

粉煤灰钙含量、细度对高性能混凝土性能影响研究

Evaluation of the Performance of Fly Ash and Calcium Carbide Slag in Improving the Properties of Expansive Soil

尚 竞¹, 陶文彬²

(1. 江苏省人民医院基建处(南京医科大学第一附属医院), 南京 210029;
2. 东南大学 土木工程学院, 南京 214135)

摘要:为降低高性能混凝土(HPC)中硅酸盐水泥用量,采用不同钙含量、细度的粉煤灰替代40%水泥,研究了I级高钙粉煤灰(HFA)、低钙粉煤灰(LFA)和II级粉煤灰(II FA)对HPC的抗压强度、氯离子渗透系数、吸水率、累计水化放热量的影响规律,并通过XRD分析了氢氧化钙残留量。结果表明:采用HFA或LFA替代40%水泥可制备HPC,90 d抗压强度较基准组分别提高8.6%和13.8%,HFA利于早期强度发展,LFA长期强度更高;掺粉煤灰HPC的提高抗氯离子渗透性能、降低吸水率,细度影响比氧化钙含量更为显著;掺粉煤灰可显著降低水化放热量,LFA较HFA放热量更低,细度仅影响早期放热速率;LFA中无定型硅铝酸玻璃体含量高于HFA,可充分消耗水泥水化氢氧化钙形成C-(A)-S-H凝胶,氢氧化钙残留量最低。研究成果可为不同类型粉煤灰替代水泥提供依据。

关键词:粉煤灰; 氧化钙; 高性能混凝土; 抗压强度; 氯离子渗透系数; 水化放热

中图分类号: TU528 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-8249(2025)06-0001-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2025.06.001

SHANG Jing¹, TAO Wenbin²

(1. Jiangsu Province Hospital (The First Affiliated Hospital with Nanjing Medical University), Nanjing 210029, China; 2. School of Civil Engineering, Southeast University, Nanjing 214135, China)

Abstract: To reduce the consumption of Portland cement in high - performance concrete (HPC), 40% of the cement was replaced with fly ash of varying calcium content and fineness. The effects of Grade I high - calcium fly ash (HFA), low - calcium fly ash (LFA), and Class II fly ash (II FA) on the compressive strength, chloride ion permeability coefficient, water absorption rate, and cumulative hydration heat evolution of HPC. Residual calcium hydroxide content was analyzed via XRD. The results indicate that substituting 40% cement with HFA or LFA enables HPC production, with 90 - day compressive strength increasing by 8.6% and 13.8% respectively compared to the control group. HFA promotes early strength development, while LFA yields higher long - term strength. The addition of fly ash improved the chloride ion permeability resistance and reduced the water absorption rate of HPC, with fineness having a more significant impact than calcium oxide content. Fly ash significantly reduced the hydration heat release, with LFA exhibiting lower heat release than HFA, and fineness only affecting the early heat

基金项目:江苏省高等学校自然科学研究面上项目(23KJB560005)。

作者简介:尚 竞(1980—),男,硕士,高级工程师,研究方向:土木工程建筑。

通信作者:陶文彬(1987—),男,博士研究生,助理研究员,研究方向:基础设施的全寿命周期管控、智慧建造与运维。

收稿日期:2025-09-10

材料科学

release rate. LFA contained higher amorphous silicoaluminate glass phase than HFA, enabling complete consumption of cement hydration calcium hydroxide to form C-(A)-S-H gel, resulting in the lowest residual calcium hydroxide content. These findings provide a basis for substituting cement with different types of fly ash.

Key words: fly ash; calcium oxide; high-performance concrete; compressive strength; chloride ion permeability coefficient; hydration heat

0 引言

高性能混凝土 (HPC) 因其优异的力学性能、卓越耐久性、低渗透性、长服役寿命等特性，在现代混凝土建筑中发挥着重要作用^[1]。HPC 中传统硅酸盐水泥材料用量大，导致其生产成本高，水化放热量大，限制了其应用场景；另外，传统水泥生产过程伴随高能源消耗、高污染、高碳排放等问题，降低传统水泥使用量逐渐成为现代混凝土的发展趋势。粉煤灰具有潜在的火山灰活性和微集料填充效应，可改善混凝土的微观结构和长期性能^[2-3]，已成为制备绿色 HPC 的重要原材料。

