综述

钢渣碳酸化封存 CO_2 研究进展

孙健淇[1a]，尹子轩[1a]，王焱辉[1a]，王元柯[1a]，牛鸿竹[1]，朱 庆[1]，
朱祚峤[2]，谢振家[3]，牟望重[1b,4]

（1. 东北大学 a 冶金学院；b 材料电磁过程研究教育部重点实验室，辽宁 沈阳 110819；
2. 江苏（沙钢）钢铁研究院，江苏 张家港 215625；3. 北京科技大学 新金属材料全国重点实验室，北京 100083；
4. 瑞典皇家工学院 材料科学与工程系，瑞典 斯德哥尔摩 10044）

摘要：面对我国能源、资源、环境等压力日益突出的新形势，钢铁产业固废资源的高效利用是实现绿色可持续循环发展的关键环节。钢渣作为有战略回收价值的冶金副产物，其资源化利用备受关注。本文系统总结了钢渣的来源、性质及主要成分，综述其资源化利用现状；并重点围绕钢渣在碳酸化封存 CO_2 领域的研究展开系统阐述与分析，探讨后续产物的利用途径与潜在价值，剖析规模化应用中的关键科技挑战，进而提出对策建议，以期为钢铁工业固废资源化与“双碳”目标达成提供参考。

关键词：钢渣；双碳战略；CO_2 封存；矿物碳酸化

中图分类号：X757；TF09 **文献标志码**：A **文章编号**：1000－8764（2026）03－0001－13

doi：10.13403/j.sjqt.2026.03.041

Research progress on CO_2 storage by carbonation of steel slag

SUN Jianqi[1a], YIN Zixuan[1a], WANG Yanhui[1a], WANG Yuanke[1a], NIU Hongzhu[1],
ZHU Qing[1], ZHU Zuoqiao[2], XIE Zhenjia[3], MU Wangzhong[1b,4]

(1. Northeastern University a. School of Metallurgy; b. Key Laboratory of Electromagnetic Processing of Materials, Ministry of Education, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. Shagang Iron & Steel Research Institute of Jiangsu Province, Zhangjiagang 215625, Jiangsu, China; 3. State Key Laboratory for Advanced Metals and Materials, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 4. Department of Materials Science and Engineering, KTH Royal Institute of Technology, Stockholm 10044, Sweden)

Abstract: Facing increasingly prominent pressures on energy, resources, and environment in China, efficient utilization of solid waste resources in the steel industry is a key link to achieving green, sustainable, and circular development. As a metallurgical by-product with strategic recycling value, the resource utilization of steel slag has attracted much attention. The sources, properties, and main components of steel slag are systematically summarized, and its current status of resource utilization are reviewed; systematic explanation and analysis of steel slag in the field of carbonation and CO_2 storage are focused on, subsequent utilization pathways and potential value of products are explored, key technological challenges in large-scale applications are analyzed, and counter measures are proposed to provide references for resource utilization of solid waste in the steel industry and achieve the “dual carbon” goals.

Key words: steel slag; dual carbon strategy; CO_2 sequestration; mineral carbonation

收稿日期：2025－11－14；**修回日期**：2025－12－30

基金项目：新金属材料全国重点实验室－沙钢集团联合研发中心开放基金资助项目（2025SH-05）；东北大学基本科研业务费博士生科研创新项目（N25BSS074）；辽宁省大学生创新训练计划项目（S202510145197）

作者简介：孙健淇（2005—），男，本科在读，从事低碳智能化冶金研究。

通信作者：牟望重（1985—），男，教授，博士，从事低碳智能化冶金研究。

钢铁作为国民经济与国家发展的重要基础原材料，是现代产业体系中的重要支柱与根基所在。目前，全球粗钢产量已连续 7 年超过 18 亿 t，我国作为世界最大的钢铁生产国，粗钢产量也已连续 5 年超过 10 亿 t[1]。钢渣作为钢铁生产过程中的必要材料贯穿整个炼钢过程，并发挥着分离与吸收钢中有害杂质、净化钢液、富集钢中有益金属成分、防止钢液二次污染及减少钢液热损失等诸多作用。钢渣作为钢铁冶炼的副产物，其生成量约占钢产量的 15%～20%[2]。因此，我国每年产生的钢渣总量已接近 1 亿 t。但目前钢渣的综合利用率只有约 20%，大部分钢渣均以废渣的形式采用直接堆存或人工填埋的方式进行直接处理，这不仅导致大量土地资源被浪费，并且钢渣中的有害元素逐渐溶解和渗透到土壤与水源后还将对钢渣周围的环境与生态造成巨大威胁[3-4]。若能合理有效地利用钢渣作为固废资源，将在经济和环境两方面带来巨大收益。

碳酸化固定技术通过将 CO_2 转化为热力学稳定的碳酸盐，使其不易自发分解，因此被视为一种可靠且永久的碳封存方法。而钢渣由于冶炼所需含有大量 CaO、MgO 等碱性氧化物，若可将其作为矿物固碳的封存原料，预计每吨钢渣理论上可以吸收 150 kg 左右的 CO_2并转化成碳酸钙等稳定的盐类物质[5-6]。这不仅为钢渣的高价值利用提供了方案，同时通过矿化固定生产废气中的 CO_2，也为钢铁行业探索降碳减排提供了创新的技术解决方案。基于此，本文系统梳理了钢渣在碳酸化封存 CO_2方面的研究与前沿进展，并重点介绍了钢渣的碳酸化技术和产物应用，旨在探究钢渣在碳减排、高值化资源循环利用方面的潜力，剖析规模化应用中的关键科技挑战，进而提出对策建议，以期为钢铁工业固废资源化与“双碳”目标达成提供参考。

1 钢渣的来源、性质及组成

钢渣密度通常为 3.1～3.6 g/cm^3，具有良好的耐磨性。根据炼钢工艺的不同主要分为转炉渣（basic oxygen furnace slag，BOFS）、电弧炉渣（electric arc furnace slag，EAFS）、氩氧脱碳渣（argon oxygen decarburization furnace slag，AODS）和钢包精炼渣（ladle furnace slag，LFS）等（图 1）[5-7]。因为我国主要以转炉炼钢为主，因此其中转炉渣的产量最大，约占总量的 70%[7]。

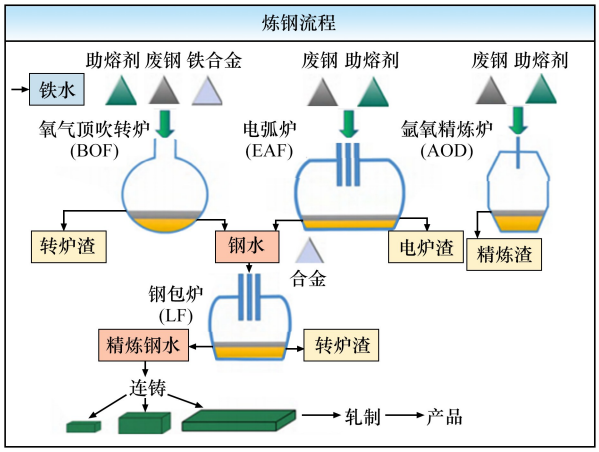


图 1 炼钢过程中产生的不同种类钢渣[8]

Fig. 1 Different steel slag produced during steelmaking process[8]

各类钢渣的物相组成较为复杂，主要受冶炼过程中的进料组分、冶炼方式以及冷却方式的影响[9]。表 1 列出了各类钢渣的典型物相组成。其中，转炉渣、氩氧脱碳渣以及钢包精炼渣的 CaO 含量较高，主要以硅酸二钙（C_2S）、硅酸三钙（C_3S）、铁酸二钙（C_2F）、RO 相（固体 CaO-FeO-MnO-MgO）以及游离氧化钙（*f*-CaO）的形式存在[10]。此外，钢渣中还存在少量铝酸盐（CA、C_3A、$C_{12}A_7$）以及游离氧化镁（*f*-MgO）[8]。在这些物相成分中，C_2S 和 C_3S 具备水硬胶凝活性，可与 CO_2 发生固化反应进一步用作辅助胶凝材料。而 *f*-CaO 和 *f*-MgO 因为水化滞后性，在与水或者水蒸气反应后易发生体积膨胀，从而导致材料开裂，因此被禁止作为混合材料用于通用硅酸盐水泥的生产，限制了其在建水泥行业的应用。钢渣的活性主要与其碱度 $R[R = w(CaO)/w(SiO_2 + P_2O_5)]$ 有关，碱度越高，活性越大，且钢渣的表观颜色也受碱度影响，高碱度钢渣通常呈现褐灰色，低碱度钢渣呈灰色[11-12]。

