

建筑垃圾 - 粉煤灰双掺混凝土耐久性研究

叶安利, 韦日强

(广西永正工程质量检测有限公司, 南宁 530221)

摘要: 研究建筑垃圾再生骨料与粉煤灰双掺混凝土在多种恶劣环境下的耐久性性能, 探讨二者协同作用机制, 为工业固废资源化利用提供理论依据。以建筑垃圾再生骨料与粉煤灰为双掺材料制备混凝土, 系统评估其在冻融循环、盐性环境和酸性环境下的耐久性性能。结果表明: 粉煤灰掺量为 15% 时, 混凝土抗压强度最高, 质量损失仅为 0.02 g, 耐蚀系数达 0.996, 表现出最优的抗侵蚀能力与长期稳定性, 耐久性表现良好。再生骨料掺量为 30% 时, 混凝土在多种恶劣环境中的相对动弹性模量保持较高水平, 结构稳定性良好; 粉煤灰与再生骨料之间存在协同增强效应, 适量粉煤灰 (15%) 可填充再生骨料界面孔隙, 提升密实性; 适量再生骨料 (30%) 则能显著提升抗冻性与耐腐蚀性。粉煤灰与再生骨料在适量掺配下具有协同增强效应, 可提升混凝土的密实性、抗冻性与耐腐蚀性, 具有良好的工程应用前景。

关键词: 建筑垃圾; 粉煤灰; 双掺混凝土; 耐久性; 再生骨料; 相对弹性模量

中图分类号: TU528.31 文献标志码: A 文章编号: 1005-8249 (2026) 02-0029-07

DOI:10.19860/j.cnki.issn1005-8249.2026.02.005

Study on Durability of Concrete Mixed with Construction Waste and Fly Ash

YE Anli, WEI Riqiang

(Guangxi Yongzheng Construction Quality Test Co., Ltd., Nanning 530221, China)

Abstract: Study the durability performance of recycled construction waste aggregate and fly ash mixed concrete in various harsh environments, explore the synergistic mechanism of the two, and provide theoretical basis for the resource utilization of industrial solid waste. Prepare concrete using recycled construction waste aggregates and fly ash as dual admixture materials, and systematically evaluate its durability performance under freeze-thaw cycles, saline environments, and acidic environments. The results showed that when the fly ash content was 15%, the compressive strength of concrete was the highest, with a mass loss of only 0.02 g and a corrosion resistance coefficient of 0.996, exhibiting the best corrosion resistance and long-term stability, and good durability. When the content of recycled aggregate is 30%, the relative dynamic elastic modulus of concrete remains at a high level in various harsh environments, and the structural stability is good. There is a synergistic enhancement effect between fly ash and recycled aggregate, and an appropriate amount of fly ash (15%) can fill the interface pores of recycled aggregate to improve compactness; Moderate recycled aggregate (30%) can significantly improve frost resistance and corrosion resistance. Fly ash and recycled aggregates have a synergistic enhancement effect when mixed in appropriate amounts, which can improve the compactness, frost resistance, and corrosion resistance of concrete, and have good engineering application prospects.

Key words: construction waste; fly ash; binary-blended concrete; durability; recycled aggregate; relative elastic modulus

材料科学

0 引言

传统混凝土制备技术存在资源消耗大、碳排放高、性能单一等问题,难以满足复杂工程环境对材料耐久性的严苛要求。因此,优化混凝土制备工艺、提升其耐久性能,已成为保障基础设施全生命周期安全与经济性的关键科学问题^[1-2]。

然而,再生骨料混凝土(RAC)的广泛应用受限于其固有的耐久性缺陷。再生骨料表面附着旧砂浆、内部微裂纹多、孔隙率高,导致其制备的混凝土存在界面过渡区(ITZ)薄弱、吸水率高、有害孔隙连通等问题,在冻融、盐蚀、酸蚀等多重因素作用下性能劣化加速^[3]。为改善RAC性能,掺加矿物掺合料是常见且有效的技术手段之一。粉煤灰凭借其微集料填充效应和火山灰活性,能够显著优化混凝土的微观结构。研究表明,粉煤灰的球形颗粒可有效填充骨料-浆体界面孔隙,其活性成分能与水泥水化产物反应生成更多C-S-H凝胶,从而增强ITZ并阻断有害孔隙的连通^[4-5]。罗加辉等^[6]研究了碱性激发剂对粉煤灰混凝土耐久性的促进机理;翟思敏等^[7]则探讨了不同粉煤灰取代率对再生混凝土综合性能的影响,均证实了粉煤灰的改良作用。

