

二氧化碳矿化技术现状与发展趋势

李志林^{1,2}, 刘琦², 薛明¹, 杨术刚¹, 蔡明玉¹, 张坤峰¹, 陈泉¹, 刘双星^{1,2*}

(1. 中国石油集团安全环保技术研究院有限公司, 北京 102206;

2. 油气资源与工程全国重点实验室, 北京 102249)

摘要: 综述了天然矿物、工业固废、原位及生物矿化等主要技术路线的最新进展与工程实践, 深入剖析了其在反应速率、能耗成本及规模化应用方面的技术瓶颈。展望未来, 研发高效催化剂、构建多场景耦合利用模式, 并借助数字化优化手段, 是突破瓶颈、推动该技术产业化与商业化应用的关键, 对于应对气候变化具有重要意义。

关键词: CO₂ 矿化; CCUS; 碳中和; 工业固废; 碳酸盐; 矿化工程

中图分类号: X701

文献标志码: A

文章编号: 0253-4320(2026)10-0086-06

DOI: 10.16606/j.cnki.issn0253-4320.2026.10.016

Current status and development trends of carbon dioxide mineralization technology

LI Zhi-lin^{1,2}, LIU Qi², XUE Ming¹, YANG Shu-gang¹, CAI Ming-yu¹, ZHANG Kun-feng¹,

CHEN Quan¹, LIU Shuang-xing^{1,2*}

(1. CNPC Research Institute of Safety & Environment Technology, Beijing 102206, China;

2. State Key Laboratory of Petroleum Resources and Engineering, Beijing 102249, China)

Abstract: This paper reviews recent progress and engineering practices of major technological routes, including natural minerals, industrial solid wastes, in-situ mineralization, and biomineralization. It further analyzes the key technical bottlenecks in terms of reaction rates, energy consumption, and large-scale application. Looking ahead, the development of efficient catalysts, the construction of multi-scenario coupled utilization models, and the application of digital optimization methods are critical to overcoming these bottlenecks and promoting the industrialization and commercialization of CO₂ mineralization technology, which holds significant importance in addressing climate change.

Key words: CO₂ mineralization; CCUS; carbon neutrality; industrial solid waste; carbonates; mineralization engineering

近 10 年来, 全球温室气体排放总体仍呈高位波动, 二氧化碳(CO₂) 占据主导地位, 深刻影响能源、工业与城市系统的低碳转型。CO₂ 矿化通过将 CO₂ 与含碱性氧化物或硅铝酸盐反应, 生成热力学稳定的碳酸盐矿物, 可实现长期、被动的碳固定; 同时, 若与再生骨料、水泥基固废、钢渣等工业副产物耦合, 还可改善材料的力学与耐久性能, 形成“固碳-减污-增材”的协同效益。从碳管理视角看, 矿化既可作为 CCUS 体系中的“终端封存”选项, 也可与建材、金属冶炼、化工过程耦合为“资源化利用”路径, 对实现过程工业的减排与污染协同治理具有重要意义。

当前研究与应用已在机理、工艺与工程 3 个层面取得进展: 在机理层面, 气液传质受限与固相表面反应的协同控制机制得到阐释, 矿化反应速率受 CO₂ 分压、温度、pH 与反应位点活化等因素耦合影响; 在工艺层面, 围绕天然矿物矿化、工业固废矿化、

地层原位矿化与生物矿化等路线, 逐步形成以 CO₂ 浓度、温度-时间窗口、前处理方式与助剂循环为核心的“工艺窗口”; 在工程层面, 混凝土养护与固废协同矿化实现了从中试到万吨级的装置实践, 玄武岩/超基性岩等地层原位试验完成多点验证。然而, 走向规模化仍面临速率与通量受限、成本结构刚性较强、系统可扩展性不足等瓶颈, 包括反应器放大后传质传热约束增强, 能耗与预处理、反应助剂以及监测、报告、核证(MRV) 成本较高, 原料同质性与连续供给等问题。

