

钢渣矿化捕集CO₂化学路径研究进展

孙萌遥, 梅孝辉*, 孙培钧, 黄雨燃, 汤烨铭, 李玲玲, 彭小林

辽宁科技学院冶金与材料工程学院, 辽宁 本溪

收稿日期: 2025年8月5日; 录用日期: 2025年9月1日; 发布日期: 2025年9月10日

摘要

钢铁行业是能源密集型产业, 钢渣和CO₂是冶炼过程中伴随排放的两大副产物。利用钢渣进行CO₂的捕集与利用技术被认为是实现钢铁冶炼副产物资源循环利用的可行且前景广阔的技术。本文首先介绍了钢渣的物理化学性质, 分析了钢渣作为碳捕集原料的可行性和潜力应用价值。其次, 本文讨论了现有钢渣捕集CO₂的工艺途径及碳捕集反应影响因素, 对不同钢渣碳捕集工艺的反应机理进行了深入的解析。最后, 基于目前钢渣矿化技术的研究现状, 提出其发展前景和有待深入研究的方向。

关键词

钢渣, 二氧化碳, 碳捕集, 资源利用

Research Progress on Chemical Pathways for CO₂ Capture by Steel Slag Mineralization

Mengyao Sun, Xiaohui Mei*, Peijun Sun, Yuran Huang, Yeming Tang, Lingling Li, Xiaolin Peng

School of Metallurgy and Materials Engineering, Liaoning Institute of Science and Technology, Benxi Liaoning

Received: Aug. 5th, 2025; accepted: Sep. 1st, 2025; published: Sep. 10th, 2025

Abstract

The iron and steel industry is energy-intensive, and steel slag and CO₂ are the two major byproducts that accompany emissions during the smelting process. The use of steel slag for CO₂ capture and utilization is a feasible and promising technology to achieve waste resource recycling. This paper firstly introduces the physicochemical properties of steel slag. The feasibility and potential application value of steel slag as a raw material for carbon capture are analyzed. Secondly, this paper discusses the existing process pathways for CO₂ capture from steel slag and the factors affecting the carbon capture reaction. The reaction mechanisms of different steel slag carbon capture processes

*通讯作者。

文章引用: 孙萌遥, 梅孝辉, 孙培钧, 黄雨燃, 汤烨铭, 李玲玲, 彭小林. 钢渣矿化捕集 CO₂ 化学路径研究进展[J]. 冶金工程, 2025, 12(3): 150-159. DOI: 10.12677/meng.2025.123019

are analyzed. Finally, based on the current research status of steel slag carbonization technology, its development prospects and directions to be studied are proposed.

Keywords

Steel Slag, Carbon Dioxide, Carbon Capture, Resource Utilization

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



1. 引言

大量的温室气体和工业固体废弃物的排放引发了严重的气候变化和环境污染问题。钢铁行业是 CO₂ 排放的主要贡献者之一。据国家统计局数据：2024 年，中国的粗钢产量超 10 亿吨。平均每生产 1 吨粗钢将伴随产生约 2 吨的 CO₂，钢铁行业每年的 CO₂ 排放量大约占全球总 CO₂ 排放量的 7% [1]。此外，钢渣是钢铁行业生产过程中排放的另一大宗废弃物。然而，我国钢渣的利用率较低，不足 30% [2]，大部分钢渣呈堆存状态，造成了严重的资源浪费和环境污染问题。因此，基于这样严峻的背景，钢铁行业有义务降低生产过程中的碳排放和提高钢渣的资源化利用率，以实现钢铁行业的可持续绿色发展。

目前，利用天然矿物或工业固体废物进行 CO₂ 捕获和利用(CCU)被认为是一项可行和有前途的技术。钢渣具有较高的 CaO 和 MgO 含量，可以直接以碳酸盐的形式固定 CO₂，也可以从钢渣中提取碱性物质作为 CO₂ 的吸收剂，是潜在的 CO₂ 封存原料[3]。因此，利用钢渣捕集 CO₂ 被认为是应对气候变化和全球变暖的必要战略之一。

2. 钢渣物理化学性质

钢渣的堆积造成了严重的环境污染和资源浪费，其化学成分组成受炼钢工艺影响较大。表 1 列出了氧气顶吹转炉(BOF)渣、电弧炉(EAF)渣、精炼氩氧脱碳炉(AOD)渣和钢包精炼炉(LF)渣的主要化学成分组成。

Table 1. The main chemical composition of BOF slag, EAF slag, AOD slag, and LF slag
表 1. BOF 渣、EAF 渣、AOD 渣和 LF 渣的主要化学成分组成

	CaO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	Fe ₂ O ₃	P ₂ O ₅	Cr ₂ O ₃	文献
BOF	50.26	13.07	2.75	1.57	—	25.73	1.32	0.22	[4]
BOF	47.7	13.3	3.0	6.4	—	24.4	1.47	—	[5]
AOD	54.3	17.7	6.4	3.0	—	9.2	—	2.8	[6]
LF	51.5	28.3	1.2	11.3	—	—	—	3.9	[7]
EAF	35.23	9.41	10.78	9.77	—	24.22	—	—	[8]

