

高速公路水泥混凝土路面中掺粉煤灰比例对耐久性的影响研究

郑世勇

重庆交通建设(集团)有限公司, 重庆 401120

DOI:10.61369/ME.2024080038

摘要 : 随着高速公路建设规模的不断扩大, 提升水泥混凝土路面的耐久性已成为保障道路服役性能的关键。粉煤灰作为一种具有潜在火山灰活性的工业副产物, 掺入水泥混凝土中不仅能改善孔隙结构, 还能显著增强其抗冻、抗渗、抗碳化及抗氯离子侵蚀能力。本文通过系统分析不同掺量粉煤灰对混凝土耐久性指标的影响, 揭示其在优化微观结构、调控水化反应过程以及提升环境适应性方面的作用机制。研究表明, 粉煤灰掺量在 15% ~ 25% 范围内时, 可在提升耐久性的同时兼顾早期强度发展, 为高速公路混凝土路面材料的设计提供了理论依据和工程指导。

关键词 : 粉煤灰; 水泥混凝土; 高速公路; 耐久性; 掺量比例

Research on the Influence of Fly Ash Proportion in Expressway Cement Concrete Pavement on Durability

Zheng Shiyong

Chongqing Transportation Construction (Group) Co., LTD. Chongqing 401120

Abstract : With the continuous expansion of the construction scale of expressways, improving the durability of cement concrete pavements has become the key to ensuring the service performance of roads. Fly ash, as an industrial by-product with potential pozzolanic activity, when added to cement concrete, can not only improve the pore structure, but also significantly enhance its frost resistance, impermeability, carbonation resistance and chloride ion erosion resistance. This paper systematically analyzes the influence of fly ash with different dosings on the durability index of concrete, revealing its mechanism of action in optimizing the microstructure, regulating the hydration reaction process and improving environmental adaptability. Studies show that when the content of fly ash is within the range of 15% to 25%, it can enhance durability while taking into account the development of early strength, providing a theoretical basis and engineering guidance for the design of concrete pavement materials for expressways.

Keywords : fly ash; cement concrete; expressway; durability; dosage ratio

引言

随着我国高速公路建设向高标准、长寿命方向发展, 混凝土路面的耐久性问题逐渐成为制约其长期服役性能的关键因素。在实际运营中, 混凝土易受到冻融循环、碳化、氯离子侵蚀等多重环境作用影响, 导致结构劣化与性能衰减, 影响道路安全与使用寿命^[1]。如何通过材料设计手段提升其抗劣化能力, 已成为工程领域关注的重点。粉煤灰作为燃煤电厂排放的固体废弃物, 因其活性氧化物含量高、颗粒细腻、形貌规则, 具备良好的潜在火山灰活性与微填充能力。在混凝土中合理掺入粉煤灰, 不仅可优化孔隙结构、调控水化反应过程, 还能提升混凝土对外界侵蚀介质的屏蔽能力, 为提高其耐久性能提供有效技术路径。本研究聚焦于不同掺量粉煤灰对混凝土路面耐久性的影响, 结合微观结构演化机制与多项性能测试指标, 系统分析其在抗冻、抗碳化、抗氯离子渗透及干湿稳定性等方面的作用规律。

一、粉煤灰的特性及其在混凝土中的作用机理

(一) 粉煤灰的物理化学性质

粉煤灰主要由燃煤电厂烟气中的细微颗粒冷却后通过电除尘方式收集而得, 颗粒普遍呈球形, 粒径分布范围较广, 具备

良好的粒径连续性和堆积密实性。其主要化学成分包括二氧化硅 (SiO_2)、三氧化二铝 (Al_2O_3)、氧化铁 (Fe_2O_3) 和氧化钙 (CaO), 其中非晶态的 SiO_2 和 Al_2O_3 含量决定其潜在火山灰活性。在形貌上, 粉煤灰颗粒表面光滑, 吸水率低, 具备优异分散性, 能提高混凝土拌合物的流动性。比表面积越高、玻璃体含

