

粉煤灰替代率对混凝土力学及抗硫酸侵蚀性能的影响研究

尹 健

(北京城建房地产开发有限公司, 北京 100010)

摘 要: 采用 5%、10% 和 15% 的粉煤灰等量替代水泥配制混凝土, 通过抗压强度、抗折强度、劈裂抗拉强度试验以及硫酸侵蚀、吸水率和孔隙率测试, 研究不同替代率下混凝土的力学性能及抗硫酸侵蚀性能。结果表明: 粉煤灰替代率为 10% 时, 混凝土养护 28 d 后的抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度均达到最优; 当替代率增至 15% 时, 各项强度明显下降。硫酸侵蚀作用下, 混凝土抗压强度损失率和质量损失率均随粉煤灰替代率增加而增大, 高替代率条件下劣化更为明显。与此同时, 混凝土吸水率和孔隙率随粉煤灰替代率增加而增加, 表明其内部结构在酸性环境中更易受损。综合来看, 适量粉煤灰可改善混凝土力学性能, 但过高替代率不利于其抗硫酸侵蚀性能, 研究成果可为粉煤灰混凝土的工程应用提供试验依据。

关键词: 粉煤灰; 混凝土; 耐久性; 抗压强度损失; 孔隙率

中图分类号: TU528

文献标志码: A

文章编号: 1005-8249 (2026) 03-0079-05

DOI: 10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.03.013

Research on the Influence of Fly Ash Replacement Rate on the Mechanical Properties and Sulfuric Acid Resistance of Concrete

YIN Jian

(Beijing Urban Construction Real Estate Development Co., Ltd., Beijing 100010, China)

Abstract: Concrete was prepared by replacing cement with 5%, 10%, and 15% fly ash in equal amounts. The mechanical properties and sulfuric acid resistance of the concrete under different replacement rates were investigated through compressive strength, flexural strength, splitting tensile strength tests, sulfuric acid attack tests, water absorption tests, and porosity tests. The results showed that when the fly ash replacement rate was 10%, the compressive strength, flexural strength, and splitting tensile strength of the concrete reached their optimal values after 28 days of curing. When the replacement rate increased to 15%, all strengths decreased significantly. Under sulfuric acid attack, the loss rate of compressive strength and the loss rate of mass of the concrete increased with the increase of the fly ash replacement rate, with more significant deterioration under high replacement rate conditions. Simultaneously, the water absorption and porosity of the concrete increased with the increase of the fly ash replacement rate, indicating that its internal structure is more susceptible to damage in an acidic environment. In summary, an appropriate amount of fly ash can improve the mechanical properties of concrete, but an excessively high replacement rate is detrimental to its sulfuric acid attack resistance. This study provides experimental evidence for the engineering application of fly ash concrete.

Key words: fly ash; concrete; durability; compressive strength loss; porosity

材料科学

0 引言

在持续推进城市更新与基础设施高质量发展的背景下，混凝土材料性能提升与低碳化应用逐渐成为工程建设领域关注的重要问题^[1]。粉煤灰作为燃煤电厂排放量较大的工业固体废弃物，具有来源广、产量大和潜在火山灰活性等特点，将其用于混凝土中，不仅有助于减少固体废弃物堆存带来的环境压力，还可在一定程度上降低水泥用量，具有较好的资源化利用价值与工程应用意义。

