

面向碳中和的 CO₂矿化封存胶凝材料制备工艺

祝善良

普信氟硅新材料（衢州）有限公司 浙江衢州

【摘要】面向碳中和目标的 CO₂矿化封存胶凝材料制备工艺通过利用工业副产物及矿物原料，实现二氧化碳的高效固定与资源化转化。该工艺在材料微观结构调控方面具有独特优势，能够在胶凝体系中形成稳定的碳酸盐矿物，提高材料的力学性能与耐久性，同时降低碳排放。通过合理选择原料与反应条件，碳固存过程与胶凝反应实现协同耦合，兼具环境效益与工程价值。该技术为传统水泥替代材料的发展开辟了新的路径，为实现碳达峰与碳中和战略提供重要支撑。

【关键词】碳中和；CO₂矿化；胶凝材料；碳封存

【收稿日期】2025年8月14日 **【出刊日期】**2025年9月18日 **【DOI】**10.12208/j.jccr.20250055

Preparation process of CO₂ mineralized sealing cementitious material for carbon neutrality

Shanliang Zhu

Puxin fluorosilicone new material (Quzhou) Co., Ltd., Quzhou, Zhejiang

【Abstract】 The preparation process of CO₂ mineralized sealing cementitious materials for carbon neutrality targets utilizes industrial by-products and mineral raw materials to achieve efficient carbon fixation and resource conversion. This process demonstrates unique advantages in microstructure regulation, enabling the formation of stable carbonate minerals within the cementitious system that enhance mechanical properties and durability while reducing carbon emissions. Through rational selection of raw materials and reaction conditions, the carbon sequestration process achieves synergistic coupling with cementitious reactions, delivering both environmental benefits and engineering value. This technology pioneers new pathways for developing alternative cement substitutes and provides crucial support for achieving carbon peaking and neutrality strategies.

【Keywords】 Carbon neutrality; CO₂ mineralization; Cementitious materials; Carbon sequestration

引言

碳排放控制与资源高效利用已成为全球关注的焦点，如何在材料领域探索低碳与功能并重的路径具有深远意义。CO₂矿化封存胶凝材料的出现，为二氧化碳的减排与资源化利用提供了切实可行的解决方案。该材料不仅能在反应过程中实现碳固存，还能显著改善力学性能与环境适应性，使之在基础设施和绿色建材中展现出广阔应用前景。围绕这一新型工艺展开研究，能够推动低碳建材体系的革新，并进一步助力碳中和目标的实现。

1 碳中和背景下传统胶凝材料的挑战

在碳中和战略持续推进的背景下，传统胶凝材料的高碳排放特征逐渐暴露出明显的局限性。以硅酸盐水泥为代表的常用胶凝材料，其生产过程需要消耗大

量石灰石、黏土等矿物原料，并在煅烧阶段释放大量CO₂。高温煅烧不仅导致能源消耗巨大，而且伴随着不可避免的分解反应碳排放，使得水泥工业成为全球碳排放的重要来源之一^[1]。据统计，水泥工业贡献了全球约8%的二氧化碳排放，这一比例在能源、交通等行业之外同样显得突出。随着碳中和目标的提出，传统工艺已难以满足绿色低碳发展的要求，迫切需要探索新的材料体系与工艺路线来实现生产过程与环境保护的平衡。

在传统胶凝材料应用中，环境负担不仅体现在生产阶段，还延伸至服役周期。水泥基材料在长期使用过程中因碳化作用而逐渐损失部分性能，同时大量粉煤灰、钢渣等工业副产物未能有效利用，加剧了资源浪费与环境压力。传统胶凝材料的高碳足迹与单一原料体

系，使其在应对碳减排目标时缺乏灵活性与适应性。例如，水泥熟料高比例的使用限制了可替代原料的掺入量，从而制约了减碳潜力的发挥。这些问题不仅影响行业整体的绿色转型，也成为制约基础设施建设和建材产业可持续发展的关键障碍。在这一过程中，碳排放与资源消耗的双重矛盾愈加突出，传统胶凝材料的局限性已成为制约碳中和目标落实的重要瓶颈。

面向碳中和的背景，亟需建立一种能够兼顾环境效益与工程性能的新型胶凝材料体系。通过对传统工艺局限性的反思，可以看到其最大问题在于以高温煅烧为核心的制备模式，以及对自然矿产资源的高度依赖。这种发展路径在碳达峰与碳中和战略要求下显得不可持续^[2]。学术界与工程界逐渐将目光转向二氧化碳矿化封存等低碳工艺。该类方法不仅能够在材料制备环节主动固定 CO₂，还能借助工业固废与副产物作为反应原料，实现废弃物资源化与碳减排的双重目标。正是由于传统胶凝材料难以承载碳中和目标的需求，探索全新的矿化封存型制备工艺才显得尤为必要，这为后续低碳建材的发展指明了方向。