基于上述背景, 本文中系统梳理各类矿化技术路线的反应机理与关键参数, 汇总代表性工程案例与技术经济(TEA)/环境生命周期(LCA) 特征, 凝练“速率-成本-规模化”的共性约束, 并提出面向工程化的工艺强化与助剂循环策略、与建材标准和碳核算/核证相衔接的应用要件及验证路径。通过构建

收稿日期: 2025-12-01; 修回日期: 2026-07-28

基金项目: 深部地质空间零碳开发利用对策(2024ZD4206); 咸水层二氧化碳封存协同烟气处置方法研究(2023ZZ1301); CCUS 地质封存溶解矿化反应机理与增效机制(52574060); 油气资源与工程全国重点实验室自主研究课题资助(PRE/indep-2505)

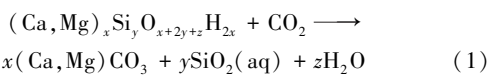
作者简介: 李志林(2002-), 男, 硕士生; 刘双星(1990-), 男, 博士, 高级工程师, 研究方向为二氧化碳封存与利用、多孔介质多相流研究, 通讯联系人, liushuangxing@cnpc.com.cn。

“路线-参数-成本-成熟度”的对比框架与案例证据链,旨在为二氧化碳矿化的可复制工程化方案提供结构化认识与数据支撑,服务于过程工业领域的减污降碳与资源化一体化转型。

1 二氧化碳矿化原理与分类

1.1 矿物碳化反应机理

CO₂ 矿化是指 CO₂ 通过与含 Ca²⁺、Mg²⁺ 等金属离子或碳酸盐沉淀菌等微生物反应生成稳定的碳酸盐矿物,从而实现气态 CO₂ 的长期固定,防止其重新进入大气。相关反应如式(1)所示。



影响矿化效率的主要因素有粒径、反应温度、CO₂ 压力。粒径的减小可增大比表面积,提升反应活性。提高反应温度能够加快碳酸盐矿物的溶解速率;温度过高则会抑制 CO₂ 溶解。当 CO₂ 溶解为碳酸化过程的限速步骤时,适度升高反应压力可提高 CO₂ 溶解度,但同时能耗增加,需在效率与经济性之间取得平衡^[1]。

未来仍需结合表征与多尺度模拟手段,深入揭示矿物活化与碳酸化反应之间的耦合机理,确定活化条件与碳酸化效率之间的定量关系,为工艺优化与工业化应用提供理论支撑。

1.2 原位矿化与外部矿化

CO₂ 矿化主要分为外部矿化与原位矿化 2 类实施路径。前者将 CO₂ 与碱性材料反应生成碳酸盐,但成本较高;后者则将 CO₂ 注入岩层,与矿物反应生成稳定碳酸盐,实现长期封存。无论采用何种途径,深入揭示矿物溶解与碳酸盐沉淀的反应机理及速率控制过程,是提升 CO₂ 封存效率与经济性的关键。

1.3 矿化产物及资源化利用路径

CO₂ 可通过多种矿化路径生成矿化产物,用于水泥、混凝土、砖块等建材骨料或胶结材料,减少对天然资源的开采^[2],如表 1 所示。

2 二氧化碳矿化主要技术路线

目前,CO₂ 矿化封存主要包含 5 大技术路线,各类路线的核心特征与发展概况对比如表 2 所示。

表 1 CO₂ 矿化方法与产物对比

矿化方法	优势	主要障碍/局限性	适用性与前景
再生混凝土浆体直接碳酸化 制备辅助胶凝材料	利用原始尾气,减少处理环节,产物具有区域适用性与一定价值	缺乏连续化、规模化工艺	在具备近源条件与技术突破的情况下具有潜在应用价值
再生骨料碳酸化	可在源头附近实施,减少输送压力	需要碳源或管网基础设施,CO ₂ 吸收量有限,产物价值低	受限于经济性,区域性应用较可能
新拌混凝土碳酸化	工艺相对成熟,操作简便	缺乏长期服役经验与耐久性验证	可用于非钢筋构件或采用替代增强材料的场景
间接碳酸化	可制备高附加值产品	工艺复杂,成本最高,建材行业对高附加值产品需求有限	在特定高端产品场景有潜力,但在水泥与混凝土行业应用有限

