工程科学学报
Chinese Journal of Engineering

双碳背景下钢渣碳捕集工艺研究现状及未来展望

安磊 张晓媛 刘雨

Research status and future prospect of carbon capture technology using steel slag in the context of carbon neutrality

AN Lei, ZHANG Xiaoyuan, LIU Yu

引用本文:
安磊, 张晓媛, 刘雨. 双碳背景下钢渣碳捕集工艺研究现状及未来展望[J]. 北科大：工程科学学报, 2025, 47(3): 562–571. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.27.002
AN Lei, ZHANG Xiaoyuan, LIU Yu. Research status and future prospect of carbon capture technology using steel slag in the context of carbon neutrality[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2025, 47(3): 562–571. doi: 10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.27.002

在线阅读 View online: https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2024.06.27.002

您可能感兴趣的其他文章
Articles you may be interested in

CO_2熔盐捕集与电解单质碳过程调节
Regulation of CO_2 molten salt capture and electrolysis to elemental carbon
工程科学学报. 2024, 46(10): 1776 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2023.12.12.001

钢铁行业低碳技术应用现状与展望
Application status and prospect of low carbon technology in iron and steel industry
工程科学学报. 2022, 44(4): 801 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.08.01.001

“双碳”背景下低碳排炼钢流程选择及关键技术
Selection and key technologies of low–carbon steelmaking processes under the background of “Double Carbon”
工程科学学报. 2022, 44(9): 1483 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2021.12.29.004

国内外钢铁行业低碳发展策略分析
Low–carbon development strategy analysis of the domestic and foreign steel industry
工程科学学报. 2022, 44(9): 1496 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.01.05.003

“双碳”目标下钢铁企业低碳发展的技术路径
Research on the low–carbon development technology route of iron and steel enterprises under the “double carbon” target
工程科学学报. 2023, 45(5): 853 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2022.09.22.003

钢渣改性生物质废弃材料制备生态活性炭及其降解甲醛性能
Preparation of ecological activated carbon based on steel slag–modified biomass waste material and its formaldehyde degradation performance
工程科学学报. 2020, 42(2): 172 https://doi.org/10.13374/j.issn2095–9389.2019.02.03.001

工程科学学报, 第 47 卷, 第 3 期: 562−571, 2025 年 3 月
Chinese Journal of Engineering, Vol. 47, No. 3: 562−571, March 2025
https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2024.06.27.002; http://cje.ustb.edu.cn

双碳背景下钢渣碳捕集工艺研究现状及未来展望

安　磊, 张晓媛, 刘　雨✉

南开大学环境科学与工程学院, 低碳非常规水源资源化与水质保障技术平台, 天津 300350
✉通信作者, E-mail: cyliu@nankai.edu.cn

摘　要　我国是全球钢铁生产大国, 钢铁行业产生的大量副产物钢渣对生态环境造成严重威胁. 作为一类大宗碱性固废, 钢渣不仅来源广泛、成本低廉, 还具有高值资源化的潜力. 在“双碳”战略背景下, 利用钢渣捕集封存 CO_2, 能有效缓解当前国内钢渣处理处置压力, 促进“双碳”战略目标的实现. 通过系统回顾国内钢渣处理及资源化现状, 分析钢渣碳捕集过程中的反应机理和关键影响因素, 针对钢渣碳捕集工艺发展中的潜在掣肘要素, 指出微/纳米气泡技术及替代水源分别在提高碳捕集效率和减少水足迹方面具有显著应用前景. 最后, 深入剖析了各种碳捕集方法下产物的资源化再利用潜能. 通过上述工作, 以期推动钢渣碳捕集工艺的规模化应用, 加速钢铁行业迈向绿色发展.

关键词　钢渣; 资源化; 碳捕集; 碳酸化; 碳足迹
分类号　X753

Research status and future prospect of carbon capture technology using steel slag in the context of carbon neutrality

AN Lei, *ZHANG Xiaoyuan*, *LIU Yu*✉

College of Environmental Science and Engineering, Engineering Laboratory of Low-Carbon Unconventional Water Resources Utilization and Water Quality Assurance, Nankai University, Tianjin 300350, China
✉Corresponding author, E-mail: cyliu@nankai.edu.cn

ABSTRACT　As the world's largest steel producer, China generates substantial amounts of steel slag byproducts during the steel-making process, posing serious threats to the ecosystem. In China, steel slag is mainly landfilled, which compromises soil and aquatic environments and results in the waste of potentially recyclable resources. The increasing production of steel slag has prompted government and public efforts to develop suitable treatment and disposal methods that minimize environmental impact. As an alkaline solid waste, steel slag not only offers favorable accessibility but also serves as a promising resource for high-value recycling. Owing to its abundant endogenous active components, such as Ca^{2+} and Mg^{2+}, steel slag has the potential to be used as a functional material for carbon capture. In the context of achieving carbon neutrality, steel slag-based carbon capture presents an effective and promising approach to carbon reduction. This article systematically reviews the current status of steel slag treatment and recycling in China and analyzes the reaction mechanisms and key influencing factors in the carbon capture process of steel slag. Steel slag-based carbon capture is generally categorized into direct and indirect methods. Owing to low mass transfer efficiency and a slow reaction rate, direct carbon capture has low CO_2 capture efficiency and is time-consuming, making it less suitable for large-scale applications. Indirect carbon capture is less dependent on high temperature and pressure and achieves better mass transfer efficiency, making it more promising for application compared with direct carbon capture. Additionally, a comprehensive analysis of the crucial factors influencing steel slag-based carbon capture technology is provided. In the case of indirect carbon capture, extensive research has focused on improving the

收稿日期: 2024−06−27
基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52300093)

extraction efficiency of metal ions through methods such as ultrasound, extractants, and milling. Dissolution efficiency of carbon dioxide in the liquid phase is equally critical. Therefore, measures that can effectively enhance CO_2 solubility, such as micro/nanobubbles and the application of seawater, were proposed. Additionally, during steel slag-based carbon capture, the synergistic treatment of multiple wastes, such as cold-rolling wastewater and exhaust flue gas, is considered a feasible strategy due to its potential environmental and economic benefits. Specifically, cold-rolling wastewater and exhaust flue gas can serve as alternatives to tap water and CO_2 sources, respectively, thereby reducing the economic and energy burdens associated with upstream transport and processing. The proposed "waste treated by waste" strategy could facilitate the synergistic disposal of multiple waste streams in the steel industry, offering theoretical and technological insights for sustainable steel slag management. Because the carbonization routes (i.e., direct and indirect carbonization) may influence the chemical composition of the final carbonated products, resource recovery strategies should be tailored to maximize economic potential. Accordingly, the resource utilization potential of carbonated products for different valorization strategies was analyzed. In summary, this study aims to promote the large-scale application of steel slag-based carbon capture and accelerate the steel industry transition toward low-carbon development.

