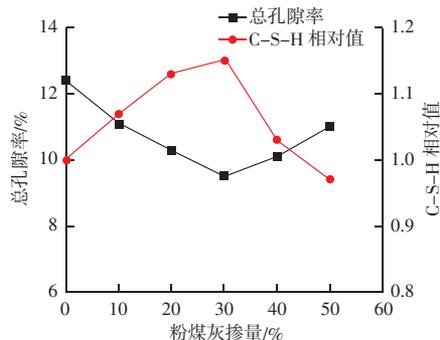


图 7 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 总孔隙率与 C-S-H 含量变化趋势

Fig. 7 Variation trends of total porosity and C-S-H content of UHPFRC with different fly ash contents

5~6 中扩散系数与渗透系数的最优点高度一致,验证了 C-S-H 生成量与宏观耐久性能之间的正相关关系。此阶段 UHPFRC 内部形成了连续且致密的凝胶骨架结构,不仅阻断氯离子渗透路径,也有效遏制气体通道扩展。然而,当掺量提升至 40% 及以上后,C-S-H 含量下降,总孔隙率反而回升,说明凝胶体系中活性不足,导致未充分水化的粉煤灰颗粒转化率下降,从而诱发毛细孔保留与孔隙互通。这一结构特征解释了高掺量组别在前述图表中渗透性与扩散性能退化的根本原因。

综上,C-S-H 含量与总孔隙率的协同变化构成了粉煤灰影响 UHPFRC 微结构和耐久性的核心机制,验证了“适量致密、超量疏松”的非线性结构演化规律,为今后掺量优化研究提供了可靠的微观依据。

3.4 电通量

由图 8 可知,电通量随掺量增加先降低后趋于回升,30% 掺量时最低为 690 C,相比空白组下降约 42.0%,说明该掺量下材料电阻率最高、结构最致密、渗透路径最短。电通量降低反映出内部孔隙网络中自由离子的迁移能力受限,体现了 UHPFRC 多性能协同提升的规律性。

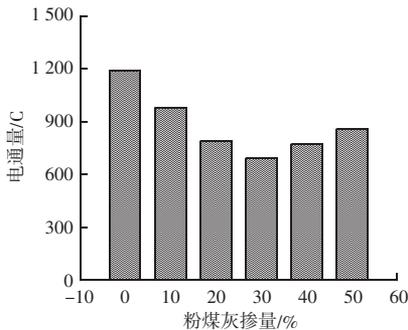


图 8 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 电通量变化

Fig. 8 Variation of electrical charge passed of UHPFRC with different fly ash contents

值得指出的是,电通量值小于 1 000 C 一般被认为属于“低渗透等级”,图中 20%~40% 掺量组均处于此范围。当掺量提升至 50% 时,电通量反升至 860 C,虽仍属低渗区间,但已显露致密性下降趋势,表明过量粉煤灰在未充分激发其活性时,反而可能形成弱连接带和离子迁移通道。

综上,电通量变化进一步印证了“适量优化、超量削弱”的非线性结构—性能关系,为粉煤灰掺量控制提供了可靠的电学与离子迁移性评价指标。

4 粉煤灰掺量对 UHPFRC 多指标综合性能的评价与最优掺量判定

4.1 多性能综合指数构建与分析

为全面评估粉煤灰掺量对超高性能纤维混凝土(UHPFRC)多项性能的协同影响,引入多性能综合指数(MPI),公式为:

$$MPI_j = \sum_{i=1}^6 \omega_i \cdot X_{ij} \quad (1)$$

式中: X_{ij} 为掺量组 j 在指标 i 的归一化得分; ω_i 为第 i 项性能权重。

为确保评价结果的工程适用性与科学合理性,基于结构承载与耐久协同性,确定各性能的权重,具体见表 4。

表 4 不同性能指标的权重分配

Table 4 Weight distribution of different performance indicators

指标名称	权重
抗压强度	0.20
抗折强度	0.15
劈裂抗拉强度	0.15
氯离子扩散抗性	0.15
气体渗透抗性	0.15
电通量抗性	0.20

由图 9 可见,20% 与 30% 掺量组形成最外包装络曲线,表现出力学与耐久性能的均衡发展。其中,20% 掺量组在 28 d 抗压强度、抗折强度、劈裂强度等力学指标中达最大值,尤其 28 d 抗压强度达 158.2 MPa,比 UC100 规范要求(100 MPa)高出 58.2%;30% 组虽在力学性能上略低于 20% 组,但在氯离子扩散等耐久指标上表现更优,适用于高腐蚀环境结构。50% 组性能图形明显内缩,抗压与劈裂强度分别较 20% 组下降 11.8% 与 15.4%,显示过高掺量稀释胶结体系并抑制水化反应,导致整体性能退化。

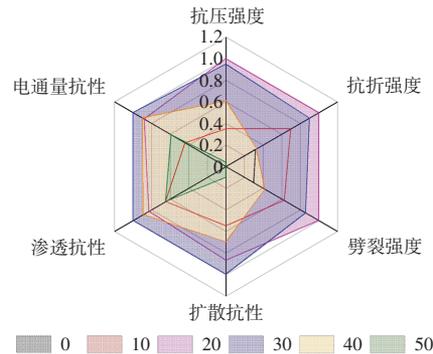


图 9 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 性能指标特征

Fig. 9 Characteristic features of performance indicators of UHPFRC with different fly ash contents

材料科学

4.2 MPI 与 BI 联合分布特征及最优掺量判定

为了进一步量化分析粉煤灰掺量影响情况,建立性能平衡指数 (BI):

$$BI_j = \frac{\min(X_{ij})}{\max(X_{ij})} \quad (2)$$

BI 值接近 1 说明各性能发展均衡, 低于 0.5 则表明存在显著短板性能。由图 10 可知, BI 与 MPI 在掺量变化趋势上高度一致, 均在 30% 掺量时达到峰值 (MPI = 0.98, BI = 0.95), 表明此时材料在综合性能和均衡性方面均最优。20% 组 BI 值为 0.74, 虽在力学性能上占优, 但部分耐久指标略有不足; 0 与 50% 组的 BI 不足 0.55, 性能均衡性差, 易受短板性能控制而发生失效。

对 MPI 与 BI 曲线进行联合正态分布拟合, 结果表明二者呈现典型的“钟形”对称趋势, 拟合度为 0.97, 掺量 - 性能关系具有明显的统计规律性。拟合模型预测的最优掺量区间为 25% ~ 32%, 其中 30% 为综合性能与均衡性兼顾的最佳点; 20% 组则适合承载力要求极高、腐蚀环境相对较轻的结构。该结果为 UHPFRC 配合比优化提供了可量化的判别依据。

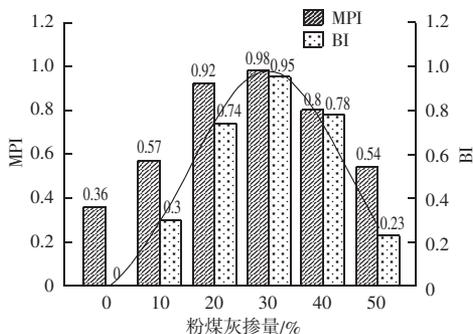


图 10 不同粉煤灰掺量下 UHPFRC 的 MPI 与 BI 指数对比
Fig. 10 Comparison of MPI and BI indices of UHPFRC with different fly ash contents

5 结论

研究通过系统试验与多指标综合分析, 揭示了粉煤灰掺量对超高性能纤维混凝土 (UHPFRC) 力学性能、耐久性能及微观结构的耦合影响规律。试验结果结合多性能综合指数 (MPI) 与性能平衡指数 (BI) 评价模型, 实现了从宏观性能到微观机理的定量关联, 并确定了不同工程需求下的最优掺量区间。主要结论如下:

(1) UHPFRC 的抗压、抗折及劈裂抗拉强度均

呈“先升后降”趋势, 20% 粉煤灰掺量时综合力学性能最佳, 28 d 抗压强度达 158.2 MPa, 较空白组提高 4.5%, 比 UC100 规范限值高出 58.2%; 28 d 抗折强度和劈裂强度分别提升 11.9%、14.0%。

(2) 氯离子扩散系数、气体渗透系数和电通量均在 30% 掺量时达到最优, 分别降至 $1.17 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 、 $6.7 \times 10^{-17} \text{ m}^2$ 和 690 C, 较空白组分别降低 35.7%、31.6% 和 42.0%, 均满足设计要求。

(3) 30% 掺量时 C - S - H 凝胶含量达到峰值 1.15, 总孔隙率降至 9.5%, 与宏观耐久性指标的最优点高度一致, 验证了“适量致密、超量疏松”的非线性结构演化规律。

(4) 性能综合指数 (MPI) 与性能平衡指数 (BI) 均在 30% 掺量时达到峰值 (MPI = 0.98, BI = 0.95), 拟合度 $R = 0.97$, 预测最优掺量区间为 25% ~ 32%, 其中 30% 适用于耐久性优先场景, 20% 适用于承载力优先场景。

参 考 文 献

- [1] SANYA O T, SHI J. Ultra - high - performance fiber reinforced concrete review [J]. Innovative Infrastructure Solutions, 2023, 8: 188.
- [2] 何蕾. 粉煤灰复合低热硅酸盐水泥混凝土的性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 57 - 61.
- [3] 李瞳, 王庆贺, 任庆新. 钢渣骨料/粉煤灰对 ECC 力学与介质传输性能的影响机理 [J]. 材料导报, 2025, 39 (19): 153 - 159.
- [4] SHAIKH F U, NISHIWAKI T, KWON S. Effect of fly ash on tensile properties of ultra - high performance fiber reinforced cementitious composites (UHP - FRCC) [J]. Journal of Sustainable Cement - Based Materials, 2018, 7 (6): 357 - 371.
- [5] BAHEDH M A, JAAFAR M S. Ultra high - performance concrete utilizing fly ash as cement replacement under autoclaving technique [J]. Case Studies in Construction Materials, 2018, 9: e00202.
- [6] 曹润倬, 周茗如, 周群, 等. 超细粉煤灰对超高性能混凝土流变性、力学性能及微观结构的影响 [J]. 材料导报, 2019, 33 (16): 2684 - 2689.
- [7] 孙婧, 王宏, 兰建伟, 等. 原状粉煤灰对超高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (1): 209 - 217.
- [8] 刘雪梅. 大掺量粉煤灰、硅灰高性能自密实混凝土力学及收缩性能影响分析 [J]. 福建建设科技, 2025 (5): 65 - 69.
- [9] 杨腾宇, 舒本安, 任彦飞, 等. 粉煤灰在超高性能混凝土中的应用技术研究 [J]. 新型建筑材料, 2022, 49 (9): 31 - 34.

(下转第 79 页)

的碳化性能有所减弱, 但可使其抗氯离子渗透率性能有所增强。当粉煤灰的掺量为 35% 时, 混凝土 28 d 的碳化深度为 4.2 mm, 仍能满足目标桥梁承台大体积混凝土施工的要求; 混凝土 28、56 d 时的电通量分别低至 345、257 C, 抗氯离子渗透能力较强。

参 考 文 献

[1] 蒲桦文. 桥梁工程中混凝土施工技术及其裂缝防治措施 [J]. 交通科技与管理, 2025, 6 (14): 100-102.

[2] 李月玲. 桥梁承台大体积混凝土裂缝控制技术 [J]. 交通世界, 2025 (26): 164-166.

