钢渣在碳捕集领域的研究进展

刘 军[1]，王泽培[2]，曹志众[1]，陶梦洁[2]，李宇蒙[1]，刘玉峰[1]，王曾睿[2]，赵 青[2]
（1. 本钢集团有限公司 a. 技术中心；b. 先进汽车用钢开发与应用技术国家地方联合工程实验室，辽宁 本溪 117000；
2. 东北大学 a. 多金属共生矿生态化冶金教育部重点实验室；b. 冶金学院，东北大学，辽宁 沈阳 110819）

摘要：针对钢铁冶金行业面临的碳减排挑战，研究者们提出利用钢渣等大宗冶金固废进行 CO_2 捕集的技术路径，并在近些年得到越来越多的关注和研究。本文对钢渣的特性及其综合利用方式进行概述，重点围绕钢渣在碳捕集领域的关键理论与技术开展综述与分析；研究探讨钢渣矿化封存 CO_2、钢渣建材化养护固定 CO_2 和钢渣制备 CO_2 捕集材料的前沿进展，并深入剖析钢渣制备 CO_2 捕集材料领域所面临的难题与挑战。基于这些分析，本文提出未来基础研究的重点与技术攻关方向，旨在为钢铁企业废弃物的协同治理与资源化高效利用提供支持与借鉴。

关键词：冶金固废；钢渣；双碳；资源循环；碳捕集
中图分类号：TF7；X701.7 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0011－10
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.087

Research progress of steel slag in field of carbon capture

LIU Jun[1], WANG Zepei[2], CAO Zhizhong[1], TAO Mengjie[2], LI Yumeng[1], LIU Yufeng[1], WANG Zengrui[2], ZHAO Qing[2]
(1. Bensteel Group Corporation Limited a. Technology Center; b. National-Local Joint Engineering Laboratory for Advanced Automotive Steel Development and Application Technology, Benxi 117000, Liaoning, China; 2. Northeastern University a. Key Laboratory for Ecological Metallurgy of Multimetallic Mineral (Ministry of Education); b. School of Metallurgy, Shenyang 110819, Liaoning, China)

Abstract: In view of the challenges of carbon emission reduction faced by the iron and steel metallurgical industry, a technical path for CO_2 capture, by using bulk metallurgical solid wastes such as steel slag, has been proposed by researchers, which has received more and more attention and research in recent years. The characteristics of steel slag and its comprehensive utilization methods are summarized, focusing on the review and analysis of key theories and technologies of steel slag in the field of carbon capture. The frontier progress of CO_2 storage by steel slag mineralization, CO_2 fixation by steel slag building materials, and CO_2 capture materials prepared by steel slag are researched, while the problems and challenges faced in the field of CO_2 capture materials prepared by steel slag are deeply analyzed. Based on these analyses, the key points and technical research directions of future basic research are proposed, aiming to provide support and reference for the collaborative management and efficient utilization of waste in iron and steel enterprises.

Key words: metallurgical solid waste; steel slag; double carbon; resource circulation; carbon capture

钢铁行业是我国国民经济的重要基础工业，为我国经济社会发展做出了重要的贡献。根据世

收稿日期：2024－10－10；**修回日期**：2024－11－16
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52374327&52074078)；沈阳市中青年科技创新人才支持计划项目(RC220491)；本钢集团辽宁省钢铁产业产学研创新联盟合作项目(KJBLM202202)；中央高校基本科研业务专项资金(N2201023&N2325009)；辽宁省教育厅 2024 年基本科研重点项目(2024JYTZD-03)
作者简介：刘 军(1971—)，男，正高级工程师，从事煤焦、炼铁、炼钢领域的工艺研究。
通信作者：赵 青(1987—)，男，博士，教授，从事碳捕集、利用与储存等方面的研究。

界钢铁协会数据显示，2023 年的全球粗钢产量高达 18.882 亿吨。冶金固废是钢铁行业的重要副产物，平均生产每吨钢产生固废 0.5 ~ 0.8 t，其中：高炉渣占比为 45% ~ 50%，钢渣占比约为 25%，铁合金渣占比约为 10%，含铁尘泥占比约为 15%[1]。目前，我国是世界产钢第一大国，面临着巨大的冶金固废治理压力，尤其是钢渣的资源化水平不高，导致大量土地被堆存占用，造成了严重的环境污染和资源浪费[2-3]。

根据国际能源署《2023 年二氧化碳排放》中的数据，2023 年全球与能源相关的 CO_2 排放量达到了创纪录的 374 亿吨，较 2022 年增加了 4.1 亿吨，增长幅度约为 1.1%[4-5]。近年来，钢铁行业产生的 CO_2 排放占全球碳排放总量的 6% ~ 7%，并占全国碳排放总量的 15% 左右[6]。从长远角度来看，CO_2 捕集、利用与封存(CCUS)被认为是一种极具潜力的碳减排策略[7-9]。对于钢铁企业而言，利用钢渣等碱性固废处理冶金烟气是实现 CCUS 的可行方案之一[10]。基于此，本文系统梳理钢渣在碳捕集领域的理论与技术进展，重点分析钢渣在矿化封存 CO_2、建材化养护固定 CO_2 和制备 CO_2 捕集材料等方面的研究前沿，旨在探讨不同技术路径的发展前景，明确未来研究的重点方向，并为钢铁企业废弃物协同治理与资源化高效利用提供合理建议。

1 钢渣综合利用现状

1.1 钢渣的性质和组成

钢铁企业产生的固废主要有高炉渣、转炉渣、电炉渣、精炼渣和粉煤灰等[11-13]。典型冶金固废的化学成分如表 1 所示。高炉渣是在高炉炼铁过程中产生的固体废弃物。钢渣指炼钢过程中产生的废渣，包括转炉渣(BOF 渣)、电炉渣(EAF 渣)和精炼渣(LF 渣)等(图 1)[14-16]。粉煤灰是煤在燃烧后被捕获的细灰[17]。炉底灰又称炉底灰渣，是煤在燃烧过程中的不燃残留物[18]。

