

建筑垃圾再生骨料混凝土性能提升技术

田 涛

陕西建工第十建设集团有限公司 陕西 西安 710000

摘要：建筑垃圾再生骨料（RCA）是破解“垃圾围城”与资源短缺的关键。本文综述其性能提升技术：预处理方面，物理、化学、生物技术各有优劣，综合评价需多维度考量；混凝土性能提升涵盖配合比优化、外加剂改性、复合改性及特殊性能针对性提升技术；宏观性能研究显示，RAC工作、力学、耐久性能受多种因素影响，通过相应措施可满足工程要求。这些技术推动了建筑产业链向循环经济转型，拓展了RAC应用边界。

关键词：建筑垃圾；再生骨料；混凝土；性能提升

引言：随着城市化进程加速，建筑垃圾大量产生，“垃圾围城”与天然砂石资源短缺问题日益严峻。建筑垃圾再生骨料（RCA）作为绿色建筑骨料，以废弃混凝土等为原料制备，为解决上述问题提供了关键途径。然而，RCA存在吸水率高、压碎值偏高等缺陷，影响其制备的混凝土性能。因此，研究建筑垃圾再生骨料混凝土性能提升技术，对实现“无废城市”、推动绿色建造及拓展RAC应用具有重要意义。

1 建筑垃圾再生骨料核心概述

建筑垃圾再生骨料（RCA）是以建筑拆除垃圾、工程弃料中的废弃混凝土、砖石、砂浆等为原料，经破碎、筛分、除杂、清洗等工艺制备的绿色建筑骨料，是破解“垃圾围城”与天然砂石资源短缺的关键途径。其核心特征源于原料的复合性与加工过程的物理重构，与天然骨料相比，RCA表面附着老砂浆、内部存在微裂纹，导致吸水率高30%~50%、压碎值偏高、表观密度偏低。目前，RCA按品质分为I-III类，分别适用于结构混凝土、非结构混凝土及路基填料等场景。随着智能分选与强化技术的发展，经处理的RCA压碎值可降至12%以下，吸水率控制在5%以内，已能满足C30及以上再生混凝土的使用要求^[1]。作为建筑业碳减排的重要载体，其资源化利用是实现“无废城市”与绿色建造的核心举措，推动建筑产业链从线性消耗向循环经济转型。

2 建筑垃圾再生骨料预处理技术

2.1 物理预处理技术

物理预处理是再生骨料提质的基础工序，核心目标是去除杂质、优化颗粒级配并修复骨料微观缺陷，主要涵盖多级破碎、精准分选与机械强化三大模块。破碎环节采用颚式破碎与冲击式整形联合工艺，既实现骨料减容，又通过颗粒整形降低针片状含量，提升堆积密度。分选技术

以“磁选+风选+近红外光选”为核心，磁选去除钢筋等铁磁性物质，风选分离塑料、木屑等轻质杂质（去除率 $\geq 85\%$ ），近红外与AI视觉识别结合可实现95%以上的混凝土纯度回收。机械强化通过研磨、打磨去除骨料表面老砂浆，搭配高压水射流清洗，有效降低孔隙率与吸水率，使吸水率降至8%以下。另外，高温煅烧（600~800℃）可消除内部微裂缝，进一步提升骨料力学性能，为后续高值化应用奠定基础。

2.2 化学预处理技术

化学预处理通过界面改性与孔隙填充，解决再生骨料表面活性低、毛细孔连通的问题，是提升骨料与水泥浆体粘结性能的关键技术。其核心工艺分为表面改性与孔隙浸渍两类，表面改性常用硅烷偶联剂、硬脂酸等，通过化学键合在骨料表面形成疏水膜，降低24h吸水率40%以上，同时增强界面粘结力。孔隙浸渍采用水泥净浆、硅灰浆液或聚合物乳液，通过真空加压方式填充骨料内部微裂缝与毛细孔，重构致密微观结构。研究表明，经硅烷偶联剂改性的RCA，其混凝土界面过渡区（ITZ）厚度从35 μm 缩减至20 μm 左右，抗压强度提升10%~15%。化学预处理需严格控制溶液浓度、浸渍时间与养护条件，避免因改性剂残留影响混凝土水化过程，目前已在中高强度再生混凝土制备中实现规模化应用。

2.3 生物预处理技术（新型技术）

生物预处理是基于微生物矿化作用的新型改性技术，利用巴氏芽孢杆菌等微生物的代谢活动，在再生骨料表面与孔隙内沉积碳酸钙等矿物质，实现缺陷修复与界面强化。其核心原理是微生物在适宜温湿度与营养条件下，分解有机底物释放碳酸根离子，与骨料中的钙离子结合生成矿化沉积层，填充微裂缝并形成致密保护膜^[2]。该技术具有绿色环保、无二次污染的优势，处理过程温和，

