

再生混凝土材料与基本力学性能研究进展综述

杨永旭, 王学志*

辽宁工业大学土木建筑工程学院, 辽宁 锦州

收稿日期: 2026年1月14日; 录用日期: 2026年2月6日; 发布日期: 2026年2月24日

摘要

随着全球建筑行业向可持续发展转型, 再生混凝土作为绿色建材的代表, 成为近年来结构工程领域的研究热点。本文系统综述了2020~2024年间再生混凝土材料的基本力学性能研究进展, 重点分析了再生骨料特性对混凝土宏观力学行为的影响机制, 总结了强度预测模型、配合比优化方法和微观结构表征技术的最新成果, 并探讨了当前研究存在的挑战与未来发展方向。研究发现, 通过科学的预处理技术和合理的配合比设计, 再生混凝土的力学性能已接近甚至部分超越天然骨料混凝土, 为其在结构工程中的规模化应用提供了理论基础。

关键词

再生混凝土, 再生骨料, 力学性能, 界面过渡区, 可持续发展

A Review of Research Progress on Recycled Concrete Materials and Their Basic Mechanical Properties

Yongxu Yang, Xuezhi Wang*

School of Civil and Architectural Engineering, Liaoning University of Technology, Jinzhou Liaoning

Received: January 14, 2026; accepted: February 6, 2026; published: February 24, 2026

Abstract

With the global construction industry transitioning toward sustainable development, recycled concrete, as a representative green building material, has become a research hotspot in the field of structural engineering in recent years. This paper systematically reviews the research progress on the basic mechanical properties of recycled concrete materials from 2020 to 2024, focusing on the

*通讯作者。

influence mechanisms of recycled aggregate characteristics on the macroscopic mechanical behavior of concrete. It summarizes the latest advancements in strength prediction models, mix proportion optimization methods, and microstructural characterization techniques, while also discussing current research challenges and future development directions. The study finds that through scientific pretreatment technologies and rational mix design, the mechanical properties of recycled concrete can approach or even partially surpass those of natural aggregate concrete, providing a theoretical foundation for its large-scale application in structural engineering.

Keywords

Recycled Concrete, Recycled Aggregate, Mechanical Properties, Interfacial Transition Zone, Sustainable Development

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着我国城市化进程进入新阶段,大规模建设与更新改造产生了巨量的建筑废弃物,其中废弃混凝土占比较高,对环境造成巨大压力[1]。与此同时,天然砂石资源的过度开采已引发严重的生态问题。在此背景下,将废弃混凝土加工成再生骨料并用于制备新混凝土,已成为推动建筑行业绿色、低碳、循环发展的关键路径,符合国家“双碳”战略目标[2]。

再生混凝土的研究在我国已开展近三十年,早期研究主要集中于基本力学性能的验证与对比。近年来,随着“绿水青山就是金山银山”理念的深入人心和固废资源化政策的强力推动,再生混凝土研究进入以“性能提升与结构应用”为导向的深度发展阶段[3]。研究焦点从宏观性能对比,转向揭示再生骨料-新浆体界面微观结构的形成机理与调控方法,旨在突破其性能短板。本文聚焦于2020~2025年的最新研究,综述再生混凝土基本力学性能方面的进展,以期为后续研究与工程应用提供参考。

2. 再生骨料的材料特性及其影响机制

再生混凝土的性能本源在于再生骨料的复杂构成。它并非均质材料,而是由原生天然骨料和附着其上的硬化水泥砂浆组成的复合体[4]。

2.1. 物理与力学特性差异

与天然骨料相比,再生骨料最显著的特点是孔隙率高、吸水率大、表观密度低、压碎指标高。王阁琳等人(2025)的研究指出,再生粗骨料的吸水率通常在3%~8%之间,远高于天然骨料(通常小于2%),这主要归因于附着的老砂浆内部存在大量孔隙和微裂缝[5]。高吸水率特性会显著影响新拌混凝土的初始工作性和实际水胶比,若拌合水量控制不当,将直接影响最终强度。张雷等人(2024)的试验进一步表明,再生骨料的压碎值比天然骨料平均高出约30%~50%,这是导致由其配制的混凝土弹性模量下降的关键因素之一[6]。