表 2 CO₂ 矿化主要技术路线总结

技术路线	技术原理	适用场景	国内应用情况	国外应用情况	优势	不足
天然矿物矿化	CO ₂ 与含 Ca、Mg 天然矿物矿化	矿产资源丰富地区、固定场地	新疆、内蒙古等地实验研究,尚未大规模应用	美国、澳大利亚有中试研究	反应产物稳定,可长期固碳	反应速率低,矿石开采与粉磨能耗高
工业固废矿化	CO ₂ 与钢渣等固废矿化	工业集中区、固废排放量大的区域	多个钢铁、水泥企业开展示范项目	欧盟、加拿大已有示范线	协同减排,废物资源化	固废成分复杂,碳固存效率不均
盐水层与深部地质体矿化	CO ₂ 注入地下储层,发生溶解、沉淀反应	深部盐水层、玄武岩	四川盆地、塔里木盆地探索注入实验	冰岛 CarbFix 项目已实现工业化	规模大、固碳潜力高	注入安全性和长期监测难度大
生物矿化	微生物或藻类代谢促进矿化	分布式排放源、中低浓度气源	处于实验室和小规模试验阶段	荷兰、美国已有藻类矿化试点	环境友好、条件温和	反应效率低,受环境条件限制大
人工促进与催化剂辅助矿化	酶等催化剂加速矿化	各类矿化体系的效率提升	部分高校与研究所实验验证	日本、欧洲有加速剂研究	显著提升反应速率	催化剂成本高,耐久性不足

2.1 天然矿物矿化

富含 Ca、Mg 的天然矿物因储量丰富、成本低廉,被认为是 CO₂ 矿化的理想原料^[3]。按反应路径不同,矿化方式分为直接矿化与间接矿化。直接矿化是在高温高压下使 CO₂ 与矿物反应,工艺简单但能耗较高、产品附加值低;间接矿化是通过酸、碱或盐类介质先浸出 Ca²⁺、Mg²⁺,再与 CO₂ 反应生成碳酸盐,具有条件温和、产物纯度及经济价值高等优势。

Qian 等^[4]对比 2 种矿化方式的典型工艺参数,发现间接矿化具有更优表现。其中,介质筛选是间接矿化的关键步骤,需兼顾浸出效率、循环利用经济性、环境友好性,并利于大规模工业应用。

天然矿物的 CO₂ 矿化性能受矿物类型、预处理与改性方法及吸附条件等因素影响。预处理和改性方式决定了吸附剂的结构与活性,因此应结合矿物特性合理选择工艺,并评估不同改性技术的协同效应。未来研究可聚焦高比表面积与多活性位点的复合矿物材料,以提升 CO₂ 吸附效率与稳定性。

2.2 工业固废矿化

工业固废种类丰富、成本低、碳化活性组分较多,是理想的 CO₂ 矿化封存原料。

钢渣作为代表性固废,其干法碳化率较低,而湿法与间接碳化因液相存在可显著加快反应速率。Zhai 等^[5]通过盐酸与碱性预处理对比实验发现,盐酸可提高 Ca²⁺ 浸出率使碳化率达 28%,氢氧化钠则提升 Si⁴⁺ 浸出率使碳化率达 38%。Sun 等^[1]研究发现超声波可促进固废的矿化反应。Tai 等^[6]采用超临界二氧化碳(SC-CO₂)可穿透钝化层促进碳化,但更受制于高温高压条件及设备成本。此外,Ma 等^[7]将流化喷射粉碎超细钢渣粉与电石渣 1:1 混合,显著提升了矿化效率,并归因于二者在碳化时协同生成钙、镁碳酸盐。

