

再生骨料改性方法研究综述

杨启凡¹, 李佳慧^{1,*}

1. 山东理工大学, 建筑工程与空间信息学院, 山东 淄博, 255000.

摘要: 再生骨料表面附着的旧砂浆导致了其孔隙率高、强度低、吸水率大等缺陷, 进而制约了其在工程中的大规模应用。本文阐述了再生骨料强化技术研究进展, 重点分析了物理强化、化学强化、生物改性及碳化改性等方法的作用机理、优缺点, 并对比了不同技术的适用性。研究表明, 物理强化工艺成熟但能耗较高, 化学强化效果显著但存在污染风险, 生物与碳化改性绿色环保但技术成熟度待提升。再生骨料强化技术需向低能耗、低污染及协同强化方向发展, 为工程应用和技术优化提供参考。

关键词: 再生骨料; 建筑垃圾; 强化技术; 资源利用

Research on Modified Methods for Recycled Aggregates: A Review

Qifan Yang¹, Jiahui Li^{1,*}

1. Department of Civil Engineering, School of Civil Engineering and Geomatics, Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255000, China

Abstract: The old mortar adhering to the surface of recycled aggregates results in defects such as high porosity, low strength, and high water absorption, thereby limiting their large-scale application in engineering projects. This paper reviews the research progress in recycled aggregate reinforcement technologies, focusing on the mechanisms of action, advantages, disadvantages, and application scenarios of physical reinforcement, chemical reinforcement, biological modification, and carbonization modification methods, and compares the applicability of different technologies. Research indicates that physical strengthening processes are mature but have high energy consumption, chemical strengthening yields significant results but poses pollution risks, while biological and carbonization modification are environmentally friendly but require further technical maturation. Aligning with the principles of green and efficient production, this paper proposes that recycled aggregate strengthening technologies should evolve toward low energy consumption, low pollution, and synergistic strengthening approaches, providing guidance for engineering applications and technological optimization.

Keywords: Recycled aggregates; construction waste; strengthening technologies; resource utilization

随着我国城市化进程的不断加快, 建筑垃圾的数量逐年增加^[1] (如图 1 所示)。据城乡建设部统计, 我国城市的建筑垃圾每年产生超过 20 亿吨, 是生活垃圾的 8 倍, 占城市固体废物总量的 40%^[2]。传统的建筑废弃垃圾处理方式不仅消耗大量人力物力, 还会生成大量的温室气体和有毒气体破坏环境。此外, 天然砂石资源的枯竭使得混凝土行业面临前所未有的危机, 天然骨料的开采也加剧了环境污染。

为了贯彻我国建筑业的绿色可持续发展理念, 将建筑废料回收利用为再生骨料已成为当前较为

普遍的处理方式。这不仅有效解决了建筑垃圾的处置问题，还减少了对天然资源的需求。然而，由于再生骨料存在孔隙率高、强度低、吸水率大等性能缺陷^[3]（如图 2 所示），这严重限制了再生混凝土的应用范围和实际使用场景^[4]。因此，研究并改进再生骨料处理方法，以提升其性能，已成为当务之急。目前，再生骨料强化方法主要通过物理、化学和生物方法将附着在骨料表面的旧砂浆去除或增强老砂浆来改善骨料的吸水率和降低骨料孔隙率从而达到增强再生骨料的目的。

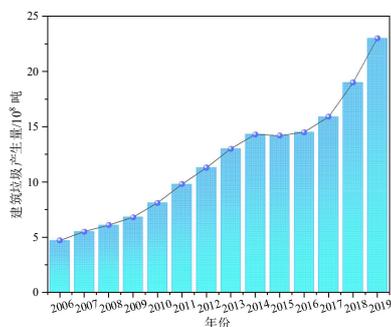
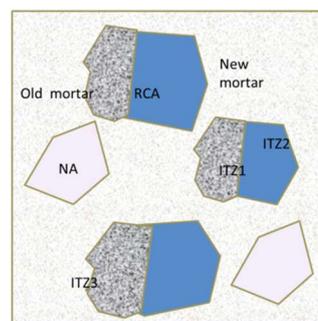
图 1 建筑垃圾产生量^[3]Fig. 1 Construction waste generation^[3]