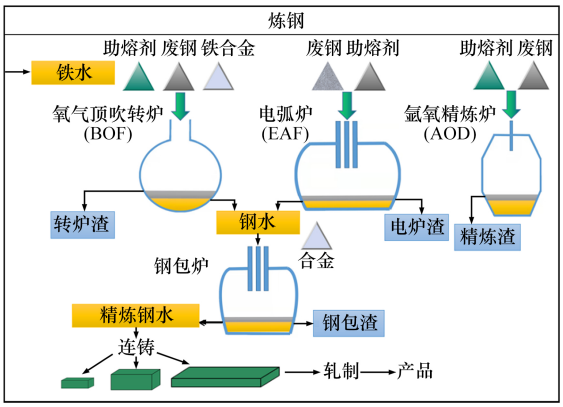


图 1 炼钢过程中产生的典型钢渣

Fig. 1 Typical steel slag produced during the steelmaking process

钢渣的物相组成较为复杂，主要受其化学成分及冷却制度的影响。表 2 列出了钢渣中典型的物相组成，主要包括硅酸二钙(C_2S)、硅酸三钙(C_3S)、铁酸二钙(C_2F)、游离氧化钙(*f*-CaO)以及 RO 相(固体 CaO-FeO-MnO-MgO)等。由于 BOF 渣中具有较高的 CaO、SiO_2 和 Fe_2O_3 含量，其主要矿相通常包括 C_2S、C_3S、C_2F 等。LF 渣具有较高的 CaO 和 Al_2O_3 含量，因此铝酸盐和硅酸盐是 LF 渣中主要的矿相，常见的包括 C_3A、C_2S、铝酸钙(CA)和七铝酸十二钙($C_{12}A_7$)。

表 1 典型冶金固废的主要化学成分(质量分数)

Table 1 Main chemical composition of typical metallurgical solid wastes %

种类	CaO	FeO	SiO_2	Al_2O_3	MgO	MnO	P_2O_5	参考文献
高炉渣 1	40.100	1.530	34.600	14.780	5.290	—	—	[19]
高炉渣 2	34.000	1.030	34.500	17.700	6.010	—	—	[20]
转炉渣	42.300	28.000	11.700	2.700	7.800	4.900	2.20	[21]
电炉渣	45.700	3.300	32.300	3.700	5.200	2.000	—	[22]
精炼渣	65.000	1.150	23.930	1.940	6.360	0.090	0.002	[23]
粉煤灰	6.080	2.260	52.530	12.890	6.350	—	0.610	[24]
炉底灰	28.787	7.517	31.197	10.826	3.019	0.221	3.368	[18]
合金渣	90.870	0.510	4.430	2.470	0.610	—	—	[20]

表 2　钢渣典型物相组成

Table 2　Phase composition of typical steel slag

钢渣种类	矿相组成	参考文献
转炉渣 1	C_3S、C_2S、C_2F、(Ca,Si,Mg,)O、MgO、CaO	[25]
转炉渣 2	γ-C_2S、β-C_2S、C_3S、C_2F、MgO·FeO	[26]
转炉渣 3	C_2S、C_3S、C_3F、MgO、*f*-CaO、RO	[27]
电炉渣	γ-C_2S、β-C_2S、C_2F、MnO·FeO	[26]
精炼渣 1	C_3S、γ-C_2S、C_3A、C12A7、*f*-CaO、MgO·FeO	[26]
精炼渣 2	β-C_2S、γ-C_2S、MgO、CaF_2、C_3MS_2、*f*-CaO	[28]

1.2　钢渣的资源化利用领域

1.2.1　厂内循环

目前，钢渣的处理方法主要包括热泼法、热闷法、水淬法、滚筒法和风淬法等[29]。处理后的钢渣，可通过逐级处理提取资源，用作厂内返料，主要利用方式如下。

（1）回收废钢。钢渣中常含有大量金属态铁和铁氧化物，是钢铁企业非常重要的二次资源。有效回收钢渣中的铁资源，能大幅降低资源浪费[30]。因自身磁性特征，企业常通过磁选分离回收钢渣中的铁资源。研究表明，采用强、弱梯度磁选工艺处理钢渣，铁的回收率可超过 80%[31]。

（2）烧结熔剂。钢渣中富含 Fe、Ca、Mg、Mn 等可再利用的元素，能作为烧结矿的增强剂[32]。钢渣中残留的铁及 FeO 等成分在氧化过程中可迅速释放大量热量，从而有效节省燃料消耗。此外，钢渣中的 CaO、MgO 可替代部分石灰岩和白云石，从而降低烧结过程的成本[33]。

（3）高炉熔剂。钢渣具有高碱度特点，除了可以用作烧结熔剂，还可以经过处理用作高炉熔剂。钢渣中含有的 MnO 和 MgO 有助于改善高炉渣的流动性。钢渣作为高炉熔剂，可提高铁水的含 Mn 量；钢渣中的 Fe 取代部分铁矿石，可达到降低生产成本的目的[34]。

目前，钢渣在厂内的循环利用仍有限，大量钢渣被堆存在渣场或交由第三方处理，导致了资源浪费、环境污染和社会压力。

1.2.2　厂外利用

我国钢渣的综合利用涵盖了厂内循环利用（7.5%）、水泥生产（9.3%）、道路建设（2.6%）和土木工程（10.1%）等应用领域，其中堆放填埋处理占比为 70.5%[35]。具体利用方式如下。

（1）混凝土用胶凝材料。混凝土是全球使用最广泛的建筑材料，年消耗量约为 120 亿吨[36]。由于含有大量 C_2S、C_3S、C_4AF 和 C_3A 等矿物相，钢渣具有作为水硬性材料的潜力，因此可被用作辅助胶凝材料[37]。但钢渣中含有的 *f*-CaO、*f*-MgO 和 β-C_2S 等物相会造成建材制品的体积膨胀[38]。因此，需要通过自然时效、加速碳酸化等方法对钢渣进行稳定化处理。

（2）废水处理剂。冶金废水通常具有种类多、水量大且水质成分复杂等特征。研究表明，通过物理或化学的方法对钢渣进行改性，可以吸附废水中的重金属离子[39]，从而减少废水中的重金属含量。特别是通过酸性溶液对钢渣进行改性处理后，钢渣对 As^{5+} 离子有较好的吸附效果[40]。