2 钢渣资源化利用研究现状

钢渣在利用前需要进行预处理，不同的预处

表 1　典型钢渣的主要化学成分(质量分数)

Table 1　Main chemical composition of steel slag　　%

钢渣种类	CaO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	FeO	Fe_2O_3	P_2O_5	Cr_2O_3	参考文献
转炉渣	50.26	13.07	2.75	1.57	—	25.73	1.32	0.22	[13]
	47.90	12.20	1.20	0.80	—	—	0.37	—	[14]
	47.70	13.30	3.00	6.40	—	24.40	1.47	—	[15]
	45.00	11.10	1.90	9.60	10.70	10.90	—	—	[16]
	39.08	12.47	6.87	10.57	—	19.48	—	—	[17]
	42.60	10.75	3.73	5.01	—	24.23	2.36	—	[18]
	42.80	16.20	3.60	6.10	—	22.50	—	—	[19]
电弧炉渣	35.23	9.41	10.78	9.77	—	24.22	—	—	[17]
	35.50	32.20	6.70	5.20	3.30	20.30	—	—	[16]
	35.90	21.90	6.80	4.70	—	23.10	—	—	[19]
	24.40 ~ 29.10	6.04 ~ 15.40	12.20 ~ 14.10	2.90 ~ 3.40	27.40 ~ 34.40	—	1.20	0.70 ~ 0.90	[20]
氩氧脱碳渣	54.30	17.70	6.40	3.00	—	9.20	—	2.80	[10]
	54.80	32.50	1.40	9.00	—	0.25	—	0.76	[21]
	55.90	24.67	1.07	5.85	1.15	—	—	0.51	[22]
	58.40	26.40	2.10	2.10	0.20	—	—	0.30	[23]
	55.60	31.70	1.20	9.80	—	—	—	0.30	[24]
钢包精炼渣	65.23	12.35	16.55	3.93	—	0.79	—	—	[17]
	51.50	28.30	1.20	11.30	—	—	—	3.90	[24]
	55.90 ~ 57.00	26.40 ~ 26.90	4.30 ~ 5.20	3.20 ~ 4.20	—	1.00 ~ 1.60	—	—	[25]
	50.50 ~ 57.50	12.60 ~ 19.80	4.30 ~ 18.60	7.50 ~ 11.90	—	1.60 ~ 3.30	—	—	[26]

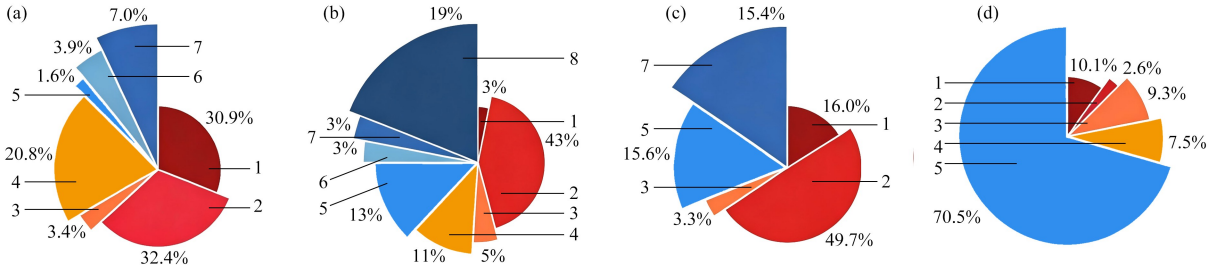
理方式会影响其粒度、物相组成、活性和碱度等，从而进一步影响后续的用途。目前对钢渣的预处理主要有热闷法、热泼法、水淬法、滚筒法和风淬法等[27]。我国主要采用热泼法和热闷法来处理钢渣，这两种方法用途广泛，成本低，处理率高。国外主要采用加压蒸汽老化法，产出稳定性高、粒度小而均匀的钢渣[28]。资源化利用方面，钢渣作为被“放错位置”的工业固废，其利用可分为钢厂内循环和厂外利用两大方面。

当前发达国家的钢渣综合利用率超过 90%，而我国钢渣产量庞大，利用率却远低于发达国家，只有约 20%[4]。不同国家对钢渣的利用情况如图 2 所示。由图 2 可知，日本、欧盟和美国主要将钢渣应用于道路建设以及土木工程，同时还应用于钢厂的内部循环、农业、水泥制造等。而我国大部分的钢渣主要是就地掩埋或露天堆放、丢弃，不仅占用大量土地还会使其中含有的重金属元素渗入土壤和水体，对生态环境及人类健康构成威胁[4]。同时，由于随意露天堆放或在处理运输过程中操作不当，还会产生大量粉尘，严重危害大气环境和人体健康。因此，鉴于我国钢渣产量持续攀升，亟需高度重视钢渣的资源化利用。

2.1　钢厂内循环

(1) 铁的回收。钢渣中通常含有部分单质铁以及铁氧化物，占到总质量分数的 20% ~ 30%，因此是可回收的含铁资源，部分企业利用钢渣中铁的磁性特征，采用磁选分离回收其中的铁，可达到 80% 的回收率[29-30]。但限制于含铁量有限，仍有大量钢渣由于回收成本问题被搁置，无法被长期利用。

(2) 冶炼熔剂替代。钢渣中富含 Ca、Mg、Fe、Mn 等元素，可作为烧结过程的增强剂，同时



（a）日本；（b）欧盟；（c）美国；（d）中国

1—土木工程；2—道路建设；3—水泥生产；4—内循环；5—丢弃、填埋；6—农业领域；7—其他；8—暂存。

图 2 不同国家的钢渣利用情况[4]

Fig. 2 Utilization status of steel slag in different countries[4]

其中的 CaO、MgO 可替代石灰石与白云石，降低烧结环节的成本[31]。此外，钢渣中含有的 MgO、MnO 使其具备替代高炉熔剂的作用，在改善高炉渣的流动性的同时还可提高铁水的含 Mn 量，降低生产炼铁环节的成本[32]。

2.2 厂外利用

（1）建筑材料领域：钢渣因含有 C_2S、C_3S 等矿物相，具有作为辅助胶凝材料的潜力。研究表明，可将其作为混凝土添加剂，但需要通过自然时效或加速碳酸化等方法进行稳定化处理，以克服 *f*-CaO、*f*-MgO 等物相可能造成的体积膨胀问题[33-34]。此外，其高强度、稳定性等特性使其成为土木工程中的理想材料。

（2）农业领域应用：钢渣富含 Ca、Si、Fe 等元素，可作为农业肥料和土壤改良剂。其中，Ca 元素可促进作物生根和增产，Fe、Si 元素有助于提高作物代谢和抗病能力，微量的 P、Cu、Mn 元素则能改善土壤理化性质[35-36]。经高温煅烧后，钢渣中元素的溶解度显著提高，进一步增强了其在农业领域的应用价值[37]。

（3）道路建设应用：钢渣具备优异的耐磨性，非常适合作为道路基层和回填材料。在欧美发达国家，尤其是德国和美国，钢渣在道路建设中的利用率较高，已成为重要的基础设施建设材料。相比之下，中国在这一领域的利用水平仍然较低，存在巨大的发展空间[38]。