除粉煤灰外,学者们还探索了多种改性技术以进一步提升混凝土性能。吴亚敏等^[8]引入多壁碳纳米管(MWCNTs)以增强粉煤灰混凝土的力学与耐久性能;吕大为^[9]采用表面改性PVA纤维增强粉煤灰混凝土;张启懿等^[10]则研究了NaOH激发对粉煤灰混凝土微结构及抗冻融性能的改善作用;李倩等^[11]对双掺矿物掺合料混凝土的碳化性能;任亚伟等^[12]研究了电石渣-粉煤灰体系;杜婷等^[13]探讨了粉煤灰-矿渣再生混凝土的性能;孔萌萌等^[14]分析了超低温下粉煤灰-硅灰双掺砂浆的表现;郑永娟^[15]对聚丙烯颗粒改性混凝土的研究,均从不同角度丰富了固废利用与混凝土性能提升的理论与实践。

基于此,研究通过人工分拣去除建筑垃圾中的木料、塑料等较大杂质,再用液压锤处理较大混凝土垃圾,经振动给料机筛除细小杂质与泥土后,制备再生粗骨料;按设计配合比将再生骨料、粉煤灰等材料混合搅拌,制备建筑垃圾-粉煤灰双掺混凝土并进行标准养护;并进行冻融循环、盐性环境、

酸性环境测试,结合扫描电子显微镜观察微观形貌,分别探究粉煤灰掺量、再生骨料掺量对双掺混凝土力学性能与耐久性能的影响,进而分析粉煤灰与再生骨料的协同作用机制,旨在改善该双掺混凝土的耐久性,为工业固废大规模资源化利用提供理论依据,推动混凝土技术向绿色化、高性能化发展。

1 材料方法

1.1 材料试剂

再生粗骨料来源于南宁市多个拆除施工现场,经破碎、筛分与清洗处理,其粒径范围为5~25 mm且连续级配,压碎指标为15.2%,吸水率为6.97%,相关性能符合GB/T 25177—2010《混凝土用再生粗骨料》要求。所用粉煤灰为Ⅱ级,细度以45 μm筛余计为18.5%,需水量比为98%,烧失量为3.2%,满足GB/T 1596—2017《用于水泥和混凝土中的粉煤灰》的规定。胶凝材料采用P·O 42.5普通硅酸盐水泥,其性能符合GB 175—2007《通用硅酸盐水泥》要求。细骨料为天然河砂,细度模数2.6,属中砂范畴,含泥量低于1.0%。减水剂为聚羧酸系高性能减水剂,减水率不低于25%。拌合水为普通自来水,水质满足JGJ 63—2006《混凝土用水标准》的规定。粉煤灰中的主要成分见表1。

表1 粉煤灰成分

Table 1 Composition of fly ash									/%
化学成分	二氧化硅	氧化铝	氧化铁	氧化钙	氧化镁	三氧化硫	氧化钠	氧化钾	
含量	40.81	17.31	18.63	15.93	0.97	1.06	0.82	1.88	

为使骨料混合均匀,先将预湿饱和的再生骨料与细骨料一同倒入搅拌机中干拌5 min,随后投入粉煤灰和水泥,保证胶凝材料与骨料均匀混合,干拌时间设定为3 min。将减水剂溶解在水中,再将溶液倒入搅拌机中湿拌3 min。将浆料倒入模具中,轻微振捣排出空气,防止再生骨料因强度较低而破碎。掺加粉煤灰的双掺混凝土早期水化较慢,且再生骨料界面薄弱,必须加强保湿养护。浇筑完毕后应立即覆盖塑料薄膜或湿麻袋,防止水分蒸发,静置12 h后达到终凝状态,拆模浇水叠加标准养护28 d。

1.2 建筑垃圾-粉煤灰双掺混凝土制备工艺

1.2.1 建筑垃圾预处理

首先通过人工分拣去除建筑垃圾中的木料、塑料等较大杂质,减少这些杂质对混凝土耐久性的影

响。随后使用液压锤处理其中较大的混凝土垃圾，将粒径适中的建筑垃圾输送至振动给料机，筛除其中的细小杂质和泥土。筛除后将这些物料转移至鄂式破碎机中，通过该设备将物料破碎成较小粒径，破碎后包裹在建筑垃圾中的金属杂质会被分离出来。使用磁选机筛分后，再经圆锥式破碎机进行二次破碎，使物料粒径初步控制在 ≤ 25 mm，随后送入配套的 GZ 型振动筛进行分级筛分，筛分出 5~10、10~20、20~25 mm 三个粒级，按质量比 2:5:3 混合形成 5~25 mm 连续级配的颗粒；完成筛分组合后，使用轮