KEY WORDS　steel slag; resource utilization; carbon capture; carbonation; carbon footprint

我国钢铁产量近年来急速增长，相应副产品钢渣的年产生量已超过 1 亿吨[1]. 长期以来，钢渣在国内的综合利用率不足 30%，远低于美国、欧洲等地区水平（>80%）. 国内大部分地区对钢渣的处理策略为简单堆放或直接填埋，不仅对周边土壤和水环境造成巨大威胁，还造成潜在可回收资源的浪费，严重背离生态环境友好发展策略. 为了倒逼钢铁行业加快绿色转型，我国从 2018 年开始对钢渣固废征收环保税（25 元·吨$^{-1}$）[2]. 十四五规划中进一步明确提出“无废城市”建设，旨在持续推进固体废物源头减量和资源化利用[3]. 实现钢渣的资源化再利用不仅有助于缓解钢渣对城市环境的严重威胁，还可以生产额外经济价值产品，兼具环境和经济双重效益[4]. 当前国内钢渣资源化的路径主要有返炉炼铁，制备建筑胶凝材料、土壤改良剂和钢渣碳酸化等[5]，其中钢渣作为建筑胶凝材料的消耗量最大. 然而，钢渣衍生的水泥材料在水化过程中的体积稳定性较差，严重限制了其在建材领域的大规模应用. 基于此，亟需探索新型低碳绿色的钢渣高值资源化路径，提升其潜在资源回用价值.

作为世界上最大的发展经济体，中国的快速发展伴随着对化石燃料的高消耗. 据统计，2022 年中国 CO_2 排放量达到 121 亿吨，占全球总量的 33%[6]. CO_2 大量排放加剧了温室效应，对生态环境造成严重威胁. 十四五以来，实现绿色高质量发展成为经济产业升级的重点. 长期来看，未来国内的工业生产仍将以化石燃料为主，碳排放量预计将继续增长. 因此，开拓推广碳捕集与封存（CCUS）技术对实现低碳高质发展至关重要. 中国的钢铁工业作为仅次于电力和水泥的第三大碳排放领域，炼钢过程排放的尾气 CO_2 质量分数高达 20% ~ 30%，国内钢厂的低碳转型任重道远，也是落实“双碳”目标的重要责任主体. 钢渣中含有 CaO（质量分数 36.2% ~ 54.3%）等较多碱性成分，将其与 CO_2 反应稳定钢渣中的碱性物质，可以协同实现钢渣资源化和 CO_2 封存，该技术也被认为是极具潜力的 CO_2 捕集技术. 据估计，通过碱性固废捕集封存 CO_2，将减少国内 19.2% 的年总碳排放量[7]. 中国每年贡献全球粗钢总产量的 50% 以上，相应产生的钢渣废物体积和数量巨大. 在“碳达峰、碳中和”的战略背景下，钢渣碳捕集对钢渣治理过程中“减污降碳”协同增效具有重要的推动作用与意义.

本文对国内当前钢渣的管理现状进行了介绍，论述了钢渣碳捕集工艺的反应机理及关键响因素. 基于 CO_2 溶解度对钢渣碳捕集速率的潜在限制和间接碳捕集法对淡水资源的显著消耗，深入剖析了微/纳米气泡技术和替代水源在钢渣碳捕集中的应用潜力，最后深入阐述了碳捕集产物资源回用策略. 通过对现有工作的总结和讨论，以期推动钢渣碳捕集工艺的规模化应用，为钢渣资源化处置提供可持续解决方案.

1　钢渣来源及成分组成

钢渣是炼钢过程产生的高温熔融态渣液经冷却后形成的碱性固体废物. 国内钢铁行业主要采用转炉生产工艺，相应转炉钢渣占总钢渣产量的 80%[8]，因此后文所称的钢渣均指代转炉钢渣. 据统计，转炉工艺每生产 1 t 钢约产生 400 kg 钢渣. 钢渣主要由 Ca、Si、Fe、Mn、Al、Mg、P、O 等元素组成，以质量分数计，主要化合物有 CaO（36.2% ~ 54.3%）、Fe_2O_3+FeO（16.8% ~ 34.5%）和 SiO_2（8.6% ~ 16.2%），还有少量 Al_2O_3、MgO 和 MnO（表 1）. 据钢

表 1　钢渣主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical components of steel slag (mass fraction)　%

CaO	SiO_2	Fe_2O_3+FeO	Al_2O_3	MgO	MnO	Reference
36.2−54.3	8.6−16.2	16.8−34.5	1.0−8.2	3.0−6.4	0.5−4.4	[9−20]

渣的扫描电镜观察结果, 其表面粗糙且具有蜂窝孔洞, 表面粘附有大量“灰尘”状的碱性水化产物, 可能是由于冶炼过程中投加的碱性物质导致, 这佐证了钢渣具有较高碱度, 为钢渣对 CO_2 的捕集吸收提供了有利前提. 钢渣的矿物成分主要为硅酸三钙(C_3S)、硅酸二钙(α-C_2S、β-C_2S 和 γ-C_2S)、铁铝酸钙、铁酸二钙(C_2F)、金属氧化物形成的固溶体(RO 相)和游离氧化钙/氧化镁(f-CaO/f-MgO)等. 其中, C_3S 和 C_2S 具有胶凝活性, 占钢渣矿物相含量半数以上. f-CaO 和 f-MgO 主要来源于炼钢过程中投加的过量石灰和白云石, 具有滞后水化的特性, 导致钢渣的体积稳定性较差, 易出现体积膨胀、材料开裂等问题.

2　钢渣资源化现状

发达国家钢渣的回收利用主要集中在钢厂内循环、道路、水泥、建筑、土木工程等领域[21]. 而在我国, 只有大约 30% 的钢渣被有效利用, 与发达国家存在较大差距[22]. 作为被“放错位置”的工业固废, 钢渣中含有丰富的钙、镁和铁等潜在资源. 钢渣资源回收不仅有利于提升钢渣的环境友好性, 还可推动钢铁行业加速构建循环型经济格局, 实现产业结构升级. 近年来, 国内钢铁企业通过“内–外双循环”的管理理念, 以求实现对钢渣的资源综合利用. 内循环方面, 钢渣作为炼钢原料用于回收冶炼. 然而, 钢渣中仅含 20% ~ 30%(质量分数)的铁相, 经磁选回收后仍有超过 70% 的废渣待处置[4], 这一选择显然并不能成为钢渣的长期资源回收策略. 外循环方面, 钢渣主要用于水泥生产原料. 但是, 钢渣的水化活性偏弱, 早期强度低, 凝结时间长, 这是其作为水泥生产原料的缺点所在. 另一方面, 钢渣中的 f-CaO 和 f-MgO 水化后会分别生成 $Ca(OH)_2$ 和 $Mg(OH)_2$, 反应产物体积的增大可能会将混凝土涨裂[23−24]. 安定性不良是限制钢渣在建材领域大规模应用的关键掣肘原因.

如上所述, 当前国内的钢渣处理策略难以实现对钢渣的长期可持续有效处置. 碳捕集为钢渣的资源再利用提供了一个可行的技术选择. 据估, 钢渣碳捕集工艺预计可以减排 4.5 亿吨 CO_2, 约占中国钢铁行业年 CO_2 排放量的 23.81%[25]. 在“双碳”战略背景下, 钢渣碳捕集作为一类新型绿色降碳技术, 可以协同实现钢渣资源化和钢铁行业碳减排, 对钢渣治理过程中“减污降碳”协同增效具有重要推动作用与意义.

