

再生骨料强化方法研究综述

汪宇炯

成都理工大学, 中国·四川 成都 610059

摘要: 随着中国城市化进程的加快, 建筑材料的需求量与日俱增, 建筑垃圾堆存污染环境与自然砂石资源开采之间的矛盾愈发激烈。建筑垃圾经处理后可作为再生骨料用于替代天然骨料, 不仅避免生态环境的进一步破坏, 而且可以转废为宝, 再次利用到建筑材料中。再生骨料表面所附着的老旧砂浆导致了诸多缺陷, 影响了再生骨料的性能, 限制了建筑垃圾的大规模使用, 为了优化骨料表面的附着砂浆, 提高再生骨料的资源化应用。论文梳理了近年来国内外学者对再生骨料优化的研究成果, 从附着砂浆的去除和强化为出发点, 分析了强化的原理及效果, 评价了各种骨料强化方式的优缺点、适用性、经济成本以及生态环境等方面, 并提出了研究展望, 旨在为研究学者强化再生骨料提供参考和依据。

关键词: 再生骨料; 砂浆强化; 处理技术; 性能分析

A Review of Research on Reinforcement Methods for Recycled Aggregates

Yutong Wang

Chengdu University of Technology, Chengdu, Sichuan, 610059, China

Abstract: With the acceleration of urbanization in China, the demand for building materials is increasing day by day, and the contradiction between environmental pollution caused by construction waste and the exploitation of natural sand and gravel resources is becoming increasingly fierce. After treatment, construction waste can be used as recycled aggregate to replace natural aggregate, which not only avoids further damage to the ecological environment, but also can be turned into treasure and reused in building materials. The old mortar attached to the surface of recycled aggregates has caused many defects, affecting the performance of recycled aggregates and limiting the large-scale use of construction waste. In order to optimize the adhesive mortar on the surface of aggregates and improve the resource utilization of recycled aggregates. This article summarizes the research results of domestic and foreign scholars on the optimization of recycled aggregates in recent years. Starting from the removal and strengthening of attached mortar, the principle and effect of strengthening are analyzed, and the advantages and disadvantages, applicability, economic cost, and ecological environment of various aggregate strengthening methods are evaluated. The research prospects are also proposed, aiming to provide reference and basis for researchers to strengthen recycled aggregates.

Keywords: recycled aggregates; mortar reinforcement; processing technology; performance analysis

0 前言

随着中国社会化进程的加快, 建设行业的发展速度不断提高, 混凝土作为主要的建筑材料之一, 使用途径和种类得到了多方面发展, 每年消耗了接近 30 亿 m^3 的混凝土应用于建筑行业^[1]。与此同时, 城市化进程导致旧建筑拆除的规模不断增大, 建筑垃圾的存量市场也趋于饱和, 截至 2022 年已达到 32 亿吨。而建筑垃圾作为一种可再生资源, 经筛分、破碎、处理后可制备再生骨料, 不仅能响应国家的双碳政策, 缓解天然砂石资源的过度开采, 而且能消耗建筑垃圾的存量规模, 减少建筑废物对当地的环境污染, 促进建筑行业的可持续性发展。

建筑垃圾经过初步破碎、筛分等步骤后可制备再生骨料, 而建筑垃圾中仅废弃混凝土占比达到了 40% 以上, 可见利用潜力较大。然而, 受限于废弃混凝土的种类、用途、

年限不同, 破碎得到再生骨料表面存在不同程度的老旧砂浆, 使得再生骨料表现出吸水率高、压碎指标高、孔隙率大、干燥收缩大、表观密度低等特点^[2]。整体性能不如天然骨料, 用其制备的再生混凝土性能较差, 因此无法大批量替代天然砂石骨料, 可见对于再生骨料进行强化处理是提高再生骨料资源化利用的关键环节。

论文针对以上的研究需求, 以国内外相关学者的研究结论为基础, 叙述了再生骨料的定义及劣势, 分类总结了再生骨料的强化方法, 分析了各类强化方法的局限性, 为相关领域的研究学者提供参考。

1 再生骨料

1.1 再生骨料的定义

再生骨料由各类建筑物和构筑物及其附属设施等进行

建设、改造、拆除、铺设等过程中产生的各类废弃混凝土经破碎和筛分所生成，根据骨料的粒径分为再生粗骨料和再生细骨料，作为再生混凝土集料替代部分天然砂石制备多种类、多用途、多需求的再生混凝土。