（3）钢渣肥料。钢渣具有碱性和可溶性，且含有大量的 Ca、Si、Fe 元素，以及微量的 P、Cu、Mn 等元素，因此可以作为农业肥料或酸性土壤改良剂[41]。研究表明，钢渣中的 Ca 元素可以促进作物生根和增产，Fe、Si 元素可以促进作物代谢，提高抗病能力[42]，P、Cu 元素有助于提高作物产量，Mn 元素则有助于改善土壤的酸碱性。

此外，钢渣还能够还原得到金属铁，并为制备微晶玻璃提供原料[43]。李宇等[38]利用转炉钢渣作为主要原料，成功制备了钢渣微晶玻璃。CCUS 被《Science》等期刊评为最具应用前景的工业末端减排技术，被视为推动钢铁、建材等产业耦合低碳发展的关键枢纽性技术。钢渣中含有大量的高活性含钙镁碱性物相，是理想的 CO_2 固定转化原料。不仅如此，钢渣和 CO_2 排放源邻近，体量匹配，就地协同处理条件便利，是企业“以废治废”的理想材料。

2　利用钢渣捕集 CO_2 的研究现状

在目前碳捕集与封存的众多技术中，利用天然矿物矿化固定 CO_2 技术凭借原料碳储量丰富等优点展现出显著的发展潜力[44]。天然矿物通常包括橄榄石、蛇纹石和硅灰石等。该技术指含有金

属氧化物的矿物与 CO_2 反应生成稳定且具有不溶性的碳酸盐[45]。但天然矿物在进行异地矿化时需要开采、运输等工序，增加了成本预算和能源消耗。相比之下，利用钢渣捕集 CO_2 技术不仅省去了繁琐的工序，还能回收高附加值产品，从而在经济上具备更强的竞争力。本文将从钢渣矿化封存 CO_2、钢渣建材化养护固定 CO_2、钢渣制备 CO_2 捕集材料三方面来阐述。

2.1 钢渣矿化封存 CO_2

2.1.1 直接碳酸化

直接碳酸化指 CO_2 直接与原料反应，根据反应过程中是否添加水，可分为直接干法碳酸化和直接湿法碳酸化。

（1）直接干法碳酸化。直接干法碳酸化是指钢渣中的 CaO 与 MgO 等物相直接与空气中的 CO_2 进行反应(类型为气－固反应)，并生成稳定的碳酸盐[46]。研究表明，在 CaO 吸脱附 CO_2 试验中，CaO 的转化率随吸脱附循环次数的增加而降低，直至降低到某值后保持不变[47]。此外，受限于动力学，在常温下，直接干法碳酸化反应速率较低；然而，当碳酸化反应温度从 400 ℃增加到 600 ℃时，钢渣的碳酸化反应速率可以增加 70 倍[48]，故反应温度直接影响反应的进行。

（2）直接湿法碳酸化。相比于直接干法，直接湿法碳酸化的反应速率显著提高。该方法主要包括三个步骤[49-50]：首先，CO_2 溶解于水中生成 CO_3^{2-}，如式(1)所示；其次，钢渣中 Ca/Mg 进入到溶液中形成 Ca^{2+} 和 Mg^{2+}，如式(2)所示；最后，生成相应的碳酸盐，如式(3)所示。由 Ca/Mg 溶出而形成的物质阻碍了钢渣的进一步反应[51]，可以通过增加比表面积、去除表面沉淀产物等措施提高碳酸化速率。

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

$$CaSiO_3(s) + 2CO_2 + H_2O \rightleftharpoons Ca^{2+} + SiO_2 + 2HCO_3^- \text{（以 } CaSiO_3 \text{ 为例）} \quad (2)$$

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

在钢渣直接湿法碳酸化的反应研究中，温度、钢渣粒径、固液比和 CO_2 流量等因素均对 CO_2 捕集效率产生重要影响[52]。该工艺的优势在于流程简短和处理成本低，但仍存在 CO_2 捕集效率较低和反应速率缓慢的问题，因此在 CO_2 捕集方面的成效并不显著。相比之下，钢渣的间接碳酸化技术显示出更好的效果。

2.1.2 间接碳酸化

间接碳酸化指的是钢渣经过一系列媒介浸出的过程。在该过程中，钢渣中的某些元素以化合物或离子的形式被提取，同时，空气中的 CO_2 溶解于水中，以碳酸根的形式存在，两者进行反应能够有效地吸收 CO_2。钢渣处理通常使用铵盐溶液或酸性溶液作为碱金属离子选择性浸出液[53]。通过浸出，钢渣中相对惰性的钙可以有效地转化为高活性 Ca^{2+}，从而提升钢渣的固碳量[54]。因此，间接碳酸化不仅能提高钢渣固碳量，同时也为制备高纯度碳酸钙产品提供了原料基础。

综上所述，间接碳酸化因其较高的碳酸化效率和相对纯净的碳酸化产物而备受关注，但在提升其 CO_2 吸附容量方面仍需进一步研究和改进。

2.2 钢渣建材化养护固定 CO_2

混凝土是全球使用较多的建筑材料，全球每年消耗约 120 亿吨[36]。其组成通常包括 10%～20% 的水泥，70%～80% 的天然骨料和 5%～10% 的水[55]。由于用于合成混凝土的原料供需矛盾日益严峻，混凝土行业面临越来越紧张的资源约束。因此，考虑到混凝土在建筑及其他行业的重要性，其可持续发展需探索原料替代方案。近年来，学者们开始关注将钢渣作为混凝土原材料的替代品，同时实现 CO_2 的捕集。例如，在混凝土生产中将钢渣用作粗/细骨料，但由于不稳定性，其在此方面的应用受到限制[56]。

已有研究表明，钢渣、高炉渣、电石渣和粉煤灰等冶金固废均可用于混凝土的制备。GUO 等[57]观察到加入钢渣粉后混凝土坍落度降低；LIU 等[58]通过试验发现，用钢渣作为水泥替代品制备的混凝土利用效率提高；BARBOSA 等[59]指出，每代替 1 t 水泥熟料可减少 0.83 t CO_2 排放；孙一夫[60]以钢渣和粉煤灰为原料，分析了不同掺比对混凝土固定 CO_2 效果的影响，结果表明，钢渣加气混凝土的整体固碳效果优于粉煤灰加气混

