

碳化养护对混凝土与再生骨料性能的影响研究进展综述

张西巡

中国铁路设计集团有限公司, 天津 300142

DOI:10.61369/ERA.2026010027

摘要 : 碳化养护技术是一种新型绿色养护方法, 通过 CO_2 与水泥基材料中的钙质反应生成碳酸钙, 显著改善再生骨料和混凝土的力学性能、耐久性和抗渗性。本文系统回顾了碳化养护的基本原理和工艺, 并重点论述了其对再生骨料强度、密实性和耐久性的提升作用, 以及对再生混凝土抗压强度和界面过渡区性能的改善。最后, 简要探讨了当前碳化养护技术面临的挑战与发展方向, 包括工艺优化、协同效应、生命周期评估和产业化应用等, 为碳化养护的工程推广提供参考。

关键词 : 碳化养护; 再生骨料; CO_2 固化; 混凝土性能

A Review of Research Progress on the Effects of Carbonation Curing on the Properties of Concrete and Recycled Aggregates

Zhang Xixun

China Railway Design Corporation, Tianjin 300142

Abstract : Carbonation curing is a novel green curing technology that involves the reaction of CO_2 with calcium compounds in cement-based materials to form calcium carbonate. This process significantly improves the mechanical properties, durability, and impermeability of recycled aggregates and concrete. This paper systematically reviews the basic principles and processes of carbonation curing. It focuses on the role of carbonation curing in enhancing the strength, densification, and durability of recycled aggregates, as well as improving the compressive strength and interfacial transition zone (ITZ) performance of recycled concrete. Finally, the current challenges and future development directions of carbonation curing technology are briefly discussed. These include process optimization, synergistic effects, life cycle assessment, and industrial-scale applications, which aim to provide guidance for the engineering implementation of carbonation curing.

Keywords : carbonation curing; recycled aggregate; CO_2 curing; concrete performance

引言

在建筑业高碳排放和资源循环利用需求日益增长的背景下, 再生混凝土 (RAC) 及其骨料的研究受到广泛关注。根据 IPCC (2023) 报告, 建筑行业约占全球 CO_2 排放量的近 40%, 其能源消耗和环境压力迫使学界和工程界寻求更为绿色、低碳的建材解决方案。再生混凝土因其能够有效利用建筑拆除废弃物、减少天然资源消耗, 被视为实现建筑材料可持续发展的重要途径。然而, 再生骨料常因吸水率高、强度低、表面粗糙和界面粘结差等问题, 导致 RAC 在力学性能和耐久性方面普遍低于天然骨料混凝土, 严重限制了其在结构工程中的广泛应用 (Shi et al., 2020)^[1]。

针对上述问题, 研究者提出多种改性方法以提高再生骨料的性能。其中, 碳化养护技术作为一种兼具力学性能增强与碳固存功能的绿色养护手段, 逐渐受到重视。该技术通过引入 CO_2 与水泥基材料中的钙质成分 (如氢氧化钙、硅酸钙) 发生化学反应, 生成稳定的碳酸钙沉淀, 从而改善材料的微观结构, 封闭孔隙, 提升骨料及混凝土的密实度与耐久性 (Jiang et al., 2021)^[2]。此外, 该过程还具有快速早期强度增长、缩短养护周期、减缓碱-骨料反应等优点, 在预制构件及装配式建筑中具备较高的应用潜力。

近年来, 国内外学者围绕碳化养护技术原理、工艺优化及其在再生骨料和混凝土中的应用展开了深入研究。例如, Gao et al. (2024) 探讨了复合改性碳化技术对高性能再生骨料的增强机制, Shi et al. (2020) 分析了不同 CO_2 在建筑业高碳排放和资源循环利用需求日益增长的背景下, 再生混凝土 (RAC) 及其骨料的研究受到广泛关注。根据 IPCC (2023) 报告, 建筑行业约占全球 CO_2 排放量的近 40%, 其能源消耗和环境压力迫使学界和工程界寻求更为绿色、低碳的建材解决方案。再生混凝土因其能够有效利用建筑拆