这些强化措施已在实验室小规模验证,但具体应用场景与优化条件仍需进一步研究,并开发更全面的工业化技术方案。

2.3 盐水层与深部地质体矿化

深层盐水层主要由砂岩等多孔岩体构成,注入的 CO₂ 溶解于地层水后形成碳酸,随后与地层矿物反应,生成稳定的碳酸盐矿物,该矿化过程通常需要数百年以上才能显著发生。在玄武岩地层中 CO₂ 主要通过原位矿化实现长期封存,矿化速率相对较快^[8]。

包琦等^[9]通过矿化反应实验表明玄武岩矿化

反应效率随温度升高和反应时间延长而增大,长期矿化过程中因矿物的溶解-再沉积平衡存在速率瓶颈。Deng 等^[10]引入 HCl 和 NH₃ 作为反应助剂,加速玄武岩 CO₂ 矿化速率,模拟显示 NH₃ 注入阶段矿化速率加快 20 倍。

CO₂ 原位矿化封存能够避免与大规模开采、运输和处理固体反应物相关的步骤和成本,降低能耗与提高反应速率仍然是未来工作的主要重点。其他方面,除传统的检测方法外,还需进一步发展精准的数值模拟技术,以加深对多尺度流体-岩石反应动力学及运移规律的理解,进而完善可视化监测技术^[11-12]。

2.4 生物矿化

生物矿化是微生物直接参与或间接影响矿化的过程,减少了传统化学助剂的使用^[13]。其中,微生物诱导碳酸盐沉淀(MICP)是矿化的重要途径,微生物通过代谢途径影响水体中 CO₂ 浓度与 pH,促进 HCO₃⁻ 向 CO₃²⁻ 转化并生成 CaCO₃ 沉淀^[14]。该过程可分为自养与异养 2 类机制:前者主要由蓝藻和微藻主导,后者主要由脲酶和硝酸盐还原菌主导。脲酶因具备广泛存在、强钙化潜力和易于调节的优势,是研究最广泛、最有效的 MICP 途径。

Wang 等^[15]研究发现,MICP 处理使再生粗骨料吸水率降低了 32.5%。Wang 等^[16]研究发现,MICP 处理使土体渗透率和侵蚀率分别降低了 90.9% 和 95.2%。王晓丽等^[17]研究发现即使在盐渍环境下,MICP 也可生成沉淀填充混凝土裂隙,提升抗压强度达 28.93%,降低渗透系数达 46.37%。目前,MICP 主要归因于光合作用、硫酸盐还原、脲酶、反硝化和铁还原微生物,如表 3 所示。

表 3 微生物及其相关应用

代谢途径	微生物	应用
光合作用	小红卵菌	重金属回收
	聚球菌	修复混凝土
硫酸盐还原	硫酸盐还原菌	增强 Ca ²⁺ 结合能力
脲解作用	芽胞杆菌	增强混凝土抗压能力
	苏云金杆菌	重金属污染物的沉淀
反硝化作用	巴氏孢子菌	生物修复
	硝基还原杆菌	生物混凝土
铁还原作用	铁还原菌	碳酸盐沉淀

在实际工程应用中,处理效果均匀性仍是一项重大挑战。由于反应不完全,脲酶水解副产物中会

生成高浓度 NH_4^+ 和 NH_3 ,回收困难且可能造成环境危害。铁还原等无害的 MICP 途径正被探索,但这些替代工艺的技术可行性仍不明确,未来需跨学科领域的进一步合作,以推动该方向的研究与应用。

2.5 人工促进与催化剂辅助矿化

人工促进与催化剂辅助矿化旨在通过催化剂或助剂降低反应活化能,加速 CO_2 水合与 Ca^{2+} 、 Mg^{2+} 的溶出,提高矿化速率。碳酸酐酶(CA)可高效催化 CO_2 与水生成碳酸氢根离子,被视为 CCUS 体系中具备应用前途的生物催化剂^[18]。除生物酶外,化学助剂及多孔结构材料也被广泛用于促进 CO_2 矿化反应^[5]。

刘鹏等^[19]利用 CA 促进脲酶水解固化砂土,与常规 MICP 相比,胶结物生成量提高了 105.3%。刘清等^[20]合成仿生 CA,反应 1 h 能生成 1 171 mg 的 CaCO_3 并实现 72.3%的 CO_2 转化率。酶类催化剂易受高温和 pH 影响,需进行固定化处理,各种方法的优缺点如表 4 所示。