BOF 渣主要由 CaO、SiO₂ 和氧化铁(FeO/Fe₂O₃)组成，其中 SiO₂ 的含量约为 10~17 wt.%，氧化铁(FeO/Fe₂O₃)的含量约为 3~26 wt.%，CaO 的含量最高，约为 39~51 wt.%。AOD 渣的化学成分与 BOF 渣相似，CaO 和 SiO₂ 的含量分别为 54~59 wt.%和 17~35 wt.%。此外，AOD 渣还含有大量 Cr₂O₃ (0.3~3 wt.%)。LF 渣除了具有较高的 CaO 含量(50~66 wt.%)外，SiO₂ 含量也明显高于 BOF 渣，而 Fe₂O₃ 的含量则明显低

于 BOF 渣和 EAF 渣。

从表 1 中可以看出, 不同种类钢渣均具有较高的 CaO 含量, 表明各种类钢渣均具有较高的 CO₂ 封存潜力。然而, 受钢渣化学成分组成和冷却工艺的影响, 不同种类钢渣的矿相组成差异较大。BOF 渣主要由硅酸盐相、铁酸盐相和少量白色的镁钨铁矿组成[4]。而 EAF 渣主要由 Ca-Mg-Al 硅酸盐矿物组成 (2CaO·Al₂O₃·SiO₂、2CaO·MgO·2SiO₂), Ca-Mg 硅酸(3CaO·MgO·2SiO₂ 盐)和氧化铁(FeO) [8]。LF 渣主要由 Ca(OH)₂ 和少量的硅酸二钙和水合硅酸钙组成[7]。

3. 钢渣矿化捕集 CO₂ 路径

利用含钙废弃物捕集 CO₂ 可生成稳定的碳酸盐矿物, 被认为是永久封存 CO₂ 的方法[9]。目前, 利用钢渣捕集 CO₂ 的途径主要包括直接法和间接法。直接法还可根据湿度的不同分为直接干法和直接湿法[10]。在钢渣直接干法碳捕集工艺中, 钢渣直接与 CO₂ 反应形成碳酸盐矿物。钢渣间接碳捕集工艺包括两个步骤: 钢渣中的 Ca²⁺ 浸出和含 Ca²⁺ 浸出液的碳捕集[3]。利用这种方法, 钢渣中的元素(如 Ca 和 Mg)可有效转化为稳定的碳酸盐矿物, 从而实现 CO₂ 的固定和封存[11]。图 1 为钢渣直接碳捕集工艺路线图。

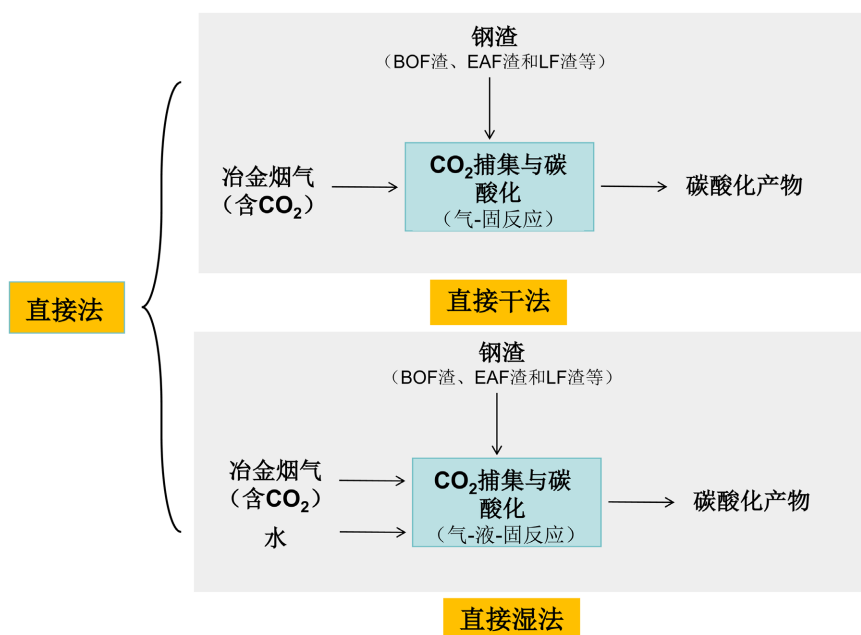


Figure 1. Roadmap for direct carbon capture process from steel slag

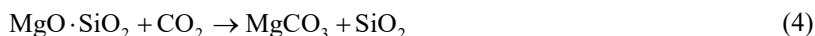
图 1. 钢渣直接碳捕集工艺路线图

3.1. 直接法

3.1.1. 直接干法

直接干法被认为是一种简单的钢渣碳捕集工艺, 其通过钢渣与 CO₂ 气体在一个反应器中的直接反应来实现[11]。该工艺无需采用额外化学试剂从钢渣中提取活性成分(如 Ca 或 Mg)[11]。因此, 钢渣直接法工艺具有工艺简单和操作方便的优点, 在原位碳捕集与封存方面具有良好的前景。钢渣直接干法工艺通常要求气固界面反应在环境相对湿度 20% 以下进行, 其主要矿物反应原理如下公式所示。