近年来，国内外学者围绕粉煤灰混凝土的性能开展了系列研究。在力学性能方面，苏升煜等^[2]研究表明，干法碳酸化处理可显著提升高钙粉煤灰的固碳能力，并通过促进有利水化产物形成与孔结构致密化，提高其活性与工程应用性能；杜婷等^[3]研究指出，粉煤灰和矿渣等微细矿物掺料可通过填充效应与火山灰反应协同改善再生混凝土基体结构；陆进保^[4]采用正交试验分析了PVA纤维长度、体积掺量及粉煤灰掺量对加筋混凝土抗压性能的影响，结果表明合理掺配有助于提升混凝土承载性能；张明磊等^[5]发现粉煤灰对混凝土强度改善作用与界面过渡区结构优化有关。在耐久性性能方面，陈义国等^[6]指出，再生骨料预处理可通过内养护效应促进水化反应进行，从而改善粉煤灰再生骨料混凝土的力学特性；周均昊等^[7]通过分析酸性介质作用下混凝土的力学劣化行为，发现粉煤灰基地聚物混凝土具有较低的质量损失率和强度衰减率；陈瑞芸等^[8]在不同pH值条件下开展耐酸性分析，认为粉煤灰混凝土虽发生一定劣化，但其整体耐久性性能优于普通水泥混凝土；杨林等^[9]认为，粉煤灰通过降低体系中可反应钙相含量并促进凝胶结构致密化，有助于提高材料化学稳定性；车志豪等^[10]基于渗透与扩散试验指出，粉煤灰的二次火山灰反应可降低孔隙连通性，从而延缓侵蚀介质传输过程。此外，部分学者还对粉煤灰混凝土的工作性及早期性能进行了研究。王振波等^[11]发现粉煤灰掺入后可改善拌合物流动性，但对早期强度发展的影响受掺量与养护条件制约；魏荣华等^[12-13]从水化产物演化、孔结构分布及界面过渡区特征等方面研究了粉煤灰混凝土的性能变化机理，认为粉煤灰可通过微集料效应与火山

灰反应共同改善材料内部结构；赵晏等^[14]研究了粉煤灰混凝土的抗渗性、抗冻性及长期服役性能，发现适宜掺量下粉煤灰有助于提高混凝土抵御外界环境作用的能力；刘梦晶等^[15]研究粉煤灰混凝土的渗透性能发现，适量粉煤灰有助于优化材料孔结构并降低介质传输能力，但当掺量较高且龄期较短时，其抗渗性能提升并不显著。总体来看，现有研究主要集中于粉煤灰混凝土的力学性能、耐久性能及作用机理等方面，但针对具体工程环境下不同粉煤灰掺量混凝土力学响应及酸性介质作用下性能变化规律的研究仍有待进一步开展。

基于此，选取不同粉煤灰替代率混凝土为研究对象，开展其力学性能及抗硫酸侵蚀性能试验研究。通过抗压、抗折和劈裂抗拉试验分析粉煤灰替代率对混凝土力学性能的影响，并结合孔隙率和吸水率测试表征其内部结构特征；同时在酸性介质条件下考察混凝土质量损失和强度劣化行为，揭示粉煤灰替代率对混凝土力学性能、耐久性能及孔结构变化的影响规律，为粉煤灰混凝土的工程应用提供试验依据。

1 试验材料与方法

1.1 原材料

胶凝材料采用42.5级普通硅酸盐水泥和粉煤灰。水泥密度为3.12 g/cm³，初凝时间为46 min，终凝时间为358 min，标准稠度为33%，安定性膨胀值为2.18 mm，90 μm方孔筛筛余率为3.77%。粉煤灰为F类Ⅰ级粉煤灰，密度为2.33 g/cm³，比表面积为475 m²/kg，其主要化学成分见表1。

表1 粉煤灰主要化学组分

Table 1 The main chemical composition of fly ash /%					
SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	Na ₂ O	Fe ₂ O ₃	CaO
60.04	1.22	23.96	0.52	4.83	2.91

粗细集料分别采用干燥洁净的河卵石和河砂。粗集料最大粒径为20 mm，相对密度为2.72，吸水率为1.12%。细集料为河砂，饱和面干状态下相对密度为2.64，吸水率为1.23%。

1.2 试件制备

以5%、10%、15%比例的粉煤灰替代水泥制备混凝土，试件编号分别为FA-05，FA-10，FA-15，

设置基准组 (FA-00) 粉煤灰不可替代水泥。并测试其力学性能, 混凝土配合比见表 2。共制备三类试件: 150 mm 立方体用于抗压与侵蚀试验, 100 mm×100 mm×500 mm 棱柱体用于抗折试验, $\phi 150$ mm×300 mm 圆柱体用于劈裂抗拉试验。所有试件均经分层振捣成型, 以保证内部密实无缺陷。