除了上述应用以外，还有研究利用钢渣作为原料制备微晶玻璃[39]。这些应用虽然可实现钢渣的高值化利用但是市场竞争力弱。近年来，以钢渣作为碳捕集材料被认为是一种很有前途的技术，由于钢渣中含有大量的碱金属氧化物，它可以通过生成碳酸盐的形式捕获和储存 CO_2，以防止大量 CO_2 排放到大气中[40]。此外，钢渣碳化可以解决体积稳定性差和重金属离子浸出的问题。综上所述，钢渣在 CO_2 封存方面具有很大的潜力，可以达到以废治废的目的。

3 钢渣碳酸化捕集 CO_2 研究现状

目前，钢渣固碳技术主要分为直接碳捕集和间接碳捕集两类[41]。直接碳捕集法依据反应体系不同又可分为直接气相碳化、直接液相碳化法，表 2 总结了钢渣通过不同碳化法实现固定 CO_2 的情况[42]。

3.1 钢渣直接碳捕集技术

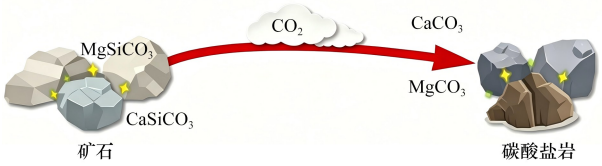
钢渣直接碳捕集是 CO_2 直接与钢渣反应生成稳定碳酸盐的过程，是受矿石自然风化过程启发而来(图 3)，已经成为固废碳化技术中最具工业化潜力的途径之一[53]。由于钢渣中富含 CaO、MgO 等强碱性氧化物，可与大气或者工业废气中的 CO_2 反应生成热力学稳定的 $CaCO_3$、$MgCO_3$ 等碳酸盐矿物，因此该技术在 CCUS 体系中具有独特优势，可实现钢厂原位的以废治废。

在直接气相碳化过程中，CO_2 以气态形式与固体钢渣颗粒直接反应，生成固态碳酸盐产物(图 4)[54-55]。其反应机理通常经历 3 个阶段：首先为 CO_2 在钢渣颗粒表面的快速化学吸附与反应阶段，其次是碳酸盐产物层逐渐形成并控制后续扩散的中间阶段，最后为反应趋缓阶段。由于最终阶段受产物层扩散限制，反应速率显著降低。研究表明，直接气相碳化的速率受反应温度、CO_2

表 2　不同碳捕集法下的钢渣碳酸化效果

Table 2　Carbonation effectiveness of steel slag under different carbon capture methods

碳化方法	钢渣类型	成分(质量分数)/%	碳酸化工艺参数								参考文献
			试剂	粒度/μm	温度/℃	压强/Pa	时间/min	液固比/(mL·g^{-1})	搅拌速度/(r·min^{-1})	固碳量/(g·kg^{-1})	
直接气相法	BOF	CaO(39.68) MgO(10.05)	—	< 74	600	—	60	—	—	88.5	[43]
	EAF	CaO(30.48) MgO(4.93)	—	100 ~ 125	500	3	50	—	—	—	[44]
	AOD	CaO(54.30) MgO(9.20)	—	—	20	—	40 320	—	—	180.0	[45]
直接液相法	BOF	CaO(43.00) MgO(5.70)	—	—	60	—	—	20	—	215.0	[46]
	EAF	CaO(49.30) MgO(4.10)	—	< 150	100	10	1 440	5	—	280.0	[47]
	AOD	CaO(54.50) MgO(8.00)	—	10 ~ 200	80	8	900	0.15	—	8.1	[47]
	LF	CaO(51.86) MgO(5.92)	—	< 88	20	1	—	5	700	177.0	[48]
间接碳化法	BOF	CaO(36.60)	HNO_3, NaOH	2 000 ~ 3 300	90	0.2	2 880	10	—	15.0	[49]
	EAF	CaO(39.04) MgO(8.79)	NH_4CL	54 ~ 74	60	—	—	—	20	—	[50]
	AOD	CaO(69.4) MgO(6.51)	—	—	—	—	—	—	—	—	[51]
	LF	CaO(35.18) MgO(6.62)	冷轧废水	—	—	—	60	20	—	183.0	[52]



$(Ca, Mg)SiO_3(s) + CO_2(g) \rightarrow (Ca, Mg)CO_3(s) + SiO_2(g)$

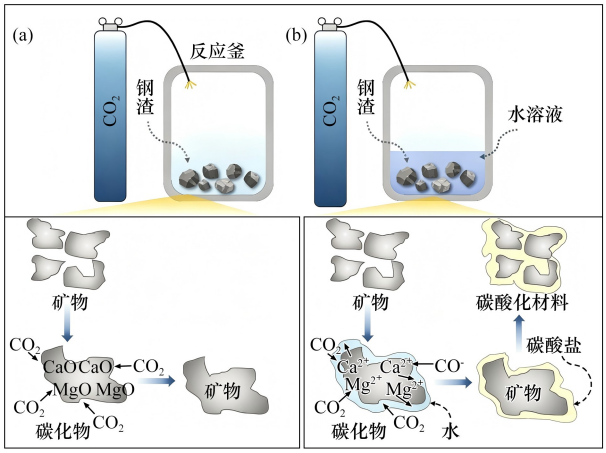
图 3　矿石风化自然过程及反应机理

Fig. 3　Natural weathering process of ores and the reaction mechanism

分压、钢渣的矿相结构等因素显著影响。在常压条件下，该过程的动力学受限，通常需在较高温度(400 ~ 600 ℃)及高压 CO_2 环境下才能获得较高碳化率。例如，张亚朋等[55]在 530 ℃下通入 15% CO_2 气体对钢渣进行干法固碳，其最大碳封存量仅为 70.78 mg/g，反应受限于 CO_2 扩散及碳酸盐产物层的阻滞效应。WANG 等[56]、BOBICKI 等[57]进一步证实，钢渣中的硅酸钙(Ca_2SiO_4)与硅酸镁相(Mg_2SiO_4)均可发生碳化反应，但需在较高 CO_2 分压下才能维持有效速率。总体而言，气固碳化工艺简便、能耗低，但受限于传质阻力和反应动力学，其 CO_2 捕集效率与转化率普遍较低。为克服扩散控制的限制，研究者尝试通过机械活化、超声辅助或纳米粉化等方法增强反应界面的活性。SANTOS[21]等发现，提高钢渣比表面积可显著提升 CO_2 扩散效率与反应速率。

相比之下，直接液相碳化法引入液相介质(水或含水溶液)，通过 CO_2 在液相中的溶解及电离反应实现碳酸根(CO_3^{2-})的生成，并与钢渣中溶出的 Ca^{2+}、Mg^{2+} 反应形成碳酸盐(图 4)。其基本过程包括：CO_2 溶于水生成碳酸(H_2CO_3)，随后电离为 HCO_3^- 与 CO_3^{2-} 离子（式 1），H^+ 促进钢渣中 Ca^{2+}、

Mg^{2+}的溶出(式 2)，最终 Ca^{2+}、Mg^{2+}与 CO_3^{2-}结合生成相应的碳酸盐沉淀(式 3)。这一过程属于三相体系反应，受到液固比、pH、温度、CO_2压强、反应时间等多因素耦合影响。相较直接气相碳化法，气－液－固三相下的碳化可显著加快反应速率，在较低温压条件下即可实现较高的 CO_2转化率。例如，王秋华等[58]在固液比为 9%、反应温度为 100 ℃、CO_2压强为 0.4 MPa、反应时间为 60 min 条件下，钢渣固碳率达 119.1 mg/g，产物主要为方解石型 $CaCO_3$。BACIOCCHI 等[59]也报道，在液相碳化中适当提高温度与 CO_2压强可使碳化效率提升至 300 mg/g。与直接气相法相比，直接液相碳化法因 CO_2在液相中的高溶解度与 Ca^{2+}迁移率，能显著减轻扩散控制问题，因此被认为是最具实用前景的直接固碳技术。