式洗砂机多次清洗物料，去除颗粒表面附着的粉尘、泥屑，保证该物料的清洁度，最终获得 5~25 mm 连续级配的再生粗骨料，备用。该再生骨料各项基础参数见表 2。

表 2 建筑垃圾基础参数

Table 2 Basic parameters of construction waste

参数内容	表观密度 / (kg/m ³)	堆积密度 / (kg/m ³)	实际空隙率 / %	压碎规范 / %	实际压碎值 / %	吸水率 / %
数值	2 789	1 458	51	<22	15.2	6.97

1.2.2 双掺混凝土制备

制备混凝土时，设计材料配合比结果见表 3。

表 3 双掺混凝土配合比

Table 3 Mix proportion of double-mixed concrete

材料名称	有效拌合水	水泥	粉煤灰	胶凝材料总量	有效水胶比	再生粗骨料	天然砂	减水剂	预浸泡水	总用水量
参考用量 / (kg/m ³)	185	302	53	355	0.52	1 150	720	2.91	58	243
误差 / %	±1	±1	±1			±2	±2	±1		

注：1. 有效拌合水指直接参与水泥水化反应及混凝土搅拌成型的水量，不包含预浸泡骨料的水分；预浸泡水仅用于预湿润再生粗骨料，避免搅拌过程中骨料额外吸水导致实际水胶比偏离设计值，不参与水胶比计算。2. 有效水胶比计算依据：有效水胶比 = 有效拌合水 / 胶凝材料总量，该比例是控制混凝土水化程度、孔结构细化及耐久性能的核心参数。3. 再生粗骨料需经预浸泡处理至水饱和状态，确保搅拌时不再吸收有效拌合水，保证混凝土工作性与力学性能稳定性。

为严格控制水胶比精度及混凝土制备一致性，制定标准化流程如下：首先按配合比称量 1 150 kg/m³ 再生粗骨料，置于密闭容器中加入 58 kg/m³ 预浸泡水，搅拌均匀后密封静置 24 h，确保骨料内部孔隙完全饱和且表面无明水^[16]；随后分别精准称量天然砂 720 kg/m³、P·O 42.5 普通硅酸盐水泥 302 kg/m³、II 级粉煤灰 53 kg/m³、聚羧酸系减水剂 2.91 kg/m³ 备用；干拌阶段将预浸泡后沥干的再生粗骨料与天然砂一同倒入 JS500 型混凝土搅拌机，干拌 5 min 确保骨料混合均匀，再加入称量好的水泥与粉煤灰继续干拌 3 min，使胶凝材料均匀包裹骨料表面；湿拌阶段将减水剂完全溶解于 185 kg/m³ 有效拌合水中，搅拌均匀后倒入搅拌机湿拌 3 min 至浆料均匀细腻，期间轻微振捣排出气泡，避免再生骨料因振捣过度破碎；最后将搅拌完成的混凝土浆料倒入模具按标准流程振捣成型，浇筑后立即覆盖塑料薄膜保湿，静置 12 h 终凝后拆模，采用温度 (20 ± 2) °C、相对湿度 ≥ 95% 的标准养护条件养护 28 d。

1.3 耐久性能讨论

从冻融循环、盐性环境干湿循环、酸性环境干湿循环等多个角度分析该双掺混凝土的耐久性能。冻融循环耐久性测试通过冻融循环机进行；盐性环境通过 5% NaCl 溶液模拟，酸性环境通过 pH = 3~4

的 H₂SO₄ 溶液模拟，通过干湿循环浸泡实现测试耐久性^[17]。

冻融循环试验设计：标准养护 28 d 后，将双掺混凝土试样置于冻融试验机试验盒之中，倾倒入清水没过各个试样，每 3 h 冻融循环一次，冻时温度为 (-18 ± 2) °C，融时温度为 (5 ± 2) °C。试验共进行 150 次循环，每 10 次循环更换一次清水，并测试试件的质量、横向基频和抗压强度。相对动弹性模量按公式 (1) 计算：