钢渣直接捕集 CO_2 存在着化学反应速率慢、 CO_2 捕集效率低和碳酸化反应周期长等缺点。碳酸化反应形成的碳酸盐产物堆积在未反应的钢渣表面,使得 CO_2 难以扩散到未反应钢渣表面,阻碍了碳酸化反应的进一步进行。为了提高钢渣直接法碳捕集的反应速率,在反应过程中,通常需要高温和高压处理[12]。然而,由于气态 CO_2 的熵值较高,随着温度的继续升高,平衡转移至游离 CO_2 ,发生碳酸盐产物的分解反应,导致碳化达到上限。据报道,天然 CaO 的温度上限为 $550^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$,因此,钢渣的碳化温度通常在 $550^\circ\text{C} \sim 650^\circ\text{C}$ 之间[12]。

3.1.2. 直接湿法

钢渣的直接湿法是指钢渣与水悬浮液中的 CO_2 发生反应,即在钢渣直接干法工艺的基础上引入水,钢渣的碳酸化反应在一定的湿度下完成[12]。钢渣直接湿法碳捕集工艺具体的反应原理如公式(5)~(9)所示。 CO_2 会首先溶解在水中形成碳酸,碳酸进一步电离出 H^+ ,促进钢渣的溶解和 Ca^{2+} 释放,提高了钢渣碳捕集反应速率和效率。另外,也有研究表明,在直接湿法碳捕集工艺中,钢渣与 CO_2 的反应可通过两种方式进行:(1) CaO 直接与 CO_2 反应生成碳酸盐(CaCO_3);(2) CaO 溶于水形成氢氧化物($\text{Ca}(\text{OH})_2$),再与 CO_2 反应生成碳酸盐。当然,在潮湿条件下, CO_2 过量时也会形成碳酸氢盐($\text{Ca}(\text{HCO}_3)_2$) [13]。较高的液固比(L/S,湿度较大)有利于第二种反应占主导地位。当达到某个临界点时,过量的水会形成传质障碍,降低离子强度,导致 Ca^{2+} 的溶解速率下降,因此,碳捕集率不再显著提高[13]。随着固液比的不同,反应机理有所不同,在今后的研究中应进一步关注反应机理和动力学。此外,由于不同钢渣所含的 Ca 、 Mg 元素的赋存矿相种类不同,游离 CaO 的含量决定了钢渣直接湿法碳捕集工艺的 CO_2 固定能力。钢渣中游离 CaO 含量越高, CO_2 的捕集能力越好[14]。



在反应初期,充足的反应物可使反应迅速发生。随着反应的不断进行,碳酸化产物会聚集在钢渣颗粒表面,在一定程度上阻碍反应的进行,反应速率降低。因此,无论是钢渣直接干法还是直接湿法碳捕集工艺,随着碳酸化反应的进行,反应钢渣颗粒表面会生成致密的碳酸盐产物层和贫钙钝化层,该产物层或钝化层的存在进一步阻止了钢渣内部 Ca^{2+} 的溶出和 CO_2 向未反应界面的扩散,进而影响钢渣的碳酸化反应速率和碳捕集率[15]。针对产物层钝化问题,目前研究中提出了多种策略以提高反应速率和碳捕集率。通过对钢渣进行研磨处理,减小钢渣的粒径,增加反应界面面积,从而提高反应速率[16]。研究表明:粒度越小,钢渣具有较大的比表面积,有利于 Ca^{2+} 的提取和钢渣的碳化[16],因为缩短了元素从颗粒内部到表面的扩散距离[17][18]。此外,研究表明:当钢渣尺寸从小于 $2000\ \mu\text{m}$ 减小到 $38\ \mu\text{m}$ 时,钢渣中钙的碳酸化率从约 26% 增加到 74%。减小钢渣的粒度可提高转化率,表明钢渣直接湿法碳捕集工艺主要以固体颗粒的表面反应为主[19]。另外, Li 等[20]的研究表明通过加入 EDTA 为催化剂,可以促进碳酸盐的生成和扩散,改善反应物的结构,减少产物层的形成。

除此以外,通过优化反应条件可进一步提高反应速率和碳捕集效率。结果表明,钢渣的粒度和反应

温度是影响碳化反应速率的关键因素[21]。反应温度对钢渣直接湿法碳捕集工艺的反应速率有着复杂的影响,太高和太低的温度都会限制反应的正向进行[13]。温度升高,游离 CaO 和 MgO 在水溶液中的溶解能力降低,CO₂ 的溶解度降低。另外,实验结果表明,利用钢渣直接捕集炼钢厂不同运行条件下烟气中的 CO₂,在温度为 600℃时,钢渣的碳酸化转化率可达到 49.5%至 55.5%,最大 CO₂ 捕集量为 88.5 g CO₂/kg [14]。

