

高性能水泥混凝土中矿物掺合料的协同作用分析

张磊^{1,2} 王婷¹ 陈浩龙¹

1 陕西铁路工程职业技术学院, 陕西渭南, 714099;

2 陕西省高性能混凝土工程实验室, 陕西渭南, 714099;

摘要: 建筑工程对混凝土性能的要求日趋严苛, 高性能水泥混凝土(HPC)以其优异的强度、耐久性及工作性, 已成为重大工程建设的核心材料。矿物掺合料是HPC的关键组分, 单一掺合料难以满足多维度性能需求, 而不同掺合料的协同作用可显著优化混凝土微观结构与宏观综合性能。本文结合国内外研究进展, 系统分析粉煤灰、矿渣粉、硅灰、偏高岭土等常用掺合料的基本特性, 深入阐释其复合协同机理(含填充、火山灰、界面优化及微集料效应), 并探讨掺量比例、养护制度、水胶比等关键因素对协同效果的调控作用。文末总结其工程应用现存问题并展望未来研究方向, 以期为HPC配合比优化设计及工程实践提供理论支撑。

关键词: 高性能水泥混凝土; 矿物掺合料; 协同作用

DOI: 10.64216/3080-1508.25.11.078

引言

在我国基础设施建设高质量发展背景下, 混凝土性能决定工程结构的安全性、耐久性与经济性。高性能水泥混凝土(HPC)是新型高端材料, 应用广泛。但传统高性能混凝土以水泥为主要胶凝材料, 消耗资源能源、排放二氧化碳。在此背景下, 矿物掺合料资源化利用是有效路径, 其源于工业废渣或天然矿物, 掺入混凝土可替代部分水泥、降低造价与碳排放、优化微观结构、提升宏观性能。不过, 单一矿物掺合料改性效果有局限性, 如粉煤灰早期强度贡献不足、硅灰使混凝土拌合物流动性衰减、矿渣粉在低水胶比条件下填充效能受限。相比之下, 复合使用矿物掺合料可利用协同效应克服单一掺合料缺陷, 实现混凝土性能优化。目前, 矿物掺合料协同作用研究有进展, 但系统研究仍待深化。本文旨在综合分析常用矿物掺合料, 揭示协同作用机制, 探讨影响协同效果的调控因素, 为高性能水泥混凝土配合比设计与工程实践提供依据。

1 高性能水泥混凝土中常用矿物掺合料的基本特性

高性能水泥混凝土中常用的矿物掺合料主要包括粉煤灰、矿渣粉、硅灰、偏高岭土等, 不同掺合料的化学组成、物理性质存在显著差异, 这些差异直接决定其在混凝土中的作用机制与效果。

1.1 粉煤灰

粉煤灰是燃煤电厂煤粉燃烧后收集的工业废渣, 主

要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 、 Fe_2O_3 、 CaO 等, 属于典型的火山灰质材料。根据国家标准《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》(GB/T 1596-2017), 粉煤灰可分为 F 类(由无烟煤或烟煤燃烧产生)和 C 类(由褐煤或次烟煤燃烧产生)。其中, F 类粉煤灰的 $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{Fe}_2\text{O}_3$ 含量 $\geq 70\%$, CaO 含量 $\leq 10\%$; C 类粉煤灰的 CaO 含量 $\geq 10\%$, 具备一定自硬性。

粉煤灰的物理性质具有鲜明特点: 颗粒多为球形玻璃体, 比表面积通常为 $200\text{--}400 \text{ m}^2/\text{kg}$, 堆积密度较小。在混凝土中, 球形颗粒可发挥“滚珠效应”, 有效改善拌合物的流动性; 同时, 由于粉煤灰火山灰反应活性较低, 早期主要发挥物理填充作用, 后期则与水泥水化生成的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成水化硅酸钙(C-S-H)凝胶, 进而提升混凝土的强度与耐久性。但粉煤灰存在早期强度贡献不足的缺陷, 且在低温环境下反应速率进一步减缓, 这在一定程度上限制了其在早期强度要求较高的工程中的应用。