3　钢渣碳捕集研究现状

钢渣碳捕集是利用其碳化活性组分吸收捕集 CO_2 的低碳技术, 理论碳封存能力每千克钢渣可达 0.27 ~ 0.47 kg CO_2 [26]. 该技术通过含 Ca/Mg 硅酸盐矿物在模拟风化的环境下与 CO_2 发生反应, 从而实现碳封存的目的. 由于钢渣碳捕集过程在热力学上降低了 CO_2 的能量而使其转化为低能态的碳酸盐, 因此相较于其他 CO_2 封存技术, 该技术被认为是一种更为长期有效的碳捕集技术.

3.1　直接碳捕集

直接碳捕集技术中, 按照碳化过程中参与介质的不同, 可分为直接气相碳捕集和直接液相碳捕集. 直接气相碳捕集反应发生在气–固界面, 类似于自然风化过程, 利用空气或工业烟气中的 CO_2 直接和钢渣中的碱性物质接触并反应生成碳化产物, 湿度通常小于 0.2%. 理论上来说, 钢渣的直接气相碳捕集可以自发进行. 然而, 直接气固碳捕集的反应动力学差, 碳化时间往往较长. 高温高压的反应条件有助于通过反应动力学和物质扩散效率提高反应速率. 据报道, 将温度从 400 ℃ 提高到 600 ℃, 直接气相碳捕集的反应速率提高了 70 倍[27]. 现行对钢渣直接气相碳捕集的研究较少, 主要是由于气固两相的反应速率较低, 碳捕集效果不甚理想. 考虑到高温高压烟气通常携带大量热量及 CO_2, 通过工业烟气与钢渣直接进行碳捕集是一种“以废治废”的可行策略. 在钢厂等一类能源密集型工业企业中, 直接气相碳捕集具有较大的潜在应用价值, 未来值得深入探索.

直接液相碳捕集的湿度则大于 0.2%, 利用水作为反应介质, 将 CO_2 与钢渣的传质界面转变为液–固、液–液界面, 相比于直接气相碳捕集, 可有效地增强钢渣的碳捕集效率. 图 1 为钢渣中 Ca/Mg 相的直接液相碳捕集过程. 碳捕集活性物质主要有 CaO、MgO、C_3S、β-C_2S 和 γ-C_2S. CaO 水化生成 $Ca(OH)_2$, MgO 水化生成 $Mg(OH)_2$, β-C_2S 和 C_3S 水

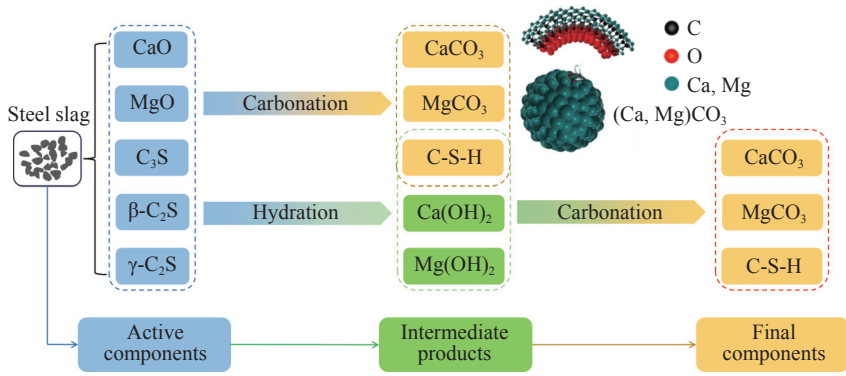

图 1　钢渣中含钙/镁相矿物的碳捕集过程[33]

Fig.1　Carbon capture process of calcium/magnesium minerals in steel slag[33]. Copyright©2021, Elsevier B.V

化生成水化硅酸钙(C–S–H)和 $Ca(OH)_2$. 当 CO_2 参与反应时, 上述水化产物进一步转化为碳捕集产物 $CaCO_3$, $MgCO_3$ 和 SiO_2 凝胶. 直接液相碳捕集中, 钢渣的加入使溶液呈碱性, 有利于 CO_2 溶解和碳酸盐矿物形成. 反应初期碳捕集速率较快, 随着反应时间的延长, 体系 pH 逐渐下降, 形成的矿物沉淀覆盖在钢渣表面, 阻碍金属离子和 CO_2 的接触[28], 使反应后期碳捕集速率减缓. Ren 等[29] 在钢渣的直接液相碳捕集中发现, 钙从硅酸钙基体中浸出后, 在硅酸钙颗粒表面留下一层无钙的富硅钝化层, 导致较低的钢渣碳化率. 温度对直接水相碳捕集效率也有显著影响. 随着体系温度的升高, 金属离子的浸出量增加, 但相应 CO_2 的溶解度则会降低. 因此, 钢渣水相碳捕集反应存在一个最佳温度, 低于该温度, 金属离子的浸出决定反应速率; 高于该温度, CO_2 的溶解可能成为限制步骤[30]. Chang 等[31] 发现反应温度在 25 ~ 65 ℃ 区间时, 钢渣碳化转化率与温度呈正相关. 此外, 体系的液固比也显著影响着碳化效率. 当水相碳捕集反应体系液固比较低时, 钢渣与水混合不充分, 会影响 CO_2 和 Ca^{2+}在气液固相中的传质效率; 液固比较高时, 过量水的存在形成传质屏障, 液相中 Ca^{2+}的浓度降低, 碳捕集反应驱动力降低. Baciocchi 等[32] 发现将体系液固比从 0.3 $L\cdot kg^{-1}$ 提高至 5.0 $L\cdot kg^{-1}$, 钢渣碳化效果相应提升. 现有关于直接液相碳捕集的研究中, 液固比多在 5 ~ 20 $L\cdot kg^{-1}$ 之间, 反应时间 10 min ~ 24 h, 反应温度 20 ~ 100 ℃[33].

在直接气相–液相碳捕集中, 反应产物主要集中在钢渣表面, 阻碍了 CO_2 的扩散, 反应动力学较差, 导致碳捕集效果不甚理想. 钢渣中的富钙矿物通常比富镁矿物具有更快的碳酸盐反应速率, 氧化物矿物的反应时间明显短于硅酸盐矿物[34−35]. Myers 等[36] 合成了 22 种结晶矿物和 13 种矿渣常见的无定形化合物, 碳化实验结果表明, CO_2 在不同矿物中的扩散系数相差 8 个数量级. 因此, 在钢渣的直接气相–液相碳捕集法中, 通过调控钢渣熔融体的凝结过程来调节其矿物相组成, 有助于提高直接碳捕集法的效率. 直接气相–液相碳捕集法的优势在于易于操作, 对反应器构型要求较低, 多在常温常压条件下进行, 因此能耗较低、经济性较高. 然而, 受制于传质效率低以及反应速率慢等原因, 直接气相–液相碳捕集法对 CO_2 的捕集效率较间接碳捕集法低, 往往需要较长的反应时间, 这显著限制了直接气相–液相碳捕集法的工程化、规模化应用.

3.2　间接碳捕集

间接碳捕集包含有两个反应过程: 浸出反应和沉淀反应(图 2). 浸出反应通过化学试剂将钢渣中的金属元素浸出到液相, 将料渣过滤得到浸出液. 随后调整浸出液体系 pH 至碱性, 通入 CO_2 与浸出液反应生成高纯度的碳酸钙沉淀. 间接碳捕集中, 金属离子浸出和生成碳酸沉淀两个步骤分开进行, 避免了碳酸盐覆盖在钢渣颗粒表面而影响 Ca^{2+}的浸出效率, 提高了 Ca^{2+}的浸出量和浸出速度. 与直接碳捕集相比, 间接碳捕集效果更优, 无需高温高压的环境, 还可以获得高纯 $CaCO_3$ 产品(质量分数可达 99.8%), 因而更具应用潜力[37].