图 2 再生骨料界面过渡区

Fig. 2 ITZ of RAs

1 物理强化技术

物理强化是借助机械作用对骨料施加应力，在剥离骨料表面所附砂浆的同时，完成对骨料颗粒的整形，进而实现再生骨料性能的提升。当下，常见的物理强化技术主要包含机械研磨、加热研磨、颗粒整形强化以及超声波清洗这四种类型。

目前广泛应用的机械研磨强化装置，一般可分为立式偏心装置研磨和卧式机械强制研磨两种类型。作为再生骨料强化领域中最先出现的技术手段，机械研磨强化具备耗时短、便于操作、效果显著且适用性强。然而，该技术也存在一定局限性，例如对设备的磨损和消耗较为严重，并且强化后的骨料强度并没有较大的提升。李义秋等^[5]研究发现，普通方法破碎获得的再生骨料性能比较差，通过研磨处理后的再生粗骨料性能与天然碎石相差无几，其表观密度增加了 3.5%，吸水率和压碎值分别降低了 38.3%和 9.5%。Shaban 等^[6]通过偏心研磨法和球磨研磨法去除再生粗骨料的旧砂浆，有效增强了再生混凝土力学性能。

加热研磨法通过加热再生粗骨料，分解脱落附着在其表面的砂浆。常见方法有高温煅烧和微波加热，不仅可以除掉吸附在骨料表面的杂质，还能通过高温处理使骨料表面形成活性层，提高再生粗骨料的力学性能。肖建庄等^[7]则通过采用微波循环加热，在保持内部温度较低的同时将再生骨料表面温度升到 300℃，极大程度上去除了再生骨料表面附着的砂浆。Mulder 等^[8]通过试验发现，再生骨料在 700℃热处理后，其表面只残留了 2%的旧砂浆。但当加热温度超过 500℃时，骨料、砂浆和界面过渡区中的矿物成分都会发生相变，使再生骨料内部产生裂缝。故证明在施加的加热温度超过了一定值后，骨料的性能反而会有下降的趋势。此外需要注意的是，加热研磨强化存在设备体积庞大、损耗显著、工艺繁琐、生产成本低以及能源消耗大等问题。

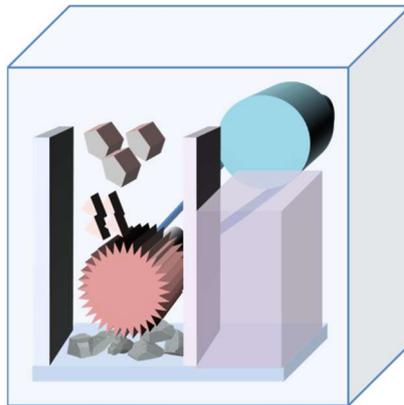


图 3 物理研磨方法示意图

Fig. 3 Schematic diagram of physical grinding method

颗粒整形技术通过机械破碎、摩擦等方式改善再生骨料表面形态如降低粗糙度、减少棱角，优化颗粒级配并去除表面附着老砂浆，以提升骨料性能。朱崇绩等^[9]通过对再生骨料进行颗粒整形，去除附着在骨料表面的旧砂浆，使再生骨料表面更加圆滑，有效地降低其内部的裂缝，从而改善其抗氯盐侵蚀及耐碳化能力。颗粒整形技术的强化主要利用骨料之间的摩擦碰撞来实现，极大的减小了机器的损耗。

超声波处理法利用高频振动使再生混凝土表面的附着砂浆和杂质脱落，同时超声波的空化效应还能改善骨料内部结构。Katz^[10]采用超声波清洗技术对再生粗骨料进行处理，试验结果表明通过超声波清洗使再生混凝土的抗压强度提升了 7%。不过，多次循环清洗会导致该工艺消耗大量水资源，并且在处理的过程中容易会对骨料造成二次伤害，生成细微裂缝，难以在大规模工程中推广应用。

