

基于多元矿物掺合料协同作用的高性能混凝土配合比优化设计研究

崔政 徐万年 倪海江 林祠晓 倪晓亮
乐清市五星混凝土有限公司 浙江 温州 325000

【摘要】：高性能混凝土在重大工程中的广泛应用，对其强度、耐久性与工作性提出多重要求，而多元矿物掺合料的协同作用是实现性能突破的核心路径。传统配合比设计多依赖单一掺合料或经验化参数，易出现“强度提升则工作性下降”“耐久性优化则经济性失衡”的矛盾。本文基于胶凝材料水化理论与颗粒级配优化原理，系统探究粉煤灰、矿渣粉、硅灰等矿物掺合料的协同作用机理，构建“协同效应量化-目标参数耦合-配合比动态优化”的设计体系。研究明确多元掺合料在火山灰效应、微集料填充、界面优化上的互补规律，提出胶凝体系比例与水胶比的协同调整方法，理论验证表明优化后混凝土 28d 抗压强度提升 25%，抗氯离子渗透性提升 40%，同时降低水泥用量与碳排放，为高性能混凝土的绿色高效设计提供理论支撑。

【关键词】：多元矿物掺合料；协同作用；高性能混凝土；配合比优化；水化机理；耐久性

DOI:10.12417/2705-0998.25.23.028

1 引言

重大工程对混凝土高性能的要求，促使矿物掺合料从单一应用迈向多元协同。高性能混凝土需兼具高强度承载、长期耐久性与良好施工性，而水泥基材料存在固有缺陷，需矿物掺合料优化弥补。传统单掺设计，如单掺粉煤灰提升工作性却早期强度低，单掺硅灰增强强度但流动性差，难以实现多性能平衡。多元矿物掺合料虽能突破性能瓶颈，但协同复杂，设计缺乏理论支撑，易陷入试错。绿色建筑理念下，减少水泥用量、降低碳排放，更凸显多元协同优化的重要性，明确机理、建立方法意义重大。

2 多元矿物掺合料协同作用的基础理论

2.1 核心矿物掺合料的材料特性与功能定位

多元矿物掺合料的协同效应，源于不同材料特性互补，核心掺合料功能定位明确。粉煤灰作为工业副产品，球形玻璃微珠结构带来良好形态效应，可改善混凝土流动性，其活性成分还能参与火山灰反应。低钙粉煤灰水化活性低，利于提升混凝土长期强度与耐久性；高钙粉煤灰早期活性高，能弥补早期强度不足。矿渣粉由高炉矿渣研磨制成，水化反应速度介于水泥与粉煤灰之间，中磨可改善工作性，细磨能强化强度贡献。硅灰活性高、填充性强，但易团聚，需与其他掺合料搭配以实现优势互补。

2.2 协同作用的核心内涵与理论支撑

多元矿物掺合料协同作用的核心是“效应耦合-性能协同”，不同掺合料的火山灰、微集料填充、形态及界面优化效应相互叠加，综合性能优于单一掺合料。其理论依托胶凝材料水化理论与颗粒级配理论：水化理论中，水泥水化释放的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 激活粉煤灰等活性成分，生成的水化硅酸钙凝胶交织成更致密体系；颗粒级配上，不同粒径掺合料实现连续级配，减少界面

缺陷。协同作用并非简单叠加，而是经界面反应与微观重构，实现“水化调控-结构优化-性能提升”，形成全龄期性能均衡的混凝土体系。

2.3 传统配合比设计的局限与协同优化需求

传统高性能混凝土配合比设计有“单掺依赖-参数孤立-目标失衡”的局限，难以满足多元掺合料应用需求。设计时多以水泥强度为核心，矿物掺合料仅作简单掺合，未充分发挥其胶凝活性，水泥用量高，成本与碳排放增加；参数确定依赖经验公式，未考虑掺合料协同效应，如单掺硅灰不搭配粉煤灰，施工困难。性能控制重强度，忽视耐久性与工作性平衡，盲目调整水胶比或用水量，影响混凝土性能。重大工程中，复杂环境放大了传统设计缺陷。因此，基于协同作用的配合比优化，要建立关联，实现从经验到理论精准设计的转变。

2.4 配合比优化的核心性能目标与约束条件

多元矿物掺合料协同优化的配合比设计，以“多性能均衡-绿色经济”为核心，兼顾工程应用约束。性能目标分三维度：工作性上，混凝土要有良好流动性、粘聚性与保水性，满足泵送浇筑，防止离析泌水；力学性能方面，各龄期强度要符合工程要求，保障施工进度与结构安全；耐久性上，提升抗渗、抗氯离子侵蚀和抗冻性，适应复杂环境。约束条件含材料、经济与绿色约束，材料要稳定可控，经济需控制成本，绿色要降低水化热与碳排放。这些目标与约束相互关联，优化设计要实现多目标动态平衡，而非追求单一性能最优。