2 CO₂矿化封存机理与胶凝体系耦合路径

CO₂矿化封存的基本机理在于将气态二氧化碳转化为稳定的碳酸盐矿物，从而实现长期固定。在胶凝材料体系中，这一过程通常通过活性氧化钙、氧化镁以及硅酸盐矿物与 CO₂的反应来完成，形成碳酸钙、碳酸镁等难溶性产物。由于这些反应具有热力学稳定性，生成的碳酸盐在材料服役周期内几乎不会分解，从根本上实现碳固存目标^[3]。与地质封存方式相比，矿化封存将二氧化碳固定于材料微观结构内部，不仅缩短了反应路径，还为构筑物赋予了新的功能属性。通过对反应动力学和传质过程的控制，可以显著提高 CO₂的吸收速率，使矿化作用与材料水化反应实现协同耦合。

在胶凝体系中，矿化过程并非单一的化学反应，而是与材料结构演化紧密关联。二氧化碳在水化产物表面扩散并与氢氧化钙反应生成碳酸钙，这一过程能够有效填充孔隙，降低材料孔隙率，从而提高致密性与力学强度。同时，部分活性硅铝成分在碳化环境下可与 Ca²⁺反应，形成碳酸盐与铝硅酸盐共存的复合相结构，这种微观结构的变化有助于提升胶凝体系的耐久性与抗侵蚀性能。随着反应的深入，胶凝材料表现出更高的尺寸稳定性和耐久性能，为其在复杂工程环境中的应用奠定了基础。矿化封存机理的优势不仅在于固定碳元素，还在于通过化学与结构双重作用赋予材料优异性能。

将 CO₂矿化与胶凝体系耦合的关键在于工艺路径的优化与控制。通过调节原料的矿物组成、颗粒细度及反应条件，可以实现二氧化碳矿化反应与水化反应的同步发生。以钢渣、粉煤灰等工业固废为原料，不仅提供了丰富的活性成分，还在碳化过程中促进了凝胶结构的生成，使固废利用与碳封存形成良性循环。在反应环境方面，湿度、压力与温度的调控对反应效率具有显著影响，高压碳化与湿式碳化工艺已展现出提升碳固存效率的潜力^[4]。通过工艺与机理的耦合，CO₂矿化不仅成为一种减碳手段，更转化为推动胶凝材料性能优化的有效路径，展现出兼具环境价值与工程价值的双重意义。

3 基于原料选择与工艺条件的制备优化

在 CO₂矿化封存胶凝材料的制备过程中，原料的选择直接决定了反应活性和最终性能。传统水泥熟料在高温煅烧中释放大量二氧化碳，因此寻找替代性低碳原料成为优化工艺的核心方向。钢渣、粉煤灰、电石渣以及矿渣粉等工业固废因含有丰富的活性氧化钙、氧化镁和硅铝组分，被广泛视为适合的碳化反应载体。这些副产物在高表面积和适宜碱度条件下能够与二氧化碳发生反应生成稳定碳酸盐，同时减少对天然矿产资源的依赖^[5]。通过合理配比，不同固废的协同作用能够增强体系的矿化速率和胶凝性能，使其在兼顾环境效益的同时保持良好的工程应用特性。

制备工艺条件的优化对于促进矿化反应的进行具有决定性影响。反应环境中的二氧化碳分压、温度与湿度都会显著影响矿化效率，高压碳化条件下气体分子扩散速率加快，有利于矿物表面与孔隙中的反应进行，而适度的湿度则能够为反应提供必要的传质介质，避免生成碳酸盐产物堵塞孔隙。反应时间和养护方式同样需要精确控制，过快的反应会造成材料结构内部应力集中，而缓慢的碳化则可能降低效率。通过实验设计对不同条件下的反应动力学进行研究，可形成一套针对不同原料体系的最优工艺参数，从而实现碳固存和性能提升的平衡。

在具体制备过程中，原料细度与活化处理也不容忽视。机械活化能够增加固废颗粒的比表面积，提升反应活性，而化学激发剂如碱性溶液则可进一步促进硅铝组分的溶解，提高矿化反应速率。多种处理手段的结合，使得 CO₂能够更有效地在胶凝体系中被捕获和固定^[6]。通过对原料选择与工艺条件的综合优化，不仅能够显著降低材料制备过程的碳排放，还能改善力学强度、抗渗性和耐久性等关键性能。这种以资源利用和碳