除了上述的几类传统影响因素外,超声波处理也被认为是一种有效去除阻碍传质钝化层的方法。Santos 等[22]的研究发现:在超声协同处理下,钢渣的碳酸化率从 30%显著提高到 49%。超声波效应使液体分子剧烈压缩和膨胀,Ca²⁺/Mg²⁺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,在钢渣碳捕集效率和能耗之间取得平衡。

3.2. 间接法

钢渣的间接碳捕集工艺是指利用酸性溶剂从钢渣中提取碱性矿物离子(如, Ca²⁺和 Mg²⁺),再与 CO₂ 反应生成相应的碳酸盐沉淀[13]。图 2 为钢渣间接法碳捕集工艺流程图。钢渣间接碳捕集工艺主要分为两大环节,包括 Ca²⁺的浸出和浸出滤液的碳酸化反应。首先钢渣中的 Ca、Mg 等元素在酸性溶液环境中溶出,通过添加碱性物质调节溶液的 pH 值(通常在强酸和弱酸环境中需要添加碱性调节剂),然后在碱性环境中将 CO₂ 通入到含有 Ca²⁺、Mg²⁺的浸出液中,并生成相应的碳酸盐沉淀[13]。相比于钢渣直接碳捕集工艺,钢渣间接碳捕集工艺具有较高的反应速率和碳捕集率。到目前为止,盐酸(HCl) [23]、硝酸(HNO₃) [24]、醋酸(CH₃COOH) [25]和铵盐溶液[26]是钢渣常用的 Ca²⁺浸出剂。因此,本部分则按照钢渣浸出剂种类的不同介绍钢渣间接碳捕集工艺的路径和影响因素。

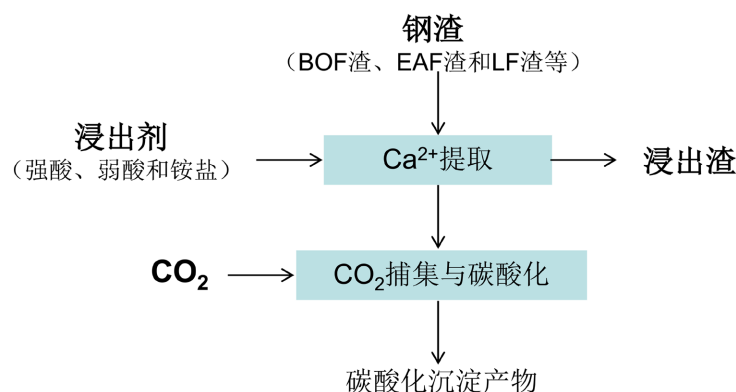
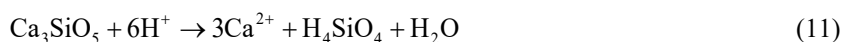
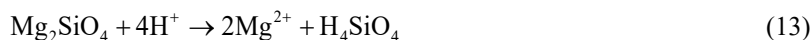


Figure 2. Process flow diagram of indirect carbon capture using steel slag
图 2. 钢渣间接碳捕集工艺流程图

3.2.1. 强(弱)酸溶液

钢渣在 HCl 溶液中浸出可能发生的化学反应如公式(10)~(13)所示。在常温状态下,各反应的标准吉布斯自由能均小于零,可自发进行[13]。然而,浸出过程中除了 Ca 元素以外,Al 和 Fe 等杂质元素也会进入到溶液中[23]。由于 HCl 溶液具有强腐蚀性,通常对反应器材料具有较高的要求,较高的能耗和杂质问题使得 HCl 浸出工艺并未得到大力的发展[13]。





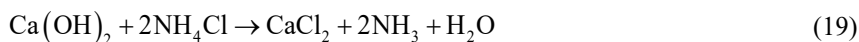
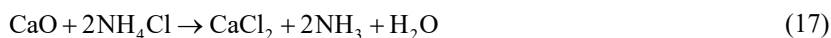
醋酸(CH_3COOH)经常被用作天然矿物的选择性浸出剂。研究者曾用 CH_3COOH 从钢渣中提取 Ca^{2+} , 结果表明高浓度 CH_3COOH 可以提取多种元素, 而较低浓度的 CH_3COOH 对钢渣中的 Ca^{2+} 有一定的选择性浸出作用[25]。因此, CH_3COOH 可用于钢渣中的 Ca^{2+} 的选择性浸出剂, 并用于 CO_2 的碳酸化封存。例如, 当 CH_3COOH 溶液的使用量低于溶解钢渣中所有 Ca 所需的化学剂量酸的 30% 时, 仅会溶解钢渣中的 CaO 和 $\text{Ca}(\text{OH})_2$, 钢渣中的其他硅酸盐相和铁酸盐矿相等并无明显的浸出作用[26], 而酸度更强的 CH_3COOH 溶液环境中会溶解大量的 Fe 和 Si [27]。因此在钢渣的选择性浸出研究中, 低浓度的醋酸溶液作为钢渣浸出剂得到了广泛的关注。钢渣在醋酸溶液中的浸出反应主要如下公式所示:



聚焦钢渣浸出剂的回收问题, 强酸和弱酸浸出剂的回收一般采用化学沉淀法, 其原理是通过阴阳离子反应产生沉淀, 将溶解的物质转化为难溶的沉淀物, 从而达到提纯的目的。利用盐酸溶液浸出钢渣后, 浸出液中大量的杂质离子可通过加入碱性物质(如 NaOH)中和酸性溶液, 除去沉淀物, 从而实现 HCl 回收。化学沉淀法具有操作简单的优点。然而, 化学沉淀过程中可能会出现金属离子的包裹和吸附, 金属损失率高。在成本方面, 化学沉淀法的成本主要取决于试剂选择和沉淀量。若沉淀物含有重金属, 则可能被视为危险废物, 处理成本高昂。Wang 等人[28]的研究表明: 利用钢渣捕获和储存 CO_2 可能需要的碱性添加剂量约为(1842 kg CO_2 /t NaOH), 这不仅成本高昂, 而且能耗也很高, 即每吨 NaOH 大约消耗 2230 kWh 的电力和 0.44 吨的蒸汽。

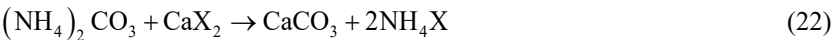
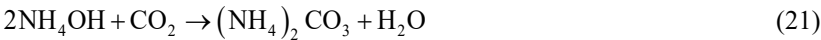
3.2.2. 铵盐溶液

用氯化铵(NH_4Cl)溶液浸出钢渣可能发生的化学反应如公式(17)~公式(19)所示, NH_4Cl 溶液为介质从钢渣中提取 Ca , 所得含 Ca^{2+} 溶液用于 CO_2 的吸收。由于 NH_3 的产生, 反应后的浸出液呈碱性, 从而有利于 CO_2 的吸收[29]。利用 NH_4Cl 溶液浸出钢渣的 Ca^{2+} 浸出率较低(<60%), 但 Ca^{2+} 的选择性浸出率高(>95%, 其他杂质元素 Mg 、 Al 和 Fe 等基本不溶出), 这也为后续含 Ca 溶液碳酸化制备高纯碳酸钙产品奠定了基础[13]。然而, 碳酸化率主要取决于钢渣中 Ca^{2+} 的浸出效率。高 Ca^{2+} 浸出效率是获得良好 CO_2 固定化性能的关键条件。



铵盐(如 NH_4Cl)作为钢渣浸出剂具有较高的 Ca 选择浸出特性, 且 NH_4Cl 溶液可循环利用, 具体原理如公式(20)~公式(22)所示。研究表明, 循环浸出钢渣的次数是一个关键因素, 其直接影响到浸出效率和工艺的经济性。循环浸出过程中, 随着循环次数的增加, 循环溶液的新鲜度会迅速降低, 浸出率逐渐下降, 这与循环溶液 NH_3 的挥发和稳定有关。 NH_3 的挥发取决于温度、 pH 值和溶解物浓度, 这意味着在实际应用中, 需要对 NH_3 进行尾气吸收和回收利用, 并使用溶剂添加和定量的方法对氨进行补充。





综上所述，无论是弱酸试剂还是铵盐类试剂都能够有效浸出钢渣中的 Ca^{2+} ，相比之下醋酸对 Ca^{2+} 浸出效果更好，但酸试剂难于回收，而铵盐类试剂具有可再生循环利用的特性，使其拥有更大的经济价值，在工业化应用领域更具有优势[13]。

4. 挑战与展望

表 2 系统对比了钢渣直接干法、直接湿法和间接法碳捕集工艺的技术效果和技术瓶颈。从表中可知，钢渣碳捕集工艺的实际碳捕集量远低于钢渣的理论 CO_2 封存量。对于直接干法，为提高反应速率，高温或高压条件显著增加了能源消耗，并且碳酸化后的钢渣产物不纯，限制了其高值化利用[30] [31]。直接湿法工艺在一定程度上提高了反应速率和矿化效率，但仍存在耗时长和能耗高等问题，且大量水资源消耗导致较差的经济性，无法充分满足工业需求[32]-[34]。钢渣间接法碳捕集工艺被认为是实现钢渣与 CO_2 协同治理良好前景的工艺方法，选择铵盐做钢渣 Ca 选择性浸出剂，可得到纯度较高的 CaCO_3 产品，同时铵盐溶液在浸出过程中可以循环使用，减少了化学试剂的消耗与成本[35]。然而，当前研究中，铵盐浸出钢渣的工艺仍存在 Ca^{2+} 浸出率低和 NH_4Cl 循环利用效率有限的挑战。未来将铵盐浸出与其他技术(如超声波辅助、微波增强等)结合，以提高浸出效率和反应速率，但这也是非常耗能的[25]。

对于钢渣直接法碳捕集工艺，未来的研究应注重设计高效的热回收系统，利用反应热来预热进料或用于其他过程，降低整体能耗。与此同时，对于钢渣间接法碳捕集工艺，开发新型浸出剂，在实现 Ca^{2+} 选择性浸出的同时，提升 Ca^{2+} 的浸出率，进而提高钢渣碳捕集效率。另外，通过控制碳酸化反应条件(如添加剂、 CO_2 速率、温度)，生产不同晶型、粒径和纯度的高附加值碳酸钙(如针状、立方体纳米碳酸钙)产品，用于塑料、涂料、造纸等行业，可用产品收益抵消工艺成本。