间接碳捕集中, 提高金属离子萃取效率对钢渣碳捕集程度具有重要意义. 萃取剂类型、钢渣粒径、反应温度、液固比和矿物相组成都对萃取效率有显著影响. 间接碳捕集常用的萃取剂有 H_2SO_4、HCl、HNO_3、铵盐(NH_4Cl, NH_4NO_3 和 $(NH_4)_2SO_4$)和乙酸盐(CH_3COOH 和 CH_3COONH_4)等. 强酸萃取剂对钢渣中金属离子的萃取效率较高[38]. 然而, 在碳酸化阶段, 为了提高萃取金属离子与 CO_2 的碳化反应速率, 需要将体系从强酸性转变至碱性

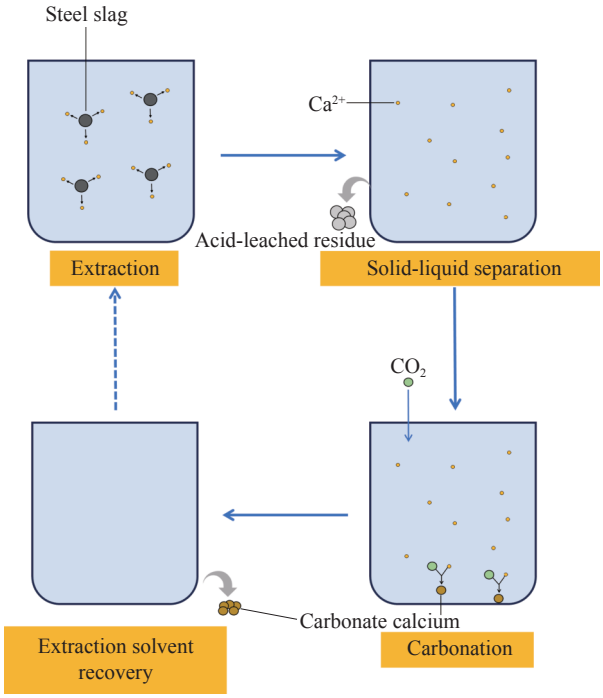

图 2　钢渣间接碳捕集流程示意图

Fig.2　Diagram of the indirect carbon capture process of steel slag

环境, 往往会消耗大量碱性物质, 因此强酸萃取剂的经济性较差. 弱酸对金属离子的萃取效率较低, 但是对 Ca^{2+}的萃取选择性较高. 乙酸盐和铵盐作为常用的弱酸萃取剂, 能选择性地浸出 Ca^{2+}, 有助于生成高纯 $CaCO_3$, 经济性较强, 可更好的适用于规模化碳捕集. 温度对碳化效果影响较为复杂, 这是因为 CO_2 和金属离子在液相中的溶解都与温度有关. 温度升高, 有利于 Ca^{2+}和 Mg^{2+}从钢渣基质的溶出, 但是不利于 CO_2 的溶解. 此外, 不同粒径的钢渣中成分也不尽相同, 这也对萃取效率造成影响[39]. 例如, 较小粒径的钢渣中(<125 μm)Ca/Mg 含量更高, 有利于碳捕集过程进行. 一般认为, 在 400 ~ 500 $m^2 \cdot g^{-1}$ 之间的比表面积适合进行碳捕集反应[40]. 在实际工艺中, 增加液固比有利于提高金属离子的萃取速率, 但会增大反应器体积, 过多的水形成传质屏障, 阻碍碳捕集进程[41]. 因此, 选择合适的液固比范围对碳捕集效果提升至关重要. 作为一种非均质多矿物混合物, 钢渣的矿物相类型也显著影响着钢渣释放金属离子的能力. Mei 等[42] 评估了钢渣中常见矿物(Ca/Mg 硅酸盐、铝酸盐、铁氧体和金属氧化物)在酸性溶液中的浸出活性. 结果表明, 与某些铝酸盐和铁氧体相比, CaO 和 Ca/Mg 硅酸盐表现出较高的浸出活性. 机械预研磨的方式也可以提高钢渣的碳化活性[43], 但是会造成额外的能耗. Rim 等[44] 将研磨介质直接加入碳矿化反应器中, 设计了一种独特的内部研磨系统, 旨在有效去除碳化过程中钢渣表面产生的钝化层.

除了上述的几类传统影响因素外, 超声波声场也有助于提高金属离子萃取效率. Said 等[45] 调查了超声波对钢渣中钙的萃取效果的影响, 发现在 50 ~ 74 μm 粒径的钢渣中, 机械搅拌对 Ca^{2+}的萃取率为 65%, 而通过超声波辅助机械搅拌的萃取率达 96%. Santos 等[46] 发现超声协同处理下, 钢渣碳转化率从 30% 显著提高到 49%. 在碳化过程中, $CaCO_3$ 钝化层包覆在未反应的钢渣颗粒周围, 抑制了传质作用. 超声波效应使液体分子剧烈压缩和膨胀. 空化气泡的坍缩和内爆使渣粒表面钝化层脱落, Ca^{2+}/Mg^{2+}扩散速率提升, 进而提高了碳捕集反应速率. 需注意的是, 施加超声波声场会增加钢渣碳捕集工艺的整体能耗及碳排放, 在未来规模化应用前, 需对反应参数进行优化, 在萃取效果和能耗之间取得平衡.

钢渣的高效间接碳捕集依赖于两个关键要素: 一是液相中金属离子的浓度; 二是 CO_2 在液相的溶解度. 因此, CO_2 的液相溶解度也极大影响着钢渣碳捕集效率, 一味的追求金属离子萃取效率的提升对碳捕集效果的帮助有限. 由亨利定律可知, 在一定温度和压强下, CO_2 在液相中的溶解度与液面上方气相 CO_2 分压呈正比. 当液相金属离子浸出量提升至一定程度时, CO_2 的溶解度可能成为限制碳捕集的主要因素. 现行较多研究致力于提高金属离子萃取效率, 但提高 CO_2 溶解度的技术研发较为有限. 提高 CO_2 分压可帮助提升 CO_2 的液相溶解度, 但是这一措施可能涉及到额外的 CO_2 浓缩过程, 或者由于体系压力的提升造成较高的能源消耗. 因此, 亟需开发可有效提升 CO_2 溶解度的技术, 消除 CO_2 传质过程对钢渣间接碳捕集的潜在速率限制.