凝土；罗旷等[20]则以电石渣和矿渣为原料，进行了 CO_2 养护加气混凝土的研究。结果表明，随着电石渣掺量的增加，混凝土的固碳率亦随之提升，CO_2 气体主要与制备的混凝土中的$Ca(OH)_2$迅速反应，生成碳酸钙晶体，晶型为方解石和球霰石。值得注意的是，CO_2 的介入时间是 CO_2 养护加气混凝土的重要指导参数，且内部加气混凝土的固碳表现通常低于外部。然而，CO_2 加气混凝土在应用方面仍面临一些瓶颈[61]，例如硅酸盐水泥基 CO_2 浆液的稳定性等问题。综上所述，混凝土在 CO_2 固定方面展现出巨大的潜力，但这一技术仍需进一步探索与发展。

2.3　钢渣制备 CO_2 捕集材料

与上述两种利用钢渣封存 CO_2 的方法相比，钢渣制备 CO_2 捕集材料展现出更高的反应速率和易于控制的参数。钢渣中矿相丰富，含有铁、钙、硅等可回收利用的元素，在碳捕集方面成效显著，因此引起了学者对利用钢渣制备 CO_2 捕集材料的广泛关注。

2.3.1　钙基吸附剂

钢渣产量大且富含钙、镁、硅等组分，因而被视为一种良好的 CO_2 捕集原料。然而，由于钢渣中的钙成分主要以硅钙相的形式稳定存在，直接将钢渣用于 CO_2 捕集的效果并不理想。因此，学者们逐渐开始关注从钢渣中浸出、提取和回收钙，以提高其在 CO_2 捕集中的有效性。目前，利用钢渣制备 CO_2 捕集材料一般分为两步[62]：第一步为钢渣离子浸出；第二步为 CO_2 捕集材料制备。在第一步中，通常选择酸性溶液来梯次浸出钢渣中的 Ca、Mg、Si 等，所制备的溶液用于第二步的合成与制备。

在早期的研究中，首先被认定为可以进行离子浸出的是 HCl、HNO_3、CH_3COOH 以及 NH_4Cl 等酸性溶液。对于钙基吸附剂来讲，需要合成稳定的碳酸盐。研究表明，使用强酸溶液浸出后，Ca 和 Mg 的浸出率可分别达到97%和46%[63]。但由于浸出溶液酸性较强，钢渣中 Ca、Mg 元素被提取，钢渣中的 Fe 元素、有毒元素以及重金属元素也会进入到溶液中[64]。这些杂质会降低材料的捕碳效率。因此，在制备 CO_2 捕集材料前需要加入一定量的碱性添加剂，如 NaOH。添加的目的一是为了与溶液中的 Fe、Si 等元素反应，生成沉淀，提高碳酸盐的纯度；二是为了调节 pH 值到 10 左右，为碳酸盐沉淀的生成提供更好的合成环境[65]。

针对通过以上方法浸出钢渣时存在的问题，广大学者从降低能源消耗与溶液可循环利用的角度出发，在原有的技术上做出优化。ZHANG 等[66]研究表明，钢渣在铵盐溶液中 Ca 的选择性浸出率可高达 93%，而 Mg 的浸出率则小于 5%。因此，选择铵盐溶液作为浸出溶液可得到较高纯度的碳酸钙。式(4)~(6)为钢渣在铵盐溶液中发生的主要反应[67]。由式(4)可知，可将铵盐溶液回收至钢渣浸出环节，从而降低溶剂的成本。

$$CaO(s)+2NH_4X(aq)+H_2O(l)\rightarrow CaX_2(aq)+2NH_4OH(aq)\quad X=Cl^-,NO_3^-,CH_3COO^- \tag{4}$$

$$2NH_4OH(aq)+CO_2(g)\rightarrow (NH_4)_2CO_3(aq)+H_2O \tag{5}$$

$$(NH_4)_2CO_3(aq)+CaX_2(aq)\rightarrow CaCO_3(s)+2NH_4X(aq) \tag{6}$$

以转炉渣为原料，采用乙酸为浸出液，在 N_2、CO_2 气氛进行多次吸脱附反应，该过程重复进行 30 次后得出最优效果为每千克吸附剂可吸收 14.2% 的 CO_2[68]。此外，以钢渣为原料，使用萃取－沉淀的方法制备 CO_2 吸附剂，在 650 ℃的环境下进行 20 次循环吸附，最佳 CO_2 吸附容量为0.27 g/g[69]。SUN 等[70]以钢渣为原料合成钙基吸附剂，在650 ℃的环境下进行 50 次循环吸附试验，结果显示，钙基吸附剂的 CO_2 吸附容量可达到 0.223 g/g。相关吸附剂对 CO_2 的吸附容量数据详见表 3。

表 3　不同种类 CO_2 捕集材料的吸附容量

Table 3　Adsorption capacity of different types of CO_2 capture materials

钢渣种类	浸出液	吸附温度/℃	吸附时间/min	CO_2 体积占比/%	吸附容量(质量分数)/%	参考文献
转炉渣 1	甲酸	700	150	10	23.4	[22]
转炉渣 2	甲酸	700	150	10	17.0	[71]
转炉渣 3	乙酸	650	30	15	22.3	[72]
转炉渣 4	乙酸	700	25	15	14.2	[73]
电炉渣	—	600	180	20	10.5	[74]

2.3.2 硅基吸附剂

以转炉渣为原料，采用甲酸为浸出液，可以合成由介孔 SiO_2、Fe_3O_4 粒子和结晶 CaO 粒子构成的复合物[21]。研究表明，在甲酸溶解的过程中，转炉渣中的 Fe_3O_4 颗粒并未被去除，而是作为支架组分被包裹在最终的吸附剂中。留存的 Fe_3O_4 可以通过磁选或过滤的方式进行分离、回收和再利用，最终获得的 $CaO\text{-}SiO_2$ 复合物可用作 CO_2 吸附剂，每千克吸附剂可吸收 23.4% 的 CO_2。此外，以电炉渣为试验原料[72]，经处理后制得 SiO_2，并将 Li_2CO_3 和 SiO_2 混合后加水制得浆料，最终制得硅基吸附剂。通过循环吸脱附试验，结果显示，在 600 ℃环境中吸附 180 min，最优 CO_2 吸附容量为 0.105 g/g。YANG 等[24]首次采用生物质锅炉飞灰制备 Li_4SiO_4 吸附剂，并通过水洗和酸洗对粉煤灰进行预处理，以提高吸附剂的吸附性能，研究指出，生物质粉煤灰可以用于生产 Li_4SiO_4，其 CO_2 吸附容量为 0.243 g/g。