不会破坏骨料颗粒结构。实验数据显示,经生物矿化处理的RCA,其再生混凝土28d抗压强度提高15%~20%,抗冻融循环次数提升至100次以上。目前,生物预处理仍处于产业化初期,核心瓶颈在于矿化效率与成本控制,通过优化微生物菌种、固定化技术与营养体系,有望成为高值化再生骨料制备的核心技术之一。

2.4 预处理技术综合评价

再生骨料预处理技术的综合评价需围绕技术效能、经济成本与环境影响构建多维度指标体系,核心评价指标包括骨料品质提升效果、处理效率、能耗与碳排放等。物理预处理技术成熟度高、处理量大,适合规模化生产线,但其能耗较高,对微裂缝的修复能力有限;化学预处理改性效果显著,能精准调控骨料界面性能,却存在药剂成本高、易造成化学残留的问题;生物预处理绿色环保,界面强化效果突出,但矿化周期长、效率偏低,难以满足大规模连续生产需求。工程应用中,需根据再生骨料原料特性与目标用途选择适配技术,如结构用骨料优先采用“物理整形+化学浸渍”复合工艺,路基填料可采用单一物理分选工艺。未来,评价体系将进一步融入全生命周期理念,推动预处理技术向高效、低碳、智能化方向升级。

3 建筑垃圾再生骨料混凝土性能提升关键技术

3.1 配合比优化技术(基础提升技术)

配合比优化是再生骨料混凝土(RAC)性能提升的基础,核心是基于RAC的吸水特性与界面缺陷,构建“水胶比-替代率-掺合料”协同调控体系。与普通混凝土不同,RAC配合比设计需引入“有效用水量”概念,额外增加5%~10%拌合水补偿骨料初始吸水损失,同时通过聚羧酸减水剂调控流动性,确保坍落度达 $180 \pm 20\text{mm}$ 。再生骨料替代率是核心调控参数,一般场景下控制在30%~50%,可兼顾力学性能与经济性;高强度需求场景则降低至30%以下,并将水胶比控制在0.4以下。此外,双掺粉煤灰(15%~20%)、矿渣粉等矿物掺合料,利用其火山灰活性与填充效应,优化RAC微观结构,降低孔隙率。正交试验与数据驱动模型的应用,实现了配合比的精准优化,当替代率30%、水胶比0.38、粉煤灰掺量15%时,RAC28d抗压强度达35MPa,抗渗等级达P8。

3.2 外加剂改性提升技术

外加剂改性是针对RAC工作性能与耐久性能短板的靶向提升技术,通过高效减水剂、引气剂、膨胀剂等的协同使用,实现性能的精准调控。聚羧酸系高效减水剂(掺量0.8%~1.2%)是核心外加剂,可显著降低用水量,减少孔隙率,同时提升RAC流动性,使坍落度提升20%~

30%,解决高替代率下的坍落度损失问题。引气剂通过引入微小封闭气泡(直径20~50 μm),切断毛细孔通道,提升RAC抗冻性,使抗冻等级达F200以上^[3]。膨胀剂的掺入可补偿RAC的收缩变形,减少早期裂缝,搭配聚丙烯纤维(掺量0.1%~0.3%),可使抗裂性能提升20%以上。外加剂改性需重点关注相容性,针对RAC的高碱环境与骨料吸附特性,优化外加剂掺量与掺加方式,采用“滞水法”掺加可进一步提升保坍效果,为泵送施工提供技术保障。

3.3 复合改性提升技术(核心技术)

复合改性是整合骨料预处理、配合比优化与外加剂调控的核心技术,通过“多尺度协同”实现RAC性能的跨越式提升,是解决高掺量RAC性能劣化的关键。其核心思路是从骨料微观缺陷、界面过渡区(ITZ)强化与基体结构优化三个维度入手,常见组合工艺包括“物理整形+化学浸渍+矿物掺合料双掺”“生物矿化+聚羧酸减水剂+纤维增强”等。例如,硅灰与纳米 TiO_2 复掺可协同优化高掺量RAC性能,硅灰填充孔隙,纳米 TiO_2 促进水化反应,使ITZ显微硬度提升30%以上,氯离子扩散系数降低40%。“物理打磨+硅烷偶联剂改性+钢纤维增强”复合工艺,可使100%替代率的RAC 28d抗压强度提升30%,弹性模量提升25%。复合改性技术的核心是匹配性设计,根据工程场景的强度、耐久性要求,优化工艺组合与参数,目前已在桥梁、市政道路等重点工程中实现应用。

3.4 特殊性能针对性提升技术

特殊性能针对性提升技术是面向极端工程环境的定制化技术,针对海工、寒区、高温、重载等场景的特殊需求,构建专项性能提升体系。海工场景重点提升抗氯离子侵蚀性能,采用“硅烷浸渍+矿渣粉双掺”技术,使氯离子扩散系数降低50%以上,同时掺入阻锈剂,防止钢筋锈蚀。寒区场景聚焦抗冻融性能,通过引气剂引入适宜气泡间距,搭配骨料预饱水技术,使RAC经300次冻融循环后质量损失率控制在3%以内。高温与防火场景,利用RAC导热系数低的优势,掺入陶粒等轻质骨料与防火外加剂,提升耐火极限;重载场景则通过钢纤维增强与配合比优化,提升抗压强度与抗磨损性能,使抗压强度达50MPa以上。该技术以场景需求为导向,融合材料改性与设计,拓展了RAC的应用边界,推动其从普通市政工程向高等级结构工程延伸。