表 1 再生骨料物理强化技术方法对比

Table 1 Comparison of physical reinforcement technology methods for RAs

方法	优点	缺点
机械研磨 ^[5]	耗时短、操作简便、效果明显、实用性高	对设备的磨损、消耗严重，且强化后效果不理想
加热研磨 ^[8]	吸附在骨料表面的杂质，灵活性高	对温度把控有一定要求，经济成本高
颗粒整形强化 ^[9]	改善表面形态与级配、去除老砂浆、增强界面黏结、提升混凝土性能	能耗高、设备磨损大、细粉多、工艺复杂、骨料易损耗
超声波清洗 ^[10]	可实现高效分离骨料和砂浆，强化效果较机械研磨法更好	工艺耗费大量水资源，易产生二次裂缝，难以大规模投入工程使用

2 化学强化技术

化学强化是通过化学试剂、溶液或胶凝材料与骨料发生反应，改善其表面特性，增强界面黏结并填充孔隙，从而提升骨料的物理性能，以达到强化再生骨料的目的。目前常用的化学强化方法有矿物掺合料、水泥净浆和化学药剂三种强化方法。

矿物材料及纳米材料对再生粗骨料预浸裹覆，可填补骨料中的裂缝，降低骨料的吸水率，提高骨料与基体的界面黏结性能，增强界面过渡区。黄伟等^[11]采用预浸纳米 SiO₂ 溶液对骨料进行强化处

理,发现采用质量浓度为 1%和 2%的纳米 SiO_2 溶液提前浸泡后,再生粗骨料的吸水率分别降低了 14.9%和 22.5%,骨料的压碎指标则分别降低了 4.2%, 6.1%。

水泥净浆处理法主要基于表面覆膜的原理实现再生骨料强化。在处理过程中,水泥净浆在再生骨料表面形成致密包覆层,不仅显著降低骨料的吸水率与压碎值,还能优化再生骨料与混凝土之间的界面过渡区结构,最终实现再生混凝土力学性能与耐久性能的双重提升。谢玲君等^[12]以废弃砖瓦为原料制备再生细骨料,使用相同水灰比的水泥浆包裹骨料,研究发现其水泥砂浆性能与旧混凝土基本一致,且二次掺入水泥浆后使用效果更佳。

化学药剂改性法是指将再生骨料浸入醋酸、盐酸、硫酸等化学试剂中,利用旧砂浆与酸溶液的化学反应,溶解和去除旧砂浆。Ismail 等^[13]使用不同浓度 (0.1、0.5、0.8mol/L) HCl 溶液对再生骨料分别浸泡 1、3、7d,结果显示旧砂浆剥离量随着 HCl 浓度的增加而增加,但浸泡时间对旧砂浆剥离量无显著影响。

适当的酸处理 (例如使用 HCl 溶液) 能够有效去除再生骨料表面的附着砂浆,从而提高骨料的强度,进一步促进建筑废弃物的循环利用。然而,酸处理也存在一些潜在缺点。如果酸溶液的浓度过高或浸泡时间过长,可能会导致骨料表面过度溶解或腐蚀,从而降低其物理性能。酸处理过程中使用的化学试剂以及废弃物处理也可能对环境造成一定的负面影响,同时,这一过程还需额外的时间和成本投入。

表 2 再生骨料化学强化技术方法对比

Table 2 Comparison of chemical reinforcement methods for RAs

方法	优点	缺点
矿物掺合料改性 ^[11]	可修复再生骨料的微观缺陷	掺合料和纳米材料分散难,成本高
水泥净浆改性 ^[12]	工艺简单、提升界面黏结力、改善骨料性能、成本较低	强化效果有限、均匀性难控、对老砂浆处理不彻底
化学药剂改性 ^[13]	工艺相对简单,强化效果好,灵活性强	化学污染风险、成本较高、工艺复杂、可能影响骨料耐久性、需后续处理