表 4 不同固定方法的优缺点

固定化方法	优点	缺点
吸附法	制备简单	结合力弱
共价结合法	结合牢固	制备复杂
交联法	无需载体	难以控制交联度
包埋法	对酶损伤小	传质阻力大

该矿化方法面临酶稳定性差、助剂回收困难及材料成本高等问题,未来可从可循环使用的催化剂开展研究,研发更环保、更耐用的催化材料,为早日实现工业化生产奠定良好的基础。

3 工程应用现状与典型案例

当前, CO_2 矿化技术已具备现场应用基础并开展多项示范项目。在国内,浙江大学建成全球首个万吨级 CO_2 矿化混凝土养护工程,每年可封存约 1 万 t CO_2 并生产约 1 亿块轻质实心砖;四川大学与攀钢集团建成万吨级烟气 CO_2 矿化装置,年固碳约 1.5 万 t, CO_2 转化率达 90%、净封存率达 75%^[21]。包钢集团联合阿尔托大学建设钢渣矿化中试厂,可使每吨钢渣封存 0.21 ~ 0.40 t CO_2 ,并产出高纯 CaCO_3 与含铁料,实现钢渣资源化与减碳协同^[22]。

国外典型案例包括冰岛的 CarbFix,自 2007 年以来累计注入并矿化超过 8 万 t CO_2 ^[23];美国 Wallula 项目首次在 800 ~ 900 m 玄武岩层实现 SC-CO_2 原位矿化;CarbonCure 通过向混凝土中注入 CO_2 实现工业化应用,每立方米可减少 7 ~ 11 kg CO_2 排放,累计减排约 50 万 t CO_2 。Biomason 采用 MICP 生产生物混凝土,计划到 2030 年前减少 25% 的工业混凝土排放。

上述项目已验证该技术的可行性与固碳潜力(表 5),但一些因素仍制约其大规模开展^[23]。一方面,矿化过程能耗高、助剂与预处理成本高,经济性亟待提升;另一方面,不同矿物原料在活性、资源分布与处理路径上存在差异,影响技术的普适性。未来研究应聚焦低能耗工艺流程优化与资源耦合利用,加强反应器设计、废弃物协同矿化及助剂循环,提升整体经济性。同时需完善政策激励与市场衔接,健全 MRV 体系,推动矿化技术在钢铁、水泥、矿业及建材领域的规模化与商业化应用。

表 5 全球 CO_2 矿化工程应用案例

项目名称	类型	技术路径	实施方	CO_2 减排规模/ (万 t·a ⁻¹)	所处国家/ 地区	年份
Wallula 项目	地下注入矿化	CO_2 玄武岩矿化	PNNL	共 0.1	美国	2009
CarbonCure 混凝土	工业固废矿化	CO_2 矿化养护混凝土	CarbonCure Technologies	约 17	加拿大	2012
Carbfix 项目(Hellisheiei 电厂)	地下注入矿化	CO_2 玄武岩矿化	Carbfix、Reykjavik	7	冰岛	2012
Brevik 水泥厂 CCS 项目	工业 CCS	CCS	Heidelberg Materials	40	挪威	2020
强耐新材 CO_2 深度矿化养护制建材项目	工业固废矿化	CO_2 矿化养护混凝土	浙江大学、河南强耐新材股份有限公司	1 万	中国	2020
包钢集团碳化法钢铁渣综合利用项目	工业固废矿化	CO_2 与钢渣矿化	包钢集团	1	中国	2021
CO_2 矿化利用固废关键技术与万吨级工业试验项目	工业固废矿化	CO_2 与脱硫渣矿化	四川大学、攀钢集团	1.5	中国	2021