1.2 再生骨料的劣势

再生骨料受限于前期的损耗阶段，导致再生骨料表面存在众多的裂纹及孔洞，而表面所附着的不均质老旧砂浆使得骨料表面更加粗糙，棱角杂乱分布。相较于天然骨料，由于老旧砂浆疏松多孔、亲水性强、损伤裂缝多、孔隙率大的特点，对再生骨料的吸水率、表观密度、压碎指标产生了较为显著的负面影响，洛杉矶磨耗值也侧面反映了再生骨料与砂浆界面过渡区粘结力较弱。

2 再生骨料的强化方法

再生骨料是由原始骨料、砂浆、外加剂、纤维材料等组成的多元材料，部分研究表明骨料表面所附着的老旧砂浆的质量已达到再生骨料质量的 20%~70%，可见附着砂浆已成为影响再生骨料性能的主要因素。目前，针对再生骨料的强化方法主要分为两大类：一类是去除再生骨料表面的老旧砂浆，另一类则是强化附着砂浆，提高砂浆与骨料界面区的粘结强度，从而达到改善再生骨料性能的目的。

2.1 附着砂浆的去除

2.1.1 机械研磨法

机械研磨法主要是采用机械设备对废弃混凝土块进行破碎、研磨，利用机械与骨料、骨料与骨料之间相互作用，从而达到去除骨料表面砂浆的目的。有学者^[3]采用改性搅拌机以 10rpm 的速度处理 5h，在搅拌过程中用水去除较小颗粒、灰尘等，并通过改良筛子进行了筛分，该处理方法减少了 62% 的粘附砂浆量，高吸水性和低密度得到了优化。也有学者^[4]采用洛杉矶研磨机对再生骨料进行处理，得出 500 转（500RVS）的加工速度所处理的改善效果优于 700 转（700RVS），有效处理了骨料表面的粘结砂浆。此外，部分学者使用球磨机处理再生骨料表面的附着砂浆，探究得出再生骨料的清洁程度与粘附在骨料表面的水泥浆数量有关，对再生混凝土的和易性与抗压强度影响较大。机械研磨方式虽然在操作简便性低、处理成本低等方面有一定的优势，但是存在骨料损坏大、残留砂浆多、杂质含量高等问题，从而影响再生骨料的品质。

2.1.2 酸溶液浸泡法

再生骨料表面的附着砂浆的主要由二氧化硅（SiO₂）、氧化钙（CaO）、氧化铝（Al₂O₃）、氧化铁（Fe₂O₃）等成分所构成，大部分成分均能与酸溶液进行反应，从而达到分离原生骨料和附着砂浆的目的。常见的酸性溶液有盐酸、硫酸、乙酸、硝酸等，与附着砂浆反应的化学表达式如表 1 所示。

表 1 砂浆的化学反应过程

溶液种类	化学反应方程式
硫酸溶液 (H ₂ SO ₄)	CaO+H ₂ SO ₄ →CaSO ₄ +H ₂ O
	Ca(OH) ₂ +H ₂ SO ₄ →CaSO ₄ +2H ₂ O
	Al ₂ O ₃ +3H ₂ SO ₄ →Al ₂ (SO ₄) ₃ +3H ₂ O
	Fe ₂ O ₃ +3H ₂ SO ₄ →Fe ₂ (SO ₄) ₃ +3H ₂ O
盐酸溶液 (HCl)	CaO+2HCl→CaCl ₂ +H ₂ O
	Ca(OH) ₂ +2HCl→CaCl ₂ +2H ₂ O
	Al ₂ O ₃ +6HCl→2AlCl ₃ +3H ₂ O
	Fe ₂ O ₃ +6HCl→2FeCl ₃ +3H ₂ O
磷酸溶液 (H ₃ PO ₄)	3CaO+2H ₃ PO ₄ →Ca ₃ (PO ₄) ₂ +3H ₂ O
	Ca(OH) ₂ +2H ₃ PO ₄ →Ca(H ₂ PO ₄) ₂ +2H ₂ O
	Al ₂ O ₃ +2H ₃ PO ₄ →2AlPO ₄ +3H ₂ O
	Fe ₂ O ₃ +2H ₃ PO ₄ →Fe ₂ (PO ₄) ₂ +3H ₂ O
乙酸溶液 (CH ₃ COOH)	CaO+2CH ₃ COOH→Ca(CH ₃ COO) ₂ +H ₂ O
	Ca(OH) ₂ +2CH ₃ COOH→Ca(CH ₃ COO) ₂ +2H ₂ O
	Al ₂ O ₃ +6CH ₃ COOH→2Al(CH ₃ COO) ₃ +3H ₂ O
	Fe ₂ O ₃ +6CH ₃ COOH→2Fe(CH ₃ COO) ₃ +3H ₂ O
硝酸溶液 (HNO ₃)	CaO+2HNO ₃ →Ca(NO ₃) ₂ +H ₂ O
	Ca(OH) ₂ +2HNO ₃ →Ca(NO ₃) ₂ +2H ₂ O
	Al ₂ O ₃ +6HNO ₃ →2Al(NO ₃) ₃ +3H ₂ O
	Fe ₂ O ₃ +6HNO ₃ →2Fe(NO ₃) ₃ +3H ₂ O