$$E_r = \frac{f_n^2}{f_0^2} \times 100\%$$

式中： E_r 为相对动弹性模量，%； f_0 为初始基频，Hz； f_n 为第 n 次循环后的基频，Hz。

盐性环境试验设计：使用浓度为 5% 的 NaCl 溶液作为盐性环境浸泡液，试件浸泡 15 h 后取出，表面擦干，置于 (60 ± 2) °C 烘箱中烘干 5 h，随后室温放置 4 h，进行 24 h 干湿循环。试验共进行 150 次循环。每 5 次循环更换一次 NaCl 溶液，以维持 Cl⁻ 浓度稳定。试验结束后测试质量损失、抗压强度及耐蚀系数。耐蚀系数计算公式为：

$$K = \frac{f_{c,e}}{f_{c,\omega}}$$

式中： K 为耐蚀系数； $f_{c,e}$ 为侵蚀环境下试件抗压强

材料科学

度, MPa; $f_{c,w}$ 为清水中同龄期试件抗压强度, MPa。

酸性环境试验设计: 采用 H_2SO_4 溶液调节 pH 至 3.0 ± 0.2 模拟酸性环境。干湿循环制度同盐性环境试验, 共进行 150 次循环。每 5 次循环检测并调节溶液 pH 至 3.0 ± 0.2 , 确保酸性环境稳定。试验结束后测定试件质量损失、抗压强度及耐蚀系数。

1.3.1 不同粉煤灰用量对耐久性影响

设定再生骨料(建筑垃圾)用量为 30%, 调整粉煤灰掺量分别为 0、12%、15%、18%, 制备出试样, 分别经冻融循环和多环境干湿循环后, 使用万能试验机测试耐久性相关性能参数。

1.3.2 不同再生骨料用量对耐久性影响

将粉煤灰用量设定为 15%, 调整再生骨料掺量分别为 0、15%、30%、45%, 制备出试样, 分别经冻融循环和多环境干湿循环后, 使用万能试验机测试耐久性相关性能参数。

1.3.3 SEM 对比

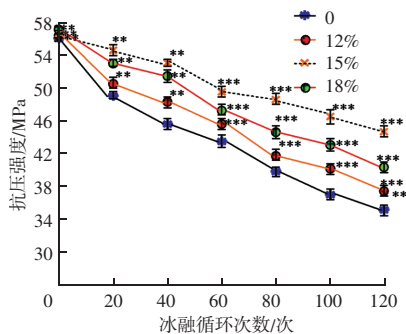
通过上述试验确定粉煤灰 15% 用量, 再生骨料(建筑垃圾) 30% 用量时, 双掺混凝土的耐久性能最佳。使用扫描电子显微镜分析单掺 15% 粉煤灰、单掺 30% 再生骨料、双掺 15% 粉煤灰和 30% 再生骨料的混凝土的微观形貌, 获得 SEM 图像。

2 结果分析

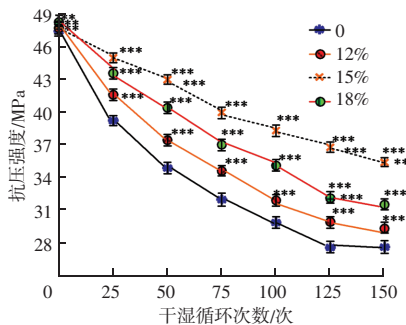
2.1 粉煤灰对双掺混凝土耐久性影响

粉煤灰用量对双掺混凝土抗压强度及动弹性模量变化。本研究每组设置 3 个平行试件采用单因素方差分析比较不同粉煤灰掺量组间的差异显著性, 显著性水平 α 为 0.05。如图 1 (a) 所示, 双掺混凝土中粉煤灰用量增加, 会导致其抗压强度提高, 用量在 15% 时, 抗压强度达到峰值, 用量超过 15% 后, 该强度反而下降, 这种情况是由于混凝土中适量粉煤灰可有效改善混凝土的密实性, 减少冻融损伤, 粉煤灰过多导致胶凝材料体系碱度降低、水化反应减缓有关。由图 1 (b) 可知, 在中盐性环境中, 适量使用粉煤灰 (15%) 能提升双掺混凝土的力学性能, 但是过少或者过多使用粉煤灰, 均不利于性能提升, 这种情况是由于粉煤灰的火山灰反应会使混凝土发生 C-S-H 凝胶变化, 填充混凝土孔隙, 氯