1.2 矿渣粉

矿渣粉是由高炉矿渣经水淬急冷后, 再经超细研磨制成的粉末材料, 主要化学成分为 CaO 、 SiO_2 、 Al_2O_3 、 MgO 等, 属于潜在水硬性材料。矿渣粉的活性主要取决于其玻璃体含量与比表面积, 玻璃体含量越高、比表面积越大, 活性越强。根据国家标准《用于水泥和混凝土中的粒化高炉矿渣粉》(GB/T 18046-2017), 矿渣粉按活性指数可分为 S75、S95、S105 三个等级。

矿渣粉颗粒形状不规则, 比表面积一般为 $400\text{--}600$

m^2/kg , 堆积密度较大。在混凝土中, 矿渣粉可与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生反应, 生成 C-S-H 凝胶和水化铝酸钙 (C-A-H) 凝胶, 显著提升混凝土的后期强度; 同时, 矿渣粉的填充作用可优化混凝土的孔隙结构, 降低孔隙率, 增强混凝土的抗渗性与抗冻性。但矿渣粉早期水化速率较慢, 单一使用时易导致混凝土早期强度偏低, 且在高掺量条件下可能出现收缩开裂问题。

1.3 硅灰

硅灰又称微硅粉, 是铁合金厂冶炼硅铁或硅锰合金过程中产生的工业烟尘, 经收集、提纯制成的超细粉末材料, 主要化学成分为 SiO_2 (含量 $\geq 90\%$), 属于高活性火山灰质材料。硅灰颗粒尺寸极小, 平均粒径仅为 0.1-0.3 μm , 比表面积高达 15000-20000 m^2/kg , 具备极高的化学活性。

在混凝土中, 硅灰的高活性使其能快速与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成大量 C-S-H 凝胶; 同时, 硅灰的超细颗粒可填充至水泥水化产物的孔隙中, 显著优化混凝土微观结构, 提升其强度、硬度与耐磨性。但硅灰比表面积过大导致需水量较高, 单一使用时易造成混凝土拌合物流动性显著下降, 甚至出现离析、泌水问题, 且其成本偏高, 限制了大规模工程应用。

1.4 偏高岭土

偏高岭土是由高岭土在 500~800°C 温度区间煅烧、脱去结晶水后制得的无定形粉末材料, 主要化学成分为 SiO_2 和 Al_2O_3 , 属于高活性火山灰质材料。偏高岭土的比表面积一般为 800-1200 m^2/kg , 化学活性仅次于硅灰。

在混凝土中, 偏高岭土可与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生火山灰反应, 生成 C-S-H 凝胶和水化铝酸钙凝胶; 同时, 其还能与水泥中的水化铝酸钙反应生成单硫型水化硫铝酸钙 (AFm) 或三硫型水化硫铝酸钙 (AFt), 有效抑制混凝土的碱-骨料反应。此外, 偏高岭土的填充作用可优化混凝土孔隙结构, 提升其抗渗性与耐久性。但偏高岭土需水量较高, 单一使用时会增加混凝土用水量, 且价格相对昂贵, 制约了其广泛应用。

2 矿物掺合料的协同作用机理

矿物掺合料协同作用特指两种及以上掺合料复合使用时, 其对混凝土性能的改善效应呈现超叠加特性, 该特性源于填充效应、火山灰效应、界面优化效应及微集料效应的耦合作用, 各效应间的协同机制可概括如下:

2.1 填充效应协同

填充效应协同核心在于利用不同掺合料的颗粒级配差异实现多级梯度填充, 通过大粒径掺合料填充水泥颗粒间隙、中细粒径掺合料填充大颗粒间隙、超细粒径掺合料填充水化产物微孔的层级填充模式, 显著降低混凝土内部孔隙率, 细化孔隙结构。该协同效应可同步优化混凝土拌合物工作性, 抑制泌水离析现象。

研究表明, 复合掺合料的多级填充效能显著优于单一掺合料, 可使混凝土孔隙率降低 30%以上, 为混凝土致密性提升奠定结构基础。

2.2 火山灰效应协同

火山灰效应协同体现为掺合料间的活性互补与反应时序接力: 高活性掺合料可加速早期火山灰反应, 保障混凝土早期强度发展; 低活性掺合料则通过后期持续反应, 实现强度的长期增长。不同掺合料的反应产物可相互交织, 优化水化产物体系结构。