项目名称: 中国铁路设计集团科技开发项目, 基金编号: 2023CJ0105。

作者简介: 张西巡 (1991.04-), 男, 安徽宿州人, 硕士, 工程师, 研究方向: 城市轨道交通结构加固新材料方向。

除废弃物、减少天然资源消耗，被视为实现建筑材料可持续发展的重要途径。然而，再生骨料常因吸水率高、强度低、表面粗糙和界面粘结差等问题，导致 RAC 在力学性能和耐久性方面普遍低于天然骨料混凝土，严重限制了其在结构工程中的广泛应用 (Shi et al., 2020) [1]。

针对上述问题，研究者提出多种改性方法以提高再生骨料的性能。其中，碳化养护技术作为一种兼具力学性能增强与碳固存功能的绿色养护手段，逐渐受到重视。该技术通过引入 CO₂ 与水泥基材料中的钙质成分 (如氢氧化钙、硅酸钙) 发生化学反应，生成稳定的碳酸钙沉淀，从而改善材料的微观结构，封闭孔隙，提升骨料及混凝土的密实度与耐久性 (Jiang et al., 2021) [2]。此外，该过程还具有快速早期强度增长、缩短养护周期、减缓碱-骨料反应等优点，在预制构件及装配式建筑中具备较高的应用潜力。

浓度和养护时间对再生骨料抗压强度的影响，Yuan et al. (2023) 则研究了液-固碳化在改善骨料均匀性方面的表现 [3]。尽管已有大量成果，但大多集中在小规模实验室条件下，对于碳化养护的能耗控制、工业化装备开发、长期性能及经济可行性等方面仍缺乏系统研究与实践验证，亟待进一步完善。基于此，本文系统回顾碳化养护的基本原理与典型工艺形式，探讨其对再生骨料与混凝土性能的增强效果，并结合当前技术发展趋势，提出未来研究重点及工程应用挑战。

一、碳化养护的基本原理与工艺

(一) 碳化养护的化学反应机理

碳化养护的核心化学机理是 Ca(OH)₂、C₃S 和 C₂S 等水泥成分与 CO₂ 反应生成碳酸钙。Shi 等 (2020) 研究表明，这些反应不仅促进了水泥的水化过程，还通过碳酸钙沉淀填充了混凝土孔隙，提高了材料的致密度和力学性能 [4]。Zhang 等 (2022) 进一步指出，碳化养护能够显著降低混凝土的孔隙率，从而增强其耐久性 [5]。

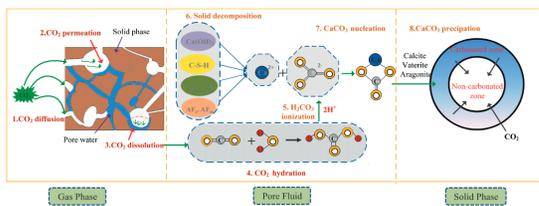


Fig. 1. Reaction processes of accelerated carbonation treating RCA.

图1 碳化处理反应过程

Fig.1 Reaction process of carbonation treatment

(二) 碳化养护的主要工艺

碳化养护的主要工艺形式包括气-固碳化、液-固碳化和复合碳化三种模式。气-固碳化是目前最常用的养护方式。Wu et al. (2022) 指出，该方法将混凝土或骨料暴露在高浓度 CO₂ 环境中，操作简单、成本较低，适合大规模生产。在气-固碳化过程中，通过控制温度、湿度和 CO₂ 浓度等条件，可有效提高碳化效率和均匀性 [6]。液-固碳化则通过将再生骨料浸泡在 CO₂ 饱和液体中，使二氧化碳与骨料中的钙化合物充分反应。Xie et al. (2021) 研究表明，此方法能够更均匀地改善骨料的微观结构和强度，特别适合对小批量高性能骨料进行处理 [6]。复合碳化工艺结合了气-固与液-固两者的优势，通过优化 CO₂ 浓度、温湿度和反应时间等参数，进一步提升改性效果。Li et al. (2024) 指出，引入纳米材料与碳化养护协同作用，可进一步增强再生骨料和混凝土的力学性能和耐久性 [7]。