4　钢渣碳捕集工艺未来展望

4.1　提高 CO_2 溶解度的有效策略: 微/纳米气泡及海水资源

如上所述, 现行钢渣间接碳捕集研究中, 提高 CO_2 溶解度对于提升整体碳捕集效率至关重要. 现行对钢渣的液相碳捕集工艺研发中, CO_2 多以大气泡形式释放, 气液两相接触面积和时间有限, 较大限制了气液传质及扩散效率[47]. 微/纳米气泡由于长滞留时间、高稳定性以及高比表面积的优势, 在碳捕集领域中预计将具有显著的应用潜力. 与普通 CO_2 气泡相比, 微/纳米气泡 CO_2 可使水泥

浆体的碳化速度提高 77%[48]. 此外, Liu 等[49] 在钢渣间接碳捕集中, 将 CO_2 烟气以微/纳米气泡形式鼓入液相, 在超声波的诱导空化作用下, 最终生产出高值球霰石晶型碳酸钙微球产品. 在质量分数 70% CO_2 和 20 ℃ 时, 碳酸钙产物纯度达 99.5%, 预计 1 t 钢渣可制取 840 kg $CaCO_3$[49]. 微/纳米气泡作为一类具有低能耗、高传质效率的曝气技术, 通过与钢渣捕集工艺的有机结合, 可以显著改善现行钢渣碳捕集中 CO_2 溶解过程的速率限制, 进而显提升钢渣的碳捕集能力.

国内沿海地区的炼钢产业较为发达, 大部分钢厂分布在沿海地区. 海水作为一类资源丰富、价格低廉的替代溶剂, 呈弱碱性, 相较于淡水资源具有显著的 CO_2 溶解能力. Wang 等[50] 报道海水中超过 90% 的 Ca^{2+}和 Mg^{2+}可与 CO_2 反应, 1 m^3 天然海水可固定约 1.34 m^3 或 2.65 kg CO_2, 且浓缩海水的潜力是该值的 2 ~ 3 倍. CO_2 气体溶解于海水后, 发生连续的解离反应并产生 H^+、HCO_3^-和CO_3^{2-}, 因此适当提高海水 pH 可进一步增强 CO_2 的溶解度. 钢渣不仅可营造碱性环境, 还为碳捕集反应提供了大量反应活性物质(Ca^{2+}和 Mg^{2+}). Li 等[51] 研究表明与未添加钢渣的海水相比, CO_2 溶解度在添加 1% 质量分数钢渣的海水中可提高 64.27%. 有研究表明, 钢渣含量每增加 1.0%, 海水中的 CO_2 传质系数随之增大, CO_2 溶解度可平均提高 115.56%[52]. 由于高盐度环境有助于钢渣中 Ca^{2+}的浸出, 钢渣在海水浓缩液中的碳化效率通常高于天然海水[53−54]. 在钢渣碳捕获工艺中, 海水资源的利用不仅可以提高 CO_2 溶解度, 还有助于提高海洋碳汇潜力[55].

4.2　减少碳捕集相关水足迹: 冷轧废水的利用

高效钢渣碳捕集工艺的研发不应忽略地区水资源的可用性, 减少水足迹对实现绿色可持续型碳捕集同样至关重要[56]. 钢渣间接碳捕集工艺中, 除了着重于碳捕集效率的提升, 其工艺整体的环境及经济友好性也需重点关注. 现行钢渣间接碳捕集工艺使用的液相介质多为净化后的水源, 净水处理附增的额外成本及用水压力往往被忽略. 在全球水资源紧缺的背景下, 钢渣间接碳捕集作为一类水资源密集型工艺, 可能会带来额外的用水压力. 以其他类型水资源(工业废水或海水)替代淡水资源, 将节水理念与碳捕集工艺相结合, 有助于提高碳捕集技术的环境友好性. 冷轧废水作为炼钢过程产生的“三废”(固废、废水和废气)之一, 可替代淡水成为液相介质, 减少钢渣碳捕集工艺相关能源及资源消耗. 相关研究表明, 以冷轧废水作为替代水资源, 不仅可实现高达 89.4% 的钢渣碳化率(1 kg 钢渣的碳封存能力达 283 g CO_2), 还显著减少了城市淡水资源消耗[57]. Pan 等[58] 在旋转填充床中使用冷轧废水对炼钢废气进行碳捕集, 取得较高的传质和反应速率, 在 25 ℃、1 个标准大气压的反应条件下, 1 min 内可去除 96% ~ 99% 烟气中的 CO_2. Chang 等[59] 探究了城市生活垃圾焚烧炉底灰在冷轧废水中的固碳效果, 发现 1 kg 底灰的碳捕集能力可达 102 g CO_2. 此外, 冷轧废水通常硬度较高, 钢渣的碳化过程有助于协同回收冷轧废水的钙元素[60]. 在钢渣碳捕集工艺中以冷轧废水作为淡水资源的替代品, 有助于推动钢铁行业加速迈向绿色可持续发展.

4.3　降低 CO_2 收运成本: 原位碳捕集策略

碳捕集工艺中, CO_2 收集和运输增加的相关物料成本和能耗往往被忽视, 这可能会使碳捕集工艺由碳汇转变为碳源, 致使该工艺的整体环境效益大打折扣. CO_2 是炼钢烟气的主要成分之一. 以炼钢烟气作为钢渣碳捕集中的 CO_2 源, 无需额外的浓缩及运输过程, 物料成本较低, 具有较强的经济性[61]. 2022 年 11 月, 河南济源投入运营了全球首条利用钢渣原位捕集水泥窑烟气 CO_2 的低碳生产线, 该项目利用钢渣进行原位碳捕集, 在实现水泥窑烟气碳减排的同时, 有效解决了钢渣安定性不良的问题, 这意味着我国钢渣碳捕集技术产业化应用迈入了新的阶段. Tian 等[27] 使用直接气固碳化法对钢厂的 CO_2 排放烟气进行碳捕集, 发现在 600 ℃ 的炼钢烟气环境中, 钢渣碳化率处于 49.5% ~ 55.5% 范围间, 最大碳固存量每吨钢渣达 88.5 kg CO_2. Zhang 等[62] 在 55 ℃ 的环境下利用烟气对钢渣碳化处理 24 h, 每公斤钢渣可吸收约 121 g CO_2. 钢铁行业作为我国主要的碳排放行业, 对炼钢烟气的原位碳捕集有助于推动环境可持续发展, 进而为实现“双碳”愿景提供技术支撑. 同时, 在钢渣碳捕集工艺中, 分别以易获取低成本的炼钢烟气和冷轧废水作为气相及液相介质, 缓解了 CO_2 源和淡水资源在运输、加工过程中的相关经济及能耗负荷. 这一策略有助于实现钢厂“三废”协同综合处置, 为未来钢厂多宗废物的同步资源回收开阔了思路(图 3).