Table 2. Technical effects and bottlenecks of direct dry, direct wet, and indirect carbon capture processes using steel slag
表 2. 钢渣直接干法、直接湿法和间接法碳捕集工艺的技术效果和技术瓶颈

碳捕集工艺	原料	反应条件				CO_2 理论捕集量 (g CO_2 /kg 渣)	碳捕集效率(%)	产物纯度	主要技术瓶颈	参考文献
		温度 (°C)	压力	反应时间	液固比					
直接干法	Ca: 35.3%; Mg: 0.52%	650	100% vol. CO_2 ; 20 bar	30 min	—	388	9	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	反应速率较慢，反应产物层(如碳酸盐)可能阻碍进一步反应，导致碳化效率较低，产物纯度难以提高	[30]
直接干法	Ca: 41.3%; Mg: 0.33%	650	100% vol. CO_2 ; 20 bar	30 min	—	454.3	26	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	反应速率较慢，反应产物层(如碳酸盐)可能阻碍进一步反应，导致碳化效率较低，产物纯度难以提高	[30]
直接干法	Ca: 42.25%; Mg: 8.0%	500	75% vol. CO_2 ; 20 bar	50min	—	464.8	18	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	反应速率较慢，反应产物层(如碳酸盐)可能阻碍进一步反应，导致碳化效率较低，产物纯度难以提高	[31]
直接湿法	CaO: 51.11%; MgO: 4.17%	60	100% vol. CO_2 ; 1 bar	60 min	10 mL/g	401.6	60	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	气-液-固三相间的传质效率较低，导致反应速率缓慢，产物纯度难以提高；产生大量废水，需额外处理以避免二次污染	[32]
直接湿法	CaO: 41.4%; MgO: 7.87%	100	250 kg/cm ³	24 h	5 g/g	325.3	56	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	反应速率缓慢，产物纯度难以提高；产生大量废水，需额外处理以避免二次污染	[33]
直接湿法	CaO: 42.23%; MgO: 9.15%	65	99.9% vol. CO_2 ; 1 bar	30 min	20 mL/g	331.8	67	碳酸化产物存在于未反应钢渣颗粒表面，纯度需进一步优化	反应速率缓慢，产物纯度难以提高；产生大量废水，需额外处理以避免二次污染	[34]

续表

间接法 (HCl 溶 液)	CaO: 47%; MgO: 3.9%	30	100% vol. CO ₂ ; 1 atm	1 h	50 g/L	369.3	73	[23]
间接法 (CH ₃ CO OH 溶液)	CaO: 38%; MgO: 6.01%	60 (微 波强 化)	20% vol. CO ₂	30 min	25 g/L	298.6	92	[25]
间接法 (NH ₄ Cl 溶液)	CaO: 44.5%; MgO: 4.17%	80	100% vol. CO ₂ ; 1 atm	120 min	—	349.6	37	[29]
间接法 (NH ₄ Cl 溶液)	CaO: 36%; MgO: 5.9%	53	100% vol. CO ₂	68 min	12 mL/g	282.9	51	[35]

间接法虽然在钙提取率和反应速率方面优于直接法，但其工艺复杂；间接法需要额外的溶剂和分离步骤，增加了工艺复杂性和成本

5. 结论

钢铁生产过程中 CO₂ 温室气体和钢渣的大量排放造成了严重的环境污染和资源浪费问题。钢渣碳捕集技术为钢铁行业提供了一条减少温室气体排放和优化钢渣资源利用的创新路径。本文系统介绍了钢渣的物理化学性质，综述了利用工业钢渣进行 CO₂ 矿物碳酸化的主要途径和机理。钢渣直接法碳捕集工艺受到气体扩散控制，具有较低的碳捕集率。然而，在高温冶金中，钢渣直接碳捕集工艺仍有很大的实用价值，因为高温烟气的存在不需要额外的热量补充。钢渣间接碳捕集工艺具有较高的钢渣浸出率和碳捕集率，且该工艺可生产出碳酸盐产品，仍然是一种有前景的钢渣碳化方法。未来的研究应该进一步综合评估钢渣间接碳捕集工艺的经济成本和环境效益。

基金项目

辽宁省教育厅 2024 年重点项目“面向 CO₂ 捕集的钢渣 Ca 组元强效增溶基础研究”(LJ212411430036); 辽宁科技学院(2024 年)博士科研启动基金项目“钢渣回收有价值元素的可持续工艺研究”(2407B12); 2025 年辽宁科技学院大学生创新创业训练计划项目“‘因废制宜’- 钢渣碳捕集制备超细粉体方解石”(202511430082); “百千万人才工程”培养经费资助; 辽宁省教育科学‘十四五’规划立项课题“应用型高校冶金专业的一流本科课程建设研究”(JG24DB285); 2024 辽宁科技学院教研课题“应用型高校冶金专业的一流本科课程建设研究”(LKJY202415); 2022 年辽宁科技学院教改项目“工程教育认证和新工科背景下冶金工程国家一流专业课程思政建设的研究与实践”。

参考文献

[1] World Steel Association (2021) Climate Change and the Production of Iron and Steel: An Industry View.

