

高掺粉煤灰桥梁混凝土中碳化 - 裂缝协同效应研究

文 / 冉英华 中铁二十四局集团江苏工程有限公司

摘要: 为探究高掺粉煤灰桥梁混凝土在服役过程中碳化与裂缝协同作用机制, 本文开展了不同掺量粉煤灰混凝土的力学性能、水化热、抗裂与碳化行为试验, 并辅以微观结构分析手段进行机制解析。通过设置 0%、30%、50%、70% 四种掺量梯度, 系统测试了各组试件的强度演化、水化放热过程、裂缝发展特征及加速碳化深度。结果显示, 适量粉煤灰可降低水化热峰值与早期开裂风险, 但高掺量下 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 含量减少、界面孔隙率升高, 使得抗碳化能力明显下降。结合扫描电镜 (SEM) 与 XRD 分析, 揭示了 C-S-H 胶体碳化与界面劣化的协同路径, 并量化裂缝存在对 CO_2 传输速率与碳化深度的放大效应。研究结果为高掺粉煤灰混凝土在桥梁耐久性设计中的掺量控制与裂缝防治提供了实验依据与微观支撑。

关键词: 高掺粉煤灰; 桥梁混凝土; 碳化行为; 裂缝演化; 协同效应

【DOI】10.12254/j.issn.2096-6539.2025.23.039

引言

近年来, 随着低碳建材和资源综合利用技术的发展, 粉煤灰在混凝土中的高掺应用逐渐成为提升结构耐久性与绿色性能的重要路径, 特别是在桥梁工程等长期服役构筑物中应用广泛。然而, 高掺粉煤灰混凝土在实际服役过程中面临早期强度不足、界面弱化以及抗碳化能力下降等问题, 且裂缝的存在会进一步加剧 CO_2 向结构内部扩散, 诱发碳化 - 裂缝协同退化效应, 显著影响混凝土保护层的稳定性与钢筋锈蚀风险^[1]。针对上述问题, 本文以桥梁结构高掺粉煤灰混凝土为研究对象, 设计不同掺量梯度, 通过力学性能、水化热、加速碳化与裂缝控制试验, 结合扫描电镜 (SEM) 与 XRD 等微观测试手段, 系统分析掺量变化对碳化 - 裂缝协同作用的影响规律, 旨在为桥梁混凝土的高掺粉煤灰优化设计及耐久性提升提供理论基础与技术支持。

一、材料与方法

(一) 材料与配合比

试验所用水泥为 P·O 42.5 普通硅酸盐水泥, 满足《通用硅酸盐水泥》(GB 175-2023) 要求。粉煤灰为 II 级低钙粉煤灰, 来源于华东地区典型燃煤电厂, 具有较高活性指数, 细度为 18.7%, 烧失量 2.3%, 其主要化学成分为 SiO_2 、 Al_2O_3 与 Fe_2O_3 总量占比达 75% 以上^[2]。细骨料采用中砂, 颗粒级配合理, 细度模数为 2.7, 含泥量控制在 1.8% 以内; 粗骨料为连续级配碎石, 粒径 5 - 20mm, 压碎指标为 7.6%。外加剂为聚羧酸高性能减水剂, 减水率 $\geq 25\%$ 。

为研究粉煤灰掺量对混凝土碳化与裂缝行为的影响, 设计四组粉煤灰掺量梯度: 0%、30%、50%、70%, 水胶比统一为 0.38, 砂率控制在 39%。各组混凝土配合比按质量比列于表 1。拌合水采用自来水, 混凝土在 180s 内机械搅拌均匀, 确保拌和物具有良好的和易性及均匀性。

(二) 物理与力学性能试验

混凝土物理性能测试包括坍落度、含气量与密度, 依据 GB/T 50080-2016 标准进行。坍落度控制在 120 -

140mm, 采用圆锥筒下沉法测定; 含气量由压差法获取; 密度通过质量与体积比计算, 用以评估拌合均匀性与致密性。

力学性能测试包括抗压强度、劈裂抗拉强度及轴向静力弹性模量。抗压试件为 100mm 立方体, 抗拉与弹性模量试件为 $\phi 150\text{mm} \times 300\text{mm}$ 圆柱体, 养护龄期设为 7d、28d 和 90d。加载采用电液伺服系统, 按 GB/T 50081-2019 进行抗压强度及抗劈裂试验。弹性模量通过应力 - 应变线性段斜率计算^[3], 公式如下:

$$E_c = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - \varepsilon_1} \quad (1)$$