固存双重目标为导向的优化策略，为矿化胶凝材料在绿色建材领域的推广应用提供了坚实的技术基础。

4 矿化胶凝材料性能提升与工程应用价值

在 CO₂矿化封存胶凝材料的研究中，性能提升不仅体现为力学强度的增强，还表现在材料整体耐久性的改善。矿化反应生成的碳酸钙能够填充微孔与毛细通道，使得体系结构更为致密，从而显著提高抗压强度和抗折强度。与传统水泥材料相比，矿化胶凝体系中的晶体与凝胶相结合形成的复合结构，有助于缓解内部应力集中现象，提高断裂韧性和尺寸稳定性^[7]。矿化反应在一定程度上抑制了氢氧化钙过量析出的问题，使得材料在长期服役中表现出更强的抵抗碳化、硫酸盐侵蚀和氯离子渗透的能力。这些性能上的优势不仅拓展了材料的应用场景，也为绿色建材产业的高质量发展提供了技术支撑。

性能提升的价值还体现在对工程应用适应性的强化。矿化胶凝材料在制备过程中利用了大量工业副产物，不仅实现了资源再生，还使产品表现出良好的可加工性和环境兼容性。在混凝土结构中应用时，这类材料能够有效降低整体碳足迹，并在施工环节展现出较好的和易性和泵送性。由于矿化过程在微观上增强了孔隙结构的均匀性，构件在承载状态下表现出更高的稳定性，适合在桥梁、隧道和海工等高耐久性需求的工程中使用。与此同时，矿化胶凝体系在制品加工环节还可通过工艺调整实现快速固化，提高生产效率和成型质量，满足预制构件规模化生产的要求。工程应用的可行性不仅在实验室得到验证，也逐渐在实际项目中展现潜力。

矿化胶凝材料的工程价值更在于其对碳中和目标的战略贡献。在材料生产阶段直接固定二氧化碳，不仅实现了碳排放削减，还赋予材料以环境效益与社会效益的双重价值。随着政策引导与碳交易机制的逐渐完善，这类新型材料的推广有望在建筑业中形成可量化的减排效益，从而提升工程项目的绿色认证水平。其低碳属性与性能优势相结合，将推动建筑行业在碳中和背景下完成从高能耗向低能耗、从高排放向低排放的转变^[8]。矿化胶凝材料通过性能提升与工程应用价值的充分展现，成为连接技术创新与可持续发展的关键纽带，

预示着低碳建材体系在全球绿色转型中的重要地位。

5 结语

碳中和战略的深入实施使传统高碳排放胶凝材料面临前所未有的挑战，CO₂矿化封存胶凝材料的研究与应用正是在这一背景下展现出独特价值。这一新型工艺不仅实现了二氧化碳的高效固定，还在微观结构优化中赋予材料优越的力学性能与耐久特性。以工业固废为主要原料的利用路径，使资源循环与环境效益得以兼顾，为绿色建材体系提供了可持续的发展方向。性能提升与工程适应性的结合，使其在基础设施与高性能混凝土应用中展现广阔前景。碳固存与胶凝反应的协同作用，不仅推动了低碳工艺创新，也为建筑行业转型提供了坚实支撑。

参考文献

- [1] 何亚莉. 面向碳中和的区域土地利用变化碳效应时空模拟与优化研究[J]. 黑龙江国土资源, 2025, 23(08): 74-82.
- [2] 陈松巍, 卜继霞. 改性磷石膏充填体胶凝材料开发关键技术[J]. 中国科技信息, 2025, (16): 65-67.
- [3] 王真, 潘力铭. 碳中和背景下能源企业数字经济发展路径研究[J]. 国际商务财会, 2025, (15): 88-92+97.
- [4] 康丽华, 肖凤娟, 张广田, 等. 多元固废复合胶凝材料混凝土单轴受压力学性能试验研究 [J/OL]. 材料导报, 1-19[2025-08-19].
- [5] 刘志强, 王越, 杨斌, 等. 电石渣激发矿渣-尾矿粉复合固废基胶凝材料性能试验研究 [J/OL]. 混凝土与水泥制品, 1-4[2025-08-19].
- [6] 田春晓, 张贤哲. 碳中和目标下企业碳会计体系构建与实践路径探析[J]. 商业观察, 2025, 11(23): 94-97.
- [7] 万小军, 任碧琦, 李翠, 等. 新型胶凝材料改性尾砂堆排特性试验研究 [J/OL]. 有色金属(中英文), 1-10[2025-08-19].
- [8] 方寅. 碳中和环境下绿色建筑材料的回收利用实践 [J]. 石材, 2025, (08): 174-176.

版权声明：©2025 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

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



OPEN ACCESS