(a) 直接气相碳化法；(b) 直接液相碳化法

图 4 钢渣直接碳酸化反应过程

Fig. 4 Direct carbonation process of steel slag

$$CO_2(g) + H_2O(l) \rightarrow H_2CO_3(aq) \rightarrow H^+(aq) + HCO_3^-(aq) \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + 2\,H^+(aq) \quad (1)$$

$$CaSiO_3(s) + 2\,H^+(aq) \rightarrow Ca^{2+}(aq) + SiO_2(s) + H_2O(l)\ (\text{以}CaSiO_3\ \text{为例}) \quad (2)$$

$$(Ca/Mg)^{2+}(aq) + CO_3^{2-}(aq) \rightarrow (Ca/Mg)CO_3\downarrow(s) \quad (3)$$

此外，钢渣中不同矿相对反应速率差异明显。氧化钙(CaO)碳化速率快，数小时内即可完成；而氧化镁(MgO)与硅酸盐矿物的反应速率较低。对于非水硬性硅酸钙(γ-Ca_2SiO_4)，碳化过程中不会形成水化产物，水仅作为 CO_2溶解的介质。而对于水硬性硅酸钙(Ca_3SiO_5)，碳化反应与水化反应交织进行，形成 C-S-H 和 $Ca(OH)_2$中间产物，再进一步碳化为 $CaCO_3$。尽管 $Ca(OH)_2$初期反应速率较快，但在长期碳化过程中，硅酸钙水合物的碳化反应将逐渐占主导地位。研究表明，产物层形成后的离子扩散是碳化速率的关键限制环节[60]。因此，如何通过调控反应参数或改性钢渣结构以减轻产物层钝化效应，成为当前研究重点。近年来，研究者尝试引入超声辅助碳化、复合煅烧－活化工艺及水热－循环碳化技术等新方法以增强钢渣碳化反应。超声可破坏钢渣颗粒表面疏松的钝化层并加速 Ca^{2+}浸出，碳固化率较传统搅拌条件下可提升 42.9%[61]。此外，沸石掺杂或矿物相调控也能通过火山灰效应促进碳化反应[62]。

总体而言，直接碳捕集技术具有工艺简便、能耗低、环境兼容性好等优点，适合在钢铁冶炼废渣原位或近源应用中推广。然而，直接气相碳化法受限于反应动力学与传质阻力，碳化率较低；而直接液相碳化法虽能显著提升碳封存效率，但需控制浆料 pH 与 $CaCO_3$沉积速率以防形成钝化产物层。未来研究应从反应动力学建模、过程强化及多阶段耦合优化等方面入手，实现钢渣碳化过程的可控性与工业规模化。

3.2 钢渣间接碳捕集技术

钢渣间接碳捕集如图 5 所示。由图 5 可知，与直接碳化不同，钢渣间接碳捕集技术一般采用“两步反应”机制，即先通过浸出剂(酸、碱或铵盐溶液)将钢渣中的碱性金属离子(主要为 Ca^{2+}、Mg^{2+})选择性溶出，再通入 CO_2使其与溶液中的碱性离子反应生成高纯度碳酸盐，反应方程式见式(4)～(6)。该技术通过液相分离反应克服了固相界面传质受限的问题，能显著提高 CO_2利用率与碳酸盐产物纯度。由于反应在液相体系中进行，其碳化速率主要受限于浸出反应的动力学与溶解平衡。钢渣中可溶性 CaO、MgO 含量、矿物相结构及浸出剂种类是影响反应效果的关键因素[58]。

$$(Ca,Mg)_xSi_yO_{x+2y+z}H_{2z}(s) + 2x\,H^+(aq) \rightarrow x\,Ca^{2+}/Mg^{2+}(aq) + y\,SiO_2(s) + (x+z)\,H_2O(l) \quad (4)$$

$$CO_2(g) + 2\,OH^-(aq) \rightarrow CO_3^{2-}(aq) + H_2O(l) \quad (5)$$

$$CO_3^{2-}(aq) + (Ca/Mg)^{2+}(aq) \rightarrow (Ca/Mg)CO_3 \downarrow (s) \quad (6)$$

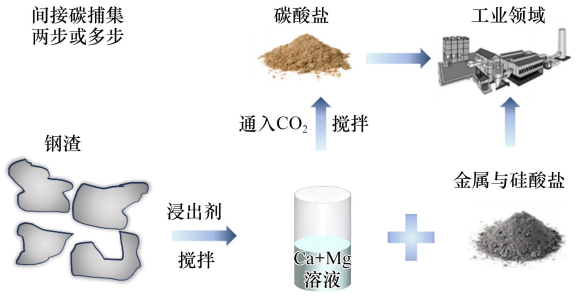


图 5　钢渣间接碳捕集示意[63]

Fig. 5　Schematic diagram of indirect carbon capture by steel slag

在酸浸体系中，如盐酸、乙酸、草酸、氨基酸等均能有效浸出 Ca^{2+}。秦松等[64]采用 1.5 mol/L HCl 溶液在 85 ℃下浸出钢渣，Ca 浸出率高达 90.51%，随后通入 CO_2 生成 $CaCO_3$，产物纯度达 96.04%，Ca 转化率为 83.96%。JO 等[65]进一步通过 NaOH 调节 pH，将浸出液中 Ca^{2+} 转化为 $Ca(OH)_2$，再经 CO_2 碳化制备出纯度高达 98.5% 的纳米碳酸钙粉体。该类方法可制得高附加值的纳米 $CaCO_3$ 产品，具有显著经济潜力。然而，酸浸体系的腐蚀性及后续液体中和处理增加了工艺复杂度和成本。为改善经济性，研究者探索使用铵盐体系（如 NH_4Cl、NH_4NO_3）作为可循环浸出剂，其优势在于浸出效率高、腐蚀性低、易回收再生，可在较温和条件下实现高 Ca^{2+} 溶出率[66]。

相较之下，碱性浸出体系的应用较少，但在特定条件下亦能实现有效固碳。例如，采用 NaOH 或 Na_2CO_3 可促进钢渣中 SiO_4^{4-} 结构断裂，释放 Ca^{2+} 并与 CO_2 反应生成碳酸盐。REN 等[67]通过水热法改性 $\beta-Ca_2SiO_4$，显著提高其比表面积与反应活性，碳化效率较传统煅烧法提升约 3.7 倍。从热力学角度看，间接碳化反应均为放热自发过程，$\Delta G<0$，表明碳酸盐生成在常温常压下即可进行[68]。但由于涉及多步传质与化学平衡，其速率控制步骤通常在于金属离子溶解与碳酸盐成核沉淀阶段。为优化反应路径，研究学者们提出了多种过程强化策略，如超临界 CO_2 浸出－碳化、液膜反应器、循环溶剂再生等技术，这些新方案能有效提升 CO_2 利用率与碳酸盐产物纯度[61-66]。

间接碳捕集的一大优势是可实现产物的高附加值化利用。碳化生成的高纯 $CaCO_3$ 可作为造纸、橡胶、涂料及医药行业的重要填料；$MgCO_3$ 可应用于阻燃剂与医用材料领域。同时，浸出残渣中的硅酸盐矿物仍可用于建材制备，实现钢渣的多途径资源化利用。已有研究表明，经间接碳化后所得 $CaCO_3$ 纯度可达 95%~99%，明显优于直接碳化所得混合相碳酸盐[64-65]。然而，该技术仍存在成本高、工艺复杂、反应设备要求高等问题，尚难以实现大规模工业化。其主要经济瓶颈在于浸出剂的消耗、再生成本以及液固分离环节的能耗。

总体而言如表 3 所示，直接与间接碳捕集各具优缺点：前者工艺简单、成本低，但固碳率有限；后者产物纯度高、经济附加值大，但工艺步骤长、能耗与成本较高。未来钢渣固碳研究的重点应在于强化固碳率以及多手段协同优化上。此外，结合机器学习与反应动力学建模，可实现钢渣成分－工艺参数－碳化性能的智能预测与过程优化[69]，为钢渣固碳技术的规模化、经济化应用奠定基础。综上，钢渣固碳作为 CO_2 资源化与碳中和体系的重要组成部分，仍需在反应机制、过程强化及产物资源化路径上持续深化研究，以实现低成本、高效率与可持续发展的目标。