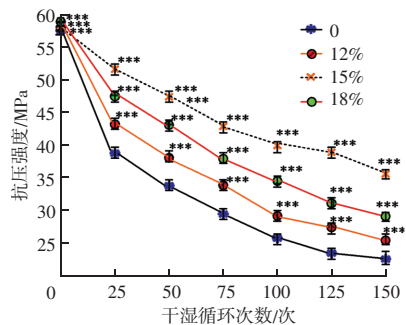
离子不能轻易渗入混凝土内部, 延缓盐性腐蚀对混凝土的影响。由图 1 (c) 可知, 在酸性环境中, 适量粉煤灰 (15%) 的使用有利于双掺混凝土的耐久性发展, 但过量粉煤灰 (18%) 会降低体系碱度, 延缓水化, 尤其在酸性环境中易受侵蚀, 显著降低其耐久性。



(a) 冻融循环



(b) 盐性环境



(c) 酸性环境

图 1 粉煤灰用量对耐久性影响

Fig. 1 Shows the influence of fly ash dosage on durability

分析酸性环境中, 该双掺混凝土随粉煤灰用量变化后, 质量损失与耐蚀系数变化见表 4。

粉煤灰颗粒(尤其是其中的玻璃微珠)粒径微小, 远小于水泥颗粒。当粉煤灰掺量为 12%、15% 时, 这些微珠可以有效填充水泥颗粒与再生骨料之间界面过渡区(ITZ)的孔隙, 使混凝土的孔结构更

表 4 质量损失率与耐蚀系数

Table 4 Mass loss rate and corrosion resistance coefficient

粉煤灰用量/%	质量损失率/%	耐蚀系数
0	0.67 ± 0.12	0.889 ± 0.012
12	0.38 ± 0.08	0.929 ± 0.008
15	0.08 ± 0.04	0.996 ± 0.004
18	0.33 ± 0.08	0.949 ± 0.007

加细化、球化。同时,粉煤灰中的活性 SiO_2 和 Al_2O_3 能与水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 发生二次水化反应,生成更多稳定、致密、高强度的 C-S-H 凝胶。C-S-H 凝胶是混凝土强度的主要来源,其结构稳定且耐酸性显著优于 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 。因此,混凝土的整体耐腐蚀能力得到提升。

粉煤灰的微填充效应和火山灰反应能显著增强 ITZ 的密实度和强度,有效阻隔酸液通过 ITZ 向内部扩散的路径。这对改善再生骨料混凝土的耐久性至关重要。

由表 4 可知,粉煤灰用量为 15%,双掺混凝土的质量损失最小,同时耐蚀系数最高。说明该粉煤灰用量下,双掺混凝土的耐腐蚀性能显著提升,即使在酸性环境中,也能提升该混凝土的耐久性。

2.2 再生骨料对双掺混凝土耐久性影响

相对动弹性模量也是验证混凝土耐久性变化的关键参数,不同再生骨料用量下,双掺混凝土的耐久性变化如图 2 所示。

2.3 SEM 分析结果

所有样品均经标准养护 28 d 后取样,采用异丙醇终止水化,60 °C 真空烘干至恒重,喷金厚度约 10 nm 后,使用 ZS400D 型扫描电子显微镜在 15 kV 加速电压下观察。每组样品至少观测 3 个不同视场,确保图像代表性。各试验样品的 SEM 图像如图 3 所示。由图 3 (a) 可知,单掺粉煤灰时,粉煤灰颗粒表面发生火山灰反应,生成的凝胶填充部分孔隙,提升了混凝土的密实性。但由于缺乏再生骨料的支撑,界面过渡区仍存在一定数量的微裂纹和孔隙,限制了耐久性的进一步提升。由图 3 (b) 可知,再生骨料表面粗糙,存在较多初始微裂纹和孔隙,与水泥基体之间的界面过渡区较为明显,存在较多裂缝和未充分水化的区域。由图 3 (c) 可知,双掺混凝土结构最为致密均匀,粉煤灰颗粒充分填充再生骨料界