4.4　最大化资源再利用效率: 碳捕集尾渣回用

不同的钢渣碳捕集方式导致碳化产物间的成分存在差异, 后续碳捕集尾渣的资源回收策略也需针对性考虑, 以寻求对尾渣资源再利用的最优解(图 3). 对于直接碳捕集, 碳化钢渣中的 f-CaO

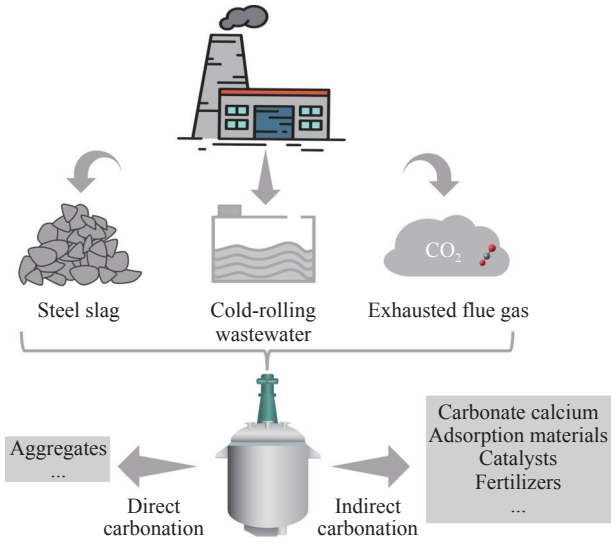

图 3　钢厂“三废”协同资源化技术路线图

Fig.3　Technology roadmap of multiple wastes collaborative resource utilization in steel mills

和 f-MgO 转化为 $CaCO_3$ 及 $MgCO_3$, 碳化产物填充了钢渣中的空隙, 碳化颗粒团聚形成更大的粒径, 强度更高、结构更为紧密, 可作为粗骨料应用于道路建设等[63]. 据报道, 碳化后的钢渣强度提升了 220%, 可较好的作为天然骨料替代品[64]. Shen 等[65]以碳化钢渣粉为胶凝材料, 粉碎后的钢渣为骨料, 磷石膏为添加剂, 制备得到的透水混凝土抗压强度达 9.4 MPa, 且具有良好的透水性, 在海绵城市透水道路中具有较强的应用潜力. 据研究, 碳化钢渣作为骨料掺加到水泥中后, 会形成单碳铝酸盐, 从而提高了碳化钢渣颗粒与水泥基体的粘结强度, 有助于增强最终的产品机械强度[66].

间接碳捕集后的产物包括高纯碳酸钙和酸浸尾渣. 高纯碳酸钙的应用潜力取决于自身的晶体结构和纯度. 通过间接碳捕集, 预计约 75% 的高纯碳酸钙可用于造纸工业, 作为亮度涂层和填料[67−68]. 对于酸浸尾渣, 其碳化活性成分 Ca 和 Mg 占比下降, Si、Fe 和 P 占比相应升高, 可用作吸附材料、催化剂或农业肥料等. 据报道, 将富硅尾渣改性制备纳米 SiO_2, 利用其良好的孔隙特征用作多孔基体, 负载有机基团后可作为重金属吸附剂或气体分离材料[69]. Cui 等[70]以钢渣为原料, 实现了制备多掺杂尖晶石 $M_xMg_{1-x}Fe_2O_4$(M=Mn, Ca)的新途径, 可实现对 Fe、Mn 和 Ca 元素的同步回收. 酸浸尾渣作为一类非均相氧化物材料, 还具有作为芬顿催化剂的潜力, 用于工业难降解废水的处理[71−72]. 此外, 钢渣间接碳捕集过程可实现对营养元素 Si 和 P 的浓缩富集, 因而可用于制备农业硅肥或磷肥[73]. 通过对高磷铁矿石炼钢后的渣料提取磷, 可以选择性溶出渣料中 81% 的磷元素[74]. 需注意的是, 钢渣衍生的农业肥料在大规模应用前, 需系统评估重金属类物质的浸出及迁移风险, 避免对生态环境及人类健康造成潜在威胁.

Guo[22]提出了“渐进式利用”理念, 即依据钢渣的特性, 对赋存的各类潜在资源逐级回收, 以实现最合理有效的资源利用. 在钢铁产业结构升级、社会观念转变以及新型法规标准颁布的多种因素交织影响下, 国内钢渣资源化水平预计将持续提升. 以资源回收为聚焦点, 因地制宜地依据碳化产物性质进行层次化资源回收, 这一思路既可减少最终外排钢渣量, 又可以最大化末端产品的经济价值, 实现一举两得之效. 以“渐进式利用”理念为核心的发展理念, 可助力钢铁行业“循环经济”长远发展, 推动行业加快探索节能降碳型绿色发展道路.

5　总结与展望

当前国内钢渣的处理方式不仅对生态环境造成严重威胁, 还造成钢渣中大量潜在可回收资源的浪费, 长远来看不利于“循环经济”的发展. 钢渣碳捕集工艺不仅具有显著碳减排效益, 相应碳捕集渣料还具有较强回收潜力, 该技术的推广施行对国内钢铁行业的低碳转型具有重要意义. 目前对钢渣碳捕集工艺的研究仍存在一些空白, 限制了该项技术的发展. 未来研究可以着重于以下几方面.

(1)以现行领域内研究成果为数据库支撑, 围绕神经网络或深度学习等计算机算法, 深入分析碳捕集工艺中多种参数间的潜在关联及影响机制, 明确最优参数范围, 在降低运行成本的同时最大化金属离子浸出及 CO_2 溶解过程, 提高碳捕集效率. 在深入推进探索工程运行参数基础上, 开拓研发碳捕集反应器构型, 扩大碳捕集工艺规模, 实现钢渣碳捕集产业化.

(2)微/纳米气泡、冷轧废水、炼钢烟气及海水资源在实际环境下对钢渣固碳效率的影响仍需要深入明晰, 各项反应参数的影响机制需深入探究. 此外, 碳捕集尾渣在资源利用前, 需全面且深入地考察赋存重金属的潜在浸出活性, 充分评估尾渣在资源回收过程中的健康及环境风险, 提高资源化过程的生态环境友好性.

(3)在评价钢渣碳捕集工艺的整体环境和经济效益时, 应从全生命周期的角度综合考虑. 这意

味着钢渣碳捕集工艺的整体效益不仅包含上游运输、预处理和化学品生产能耗, 还包含下游碳化产物资源回用带来的额外环境和经济效益, 以生命周期评估为手段对钢渣碳捕集工艺的整体经济与环境效益做出系统评价.

参 考 文 献

[1] Bai F. Review on application of carbonation of steel slag. *China Concr*, 2023(4): 86
(白锋. 钢渣碳酸化应用研究综述. 混凝土世界, 2023(4): 86)

[2] Liu J X. Analysis of market status and development trend of China”s solid waste treatment industry. *Resour Recycl*, 2019(5): 34
(刘建勋. 我国固废处理行业市场现状与发展趋势分析. 资源再生, 2019(5): 34)

[3] Meng X Y, Wang Y. Progress, problems and countermeasures of promoting the construction of “zero-waste city” in China. *Bull Chin Acad Sci*, 2022, 37(7): 995
(孟小燕, 王毅. 我国推进“无废城市”建设的进展、问题及对策建议. 中国科学院院刊, 2022, 37(7): 995)

[4] Ren X, Wang H G, Wu Y D, et al. Discussion on steel slag treatment and resource utilization under carbon peaking and carbon neutrality goals. *Environ Eng*, 2022, 40(8): 220
(任旭, 王会刚, 吴跃东, 等. “双碳”目标下钢渣处理及资源化利用探讨. 环境工程, 2022, 40(8): 220)

[5] Li L F, Ling T C, Pan S Y. Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review. *Sci Total Environ*, 2022, 806: 150280

[6] International Energy Agency. CO_2 emissions in 2022 [J/OL]. *IEA* (2023–03–02) [2024–06–27] https://www.iea.org/reports/co2-emissions-in-2022

[7] Pan S Y, Chen Y H, Fan L S, et al. CO_2 mineralization and utilization by alkaline solid wastes for potential carbon reduction. *Nat Sustainability*, 2020, 3: 399