量越大，其在碱性环境中的反应活性越强，对后期胶凝结构形成的贡献越显著。

（二）活性反应与 C-S-H 凝胶生成

粉煤灰在碱性环境中与水泥水化生成的氢氧化钙（ $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ）反应，发生缓慢的火山灰反应，形成次生 C-S-H 凝胶。该反应产物不具晶体结构，呈网络状分布，在原有水泥水化产物的基础上进一步填充毛细孔隙，提升混凝土致密性和结构完整性。通过消耗 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ ，粉煤灰可降低体系中游离碱的浓度，减弱因氢氧化钙晶体体积膨胀导致的内应力积聚，增强混凝土在服役期内的稳定性与抗裂能力^[2]。与初级水化产物相比，粉煤灰形成的凝胶密度更高，水化产物分布更均匀，有助于建立持久的胶凝骨架。

（三）微填充作用与孔隙结构优化

粉煤灰粒径通常小于水泥颗粒，颗粒形貌规则，具备良好的微填充性能。在水泥颗粒间分布时，可有效填补大粒径材料间的间隙，促使混凝土形成更加紧密的骨料-浆体结构。在水化过程中，粉煤灰微粒不仅物理上填充空隙，同时伴随二次反应生成的 C-S-H 凝胶进一步压缩孔隙空间，使毛细孔径由中等尺度向微细尺度转化，孔隙分布更趋均匀。这一结构转变显著降低了外界水分、气体和侵蚀性离子的迁移通道，提高混凝土在冻融、氯盐和碳化等恶劣环境中的抗侵蚀能力。

（四）水化热释放调节与裂缝风险控制

在高速公路大体积混凝土结构中，水泥水化初期释放大热量，导致内部温升剧烈，温度梯度过大易引发体积裂缝。掺入粉煤灰可显著降低水泥用量，延缓反应进程，从而调节水化放热曲线，减缓热峰出现时间与降低峰值温度。在水化初期，由于粉煤灰活性反应滞后，可减少初始阶段热量积聚，热胀冷缩幅度减小，温度应力分布更为均匀。温控能力的增强，有效抑制因热裂缝产生而导致的后期侵蚀通道形成，提升混凝土服役初期的结构完整性。

（五）碱含量调节与抗碱-骨料反应作用

碱-骨料反应（AAR）是混凝土结构内部一种潜在的劣化机制，源于水泥体系中可溶性碱与活性骨料之间产生的膨胀性凝胶。粉煤灰中可溶性碱含量较低，同时其参与反应时可有效稀释混凝土体系中总碱含量，降低反应诱因。在反应过程中，粉煤灰所生成的 C-S-H 凝胶吸附部分游离碱，抑制高碱环境的形成，减少碱性溶液与骨料接触反应的几率^[3]。在高湿、高温环境下，AAR 反应更为活跃，而粉煤灰的碱稀释与孔隙屏蔽作用能够延缓或阻止其发生，从根源上降低混凝土开裂风险并提升长龄期结构耐久性。

二、粉煤灰掺量对混凝土耐久性能的影响分析

（一）抗冻融性能

掺粉煤灰混凝土在冻融环境下表现出明显的耐久性增强趋势。通过对不同掺量下混凝土试件进行 300 次冻融循环测试，掺量为 20% 组的质量损失率控制在 1.2%，相比未掺组的 2.9% 下降了 58.6%。动态弹性模量下降幅度减小，线性膨胀系数降低 11.7%，

显示结构抵御内部冰胀应力能力增强。掺入粉煤灰后，细颗粒填补了水泥颗粒间空隙，显著改善了毛细孔结构，减少了毛细孔连通性，阻断了水分的迁移通道，降低了孔隙中水分冻结膨胀产生的应力集中。掺量提高至 30% 时，冻融后质量损失率反而上升至 2.5%，由于早期水化反应不足，空隙结构填充不完整，局部区域易形成应力集中点，促进微裂纹萌发和扩展。因此，在粉煤灰尚未充分反应的早龄期，结构内部抗冻能力未能形成稳定支持，反而削弱了整体冻融稳定性。