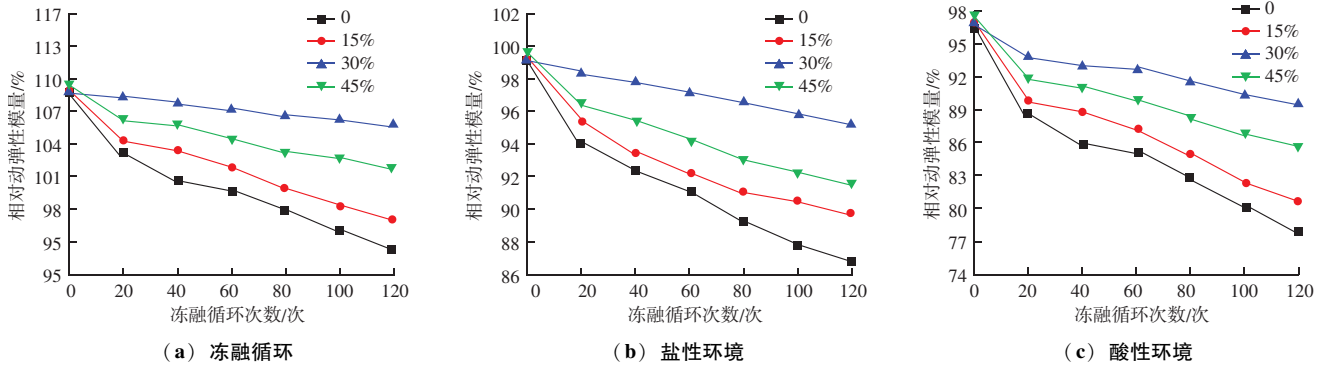
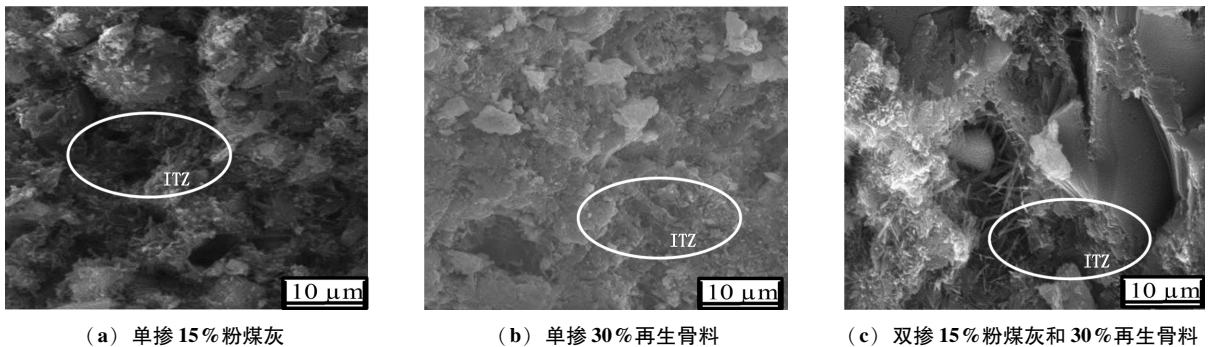


图 2 再生骨料用量对耐久性影响

Fig. 2 The influence of the amount of recycled aggregates on durability



(a) 单掺 15% 粉煤灰

(b) 单掺 30% 再生骨料

(c) 双掺 15% 粉煤灰和 30% 再生骨料

图 3 SEM 分析结果

Fig. 3 SEM analysis results

材料科学

面处的孔隙和微裂纹,大量生成凝胶覆盖于再生骨料表面,形成连续、致密的过渡层,提升了宏观耐久性能。

为定量揭示粉煤灰与再生骨料在双掺体系中的协同增强效应,弥补单因素试验在交互作用分析上的不足,本研究增设一组 2×3 因子辅助试验在固定水胶比 0.52、砂率等配合比参数与主体试验一致条件下,选取粉煤灰掺量 (0、15%) 与再生骨料掺量 (0、30%、45%) 进行全组合设计,共制备 6 组混凝土试件,依次为 FA0-RCA0、FA15-RCA0、FA0-RCA30、FA0-RCA45、FA15-RCA30 及 FA15-RCA45。各组对应的粉煤灰掺量与再生骨料掺量分别为 0 与 0、0 与 15%、0 与 30%、0 与 45%、15% 与 30%、15% 与 45%。各组试件经标准养护 28 d 后,分别进行 150 次冻融循环及盐性、酸性环境干湿循环试验,测定其相对动弹性模量保持率。基于基准组 (FA0-RCA0) 引入协同指数 S,定量评估二者交互作用。通过对比双掺组与单掺组的性能差异,从统计与机理层面验证“ $1+1>2$ ”的协同增强效应,从而为双掺体系的优化提供更充分的试验依据。试验结果见表 5。

表 5 协同效应验证试验配合比及试验结果
Table 5 Mix proportions and test results of synergy effect verification experiment

组别编号	冻融循环后	盐性环境后	酸性环境后	协同指数 S (冻融)
	相对动弹性 模量保持率 /%	相对动弹性 模量保持率 /%	相对动弹性 模量保持率 /%	
FA0-RCA0	82.5	85.2	80.1	
FA15-RCA0	88.3	90.7	87.6	
FA0-RCA30	84.1	86.5	81.9	
FA0-RCA45	80.8	83.4	78.5	
FA15-RCA30	92.7	94.5	91.8	1.18
FA15-RCA45	89.4	91.2	88.3	1.05