续表

项目名称	类型	技术路径	实施方	CO ₂ 减排规模/ (万 t·a ⁻¹)	所处国家/ 地区	年份
CO ₂ 矿化制备全固废负碳建材项目	工业固废矿化	烟气捕集 CO ₂ 耦合 工业固废制建材	有机功能材料与应用技术 研究所、同济大学	1	中国	2022
意大利 Ravenna CCS 项目	工业 CCS	CCS	Eni、Snam	2.5	意大利	2022
大同化学链矿化 CCUS 项目	工业固废矿化	CO ₂ 与电石渣矿化	原初科技有限公司、国电 力大同公司、国家能源集团	0.1	中国	2022
Blair Block 新型超低碳块的项目	耦合利用矿化	CO ₂ 与低碳材料矿化	Blair Block、CarbonBuilt	0.2	美国	2023
天龙镁业镁渣综合利用负碳项目	工业固废矿化	CO ₂ 与镁渣矿化	天龙镁业、京博控股集团	50	中国	2024

4 当前挑战与发展趋势

二氧化碳矿化的产业化当前面临 4 类核心问题:一是效率受限,气液传质与固相反应协同控制导致速率偏低,放大后边界层增厚、热管理和接触面积下降压制反应通量;二是成本刚性强,装置投资与能耗、预处理与药剂消耗、MRV 构成主要支出;三是规模化掣肘,缺乏百万吨级连续稳定样板,固废成分与供给波动,制约技术复制;四是环境与安全边界紧张,腐蚀泄漏风险、原位注入的压力-盖层完整性控制、微小泄漏识别与核证,均对工程治理与合规提出更高要求。

技术演进呈现“高效化-耦合化-智能化-规模化-规范化”的综合趋势:在高效化上,发展多孔材料、类碳酸酐酶和多功能纳米催化体系,结合传质强化构建低能耗反应窗口。耦合化上,加速与 CCUS 全链条、建材与固废流程的协同,实现“定向捕集-就地矿化-就地消纳”一体化。在智能化上,依托在线传感、数字孪生和数据驱动寻优,实现对物质运移、反应效率与安全阈值的闭环管理与 MRV 一体化。在规模化上,采用模块化反应器群和流程集成推进“10 kt→100 kt→1 Mt”梯级放大。在规范化上,建立产品质量标准和统一碳足迹/核证规则,完善碳价、绿色金融和绿色采购机制,形成技术-标准-市场的闭环。

面向未来研究与应用,主张以“场景牵引、指标驱动、风险可控、经济可证”为原则推进:优先聚焦 3 类可落地场景(工业固废协同矿化、混凝土养护增性能、玄武岩/超基性岩原位矿化),分别设定明确的速率与成本里程碑[如 $\geq 2 \sim 5 \text{ t}/(\text{m}^3 \cdot \text{d})$ 等效体积通量、单位固碳成本分阶段降至碳价中枢以下];在材料与助剂上,确立寿命与回收率的量化门槛;在工

程与放大上,形成标准化单元-群集式布局的设计手册与安全边界判据,并把 TEA/LCA 与 MRV 前置到工艺设计早期;在治理与合规上,完善注入压力管理、盖层完整性评估与微漏监测技术栈,建立全生命周期环境风险清单与应急预案;在产业与政策上,通过绿色建材标准、差异化碳价与财政/金融工具协同,提升矿化产品的市场接受度与现金流质量。通过上述路径,有望实现二氧化碳矿化在多行业、多区域的规模化部署,达成“长期固碳-产品增值-环境安全”三重目标。