表 2 混凝土配合比
Table 2 Concrete mix proportion

编号	水泥	粉煤灰	水	砂	石
	/(kg/m ³)				
FA-00	384.0		192	680	1 210
FA-05	364.8	19.2	192	680	1 210
FA-10	345.6	38.4	192	680	1 210
FA-15	326.4	57.6	192	680	1 210

1.3 试验方法

抗压强度试验采用 150 mm×150 mm×150 mm 立方体试件, 抗折强度试验采用 100 mm×100 mm×500 mm 棱柱体试件, 净跨 300 mm, 劈裂抗拉强度试验采用 $\phi 150$ mm×300 mm 圆柱体试件。力学性能试验均按 GB/T 50081—2019《普通混凝土力学性能试验方法标准》进行, 试件经标准养护 28 d 后测试。其中, 抗折强度采用三点弯曲加载方式测定。

采用硫酸侵蚀试验评价耐久性。将标准养护 28 d 后的立方体试件置于硫酸溶液中侵蚀, 先在 pH 值为 1.5 条件下侵蚀 30 d, 再在 pH 值为 0.6 条件下继续侵蚀 90 d。试验期间定期监测并调整溶液 pH 值, 每月更换一次溶液, 以保持侵蚀环境稳定。

孔隙率与吸水率于侵蚀前后测试表征混凝土内部孔结构特征, 并分析硫酸侵蚀作用下孔结构演化规律。

2 结果与分析

2.1 基本力学性能测试

2.1.1 抗压强度

由图 1 可知, 在替代率不超过 10% 时混凝土抗压强度呈现明显的上升趋势; 当替代率为 15% 时, 各龄期抗压强度均出现下降, 且低于基准混凝土的抗压强度, 表明过量掺入粉煤灰将不利于混凝土强度的发展。粉煤灰替代率为 10% 的试件在 3、7、28 d 龄期的抗压强度相较于基准值分别提升了约

12.31%、5.72%、13.16%, 这说明适量掺入粉煤灰有利于改善混凝土的早期及长期抗压性能。

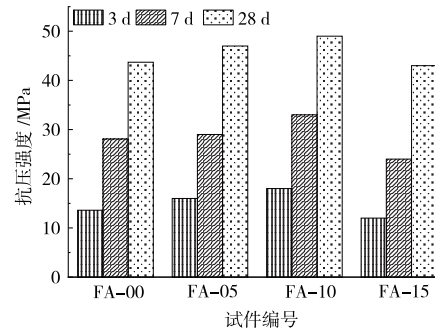


图 1 粉煤灰替代率对混凝土抗压强度的影响

Fig. 1 Effect of different fly ash admixtures on the compressive strength of concrete

2.1.2 抗折强度

由图 2 可知, 随着粉煤灰替代率的增加, 混凝土抗折强度先升高后降低, 其中 FA-10 达到峰值; 对于 FA-15, 抗折强度明显下降, 说明过量粉煤灰不利于抗弯承载能力的发挥。相较基准混凝土, FA-10 试件的抗折强度提升约 13.78%。该现象可能与适量粉煤灰参与水化反应、促进 C-S-H 凝胶生成有关, 从而改善了混凝土基体结构并提高了抗折承载能力。

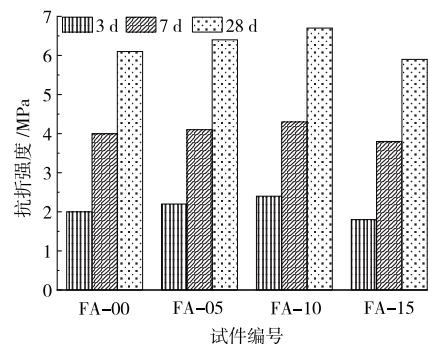


图 2 粉煤灰替代率对混凝土抗折强度的影响

Fig. 2 Effect of different fly ash dosages on the flexural strength of concrete

2.1.3 劈裂抗拉强度

由图 3 可知, 劈裂抗拉强度的变化趋势与抗折强度基本一致。随着粉煤灰替代率增加, 混凝土劈裂抗拉强度在一定范围内有所提高。FA-05、FA-10 28 d 劈裂抗拉强度比基准混凝土分别提高了 3.81%、9.53%。然而, 对于 FA-15, 劈裂抗拉强度开始下