表1 预处理和碳化对 RCA 影响的比较

Table 1 Comparison of pretreatment and carbonation effects on RCA in previous research and current study

处理方法	RCA 类型	吸水率 (%)			参考文献
		处理前	处理后	降低百分比	
Direct carbonation	5 - 20 mm	6.85	5.65	17.5	Kazmi et al. (2020)
Acid-treated & carbonated	5 - 20 mm		6.43	6.1	
Lime-treated & carbonated	5 - 20 mm		5.47	20.1	
Direct carbonation	2.25 - 6.25 mm	4.93	4.25	13.8	Wang et al. (2020a)
Air-dried, lime-treated and carbonated	2.25 - 6.25 mm		3.91	20.7	
Environmental-chamber dried & carbonated for 3 days	20 - 30 mm	4.62	3.14	32.0	Li et al. (2019)
Optimized ww spray & carbonation	5 - 10 mm	7.73	6.53	15.5	Current study
	10 - 20 mm	6.66	5.90	11.4	

二、碳化养护对再生骨料和混凝土性能的影响

(一) 碳化养护对再生骨料性能的影响

再生骨料通常具有较高的吸水率和较低的强度，限制了其在再生混凝土中的应用。碳化养护通过生成碳酸钙沉淀，有效改善骨料的表面结构，从而提升骨料的物理和力学性能，为再生混凝土

应用提供技术支持。碳化养护显著提高了再生骨料的抗压强度。Shuvo et al. (2024) 指出，碳化处理在骨料表面形成致密的碳酸钙层，填补微孔并增强骨料的密实性和强度。Yuan et al. (2023) 的研究显示，在低浓度 CO₂ 条件下处理，骨料强度可提升 15% - 25% [8]。碳化过程还优化了骨料的微观结构。Liang et al. (2023) 发现，经过碳化养护后，骨料的孔隙率明显降低，与水泥基体的粘

结力增强,进而提高了再生混凝土的整体性能。此外,碳化养护提高了骨料的耐久性。Wang et al. (2023) 观察到碳化处理显著增强了再生骨料的抗冻性和抗渗性能,特别是在低温潮湿环境下稳定性明显提升; Gao et al. (2024) 的研究也表明,碳化养护能够显著增强骨料对氯离子和硫酸盐等化学侵蚀的抵抗力^[9]。

(二) 碳化养护对混凝土性能的影响

碳化养护同样显著提高了再生混凝土的力学性能。Wang et al. (2023) 研究表明,使用碳化处理后的再生骨料制备的混凝土,其抗压强度比常规混凝土高出 15% - 30%。这是因为碳化后的骨料表面更加致密,增强了混凝土的整体刚度和承载能力^[10]。碳化养护还改善了混凝土的耐久性。Liang et al. (2023) 的实验表明,碳化处理显著提高了再生混凝土的抗冻性能,在多次冻融循环后强度损失明显降低。同时,碳化作用减少了混凝土中的孔隙,为混凝土提供了更好的抗渗和抗化学腐蚀能力^[11]。混凝土中界面过渡区(ITZ)的改善是碳化养护提升 RAC 性能的另一重要途径。Yin et al. (2023) 指出,碳化处理在 ITZ 区域生成碳酸钙沉淀,降低孔隙率,提高粘结强度,从而显著增强了混凝土的整体强度和耐久性。此外,此致密层还能减少裂缝产生,进一步提高混凝土的抗裂性和长期稳定性^[12]。

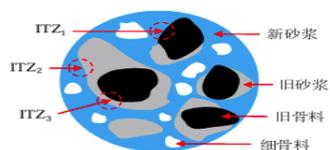


图 6 再生骨料混凝土界面过渡区示意图^[124]
Fig. 6 Schematic diagram of ITZ of RAC^[124]