由表 5 可知,在冻融、盐性与酸性三种恶劣环境中,双掺组 FA15-RCA30 的相对动弹性模量保持率均显著高于各单掺组及基准组,表现出最优的耐久性能。协同指数计算显示,FA15-RCA30 组在冻融环境下的 S 值为 1.18 (>1),FA15-RCA45 组 S 值为 1.05 (>1),表明粉煤灰与再生骨料在适宜掺量下确实存在明显的协同增强效应。这一结果验证了“ $1+1>2$ ”的协同作用,其机理可归因于粉煤灰的微填充与火山灰反应有效改善了再生骨料界面过渡

区的微观结构,而再生骨料的合理掺入则为体系提供了稳定的骨架支撑,二者协同作用提升了混凝土的密实性与环境抵抗力。

3 结论

以建筑垃圾再生骨料与粉煤灰为双掺材料制备混凝土,通过预处理建筑垃圾以获得再生骨料,按设计配合比制备双掺混凝土并对其进行标准养护;随后通过冻融循环、盐性环境、酸性环境下的性能测试,结合扫描电子显微镜观察微观形貌,系统评估双掺混凝土的耐久性能,分别探究不同粉煤灰掺量与再生骨料掺量对耐久性的影响。得出以下结论:

(1) 当粉煤灰掺量为 15% 时,双掺混凝土耐久性最优,在冻融循环、盐性及酸性环境中抗压强度最高,酸性环境下质量损失仅 0.02 g,耐蚀系数达 0.996,抗侵蚀能力与长期稳定性突出。

(2) 再生骨料掺量为 30% 时,混凝土在多种恶劣环境中相对动弹性模量保持较高水平,结构稳定性良好,综合耐久性最佳。

(3) 粉煤灰与再生骨料存在协同增强效应,15% 粉煤灰可通过微填充效应与火山灰反应,填充再生骨料界面过渡区的微裂纹和孔隙以提升密实性,30% 再生骨料则能在保证强度的同时,显著提升混凝土抗冻性与耐腐蚀性,共同改善双掺混凝土的耐久性能。二者在该掺配比例下效果最佳,显示出良好的工程应用前景。

研究主要通过 SEM 定性评估微观结构,为进一步验证双掺体系的孔结构优化与产物演变规律,未来可结合 XRD、TG-DSC 对水化产物进行物相分析,并通过 MIP 或氮吸附法量化孔隙分布,从而建立“孔结构—产物组成—耐久性能”之间的定量关系模型,为材料设计提供更系统的理论依据。

参 考 文 献

- [1] 罗加辉,龚爱民,邵善庆,等. 碱激发混杂玄武岩纤维粉煤灰混凝土耐久性研究 [J]. 水力发电, 2024, 50 (8): 94-102.
- [2] 倪坤,廖述聪,王梦宇,等. 粉煤灰-矿渣超细复合粉对混凝土耐久性的影响 [J]. 建筑技术, 2023, 54 (19): 2324-2327.
- [3] 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.

(3) 掺入硅灰和矿渣粉的 PPC, 在 25 次冻融循环后的残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度影响较小, 100 次冻融循环后的残余抗压强度、残余劈裂抗拉强度值高于基准组, 降幅显著低于基准组; 掺硅灰和矿渣粉可提升 PPC 抗冻能力, 单掺 10% 的硅灰最佳, 复掺 5% 硅灰 + 5% 矿渣粉次之。

参 考 文 献

- [1] 张阳. 高强透水混凝土制备及在园林景观道路中的应用研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2023, 37 (4): 64-68.
- [2] 韩云婷, 杨利香, 严世聪. 粗骨料对透水混凝土性能的影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 85-88.
- [3] 刘红, 曲广雷, 宋佳康, 等. 多孔混凝土透水性能试验及预测模型研究 [J]. 混凝土, 2025 (4): 241-246.
- [4] 梁锦程, 喻林, 陈建国. 硅灰掺量对多孔混凝土强度和植生性能的影响 [J]. 混凝土与水泥制品, 2025 (1): 91-95.
- [5] 周大福, 陈代果, 杨福俭, 等. 材料组成对透水混凝土性能的影响研究 [J]. 混凝土, 2024 (8): 120-124.
- [6] 李崇智, 任强伟, 孙箫然, 等. C40 透水混凝土配合比设计及性能研究 [J]. 材料导报, 2022, 36 (增刊 2): 209-213.
- [7] 国越皓, 宋思成, 孙建伟. 无机增强材料对透水混凝土强度和

渗透性的影响 [J]. 人民黄河, 2024, 46 (10): 154-157, 162.