[8] Shu K Q, Sasaki K. Occurrence of steel converter slag and its high value-added conversion for environmental restoration in China: A review. *J Cleaner Prod*, 2022, 373: 133876

[9] He T S, Li Z B, Zhao S Y, et al. Effect of reductive component-conditioning materials on the composition, structure, and properties of reconstructed BOF slag. *Constr Build Mater*, 2020, 255: 119269

[10] Tafesse M, Lee H K, Alemu A S, et al. On the expansive cracking of a cement matrix containing atomized basic oxygen furnace slag with a metallic iron. *Constr Build Mater*, 2020, 264: 119806

[11] Liao Y S, Jiang G X, Wang K J, et al. Effect of steel slag on the hydration and strength development of calcium sulfoaluminate cement. *Constr Build Mater*, 2020, 265: 120301

[12] Liu J Z, Yu B, Wang Q. Application of steel slag in cement treated aggregate base course. *J Cleaner Prod*, 2020, 269: 121733

[13] Wen T T, Yang L Y, Dang C Y, et al. Effect of basic oxygen furnace slag on succession of the bacterial community and immobilization of various metal ions in acidic contaminated mine soil. *J Hazard Mater*, 2020, 388: 121784

[14] Franco de Carvalho J M, de Melo T V, Fontes W C, et al. More eco-efficient concrete: An approach on optimization in the production and use of waste-based supplementary cementing materials. *Constr Build Mater*, 2019, 206: 397

[15] Pang B, Zhou Z H, Xu H X. Utilization of carbonated and granulated steel slag aggregate in concrete. *Constr Build Mater*, 2015, 84: 454

[16] Carvalho S Z, Vernilli F, Almeida B, et al. Reducing environmental impacts: The use of basic oxygen furnace slag in Portland cement. *J Cleaner Prod*, 2018, 172: 385

[17] Waligora J, Bulteel D, Degrugilliers P, et al. Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach. *Mater Charact*, 2010, 61(1): 39

[18] Wang C G, Wang S, Ma B H, et al. Carbonization resistance and life prediction of steel slag concrete. *China Concr Cem Prod*, 2023(3): 83
(王成刚, 王帅, 马兵辉, 等. 钢渣混凝土的抗碳化性能及寿命预测. 混凝土与水泥制品, 2023(3): 83)

[19] Fang Y F, Su W, Zhang Y Z, et al. Effect of CO_2 pretreatment on stability and hydration activity of steel slag. *J Shenyang Jianzhu Univ* (*Nat Sci*), 2022, 38(6): 1114
(房延凤, 苏文, 张玉琢, 等. CO_2 预处理对钢渣安定性和水化活性的影响研究. 沈阳建筑大学学报(自然科学版), 2022, 38(6): 1114)

[20] Zhong X Z, Li L F, Jiang Y, et al. High temperature resistance of accelerated carbonated steel slag blocks. *Bull Chin Ceram Soc*, 2021, 40(11): 3677
(仲心卓, 李路帆, 姜义, 等. 钢渣加速碳化制品的耐高温性能研究. 硅酸盐通报, 2021, 40(11): 3677)

[21] Gao W H, Zhou W T, Lyu X J, et al. Comprehensive utilization of steel slag: A review. *Powder Technol*, 2023, 422: 118449

[22] Guo J L, Bao Y P, Wang M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management. *Waste Manage*, 2018, 78: 318

[23] Wang G, Wang Y H, Gao Z L. Use of steel slag as a granular material: Volume expansion prediction and usability criteria. *J Hazard Mater*, 2010, 184(1-3): 555

[24] Altun A, Yılmaz İ. Study on steel furnace slags with high MgO as additive in Portland cement. *Cem Concr Res*, 2002, 32(8): 1247

[25] Wang X, Lu X Y, Turvey C C, et al. Evaluation of the carbon sequestration potential of steel slag in China based on theoretical and experimental labile Ca. *Resour Conserv Recycl*, 2022, 186: 106590

[26] Mayes W M, Riley A L, Gomes H I, et al. Atmospheric CO_2 sequestration in iron and steel slag: Consett, County Durham, United Kingdom. *Environ Sci Technol*, 2018, 52(14): 7892

[27] Tian S C, Jiang J G, Chen X J, et al. Direct gas-solid carbonation kinetics of steel slag and the contribution to *in situ* sequestration of

flue gas CO_2 in steel-making plants. *ChemSusChem*, 2013, 6(12): 2348

[28] Rushendra Revathy T D, Palanivelu K, Ramachandran A. Direct mineral carbonation of steelmaking slag for CO_2 sequestration at room temperature. *Environ Sci Pollut Res*, 2016, 23(8): 7349

[29] Ren E Z, Tang S Y, Liu C J, et al. Carbon dioxide mineralization for the disposition of blast-furnace slag: Reaction intensification using NaCl solutions. *Greenhouse Gases Sci Technol*, 2020, 10(2): 436

[30] Huijgen W J, Witkamp G J, Comans R N. Mineral CO_2 sequestration by steel slag carbonation. *Environ Sci Technol*, 2005, 39(24): 9676

[31] Chang E E, Pan S Y, Chen Y H, et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed. *J Hazard Mater*, 2012, 227: 97

[32] Baciocchi R, Costa G, Di Gianfilippo M, et al. Thin-film versus slurry-phase carbonation of steel slag: CO_2 uptake and effects on mineralogy. *J Hazard Mater*, 2015, 283: 302

[33] Zhang Y Y, Yu L H, Cui K K, et al. Carbon capture and storage technology by steel-making slags: Recent progress and future challenges. *Chem Eng J*, 2023, 455: 140552

[34] Stolaroff J K, Lowry G V, Keith D W. Using CaO- and MgO-rich industrial waste streams for carbon sequestration. *Energy Convers Manage*, 2005, 46(5): 687

[35] Gaus I. Role and impact of CO_2–rock interactions during CO_2 storage in sedimentary rocks. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2010, 4(1): 73

[36] Myers C A, Nakagaki T, Akutsu K. Quantification of the CO_2 mineralization potential of ironmaking and steelmaking slags under direct gas-solid reactions in flue gas. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2019, 87: 100

[37] Zhang N, Huang H D, Yang R X, et al. Aqueous metal ion leaching processes from high sulfur coal fly ash for carbon mineralization: The importance of pH control on cation extraction, carbonate purity, and silicon Q structure. *Chem Eng J*, 2023, 474: 145968

[38] Lee Y H, Eom H, Lee S M, et al. Effects of pH and metal composition on selective extraction of calcium from steel slag for $Ca(OH)_2$ production. *RSC Adv*, 2021, 11(14): 8306

[39] Polettini A, Pomi R, Stramazzo A. Carbon sequestration through accelerated carbonation of BOF slag: Influence of particle size characteristics. *Chem Eng J*, 2016, 298: 26

[40] Wang Q, Yang J W, Yan P Y. Cementitious properties of super-fine steel slag. *Powder Technol*, 2013, 245: 35

[41] Sheen Y N, Le D H, Sun T H. Innovative usages of stainless steel slags in developing self-compacting concrete. *Constr Build Mater*, 2015, 101: 268

[42] Mei X H, Zhao Q, Zhou J Y, et al. Phase transition of Ca- and Mg-bearing minerals of steel slag in acidic solution for CO_2 sequestration. *J Sustainable Metall*, 2021, 7(2): 391