近年来，众多学者围绕粉煤灰对 HPC 性能的影响开展了大量研究。何蕾^[4]通过对粉煤灰复合低热硅酸盐水泥制备大体积混凝土性能的试验研究，认为粉煤灰可改善水化放热，抑制结构开裂。卢俊平等^[5]利用分离式霍普金森压杆研究粉煤灰对高性能混凝土影响，结果表明掺入粉煤灰可提高结构密实度，增强抗变形能力。熊辉霞等^[6]研究了粉煤灰对高性能混凝土抗氯离子渗透性能的影响，掺入粉煤灰可显著降低氯离子渗透系数。对于粉煤灰对 HPC 性能的影响研究多集中粉煤灰掺量或多种矿物掺量协同作用，对于粉煤灰矿物成分对水泥水化作用机制研究尚未统一。根据粉煤灰中氧化钙含量可分为高钙粉煤灰、低钙粉煤灰^[7]，高钙粉煤灰游离氧化钙和活性矿物含量高，具有一定的自硬性^[8]；低钙粉煤灰早期火山灰效应低，以充填性能为主，但其含有的无定型硅铝玻璃体可与水化氢氧化钙反应生成 C-(A)-S-H 凝胶，贡献长期强度^[9]。胡勤等^[10]研究了单掺不同高钙或低钙粉煤灰对 MPC-UHPC 的影响，揭示了钙含量对水泥水化特征的影响机制，得到粉煤灰的最佳掺量。李建华等^[11]研究了低钙粉煤灰中玻璃体含量对水泥基材料性能影响，结果认为玻璃体可加速水化反应，优化微观结构。黄煌煌等^[12]采用 CO₂ 矿化高钙粉煤灰降低其游离氧化钙含

量，可促进水泥早期水化，提高 C-S-H 成核结晶量。董红娟等^[13]采用高、低钙粉煤灰制备复合胶凝材料，结果表明氧化钙含量显著影响材料力学性能，低钙粉煤灰以填充作用为主。周建伟等^[14]研究了三种粉煤灰细度对高强混凝土力学性能影响，得到单掺和复掺时力学性能变化规律，复掺效果优于单掺。成高立等^[15]研究石灰石粉-粉煤灰细度对水化动力学影响，提高细度可促进水化产物生成，加速放热速率。

综上，关于粉煤灰钙含量、细度对 HPC 强度、耐久性能、水化放热影响尚不清晰。因此，采用 I 级高钙粉煤灰、低钙粉煤灰和 II 级粉煤灰替代 40% 水泥，研究 HPC 的抗压强度、氯离子渗透性、吸水率、累计水化放热量的变化规律，为掺粉煤灰 HPC 配合比提供指导依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

水泥采用 P·O 52.5 级普通硅酸盐水泥，中值粒径为 18.65 μm。I 级粉煤灰，分为 F 类高钙粉煤灰 (HFA) 和 C 类低钙粉煤灰 (LFA)，HFA 中氧化钙含量为 28.3%，LFA 中氧化钙含量为 2.3%，HFA、LFA 的中值粒径分别为 10.41、11.06 μm；II 级粉煤灰 (II FA)，氧化钙含量为 11.6%，中值粒径为 31.47 μm。以上材料化学成分见表 1。细骨料采用河砂，细度模数 2.78，中砂，密度为 2 625 kg/m³；粗骨料采用石灰岩碎石，细度模数 5.57，密度为 2 630 kg/m³，粒径为 5~20 mm，连续级配。减水剂为聚羧酸醚基 (PCE) 高效减水剂，拌合水为自来水。

表 1 水泥、粉煤灰主要化学成分

Table 1 Main chemical components of fly ash and calcium carbide slag

材料名称	SiO ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃	CaO	SO ₃	MgO	Na ₂ O	/%
水泥	21.4	4.6	3.8	62.3	2.5	1.6	0.4	
HFA	26.1	13.5	22.4	28.2	4.6	1.8	0.3	
LFA	62.5	24.1	6.4	2.4	1.1	0.7	0.6	
II FA	42.2	20.8	16.2	12.6	1.9	3.3	0.9	

1.2 试验方案与试件制备

P00 为基准组试件, 胶凝材料全部采用水泥; H40、L40 为采用 HFA、LFA 分别替代 40% 水泥, H20F20、L20F20 为采用 II FA 和 HFA (或 LFA) 分别替代 20% 水泥。水胶比为 0.25, 减水剂掺量为胶凝材料质量的 2%。HPC 配合比见表 2。

表 2 HPC 配合比
Table 2 HPC mix ratio / (kg/m³)

编号	水泥	HFA	LFA	II FA	碎石	砂	减水剂
P00	560				1 033	622	11.2
H40	336	224			1 033	622	11.2
L40	336		224		1 033	622	11.2
H20F20	336	112		112	1 033	622	11.2
L20F20	336		112	112	1 033	622	11.2

试件制备: 首先, 根据 HPC 配合比将水泥、粉煤灰 (HFA、LFA、II FA) 加入强制式搅拌机, 低速搅拌 2 min, 使胶凝材料混合均匀; 然后, 将 50% 的水及全部减水剂加入搅拌机, 继续低速搅拌 3 min, 混合料初步成型; 最后, 加入剩余水, 高速搅拌 3 min, 形成均质混合料。将混合料倒入模具, 放置振动台振捣密实, 室温养护 24 h 后脱模, 移入标准养护室 (温度 (20 ± 1) °C、相对湿度 ≥ 95%) 养护至预定龄期。为进行胶凝材料水化氢氧化钙残留量分析, 同步制备不含碎石和砂的试件, 其他条件不变, 养护龄期为 90 d。

