

研究论文

DOI: 10.63221/ecsp.v2i04.1-7

亮点:

- 采用低温等离子体技术对再生骨料进行物理刻蚀与化学活化协同表面改性
- 界面过渡区宽度由 65 μ m 缩减至 42 μ m, ITZ 显微硬度提 30.2%
- 28d 抗压强度由 32.8MPa 提升至 38.5MPa, 增幅 17.4%, 达到 C35 等级要求

*通讯作者邮箱:

1250383437@qq.com

英文引用: Li Ruina et al., 2026. Optimizing the interfacial structure of recycled aggregate concrete using low-temperature plasma technology. Evidence in Engineering Science and Practice, 2 (04), 1-7.

中文引用: 李瑞娜等, 2026. 低温等离子体技术优化再生骨料混凝土界面结构. 工程科学与实践, 2 (04), 1-7.

稿件处理节点:

接收	2026 年 09 月 28 日
修订	2026 年 10 月 08 日
接受	2026 年 10 月 08 日
发表	2026 年 10 月 12 日

基金资助:

本研究未收到基金资助。

版权:

本作品原创内容可依据《知识共享署名 4.0 国际许可协议》条款使用。任何对本作品的后续分发须标明原作者及作品标题、期刊引用及 DOI 信息。

低温等离子体技术优化再生骨料混凝土界面结构

李瑞娜^{1,*}, 李长明²

¹ 华北水利水电大学, 郑州 450046

² 长垣烹饪职业技术学院, 新乡 453400

摘要 我国年产建筑垃圾已逾 35 亿吨, 其中废弃混凝土占 60%~70%, 而再生骨料混凝土因界面过渡区微观缺陷造成的性能劣化, 难以用于承重结构。研究探讨的核心问题是: 低温等离子体表面改性能否从根本上强化再生骨料与水泥浆体的界面结合, 从而突破其性能瓶颈。研究以表面改性理论与界面增强机理为框架, 以某企业提供的拆除 C30 废弃混凝土再生骨料为对象, 骨料经清洗、破碎分级与干燥后, 在氧气低温等离子体环境中完成表面活化, 按 C30 等级设计配合比, 以 50%~100%取代率制备混凝土试件; 借助扫描电子显微镜-能谱分析、显微硬度测试与抗压强度试验, 建立微观结构与宏观性能的跨尺度关联。结果表明: 处理后骨料表面砂浆附着层厚度由 2.1mm 降至 0.6mm, 吸水率由 6.8%降至 4.2%, 接触角由 78°降至 31°; 界面过渡区宽度由 65 μ m 缩减至 42 μ m, 降幅 35.4%, 界面区显微硬度由 68.5HV 提升至 89.2HV, Ca/Si 比由 1.8 降至 1.3; 混凝土 28d 抗压强度由 32.8MPa 提高至 38.5MPa, 增幅 17.4%, 达到 C35 等级要求, 优于传统化学改性方法的 8%~15%。研究揭示了物理刻蚀与化学活化协同增强界面的作用机理, 构建了“处理参数—表面特性—界面结构—宏观性能”跨尺度分析框架, 为建筑垃圾资源化与土木工程可持续发展提供了新途径。

关键词: 低温等离子体; 再生骨料混凝土; 界面过渡区; 表面改性; 固废资源化; 抗压强度

Optimizing the interfacial structure of recycled aggregate concrete using low-temperature plasma technology