同时, 火山灰反应用于水泥水化生成 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 的消耗, 可降低混凝土内部碱度, 有效抑制碱-骨料反应, 提升混凝土耐久性能。

2.3 界面优化效应协同

界面过渡区 (ITZ) 作为混凝土的天然薄弱环节, 其结构优化依赖于掺合料的协同作用: 球形颗粒掺合料可提升拌合物匀质性, 保障浆体对骨料的均匀包裹; 高活性掺合料可在界面区快速生成水化产物, 填充界面孔隙; 中细粒径掺合料则进一步降低界面区孔隙率, 强化浆体-骨料粘结性能。

协同作用可使界面过渡区厚度减少 20%-30%、孔隙率降低 40%以上, 显著提升界面强度, 减少混凝土内部应力集中现象。

2.4 微集料效应协同

微集料效应协同基于不同掺合料颗粒形态与硬度的互补性, 通过高硬度颗粒构建骨架支撑体系、球形颗粒优化颗粒级配流动性、超细颗粒填充骨架间隙的协同模式, 提升混凝土结构稳定性。

该效应可显著提升混凝土强度与弹性模量, 降低干燥收缩变形, 典型复合掺合料可使混凝土抗压强度提升 20%-30%、弹性模量提高 15%-25%。

3 影响矿物掺合料协同作用效果的关键因素

矿物掺合料协同作用效果受多重因素调控, 核心影

响因子包括掺合料掺量比例、养护制度、水胶比及水泥品种。精准控制上述因素，是充分发挥协同效应、保障混凝土性能稳定性的重要前提。

3.1 掺合料掺量比例

不同掺合料的活性特性与作用机制存在差异，其复合使用时的掺量比例对协同效应具有决定性影响。掺量比例失衡易导致协同效应衰减甚至产生负效应，需结合混凝土性能目标与掺合料特性精准匹配。

研究表明，粉煤灰-矿渣粉-硅灰复合体系的最优掺量比例（以胶凝材料总量计）为 20%~30%：20%~30%：5%~10%，矿渣粉-偏高岭土复合体系为 30%~40%：5%~15%，此比例下混凝土工作性、强度及耐久性可实现最优平衡。

3.2 养护制度

养护制度通过调控矿物掺合料的水化反应进程影响协同效果，核心调控参数包括养护温度、湿度及时间。火山灰反应需依托适宜的温湿度环境，温湿度不足将显著弱化协同效应。

标准常温养护（ $20\pm2^{\circ}\text{C}$ ）为协同效应发挥的最优化条件；高温养护可加速早期反应但易劣化后期强度，低温养护则显著抑制早期强度发展。持续湿润养护是保障反应充分进行的必要条件，养护时间建议不低于 28 天以挖掘后期反应潜力。

3.3 水胶比

水胶比是调控混凝土工作性与微观结构的核心参数，直接影响矿物掺合料协同效应的发挥。水胶比过高易加剧拌合物离析泌水，增大内部孔隙率；过低则会限制火山灰反应，恶化施工性能。

高性能混凝土中复合矿物掺合料的最优水胶比范围为 0.28~0.35，此区间内可实现拌合物工作性与掺合料反应效能的平衡，确保协同效应最优。

3.4 水泥品种

水泥品种通过影响水化速率与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成量调控协同效果。硅酸盐水泥因 C_3S 、 C_3A 含量高，水化速率快，可快速生成足量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，与复合掺合料协同效果最优；矿渣水泥与火山灰质水泥因自身组分特性，与其他掺合料复合时协同效应易受抑制。

工程实践中需结合掺合料特性精准匹配水泥品种，优先选用硅酸盐水泥或普通硅酸盐水泥以保障协同效

应充分发挥。

4 矿物掺合料协同作用的应用现状与存在问题

4.1 应用现状

随着矿物掺合料协同作用研究的不断深化，其在高性能水泥混凝土中的应用范围日益广泛。在桥梁工程领域，粉煤灰-矿渣粉-硅灰复合掺合料已成功应用于大跨度桥梁主梁、桥墩等关键构件施工，显著提升混凝土的强度与耐久性能，延长桥梁使用寿命；在高层建筑领域，矿渣粉-偏高岭土复合掺合料用于混凝土结构施工，有效增强混凝土的抗渗性与抗冻性，满足高层建筑的严苛性能要求；在海底隧道工程领域，粉煤灰-硅灰复合掺合料用于混凝土衬砌施工，显著改善混凝土的抗氯离子渗透性能，保障隧道结构的长期耐久性。