1.3 试验方法

HPC 抗压强度依据 GB/T 50081—2019《混凝土物理力学性能试验方法标准》测试, 试件尺寸为 100 mm × 100 mm × 100 mm, 养护龄期分别为 7、28、90 d。氯离子渗透和吸水率试验依据 GB/T 50082—2024《混凝土长期性能和耐久性能试验方法标准》测试, 采用快速氯离子迁移 (RCM) 试验评估养护龄期为 28、90 d 试件的抗氯离子渗透性能。

采用等温量热法测量 HPC 胶凝材料累计水化放热, 根据表 2 中胶凝材料质量比例称量 100 g 试样, 加入 40 mL 拌合水搅拌均匀, 之后采用 TAM-Air 等温量热仪进行 72 h 内水化累计水化放热量测量, 测试温度为 (25 ± 1) °C。

XRD 分析试验试件尺寸为 50 mm × 50 mm × 50 mm, 养护龄期 90 d, 将试件放置于 (110 ± 5) °C 烘干箱中烘干至恒重, 通过 TDM-20 射线衍射仪分析试件中水化氢氧化钙残留量。

2 结果与分析

2.1 抗压强度

由图 1 可以看出, 养护龄期为 7 d 时, 所有掺粉煤灰的 HPC 试件抗压强度均低于基准组 P00 试件, H40、L40、H20F20、L20F20 试件相比基本组分别降低了 6.3%、13.6%、15.7%、18.3%; 养护龄期为 28 d 时, H40、L40 试件抗压强度超过基准组 P00 分别为 8.1%、2.9%, 而掺入 II FA 的 H20F20、L20F20 试件较基准组分别降低了 2.7%、4.8%; 养护龄期为 90 d 时, 所有试件的抗压强度均高于基准组试件, H40、L40、H20F20、L20F20 试件较基准组 P00 分别提高了 8.6%、13.8%、2.3%、4.4%。

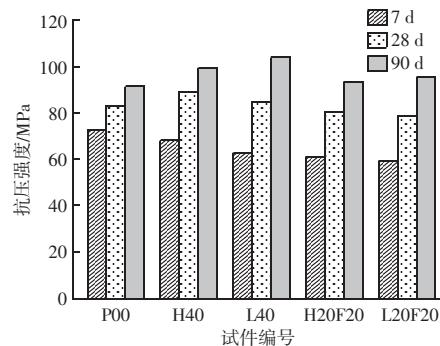


图 1 不同粉煤灰掺量 HPC 的抗压强度
Fig. 1 Compressive strength of HPC with different fly ash content

由上述分析可知, 掺粉煤灰试件 7 d 抗压强度增长缓慢, 这是由于高粉煤灰掺量时, 胶凝材料体系中的活性成分减小, 导致早期水化反应速率降低; 另一方面, 粉煤灰火山灰效应相较水泥弱, 需要更长时间水化反应才可与水化氢氧化钙反应生产 C-S-H 凝胶, 提高抗压强度, 故 28 d 时掺 HFA、LFA 的试件抗压强度高于基准组。掺高钙粉煤灰的 H40 试件, 28 d 抗压强度增幅大于掺低钙粉煤灰的 L40 试件, 且 7 d 抗压强度损失显著小于 L40 试件, 这说明高氧化钙含量的粉煤灰对 HPC 早期抗压强度发展更具有优势, 游离氧化钙可快速水化反应形成 Ca(OH)₂, 提高早期抗压强度, Ca(OH)₂ 可进一步与无定型硅、铝酸盐反应形成 C-S-H、C-A-S-H 凝胶, 填充毛细孔隙, 提高结构密实程度, 并提高界面过渡区的黏结性能, 进一步增强基体强度。

90 d 时, L40 试件抗压强度达到了 106.2 MPa, 高于 H40 试件 (101.5 MPa), 这种差异缘于 HFA 中

材料科学

SiO_2 、 Al_2O_3 总量少于 LFA，导致后期的水化反应缺少无定型硅、铝酸盐，无法与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 进一步结合转化形成 C-S-H、C-A-S-H 凝胶，导致抗压强度增幅减小。