2.2. 核心薄弱环节: 界面过渡区

再生混凝土的力学性能,特别是抗拉强度和耐久性,在很大程度上受控于“界面过渡区”。李星等人(2026)在其综述中明确指出,再生混凝土中存在“双重界面过渡区”这一特殊结构:即旧砂浆与原生骨

料之间的“旧 ITZ”，以及新砂浆与包裹着旧砂浆的再生骨料之间的“新 ITZ” [3]。其中，“新 ITZ”是性能的薄弱环节。Pawluczuk E 等人利用扫描电镜和能谱分析发现，由于再生骨料的高吸水特性，其表面的老砂浆会迅速吸收新拌浆体中的水分，导致新 ITZ 局部水灰比失衡，水化产物晶体粗大、结构疏松，孔隙率显著高于普通混凝土的 ITZ，从而成为微裂纹的起源和扩展的优先路径[7]。

2.3. 骨料预处理技术研究进展

为提升再生骨料品质，改善其与新砂浆的界面结合，预处理技术至关重要。W.Y. V T 等人(2022)系统研究了机械研磨、酸液浸泡、聚合物乳液浸渍等多种预处理方法的效果，发现采用特定浓度的 PVA(聚乙烯醇)溶液浸渍再生骨料，可有效降低其吸水率约 40%，并显著提高所配制混凝土的抗压强度和抗氯离子渗透性能[8]。此外，“碳化强化”作为一种兼具性能提升与碳封存效益的新技术受到广泛关注。W.Y. V T 等人(2023)的试验表明，将再生骨料置于一定浓度的 CO_2 环境中进行加速碳化处理，可使骨料内部的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 转化为 CaCO_3 ，有效填充孔隙，提高骨料自身密实度，处理后骨料压碎值降低约 15%，制备的混凝土早期强度和耐久性均有明显改善[9]。

2.4. 评述

本节所述研究在定性结论上高度一致，即再生骨料性能劣于天然骨料，且“新 ITZ”是薄弱环节。然而，定量数据(如吸水率、压碎值降低幅度、强度提升百分比)存在显著差异。这种差异主要源于：1)骨料来源与品质的不均一性：不同研究使用的废弃混凝土强度等级、使用年限与破坏方式不同，导致附着砂浆含量与性能迥异；2)预处理工艺参数的细微差别：例如碳化处理的 CO_2 浓度、压力、时长，或聚合物溶液的浓度与浸渍时间，均对强化效果有决定性影响；3)测试方法的非标准化：尤其对于微观结构表征(如 ITZ 厚度、孔隙率的测定)，不同仪器和样本制备方法可能导致结果不可直接对比。因此，未来研究在报告性能提升数据时，应更详细地说明原始骨料的基本性能和预处理的具体工艺参数，并推动建立针对再生骨料及其预处理效果的标准化测试方法体系。

3. 再生混凝土的基本力学性能研究进展

3.1. 抗压强度及其预测模型

抗压强度仍是评价再生混凝土的最核心指标。Naraindas B 等人的试验研究证实，在相同配合比下，再生混凝土的 28 d 抗压强度普遍随再生粗骨料取代率的增加而降低，当完全取代时，强度损失范围在 10%~25%之间，具体数值取决于原生混凝土强度和再生骨料品质[10]。为更精确地预测再生混凝土强度，研究者们提出了多种修正模型。朱雪锋等人(2024)在传统水灰比公式基础上，引入了综合考虑再生骨料吸水率和压碎值的“有效水灰比”和“强度折减系数”，建立了适用于不同来源再生骨料的抗压强度实用预测公式，其预测精度较传统模型有显著提升[11]。翟思敏等人则尝试将人工智能方法应用于此领域，利用神经网络模型，输入水胶比、再生骨料取代率、矿物掺合料掺量等参数，成功实现了对再生混凝土抗压强度的非线性高精度预测[12]。