Li Ruina^{1,*}, Li Changming²

¹ North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China

² Changyuan Vocational and Technical College of Cuisine, Xinxiang 453400, China

Abstract China generates over 3.5 billion tons of construction and demolition waste annually, of which waste concrete accounts for 60%-70%, yet recycled aggregate concrete remains unsuitable for load-bearing structures owing to micro-defects in its interfacial transition zone (ITZ). The study addressed the question of whether low-temperature plasma surface modification can fundamentally strengthen the aggregate-cement paste interface and thereby overcome this performance bottleneck. Framed by surface-modification theory and interface-reinforcement mechanisms, the research used recycled aggregates derived from a demolished C30 concrete structure and supplied by a construction-waste recycling enterprise. After washing, crushing, grading and drying, the aggregates were activated in an oxygen low-temperature plasma environment, and C30-grade concretes were prepared with natural coarse aggregate replacement ratios of 50%-100%. Scanning electron microscopy with energy-dispersive spectroscopy, microhardness testing and compressive strength tests were combined to establish cross-scale links between microstructure and macroscopic performance. The results showed that the adhered mortar layer thinned from 2.1 mm

to 0.6 mm, water absorption decreased from 6.8% to 4.2%, and the contact angle dropped from 78 to 31 degrees, indicating a hydrophobic-to-hydrophilic transition. The ITZ width was reduced from 65 μm to 42 μm (a 35.4% decrease), ITZ microhardness increased from 68.5 HV to 89.2 HV, and the interfacial Ca/Si ratio fell from 1.8 to 1.3, approaching that of the cement matrix. The 28-day compressive strength rose from 32.8 MPa to 38.5 MPa, a 17.4% gain that meets the C35 grade requirement and exceeds the 8%-15% improvements reported for conventional chemical modification. The study reveals the synergistic mechanism of physical etching and chemical activation, establishes a cross-scale framework linking treatment parameters, surface characteristics, ITZ structure, and macroscopic performance, and provides a green route for construction waste recycling and sustainable civil engineering.

Keywords: low-temperature plasma; recycled aggregate concrete; interfacial transition zone; surface modification; solid waste recycling; compressive strength

1. 引言

随着我国工业化和城市化进程的发展,大量老旧建筑物被拆除,产生大量的废弃混凝土,严重污染了环境^[1]。同时,我国基础建设的快速发展对天然砂石等原材料需求过大而导致资源匮乏。将废弃混凝土制备成再生骨料并作为混凝土原材料使用,不仅可以解决废弃混凝土的处理问题,还可以节省大量的天然资源,实现资源与环境的可持续发展^[2]。大量研究表明,再生骨料通常由原生骨料和附着旧砂浆组成,存在孔隙率高、强度低、吸水率大等性能缺点,严重制约了其在工程建设中的大规模及高掺量使用^[3]。

针对 ITZ 的强化,研究者探索了多种改性方法。文献^[4]利用纳米纤维素的填充与桥接效应改善 ITZ 微观结构,但纳米材料分散性控制仍是制约因素。文献^[5]系统总结了物理强化与化学活化的多种手段,指出传统方法存在能耗高、二次污染或界面增强效果有限的不足。国外学者亦较早将等离子体技术引入骨料表面改性领域,利用大气压介质阻挡放电等手段改善骨料表面润湿性及其与水泥基体的界面粘结,验证了等离子体活化提升界面性能的有效性,但相关研究多集中于天然骨料或单一表面特性评价,针对再生骨料处理参数优化及界面结构跨尺度关联的系统研究仍较缺乏^[6]。近年研究表明,低温等离子体表面处理可在不改变材料本体性能的前提下,通过物理刻蚀与化学接枝协同改性材料表面。基于此,引入低温等离子体技术对再生骨料进行表面处理。利用低温等离子体中的高能粒子轰击骨料表面,清除薄弱附着层并引入活性官能团,以期实现骨料-基体界面的化学键合增强,为再生骨料混凝土界面结构优化提供一条绿色高效的技术途径。

2. 再生骨料预处理与低温等离子体活化

2.1. 再生骨料预处理

再生骨料来自废弃混凝土破碎产物,表面附着大量老旧水泥砂浆,该附着层疏松多孔、微裂纹密集,且含有粉尘、泥土等杂质。预处理的核心任务是将附着层和杂质从骨料表面有效清除,同时保留骨料自身的完整性,为后续低温等离子体活化提供清洁、干燥的表面条件。