HFA、LFA 的中值粒径分别为 10.41 、 $11.06 \mu\text{m}$ ，其细度均高于水泥，具有更好的填充效应；90 d 时 H40、L40 试件的抗压强度分别为 106.2 、 101.5 MPa ，具有较高的力学强度。而 II FA 中值粒径为 $31.47 \mu\text{m}$ ，细度小于水泥，颗粒填充效应减弱，H20F20、L20F20 试件抗压强度相比 H40、L40 试件均降低，这表明，II FA 中 SiO_2 含量虽较 HFA 提高，但由于其颗粒细度较大提高了材料的孔隙率，抗压强度同比 H40 有所减小；但由于 II FA 中硅、铝含量相比水泥高，掺量适当时 90 d 抗压强度仍高于基准组。

2.2 氯离子渗透系数

由图 2 可以看出，养护龄期为 28 d 时，掺入粉煤灰的各组试件氯离子渗透系数均低于基准组 P00 试件，H40 试件氯离子渗透系数为 $1.74 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，低于 P00 ($4.21 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$)、L40 ($2.32 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$) 试件；掺入 II FA 的 H20F20、L20F20 试件氯离子渗透系数分别为 2.77×10^{-12} 、 $2.93 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，较仅掺高钙或低钙粉煤灰的试件氯离子渗透系数有所增大。影响 HPC 氯离子扩散系数的三个关键因素为水胶比、胶凝材料类型以及细度，试验中水胶比固定不变，故胶凝材料的类型和细度为主要影响因素。氧化钙在火山灰反应中可迅速溶解形成氢氧化钙，进一步生成 C-S-H、C-A-S-H 凝胶不仅可填充结构孔隙，减少连通型毛细空隙，还可具有吸附氯离子作用，从而增强抗氯离子渗透性能，故掺 HFA

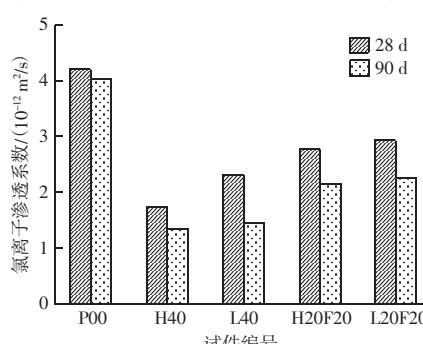


图 2 不同粉煤灰掺量 HPC 的氯离子渗透系数
Fig. 2 Chloride ion permeability coefficient of HPC with different fly ash content

的 H40 试件具有更低的氯离子渗透系数；而掺 LFA 的 L40 试件，因氧化钙含量低，导致火山灰效应减弱，水化反应生成的 C-S-H 凝胶相对减少，物理填充作用改善 HPC 基体孔隙结构占据主导地位，LFA 相比水泥具有更小的细度，故 L40 试件同样具有较好的抗氯离子渗透能力，与 H40 相比增大了 $0.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。

养护龄期至 90 d，掺粉煤灰的各组试件氯离子渗透系数较 28 d 显著降低，L40 试件经充分水化反应，基体密实程度进一步提高，氯离子渗透系数与 H40 的差距显著减小，两者仅相差 $0.09 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ 。掺入 II FA 的 H20F20、L20F20 试件氯离子渗透系数较 H40、L40 增大了约 1.5 倍，这是由于 II FA 的粒径约为 HFA、LFA 的 3 倍，材料细度的降低导致其充填效应大大减弱；与 HFA 相比，II FA 与水泥的火山灰反应可生成更多 C-S-H 凝胶，提高基体密实程度，但由于其颗粒粒径增大，仍导致 H20F20、L20F20 的氯离子渗透系数增大。大颗粒粉煤灰会降低其火山灰反应速率，未反应的粉煤灰颗粒需要更多凝胶包裹，使材料堆积密度下降，微填充效果大大减小，这也说明补充胶凝材料的细度对氯离子渗透性能的影响程度高于氧化钙含量，细粉煤灰能更有效降低 HPC 的孔隙率并细化孔径分布，改善水泥浆体与骨料界面过渡区的渗透性，从而形成高致密抗渗混凝土。

2.3 吸水率

由图 3 可以看出，HPC 的吸水率同样随掺入粉煤灰而减小，随养护龄期增长而降低。与基准组 P00 相比，H40、L40、H20F20、L20F20 试件 28 d 的吸水率分别降低 23.9%、22.3%、-4.2%、12.8%，90 d 的吸水率分别降低 30.5%、29.0%、19.7%、17.8%。HFA、LFA 具有更细小的颗粒粒径，对应的 H40、L40 试件吸水率最小；而 II FA 颗粒粒径已大于水泥，掺入 20% II FA 的 H20F20、L20F20 试件吸水率较 HFA、LFA 有所增大，这说明胶凝材料的颗粒细度与 HPC 的吸水率显著相关，更小颗粒粒径的填充效应使混凝土获得更高的密实度，可提高抗压强度，降低吸水率。