表 3　典型钢渣固碳技术对比

Table 3　Comparison of typical carbonation technologies of steel slag

技术种类	优点	缺点
直接气相碳化法	操作简单;成本低	碳酸化率低,反应条件苛刻
直接液相碳化法	在常温常压下可以实现较高的碳酸化率	需要耗费大量水;产生的废水如果处理不当会造成新的污染
间接碳化法	在常温常压下可实现较高的碳酸化率;可以产生具有高附加值的 $CaCO_3$ 产品	需要额外消耗化学试剂,工艺复杂;需要考虑化学试剂的最终处置问题;化学试剂具有腐蚀作用,会缩短装置寿命

4　碳酸化钢渣资源利用现状

目前，除了研究钢渣的碳捕集技术外，越来越多的研究者开始关注碳酸化钢渣的应用，并积

极开展了高附加值的副产物探索路径。目前应用主要集中于以下3个方面。

4.1 建材领域

碳酸化钢渣最典型应用是作为碳化骨料或掺合料，用于制备混凝土、砂浆及预制构件[70]。钢渣经碳化后，其内部活性CaO和MgO生成碳酸盐晶体，不仅能够实现CO_2固定，同时还显著提升了力学性能与体积稳定性。大量实验证据表明，碳化处理可显著提升钢渣混凝土的早期强度。例如，HE等[71]报道在掺入15%碳酸化钢渣、水胶比为0.2的体系中，3 d抗压强度可提升47.2%，孔隙率明显降低；GAO等[72]发现，在45%和60%替代率下，钢渣混凝土抗压强度较未掺杂体系分别提高6.8%和1.3%。研究还表明，碳化处理下的钢渣混凝土抗压强度可达到常规养护28 d强度的4~5倍，说明其颇具应用潜力[73]。此外，钢渣碳化骨料替代天然砂可获得36~45 MPa的抗压水平，且体积稳定性和耐久性均显著改善[74]。除了替代混凝土原料外，碳酸化钢渣还可应用于制砖、板材、砌块及轻质结构件领域，兼具结构功能与碳封存作用。钢渣中的CaO和MgO在碳化反应中会生成$CaCO_3$晶体填充孔隙、提高致密度，从而显著改善制品力学性能。XU等[75]研究表明，以碳酸化钢渣取代部分水泥制备板材，抗压强度达到20~50 MPa，可满足建筑结构与道路铺装的要求。此外，钢渣制砖和装配式构件在60 ℃、0.1 MPa CO_2条件下养护，可在短时间内获得高致密度和高强度结构，同时减少了传统烧结过程的能源消耗[76]。这些结果表明，碳酸化钢渣在混凝土制材料与结构建材中具有实际应用的可行性，可兼顾碳减排与材料性能优化。

4.2 高附加值碳酸钙材料

利用钢渣制备高纯度、特定形貌的碳酸钙是实现高值化资源利用的重要方向。通过间接浸出-气体碳化工艺，可将钢渣中的Ca^{2+}选择性提取并转化为高纯度的碳酸钙固体。JO等[65]采用稀酸浸出和CO_2气体碳化法，制备得到粒径为80~120 nm、纯度为98.5 %的纳米$CaCO_3$；LIU等[77]在10 kg级的小型试验中，以20 kg钢渣获得约10 kg $CaCO_3$，纯度达到了99.5%，具备进一步放大化应用的潜力；ZHAO等[78]的研究指出，采用0.5 mol/L HCl浸出体系时，Ca^{2+}转化率约74%，最终产物碳酸钙纯度可达98.5%~99.8%。此外，通过调控反应参数可获得不同晶型的碳酸钙产物，如方解石、文石和球霰石，分别呈现不同的形貌，可满足橡胶、涂料、造纸、塑料、医药及光学材料领域的应用需求。能耗分析显示，间接浸出-碳化体系生产1 t $CaCO_3$的能耗约916~1 460 kW·h，具备与工业合成碳酸钙相当的经济性[65]。部分研究还指出，每吨钢渣可转化为159 kg $CaCO_3$，等效封存70 kg CO_2[79]。由此可见，钢渣碳化不仅具有碳减排效益，更能转化为市场需求量大、经济附加值高的精细化工产品，为“工业废弃物-资源化-产品化”的闭环提供技术基础。

4.3 环境修复领域

除建筑与材料领域外，碳酸化钢渣还在环境治理、废水处理及土壤修复等方向展现出潜在应用前景。钢渣本身富含Ca、Fe、Si等元素，碳酸化产物具有较强的吸附与共沉淀能力，可用于捕获重金属离子、降低浸出毒性。ZHAO等[80]通过酸浸-碳酸化联合处理发现，Cr、Ni等金属元素可转化为尖晶石型稳定相，浸出液金属质量分数降低60%~90%，显著改善环境安全性。部分研究还指出，碳酸化钢渣粉体在土壤中具有缓释碱性和改良酸化土壤的作用，同时可作为吸附剂吸附去除废水中的P和As离子，实现“碳封存-污染控制”双重功能[77]。与传统化学稳定剂相比，碳酸化钢渣来源广泛、成本低廉，且其产物为环境惰性的碳酸盐，更易实现安全处置、保持长期稳定。未来，若结合循环水系统和固化反应器设计，钢渣可在工业废水治理及CO_2封存耦合工艺中发挥更大作用，成为面向“双碳目标”的资源化利用储备材料。

5 当前难题与挑战

尽管钢渣作为一种高碱性工业固废在CO_2矿物封存以及再利用领域显示出极大的应用潜力，但目前向工业化转化过程中仍面临重重难题与挑战。首先，碳化反应速率与碳酸钙/镁物相转化率普遍偏低，是制约规模化应用的核心瓶颈。钢渣

中 Ca^{2+}/Mg^{2+} 的溶出、CO_2 在液相或气相的扩散以及碳酸盐产物层的钝化效应，常常成为反应的速率控制步骤。已有研究报告通过收缩核模型指出碳酸盐产物层扩散是限制反应速率的原因之一[81]。此外，钢渣作为组成复杂、粒度分布不均的固体废弃物，其表面活性、矿物分布不均性、复杂的孔隙结构等都会对固碳速率造成严重扰动，给动力学模型的建立带来困难。RAGIPANI 等[81]研究指出，对钢渣的溶解和碳化动力学进行准确建模仍是一个待探明的过程，尤其需兼顾矿物组分竞争溶解、体系电荷平衡、产物层钝化等多方面因素。

其次，能耗大、工艺成本高也是钢渣固碳扩大化应用所面临的另一难题。当前许多现有研究停留在小尺度、实验室规模下，通常还借助研磨活化、加热、加压、超声辅助或添加催化剂等措施来提升固碳反应活性，这些额外的处理都会增加能耗和设备投资[61]。DIGIOVANNI 等[82]研究人员指出，不同于小规模的实验，放大过程中传质与传热的不均匀性可能导致低活性反应区，引起产物沉积堵塞、传质失调，进而降低反应效率和产物质量，因此放大反应器设计、强化传质与传热是当前扩大化应用亟待攻克的难题。

最后，从整体技术评价来看，目前对钢渣固碳链的生命周期评估(LCA)和经济性分析尚不充分。部分研究虽然做了初步的成本估算，但尚未深入到水足迹、资本折旧、溶剂回收损耗、环境风险(如重金属浸出、废水处理)等全流程考量，难以为实际应用的评估提供系统性支撑[83-84]。此外，面对大规模应用的阻碍，已经有部分院校研究人员与企业合作，开展了一定规模的现场试验，但目前真正落地的实际案例仍然较少。因此，为了实现钢渣的真正固碳资源化利用，仍需要业界各学科以工程为导向的攻关。