[2] Park, B. and Choi, Y.C. (2021) Investigation of Carbon-Capture Property of Foam Concrete Using Stainless Steel AOD Slag. *Journal of Cleaner Production*, **288**, Article 125621. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125621>

[3] 安胜利, 黄兰, 柴铁凡, 等. 钢渣处理技术及资源化利用研究进展[J]. 钢铁, 2025, 60(3): 1-12.

[4] Fernández-González, D., Prazuch, J., Ruiz-Bustinza, I., González-Gasca, C., Piñuela-Noval, J. and Verdeja, L.F. (2019) The Treatment of Basic Oxygen Furnace (BOF) Slag with Concentrated Solar Energy. *Solar Energy*, **180**, 372-382. <https://doi.org/10.1016/j.solener.2019.01.055>

[5] Waligora, J., Bulteel, D., Degrugilliers, P., Damidot, D., Potdevin, J.L. and Measson, M. (2010) Chemical and Mineralogical Characterizations of LD Converter Steel Slags: A Multi-Analytical Techniques Approach. *Materials Characterization*, **61**, 39-48. <https://doi.org/10.1016/j.matchar.2009.10.004>

[6] Renforth, P., Washbourne, C.-L., Taylder, J. and Manning, D.A.C. (2011) Silicate Production and Availability for Mineral

- Carbonation. *Environmental Science & Technology*, **45**, 2035-2041. <https://doi.org/10.1021/es103241w>
- [7] Guo, J., Bao, Y. and Wang, M. (2018) Steel Slag in China: Treatment, Recycling, and Management. *Waste Management*, **78**, 318-330. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.04.045>
- [8] Tian, S., Li, K., Jiang, J., Chen, X. and Yan, F. (2016) CO₂ Abatement from the Iron and Steel Industry Using a Combined Ca-Fe Chemical Loop. *Applied Energy*, **170**, 345-352. <https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2016.02.120>
- [9] 姚炜珊, 侯雅磊, 魏国强, 等. 二氧化碳资源化利用研究进展[J]. 新能源进展, 2024, 12(2): 182-192.
- [10] Kriskova, L., Pontikes, Y., Cizer, Ö., Mertens, G., Veulemans, W., Geysen, D., *et al.* (2021) Effect of Mechanical Activation on the Hydraulic Properties of Stainless Steel Slags. *Cement and Concrete Research*, **42**, 778-788. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2012.02.016>
- [11] Mustafa, J., Mourad, A.A.I., Al-Marzouqi, A.H. and El-Naas, M.H. (2020) Simultaneous Treatment of Reject Brine and Capture of Carbon Dioxide: A Comprehensive Review. *Desalination*, **483**, Article 114386. <https://doi.org/10.1016/j.desal.2020.114386>
- [12] Zhang, Y.Y., Yu, L.H., Cui, K.K., *et al.* (2023) Carbon Capture and Storage Technology by Steel-Making Slags: Recent Progress and Future Challenges. *Chemical Engineering Journal*, **455**, Article 140552. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.140552>
- [13] Zhao, Q., Liu, C., Mei, X., Saxén, H. and Zevenhoven, R. (2025) Research Progress of Steel Slag-Based Carbon Sequestration. *Fundamental Research*, **5**, 282-287. <https://doi.org/10.1016/j.fmre.2022.09.023>
- [14] Tian, S., Jiang, J., Li, K., Yan, F. and Chen, X. (2014) Performance of Steel Slag in Carbonation-Calination Looping for CO₂ Capture from Industrial Flue Gas. *RSC Advances*, **4**, 6858-6862. <https://doi.org/10.1039/c3ra47426g>
- [15] 刘军, 王泽培, 曹志众, 等. 钢渣在碳捕集领域的研究进展[J]. 烧结球团, 2024, 49(6): 11-34.
- [16] Su, T., Yang, H., Shau, Y., Takazawa, E. and Lee, Y. (2016) CO₂ Sequestration Utilizing Basic-Oxygen Furnace Slag: Controlling Factors, Reaction Mechanisms and V-Cr Concerns. *Journal of Environmental Sciences*, **41**, 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.06.012>
- [17] Yadav, S. and Mehra, A. (2017) Dissolution of Steel Slags in Aqueous Media. *Environmental Science and Pollution Research*, **24**, 16305-16315. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-9036-z>
- [18] Yang, Z., He, L., Gao, J., Liu, A. and Yu, B. (2012) Carbon Dioxide Utilization with C-N Bond Formation: Carbon Dioxide Capture and Subsequent Conversion. *Energy & Environmental Science*, **5**, 6602-6639. <https://doi.org/10.1039/c2ee02774g>
- [19] Santos, R.M., François, D., Mertens, G., Elsen, J. and Van Gerven, T. (2013) Ultrasound-Intensified Mineral Carbonation. *Applied Thermal Engineering*, **57**, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.035>
- [20] Li, N. and Unluer, C. (2023) A Comparative Study of Ethylenediamine Tetraacetic Acid Induced Gas-Solid and Liquid-Solid Accelerated Carbonation for Enhancement of Steel Slag Aggregates. *Construction and Building Materials*, **400**, Article 132539. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2023.132539>
- [21] Poletti, A., Pomi, R. and Stramazzo, A. (2016) Carbon Sequestration through Accelerated Carbonation of BOF Slag: Influence of Particle Size Characteristics. *Chemical Engineering Journal*, **298**, 26-35. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2016.04.015>
- [22] Santos, R.M., François, D., Mertens, G., Elsen, J. and Van Gerven, T. (2013) Ultrasound-Intensified Mineral Carbonation. *Applied Thermal Engineering*, **57**, 154-163. <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2012.03.035>
- [23] Jo, H., Lee, M., Park, J. and Jung, K. (2017) Preparation of High-Purity Nano-CaCO₃ from Steel Slag. *Energy*, **120**, 884-894. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2016.11.140>
- [24] Tian, S., Jiang, J., Hosseini, D., Kierzkowska, A.M., Imtiaz, Q., Broda, M., *et al.* (2015) Development of a Steel-Slag-Based, Iron-Functionalized Sorbent for an Autothermal Carbon Dioxide Capture Process. *ChemSusChem*, **8**, 3839-3846. <https://doi.org/10.1002/cssc.201501048>
- [25] Liu, L., Fan, X., Gan, M., Wei, J., Gao, Z., Sun, Z., *et al.* (2024) Microwave-Enhanced Selective Leaching Calcium from Steelmaking Slag to Fix CO₂ and Produce High Value-Added CaCO₃. *Separation and Purification Technology*, **330**, Article 125395. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2023.125395>
- [26] Tian, S., Jiang, J., Yan, F., Li, K., Chen, X. and Manovic, V. (2016) Highly Efficient CO₂ Capture with Simultaneous Iron and Cao Recycling for the Iron and Steel Industry. *Green Chemistry*, **18**, 4022-4031. <https://doi.org/10.1039/c6gc00400h>
- [27] Lee, Y.H., Eom, H., Lee, S.M. and Kim, S.S. (2021) Effects of pH and Metal Composition on Selective Extraction of Calcium from Steel Slag for Ca(OH)₂ Production. *RSC Advances*, **11**, 8306-8313. <https://doi.org/10.1039/d0ra08497b>
- [28] Wang, C.Y., Bao, W.J., Guo, Z.C., *et al.* (2018) Carbon Dioxide Sequestration via Steelmaking Slag Carbonation in Alkali Solutions: Experimental Investigation and Process Evaluation. *Acta Metallurgica Sinica (English Letters)*, **31**,