从氧化钙含量对吸水率影响来看，HFA 与 LFA 的氧化钙含量相差 25.8%；根据质量分数换算后，H40 与 L40 试件中氧化钙含量相差了 10.3%，但两

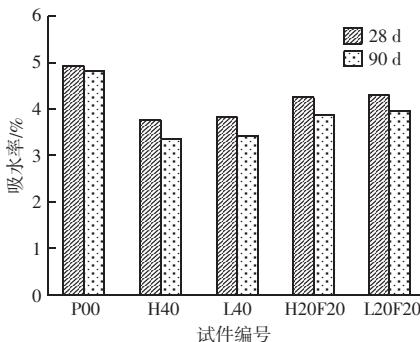


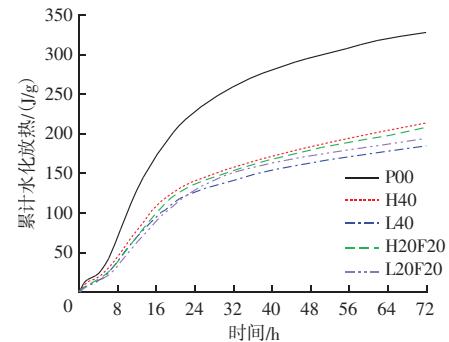
图3 不同粉煤灰掺量HPC的吸水率

Fig. 3 Water absorption of HPC with different fly ash content

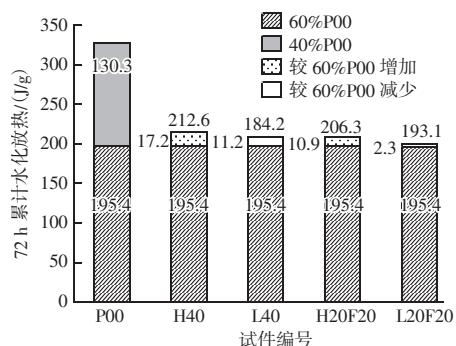
组试件 90 d 的吸水率仅相差 0.07%；同样，H20F20 与 L20F20 试件中氧化钙含量相差了 5.2%，90 d 的吸水率相差 0.09%；L40 试件相比 H20F20、L20F20 试件氧化钙含量更小，但其吸水率也更低。综上所述，粉煤灰颗粒细度对 HPC 的吸水率影响程度大于氧化钙含量。

2.4 水化热

由图 4 (a) 可以看出，胶凝材料的累计水化放热量变化可分为两个主要阶段：第一个为拌合后 24 h，该阶段由于 C_3A 、 C_3S 和 C_4AF 等化合物的水化反应，累计放热量迅速升高；第二个阶段为 24~72 h，该阶段累计放热曲线上升速度逐渐减缓。基准组 P00 试件 72 h 内累计放热量最大，为 325.7 J/g；掺入粉煤灰可显著降低胶凝材料累计放热量，H40、L40、H20F20、L20F20 试件 72 h 累计放热量分别为 212.6、184.2、206.3、193.1 J/g。掺入粉煤灰减少了胶凝材料中活性组分的含量，降低胶凝材料早期水化反应速率，从而使累计放热量减小；H40 试件 72 h 累计放热量比 L40 试件高 28.4 J/g，说明粉煤灰中的钙含量与水化放热显著相关，充足的 Ca^{2+} 促进早期水化反应进程，加速了水化热量释放。掺入 II FA 的 H20F20 试件 72 h 累计放热量较 H40 减小了 6.3 J/g，而 L20F20 试件 72 h 累计放热量较 L40 增加了 8.9 J/g，这进一步说明了材料中氧化钙含量越高水化放热量越大。从材料颗粒细度角度分析，掺入 II FA 降低了胶凝材料细度。从累计放热曲线来看，细度减小累计放热曲线斜率同比减小，说明放热量速率减慢；但随水化时间增长，累计放热曲线率变为同比增大，如 L20F20 较 L40，说明材料细度影响水化放热速率，但对累计放热量影响较小。



(a) 累计水化放热量随时间演变规律



(b) 72 h 累计水化放热量对比图

图4 不同粉煤灰掺量HPC的累计水化放热量

Fig. 4 Cumulative hydration heat release of HPC with different fly ash content

各组试件粉煤灰均替换水泥量为 40%，故取基准组 P00 试件 72 h 累计放热量的 60%，与掺粉煤灰的各组试件对比分析，如图 4 (b) 所示。可以看出，掺 HFA 的 H40、H20F20 试件累计放热量超过 P00 试件的 60%，而掺 LFA 的 L40、L20F20 试件累计放热量超过 P00 试件的 60%。由此说明，粉煤灰中氧化钙含量是影响水化放热的关键因素，与 HFA 相比，采用 LFA 替代水泥降低水泥的水化放热更为显著。H40 与 L40 试件中氧化钙含量相差 10.3%，72 h 累计放热量差 28.4 J/g，氧化钙含量每增加 1%，累计水化放热量增加 2.75 J/g；同理，根据 H20F20 与 L20F20 氧化钙含量和累计水化放热量差异，得出氧化钙含量每增加 1% 累计水化放热量增加 2.56 J/g，由此说明掺入 II FA 降低了材料细度，但对水化放热影响不显著。综上，采用粉煤灰替代水泥可降低 HPC 中水泥的水化放热量，粉煤灰辅助胶凝材料具有降低大体积混凝土或高水泥用量混凝土水化热的潜力；粉煤灰中氧化钙含量与累计水化放热量具有显著相关性。