材料科学

降,其 28d 强度比基准混凝土降低了约 3.2%。混凝土劈裂抗拉强度在 FA-10 时达到最优水平,表明适量粉煤灰不仅有助于改善混凝土的力学性能,同时仍可保持良好的工作性;而过量掺入则会削弱混凝土的整体抗拉承载能力。

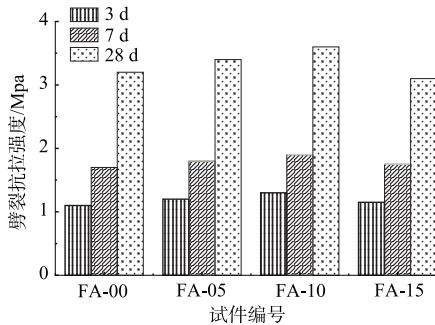


图3 粉煤灰替代率对混凝土劈裂抗拉强度的影响
Fig. 3 Effect of different fly ash dosages on splitting tensile strength of concrete

2.2 硫酸盐侵蚀作用

2.2.1 抗压强度和重量损失

由图 4 可知,随着粉煤灰替代率的提高,两项劣化指标整体呈上升趋势,说明较高粉煤灰替代率会对混凝土耐硫酸侵蚀性能产生不利影响。侵蚀 30 d 后,FA-05、FA-10、FA-15 的混凝土抗压强度损失率分别为 20.37%、22.87%、26.39%;侵蚀时间延长至 90 d 后,抗压强度损失率分别为 42.65%、45.78%、49.83%。质量损失率的变化趋势与抗压强度劣化规律基本一致,表明硫酸侵蚀作用下混凝土的质量损失与强度衰减具有良好的对应关系。

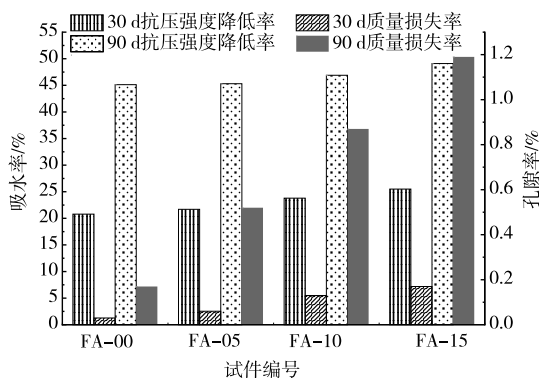


图4 粉煤灰替代率对混凝土抗压强度和重量损失的影响
Fig. 4 The effect of fly ash content on the compressive strength and mass loss of concrete

2.2.2 孔隙率与吸水率

由图 5 可知,硫酸侵蚀前和侵蚀 90 d 后的测试结果显示,不掺粉煤灰的混凝土吸水率和孔隙率最低。随着粉煤灰替代率增加,这两项指标逐渐升高,在高替代率时尤为明显。侵蚀 90 d 后,随着粉煤灰替代率由低到高增加,混凝土吸水率分别上升到约 6.51%、7.96%、8.75%。这一变化规律与抗压强度损失率和质量损失率的结果相符,说明增加粉煤灰会使混凝土内部孔结构变得疏松,降低其抗硫酸侵蚀的能力。

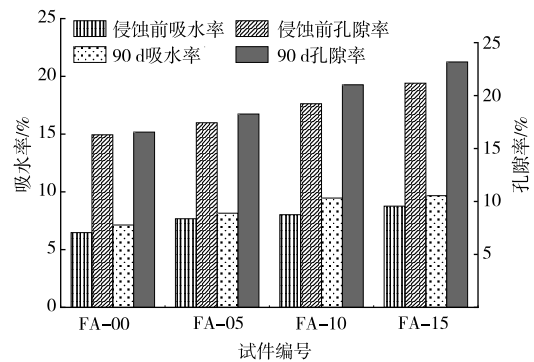


图5 混凝土硫酸侵蚀前后的吸水率和孔隙率
Fig. 5 Water absorption and porosity of concrete before and after sulfuric acid attack

3 结论

通过力学性能试验、硫酸侵蚀试验及孔结构参数测试,分析了粉煤灰对混凝土力学性能、抗硫酸侵蚀性能及孔结构特征的影响规律。得到结论如下:

(1) 粉煤灰替代水泥对混凝土力学性能影响显著。随取代率增加,混凝土抗压强度、抗折强度及劈裂抗拉强度均呈先增后降的变化规律,其中 FA-10 时各项强度指标达到峰值。

(2) 当粉煤灰替代率超过适宜范围后,其活性效应和填充效应减弱,水化反应受限,导致混凝土内部结构致密性下降,力学性能降低。

(3) 在硫酸侵蚀作用下,混凝土性能随侵蚀时间延长而持续劣化。随粉煤灰替代率增加,试件质量损失率和抗压强度损失率整体增大,表明高粉煤灰替代率不利于混凝土发挥抗硫酸侵蚀性能。

(4) 硫酸侵蚀前后,混凝土吸水率和孔隙率均随粉煤灰替代率增加而升高,且高替代率条件下孔

结构疏松化更为明显,说明粉煤灰过量取代水泥会削弱混凝土内部结构的致密性。

参 考 文 献

- [1] 杨航东. 钢管混凝土叠合柱-钢筋混凝土梁节点抗震性能 [J]. 华北地震科学, 2024, 42 (3): 26-34.
- [2] 苏升煜, 韩艳娜, 冯国瑞, 等. CO₂ 浓度对高钙粉煤灰高温固碳性能及其火山灰活性的影响 [J]. 工程科学学报, 2025, 47 (9): 1965-1978.
- [3] 杜婷, 帅小根, 石雯, 等. 粉煤灰-矿渣再生混凝土抗压强度及尺寸效应研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (2): 2142-2147.
- [4] 陆进保. 纤维增强粉煤灰加筋混凝土抗压强度性能研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 20-23, 48.
- [5] 张明磊, 许海楠. 超高海拔风机塔筒基础底板掺粉煤灰混凝土疲劳特性分析 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (5): 85-89.
- [6] 陈义国, 齐仕杰, 纪续, 等. 粉煤灰再生骨料混凝土力学性能及微结构演变 [J]. 粉煤灰综合利用, 2025, 39 (1): 13-17, 23.
- [7] 周均昊, 杨淑雁. 基于机器学习的硫酸盐侵蚀环境下混凝土抗压强度预测 [J]. 科学技术与工程, 2025, 25 (30): 13075-13083.
- [8] 陈瑞芸, 盛敏, 胡杰, 等. 新型水泥土搅拌桩胶凝材料固化地基土性能研究 [J]. 湖南大学学报 (自然科学版), 2025, 52 (5): 108-117.
- [9] 杨林, 房敬年, 彭志宇. 盐渍土地区水工隧洞混凝土硫酸盐腐蚀机理分析与抗腐蚀试验研究 [J]. 混凝土, 2025 (6): 108-115, 121.
- [10] 车志豪, 王家滨, 张凯峰, 等. 多元胶凝材料体系再生混凝土复合盐侵蚀耐久性退化规律 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (8): 2733-2742.
- [11] 王振波, 刘小慧, 张悦宁, 等. 粉煤灰及混杂纤维对 ECC 流变与力学行为的影响 [J]. 华中科技大学学报 (自然科学版), 2026, 54 (2): 85-91.
- [12] 魏荣华, 张康健, 张志强. 冻融环境混凝土配合比优化试验研究 [J]. 地下空间与工程学报, 2025, 21 (4): 1211-1218, 1227.
- [13] 王珣, 张康健, 郭金龙, 等. 基于细观力学模型的冻融混凝土性能劣化研究 [J]. 现代隧道技术, 2024, 61 (6): 209-218.
- [14] 赵晏, 朱学军, 靳凯戎, 等. 冻融循环作用下再生细骨料砂浆的氯离子扩散特性 [J]. 建筑材料学报, 2025, 28 (12): 1199-1206, 1273.
- [15] 刘梦晶, 谢友均, 上官明辉, 等. 低真空条件对混凝土中介质迁移性能的影响 [J]. 中南大学学报 (自然科学版), 2023, 54 (9): 3535-3543.

E-mail: fmhzhly@163.com