

掺加矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的影响及配合比优化研究

黄贤海¹ 江宏涛²

1.浙江省建材集团有限公司固碳混凝土分公司 浙江 湖州 313219

2.浙江省建材集团固碳科技有限公司 浙江 杭州 310011

【摘要】：高性能混凝土凭借高强度、高密实性等优势，广泛应用于各类重大工程结构中，其耐久性直接决定工程服役寿命与安全性。矿物掺合料作为高性能混凝土的重要组成部分，不仅能替代部分水泥、降低碳排放，还能显著改善混凝土微观结构，提升耐久性能。本文综述了粉煤灰、矿渣粉、硅灰、偏高岭土等常用矿物掺合料对高性能混凝土抗渗性、抗冻性、抗碳化性及抗侵蚀性的影响机制，分析了配合比优化的核心原则与关键技术，总结当前研究存在的不足，并对未来研究方向进行展望，为高性能混凝土在工程中的合理应用提供理论参考与实践依据。

【关键词】：矿物掺合料；高性能混凝土；耐久性；配合比优化

DOI:10.12417/2811-0528.26.12.041

1 引言

矿物掺合料多为工业废渣或天然矿物经加工制成，如粉煤灰、矿渣粉、硅灰等，将其掺入高性能混凝土中，既能实现工业废弃物的资源化利用，降低水泥用量和工程成本，又能通过物理填充、化学反应等作用改善混凝土微观结构，提升耐久性能。因此，系统研究矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的影响，优化配合比设计，对推动高性能混凝土的绿色发展和工程应用具有重要的理论价值和现实意义。本文结合近年来国内外相关研究成果，对该领域的研究进展进行综述。

2 常用矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的影响

2.1 粉煤灰对高性能混凝土耐久性的影响

粉煤灰是火力发电厂燃煤产生的工业废渣，主要成分为二氧化硅、三氧化二铝，具有一定的火山灰活性。将其掺入高性能混凝土中，主要通过物理填充和火山灰反应改善混凝土耐久性。粉煤灰颗粒细小、呈球形，能填充混凝土内部水泥颗粒之间的空隙，减少毛细孔隙数量，细化孔隙结构，降低混凝土的渗透性。在化学作用方面，粉煤灰中的活性成分会与水泥水化产生的氢氧化钙发生火山灰反应，生成水化硅酸钙凝胶，填充孔隙的同时，增强水泥石与骨料之间的界面黏结力，提升混凝土的整体密实性。适量掺入粉煤灰能显著提升高性能混凝土的抗渗性和抗碳化性，减少氯离子渗透，降低钢筋锈蚀风险。但粉煤灰掺量过高会降低混凝土早期强度，延缓水化进程，若养护不当，可能导致混凝土内部孔隙率增加，反而影响耐久性。一般情况下，高性能混凝土中粉煤灰掺量控制在胶凝材料总量的20%~40%为宜。

2.2 矿渣粉对高性能混凝土耐久性的影响

矿渣粉是高炉炼铁产生的废渣经磨细制成，主要成分为二氧化硅、三氧化二铝、氧化钙。矿渣粉颗粒细小，能填充水泥水化产物之间的空隙，细化孔隙结构；二是火山灰反应，矿渣粉在水泥水化产生的碱性环境下，会逐渐发生水化反应，生成水化硅酸钙、水化铝酸钙等凝胶，增强混凝土的密实性；三是改善界面过渡区，矿渣粉的水化产物能填充水泥石与骨料之间的界面缝隙，减少界面缺陷，提升界面黏结强度。矿渣粉能显著提升高性能混凝土的抗渗性、抗硫酸盐侵蚀性和抗冻性。与粉煤灰相比，矿渣粉的活性更高，早期强度发展更快，适合对早期强度有要求的高性能混凝土工程。矿渣粉掺量一般控制在胶凝材料总量的20%~50%，掺量过高会导致混凝土收缩增大，需配合外加剂调整工作性。

2.3 硅灰对高性能混凝土耐久性的影响

硅灰是硅铁合金生产过程中产生的副产品，主要成分为二氧化硅，颗粒极细，比表面积大，具有极高的火山灰活性。硅灰对高性能混凝土耐久性的改善效果最为显著。硅灰颗粒尺寸远小于水泥颗粒，能填充水泥水化产物的微小孔隙，甚至可填充到水化硅酸钙凝胶的间隙中，使混凝土内部结构更加致密；火山灰反应，硅灰能与水泥水化产生的氢氧化钙快速反应，生成大量水化硅酸钙凝胶，不仅填充孔隙，还能增强水泥石的强度和耐磨性；降低混凝土内部的毛细孔隙率，减少水分和有害物质的渗透通道。掺入硅灰能显著提升高性能混凝土的抗渗性、抗冻性、抗侵蚀性和耐磨性，尤其适用于对抗渗、抗冻要求极高的工程。但硅灰的比表面积大，需水量高，若掺量过