有学者^[5]将再生骨料置于硫酸（H₂SO₄）、硝酸（HNO₃）、盐酸（HCl）溶液在室温下浸泡 24h，研究结果表明硫酸溶液对附着砂浆的去除效果最优，质量损失率最大为 5.63%，吸水率有着明显的改善。部分学者^[6]探究了不同摩尔浓度的 HCl 溶液以及浸泡时间对附着砂浆的剥离效果，数据表明高浓度 HCl 溶液的剥离效果显著，并且骨料在高浓度溶液中浸泡时间过长不利于砂浆的去除。此外也有学者使用三种酸性溶液优化再生骨料，盐酸溶液处理后对再生骨料吸水率的改善显著，降低 12% 左右，掺入 20% 经处理后的骨料对再生混凝土的力学性能提升显著。化学处理方法虽然在处理效果优异、实验条件要求低上具有一定的优势，但是酸性溶液带有的 CH₃COO⁻、SO₄²⁻、PO₄³⁻ 等离子具有较强腐蚀性，骨料存在清洗不彻底的缺陷。

2.1.3 热处理法

再生骨料与附着砂浆之间存在着不同的线性膨胀系数，随着骨料加热温度的提高，两者的黏结处会产生较强的剪切应力，从而形成裂缝达到分离附着砂浆与骨料的目的。有学者^[7]将废弃混凝土所制备的再生骨料置于 750℃ 的温度中加热，结果显示几乎没有任何砂浆附着于骨料的表面。也有学者探究了附着砂浆从骨料表面脱落所需的加热温度，温度升至 573℃ 时产生了内应力，砂浆剥离效果优异。此外部分学者^[8]使用微波加热的方式处理骨料表面的粘附砂浆，利用再生骨料升温慢、抗拉强度高，而附着砂浆升温慢、抗拉强度低的特点，采用加热差将两者分层。有国内学者采用 500℃ 低功率微波加热 5h 的强化方式对再生粗骨料改良，再

生骨料升温至 300℃时内外形成较大的温度差,约 50% 的附着砂浆被剥离。基于上述文章,可见加热处理对附着砂浆的去除效果较为优异,但是此类方法对实验设备的精准度要求较高,并且高温对骨料本身也有较大的损耗,此外加热处理导致的高额能耗也不适用于低碳环保的推广应用。

2.2 附着砂浆的强化

2.2.1 化学浆液浸泡法

再生骨料与老旧砂浆粘结的界面区由于存在较多的缝隙、孔洞、裂纹等,因而导致粘结强度低。此外再生骨料缝隙中存在大量水泥水化产生的 $\text{Ca}(\text{OH})_2$,通过化学溶液进行处理后,两者的反应产物可用于填充和修复老旧砂浆层的薄弱结构。国内有学者^[9]采用纳米二氧化硅和水玻璃两种强化剂以不同浓度和浸泡时间为探讨因素进行了研究,研究表明 3% 浓度的二氧化硅溶液浸泡 72h 的修复效果最优,吸水率和压碎指标下降了 35.8% 和 32.12%。也有部分学者在水玻璃溶液浸泡后的基础上,再次采用不同浓度的聚乙烯醇(PVA)溶液浸泡再生骨料,实验结果表明浓度为 5% 的水玻璃溶液和 0.5% 的聚乙烯醇溶液的改性效果最佳,有利于再生混凝土早期力学强度的提升。