6　结论与展望

本文系统回顾了钢渣的现状、碳酸化反应机理、过程特征及产物应用，介绍了钢渣封存 CO_2 的关键技术路线以及研究进展。研究表明，钢渣中富含的 CaO、MgO 等碱性氧化物可与 CO_2 反应生成稳定的碳酸盐，实现长期碳固定。通过对比不同碳化路径可知，直接碳酸化工艺流程简便、设备要求低，适用于工程化试验，但反应速率与完全度仍有限；间接碳酸化虽能获得高纯度 $CaCO_3$ 产品，但其溶剂消耗和再生问题尚未解决。近年来，超声辅助、微波强化、流化床与电化学矿化等新型耦合技术的引入显著改善了传质与反应速率，为钢渣固碳提供了新的研究思路和工艺基础。总体而言，钢渣固碳不仅可实现 CO_2 的永久封存，还可生成具有经济价值的碳酸化副产物，为钢铁工业废渣减量化和碳减排提供了技术支撑。

展望未来，钢渣碳酸化技术的发展需在深度机理解析、工艺优化与应用落地等方面取得突破。首先，应深入研究钢渣碳酸化过程的动力学与传质控制机制，揭示不同矿相的反应活性与表面的钝化特征，为固碳反应速率提升与工艺设计提供理论依据。其次，应在低能耗、高效率方向优化碳化工艺，开发绿色、环境友好的反应体系，构建高效、可持续的固碳流程。与此同时，应全面考虑扩大化应用过程中所面临的问题，针对性完善优化，构建碳化产物的质量标准及环境安全评价体系，并结合生命周期分析(LCA)与技术经济评估(TEA)，系统量化钢渣固碳的碳减排效益与经济可行性。此外，钢渣固碳的真正落地，还需要产学研深度合作，推动钢渣由固废向碳减排资源的绿色转化，实现钢铁工业的低碳转型和循环经济的可持续发展。

参考文献：

[1] 罗忠河．连续 5 年超 10 亿吨！2024 年我国产钢 10.05 亿吨[N]．中国冶金报，2025-01-21(1).
LUO Zhonghe. China's steel output exceeds 1 billion tons for 5 consecutive years! China produced 1.05 billion tons of steel in 2024[N]. China Metallurgical News, 2025-01-21(1).

[2] LI L F, LING T C, PAN S Y. Environmental benefit assessment of steel slag utilization and carbonation: A systematic review[J]. Science of the Total Environment, 2022, 806: 150280.

[3] YI H, XU G P, CHENG H G, et al. An overview of utilization of steel slag[J]. Procedia Environmental

Sciences,2012,16:791 – 801.

[4] GUO J L, BAO Y P, WANG M. Steel slag in China: Treatment, recycling, and management[J]. Waste Management,2018,78:318 – 330.

[5] 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 – 20.
LIU Jun, WANG Zepei, CAO Zhizhong, et al. Research progress of steel slag in field of carbon capture[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(6):11 – 20.

[6] 戴雅君. 钢渣同步脱硫固碳及其制备建筑胶凝材料[D]. 昆明:昆明理工大学,2024.
DAI Yajun. Synchronous desulfurization and carbon fixation of steel slag and its preparation of building cementitious materials[D]. Kunming: Kunming University of Science and Technology,2024.

[7] 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.
LIU Wenhao, CHEN Qingcai, XU Tengfei. Research progress of carbon sequestration technology of steel slag under the background of dual carbon strategy[J]. Environmental Engineering,2024,42(5):172 – 182.

[8] WANG Y J,TAO M J,LI J G,et al. A review of use of metallurgical slag for its carbonation products:Processes, crystallization behavior, and application status[J]. Journal of Iron and Steel Research International,2023,30(12):2341 – 2365.

[9] WANG S P,WANG M D,LIU F,et al. A review on the carbonation of steel slag: Properties, mechanism, and application[J]. Materials,2024,17(9):2066.

[10] PARK B, CHOI Y C. Investigation of carbon-capture property of foam concrete using stainless steel AOD slag [J]. Journal of Cleaner Production,2021,288:125621.

[11] 张凯. 模拟热态钢渣直接熔制微晶玻璃晶化规律研究[D]. 武汉:华中科技大学,2012.
ZHANG Kai. Study on cystallization behavior of glass-ceramics derived from simulated molten-steel-slag[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology, 2012.

[12] 王新凤. 钢渣处理与综合利用探析[J]. 低碳世界,2021,11(6):305 – 306.
WANG Xinfeng. Discussion on treatment and comprehensive utilization of steel slag[J]. Low Carbon World,2021,11(6):305 – 306.

[13] FERNÁNDEZ- GONZÁLEZ D, PRAZUCH J, RUIZ-BUSTINZA I, et al. The treatment of Basic Oxygen Furnace (BOF) slag with concentrated solar energy[J]. Solar Energy,2019,180:372 – 382.

[14] DAS S, SOULIMAN B, STONE D, et al. Synthesis and properties of a novel structural binder utilizing the chemistry of iron carbonation[J]. ACS Applied Materials & Interfaces,2014,6(11):8295 – 8304.

[15] WALIGORA J,BULTEEL D,DEGRUGILLIERS P,et al. Chemical and mineralogical characterizations of LD converter steel slags: A multi-analytical techniques approach[J]. Materials Characterization,2010,61(1): 39 – 48.

[16] TOSSAVAINEN M, ENGSTROM F, YANG Q, et al. Characteristics of steel slag under different cooling conditions [J]. Waste Management, 2007, 27(10): 1335 – 1344.

[17] MAHOUTIAN M, SHAO Y X, MUCCI A, et al. Carbonation and hydration behavior of EAF and BOF steel slag binders [J]. Materials and Structures, 2015, 48(9):3075 – 3085.

[18] ZHANG X, QIAN C X, MA Z Y, et al. Study on preparation of supplementary cementitious material using microbial CO_2 fixation of steel slag powder[J]. Construction and Building Materials,2022,326:126864.

[19] LI L F,ZHONG X Z,LING T C. Effects of accelerated carbonation and high temperatures exposure on the properties of EAFS and BOFS pressed blocks[J]. Journal of Building Engineering,2022,45:103504.

[20] LUXÁN M P, SOTOLONGO R, DORREGO F, et al. Characteristics of the slags produced in the fusion of scrap steel by electric arc furnace[J]. Cement and Concrete Research,2000,30(4):517 – 519.

[21] SANTOS R M,VAN BOUWEL J,VANDEVELDE E,et al. Accelerated mineral carbonation of stainless steel slags for CO_2 storage and waste valorization:Effect of process parameters on geochemical properties[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control,2013,17:32 – 45.

[22] LIU B,LI J G,ZENG Y N,et al. Toxicity assessment and geochemical model of chromium leaching from AOD slag [J]. Chemosphere,2016,144:2052 – 2057.

[23] ADEGOLOYE G, BEAUCOUR A L, ORTOLA S, et al. Concretes made of EAF slag and AOD slag aggregates from stainless steel process: Mechanical properties and durability[J]. Construction and Building Materials,

2015,76:313 – 321.

[24] KRISKOVA L, PONTIKES Y, CIZER Ö, et al. Effect of mechanical activation on the hydraulic properties of stainless steel slags[J]. Cement and Concrete Research, 2012,42(6):778 – 788.

[25] SHI C J. Characteristics and cementitious properties of ladle slag fines from steel production[J]. Cement and Concrete Research,2002,32(3):459 – 462.

[26] SETIÉN J, HERNÁNDEZ D, GONZÁLEZ J J. Characterization of ladle furnace basic slag for use as a construction material[J]. Construction and Building Materials,2009,23(5):1788 – 1794.

[27] 郭辉. 转炉钢渣中铁的还原回收及制备高胶凝性水淬渣的方法研究[D]. 广州:华南理工大学,2018.
GUO Hui. Iron recovery and preparation of water-quenched slag with high cementitious performance from BOF slag by means of reduction[D]. Guangzhou: South China University of Technology,2018.

[28] 张朝晖,廖杰龙,巨建涛,等. 钢渣处理工艺与国内外钢渣利用技术[J]. 钢铁研究学报,2013,25(7):1 – 4.
ZHANG Zhaohui, LIAO Jielong, JU Jiantao, et al. Treatment process and utilization technology of steel slag in China and abroad[J]. Journal of Iron and Steel Research,2013,25(7):1 – 4.