3 生物改性技术

微生物矿化沉积技术 (MICP) 是利用微生物代谢活动促使钙离子与碳酸根离子结合生成碳酸钙沉淀,从而改善再生骨料物理性能、再生混凝土力学性能、耐久性、渗透性等。1973 年,Boquete 等^[14]研究发现土壤微生物的矿化反应可沉积碳酸钙沉淀,从而开始将微生物运用在建筑行业。钱春香等^[15]深入钻研微生物沉积产生碳酸钙的矿化机理,并将微生物矿化技术成功应用于松散颗粒固结。绝大多数微生物如巴氏芽孢杆菌、科氏芽孢杆菌、绿脓杆菌、枯草杆菌、芽孢八叠球菌、胶质芽孢杆菌等都会通过不同的形式进行矿化沉积,主要分为尿素水解、二氧化碳水合、反硝化作用三种矿化沉积方式。

尿素水解是靠脲酶菌 (巴氏芽孢杆菌等) 以尿素为碳源,通过新陈代谢活动将尿素水解碳酸根离子,进而使其与钙离子结合生成碳酸钙沉淀。反应的同时细菌还会以自身为成核位点,加快矿化沉积反应的速率。具体反应过程如图 4 (a) 所示。朱亚光^[16]等用坚强芽孢杆菌 *Bacillus Pseudofirmus* DSM-8715 改性再生骨料后发现:相比于未经过微生物改性的再生骨料,改性后的再生骨料吸水率由 6.52%降至 5.93%,降幅达到 9.05%;而压碎指标由 19.36%降至 16.07%,降幅达到 16.70%,效果显著。脲解反应矿化速率快、易控制、菌种稳定好培养,是目前应用最广泛的矿化沉

积方式，但是在尿素水解时会产生对环境影响较大的氨气。

常温常压下二氧化碳水合反应速率十分缓慢，所以需要借助催化剂来加快这一反应，碳酸酐酶是一种含锌金属酶，存在于很多微生物体内，属于已知催化反应速率极快的生物催化剂之一。在碳酸酐酶的催化下，水和反应速率会大大提升，一级反应速率常数从 $5 \times 10^{-2} \text{ s}^{-1}$ 提高到 $1.6 \times 10^6 \text{ s}^{-1}$ ，可以高效的加速二氧化碳的固化^[17]，具体如图 4 (b) 所示。丁泽晨^[17]在不同钙源下使用胶质芽孢杆菌对再生骨料进行改性处理：相比于未经处理的再生混凝土，以氯化钙为钙源的湿润碳化处理 24h 骨料增重率为 0.44%，而氢氧化钙骨料增重率为 0.65%，碳化效率均有显著提升。

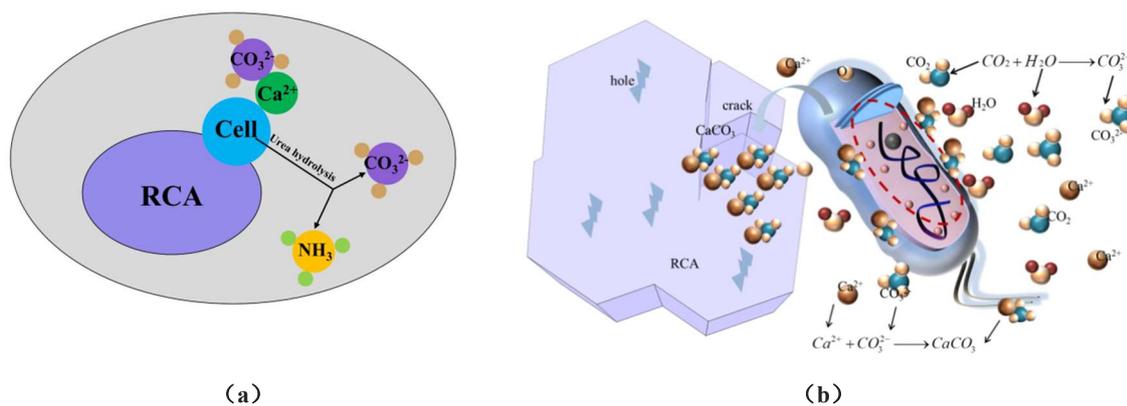


图 4 (a) 脲酶微生物改性 RCA 示意图；(b) 碳酸酐酶微生物改性 RCA 示意图；

Fig. 4 (a) Schematic diagram of urease microbial modification of RCA; (b) Schematic diagram of microbial modification of RCA by carbonic anhydrase