4 再生骨料混凝土宏观性能研究

4.1 工作性能

再生骨料混凝土(RAC)的工作性能主要包括流动性、保水性、黏聚性与坍落度损失特性,其核心影响因

素是再生骨料（RCA）的高吸水率、表面粗糙度与级配特征。与普通混凝土相比，相同配合比下RAC的流动性显著降低，当RCA替代率超过50%时，坍落度损失率高达25%-30%，需增加3%-15%用水量才能达到相近流动性。这是由于RCA的毛细孔与表面老砂浆会快速吸收拌合水，导致浆体黏度上升，流动性下降。同时，RCA表面粗糙、颗粒级配复杂，使RAC的保水性与黏聚性优于普通混凝土，有效减少离析与泌水现象。通过骨料预湿处理、聚羧酸减水剂优化与两阶段搅拌工艺（干混30s+湿混120s），可显著改善RAC工作性能，使高替代率RAC的坍落度维持在160mm以上，满足泵送施工要求。目前，工作性能评价已形成以坍落度、扩展度、倒锥法流动时间为核心的指标体系，为工程施工提供量化依据。

4.2 力学性能

RAC的力学性能主要包括抗压强度、劈裂抗拉强度、弹性模量与抗折强度，其演变规律与RCA替代率、界面过渡区（ITZ）性能及配合比密切相关。抗压强度随RCA替代率增加呈线性下降趋势，当替代率达100%时，28d抗压强度较普通混凝土平均降低15%-22%，这是由于RCA内部微裂缝与ITZ的薄弱性导致应力集中。劈裂抗拉强度降低幅度相对较小（2%-10%），但受界面粘结性能影响显著，通过骨料改性可有效提升。弹性模量是RAC的力学短板，相同强度等级下较普通混凝土低20%-30%，导致其在荷载作用下变形更大，需通过配合比优化与纤维增强进行调控。另外，RAC的力学性能具有明显的龄期效应，后期强度增长速率高于普通混凝土，90d抗压强度较28d可提升20%-30%。钢管约束、GFRP包裹等结构强化技术，可使RAC柱极限强度提高35%以上，弥补其力学性能不足。

4.3 耐久性能

RAC的耐久性能是其工程应用的核心考量，主要包括抗渗性、抗冻性、抗碳化性、抗氯离子侵蚀性与抗收缩开裂性，其劣化根源是内部高孔隙率与ITZ的薄弱结构。

抗渗性方面，RAC的孔隙连通率高，渗透性是普通混凝土的2-5倍，抗渗等级普遍低于P8，易导致水分与侵蚀介质侵入。抗冻性受孔隙结构影响显著，当RCA替代率为50%时，300次冻融循环后质量损失率超过3%，高于普通混凝土的1.5%。抗碳化性与抗氯离子侵蚀性较差，碳化深度更大，氯离子扩散系数高于普通混凝土30%-50%，易引发钢筋锈蚀^[4]。此外，RCA的老砂浆收缩性大，导致RAC的干燥收缩与徐变变形显著增加，易产生早期裂缝。通过复合改性、配合比优化与养护强化，可使RAC的抗渗等级达P10、抗冻等级达F200，碳化深度控制在8mm以内，满足一般工程的耐久性要求。

结束语

建筑垃圾再生骨料混凝土性能提升技术取得了显著进展，从预处理到混凝土性能提升，再到宏观性能研究，形成了一套较为完善的技术体系。多种技术手段的应用，有效改善了再生骨料及混凝土的性能，推动了其在不同工程场景的应用。但目前部分技术仍面临成本、效率等问题。未来，需进一步优化技术，融入全生命周期理念，推动技术向高效、低碳、智能化升级，以更好地实现建筑垃圾的资源化利用和建筑业的可持续发展。

参考文献

- [1]马士宾,牛宗岳,刘月钊,等.建筑垃圾再生骨料性能强化研究进展[J].建筑科学与工程学报,2022,39(6):1-13.
- [2]李克青,齐国强,曹芳菲,等.建筑垃圾再生骨料的特性及改性方法研究进展[J].混凝土与水泥制品,2024(11):115-120.
- [3]魏慧杰,钟辉祥,万海峰,等.基于微生物矿化的土凝岩再生骨料混凝土力学性能研究[J].交通科技,2025(1):109-113.
- [4]周文娟,周明丽,宋永远,等.再生骨料预拌对透水混凝土性能的影响与优化[J].北京建筑大学学报,2025,41(4):36-44.