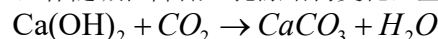
其中, E_c 为轴向弹性模量 (MPa); σ_1 , σ_2 为线性区段应力值, 通常取 $0.15f_c$ 和 $0.30f_c$; ε_1 , ε_2 为对应应变值。

应变通过电阻应变计实时采集, 结合加载数据计算出有效弹性模量, 用于分析粉煤灰对混凝土刚度性能的影响。

(三) 碳化与抗裂测试

混凝土碳化性能测试采用加速碳化法, 参照 JGJ/T 193-2009 执行。制备 $100\text{mm} \times 100\text{mm} \times 400\text{mm}$ 棱柱体试件, 标准养护 28d 后置于碳化试验箱, 控制条件为: CO_2 浓度 20%、温度 $20 \pm 2^\circ \text{C}$ 、相对湿度 65%。分别在 3d、7d、14d、28d 和 56d 取样, 用 1% 酚酞溶液喷洒断面, 测定无色区平均深度作为碳化深度^[4]。

碳化实质为 CO_2 与水泥水化产物 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 反应生成 CaCO_3 , 伴随碱性降低、孔隙结构变化, 主要反应如下:



此外, C-S-H 胶体也会发生次生碳化反应, 形成不稳定碳酸盐, 进一步削弱基体性能。

抗裂性能通过环形约束试验评估, 采用内径 150mm、外径 300mm 的钢环模具, 观测约束条件下混凝土收缩引发的开裂时间与裂缝数量^[5]。试件表面裂缝发展过程由高清相机拍摄记录, 并采用图像识别算法提取裂缝长度、宽度等指标。

为分析裂缝对碳化的协同加速作用，裂缝试件同步进行碳化深度测定，并与无裂缝对照组比较，评估表面贯通裂缝对 CO₂ 扩散路径与反应速率的影响。

二、结果与分析

表 1 不同掺量粉煤灰混凝土力学性能测试结果 (单位: MPa)

粉煤灰掺量	抗压强度 (7d)	抗压强度 (28d)	抗压强度 (90d)	抗拉强度 (28d)	抗拉强度 (90d)
0%	35.6	47.8	53.3	3.22	3.58
30%	32.9	45.1	56.7	3.05	3.49
50%	28.3	39.8	52.9	2.81	3.24
70%	23.5	33.6	47.4	2.36	2.92

从表 1 可见，粉煤灰掺量的提升显著降低了混凝土的早期强度，尤其在 7d 龄期表现出较大下滑；但随着龄期延长，30% 和 50% 掺量组的后期强度增长趋势明显，90d 强度已接近甚至超过基准组，反映出其良好的后期活性。相比之下，劈裂抗拉强度受粉煤灰掺量增加影响更为显著，表现为持续下降，说明界面强度和抗裂性可能随掺量上升而弱化，需在应用中综合考虑结构承载与耐久性匹配问题。

表 2 不同粉煤灰掺量混凝土的水化热与早期裂缝表现

粉煤灰掺量	水化热峰值时间 (h)	峰值速率 (W/g)	环缝开裂时间 (h)	裂缝条数 (28d)
0%	10.3	2.73	12.7	4
30%	13.9	2.01	21.5	1
50%	15.5	1.66	25.3	2
70%	17.8	1.36	29.4	3

从表中数据可见，随着粉煤灰掺量的增加，混凝土水化热峰值时间呈延后趋势，峰值速率持续下降，表明高掺粉煤灰有效抑制了早期水化反应强度与放热集中程度。相比之下，30% 和 50% 掺量组的水化热释放显著平缓，环缝开裂时间分别延后至 21.5h 和 25.3h，裂缝数量也显著减少，说明适量掺灰能有效缓解早期温度梯度诱导的收缩应力，提升抗裂能力。

但当掺量增至 70% 时，尽管初期热裂缝延缓出现，裂缝条数反而回升，表明粉煤灰取代过多水泥后胶凝能力不足，体系强度发展滞后，在后期收缩与界面弱化共同作用下裂缝易扩展。因此，粉煤灰掺量宜控制在 30% - 50% 范围内，以兼顾热控效应与结构完整性。

(三) 抗碳化性能分析

为研究粉煤灰掺量对混凝土碳化抵抗能力的影响，采用加速碳化试验测定各组试件在不同龄期的碳化深度变化规律。试件经 28d 标准养护后，置于 CO₂ 浓度 20%、温度 20℃、相对湿度 65% 的碳化箱中，分别在 3d、7d、14d、28d、56d 取样测定断面碳化深度，结果绘制如图 2 所示。