参考文献

- [1] Sun X, Xu H, Manickam S, *et al.* Innovative mineral carbonation techniques: A comprehensive review of ultrasound-assisted processing, mechanistic insights, optimization strategies, and environmental impacts [J]. Carbon Capture Science & Technology, 2025, 16: 100469.
- [2] Zajac M, Irbe L, Bullerjahn F, *et al.* Mechanisms of carbonation hydration hardening in Portland cements [J]. Cement and Concrete Research, 2022, 152: 106687.
- [3] Qian C, Wang Z, Wen Y, *et al.* Highly efficient CO₂ capture on acid-treated sepiolite impregnated with mixed polyethyleneimine and diethanolamine [J]. Green and Smart Mining Engineering, 2024, 1(4): 363-374.
- [4] Qian C, Li C, Huang P, *et al.* Research progress of CO₂ capture and mineralization based on natural minerals [J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2024, 31(6): 1208-1227.
- [5] Zhai H, Chen Q, Yilmaz M, *et al.* Enhancing aqueous carbonation of calcium silicate through acid and base pretreatments with implications for efficient carbon mineralization [J]. Environmental Science & Technology, 2023, 57(37): 13808-13817.
- [6] Tai A, Ma Y, Shen X, *et al.* Supercritical carbonation of steel slag and its impact on cement hydration [J]. Case Studies in Construction Materials, 2025, 23: e05142.
- [7] Ma Z, Liao H, Cheng F. Synergistic mechanisms of steelmaking slag coupled with carbide slag for CO₂ mineralization [J]. International