反硝化作用是指在硝化菌在厌氧环境中凭借硝酸盐氧化作为有机物进行新陈代谢的过程。许多细菌种类具备还原硝酸盐的能力，例如嗜碱杆菌、芽孢杆菌、脱氮杆菌等。反硝化过程会通过消耗 H^+ 使周围介质的 pH 值升高，同时产生二氧化碳，进而形成碳酸盐沉淀^[18]。不过，该作用在反应时会释放有毒气体 NO 和 N_2O ，且矿化沉积效率显著低于尿素分解反应，因此尚未得到广泛应用。

表 3 再生骨料生物改性技术方法对比

Table 3 Comparison of technological approaches to biomodification of RAs

方法	优点	缺点
尿素水解 ^[19]	矿化沉积速率快，易控制、菌种稳定好培养	会产生污染环境的氨气
二氧化碳水合反应 ^[20]	绿色环保，不会产生温室气体，对环境友好	矿化沉积速率慢
反硝化反应 ^[21]	反应易控制，菌种稳定好培养	矿化沉积速率慢，同样会产生温室气体

4 碳化改性技术

再生骨料碳化改性是通过 CO_2 与骨料中水泥水化产物（如 $\text{Ca}(\text{OH})_2$ 、C-S-H）发生矿化反应，生成碳酸钙，可以对骨料缝隙进行有效的填充，从而降低吸水率、提升力学性能并固化 CO_2 ，具体如图 5 所示。经 CO_2 碳化处理后，再生骨料的吸水率与压碎值显著降低，混凝土力学性能（抗压/抗折强度）及耐久性均显著提升^[22]。该技术在强化骨料微观结构、固定大气 CO_2 的同时，无额外能耗与污染排放，可永久固存温室气体^[23]。相较于其他改性方法， CO_2 碳化技术兼具经济性、高效性及环

境友好性，发展潜力突出。

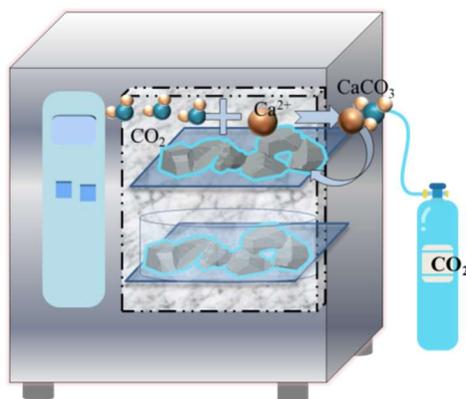


图5 碳化改性再生骨料示意图

Fig. 5 Schematic diagram of carbonation-modified recycled aggregates

5 结论

本文介绍了物理、化学、生物和碳化四种再生骨料强化技术方法，并对其强化作用机理以及优缺点进行了阐述，可以帮助选择合适的改性方法。

(1) 物理强化技术有机械研磨、加热研磨、颗粒整形强化和超声波清洗四种方法。物理方法改性效果显著，但会对机器产生磨损。同样对原料以及加工机器要求也很高。

(2) 化学强化技术主要面临产生废液污染源、强化材料成本高、设备工艺复杂、强化时间长等缺点。化学强化技术与物理强化技术相比，其工序较为复杂，成本较高。

(3) 生物改性技术和碳化改性技术相较于前面两种方法更为环保，但尿素水解法和反硝化反应会产生大量的温室气体；而二氧化碳水合反应和碳化改性技术虽然符合绿色可持续发展的理念，但是强化效果并不理想。前期微生物培养工作繁琐复杂，精准度要求较高，碳化效率低都是需要解决的问题，但是也说明了这一方向的发展潜力，仍可以保持乐观态度。

参考文献:

- [1] 许嘉男, 耿贵军, 申明远, 等. 再生骨料机械强化方法探讨[J]. 建筑机械, 2024, (08): 112-114.
- [2] 中国政府网. 我国推进建筑垃圾治理和资源化利用[EB/OL]. (2021-12-09)
- [3] 李秋义, 朱亚光, 高嵩. 我国高品质再生骨料制备技术及质量评定方法[J]. 青岛理工大学学报, 2009, 30(4):1-4+23.
- [4] Belin P, Habert G, Thiery M, et al. Cement paste content and water absorption of recycled concrete coarse aggregates[J]. Materials and Structures, 2014, 47: 1451-1465.
- [5] Shanan W M, Yang J, Su H, et al. Quality improvement techniques for recycled concrete aggregate: A review[J]. Journal of advanced concrete technology, 2019, 17: 151-167.
- [6] 肖建庄, 吴磊, 范玉辉. 微波加热再生粗骨料改性试验[J]. 混凝土, 2012, 7(7): 55-57.
- [7] Mulder E, de Jong T P R, Feenstra L. Closed cycle construction: an integrated process for the separation and reuse of C&D waste[J]. Waste Management, 2007, 27: 1408-1415.
- [8] 朱崇绩, 李秋义, 李云霞. 颗粒整形对再生骨料混凝土耐久性的影响[J]. 中国建材科技, 2007, 16(3): 6-10.
- [9] Katz A. Treatments for the improvement of recycled aggregate[J]. Journal of Materials in Civil Engineering, 2004, 16(6), 602.
- [10] 黄伟, 张阳阳, 葛进进. 预浸纳米 SiO₂ 溶液强化再生粗骨料混凝土力学性能试验[J]. 黑龙江工业学院学报(综合版), 2023, 23(12): 122-127.
- [11] 谢玲君. 废弃烧结砖瓦再生骨料混凝土配制技术与性能研究[D]. 泰安: 山东农业大学, 2012.
- [12] Ismail S, Ramli M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications[J].

- Construction and Building Materials, 2013, 44: 464-476.
- [13] Boqueute E, Boronat A, Ramos-Cormenzana A. Production of calcite (calcium carbonate) crystals by soil bacteria is a general phenomenon[J]. Nature, 1973, 246(5434): 527-529.
- [14] Qian C X, Pan Q F, WangRX. Cementation of sand granular based on carbonate precipitation induced by microor-ganism[J]. Science China Technological Sciences, 2010, 53(1): 2198-2206.
- [15] 朱亚光, 吴春然, 吴延凯, 等. 微生物矿化沉积改善再生骨料性能的研究进展[J]. 混凝土, 2018, (07): 88-92.
- [16] 丁泽晨. 废弃混凝土原地再生利用及生物改性研究[D]. 东南大学, 2020.
- [17] Zhu T, Dittrich M. Carbonate precipitation through microbial activities in natural environment and their potential in biotechnology: A Review[J]. Frontiers in Bioengineering and Biotechnology, 2016, 4: 4.
- [18] 钱春香, 王瑞兴, 詹其伟. 微生物矿化的工程应用基础[M]. 科学出版社, 2015.
- [19] Li M, Yi H, Su Y. Study on reducing water absorption of recycled aggregates (RAs) by microbial mineralization[J]. Materials, 2024, 17(7): 1612.
- [20] 黄 翰. 微生物矿化沉积技术改良再生骨料及混凝土性能研究[D]. 烟台大学, 2024.
- [21] 梁超锋, 杨金城, 潘艺倩, 等. 再生骨料碳化及其对再生混凝土性能影响的研究进展[J]. 功能材料, 2018, 49(11): 11047-11051+11060.
- [22] 顾凯文, 杨 柳, 敖清文. 再生粗骨料碳化处理对混凝土力学性能影响研究[J]. 交通科技, 2022(5): 112-116.

基金项目: 国家级创新训练项目 (MICP/EICP 改性再生骨料混凝土力学性能及抗冻性能研究, 202410433004)

¹ **第一作者:** 杨启凡 (2004-), 男, 山东理工大学本科生, 研究方向: 再生混凝土改性技术。E-mail: 985475337@qq.com。

* **通讯作者:** 李佳慧 (2000-), 男, 山东理工大学硕士研究生, 研究方向: 再生混凝土改性技术。E-mail: 13331271436@163.com。