目前，钙基和硅基吸附剂在 CO_2 捕集材料的研究较为普遍。然而，利用钢渣制备 CO_2 捕集材料仍面临工艺流程较长、需要特定的条件以满足试验要求，且对设备有一定要求等问题，这些因素均增加了工艺成本。

3 利用钢渣捕集 CO_2 的难题与挑战

目前，利用钢渣捕集 CO_2 的应用主要集中在实验室研究，而距离大规模工业化应用仍存在显著挑战。当前面临的主要难点如下。

（1）惰性相的影响控制。钢渣由多种物相组成，主要包括硅酸盐类、铝酸盐类、铁酸盐类和金属氧化物类矿相[73]。在利用钢渣制备 CO_2 捕集材料的离子浸出过程中，钙、硅离子的选择性提取面临困难，且伴有其他元素浸出的问题，影响后续制备 CO_2 捕集材料。MEI 等[74-75]系统性研究了钢渣中典型含 Ca 物相在室温酸性溶液（pH 值 = 1）中 Ca 的提取能力。研究结果显示，CaO 表现出较高的浸出反应性，其 Ca 浸出率超过 80%，其次为铝酸三钙（$Ca_3Al_2O_6$）和其他硅酸盐类矿相，其 Ca 浸出率均超过 45%。大多数铝酸盐类相和 $Ca_2Fe_2O_5$ 表现为浸出惰性，其 Ca 浸出率低于 30%。同样，ZHAO 等[76]探讨了钢渣中常见 Ca 和 Mg 赋存物相在不同酸性溶液（HCl、CH_3COOH、NH_4Cl 和 CH_3COONH_4）中的反应性，得出了类似的结果。

（2）反应动力学改善。许多研究表明，在直接法和间接法碳酸化过程中，钢渣的表面钝化行是导致钢渣 Ca 组分不能完全碳酸化的主要原因之一。为了探明钢渣的钝化机制，学者们探究了钢渣中单一矿相以及硅酸盐类矿物的浸出钝化行为[66]。

在钢渣的直接和间接碳酸化过程中，反应产物相（$CaCO_3$ 和富硅产物相）的形成是不可避免的，这阻碍了 CO_2 与钢渣的进一步反应[21]。MEI 等[75]系统性探究了钢渣中含 Ca 的硅酸盐、铝酸盐和铁酸盐等物相在酸性溶液中的表面钝化行为。结果表明，硅酸盐类矿相在酸性溶液中浸蚀后，其表面形成富硅产物相和硅胶。产物相覆盖在未反应颗粒表面，阻碍了溶液与未反应钢渣的有效接触。然而，通过物理和化学方法在反应过程中持续去除产物相，能够有效提高钢渣的碳酸化速率。

面对大规模工业化应用瓶颈，许多学者已开始模拟现场工艺流程，包括利用模拟液和现场钢渣制备 CO_2 捕集材料，取得了一定的研究成果，但实际工程应用案例仍然较少。

4 结论与展望

（1）尽管研究者已开发出多种碳捕集技术，但面对钢渣碳捕集工业化应用难题，仍需在多个关键方面开展深入研究。在钢渣碳捕集过程中，工艺成本、能量损失与碳酸化效率主要受矿化路线及操作条件的影响，包括试剂种类、反应温度、反应时间、液固比以及钢渣粒度等因素。因此，进一步优化矿化工艺以及设备智能化升级，以满足工业化生产需求，将是未来研究的重点。

（2）此外，钢渣矿化封存 CO_2、钢渣建材化养护固定 CO_2 与钢渣制备 CO_2 捕集材料等技术仍面临诸多难题，例如控制钢渣中惰性相的影响、改善反应动力学、提高矿化效率和能量利用率等。大量研究表明，利用钢渣捕集 CO_2 是钢铁行业末

端降碳关键途径，需加强产学研合作，针对“卡脖子”技术难题进行深入研究，实现从实验室到工业应用的有效转化。

参考文献：

[1] 徐润生，张雨晨，张建良，等．钢铁冶金固废固化 CO_2 研究现状及趋势[J]．钢铁研究学报，2023，35(7)：779－789.
XU Runsheng，ZHANG Yuchen，ZHANG Jianliang，et al. Status and trends of steel metallurgical solid waste solidification CO_2 research[J]. Journal of Iron and Steel Research，2023，35(7)：779－789.

[2] WANG Y J，ZENG Y N，LI J G，et al. Carbonation of argon oxygen decarburization stainless steel slag and its effect on chromium leachability[J]. Journal of Cleaner Production，2020，256：120377.

[3] 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.

[4] 王浩，陶从喜，梁乾，等．二氧化碳的捕集与矿化利用研究进展[J]．化工矿物与加工，2024，53(7)：82－90.
WANG Hao，TAO Congxi，LIANG Qian，et al. Research progress on carbon dioxide capture and mineralization utilization[J]. Industrial Minerals & Processing，2024，53(7)：82－90.

[5] SHABBIR ALAM M，DURAISAMY P，BAKKAR SIDDIK A，et al. The impacts of globalization，renewable energy，and agriculture on CO_2 emissions in India：Contextual evidence using a novel composite carbon emission-related atmospheric quality index[J]. Gondwana Research，2023，119：384－401.

[6] PAN S Y，ADHIKARI R，CHEN Y H，et al. Integrated and innovative steel slag utilization for iron reclamation，green material production and CO_2 fixation via accelerated carbonation[J]. Journal of Cleaner Production，2016，137：617－631.

[7] 戈海猛，杨向龙．双碳目标下我国电力行业发展现状与建议[J]．中国战略新兴产业，2024(24)：179－181.
GE Haimeng，YANG Xianglong. Development status and suggestions of China’s electric power industry under the dual carbon goal[J]. China Strategic Emerging Industry，2024(24)：179－181.