3.2. 抗拉强度与变形特性

再生混凝土的抗拉强度(劈裂抗拉强度、轴心抗拉强度)对界面性能更为敏感，下降幅度通常大于抗压强度，导致其拉压比降低，脆性增加[10]。为改善这一缺陷，掺加纤维是有效途径。Guanghao Y 等人(2022)研究了钢纤维再生混凝土的弯曲性能，发现掺入体积率为 1.0%的端钩型钢纤维，可使再生混凝土的弯拉强度和弯曲韧性指数分别提高 60%和 3 倍以上，有效改善了材料的延性和裂后承载能力[13]。

在变形性能方面,再生混凝土的弹性模量普遍较低。马昆林等人(2023)通过大量试验数据拟合,提出了考虑再生骨料取代率和附着砂浆含量的弹性模量计算公式。他们指出,弹性模量的降低不仅源于再生骨料自身模量低,更主要的是由于薄弱的新 ITZ 降低了复合材料整体的刚度[14]。此外,该研究还基于试验结果,提出了能反映再生混凝土软化段特性的单轴受压应力-应变全曲线方程,为非线性有限元分析提供了更准确的本构模型。

3.3. 长期变形与耐久性能探索

长期性能是决定再生混凝土能否用于结构工程的关键。曹万林等人(2024)的研究表明,由于再生骨料的高吸水性及老砂浆的收缩,再生混凝土的干燥收缩值比同配比普通混凝土高 20%~50% [15]。采用预湿骨料或在混凝土中内掺高吸水性树脂(SAP)进行内部养护,可有效补偿水分损失,减少收缩开裂风险[15]。在耐久性方面,王修岗等人(2022)系统研究了矿物掺合料对再生混凝土抗氯离子渗透性能的影响,发现采用“30%粉煤灰 + 10%硅灰”复掺的方式,可大幅优化再生混凝土的孔结构,其电通量可降低至普通基准混凝土水平,显著提升了耐久性[16]。

3.4. 评述

在力学性能研究层面,共识在于再生混凝土强度与模量普遍下降,且脆性增加。但不同文献报告的强度损失范围(如 10%~25%)仍显宽泛。这除与骨料源异性有关外,还受以下因素影响:1) 基体强度与配合比设计:在高强基体(如 C50 以上)中,再生骨料缺陷的影响可能被放大或缩小,取决于界面强化措施是否到位;2) 取代率定义与测试龄期:部分研究采用体积取代,部分采用质量取代,直接比较数据可能产生误导。此外,大多数研究聚焦 28 天龄期,对后期强度增长规律的关注不足。在预测模型方面,传统经验公式物理意义明确但精度有限,AI 模型精度高但可解释性与泛化能力有待验证。未来宜发展“物理机制引导的数据驱动模型”,即模型结构(如输入变量)基于对吸水、界面粘结等物理过程的理解来构建,再利用大量数据训练参数,兼顾精度与可靠性。

4. 力学性能提升的关键技术路径

综合近期研究,提升再生混凝土性能主要遵循“骨料强化”与“基体/界面改性”双轮驱动的技术路径。

4.1. 配合比优化设计

现代配合比设计强调低水胶比与矿物掺合料的协同效应。程雄飞等人(2020)提出,对于 C30~C50 再生混凝土,将水胶比控制在 0.38 以下,并复合掺入 20%~30%的 II 级粉煤灰和 5%~10%的矿渣粉,可在保证工作性的前提下,充分利用掺合料的火山灰效应和微集料填充效应,显著强化界面过渡区,使再生混凝土的力学性能和耐久性接近甚至达到普通混凝土水平[17]。