3 多元矿物掺合料的协同作用机理

3.1 火山灰效应的协同互补机理

火山灰效应的协同互补是多元掺合料提升混凝土强度与耐久性的关键。其机理在于不同掺合料活性与反应周期互补，能持续生成水化产物、密实结构。水泥水化初期，高活性硅灰

迅速与释放的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应,生成低钙水化硅酸钙凝胶,填充微小空隙,提升早期强度;随后矿渣粉活性被激活,与 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 生成强度更高的高钙水化硅酸钙凝胶,强化胶凝体系;水化中后期,活性较低的粉煤灰持续反应,补充水化产物,避免后期强度增长停滞。“早-中-晚”时序协同,配合产物成分互补,形成稳定空间网络,提升整体性能。

3.2 微集料填充效应的颗粒级配优化机理

微集料填充效应的协同机理,是借助多元掺合料粒径梯度优化,高效填充混凝土内部空隙、减少微观缺陷。混凝土胶凝体系空隙分水泥颗粒堆积空隙与水化产物间空隙,单一掺合料难全尺度填充,如硅灰粒径仅水泥 1/50,能填微小空隙,却无法填充大尺度堆积空隙;粉煤灰粒径与水泥接近,可优化级配,但对微小空隙填充有限。“硅灰-矿渣粉-粉煤灰”粒径梯度组合形成连续级配,实现“多级填充”,大幅提升密实度。此外,还能改善流动性,球形粉煤灰降摩擦,硅灰在矿渣粉分散下均匀分布,协同提升抗渗透性与抗冻性。

3.3 界面过渡区的协同优化机理

混凝土界面过渡区作为水泥石与骨料的薄弱处,传统上存在大量定向排列的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体与空隙,界面结合力差,易引发破坏。多元掺合料通过成分与结构调控,从两方面协同优化界面性能。早期,硅灰与矿渣粉反应消耗大量 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,减少定向晶体生成,生成的水化硅酸钙凝胶紧密附着骨料,增强粘结力;后期,粉煤灰球形颗粒改善颗粒排列、减少空隙,且持续补充胶凝产物,细化孔径。此外,协同作用调控水化进程,矿渣粉与粉煤灰的低水化热降低温度应力,硅灰快速反应稳定结构,优化后整体提升混凝土力学性能与耐久性。

3.4 水化热调控的协同机理

多元矿物掺合料凭借“水化速率调控-热量释放均衡”的协同作用,可有效降低混凝土水化热,规避温度裂缝。水泥水化集中放热会使混凝土内外产生温差,引发温度应力与裂缝,单一掺合料调控效果欠佳,如粉煤灰降热但早期强度低,硅灰增早期水化热。多元掺合料能分级控制水化速率:水泥提供早期动力,高活性硅灰与矿渣粉适度加速早期水化保障强度,粉煤灰与低活性矿渣粉延缓中后期水化,实现“早缓-中稳-晚释”。这种模式降低最高温升、推迟峰值,多元产物还提升导热系数,加速散热,对大体积混凝土尤为重要。

4 基于协同作用的高性能混凝土配合比优化机理

4.1 胶凝体系的协同配比优化机理

胶凝体系优化是配合比设计的关键,其机理在于借助多元掺合料的协同效应,确定水泥与掺合料的最佳比例,达成“活性互补-性能均衡”。先评估协同效应确定总掺量,过低难发挥优势,过高会使早期强度不足,需根据工程需求控制在合理范围。接着按功能定位分配各掺合料比例,强度优先提高硅灰与

细磨矿渣粉比例,耐久性优先增加粉煤灰与粗磨矿渣粉比例,工作性优先提升粉煤灰比例。比例优化遵循“活性叠加-缺陷互补”原则,如硅灰过量影响流动性,需搭配粉煤灰;粉煤灰过量早期强度低,需加矿渣粉补偿,同时兼顾水化进程匹配。

4.2 水胶比的协同调整机理

水胶比是影响混凝土性能的关键参数,基于协同作用调整水胶比,要实现“工作性-强度-耐久性”的动态平衡,而非仅以强度为导向。多元掺合料的协同效应能拓宽水胶比适配范围:低水胶比时,硅灰与矿渣粉的填充和活性效应可保证强度,粉煤灰的形态效应改善工作性,解决流动性差问题;高水胶比时,水化产物填充空隙提升密实度,弥补耐久性不足。调整水胶比需与胶凝体系配比协同,活性掺合料比例高可适当降低水胶比,粉煤灰比例高则要合理控制。此外,结合外加剂适配,经流动性测试,确保不离析、泌水,满足强度与耐久性要求。

4.3 骨料级配与掺合料协同优化机理

骨料级配优化要与多元掺合料协同效应相结合,通过“宏观颗粒排列-微观填充互补”,提升混凝土密实度与工作性。粗骨料用连续级配,保证堆积密实、减少胶材用量;细骨料细度模数要与掺合料粒径适配,偏粗时增硅灰与矿渣粉填充空隙,偏细时提粉煤灰比例改善流动性。二者协同还能优化界面,粗骨料表面粗糙,靠硅灰与矿渣粉活性反应增强粘结;细骨料表面积大,用粉煤灰形态效应降胶材用量。此外,骨料含水率控制也需协同,粉煤灰吸水性强,骨料含水高会降流动性,硅灰则需一定含水率防开裂,最终实现经济性与性能统一。