材料科学

2.5 氢氧化钙残留量

采用 XRD 分析 28、90 d 龄期时不同粉煤灰掺量的 HPC 中氢氧化钙残留量，通过 HPC 中氢氧化钙残留量分析胶凝材料火山灰反应的进行程度，结果如图 5 所示。

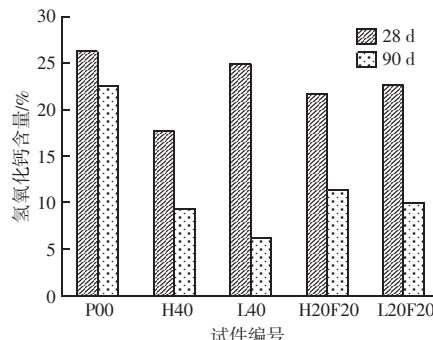


图 5 不同粉煤灰掺量的 HPC 中氢氧化钙含量
Fig. 5 Cumulative hydration heat release of HPC with different fly ash content

由图 5 可以看出，掺入粉煤灰后 HPC 试件中氢氧化钙残留量显著降低，至 90 d 龄期氢氧化钙含量降幅最为显著；从 28 d 至 90 d 龄期，P00、H40、L40、H20F20、L20F20 试件中氢氧化钙含量分别降低了 3.7%、8.5%、18.8%、10.3%、12.6%；90 d 时各试件中氢氧化钙残留量分别为 22.7%、9.4%、6.3%、11.5%、10.1%。可见，采用纯水泥的 P00 试件氢氧化钙残留量最高，掺入 40% LFA 的 L40 试件氢氧化钙含量降幅最为显著，90 d 时试件中氢氧化钙残留量最低；掺入 40% HFA 的 H40 试件氢氧化钙残留量次之；掺入 20% II FA 的试件氢氧化钙残留量较 H40、L40 略有增长。H40 试件氧化钙含量高于 L40 试件，但其 SiO_2 、 Al_2O_3 含量低于 L40 试件，L40 试件较 H40 试件中无定型硅铝玻璃体含量更高，可消耗更多氢氧化钙转变成 C-(A)-S-H 凝胶，由此降低氢氧化钙含量，故采用低钙粉煤灰的 HPC 可获得更低氢氧化钙残留、更高的硅铝酸盐凝胶生成量，这种现象与 $\text{SiO}_2 + \text{Al}_2\text{O}_3$ 对氢氧化钙的消耗机制密切相关。此外，II FA 的颗粒细度明显低于 HFA、LFA，其火山灰反应活性相比变弱，故掺 II FA 试件氢氧化钙残留量均有所提高。

3 结论

为探究粉煤灰材料的钙含量、颗粒细度对 HPC 性能的影响，采用 I 级高钙粉煤灰、低钙粉煤灰和 II 级粉煤灰部分替代水泥，研究对 HPC 的抗压强度、

抗氯离子渗透性能、吸水率、累计水化放热的影响规律，并通过 XRD 分析了试件中氢氧化钙残留量，得出以下主要结论：

(1) 采用 HFA 和 LFA 可用于部分替代水泥制备 HPC，掺量 40% HFA 或 LFA 的 HPC，90 d 抗压强度分别提高 8.6%、13.8%；HFA 较 LFA 更利于早期(7、28 d) 强度发展，LFA 长期抗压强度更高；粉煤灰细度对抗压强度影响较为显著，掺 20% II FA 的 H20F20 试件较 H40 提高了无定型硅铝酸盐含量，90 d 抗压强度降低但高于基准组。

(2) 掺 HFA 或 LFA 的 HPC 较基准组试件抗氯离子渗透性能显著提高，且随养护龄期增长抗氯离子渗透性能增强；28 d 龄期时，掺 HFA 的试件氯离子渗透性系数更低；90 d 龄期时，掺 HFA 或 LFA 的 HPC 的氯离子渗透性能以及吸水率基本相近；粉煤灰颗粒细度相较钙含量对氯离子渗透系数以及吸水率影响更为显著，掺 20% II FA 的 HPC 细度减小，氯离子渗透系数增大约 1.5 倍。