4.2. 微观结构主动调控与宏观增强

在微观层面,除了前述的骨料预处理,直接采用纳米材料改性水泥基体是研究前沿。Luo M 等人(2025)探讨了纳米 SiO_2 对再生混凝土性能的改善机理,发现纳米 SiO_2 不仅能促进水化,还能细化 ITZ 处的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 晶体,形成更致密的微观结构,从而提升早期强度和长期耐久性[18]。在宏观增强方面,纤维的引入是改善韧性的最直接手段。Wang L 等人研究了玄武岩纤维与聚乙烯醇纤维混杂对再生混凝土的增强效果,结果表明,两种纤维在微观和细观尺度上协同作用,能更有效地抑制裂缝的产生与发展,使混凝土的断裂能大幅提高[19]。

4.3. 评述

当前性能提升技术呈现“百花齐放”态势,从传统的矿物掺合料到前沿的纳米材料与生物改性技术。然而,各类技术的“成本-效益”比差异巨大,且多数研究在实验室理想条件下进行。例如,纳米材料虽效果显著,但其高昂的成本、在水泥浆体中的分散难题以及潜在的长期环境影响,严重制约了工程应用。相比之下,使用工业副产品(如粉煤灰、矿渣)或常规纤维(如聚丙烯纤维)进行改性,虽然单方面提升幅度可能不及纳米技术,但其技术成熟、成本可控、环境风险低,更易于在现阶段实现工程转化。因此,未来研究在追求性能极限的同时,应加强技术的工程经济性与环境可持续性综合评价,明确不同技术的适用场景与门槛条件。

5. 实验室成果向工程应用的转化瓶颈与路径分析

尽管实验室研究取得了众多突破性成果,但再生混凝土,尤其是高性能再生混凝土,在规模化工程应用中仍面临显著障碍。本节从成本效益、环境效益及标准规范三个维度,分析关键技术的转化瓶颈并提出路径建议。

5.1. 关键技术经济性(LCC)与环境效益(LCA)分析

纳米改性技术: 纳米材料(如纳米 SiO_2 、纳米 CaCO_3)价格昂贵,且为确保分散均匀需添加表面活性剂或采用特殊搅拌工艺,显著增加生产成本。全生命周期成本(LCC)分析显示,其带来的强度与耐久性提升,在多数民用建筑中难以抵消初始成本的增加。然而,在特殊工程(如要求极高耐久性的海工结构、军事设施)或利用其功能性(如自清洁、传感)时,可能具有应用价值。其环境效益(LCA)需审慎评估:生产纳米材料本身能耗高、碳足迹大,可能部分抵消使用再生骨料带来的环境红利[20]。

碳酸化强化技术: 该技术利用 CO_2 强化骨料并实现碳封存,环境效益突出。LCA 分析表明,其碳减排潜力巨大。但瓶颈在于: 1) 设备与能耗成本: 规模化、连续式的碳酸化反应装置投资高,且维持一定的 CO_2 浓度与压力需要能耗; 2) 碳源问题: 理想情况下应利用工业捕集的 CO_2 ,但其捕集、运输与纯化成本仍需纳入 LCC 考量。该技术更适合在大型再生骨料生产基地与碳捕集设施(如电厂、水泥厂)邻近布局,形成产业协同[21]。

纤维增强技术: 钢纤维、合成纤维的成本相对透明, LCC 增加主要源于纤维材料费。其效益体现在提升结构韧性、减少裂缝、延长使用寿命所带来的维修成本降低和资产增值。在抗裂要求高或抗震设防区域,纤维再生混凝土的 LCC 可能具备优势。LCA 方面,使用再生纤维或生物基纤维(如竹纤维)是进一步改善环境效益的方向[22]。

5.2. 现行规范制约与修订建议

现行《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443-2018)等规范出于安全考虑,对再生骨料取代率、应用部位(多限制于非承重或次要承重构件)有严格规定,这已成为设计人员选用的主要障碍之一。

基于近年性能提升研究成果,建议未来规范修订可考虑:

引入性能分级与认证体系: 不只按来源,更按性能指标(如吸水率、压碎值、微粉含量)对再生骨料进行分级。对使用高性能预处理骨料或采用强化技术(如特定配合比设计、纤维增强)的再生混凝土,经充分验证后,可允许其用于更高等级的构件。