- 771-784. <https://doi.org/10.1007/s40195-017-0694-0>
- [29] Kodama, S., Nishimoto, T., Yamamoto, N., Yogo, K. and Yamada, K. (2008) Development of a New pH-Swing CO₂ Mineralization Process with a Recyclable Reaction Solution. *Energy*, **33**, 776-784. <https://doi.org/10.1016/j.energy.2008.01.005>
- [30] Santos, R.M., Ling, D., Sarvaramini, A., Guo, M., Elsen, J., Larachi, F., *et al.* (2012) Stabilization of Basic Oxygen Furnace Slag by Hot-Stage Carbonation Treatment. *Chemical Engineering Journal*, **203**, 239-250. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2012.06.155>
- [31] Yu, J. and Wang, K. (2011) Study on Characteristics of Steel Slag for CO₂ Capture. *Energy & Fuels*, **25**, 5483-5492. <https://doi.org/10.1021/ef2004255>
- [32] Chang, E.E., Chen, C.H., Chen, Y.H., *et al.* (2011) Performance Evaluation for Carbonation of Steel-Making Slags in a Slurry Reactor. *Journal of Hazardous Materials*, **186**, 558-564. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2010.11.038>
- [33] Su, T.H., Yang, H.J., Shau, Y.H., *et al.* (2016) CO₂ Sequestration Utilizing Basic-Oxygen Furnace Slag: Controlling Factors, Reaction Mechanisms and V-Cr Concerns. *Journal of Environmental Sciences*, **41**, 99-111. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2015.06.012>
- [34] Ukwattage, N.L., Ranjith, P.G. and Li, X. (2017) Steel-Making Slag for Mineral Sequestration of Carbon Dioxide by Accelerated Carbonation. *Measurement*, **97**, 15-22. <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2016.10.057>
- [35] Sun, Y., Zhang, J.P. and Zhang, L. (2016) NH₄Cl Selective Leaching of Basic Oxygen Furnace Slag: Optimization Study Using Response Surface Methodology. *Environmental Progress & Sustainable Energy*, **35**, 1387-1394. <https://doi.org/10.1002/ep.12365>