[8] 向国育，申长俊，陆诗建，等．二氧化碳捕集、利用与封存示范工程进展[J/OL]．低碳化学与化工，2024：1－10.[2024－09－02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1807.TQ.20240830.1737.006.html.
XIANG Guoyu，SHEN Changjun，LU Shijian，et al. Progress of carbon dioxide capture，utilization and storage demonstration engineerings[J/OL]. Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering，2024：1－10.[2024－09－02]. http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1807.TQ.20240830.1737.006.html.

[9] 田京雷，柴雅宁，崔永康，等．钢铁工业 CCUS 全流程降碳体系构建与技术进展[J]．钢铁，2024，59(9)：226－235.
TIAN Jinglei，CHAI Yaning，CUI Yongkang，et al. Construction and technological progress of CCUS whole-process carbon reduction system in iron and steel industry[J]. Iron & Steel，2024，59(9)：226－235.

[10] 李玲玲，陈韧，张作良，等．精炼渣钙组分乙酸浸出制备钙基 CO_2 吸附材料[J]．钢铁研究学报，2020，32(7)：550－555.
LI Lingling，CHEN Ren，ZHANG Zuoliang，et al. Preparation of calcium-based CO_2 adsorbent by acetic acid leaching of calcium component from refining slag[J]. Journal of Iron and Steel Research，2020，32(7)：550－555.

[11] 牛奔．冶金固废处置的资源化利用策略与技术路径研究[J]．冶金与材料，2024，44(1)：97－99.
NIU Ben. Study on resource utilization strategy and technical path of metallurgical solid waste disposal[J]. Metallurgy and Materials，2024，44(1)：97－99.

[12] 常仕琦．高炉渣与转炉渣协同改质及资源化利用[D]．包头：内蒙古科技大学，2023.
CHANG Shiqi. Collaborative modification and resource blast furnace slag and utilization of converter slag[D]. Baotou：Inner Mongolia University of Science & Technology，2023.

[13] YILDIRIM I Z，PREZZI M. Chemical，mineralogical，and morphological properties of steel slag[J]. Advances in Civil Engineering，2011(3)：463638.

[14] WANG Y J，MENG J T，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.

[15] BRANDT D A, WARNER J C. Metallurgy Fundamentals [M]. 5rd Edition. Boca Raton: Goodheart-Wilcox Publisher, 2009.

[16] 佟帅,李晨晓,王书桓,等. 钢渣处理工艺及综合利用分析[J]. 冶金能源,2020,39(6):3-7.
TONG Shuai, LI Chenxiao, WANG Shuhuan, et al. Steel slag treatment process and comprehensive utilization analysis[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2020, 39(6):3-7.

[17] MATHAPATI M, AMATE K, DURGA PRASAD C, et al. A review on fly ash utilization[J]. Materials Today: Proceedings, 2022, 50:1535-1540.

[18] LIU Jun, CHENG Lei, JIN Hesong, et al. Sustainable utilization of concrete slurry waste in eco-friendly artificial lightweight cold-bonded aggregates: An alternative pathway for efficiently sequestrating CO_2[J]. Construction and Building Materials, 2024, 421:135759.

[19] HASHIM Z H, KUWAHARA Y, MOHAMED A R, et al. CO_2 adsorption on a CaO-Ca_{12} Al_{14} O_{33} composite synthesized from a blast furnace slag and its regenerative ability[J]. ISIJ International, 2023, 63(1):190-196.

[20] 罗旷,张威,张力,等. 二氧化碳矿化养护全固废加气混凝土研究[J]. 能源工程,2023,43(2):41-47.
LUO Kuang, ZHANG Wei, ZHANG Li, et al. Study on CO_2 mineralized curing all-solid waste aerated concrete [J]. Energy Engineering, 2023, 43(2):41-47.

[21] KUWAHARA Y, HANAKI A, YAMASHITA H. Direct synthesis of a regenerative CaO-Fe_3O_4-SiO_2 composite adsorbent from converter slag for CO_2 capture applications ACS[J]. Sustainable Chemistry & Engineering, 2022, 10(1):372-381.

[22] ENGSTRÖM F, ADOLFSSON D, YANG Q, et al. Crystallization behaviour of some steelmaking slags[J]. Steel Research International, 2010, 81(5):362-371.

[23] TAO M J, WANG Y J, LI J G, et al. Slurry-phase carbonation reaction characteristics of AOD stainless steel slag[J]. Processes, 2021, 9(12):2266.

[24] YANG Y D, CHEN Z Q, SUN X D, et al. Li_4SiO_4 adsorbent derived from industrial biomass fly ash for high-temperature CO_2 capture[J]. Fuel, 2023, 337: 126853.

[25] 张作良,陈韧,孟祥然,等. 转炉钢渣物相组成及其显微形貌[J]. 材料与冶金学报,2019,18(1):37-40.
ZHANG Zuoliang, CHEN Ren, MENG Xiangran, et al. Phase compositions and microstructure of slag in BOF [J]. Journal of Materials and Metallurgy, 2019, 18(1): 37-40.

[26] 吴启帆,包燕平,林路,等. 不同工艺钢渣物相组成及其显微形貌研究[J]. 工业安全与环保,2015,41(8):86-89.
WU Qifan, BAO Yanping, LIN Lu, et al. Study on phase compositions and microstructure of slag in different processes[J]. Industrial Safety and Environmental Protection, 2015, 41(8):86-89.

[27] MA G J, TANG H, JIN Y B. Mineral sequestration of CO_2 using basic oxygen furnace (BOF) steelmaking slag[J]. Advanced Materials Research, 2011, 194/195/196: 2140-2144.

[28] WANG Y J, ZENG Y N, LI J G, et al. Properties of ten-year-aged argon oxygen decarburization stainless steel slag[J]. Journal of Iron and Steel Research International, 2021, 28(10):1233-1242.

[29] 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.

[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. Fundamental research on recovery of valuable components and resource utilization of steel slag [D]. Shenyang: Northeastern University, 2013.

[31] 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.

[32] 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;101.
YUAN Hongtao, GUI Yongliang, ZHANG Shunyu. Comprehensive utilization of steel-making slag[J]. Shanxi Metallurgy, 2016, 39(1):35-37;101.