[29] 李星,冯海东,徐磊,等. 转炉钢渣磁选提铁研究[J]. 工业加热,2011,40(6):40 – 42.
LI Xing, FENG Haidong, XU Lei, et al. Study of recovering iron from steel slag by magnetic separation[J]. Industrial Heating,2011,40(6):40 – 42.

[30] 崔玉元. 钢渣中有价组元回收及资源化利用的基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2013.
CUI Yuyuan. Basic research on recovery and resource utilization of valuable components in steel slag[D]. Shenyang: Northeastern University,2013.

[31] 袁宏涛,贵永亮,张顺雨. 钢渣综合利用综述[J]. 山西冶金,2016,39(1):35 – 37.
YUAN Hongtao, GUI Yongliang, ZHANG Shunyu. Comprehensive utilization of steel-making slag[J]. Shanxi Metallurgy,2016,39(1):35 – 37.

[32] 赵立杰,张芳. 钢渣资源综合利用及发展前景展望[J]. 材料导报,2020,34(S2):319 – 322.
ZHAO Lijie, ZHANG Fang. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources[J]. Materials Reports,2020,34(S2):319 – 322.

[33] LI L L, ZHAO F Q, LIU S J. The activation of steel slag and its application in construction and building materials[J]. Advanced Materials Research, 2014, 884/885: 702 – 705.

[34] FU S T, KWON E E, LEE J. Upcycling steel slag into construction materials[J]. Construction and Building Materials,2024,444:137882.

[35] WANG X, CAI Q S. Steel slag as an iron fertilizer for corn growth and soil improvement in a pot experiment[J]. Pedosphere,2006,16(4):519 – 524.

[36] 王安,吴美玲,李忠元,等. 钢渣应用于土壤修复的研究进展[J]. 环境工程技术学报,2023,13(4):1535 – 1543.
WANG An, WU Meiling, LI Zhongyuan, et al. Research progress on the application of steel slag for soil remediation[J]. Journal of Environmental Engineering Technology,2023,13(4):1535 – 1543.

[37] O'CONNOR J, NGUYEN T B T, HONEYANDS T, et al. Production, characterisation, utilisation, and beneficial soil application of steel slag: A review[J]. Journal of Hazardous Materials,2021,419:126478.

[38] LI H B, CUI C Y, SHENG Y P, et al. Application of composite steel slag as subgrade Filler: Performance evaluation and enhancement[J]. Construction and Building Materials,2023,370:130448.

[39] ZHU X P, HUO Y D, ZHAO R M, et al. One-step microcrystalline glass preparation using smelting slag from waste automobile three-way catalysts through iron collection[J]. Applied Sciences,2022,12(22):11723.

[40] XU Y, LI E S, HU C G, et al. Recycling of iron and steel slag for carbon reduction and low-environment load application[J]. Carbon Neutralization, 2024, 3(4): 606 – 628.

[41] 尹尤豪,郭俊祥,古明远,等. 双碳背景下钢渣碳酸化固碳技术研究进展及展望[J]. 钢铁研究学报,2025,37(6):689 – 696.
YIN Youhao, GUO Junxiang, GU Mingyuan, et al. Research progress and prospect of steel slag carbonation carbon sequestration technology under double carbon background[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2025,37(6):689 – 696.

[42] LIN X, ZHANG Y S, LIU H W, et al. Carbon dioxide sequestration by industrial wastes through mineral

carbonation:Current status and perspectives[J]. Journal of Cleaner Production,2024,434:140258.

[43] 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[J]. ChemSusChem,2013,6(12):2348 – 2355.

[44] YU J,WANG K B. Study on characteristics of steel slag for CO_2 capture[J]. Energy & Fuels,2011,25(11):5483 – 5492.

[45] MOON E J,CHOI Y C. Development of carbon-capture binder using stainless steel argon oxygen decarburization slag activated by carbonation[J]. Journal of Cleaner Production,2018,180:642 – 654.

[46] CHEN K W,PAN S Y,CHEN C T,et al. High-gravity carbonation of basic oxygen furnace slag for CO_2 fixation and utilization in blended cement[J]. Journal of Cleaner Production,2016,124:350 – 360.

[47] 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]. Journal of Hazardous Materials,2015,283:302 – 313.

[48] YI Y R,LIN Y,DU Y C,et al. Accelerated carbonation of ladle furnace slag and characterization of its mineral phase[J]. Construction and Building Materials,2021,276:122235.

[49] VAN ZOMEREN A,VAN DER LAAN S R,KOBESEN H B A,et al. Changes in mineralogical and leaching properties of converter steel slag resulting from accelerated carbonation at low CO_2 pressure[J]. Waste Management,2011,31(11):2236 – 2244.

[50] TONG Z B,MA G J,ZHOU D,et al. The indirect mineral carbonation of electric arc furnace slag under microwave irradiation[J]. Scientific Reports,2019,9:7676.

[51] TEIR S,ELONEVA S,FOGELHOLM C J,et al. Dissolution of steelmaking slags in acetic acid for precipitated calcium carbonate production[J]. Energy,2007,32(4):528 – 539.

[52] CHEN T L,JIANG W,SHEN A L,et al. CO_2 mineralization and utilization using various calcium-containing wastewater and refining slag via a high-gravity carbonation process[J]. Industrial & Engineering Chemistry Research,2020,59(15):7140 – 7150.

[53] CHEN Y X,KANAN M W. Thermal Ca^{2+}/Mg^{2+} exchange reactions to synthesize CO_2 removal materials[J]. Nature,2025,638(8052):972 – 979.

[54] LACKNER K S,WENDT C H,BUTT D P,et al. Carbon dioxide disposal in carbonate minerals[J]. Energy,1995,20(11):1153 – 1170.

[55] 张亚朋,崔龙鹏,刘艳芳,等. 3种典型工业固废的CO_2矿化封存性能[J]. 环境工程学报,2021,15(7):2344 – 2355.
ZHANG Yapeng,CUI Longpeng,LIU Yanfang,et al. Comparison of three typical industrial solid wastes on the performance of CO_2 mineralization and sequestration[J]. Chinese Journal of Environmental Engineering,2021,15(7):2344 – 2355.

[56] WANG J Y,ZHONG M,WU P F,et al. A review of the application of steel slag in CO_2 fixation[J]. ChemBioEng Reviews,2021,8(3):189 – 199.

[57] BOBICKI E R,LIU Q X,XU Z H,et al. Carbon capture and storage using alkaline industrial wastes[J]. Progress in Energy and Combustion Science,2012,38(2):302 – 320.

[58] 王秋华,吴嘉帅,张卫风. 碱性工业固废矿化封存二氧化碳研究进展[J]. 化工进展,2023,42(3):1572 – 1582.
WANG Qiuhua,WU Jiashuai,ZHANG Weifeng. Research progress of alkaline industrial solid wastes mineralization for carbon dioxide sequestration[J]. Chemical Industry and Engineering Progress,2023,42(3):1572 – 1582.

[59] BACIOCCHI R,COSTA G,DI BARTOLOMEO E,et al. Carbonation of stainless steel slag as a process for CO_2 storage and slag valorization[J]. Waste and Biomass Valorization,2010,1(4):467 – 477.

[60] OMALE S O,CHOONG T S Y,ABDULLAH L C,et al. Utilization of Malaysia EAF slags for effective application in direct aqueous sequestration of carbon dioxide under ambient temperature[J]. Heliyon,2019,5(10):e02602.

[61] 狄华娟,杨林军,潘丹萍. 超声波强化钙基废渣碳酸化固定CO_2的性能[J]. 化工学报,2012,63(8):2557 – 2565.
DI Huajuan,YANG Linjun,PAN Danping. Enhancement of carbon dioxide sequestration with calcium-based residues by ultrasonics[J]. CIESC Journal,2012,63(8):2557 – 2565.

[62] ZHANG X,WANG B M,CHANG J. Effect of zeolite calcination temperature on the carbonation degree and strength of steel slag compacts[J]. Construction and

Building Materials,2022,343:127987.