高会导致混凝土工作性下降,易产生收缩裂缝,一般掺量控制在胶凝材料总量的5%~10%为宜,且需配合高效减水剂使用。

2.4 偏高岭土对高性能混凝土耐久性的影响

偏高岭土是高岭土经高温煅烧后得到的活性矿物掺合料,主要成分为二氧化硅和三氧化二铝,活性高于粉煤灰和矿渣粉。其对高性能混凝土耐久性的改善作用主要源于火山灰反应和微观填充作用,偏高岭土能与水泥水化产物中的氢氧化钙反应,生成水化硅酸钙和水化铝酸钙凝胶,填充混凝土内部孔隙,细化孔隙结构,提升密实性。偏高岭土能显著提升高性能混凝土的抗渗性、抗碳化性和抗氯离子侵蚀性,同时能抑制混凝土的碱-骨料反应,减少裂缝产生。偏高岭土掺量一般控制在胶凝材料总量的5%~15%,掺量过高会导致混凝土早期收缩增大,需通过合理养护和外加剂调整来缓解。

3 掺加矿物掺合料的高性能混凝土配合比优化研究

3.1 配合比优化原则

一是耐久性优先原则,配合比优化的核心目标是提升混凝土的耐久性能,根据工程服役环境,重点优化抗渗、抗冻、抗侵蚀等指标。

二是工作性适配原则,确保混凝土具有良好的流动性、黏聚性和保水性,满足施工浇筑要求。

三是强度匹配原则,根据工程设计强度等级,确保混凝土的抗压、抗拉强度达到设计标准。

四是经济性原则,在保证性能的前提下,合理提高矿物掺合料掺量,减少水泥用量,降低工程成本;五是环保性原则,优先选用工业废渣类矿物掺合料,实现废弃物资源化利用,降低碳排放。

3.2 配合比优化关键技术

3.2.1 水胶比

影响高性能混凝土耐久性和强度的核心参数,也是配合比优化的关键。水胶比过大,混凝土内部毛细孔隙增多,密实性下降,耐久性和强度降低;水胶比过小,混凝土工作性变差,易产生收缩裂缝。掺加矿物掺合料后,由于矿物掺合料的活性

需要一定时间发挥,可在保证工作性的前提下,适当降低水胶比,一般控制在0.28~0.38之间,结合矿物掺合料类型和掺量进行调整。

3.2.2 矿物掺合料

掺量的优化需结合其类型、活性及工程需求,采用单掺或复掺方式。单掺时,根据前文所述,控制各矿物掺合料的合理掺量范围;复掺时,利用不同矿物掺合料的优势互补,提升混凝土综合性能。例如,粉煤灰与矿渣粉复掺,可兼顾早期强度和后期强度,改善工作性;硅灰与粉煤灰复掺,可在提升耐久性的同时,降低硅灰的需水量,避免收缩裂缝产生。

3.2.3 外加剂

合高效减水剂能有效降低混凝土需水量,在降低水胶比的同时,保证良好的工作性,常用的高效减水剂有聚羧酸类、萘系等,掺量一般为胶凝材料总量的0.5%~1.5%。此外,根据工程需求,可掺入缓凝剂、引气剂等外加剂,缓凝剂可延缓混凝土凝结时间,避免高温施工产生裂缝;引气剂可引入微小气泡,提升混凝土抗冻性。

3.2.4 骨料级配

粗骨料应选用强度高、颗粒均匀、级配良好的碎石,最大粒径不宜超过20mm;细骨料应选用洁净的中砂,含泥量控制在2%以内,通过优化骨料级配,减少空隙率,提升混凝土的密实性。

4 结论

常用矿物掺合料均能通过物理填充、火山灰反应等作用,改善高性能混凝土的微观结构,提升其抗渗、抗冻、抗碳化、抗侵蚀等耐久性能。粉煤灰、矿渣粉、硅灰、偏高岭土等矿物掺合料各有优势,合理选用单掺或复掺方式,控制适宜掺量,能在保证混凝土工作性和强度的前提下,显著提升耐久性,同时实现工业废弃物资源化利用,降低工程成本和碳排放。掺加矿物掺合料的高性能混凝土配合比优化,需遵循耐久性优先、工作性适配、强度匹配、经济性和环保性原则,重点优化水胶比、矿物掺合料掺量、外加剂用量和骨料级配,通过多参数协同调整,实现混凝土综合性能的平衡。

参考文献:

- [1] 田帅,吕剑锋,李世华,等.矿物掺合料对高性能混凝土耐久性的影响[J].混凝土与水泥制品,2020,(10):12-16.
- [2] 田耀刚,卢东,王帅飞,等.铜黄高速公路 C50 高性能混凝土耐久性研究[J].施工技术,2019,48(03):20-24.
- [3] 赵韶华.矿物掺合料对高性能混凝土力学性能和耐久性的影响分析[J].黑龙江交通科技,2017,40(02):13-15.