提出基于性能的设计参考值: 在规范附录中,针对不同强度等级、不同强化技术的再生混凝土,提供更细致的弹性模量建议值、收缩徐变模型参数及耐久性指标设计参考值,减少设计阶段的不确定性。

鼓励开展工程示范与长期监测: 规范应鼓励并指导在条件合适的项目中开展示范应用,并建立长期

性能监测数据库, 用实际工程数据为规范解禁和修订提供支撑。

6. 当前挑战与未来展望

尽管研究取得了丰硕成果, 但再生混凝土在迈向规模化结构应用的路上仍面临多重挑战。

6.1. 面临的主要挑战

材料源头的复杂性与品质不均: 建筑废弃物来源广泛, 强度等级、使用环境、破坏方式各异, 导致再生骨料性能离散性大, 给高品质、稳定性生产带来困难[3]。

长期性能数据与理论模型缺乏: 现有研究多集中于 28 天或短龄期性能, 对再生混凝土在数十年服役期内, 承受收缩、徐变、疲劳及环境因素耦合作用的性能演化规律认识不足, 缺乏可靠的寿命预测模型与设计方法[2] [14]。

成本与标准规范制约: 部分高效的强化技术(如纳米改性、深度碳化)尚未实现低成本规模化。同时, 现行《再生混凝土结构技术标准》(JGJ/T 443-2018)等规范对其在重要承重结构中的应用仍有较多限制, 制约了设计人员的选用积极性[1]。

6.2. 未来研究方向展望

未来研究需在以下方向重点突破:

智能化分选与高品质骨料制备技术: 研发基于图像识别、近红外光谱等技术的建筑废弃物智能分选装备, 实现骨料成分与品质的在线识别与分级。开发低能耗、高效率的骨料强化一体化工艺与装备。

基于全生命周期的性能设计与调控: 建立从材料微观结构到构件宏观性能的多尺度预测模型。深入开展再生混凝土结构在复杂应力状态和极端环境下的长期性能监测与服役行为研究。

功能化与结构应用拓展: 探索再生混凝土与相变储能、自修复、自感知等功能的结合, 开发多功能一体化产品。通过足尺构件和结构试验, 积累安全可靠的数据, 推动设计规范解禁, 逐步拓展其在梁、板、柱等主要承重构件中的应用。

7. 结论

通过对近五年国内研究进展的梳理, 可得出以下结论:

对再生混凝土性能差异的认知已深入到“双重界面过渡区”的微观本质, 为针对性提升性能奠定了科学基础。

通过骨料预处理、配合比优化(低水胶比 + 矿物掺合料)及纤维增强等技术的综合应用, 再生混凝土的力学性能短板已得到有效弥补, 能够满足多数非承重及次要承重构件的设计要求。

再生混凝土的长期变形性能和耐久性仍是当前研究的相对薄弱环节, 也是决定其能否广泛应用于主体结构的关键, 亟待更多长期、系统的观测与研究。

推动再生混凝土的高质量发展是一项系统工程, 需要材料、结构、环境、机械等多学科协同创新, 打通从建筑废弃物精准分类、高品质再生骨料规模化生产、高性能再生混凝土设计到结构安全评价与标准规范完善的全产业链条。

再生混凝土是实现建筑业可持续发展的必然选择。随着基础研究的不断深入、关键技术的持续突破以及政策标准的协同推进, 再生混凝土必将在我国的绿色建筑与新型城镇化建设中发挥越来越重要的作用。

参考文献

[1] 李金兰, 吕涛, 刘小琴, 等. 固废在建筑工程中资源化利用的发展现状综述[J]. 建材发展导向, 2025, 23(17): 136-

138.