预处理操作按顺序执行:清洗、破碎分级、干燥和筛分。清洗工序采用机械搅拌与高压水冲洗结合的方式,去除骨料表面粘附的泥土、粉尘及可溶性

盐类。冲洗后的骨料经破碎机进一步处理,调整颗粒级配至连续级配范围(5~25mm)^[7]。清洗破碎后的骨料置于鼓风干燥箱中,在 105℃条件下连续干燥 24h 至恒重,含水率控制在 0.5%以下。干燥后经标准筛筛分,剔除粒径超出范围的颗粒,确保后续低温等离子体处理批次间骨料粒径的一致性。

高压水冲洗的冲击力与搅拌摩擦的剪切力协同作用使附着层中强度较低的疏松部分优先脱落。经过预处理的骨料封装于密封袋中,标注处理批次与日期,存储于干燥环境中,存放时间不超过 48h 即进入低温等离子体活化处理工序。

2.2. 低温等离子体活化处理

在低温等离子体反应腔室中进行再生骨料活化处理,处理前将预处理骨料均匀平铺于石英舟内,单层铺放以保证低温等离子体与骨料表面充分接触。石英舟置入反应腔室后抽真空至本底压力 5Pa,随后按设定流量通入处理气体,稳定腔室压力至工作压力 30~60Pa。

本文正式试验处理气体统一为高纯氧气(O₂,纯度≥99.99%),处理条件统一为:放电功率 300W, O₂流量 50 mL/min,腔室工作压力 50Pa,腔室温度 -20℃,处理时间 10min,单批次处理量 2kg。50%、75%和 100%取代率所用再生骨料均取自同一批预处理骨料,并在相同等离子体条件下完成活化,以保证组间可比性。本文正式试验低温等离子体处理条件见表 1。

表 1 本文正式试验低温等离子体处理条件

参数	设定值
处理气体	高纯 O ₂ (纯度≥99.99%)
O ₂ 流量	50 mL/min
放电功率	300 W
腔室工作压力	50 Pa
腔室温度	-20℃
处理时间	10 min
单批处理量	2 kg
适用再生骨料取代率	50%、75%、100%

氧气低温等离子体中的氧自由基与高能电子撞击骨料表面,将骨料表面附着层中的有机污染物氧化为 CO₂和 H₂O 等气态产物并抽离腔室^[8]。物理刻蚀过程中高能粒子轰击骨料表面薄弱区域,使附着层微裂纹扩展并剥落。化学活化过程中氧低温等离子体在骨料表面引入含氧极性基团。基团的引入使骨

料表面由疏水向亲水转变，与新拌水泥浆体的接触角降低。低温等离子体刻蚀速率 E 与放电功率 P 和处理时间 t 相关。在一定功率范围内，刻蚀速率随功率增大而提高，随处理时间延长趋于饱和，该关系可表示为：

$$E = \delta \cdot P^\gamma \cdot t^\mu \quad (1)$$

式中， δ 为低温等离子体反应设备常数； γ 、 μ 分别为功率指数与时间指数，由低温等离子体诊断实验确定。活化处理完成后，关闭放电电源，持续通入保护气体 5min 冷却骨料至室温。经活化处理的再生骨料表面灰白色附着层明显减少，暴露出原生骨料的底色，表面粗糙度增加^[9]。

3. 再生骨料混凝土配制与界面结构增强

3.1. 配合比设计

活化骨料与水泥浆体之间的界面结合强度取决于骨料表面化学活性与物理形貌的协同作用。混凝土配合比按 C30 强度等级设计^[9-11]，如表 2 所示。

表 2 再生骨料混凝土配合比 (kg/m³)

再生 骨料 取代 率/%	天然粗 骨料 kg/m ³	活化 再生 粗骨 料	细骨料 (砂)	水泥 (P·O 42.5)	水	砂 率 /%	水 胶 比
0	1100	0	720	420	189	40	0.45
50	550	550	720	420	189	40	0.45
75	275	825	720	420	189	40	0.45
100	0	1100	720	420	189	40	0.45