(3) 采用粉煤灰部分替代水泥可显著降低胶凝材料的累计水化放热量，粉煤灰中氧化钙含量对累计水化放热量影响显著；粉煤灰细度仅影响放热速率，对累计放热量影响不显著；LFA 相较 HFA 降低水泥的累计水化放热量更为显著，72 h 累计水化放热量降低 43.4%。

(4) 掺粉煤灰可显著降低 HPC 中氢氧化钙残留量，掺 LFA 较 HFA 效果更显著，且随养护龄期增长氢氧化钙残留量降幅最大；粉煤灰细度减小会降低火山灰反应活性，氢氧化钙残留量略有提高。

参 考 文 献

- [1] 刘非凡. 国内超高性能混凝土产品的基本性能分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2022, 36 (5): 45–51.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 卢俊平, 王亚, 刘磊, 等. 粉煤灰高性能混凝土动态压缩性能试验研究 [J]. 混凝土, 2024 (8): 55–62.

(下转第 59 页)

固废基胶凝材料砂浆的配合比设计研究

Concrete Preparation and Performance Study of Solid Waste – based Cementitious Materials and Multi – component Cementitious Mortars

李 研，宋少民

(北京建筑大学，未来城市设计高精尖创新中心，北京 100044)

摘要：为了砂浆产业的低碳和可持续发展，文中研究固废基胶凝材料和用粉煤灰替代部分固废基胶凝材料的二元胶凝组分砂浆配合比设计的规律和关键参数，通过控制胶凝材料和水的用量研究 M10~M50 不同强度等级的砂浆性能。结果表明：胶凝材料和水的用量都对砂浆稠度和抗压强度有影响，胶凝材料对砂浆的影响比水的影响更为显著；胶凝材料用量不能过低，用水量不得过高，否则会出现明显的泌水。粉煤灰替代率对砂浆稠度和抗压强度影响显著，替代率增加，稠度增加，抗压强度有所下降，对砂浆早期强度有显著负面影响；当胶凝材料用量较低，粉煤灰替代率达 50% 时，早期强度过低，不具有技术可行性。总体上看，基于固废基胶凝材料的二元胶凝组分制备砂浆技术经济性更好。研究结果可为明确固废基胶凝材料砂浆配合比设计的技术要点，为固废基胶凝材料砂浆后期工程应用提供数据支撑。

关键词：砂浆；固废基胶凝材料；二元胶凝组分；配合比；稠度；抗压强度

中图分类号：TU528 **文献标志码：**A **文章编号：**1005–8249 (2025) 06–0007–06

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005–8249.2025.06.002

LI Shao, SONG Shaomin

(Beijing University of Civil Engineering and Architecture, High – End Innovation Center for Future Urban Design, Beijing 100044, China)

Abstract: To promote low – carbon and sustainable development in the mortar industry, this study investigates the design principles and key parameters for binary cementitious mortar mix proportions using solid waste – based cementitious materials and a dual – component cementitious system where fly ash replaces solid waste – based cementitious materials. Mortar with strength grades ranging from M10 to M50 was prepared and tested by controlling cementitious material dosage and water content. The results showed that both cementitious material dosage and water content influence mortar consistency and compressive strength, with cementitious material dosage exerting a more significant effect than water content. During mortar preparation, cementitious material dosage must not be excessively low, and water content must not be excessively high, otherwise pronounced bleeding will occur. The fly ash replacement rate significantly affects mortar consistency and compressive strength. Increasing replacement rate enhances consistency but reduces compressive strength, exerting a pronounced negative effect on early – stage strength. When cementitious material content is low and fly ash replacement reaches 50%, early strength becomes excessively low,

- [3] 周冲, 黄玮, 王兆军, 等. 黄河冲积平原区软土地基快速液压夯加固参数试验研究 [J]. 铁道建筑, 2025, 65 (1): 142–146.
- [4] 崔宇寒, 顾东明, 余海兵, 等. 降雨开挖诱发顺层岩质滑坡稳定性与堆积特征 [J]. 人民长江, 2024, 55 (9): 156–164.
- [5] 刘畅, 季凡凡, 郑刚, 等. 降雨对软土基坑支护结构影响实测及机理研究 [J]. 岩土工程学报, 2020, 42 (3): 447–456.
- [6] 姚亚辉, 薛晓辉, 张玉洁, 等. 开挖条件下土质边坡稳定性影响试验研究 [J]. 科技通报, 2015, 31 (9): 103–106.
- [7] 安海堂, 余会明, 张卫强. 土质边坡开挖试验及其数值模拟研究 [J]. 人民长江, 2016, 47 (19): 48–52, 82.
- [8] 马文成. 不同降雨条件下高填方边坡稳定性的数值模拟分析 [J]. 价值工程, 2025, 44 (5): 19–21.
- [9] 涂美义, 袁世宇, 陈江军, 等. 不同降雨工况下的矿山修复工程