图 2 表明，随着龄期延长，各组混凝土碳化深度均增大，且掺灰越多，碳化越快。28d 时，0% 组碳化深度为 4.6mm，70% 组达 9.1mm，主要由于高掺粉煤灰降低 Ca(OH)₂ 含量，削弱碱性保护，同时 C-S-H 结构疏松，提升 CO₂ 渗透性。30% 组在 56d 时碳化深度最低，说明适

(一) 基本性能表现

为系统评估粉煤灰掺量对混凝土基本性能的影响，对各组混凝土在 7d、28d 和 90d 龄期进行抗压强度与劈裂抗拉强度测试，结果见表 1。

(二) 水化热与抗裂性能影响

为探究粉煤灰掺量对混凝土早期水化热释放与裂缝发展的影响，采用等温量热仪对各组混凝土 72h 内的水化放热过程进行监测，并结合钢环约束试验评估其早期抗裂性能。水化热的峰值时间与速率反映出混凝土体系的反应活性，开裂时间与裂缝条数可用于表征热致裂缝风险。试验数据见表 2。

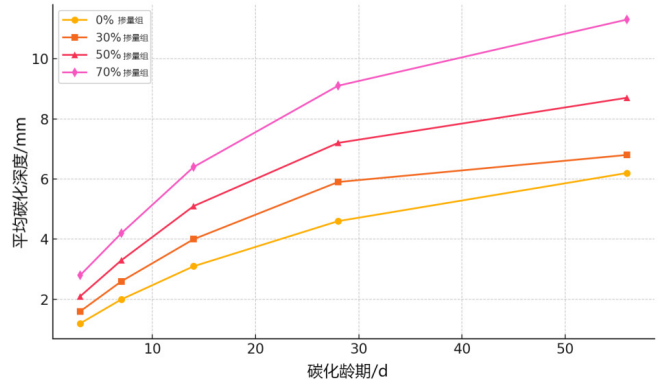


图 2 不同粉煤灰掺量混凝土碳化深度随龄期变化曲线

量掺灰可在一定程度上提升致密性、延缓碳化；50% 组后期碳化增长陡峭，表明碱性不足难以长期抵御侵蚀。整体来看，粉煤灰对抗碳化性能具有“双重效应”，30% 以内有利，超过则不利，掺量应结合桥梁服役环境合理控制。

(四) 碳化 - 裂缝协同效应

混凝土表面裂缝的存在显著改变了碳化前沿的传播路径与速率。为量化该协同效应，分别选取典型有裂缝试件与无裂缝对照组，开展加速碳化试验，测定不同龄期下的碳化深度，结果如图 3 所示。

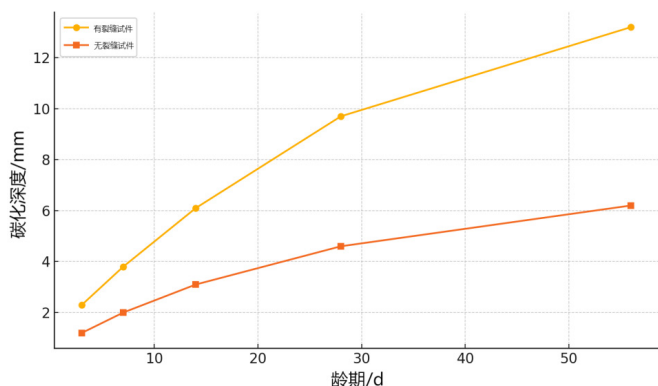


图3 裂缝存在对混凝土碳化深度的影响曲线

从图3可见，裂缝显著加快了碳化前沿推进速度，28d时有裂缝试件碳化深度达9.7mm，较无裂缝组提升逾110%，56d时突破13mm，存在贯通风险。其加速机制主要在于裂缝提供了CO₂通道，降低扩散阻力，同时诱发局部干湿交替，增强C-S-H碳化反应，尤其在Ca(OH)₂储量有限的高掺粉煤灰体系中更为明显。因此，结构设计中应重视裂缝-碳化协同风险，加强控裂与界面保护，防止早期微裂缝诱发碳化失稳，保障混凝土长期耐久性。

(五) 微观机制探讨

为揭示粉煤灰掺量与裂缝对碳化加速效应的微观根源，选取代表性试件开展扫描电子显微镜(SEM)与X射线衍射(XRD)分析，并结合图像识别法定量计算界面过渡区孔隙率，探讨碳化-裂缝协同作用的材料基础。