（二）抗碳化性能

混凝土抗碳化能力与其碱性维持水平和 CO_2 扩散阻力密切相关。在标准碳化环境中开展 28 天加速碳化测试，未掺粉煤灰试样碳化深度达到 3.2 mm，而掺量为 20% 的试样仅为 1.8 mm，碳化速率降低 43.75%。粉煤灰与水化过程产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生潜在火山灰反应，生成二次 C-S-H 凝胶结构，有效减少体系中碱性物质含量，延缓碳化前沿推进速度。中等掺量下，孔结构得到显著细化，毛细孔比例降低， CO_2 扩散路径变得复杂曲折，显著提高气体阻隔性能。当掺量提升至 35% 后，碳化深度反弹至 2.6 mm，主要由于水泥含量大幅下降，早期水化产物数量不足，未能形成有效屏蔽结构，导致碳化环境中的酸性气体更易进入内部。碳化性能改善主要依赖于初期致密性建立与中期活性释放同步推进，20% 左右的掺量形成了结构密实与碱性维持之间的平衡状态。

（三）抗氯离子渗透性

氯离子侵蚀能力直接影响钢筋锈蚀与混凝土结构耐久性，通过快速氯离子电通量测试（RCP）和扩散系数测定，发现粉煤灰掺量对抑制 Cl^- 渗透表现出显著作用。掺量 20% 组的电通量为 1765 C，氯离子扩散系数为 $7.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，较未掺组（3500 C、 $1.28 \times 10^{-11} \text{ m}^2/\text{s}$ ）分别降低 49.6% 与 44.5%。粉煤灰填充效应使得毛细孔体积和连通率显著下降，形成封闭性更高的孔隙网络，大幅增加 Cl^- 在体系中迁移路径和扩散阻力。同时，C-S-H 凝胶结构对氯离子具有吸附与物理包裹能力， Al_2O_3 与 Cl^- 进一步反应形成稳定铝盐，增加了氯离子的化学结合比例。掺量提高至 30% 后，RCP 结果下降至 1650 C，但扩散系数降幅趋缓，表明后期生成的 C-S-H 密度未能同步提升，胶体结构未形成进一步的致密化^[4]。因此，在保证结构致密和胶凝连续性的前提下，20% 的粉煤灰掺量在抗氯离子渗透方面体现了良好均衡性能。

（四）干湿循环下的体积稳定性

干湿循环反复改变混凝土内部湿度分布，引发毛细压力波动，是造成微裂纹扩展和体积不稳定的主要外部因素。在 60 次干湿循环后，未掺粉煤灰样本质量损失率为 2.1%，表面微裂纹显著，而掺量为 20% 的样本质量损失率仅为 0.8%，微应变保持在 $145 \mu\epsilon$ 以下，结构完整性与尺寸稳定性显著提升。粉煤灰细化孔径结构并增加凝胶体密度，有效削弱了水分迁移路径，降低内部毛细张力变化幅度，提升混凝土对干湿应力变化的缓冲能力。若掺量升高至 30%，干缩应变上升至 $186 \mu\epsilon$ ，主要源于部分未水化粉煤灰颗粒滞留于浆体中，形成局部应力集中点，反而加剧应变集中现象，破坏连续性结构。结构在干湿环境中稳定性依赖于孔隙封闭程度与水分缓释能力，20% 掺量水平实现了这两者之间的

均衡配置，在应对外界环境变化时展现出优越的适应性和韧性。

三、粉煤灰掺量的优化与配比策略建议

(一) 粉煤灰掺量与耐久性能之间的协同关系

粉煤灰掺量直接影响 C-S-H 凝胶的生成速率与总量，从而调节混凝土微结构的致密性和渗透控制能力。掺量在 15% 至 25% 范围内，毛细孔显著减少，C-S-H 凝胶生成充分，能有效屏蔽侵蚀通道，提高冻融循环和碳化条件下的结构稳定性。掺量为 20% 时，28 天抗压强度达 44.2 MPa，氯离子扩散系数为 $7.1 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，碳化深度为 1.8 mm，整体性能优良。掺量超过 30% 则因水泥减少，早期水化产物不足，孔隙率升高，抗渗抗裂性能下降，影响结构早期安全性。综合分析，20% 为兼顾孔隙细化、强度维持与抗蚀性的最优掺量。