依照表 2，配合比设计采用固定材料总量法：各组水泥、水、砂用量保持不变（水胶比 0.45，砂率 40%），粗骨料总用量恒为 1100kg/m³，活化再生骨料按等质量方式取代天然粗骨料，取代率分别为 50%、75%和 100%。需要说明的是，再生骨料混凝土常因再生骨料吸水率高而需预湿或附加拌合水^[12]，本试验各取代率下均未设置附加拌合水：一方面，经预处理与低温等离子体活化后，骨料吸水率已由 6.8%降至 4.2%，接近天然骨料水平，附加需水量大幅降低；另一方面，附加拌合水易在骨料表面形成自由水膜，稀释并屏蔽活化引入的含氧极性基团，削弱界面化学键合效果。搅拌过程中先将活化骨料与水泥投入搅拌机干混 30s，使水泥颗粒均匀附着于骨料表面，再依次加入砂和水湿拌 120s。成型混凝土在标准养护室养护至规定龄期，养护温度 20±2℃，相对湿度 95%以上^[13]。

本文配合比设计虽包含 50%、75%和 100%三种再生骨料取代率，但正文结果部分重点报告 100%取代率。其原因在于：100%取代率为再生骨料性能劣化最严重、ITZ 缺陷最集中的最不利工况，可最直接检验低温等离子体改性是否足以突破再生骨料混凝土用于承重结构的性能瓶颈；50%和 75%组主要用于验证取代率梯度下的规律一致性。

3.2. 界面增强机制

低温等离子体活化在骨料表面引入了高密度的含氧极性基团，这些基团与水泥颗粒表面的钙离子、硅酸根离子之间存在化学亲和性。在水泥水化初期，含氧基团与液相中的钙离子发生络合反应，在骨料表面形成富钙层。该富钙层为后续水化产物的成核提供优先位点，使水化硅酸钙凝胶在骨料表面直接生长而非悬浮于液相中成核后沉积，缩短了界面过渡区中疏松层的形成区间^[14]。同时，基团的存在还降低了骨料表面与水泥浆体之间的界面张力，使浆体在骨料表面铺展更充分，减少了界面处滞留的空气和自由水。

物理形貌方面，低温等离子体刻蚀在骨料表面形成了微米级凹凸结构，增大了骨料与水泥浆体的实际接触面积。接触面积增加使界面处的机械互锁效应增强。骨料表面化学活性与物理形貌协同增强示意如图 1 所示。

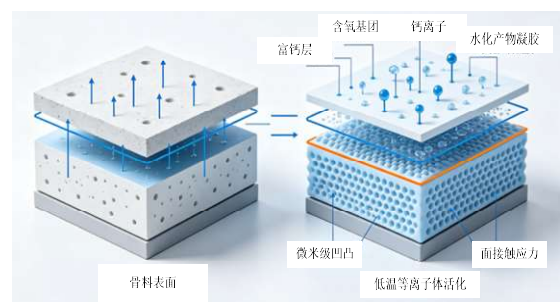


图 1 骨料表面化学活性与物理形貌协同增强示意图

4. 结果与分析

4.1. 表面改性效果与 ITZ 微观结构

以某建筑垃圾资源化企业的再生骨料为实验对象。再生骨料来源于拆除的 C30 混凝土结构，经颞式破碎后筛分得到 5~25mm 连续级配粗骨料^[15]。初始骨料表面附着砂浆层平均厚度为 2.1mm，吸水率为 6.8%，表观密度为 2460kg/m³。低温等离子体处理在定制反应腔室中进行，处理参数依据前期正交试验确定：处理气体为高纯 O₂，放电功率 300W，

氧气流量 50mL/min, 腔室工作压力 50Pa, 腔室工作温度为 -20℃, 处理时间 10min。单批次处理量为 2kg。处理后骨料表面附着砂浆层厚度降至 0.6mm, 吸水率降至 4.2%, 接触角由 78°降至 31°, 表明含氧极性基团已有效接枝。同时, 骨料本体性能基本保持不变: 表观密度由 2460kg/m³微降至 2458kg/m³, 压碎指标由 14.5%变为 14.6%, 变化幅度均在测试误差范围内, 说明低温等离子体的作用深度仅限于骨料表面微米级层面, 未对骨料本体强度造成损伤。再生骨料低温等离子体处理现场如图 2 所示。