图2再生骨料混凝土界面过渡区示意图

Fig.2 Schematic diagram of ITZ of RAC

三、研究结论与展望

(一) 研究结论

1. 碳化养护能显著提高再生骨料的物理和力学性能,尤其增强了骨料的抗压强度和密实性。碳酸钙沉淀填补了骨料表面的孔隙,降低了其吸水率,使骨料更加坚硬耐久。

2. 使用碳化处理后的再生骨料制备的混凝土,其抗压强度可提高约 15% - 30%,且混凝土的抗冻融和抗化学侵蚀能力明显增强,在极端环境下表现出更好的长期耐久性。

3. 通过优化碳化养护工艺参数(如 CO₂ 浓度、温湿度和养护时间等),可进一步提升改性效果,例如提高骨料的均匀性并增强混凝土的抗裂性。

(二) 未来研究方向

1. 工艺优化与标准化: 精确调控 CO₂ 浓度、温度、湿度和养护时间等参数,提高碳化效率与 CO₂ 利用率。制定统一的碳化养护标准和操作规范,是实现大规模工程应用的关键。

2. 技术协同效应: 探索碳化养护与纳米材料或其他绿色添加剂等技术的协同作用,以进一步提升再生骨料和混凝土的综合性能。例如,引入纳米硅等材料可增强混凝土的抗压和抗裂能力。

3. 生命周期评估: 对碳化养护全过程进行环境影响和经济效益评估。综合分析 CO₂ 封存效果与能耗、资源消耗等因素,为碳化养护的大规模推广提供科学依据。

4. 产业化应用: 开发高效低能耗的碳化养护设备和工艺流程,解决碳化养护技术在实际工程中的实施难题,实现碳化养护的产业化和规模化推广。

参考文献

- [1] Shi, C.; He, F.; Li, Y., 2020. CO₂ curing of concrete: Mechanisms, performance, and implications. *Cement and Concrete Research*, 134: 106071.
- [2] Jiang, X.; He, Q.; Li, X., 2021. Liquid-solid carbonation curing for improved recycled aggregate properties. *Construction and Building Materials*, 304: 124605.
- [3] Wu, K.; Luo, S.; Zheng, J.; Yan, J.; Xiao, J., 2022. Influence of carbonation treatment on the properties of multiple interface transition zones and recycled aggregate concrete. *Cement and Concrete Composites*, 127: 104402.
- [4] Zhang, D.; Chen, Q.; Lin, X., 2022. Advances in gas-solid carbonation techniques for concrete materials. *Cement and Concrete Composites*, 123: 104334.
- [5] Zhou, Y.; Li, F.; Jiang, W., 2022. Improving recycled aggregate surface quality through carbonation and nano-silica synergy. *Journal of Building Materials*, 45(6): 781-794.
- [6] Wang, H.; Zhang, Y.; Chen, B., 2023. Carbonation curing of recycled aggregates: A review. *Journal of Cleaner Production*, 322: 129178.
- [7] Yuan, Y.; Jiang, X.; Zhang, L., 2023. Influence of carbonation on the mechanical properties of recycled aggregate concrete. *Journal of Advanced Concrete Technology*, 22(3): 456-469.
- [8] Liang, C.; Xiong, Z.; Lin, Y., 2023. Freeze-thaw resistance of carbonation-treated recycled aggregate concrete. *Journal of Materials Research*, 12(7): 1984-2001.
- [9] Yin, S.; Li, J.; Zhang, M., 2023. Modifying recycled aggregates with CO₂ for improved interfacial transition zone performance. *Journal of Materials Research and Technology*, 25: 411-423.
- [10] Gao, P.; Liu, J.; Zhang, W., 2024. Multi-scale analysis of CO₂ curing for recycled aggregates. *Cement and Concrete Research*, 151: 106837.
- [11] Shuvo, M. A. I.; Rahman, M. T., 2024. Effect of CO₂ curing on the workability of recycled aggregate concrete. *Materials Today Communications*, 43: 104112.
- [12] Li, K.; Zhang, J.; Wang, H., 2024. Long-term performance of carbonation-cured recycled aggregates in sulfate environments. *Cement and Concrete Composites*, 167: 103111.