[33] 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(增刊2):1319-1322;1333.
ZHAO Lijie, ZHANG Fang. Comprehensive utilization and development prospect of steel slag resources[J]. Materials Reports, 2020, 34 (Suppl 2): 1319-1322;

1333.

[34] 高韩锋,姚乐. 钢铁企业固体废弃物资源化利用[J]. 知识经济,2015(20):125 – 126.
GAO Hanfeng, YAO Le. Resource utilization of solid waste in iron and steel enterprises[J]. Knowledge Economy,2015(20):125 – 126.

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

[36] HOSSEINNEZHAD H, SÜRMELIOĞLU S, ÇAKıRÖA, et al. A novel method for characterization of recycled concrete aggregates: Computerized microtomography[J]. Journal of Building Engineering,2023,76:107321.

[37] 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.

[38] 李宇,代文彬,苍大强. 采用一步烧结法的钢渣基微晶玻璃制备机理[J]. 硅酸盐通报,2014,33(12):3288 – 3294.
LI Yu, DAI Wenbin, CANG Daqiang. Preparation mechanism of glass-ceramics based on steel slag using one-step sintering process[J]. Bulletin of the Chinese Ceramic Society,2014,33(12):3288 – 3294.

[39] 代祎明,闫勃婷,李明阳,等. 钢渣吸附重金属离子研究进展[J]. 钢铁研究学报,2024,36(8):957 – 974.
DAI Yiming, YAN Boting, LI Mingyang, et al. Research progress on adsorption of heavy metal ions by steel slag [J]. Journal of Iron and Steel Research,2024,36(8): 957 – 974.

[40] YANG L Y, GAO M D, LV Y, et al. Removal arsenic(V) efficiency and characteristics using modified basic oxygen furnace slag in aqueous solution[J]. Journal of Resources and Ecology,2022,13(3):537 – 546.

[41] MULODIA V, SUMAN A, PRASAD S, et al. Effect of particle size and application rate of steel(Linz-Donawitz, LD) slag on heavy metal built-up in soil and their transfer dynamics in spinach(Spinacia oleracea L.)[J]. Sustainable Chemistry for the Environment, 2024, 6: 100112.

[42] 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.

[43] 孙靖婷,童志博,刘诗昌,等. 铵浸钢渣固化砷碱渣制备微晶玻璃[J]. 中国资源综合利用,2022,40(6):17 – 20;26.
SUN Jingting, TONG Zhibo, LIU Shichang, et al. Preparation of glass-ceramic by solidifing arsenic alkali slag with ammonium leached steel slag[J]. China Resources Comprehensive Utilization,2022,40(6):17 – 20;26.

[44] LIU W Z, TENG L M, ROHANI S, et al. CO_2 mineral carbonation using industrial solid wastes: A review of recent developments[J]. Chemical Engineering Journal, 2021,416:129093.

[45] WANG B, PAN Z H, CHENG H G, et al. A review of carbon dioxide sequestration by mineral carbonation of industrial byproduct gypsum[J]. Journal of Cleaner Production,2021,302:126930.

[46] CHEN Z H, CANG Z Z, YANG F M, et al. Carbonation of steelmaking slag presents an opportunity for carbon neutral: A review[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2021, 54:101738.

[47] LI Z S, CAI N S, HUANGY Y, et al. Experimental research of CaO cyclic absorbing CO_2 [J]. Journal of Combustion Science and Technology,2005,11(4):379.

[48] BACIOCCHI R, POLETTINI A, POMI R, et al. CO_2 sequestration by direct gas-solid carbonation of air pollution control (APC) residues[J]. Energy & Fuels, 2006,20(5):1933 – 1940.

[49] YAN H, ZHANG J Y, ZHAO Y C, et al. CO_2 Sequestration from flue gas by direct aqueous mineral carbonation of wollastonite[J]. Science China Technological Sciences,2013,56(9):2219 – 2227.

[50] SANTOS R M, FRANÇOIS D, MERTENS G, et al. Ultrasound-intensified mineral carbonation [J]. Applied Thermal Engineering,2013,57(1/2):154 – 163.

[51] CHANG E E, PAN S Y, CHEN Y H, et al. Accelerated carbonation of steelmaking slags in a high-gravity rotating packed bed[J]. Journal of Hazardous Materials, 2012, 227:97 – 106.

[52] POLETTINI A, POMI R, STRAMAZZO A. Carbon sequestration through accelerated carbonation of BOF slag: Influence of particle size characteristics[J]. Chemical Engineering Journal,2016,298:26 – 35.

[53] HONG S J, PARK A H A, PARK Y. Evaluation of elemental leaching behavior and morphological changes of steel slag in both acidic and basic conditions for carbon

sequestration potential[J]. Korean J. Chem. Eng., 2021, 38:2279 – 2285.

[54] REDDY A S, PRADHAN R K, CHANDRA S. Utilization of basic oxygen furnace(BOF) slag in the production of a hydraulic cement binder[J]. International Journal of Mineral Processing, 2006, 79(2):98 – 105.

[55] ABUKERSH S A, FAIRFIELD C A. Recycled aggregate concrete produced with red granite dust as a partial cement replacement[J]. Construction and Building Materials, 2011, 25(10):4088 – 4094.

[56] ZHENG Z, DENG P. Mechanical and fracture properties of slag/steel slag-based geopolymer fully recycled aggregate concrete[J]. Construction and Building Materials, 2024, 413:134533.

[57] GUO X L, SHI H S, WU K. Effects of steel slag powder on workability and durability of concrete[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Materials Science), 2014, 29(4):733 – 739.

[58] LIU P, ZHONG J K, ZHANG M, et al. Effect of CO_2 treatment on the microstructure and properties of steel slag supplementary cementitous materials[J]. Construction and Building Materials, 2021, 309(22):125171.

[59] BARBOSA COSTA L L C, NOGUEIRA M A, ANDRADE H D, et al. Mechanical and durability performance of concretes produced with steel slag aggregate and mineral admixtures[J]. Construction and Building Materials, 2022, 318:126152.

[60] 孙一夫. 二氧化碳养护固废轻质混凝土配方优化及工业化应用[D]. 杭州:浙江大学, 2021.
SUN Yifu. Formula optimization and industrial application of carbon dioxide curing solid waste lightweight concrete[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2021.