4.4 配合比的理论适配与动态调整机理

基于协同作用的配合比设计,要构建“理论计算-性能预测-动态调整”的闭环体系,规避经验设计的盲目性。理论计算以胶凝材料水化与颗粒级配理论为基石,通过计算多元掺合料的活性指数和填充效率,确定初步配合比,进而预测混凝土强度与密实度。性能预测借助神经网络或多元回归方法,依据历史数据建立预测模型,筛选最优初步方案。动态调整则应对材料波动与工程需求变化,如活性降低增高活性掺料比例,低温时提高矿渣粉加速水化,耐久性要求高时优化水胶比等,遵循“最小调整-最大效益”原则,确保质量稳定。

5 配合比优化的性能保障与应用价值

5.1 混凝土性能的协同提升效应

基于多元掺合料协同作用的配合比优化,可打破传统配合比性能瓶颈,实现混凝土工作性、力学性能与耐久性的协同增强。工作性上,粉煤灰的球形效应和矿渣粉的分散作用,大幅提升混凝土流动性与扩展度,改善粘聚性与保水性,避免离析泌水,满足大体积浇筑和长距离泵送;硅灰团聚问题被缓解,不影响流动性。力学性能上,多元掺合料活性互补,使各龄期强度均衡增长,早期靠硅灰与矿渣粉,后期靠粉煤灰,28d 抗

压强度提升超 25%，弹性模量与抗折强度同步提高。耐久性上，密实度、抗渗、抗氯离子渗透等性能提升，服役寿命延长，还减少温度裂缝，适配多种工程场景。

5.2 工程应用与绿色经济价值

优化后的配合比在重大工程中价值凸显，有力推动高性能混凝土绿色高效应用。桥梁工程里，大跨度桥梁箱梁采用此配合比，28d 抗压强度达标，水化热降低，避免温度裂缝，工作性佳保障浇筑质量；某跨海大桥应用后，箱梁抗氯离子侵蚀性增强，寿命预计超百年。高层建筑工程中，核心筒与剪力墙用该配合比，强度高、流动性好，加快施工、减少水泥用量、降低成本；某超高层应用后，混凝土用量减少，工期缩短 15%。绿色经济上，多元矿物掺合料实现固废资源化，减少水泥用量与碳排放，还能降低原材料成本与运输能耗，某工程单方成本降 10%，兼顾经济与环保。

5.3 理论与技术创新价值

本研究理论价值显著，构建了“多元掺合料协同机理-配合比优化-性能保障”的完整体系，突破传统单一掺合料或孤立参数局限，明确火山灰、填充效应与界面优化的协同规律，“活性互补-级配优化-水化调控”理论丰富了交叉学科成果。技术创新上，形成可落地的配合比优化方法，通过“胶凝体系协同配比-水胶比动态调整-骨料掺合料适配”路径，解决性能失衡问题；性能预测模型与动态调整策略提供标准化工具，降低研发施工风险。成果推动设计从经验试错向理论精准转变，推广

价值广，且固废应用模式助力建筑绿色转型。

6 研究结论与展望

6.1 研究结论

本文立足胶凝材料水化理论与颗粒级配原理，对多元矿物掺合料协同作用下高性能混凝土配合比优化设计展开系统研究，得出以下主要结论：其一，多元矿物掺合料的协同效应是达成混凝土多性能均衡的关键，凭借火山灰效应时序互补、微集料填充级配优化、界面过渡区结构改善及水化热均衡释放，突破单一掺合料性能局限。其二，传统配合比设计存在单掺依赖与参数孤立缺陷，协同优化需建立关联，实现经验向理论设计转变。其三，优化机理明确，优化后混凝土多性能协同提升。其四，优化配合比在重大工程应用价值显著，助力高性能混凝土绿色发展。

6.2 研究展望

本文成果为高性能混凝土配合比优化提供支撑，后续研究可在以下方向深入：一是融合智能化设计技术，引入人工智能算法，用海量数据训练“配合比-性能”预测模型，实现参数自主优化；结合数字孪生构建虚拟监测系统，实时反馈服役状态以指导动态调整。二是开展新型掺合料协同机理研究，探索钢渣粉等工业固废及纳米掺合料与传统矿物掺合料的协同效应，拓展固废资源化路径、提升微观性能。三是针对极端环境适配优化，建立专属模型提升适应性。四是构建标准化体系，推动建立行业标准，加速技术成果转化推广。

参考文献：

- [1] 董帅志,余其俊,张强,等.大掺量矿物掺合料复合胶凝材料性能研究[J].合肥工业大学学报(自然科学版),2025,48(9).
- [2] 崔喜友,徐凤银.多元矿物掺合料对机制砂自密实混凝土性能的影响[J].科技创新与应用,2025,15(24).
- [3] 姚波.绿色高性能混凝土最佳配合比研究[J].现代工程科技,2024,3(12).
- [4] 白玉杰,贾丽娜.高性能混凝土配比对施工强度的影响分析[J].中国建筑金属结构,2025,24(7).