- Journal of Greenhouse Gas Control, 2021, 105: 103229.
- [8] Fang Z, Yang C, Wang R. Monitoring technologies for CO₂ storage in coal seams and enhanced coalbed methane recovery: A review of field applications [J]. Fuel Processing Technology, 2025, 276: 108274.
- [9] 包琦, 赵文韬, 王春凯, 等. 玄武岩 CO₂ 矿化反应效率与封存潜力评价[J]. 洁净煤技术, 2024, 30(10): 110–119.
- [10] Deng H, Yu C, Jiang Q, *et al.* Accelerated CO₂ mineralization in basalt via reaction process control: Mineralization effect, mineral evolution, and reservoir property implications[J]. Gas Science and Engineering, 2025, 140: 205648.
- [11] Yang S, Liu S, Zhang K, *et al.* The sorption behaviors of barium during reinjection of gas field produced water into sandstone reservoir: An experimental water-rock interaction study [J]. Sustainability, 2023, 15(10): 8132.
- [12] Cai M, Li X, Zhang K, *et al.* Coupled hydro-mechanical-chemical simulation of CCUS-EOR with static and dynamic microscale effects in tight reservoirs[J]. Fuel, 2024, 357: 129888.
- [13] 纪泳丞, 魏浩然, 李晗. MICP 在土壤与水泥基材料中加固修复应用进展[J]. 中国水土保持科学, 2025: 1–14.
- [14] 孟凡柳, 屠袁哲, 李南骏, 等. 碳酸酐酶生物矿化固定 CO₂ 研究及应用进展[J]. 生物工程学报, 2025, 41(5): 1861–1873.
- [15] Wang J, Pang S, Zhan X, *et al.* Improving recycled concrete aggregate performance via microbial-induced calcium carbonate precipitation: Effects of bacterial strains and mineralization conditions[J]. Buildings, 2025, 15(5): 825.
- [16] Wang Y N, Li S K, Li Z Y, *et al.* Exploring the application of the MICP technique for the suppression of erosion in granite residual soil in Shantou using a rainfall erosion simulator[J]. Acta Geotechnica, 2023, 18(6): 3273–3285.
- [17] 王晓丽, 张文, 王新红, 等. MICP 修复盐渍环境混凝土裂隙的关键影响因素与修复效能研究[J]. 材料导报, 2026, 40(8): 100–106.
- [18] 于洋, 刘琦, 吕静, 等. 碳酸酐酶固定及在二氧化碳捕集应用研究进展[J]. 洁净煤技术, 2021, 27(2): 69–78.
- [19] 刘鹏, 曹源兴, 程钰, 等. 碳酸酐酶增强微生物矿化固土效果的试验研究[J]. 岩土力学, 2024, 45(9): 2554–2564.
- [20] 刘清, 刘奇, 潘琦, 等. ZIF-8 基仿生碳酸酐酶构建及对 CO₂ 高效矿化[J]. 广西大学学报: 自然科学版, 2023, 48(6): 1404–1413.
- [21] 程文煜, 姜华瑀, 熊卓, 等. 燃煤电厂增效降碳发展路径分析[J/OL]. 煤炭转化, 2025: 1–25. https://kns.cnki.net/kcms2/article/abstract?v=jit-Bskw5eSPT5u_MbTp9g5EebqiqYA9uuYViMGdxGSXuSRte8Tsp4gferNyWhAJ2JdCvR1dJ22twZGnOyd06VP4w97m_NNthZBVPtLgHmkD4IczclsSHb0cfgo7ncYyHaR-mtauxKiqQhauH-wq7i08pPXYCZxy97rdIQ34n6sXS0Y80VPLLeg=&uniplatform=NZKPT&language=CHS.
- [22] 刘文昊, 陈庆彩, 徐腾飞. 双碳战略背景下的钢渣固碳技术研究进展[J]. 环境工程, 2024, 42(5): 172–182.
- [23] Hang Y, Qi L, Qi B, *et al.* Review on in-situ CO₂ mineralization sequestration: Mechanistic understanding and research frontiers[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2025, 12(1): 15. ■
- (上接第 85 页)
- [7] Prabowo J, Lai L, Chivers B, *et al.* Solid carbon co-products from hydrogen production by methane pyrolysis: Current understandings and recent progress[J]. Carbon, 2024, 216: 118507.
- [8] Zaghoul N, Kodama S, Sekiguchi H. Hydrogen production by methane pyrolysis in a molten-metal bubble column [J]. Chem Eng Technol, 2021, 44(11): 1986–1993.
- [9] Pérez B J L, Jiménez J A M, Bhardwaj R, *et al.* Methane pyrolysis in a molten gallium bubble column reactor for sustainable hydrogen production: Proof of concept & techno-economic assessment[J]. Int J Hydrog Energy, 2021, 46(7): 4917–4935.
- [10] Kudinov I V, Pimenov A A, Kryukov Y A, *et al.* A theoretical and experimental study on hydrodynamics, heat exchange and diffusion during methane pyrolysis in a layer of molten tin [J]. Int J Hydrog Energy, 2021, 46(17): 10183–10190.
- [11] Msheik M, Rodat S, Abanades S. Experimental comparison of solar methane pyrolysis in gas-phase and molten-tin bubbling tubular reactors[J]. Energy, 2022, 260: 124943.
- [12] Sorcar S, Rosen B A. Methane pyrolysis using a multiphase molten metal reactor[J]. ACS Catal, 2023, 13(15): 10161–10166.
- [13] Abdollahi M R, Nathan G J, Jafarian M. Process configurations to lower the temperature of methane pyrolysis in a molten metal bath for hydrogen production[J]. Int J Hydrog Energy, 2023, 48(100): 39805–39822.
- [14] Scheiblehner D, Neuschitzer D, Wibner S, *et al.* Hydrogen production by methane pyrolysis in molten binary copper alloys [J]. Int J Hydrog Energy, 2023, 48(16): 6233–6243.
- [15] Scheiblehner D, Antrekowitsch H, Neuschitzer D, *et al.* Hydrogen production by methane pyrolysis in molten Cu-Ni-Sn alloys [J]. Metals, 2023, 13(7): 1310.
- [16] Wi T G, Park Y J, Lee U, *et al.* Methane pyrolysis rate measurement using electromagnetic levitation techniques for turquoise hydrogen production: Liquid In, Ga, Bi, Sn, and Cu as catalysts [J]. Chem Eng J, 2023, 460: 141558.
- [17] Busillo E, Damizia M, De Fillippis P, *et al.* Methane pyrolysis in molten media: The interplay of physical properties and catalytic activity on carbon and hydrogen production [J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2024: 106752.
- [18] Msheik M, Rodat S, Abanades S. Solar methane pyrolysis in a liquid metal bubble column reactor: Effect of medium type and gas injection configuration [J]. J Anal Appl Pyrolysis, 2024, 183: 106756.
- [19] Cooper-Baldock Z, Perrelle T D L, Phelps C, *et al.* Preliminary evaluation of methods for continuous carbon removal from a molten catalyst bubbling methane pyrolysis reactor [J]. Energies, 2024, 17(2): 290. ■