图 2 再生骨料低温等离子体处理现场图

依据配合比设计方案制备再生骨料混凝土试件。设活化再生骨料取代率为 100%, 水胶比 0.45, 砂率 40%。养护 28d 后取界面过渡区试样进行显微硬度测试。界面过渡区显微硬度测试结果如下表 3 所示。

表 3 界面过渡区显微硬度对比

试样类型	ITZ 平均宽度/ μm	ITZ 显微硬度/HV	基体显微硬度/HV	硬度比 (ITZ/基体)
优化前	65	68.5	112.3	0.61
优化后	42	89.2	114.6	0.78

由表 3 可知, 低温等离子体处理后, ITZ 宽度由 65 μm 缩减至 42 μm , 降幅 35.4%, 说明低温等离子体刻蚀清除了表面疏松附着层, 活性基团改善了骨料与浆体的化学键合, 界面处的水化产物分布更均匀、密实度提高。显微硬度由 68.5HV 提升至 89.2HV, 增幅 30.2%。SEM-EDS 分析表明, 优化后 ITZ 中 Ca/Si 比由 1.8 降至 1.3, 更接近水泥基体中的 Ca/Si 比, 界面结合由机械咬合为主向化学键合为主转变^[16]。

4.2. 宏观力学性能

对优化前后再生骨料混凝土试件进行抗压强度测试, 采用 100mm×100mm×100mm 立方体试件, 养护 28d 后测试^[13,17]。测试结果如下图 3 所示。

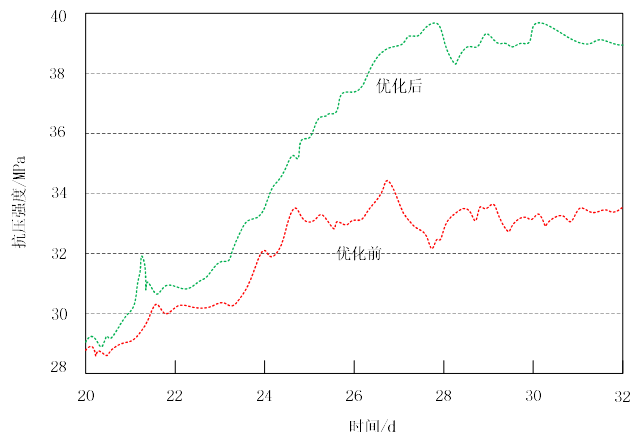


图 3 优化前后混凝土界面结构抗压强度对比

从上图可以看出, 低温等离子体处理后 28d 抗压强度为 38.5MPa, 较未处理组提高 17.4%, 达到或超过 C35 强度等级要求。这是因为低温等离子体处理的物理刻蚀清除表面薄弱层、化学接枝引入活性基团的协同作用, 在骨料表面创造了有利于水化产物成核与生长的化学环境, 使 ITZ 区域的水化硅酸钙凝胶填充更充分, 孔隙率降低、结构致密化。该结果验证了低温等离子体技术在再生骨料界面结构优化中的可行性。

5. 机理讨论

5.1. 物理刻蚀与化学活化协同

低温等离子体对再生骨料表面的改性可归因于物理刻蚀与化学活化的耦合作用。在物理刻蚀方面, 等离子体中的高能电子、正负离子及激发态中性粒子以 10~100eV 的能量持续轰击骨料表面, 使表面附着砂浆层中的 C-Si、C-O、Si-O 等化学键断裂, 弱边界层不断剥落; 同时高能粒子撞击造成表面微裂纹尖端应力集中, 促使微裂纹沿晶界或弱结合面扩展, 加速附着砂浆层的清除。物理刻蚀过程不仅去除了原有的疏松附着层, 还在骨料表面形成了微米级至亚微米级的凹凸结构, 显著增大了骨料的比表面积和表面粗糙度。