此外,也有部分学者利用超细微粉粒径小、活性强的特点,部分活性组分能与砂浆中的氢氧化钙反应生成凝胶产物,从而优化砂浆的孔隙结构。有学者^[10]团队使用四种掺有超细微粉的浆液对再生骨料进行优化,结果显示掺入 10% 硅粉的水泥浆液的处理效果优异,压碎指标显著的降低 43.7%。也有学者使用 FA&SF、FA&C、NSF 三种类型的浆液浸泡处理了再生骨料,数据指出 40% FA&C 浸泡骨料 4h 的处理效果最优,骨料的压碎指标和磨损值降低了 39%、35%。总结上述学者的研究结论,通过化学浆液浸泡的处理方式对再生骨料物理指标的改性效果优异,对优化操作的实验条件要求较低,但是受限于化学强化浆液种类众多、裹浆工艺不一等因素,难以形成统一的操作标准。

2.2.2 碳化处理法

大量的研究指出,再生骨料表面所附着的老旧砂浆主要成分为氢氧化钙、水化硅酸钙以及未完全水化的硅酸二钙及硅酸三钙等产物,而二氧化碳能与碳化产物反应生成碳酸钙(CaCO_3)产物,填充骨料的内部空隙,达到提高再生骨料性能的目的,化学表达式如表 2 所示。

表 2 砂浆的碳化反应过程

反应产物	化学反应表达式
氢氧化钙 $\text{Ca}(\text{OH})_2$	$\text{Ca}(\text{OH})_2 + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{H}_2\text{O}$
水化硅酸钙 C-S-H	$\text{C-S-H} + \text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2 \cdot n\text{H}_2\text{O}$
硅酸二钙 Ca_2SiO_4	$\text{CaSiO}_4 + 2\text{CO}_2 \rightarrow \text{CaCO}_3 + \text{CaSiO}_3$
硅酸三钙 Ca_3SiO_5	$\text{Ca}_3\text{SiO}_5 + 3\text{CO}_2 \rightarrow 3\text{CaCO}_3 + \text{SiO}_2$

实际进行碳化处理时需要考虑碳化压力、碳化时间、碳化浓度、碳化温度等因素。有学者^[11]在温度为 $20 \pm 2^\circ\text{C}$ 、相对湿度为 $60 \pm 5\%$ 的碳酸室中分析了不同碳化

浓度产生的影响,数据表明碳化浓度在 70% 左右时显著降低了再生骨料吸水率和压碎指标,高浓度碳化对骨料不利。也有学者在 100% 的 CO_2 浓度及 0.1Bar 的加压值下探讨了碳化时间对再生骨料的影响效果,结果表明碳化 72h 后,再生骨料吸水率得到了大幅度降低,10mm 的再生骨料相较碳化 6h 降低了 32.9%。国外有学者^[12]研究了在碳化过程中粒径大小和骨料水分含量对再生骨料的改性效果,结论表明比表面积更大的小粒径再生骨料碳化效果更优异,而骨料过高或过低的含水量都会影响再生骨料孔隙结构中的湿度。然而部分骨料内部的氢氧化钙等碳化物质不足,可以通过预处理的方式提高 Ca^{2+} 的含量。此外,也有学者采用石灰水养护和碳化结合的方式处理再生骨料,经石灰水浸泡后为再生骨料提供了额外的钙源,增加了碳化产物的数量,吸水率和孔隙率分别降低了 50% 和 33%。碳化处理作为一种高效且环保的处理方式,不仅能大幅度提升再生骨料的性能,也能消耗大气中的二氧化碳,此类处理方式也与中国减碳减排背景高度相关,具有较为广阔的应用前景。

2.2.3 微生物矿化法

微生物诱导碳酸钙沉淀矿化处理是利用老旧砂浆所含有的大量 Ca^{2+} 作为实验基础,通过与细菌呼吸代谢产生的 CO_3^{2-} 进行化学反应,生成致密的碳酸钙(CaCO_3),从而填充砂浆的缝隙和孔洞,形成生物沉淀覆盖层。然而微生物的沉淀矿化过程受培养基的组成、pH 值高低、相对湿度、骨料粒径等因素影响较大。国外有学者^[13]探究 4 种钙源对芽孢杆菌矿化沉淀效应的影响,数据显示氯化钙为钙源的培养基中,芽孢杆菌的脲酶产量最高,氧化钙为钙源的培养基脲酶产量最低。也有学者^[14]探究得出 pH 值对碳酸钙沉淀有双重影响,巴氏菌的比脲酶活性随 pH 值的升高出现了先增后降的发展趋势,脲酶活性在 PH 约为 8 时达到峰值。此外,也有团队研究了 pH 值和矿化温度对微生物沉淀的影响,数值指出链球菌在 pH 值为 9.5 时碳酸钙沉淀质量达到峰值,此外随着矿化温度的提高,酶活性和高温下尿素水解的速率增大,碳酸钙沉淀质量增加显著。可见微生物沉淀矿化法是一种较为新颖的处理技术,具有可持续性、绿色、低碳的优点,后续的应用潜力大。但是受限于微生物处理对工艺设备的要求苛刻、微生物种群繁多、经济成本高等特点,无法进行大批量应用。