[63] REDDY K R, GOPAKUMAR A, CHETRI J K. Critical review of applications of iron and steel slags for carbon sequestration and environmental remediation[J]. Reviews in Environmental Science and Bio/Technology, 2019, 18(1):127 – 152.

[64] 秦松,李俊国,王亚军,等. AOD 不锈钢渣中 Ca 高效浸出及其间接碳酸化[J]. 钢铁,2024,59(8):200 – 209.
QIN Song, LI Junguo, WANG Yajun, et al. Efficient leaching and indirect carbonation of Ca from AOD stainless steel slag[J]. Iron and Steel, 2024, 59(8): 200 – 209.

[65] JO H, LEE M G, PARK J, et al. Preparation of high-purity nano-$CaCO_3$ from steel slag[J]. Energy, 2017, 120:884 – 894.

[66] KOHITLHETSE I C, MANONO M S, MOTSETSE C K, et al. A step towards CO_2 sequestration through mineral carbonation: Using ammonium-based lixiviants for the dissolution of calcium from iron-making blast furnace slag[J]. Minerals,2024,14(7):695.

[67] REN M, SHEN P L, TAO Y, et al. Development of highly carbonation-effective calcium silicates (β-C_2S): Phase evolution, microstructure, and carbonation mechanisms[J]. Cement and Concrete Research,2024,181:107542.

[68] CHANG J, WU H. Study on carbonation mechanism of steel slag[J]. Journal of the Chinese Ceramic Society, 2010,38(7):1185 – 1190.

[69] HE B Y, ZHU X Y, CANG Z Z, et al. Interpretation and prediction of the CO_2 sequestration of steel slag by machine learning[J]. Environmental Science & Technology,2023,57(46):17940 – 17949.

[70] 袁啸,赵慧玲. 不同激发方法对钢渣胶凝材料活性提高及机理研究[J]. 烧结球团,2024,49(4):107 – 113.
YUAN Xiao, ZHAO Huiling. Study on the enhancement and mechanisms of steel slag cementitious material activity by different activation methods[J]. Sintering and Pelletizing,2024,49(4):107 – 113.

[71] HE Z M, SHAO X Y, CHEN X. Effect of carbonation treatment on the strength and CO_2 uptake rate of composite cementitious material with a high steel slag powder content[J]. Materials,2023,16(18):6204.

[72] GAO P F, WANG J, CUI J J, et al. Experimental study on the effects of carbonated steel slag fine aggregate on the expansion rate, mechanical properties and carbonation depth of mortar[J]. Materials,2024,17(13):3279.

[73] MO L W, ZHANG F, DENG M, et al. Accelerated carbonation and performance of concrete made with steel slag as binding materials and aggregates[J]. Cement and Concrete Composites,2017,83:138 – 145.

[74] BIAVA G, DEPERO L E, BONTEMPI E. Accelerated carbonation of steel slag and their valorisation in cement products: A review[J]. Spanish Journal of Soil Science, 2024,14:12908.

[75] XU Z M, ZHOU Y, ZHANG Y H. Ultra-high strength carbonated slab prepared with steel slag powders via accelerated carbonation for CO_2 sequestration[J]. Journal of Materials Research and Technology,2023,24:9058 – 9068.

[76] SRIVASTAVA S, CERUTTI M, NGUYEN H, et al. Carbonated steel slags as supplementary cementitious materials: Reaction kinetics and phase evolution[J]. Cement and Concrete Composites,2023,142:105213.

[77] LIU X Y, WU P F, LIU X M, et al. The utilization of carbonated steel slag as a supplementary cementitious material in cement[J]. Materials,2024,17(18):4574.

[78] ZHAO Q, LIU C J, MEI X H, et al. Research progress of steel slag-based carbon sequestration[J]. Fundamental Research,2025,5(1):282 – 287.

[79] LI Y R, LIAO H Q, GUO Y X. Aqueous carbonation of steel slag and preparation of calcium carbon: A new strategy for the utilization of steel slag[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2025, 13(2): 115951.

[80] ZHAO Q, LIU K, SUN L F, et al. Towards carbon sequestration using stainless steel slag via phase modification and co-extraction of calcium and magnesium[J]. Process Safety and Environmental Protection,2020, 133:73 – 81.

[81] RAGIPANI R, BHATTACHARYA S, SURESH A K. A review on steel slag valorisation via mineral carbonation[J]. Reaction Chemistry & Engineering, 2021, 6(7): 1152 – 1178.

[82] DIGIOVANNI C, HISSEINE O A, AWOLAYO A N. Carbon dioxide sequestration through steel slag carbonation: Review of mechanisms, process parameters, and cleaner upcycling pathways[J]. Journal of CO_2 Utilization,2024,81:102736.

（下转第 40 页）

Power Technology and Environmental Protection, 2022, 38(5):407 – 413.

[15] 宋晓皎,王帅,王琦. 布风板阻力对流动传质的影响[J]. 节能,2020,39(5):67 – 70.
SONG Xiaojiao, WANG Shuai, WANG Qi. Influence of resistance of air distribution plate on flow and mass transfer[J]. Energy Conservation,2020,39(5):67 – 70.

[16] 张开兴,马国良,胡芳源,等. 绿茶风选装备设计与性能试验[J]. 农业机械学报,2023,54(S2):366 – 374.
ZHANG Kaixing, MA Guoliang, HU Fangyuan, et al. Design of equipment and experiment on air separation performance of green tea[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(S2):366 – 374.

[17] 张孟辉,邵彬,谢华华,等. 基于气 – 固两相流体动力学数值模拟的风选室设计[J]. 矿山机械,2019,47(8):47 – 51.
ZHANG Menghui,SHAO Bin,XIE Huahua,et al. Design of air separation chamber based on numerical simulation of gas-solid two-phase hydrodynamics[J]. Mining & Processing Equipment,2019,47(8):47 – 51.

(上接第13页)

[83] 谢奎,赵良,朱辰,等. pH摆动:钢渣矿化固碳工艺经济潜力评估[J]. 高校地质学报,2024,30(4):476 – 484.
XIE Kui, ZHAO Liang, ZHU Chen, et al. pH swing: evaluation of economic potential of mineralized carbon fixation process of steel slag[J]. Geological Journal of China Universities,2024,30(4):476 – 484.

[84] WATJANATEPIN P,STEINWIDDER L,DE SCHUTTER A, et al. Preliminary environmental and economic assessment of mineral carbonation of steel slags as a carbon capture, utilization and storage technology[J]. Procedia CIRP,2024,122:318 – 323.

(上接第21页)

[26] 秦皇岛首钢机械有限公司. 智能检测系统[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.
Qinhuangdao Shougang Machinery Co., Ltd. Intelligent Detection System[EB/OL]. (2018 – 11 – 28)[2025 – 11 – 20]. https://mp.weixin.qq.com/s/j4eYj0RvQ09FMqqHs-AZhw.

[27] 陈思墨,乐文毅,李旭东,等. 基于机器视觉识别的袋式除尘器破袋检测定位技术研究与应用[C]//2024全国除尘技术研讨会论文集(下). 抚顺:中国环境保护产业协会除尘专业委员会,2024:662 – 666.
CHEN Simo,YUE Wenyi,LI Xudong,et al. Research and application of bag break detection and localization technology in baghouse dust collectors based on machine vision recognition[C]//Proceedings of the 2024 National Conference on Dust Control Technology (Volume II). Fushun: Dust Removal Professional Committee of China Environmental Protection Industry Association, 2024: 662 – 666.

[28] LIU Xuan, TANG Yuquan, ZHANG Zhirong, et al. A pattern recognition method for filter bags in bag dust collectors based on ∅-optical time-domain reflectometry [J]. Photonics,2024,11:152.

[29] 刘旭安,胡新广. 分布式光纤传感技术在除尘器破袋检测中的应用方案解析[J]. 科技视界,2023,13(18):37 – 40.
LIU Xuan,HU Xinguang. Analysis of application scheme of distributed optical fiber sensing technology in bag breakage detection of dust collector[J]. Science&Technology Vision,2023,13(18):37 – 40.