在化学活化方面, 氧气等离子体中的氧原子、氧分子离子、臭氧等含氧活性物种与暴露的骨料表面发生化学反应, 在表面引入大量含氧极性基团 (如 -OH、-COOH、Si-O 等), 使骨料表面由低表面能的疏水性状态转变为高表面能的亲水性状态。同时, 含氧基团的存在使骨料表面与水泥浆体中的 Ca²⁺、硅酸根离子等形成化学键合或氢键连接, 为后续水

化产物的成核与生长提供了优先位点。文献^[6]对等离子体处理纤维-水泥基体界面进行了研究,发现等离子体活化可显著提高界面粘结;文献^[8]表明低温等离子体处理可引入极性基团并增强防水卷材与混凝土界面粘接力;文献^[18]关于硅烷改性再生砖骨料混凝土的微观分析也表明,表面化学改性可改善界面过渡区结构。上述研究支持化学活化对界面键合的贡献,但物理刻蚀与化学活化的相对贡献多通过单一处理条件间接推断。在本文体系中,物理刻蚀增大的比表面积可能为化学活化提供更多活性位点,而化学活化形成的极性表面又可能促进水泥颗粒在骨料表面的均匀润湿与铺展,二者耦合共同提升界面结合性能。后续需设置惰性气体等离子体(以物理刻蚀为主)与 O₂等离子体(物理刻蚀+化学活化)等对照试验,并结合 XPS、FTIR、BET 及骨料拔出试验,进一步定量区分二者贡献。

5.2. 微观-宏观性能的关联性分析

微观结构与宏观性能之间存在显著的跨尺度关联性。低温等离子体处理后,ITZ 宽度由 65 μm 缩减至 42 μm ,意味着界面弱区的空间尺度大幅压缩,应力集中程度显著降低;ITZ 显微硬度由 68.5HV 提升至 89.2HV,与基体硬度(114.6HV)的比值由 0.61 提升至 0.78,界面与基体的力学性能梯度明显减小,使混凝土在受荷过程中应力传递更为均匀,避免了界面区的过早破坏。微观结构的优化最终体现在宏观抗压强度的显著提升,28d 抗压强度由 32.8MPa 提升至 38.5MPa,增幅达 17.4%,达到或超过 C35 强度等级要求。

本研究中强度提升幅度(17.4%)高于纳米纤维素改性(约 8%~12%)^[4]和硅烷偶联剂改性(约 10%~15%)^[18]等传统方法的报道值,表明低温等离子体技术在改性效率和效果上具有优势。该优势主要源于物理刻蚀与化学活化的协同作用,以及等离子体活性物种的高反应活性。但本研究样本量有限,统计显著性有待扩大样本验证;等离子体处理的长期稳定性、对不同类型骨料的适用性等仍需深入研究。

6. 结论

本文通过系统的实验研究和机理分析,验证了低温等离子体技术优化再生骨料混凝土界面结构的可行性和有效性,主要研究结论如下:

(1) 低温等离子体处理可在基本不损伤再生骨料本体的前提下实现表面高效改性。处理后骨料表面砂浆附着层厚度由 2.1mm 降至 0.6mm,吸水率由 6.8%降至 4.2%,接触角由 78°降至 31°,表面化学活性显著提升;骨料压碎指标由 14.5%仅变为 14.6%,表观密度保持在 2458kg/m³以上,本体性能未受损伤,为“不改变骨料本体性能”提供了试验佐证。

(2) 经 O₂低温等离子体处理的再生骨料所制备的混凝土,界面过渡区(ITZ)宽度由 65 μm 缩减至 42 μm ,降幅达 35.4%;ITZ 显微硬度由 68.5HV 提升至 89.2HV,增幅达 30.2%;与基体的硬度比由 0.61 提升至 0.78,界面弱区效应显著弱化。