3 研究展望

论文以再生骨料的强化方法为切入点,分别从再生骨料附着砂浆的去除和强化这两方面介绍了再生骨料的改性方法。传统的机械研磨和热处理方法存在能耗较高、骨料损坏大以及砂浆去除效果不佳等劣势,可以进一步研究与酸溶液浸泡相结合的方式,充分利用两者的优势。目前,较为新颖的碳化、微生物矿化处理都是极为高效的改性方式,但是大部分改性方法仅限于实验室中的理想研究阶段,没有形成

统一的规范标准,所需的仪器设备要求较高、操作流程烦琐、缺乏对化学裹浆液的后续处理、再生骨料改性的经济成本居高不下以及如何实现再生骨料的大规模商用改性等问题,都需要进一步细化研究。

参考文献:

- [1] 戴显明.积极促进绿色建筑发展 努力践行砼业低碳理念——中国建筑业协会混凝土分会五届二次理事会工作报告[J].混凝土,2012(1):1-3.
- [2] Guo H, Shi C, Guan X, et al. Durability of recycled aggregate concrete – A review[J]. Cement and Concrete Composites, 2018(89):251-259.
- [3] Dimitriou G, Savva P, Petrou F M. Enhancing mechanical and durability properties of recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials,2018(158):228-235.
- [4] Babu V S, Mullick A K, Jain K K, et al. Mechanical properties of high strength concrete with recycled aggregate-influence of processing[J]. Indian Concr J,2014,88(5):10-26.
- [5] Saravanakumar P, Abhiram K, Manoj B. Properties of treated recycled aggregates and its influence on concrete strength characteristics[J]. Construction and Building Materials,2016(111): 611-617.
- [6] Ismail S, Ramli M. Engineering properties of treated recycled concrete aggregate (RCA) for structural applications[J]. Construction and Building Materials,2013(44):464-476.
- [7] Mulder E, Blaakmeer J, Tamboer L, et al. A closed material cycle for concrete, as part of an integrated process for the reuse of the total flow of C&D waste. In: Dhir, Ravindra K., Dyer Thomas D., Halliday, Judith E. (Eds.)[Z].2002.
- [8] Akbarnezhad A, Ong K, Zhang M, et al. Microwave-assisted beneficiation of recycled concrete aggregates[J]. Construction and Building Materials,2011,25(8):3469-3479.
- [9] 魏红俊,闫洪生,朱亚光,等.化学强化对再生粗骨料性能的改性研究[J].山东农业大学学报(自然科学版),2021,52(6):1009-1016.
- [10] 杜婷,李惠强,吴贤国.混凝土再生骨料强化试验研究[J].新型建筑材料,2002(3):6-8.
- [11] Pan G, Zhan M, Fu M, et al. Effect of CO₂ curing on demolition recycled fine aggregates enhanced by calcium hydroxide pre-soaking[J]. Construction and Building Materials,2017(154):810-818.
- [12] Zhan B, Poon S C, Liu Q, et al. Experimental study on CO₂ curing for enhancement of recycled aggregate properties[J]. Construction and Building Materials,2014(67):3-7.
- [13] Varennyam A, Xiangliang P. Influence of calcium sources on microbially induced calcium carbonate precipitation by *Bacillus* sp. CR2[J]. Applied biochemistry and biotechnology,2014,173(1):307-17.
- [14] V A, A M, C P B, et al. Lactose mother liquor as an alternative nutrient source for microbial concrete production by *Sporosarcina pasteurii*[J]. Journal of industrial microbiology & biotechnology,2009,36(3):433-8.

作者简介:汪宇炯(1999-),男,中国四川成都人,硕士,从事建筑材料研究。