[3] 谢金龙, 杜永红, 郭士熊, 等. 矿物掺合料对大体积混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土世界, 2025 (1): 37-40.

[4] 陈丰. 粉煤灰对大体积混凝土水化热速率影响的研究 [J]. 江西建材, 2023 (5): 55-57.

[5] 郭巧玲. C40 超大体积混凝土配合比设计优化及工程应用 [J]. 江西建材, 2023 (7): 185-187, 191.

[6] 江厚亮, 周天应, 尹长权. 粉煤灰-硅灰对大体积混凝土力学性能的影响 [J]. 四川建筑科学研究, 2025, 51 (2): 80-85.

[7] 刘林田, 林家兴, 杨彤薇, 等. 掺粉煤灰、石灰粉对大体积混凝土水化热性能影响分析 [J]. 建筑技术开发, 2025, 52 (3): 142-144.

[8] 陈祥花, 劳国威, 郑述芳, 等. 粉煤灰掺量对全再生粗骨料自密实混凝土工作性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (2): 531-539.

[9] 王森, 王苍丽. 粉煤灰掺量对引气混凝土抗硫酸盐侵蚀能力的影响 [J]. 化学与粘合, 2023, 45 (5): 469-472.

[10] 甄景新. 粉煤灰品质和掺量对公路工程纤维混凝土综合性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (2): 22-26.

[11] 高尚, 周昊. II 级粉煤灰在高性能、大体积混凝土中应用的实例探讨 [J]. 公路, 2019, 64 (9): 120-122.

[12] 方金宇, 肖侑坪. 单掺粉煤灰配合比在桥梁大体积混凝土承台中的应用 [J]. 四川建筑, 2022, 42 (6): 257-258.

[13] 任海. 桥梁大体积混凝土中掺加粉煤灰的应用 [J]. 黑龙江交通科技, 2017, 40 (1): 69-70.

[14] 张国勤. 大体积混凝土施工配合比中粉煤灰最优掺量 [J]. 建材与装饰, 2020 (20): 44, 46.

[15] 刘大为. 粉煤灰掺量对水工大体积混凝土性能的影响 [D]. 沈阳: 沈阳建筑大学, 2016.

(上接第 74 页)

[10] 胡萍. 粉煤灰对高性能混凝土抗裂性能的影响研究 [J]. 砖瓦, 2023 (12): 53-55.

[11] 陈广升. 碱激发粉煤灰-高炉矿渣粉固化铸造废砂用作路基填料研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (4): 117-122.

[12] 王金歌. 粉煤灰和矿渣复合掺料对高性能混凝土力学性能和耐久性的影响 [J]. 科学技术创新, 2024 (11): 185-188.

[13] 高鹏, 陈星, 王维, 等. 粉煤灰不同掺量对高性能混凝土耐久性影响研究 [J]. 粘接, 2024, 51 (2): 80-83.

[14] 刘丹, 杜应吉. 大掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 人民黄河, 2011, 33 (10): 88-90.

[15] 张兴龙. 高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (2): 49-53.

[16] 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.

[17] 刘超群, 朱泽文, 代力, 等. 粉煤灰基超高性能混凝土配合比优化研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2024, 38 (3): 11-15.

[18] 段玉东, 李明霞. 粉煤灰中不同 CaO 含量对水泥浆体安定性及抗裂性的影响研究 [J]. 水利水电技术 (中英文), 2025, 56 (增刊 1): 847-851.

[19] GB 175—2023 通用硅酸盐水泥 [S].

[20] JGJ 63—2006 混凝土用水标准 [S].

[21] GB/T 50082—2024 混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准 [S].

[22] American Society for Testing and Materials. Standard Test Method for Electrical Indication of Concrete's Ability to Resist Chloride Ion Penetration; ASTM C1202-12 [S]. West Conshohocken: ASTM International, 2012.

[23] GB/T 31387—2025 超高性能混凝土 [S].

[24] GB/T 50476—2019 混凝土结构耐久性设计标准 [S].