[61] 张源, 他旭鹏, 覃述兵, 等. CO_2 泡沫混凝土碳封存潜力分析[J]. 环境科学, 2023, 44(9):5308 – 5315.
ZHANG Yuan, TA Xupeng, QIN Shubing, et al. Analysis of carbon storage potential of CO_2 foamed concrete[J]. Environmental Science, 2023, 44(9):5308 – 5315.

[62] MEI X H, ZHAO Q, LI Y M, et al. Phase transition and morphology evolution of precipitated calcium carbonate (PCC) in the CO_2 mineralization process[J]. Fuel, 2022, 328:125259.

[63] 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[J]. RSC Advances, 2021, 11(14):8306 – 8313.

[64] ZHAO Q, CHU X Y, MEI X H, et al. Co-treatment of waste from steelmaking processes: Steel slag-based carbon capture and storage by mineralization[J]. Frontiers in Chemistry, 2020, 8:571504.

[65] WANG C Y, BAO W J, GUO Z C, et al. Carbon dioxide sequestration via steelmaking slag carbonation in alkali solutions: Experimental investigation and process evaluation[J]. Acta Metallurgica Sinica (English Letters), 2018, 31(7):771 – 784.

[66] ZHANG H N, XU A J, HE D F, et al. Alkaline extraction characteristics of steelmaking slag batch in NH_4Cl solution under environmental pressure[J]. Journal of Central South University, 2013, 20(6):1482 – 1489.

[67] HUMBERT P S, CASTRO-GOMES J. CO_2 activated steel slag-based materials: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2019, 208:448 – 457.

[68] TIAN S C, JIANG J G, YAN F, et al. Synthesis of highly efficient CaO-based, self-stabilizing CO_2 sorbents via structure-reforming of steel slag[J]. Environmental Science & Technology, 2015, 49(12):7464 – 7472.

[69] TIAN S C, JIANG J G, YAN F, et al. Highly efficient CO_2 capture with simultaneous iron and CaO recycling for the iron and steel industry[J]. Green Chemistry, 2016, 18(14):4022 – 4031.

[70] SUN J, LIU W Q, HU Y C, et al. Acidification optimization and granulation of a steel-slag-derived sorbent for CO_2 capture[J]. Chemical Engineering & Technology, 2018, 41(10):2077 – 2086.

[71] MEI X H, ZHAO Q, MIN Y, et al. Dissolution behavior of steelmaking slag for Ca extraction toward CO_2 sequestration[J]. Journal of Environmental Chemical Engineering, 2023, 11(3):110043.

[72] BEJARANO-PEÑA W D, ALCÁNTAR-VÁZQUEZ B, RAMÍREZ-ZAMORA R M. Synthesis and evaluation in the CO_2 capture process of potassium-modified lithium silicates produced from steel metallurgical slags[J]. Materials Research Bulletin, 2021, 141:111353.

[73] HASHIM Z H, KUWAHARA Y, HANAKI A, et al. Synthesis of a CaO-Fe_2O_3-SiO_2 composite from a dephosphorization slag for adsorption of CO_2[J]. Catalysis Today, 2023, 410:264 – 272.

(下转第34页)

[65] 李全,王欢,朱荣,等. 二氧化碳作为连铸保护气体的试验研究[J]. 连铸,2015,40(2):5-9.
LI Quan, WANG Huan, ZHU Rong, et al. Experimental research on using CO_2 as shielding gas in continuous casting[J]. Continuous Casting,2015,40(2):5-9.

[66] 王欢,朱荣,刘润藻,等. 二氧化碳在电弧炉底吹中的应用研究[J]. 工业加热,2014,43(2):12-14;17.
WANG Huan, ZHU Rong, LIU Runzao, et al. Application research of carbon dioxide in EAF bottom blowing[J]. Industrial Heating,2014,43(2):12-14;17.

[67] 李层,李欣,魏光升,等. 115 t量子电弧炉 CO_2 喷吹工艺的影响研究[J]. 炼钢,2023,39(6):1-7;22.
LI Ceng, LI Xin, WEI Guangsheng, et al. Study on the influence of CO_2 injection process of 115 t quantum electric arc furnace[J]. Steelmaking, 2023, 39(6):1-7;22.

(上接第10页)

[74] RASMUSSEN S B, KUSTOV A, SKOTTE J, et al. Characterization and regeneration of Pt-catalysts deactivated in municipal waste flue gas[J]. Applied Catalysis B:Environmental,2006,69(1/2):10-16.

[75] FAN X H, YU Z Y, GAN M, et al. Elimination behaviors of NO_x in the sintering process with flue gas recirculation [J]. ISIJ International,2015,55(10):2074-2081.

[76] CHEN Y G, GUO Z C, WANG Z. Application of modified coke to NO_x reduction with recycling flue gas during iron ore sintering process[J]. ISIJ International, 2008, 48(11):1517-1523.

[77] KUO C H. Design, synthesis, and characterization of transition metal oxide based functional materials for multi-phase catalytic applications[D]. Connecticut: University of Connecticut,2015.

[78] BINDER A J. Synthesis and characterization of support modified nanoparticle-based catalysts and mixed oxide catalysts for low temperature CO oxidation[D]. Knoxville: University of Tennessee,2015.

[79] VÉDRINE J. Heterogeneous catalysis on metal oxides [J]. Catalysts,2017,7(11):341.

[80] ZHANG L L, ZHOU M X, WANG A Q, et al. Selective hydrogenation over supported metal catalysts: From nanoparticles to single atoms[J]. Chemical Reviews, 2020,120(2):683-733.

(上接第20页)

[74] MEI X H, ZHAO Q, MIN Y, et al. Phase transition and dissolution behavior of Ca/Mg-bearing silicates of steel slag in acidic solutions for integration with carbon sequestration[J]. Process Safety and Environmental Protection,2022,159:221-231.

[75] 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]. Journal of Sustainable Metallurgy,2021,7(2):391-405.

[76] ZHAO Q, LI J Y, YOU K W, et al. Recovery of calcium and magnesium bearing phases from iron and steelmaking slag for CO_2 sequestration[J]. Process Safety and Environmental Protection,2020,135:81-90.