(3) 微观结构的优化显著提升了混凝土的宏观力学性能,28d 抗压强度由 32.8MPa 提升至 38.5MPa,增幅 17.4%,达到 C35 强度等级要求。

本文系统地将低温等离子体技术应用于再生骨料表面改性,揭示了 O₂低温等离子体条件下物理刻蚀与化学活化协同增强再生骨料-水泥浆体界面结合的作用机理,建立了“等离子体处理参数—骨料表面特性—ITZ 微观结构—宏观力学性能”的跨尺度关联。

后续研究应扩大样本范围,探索等离子体处理长期稳定性、对不同类型骨料的适用性,开发大功率、大容量处理设备,并研究其对混凝土耐久性的影响,推动工程化应用。

参考文献

- [1] 骆艳杰,赵薇. 建筑垃圾资源化利用及其生命周期评价的研究进展[J]. 环境污染与防治, 2024, 46(6): 901-907.
- [2] 马昆林,刘建,申景涛,等. 骨料强化方法对再生混凝土多界面过渡区微观结构的影响[J]. 铁道科学与工程学报, 2023, 20(10): 3809- 3819.
- [3] 何子明,申爱琴,王路生,等. 再生骨料强化技术及对再生混凝土性能影响研究综述[J]. 吉林大学学报(工学版), 2025, 55(3): 790- 810.
- [4] 邓方茜,唐可,曹聪,等. 纳米纤维素改性的再生混凝土骨料-基体界面微结构表征[J]. 水泥, 2024(11): 8- 13.
- [5] 胡成. 再生骨料混凝土的资源化利用与性能优化[J]. 2026(3): 34- 36.
- [6] Hlůžek R, Trejbal J, Nežerka V, et al. Improvement of bonding between synthetic fibers and a cementitious matrix using recycled concrete powder and plasma treatment:from a single fiber to FRC[J].European Journal of Environmental and Civil Engineering, 2022, 26(9): 3880- 3897.
- [7] GB/T 25177-2010, 混凝土用再生粗骨料[S]. 北京: 中国标准出版社, 2010.

- [8] 陈立斌, 胡豫, 伍盛江, 等. 低温等离子体处理改性及分子接枝增强防水卷材与混凝土界面粘接力[J]. 新型建筑材料, 2024, 51(9): 90-95.
- [9] 叶冕. 再生骨料界面改性对高强混凝土性能的影响研究[J]. 施工技术(中英文), 2026(4): 25- 29.
- [10] 申彦利, 魏冠超, 王鹏, 等. 再生骨料水泥稳定碎石力学性能分析与最优配合比预测[J]. 硅酸盐通报, 2026, 45(7): 2561- 2572.
- [11] JGJ 55- 2011, 普通混凝土配合比设计规程[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2011.
- [12] Sun D S, Huang W, Liu K W, et al. Effect of the moisture content of recycled aggregate on the mechanical performance and durability of concrete[J]. Materials, 2022, 15(18): 6299.
- [13] GB/T 50081-2019, 混凝土物理力学性能试验方法标准[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2019.
- [14] Scrivener K L, Crumbie A K, Laugesen P. The interfacial transition zone (ITZ) between cement paste and aggregate in concrete[J]. Interface Science, 2004, 12(4): 411- 421.
- [15] 周方栋, 张鸿钺, 贾泽昊. 再生骨料混凝土力学性能及耐久性优化试验研究[J]. 全面腐蚀控制, 2026, 40(8): 149-151.
- [16] Poon C S, Shui Z H, Lam L. Effect of microstructure of interfacial transition zone on compressive strength of concrete prepared with recycled aggregates[J]. Construction and Building Materials, 2004, 18(6): 461-468.
- [17] 张孟宇. 再生骨料混凝土路面抗压强度试验检测方法优化[J]. 2026(3): 073-076.
- [18] Ge P, Huang W, Zhang J R, et al. Microstructural analysis of recycled brick aggregate concrete modified by silane[J]. Structural Concrete, 2022, 23(4): 2352-2364.