- [8] 王玥. 掺硅灰多孔混凝土本构关系及微观结构研究 [D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2018.
- [9] 温煦, 赵朋, 汤畅. 超细矿渣粉及可再分胶粉对透水混凝土的性能影响研究 [J]. 粉煤灰综合利用, 2020, 34 (1): 45-48, 93.
- [10] 陈尚鸿, 林佳福, 杨政险, 等. 钢渣 - 矿渣透水混凝土力学性能的试验研究 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (5): 1767-1777.
- [11] 刘沛, 姚素玲, 董宪妹, 等. 矿物掺合料透水混凝土微观结构及性能分析 [J]. 硅酸盐通报, 2023, 42 (7): 2504-2512.
- [12] 吴庆, 朱袁洁, 许耀, 等. 基于 SEM 和 XRD 微观测试下单掺矿物掺合料透水混凝土性能分析 [J]. 江苏科技大学学报 (自然科学版), 2020, 34 (3): 112-118.
- [13] 梁巧, 桑正辉, 伍松云, 等. 掺矿渣生态多孔混凝土的冻融试验 [J]. 湖南文理学院学报 (自然科学版), 2017, 29 (4): 81-84.
- [14] 张贵, 高婷. 生态多孔混凝土冻融试验方法探讨 [J]. 湖南文理学院学报 (自然科学版), 2017, 29 (1): 91-94.
- [15] 聂清念, 杨永民, 刘晓飞, 等. 高强承压多孔混凝土的抗冻融性能研究 [J]. 人民珠江, 2021, 42 (1): 53-59.

(上接第 34 页)

- [4] 陈辉, 陈芳芳. 石墨烯增韧粉煤灰混凝土的制备及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2023, 54 (5): 5198-5203.
- [5] 邵善庆, 龚爱民, 屈宝莉, 等. 冻盐耦合作用下掺碱粉煤灰混凝土的劣化规律 [J]. 水力发电学报, 2024, 43 (5): 115-122.
- [6] 罗加辉, 龚爱民, 王福来, 等. 碱性激发剂掺量对粉煤灰混凝土耐久性的分析 [J]. 湖北农业科学, 2024, 63 (12): 178-184.
- [7] 翟思敏, 黄金霞. 建筑用不同取代率粉煤灰再生混凝土的力学性能及耐久性能研究 [J]. 功能材料, 2024, 55 (4): 4121-4126.
- [8] 吴亚敏, 段君峰, 张莉, 等. 多壁碳纳米管对粉煤灰混凝土的力学和耐久性能的影响 [J]. 功能材料, 2024, 55 (9): 9229-9236.
- [9] 吕大为. PVA 纤维增强粉煤灰混凝土的力学性能及耐久性分析 [J]. 功能材料, 2025, 56 (2): 2201-2207, 2213.
- [10] 张启懿, 邹春霞, 郭晓松, 等. NaOH 改善粉煤灰混凝土微结构及抗风蚀-冻融耐久性能 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2024, 54 (4): 131-140.

- [11] 李倩, 毛诗洋, 孙彬, 等. 大比例双掺矿物掺合料混凝土碳化性能试验研究 [J]. 建筑科学, 2024, 40 (9): 66-71.
- [12] 任亚伟, 蔡燕霞, 刘逢涛. 电石渣、粉煤灰稳定煤矸石基层混合料性能试验研究 [J]. 公路工程, 2023, 48 (1): 74-78, 97.
- [13] 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.
- [14] 孔萌萌, 崔云鹏, 李洪斌, 等. 超低温环境下双掺粉煤灰及硅灰对砂浆力学性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2024, 51 (9): 30-34.
- [15] 郑永娟. 粉煤灰和塑料废料对混凝土力学和耐久性能的影响 [J]. 塑料科技, 2024, 52 (7): 105-108.
- [16] 秦哲焕, 周志刚, 朱国军, 等. 粉煤灰 - 矿粉超细复合型矿物掺合料对混凝土耐久性能的影响 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (6): 66-69, 79.
- [17] 李炳良, 陶李尧, 罗健林, 等. 内掺粉煤灰/再生砖粉的再生砂浆收缩及冻融耐久性能 [J]. 新型建筑材料, 2023, 50 (7): 42-46.