[43] Kurusta T, Mucsi G, Kumar S, et al. Carbon-dioxide sequestration by mechanical activation of Linz-Donawitz steel slag; the effect of water on CO_2 capture. *Fuel*, 2023, 352: 128951

[44] Rim G, Wang D Y, Rayson M, et al. Investigation on abrasion versus fragmentation of the Si-rich passivation layer for enhanced carbon mineralization *via* CO_2 partial pressure swing. *Ind Eng Chem Res*, 2020, 59(14): 6517

[45] Said A, Mattila O, Eloneva S, et al. Enhancement of calcium dissolution from steel slag by ultrasound. *Chem Eng Process Process Intensif*, 2015, 89: 1

[46] Santos R M, François D, Mertens G, et al. Ultrasound-intensified mineral carbonation. *Appl Therm Eng*, 2013, 57(1-2): 154

[47] Hu G Y, Jin S M, Liu K. Precipitation of silica by CO_2 bubbles/microbubbles and kinetics research. *J Cleaner Prod*, 2023, 428: 139322

[48] Pu Y H, Li L, Shi X S, et al. Recent advances in accelerated carbonation for improving cement-based materials and CO2 mitigation from a life cycle perspective. *Constr Build Mater*, 2023, 388: 131695.

[49] Liu L C, Gan M, Fan X H, et al. Synthesis of high-value $CaCO_3$ *via* indirect CO_2 fixation utilized blast furnace slag. *J Environ Chem Eng*, 2023, 11(5): 110655

[50] Wang W L, Hu M Q, Zheng Y L, et al. CO_2 fixation in Ca^{2+}-/Mg^{2+}-rich aqueous solutions through enhanced carbonate precipitation. *Ind Eng Chem Res*, 2011, 50(13): 8333

[51] Li H W, Zhang R J, Wang T Y, et al. Performance evaluation and environment risk assessment of steel slag enhancement for seawater to capture CO_2. *Energy*, 2022, 238: 121861

[52] Li H W, Tang Z G, Li N, et al. Mechanism and process study on steel slag enhancement for CO_2 capture by seawater. *Appl Energy*, 2020, 276: 115515

[53] Nyambura M G, Mugera G W, Felicia P L, et al. Carbonation of brine impacted fractionated coal fly ash: Implications for CO_2 sequestration. *J Environ Manage*, 2011, 92(3): 655

[54] Uliasz-Bocheńczyk A, Mokrzycki E, Piotrowski Z, et al. Estimation of CO_2 sequestration potential *via* mineral carbonation in fly ash from lignite combustion in Poland. *Energy Procedia*, 2009, 1(1): 4873

[55] Liu S S, Song J M, Li X G, et al. Enhancing CO_2 storage and marine carbon sink based on seawater mineral carbonation. *Mar Pollut Bull*, 2024, 206: 116685

[56] Rosa L, Sanchez D L, Realmonte G, et al. The water footprint of carbon capture and storage technologies. *Renewable Sustainable Energy Rev*, 2021, 138: 110511

[57] Chang E E, Chiu A C, Pan S Y, et al. Carbonation of basic oxygen furnace slag with metalworking wastewater in a slurry reactor. *Int J Greenhouse Gas Control*, 2013, 12: 382

[58] Pan S Y, Chiang P C, Chen Y H, et al. Ex Situ CO_2 capture by carbonation of steelmaking slag coupled with metalworking wastewater in a rotating packed bed. *Environ Sci Technol*, 2013, 47(7): 3308

[59] Chang E E, Pan S Y, Yang L, et al. Accelerated carbonation using

municipal solid waste incinerator bottom ash and cold-rolling wastewater: Performance evaluation and reaction kinetics. *Waste Manage*, 2015, 43: 283

[60] Wei C, Dong J P, Hu Z H, et al. CO_2 sequestration exploration utilizing converter slag and cold-rolling waste water: The effect of carbonation parameters. *Process Saf Environ Prot*, 2021, 148: 1233

[61] Li H Z, Guo R T, Chen Y P, et al. Utilization of steel slag as a highly efficient absorbent for SO_2 removal at coal-fired power stations. *Environ Adv*, 2022, 9: 100276

[62] Zhang S P, Ghouleh Z, Liu J Y, et al. Converting ladle slag into high-strength cementing material by flue gas carbonation at different temperatures. *Resour Conserv Recycl*, 2021, 174: 105819

[63] Zhang S P, Ghouleh Z, Mucci A, et al. Production of cleaner high-strength cementing material using steel slag under elevated-temperature carbonation. *J Cleaner Prod*, 2022, 342: 130948

[64] Jiang Y, Ling T C. Production of artificial aggregates from steel-making slag: Influences of accelerated carbonation during granulation and/or post-curing. *J CO_2 Util*, 2020, 36: 135

[65] Shen W G, Liu Y, Wu M M, et al. Ecological carbonated steel slag pervious concrete prepared as a key material of sponge city. *J Cleaner Prod*, 2020, 256: 120244

[66] Li X D, Mehdizadeh H, Ling T C. Environmental, economic and engineering performances of aqueous carbonated steel slag powders as alternative material in cement pastes: Influence of particle size. *Sci Total Environ*, 2023, 903: 166210

[67] Eloneva S, Teir S, Savolahti J, et al. Co-utilisation of CO_2 and calcium silicate-rich slags for precipitated calcium carbonate production (part II)//*Proceedings of ECOS* 2007. Padova, 2007: 1389

[68] Zevenhoven R, Teir S, Eloneva S. Heat optimisation of a staged gas–solid mineral carbonation process for long-term CO_2 storage. *Energy*, 2008, 33(2): 362

[69] Li K M. *Industrial Solid Waste Derived SiO_2 as Support for Synthesizing Amine Functional Adsorbents Used for CO_2 Capture and Its Mechanism* [Dissertation]. Beijing: Tsinghua University, 2017
(李凯敏. 固废源 SiO_2 基固态胺材料用于 CO_2 捕集技术及机理研究[学位论文]. 北京: 清华大学, 2017)

[70] Cui K K, Wu Z J, Huang W, et al. Recycle of valuable metals in converter steel slag for preparing multidoped $M_xMg_{1-x}Fe_2O_4$ (M = Mn, Ca) spinel. *ACS Sustainable Chem Eng*, 2014, 2(3): 344

[71] Song B, Wang Z Y, Li J F, et al. Preparation and electrocatalytic properties of Kaolin/steel slag particle electrodes. *Catal Commun*, 2021, 148: 106177

[72] Wang Z Y, Song B, Li J F, et al. Degradation of norfloxacin wastewater using Kaolin/steel slag particle electrodes: Performance, mechanism and pathway. *Chemosphere*, 2021, 270: 128652

[73] Wang G G, Chen C Y, Li J Q, et al. Dual-value utilization of calcium-silica slag: Sequestration of CO_2 to recover high-purity vaterite with silica fertilizer as a by-product. *Sep Purif Technol*, 2024, 330: 125281

[74] Yu Y H, Du C M, Yu J K, et al. Effect of BOF slag modification on the dissolution behavior of phosphorus from practical dephosphorization slag. *Metall Mater Trans B*, 2022, 53(6): 3635