(二) 水灰比调控与粉煤灰协同作用机制

水灰比作为控制孔隙结构与水化环境的核心参数，与粉煤灰的微填充效应高度耦合。低水灰比可减少毛细孔体积，提升 C-S-H 凝胶密度，增强致密性与抗渗能力。在水灰比 0.38、粉煤灰 20% 的条件下，孔隙率降至 12.7%，电通量为 1780 C，扩散系数为 $7.5 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，微结构以微孔为主，连通性弱。若水灰比增至 0.45，即使掺量不变，孔径扩大，扩散系数上升至 $9.6 \times 10^{-12} \text{ m}^2/\text{s}$ ，抗蚀性能下降。建议水灰比控制在 0.35 至 0.42 之间，并使用聚羧酸减水剂保障流动性与水化充分性。

(三) 龄期发展规律与养护制度对性能的影响

粉煤灰反应速率低于水泥，其活性释放与 C-S-H 凝胶生成依赖湿度和养护时间。在掺量 20%、水灰比 0.38 条件下，混凝土 7 天强度为 28.6 MPa，56 天达 52.8 MPa，后期强度提升达 84.6%，显示明显的二次水化过程。持续 14 天湿养护（28° C、95% 湿

度）可使毛细孔体积减少 26%，C-S-H 凝胶增加 18%，电通量降至 1765 C，显著提升抗渗性。干养条件下，28 天电通量升至 2620 C，孔结构疏松，性能退化。建议湿养护不少于 14 天，尤其在干燥、高温或多风环境中，采用湿麻布、保湿膜或定期喷水，防止早期干裂与微裂纹形成^[5]。

(四) 区域环境适应性与掺量策略的匹配调控

不同气候区域需匹配相应的粉煤灰掺量策略。南方高湿区常见干湿循环和 AAR 风险，建议掺量设为 25%，以稀释碱浓度、增强密实性，抑制 AAR 并提升抗裂性能。北方寒冷地区应兼顾抗冻性与早期开通需求，掺量控制在 18% 以内，保障 7 天强度达 30 MPa，并配合高效减水剂提高密实性。在高温干燥或加速施工条件下，宜使用比表面积高于 420 m^2/kg 的 I 级粉煤灰，并视需添加早强剂，确保 3 天强度达 24 MPa 以上，满足早期抗裂与快速通车要求。掺量应结合区域环境、强度标准和施工周期进行精准调控。

四、结语

合理控制粉煤灰掺量可有效改善水泥混凝土的孔隙结构，提升抗渗性、抗裂性与抵御外界侵蚀的能力，在保障高速公路路面结构长期稳定性方面发挥重要作用。掺量在 15% 至 25% 范围内时，活性填充与二次水化反应协同作用显著，能够在不牺牲早期强度的前提下，强化耐久性能表现。掺量过高则会导致水化产物不足，影响结构致密性与早期强度发展。掺量设计应结合区域气候、服役环境与施工周期综合调控，并与水灰比、养护制度协同匹配，确保混凝土在服役周期内具有良好的性能演化路径。未来，可从材料改性、复合掺合料优化以及服役期耐久性预测等方面拓展深化，以推动高性能、绿色路面体系的持续发展。

参考文献

- [1] 贺勇. 粉煤灰和矿渣粉双掺技术在混凝土中的应用探索 [J]. 建材与装饰, 2020, (14): 3+5.
- [2] 高桂海. 石灰石粉做矿物掺合料对水泥路面性能的影响研究 [J]. 中外公路, 2021, 41(05): 283-287.
- [3] 曾庆玲. 钢渣粉、粉煤灰及矿粉单掺或复掺对混凝土耐久性的影响研究 [J]. 江西建材, 2023(5): 11-13.
- [4] 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(02): 80-83.
- [5] 陈立延, 杨安, 洪芬, 等. 不同粉煤灰掺量对泡沫混凝土性能及其孔径的影响 [J]. 混凝土, 2021, (08): 137-140.