此外，矿物掺合料的协同作用还广泛应用于预制混凝土构件、道路混凝土、水工混凝土等领域，实现了良好的经济效益与社会效益双赢。例如，在预制混凝土构件生产中，复合矿物掺合料的应用可降低水泥用量，提升构件强度与耐久性，同时缩短生产周期；在道路混凝土施工中，复合矿物掺合料的应用可增强混凝土的耐磨性与抗折强度，延长道路服役寿命。

4.2 存在问题

尽管矿物掺合料的协同作用在高性能水泥混凝土中已得到广泛应用，但仍存在诸多问题亟待解决：一是协同作用机理研究深度不足，目前对不同掺合料组合的协同作用机理多停留在宏观层面，对微观结构演变规律、水化产物相互作用机制等核心问题的研究仍缺乏系统性；二是缺乏统一的配合比设计标准，不同地区、不同工程对复合矿物掺合料的掺量比例、水胶比等参数的选择存在较大差异，导致协同作用效果稳定性不足；三是掺合料质量波动较大，工业废渣类掺合料（如粉煤灰、矿渣粉）的化学组成与物理性质受原材料品质、生产工艺等因素影响显著，质量波动较大，直接影响协同作用效果的稳定性；四是特殊环境下协同作用效果研究滞后，低温、高海拔、盐碱地等特殊环境下，矿物掺合料的水化反应特性与协同作用机制与常温环境存在显著差异，现有研究成果难以满足特殊环境工程的应用需求。

5 未来研究方向展望

针对矿物掺合料协同作用研究与工程应用现存问题，未来研究应聚焦以下核心方向：其一，深化协同作

用微观机理研究,依托先进表征技术系统揭示掺合料复合体系水化产物演变、微观结构形成及界面作用规律,夯实理论支撑;其二,构建统一的配合比设计标准,结合区域原材料特性与工程需求制定规范,保障协同效应稳定性;其三,强化掺合料质量控制技术研发,重点突破工业固废掺合料预处理及精准检测技术,降低质量波动对协同效果的影响;其四,开展特殊环境下协同作用研究,聚焦低温、高海拔、盐碱地等场景,阐明其水化特性与协同机制,开发适配性复合掺合料配方;其五,拓展新型矿物掺合料协同应用研究,探索钢渣粉、磷渣粉等工业固废及沸石粉等天然矿物的复合效应,提升资源利用率。

6 结论

矿物掺合料协同作用是优化高性能水泥混凝土综合性能的核心技术路径。常用矿物掺合料特性差异显著,其复合使用时通过填充、火山灰、界面优化及微集料效应的耦合作用,可有效改善混凝土工作性、强度与耐久性,且协同效果受掺量比例、养护制度、水胶比及水泥

品种等关键因素调控。目前,该技术已在多领域工程中广泛应用,但仍面临协同机理研究不系统、配合比设计标准不统一、掺合料质量波动等问题。未来需强化上述核心问题的研究,推动其在高性能水泥混凝土领域的深度应用与创新发展。

参考文献

- [1] 苏庆. 高性能混凝土外加剂与水泥基材料的适应性及协同作用机理探究[J]. 中国水泥, 2025(4).
- [2] 张国刚. 矿物掺合料对水工混凝土抗冻性的作用机理研究[J]. 水利科学与寒区工程, 2025(4).
- [3] 宋羿昊. 掺合料对协同处置水泥混凝土重金属浸出特性的影响[J]. 价值工程, 2025, 44(1):105-107.

作者简介: 张磊(1989.01-),男,汉族,陕西兴平,硕士,学生工作办公室主任,讲师,高性能混凝土。

基金项目: 陕西铁路工程职业技术学院科研基金项目《锂渣作为水泥及混凝土掺合料的应用研究》(2023KYYB-16)。