- [10] 吴能. 不同降雨持续时间条件下土质边坡的稳定性分析 [J]. 水利科技与经济, 2024, 30 (12): 30–33.
- [11] 蔡汉杰. 公路工程高边坡开挖稳定性研究 [J]. 工程技术研究, 2024, 9 (21): 126–128.
- [12] 张军文. 软土边坡开挖变形特征与临界破坏范围数值模拟 [J]. 能源与节能, 2023 (7): 156–160.
- [13] 魏芸, 赵娟. 软土边坡稳定分析时土体强度参数的取法分析 [J]. 港工技术, 2017, 54 (5): 33–34.
- [14] 张雷. 软土边坡支护技术及其应用分析 [J]. 四川水泥, 2024 (9): 109–111.
- [15] 王梓轩. 强风化砾岩区取土场开挖前后边坡稳定性研究 [J]. 交通节能与环保, 2025, 21 (1): 160–163.

(上接第 6 页)

- [6] 熊辉霞, 张谦, 李岩, 等. 粉煤灰和硅灰掺料对高性能混凝土氯离子扩散影响 [J]. 混凝土, 2021 (7): 95–97.
- [7] 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] LUAN C Q, WU Z M, HAN F N, et al. The effects of calcium content of fly ash on hydration and microstructure of ultra - high performance concrete [J]. Journal of Cleaner Production, 2023, 415: 137735.
- [9] WANG Z W, GUO M L, LIU C L, et al. Chloride binding behavior and pore structure characteristics of low - calcium high - strength cement pastes [J]. Materials, 2024, 17 (13): 3129.
- [10] 胡勤, 李猛, 刘京, 等. 粉煤灰钙含量对 MPC-UHPC 水化及力学性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2025 (7): 95–102.

- [11] 李建华, 邓强, 赵中军, 等. 低钙粉煤灰玻璃体含量对强度发展的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (6): 2201–2209.
- [12] 黄煌煌, 陈铁锋, 高小建. CO₂矿化改性高钙粉煤灰对水泥砂浆力学性能和微结构的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2024, 43 (5): 1889–1896.
- [13] 董红娟, 熊青青, 王晨阳, 等. 高低钙粉煤灰协同钙基固废制备复合胶凝材料性能研究 [J]. 内蒙古科技大学学报, 2024, 43 (4): 326–330, 352.
- [14] 周建伟, 余保英, 程宝军. 不同细度粉煤灰复掺对高强混凝土力学性能的影响 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (3): 75–78.
- [15] 成高立, 李晓光, 王攀奇, 等. 石灰石粉-粉煤灰细度变化对水泥基胶凝材料体系水化动力学的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (7): 2337–2343.

(上接第 22 页)

- [4] 王蓓, 王彦. 矿物掺合料在活性粉末混凝土 (RPC) 中应用研究 [J]. 混凝土, 2024 (10): 167–170, 177.
- [5] 何翔, 乔险涛, 喻鹏, 等. 工业固废粉末对自密实高性能混凝土性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (11): 4017–4026.
- [6] 汤建华, 贾飞, 潘慧敏, 等. 矿物掺合料粒度分布对喷射混凝土抗硫酸盐侵蚀性能的影响 [J]. 混凝土, 2022 (6): 61–66.
- [7] 张平, 陈旭, 李绍纯, 等. 绿色低碳型高性能混凝土的制备及其性能研究 [J]. 新型建筑材料, 2020, 47 (9): 155–158.
- [8] 马召林, 明阳, 李文俊, 等. 多元固废协同制备超细高活性矿物掺合料及性能研究 [J]. 硅酸盐通报, 2025, 44 (5): 1824–1833.
- [9] 张雪丽, 侯付闯. 多元复合超细掺合料制备混凝土内部结构研究 [J]. 混凝土, 2023 (10): 116–119.

- [10] 宋佳佳, 杜红秀. CMK 复合微粉对混凝土耐蚀性及阻抗谱特性的影响 [J]. 太原理工大学学报, 2023, 54 (6): 1127–1133.
- [11] 蒋勇, 廖斌, 王小均, 等. 钢渣复合矿粉对不同养护条件下混凝土性能的影响 [J]. 金属矿山, 2024 (5): 311–317.
- [12] 陈平, 夏海洋, 胡成, 等. 多元固废基复合胶凝材料的硬化特征与抗蚀性能研究 [J]. 混凝土, 2025 (3): 24–28.
- [13] 卫煜, 陈平, 明阳, 等. 复合超细高活性矿物掺合料对 UHPC 水化和收缩性能的影响 [J]. 硅酸盐通报, 2022, 41 (2): 461–468.
- [14] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰-矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66–69, 79.
- [15] 刘琴梅. 矿物掺合料对 C55 高性能混凝土性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (3): 97–100.