SEM结果显示，0%与30%掺量组界面结构致密，C-S-H胶体与Ca(OH)₂晶体分布均匀；而在50%以上掺量组、特别是裂缝邻近区域，出现大量针状碳酸钙沉积及微裂纹链，微结构明显劣化。XRD分析表明，随着掺量增加，Ca(OH)₂峰强减弱，CaCO₃及低钙产物(如C-A-S-H)增强，说明碱性与结构稳定性下降。典型碳化反应如下：



该反应消耗胶结相，裂缝诱导区域析出的产物易引起局部膨胀与脱粘，进一步破坏保护层连续性。为定量验证上述过程，图4对比了不同掺量下有无裂缝试件在

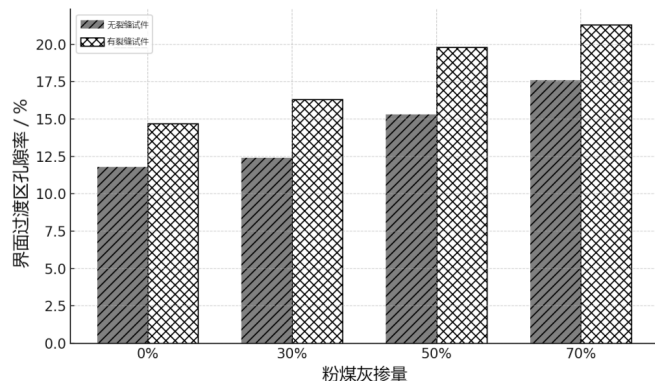


图4 不同掺量下裂缝对界面孔隙率的影响

界面过渡区的平均孔隙率，反映裂缝与高掺灰共同作用对界面结构的削弱效应。

图4数据显示，随着粉煤灰掺量升高，界面孔隙率整体增加，且有裂缝试件在各掺量下均高于无裂缝组，70%掺量时差值达3.7个百分点，说明裂缝显著削弱了界面致密性，促进碳化介质渗透。高掺粉煤灰导致碱性不足、凝胶相弱化，加之裂缝贯通界面，形成碳化-裂缝协同加速的微观机制。因此，在高掺灰桥梁混凝土中，应重点控制界面结构与裂缝发展，提升整体抗碳化性能与耐久性。

结语

本文揭示了高掺体系下碳化-裂缝协同作用的加速机制。试验结果表明，30%-50%掺量可在降低水化热峰值的同时延缓裂缝出现，改善早期变形控制与热致应力分布；但当掺量超过50%后，混凝土早期强度与界面完整性显著下降，抗裂与抗碳化能力同步减弱，界面过渡区孔隙率大幅上升，整体耐久性面临显著退化风险。

裂缝的存在显著加快了碳化前沿的推进速度，尤其在高掺灰条件下，裂缝贯通界面结构、形成低阻通道，有效放大了CO₂渗透速率与侵蚀深度，构成碳化-裂缝协同加速机制的关键通路。特别是在70%掺量组中，碳化侵蚀与微裂扩展交互增强，表现出典型的非线性、正反馈退化模式。建议在桥梁等耐久性要求高的工程中，将粉煤灰掺量控制在50%以内，并注重界面过渡区密实性设计与裂缝风险控制，以提升混凝土服役期内的抗碳化能力和结构安全储备。未来研究可进一步融合环境暴露等级、裂缝演化路径与CO₂扩散模型，实现碳化-裂缝协同损伤的预测与调控。

参考文献

- [1] 张兴龙. 高掺量粉煤灰混凝土力学性能试验研究[J]. 粉煤灰综合利用, 2025, (02): 49-53.
- [2] 王方刚, 陆加越, 张英杰, 等. 醇胺类和C-S-H-PCE纳米种子多元体系协同效应对高掺粉煤灰-水泥浆体早期强度的影响[J]. 混凝土, 2024, (11): 138-144+154.
- [3] 周忠华. 高掺量污泥和粉煤灰低温烧砖技术[J]. 砖瓦, 2024, (09): 17-18+26.
- [4] 曾勇, 石远航. 高掺量粉煤灰大坝混凝土绝热升温试验以及早期开裂性研究[J]. 江西建材, 2024, (04): 49-51.
- [5] 武斌, 武赛琴, 张媛媛, 等. 高掺量炉渣粉煤灰玻化微珠保温砂浆石膏板复合墙体热工性能试验研究[J]. 新型建筑材料, 2023, 50(07): 150-154.

作者简介：冉英华，女，1985年3月，汉，河北保定，本科，工程师，研究方向：工程试验。