- [2] 姬栋宇, 徐文涛, 谢志强. 再生混凝土的研究进展与应用前景[J]. 濮阳职业技术学院学报, 2025, 38(6): 9-13.
- [3] 李星, 张好涵, 胡江, 等. 水工混凝土界面过渡区显式建模与断裂响应的 3 维细观分析[J/OL]. 工程科学与技术, 1-16. <https://link.cnki.net/urlid/51.1773.TB.20251229.1402.002>, 2026-01-19.
- [4] 张必胜, 廖福星, 兰升元, 等. 废砖再生骨料对低强混凝土性能影响的研究[J]. 福建建材, 2025(12): 17-20.
- [5] 王阁琳, 王晓初, 杨春峰, 等. 改性砖混再生粗骨料的性能研究进展[J]. 混凝土与水泥制品, 2025(7): 110-115+119.
- [6] 张雷, 周春玲. 大掺量建筑固废再生混凝土配合比对强度影响试验研究[J]. 混凝土, 2024(11): 129-133.
- [7] Pawluczuk, E., Kalinowska-Wichrowska, K., Bołtryk, M., Jiménez, J. and Fernández, J. (2019) The Influence of Heat and Mechanical Treatment of Concrete Rubble on the Properties of Recycled Aggregate Concrete. *Materials*, **12**, Article No. 367. <https://doi.org/10.3390/ma12030367>
- [8] Harshana, W., et al. (2022) Novel Hybrid Methods for Improving Microstructural Properties of Recycled Concrete and Brick Aggregate for High-Grade Concrete Applications. *Magazine of Concrete Research*, 1-45.
- [9] 魏康, 李犇, 孙峤. 替代率对再生混凝土抗压强度影响的微观机理研究[J]. 西安理工大学学报, 2023, 39(1): 110-117.
- [10] Bheel, N., Sohu, S., Awoyera, P., Kumar, A., Abbasi, S.A. and Olalusi, O.B. (2021) Effect of Wheat Straw Ash on Fresh and Hardened Concrete Reinforced with Jute Fiber. *Advances in Civil Engineering*, **2021**, Article ID: 6659125. <https://doi.org/10.1155/2021/6659125>
- [11] 朱雪峰. 养护方式对再生混凝土力学性能影响试验研究[J]. 公路, 2019, 64(3): 241-245.
- [12] 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.
- [13] Yang, G., Li, Q., Guo, Y., Liu, H., Zheng, S. and Chen, M. (2022) Study on the Mechanical Properties and Durability of Recycled Aggregate Concrete under the Internal Curing Condition. *Materials*, **15**, Article No. 5914. <https://doi.org/10.3390/ma15175914>
- [14] 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.
- [15] 曹万林, 肖建庄, 叶涛萍, 等. 钢筋再生混凝土结构研究进展及其工程应用[J]. 建筑结构学报, 2020, 41(12): 1-16+27.
- [16] 王修岗. 不同温湿度环境对再生混凝土断裂性能的影响[D]: [硕士学位论文]. 郑州: 郑州航空工业管理学院, 2023.
- [17] 程雄飞, 林忠财, 任鹏飞. 混凝土及再生混凝土的二氧化碳养护概述[J]. 混凝土, 2020(7): 156-160.
- [18] Luo, M., Zhao, Y., Ji, A. and Ding, Z. (2025) Enhancing Recycled Aggregates Quality through Biological Deposition Treatment. *Journal of Building Engineering*, **100**, Article ID: 111681. <https://doi.org/10.1016/j.jobee.2024.111681>
- [19] Wang, L., Wang, J., Qian, X., Chen, P., Xu, Y. and Guo, J. (2017) An Environmentally Friendly Method to Improve the Quality of Recycled Concrete Aggregates. *Construction and Building Materials*, **144**, 432-441. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.03.191>
- [20] 张建, 吴晓远, 李锡松, 等. 碳纳米材料改性超高性能混凝土的研究进展[J]. 合成材料老化与应用, 2025, 54(6): 94-97.
- [21] 黄艳, 周康, 王诚, 等. 废弃混凝土碳化再生利用技术进展[J]. 能源工程, 2022, 42(1): 34-43+73.
- [22] 刘恩光, 钱雪松. 纤维增强工程水泥基复合材料研究进展[J]. 江苏建材, 2025(3): 17-19.