

“双碳”背景下钢铁行业 CO₂ 捕集研究进展

魏 静^{1,2,3,4}, 邓 敏^{1,2,3,4}, 银登国^{1,2,3,4,5}, 史 龙^{1,2,3,4}, 秦子康^{2,3,4},
郑峻峰^{2,3,4}, 姚 露^{2,3,4}, 蒋文举^{2,3,4}, 杨 林^{2,3,4}, 代忠德^{2,3,4,*}

(1. 四川大学 建筑与环境学院, 四川 成都 610065; 2. 国家烟气脱硫工程技术研究中心, 四川 成都 610065; 3. 四川省碳中和技术创新中心, 四川 成都 610065; 4. 四川大学 碳中和未来技术学院, 四川 成都 610065; 5. 东方电气集团东方锅炉股份有限公司, 四川 自贡 643000)

摘要: 碳捕集、利用与封存技术(CCUS)为钢铁行业提供了一条现实可行的脱碳路径,是现有高碳生产模式向低碳转型过程中不可或缺的过渡技术。总结了当前钢铁行业的粗钢生产现状及碳排放特征,系统概述并对比了炼钢厂中几种常见的碳捕集技术,包括液体吸收法、固体吸附法和膜分离法的原理和优缺点。同时,回顾了国内外钢铁行业碳捕集技术的试验进展及典型工程应用案例。许多钢铁企业和研究机构正在探索与行业特征相适应的碳捕集工艺,如高炉煤气的化学吸收和物理吸附技术等。然而,由于成本高昂、能耗较大以及基础设施限制,碳捕集技术的大规模应用面临诸多挑战。展望未来,随着全球碳中和目标的推进、政策支持的增强以及技术的突破,碳捕集技术在钢铁行业的应用有望逐步扩大,为行业脱碳进程提供重要支持。

关键词: CCUS; 钢铁工业; 碳排放; 碳中和; 氢冶金

中图分类号: X701

文献标识码: A

Research Progress on CO₂ Capture in the Steel Industry Under the Dual Carbon Background

WEI Jing^{1,2,3,4}, DENG Min^{1,2,3,4}, YIN Dengguo^{1,2,3,4,5}, SHI Long^{1,2,3,4},
QIN Zikang^{2,3,4}, ZHENG Junfeng^{2,3,4}, YAO Lu^{2,3,4}, JIANG Wenju^{2,3,4},
YANG Lin^{2,3,4}, DAI Zhongde^{2,3,4,*}

(1. *College of Architecture and Environment, Sichuan University, Chengdu 610065, China*; 2. *National Engineering Research Centre for Flue Gas Desulfurization, Chengdu 610065, China*; 3. *Carbon Neutral Technology Innovation Centre of Sichuan, Chengdu 610065, China*; 4. *School of Carbon Neutrality Future Technology, Sichuan University, Chengdu 610065, China*;
5. *Dongfang Boiler Co., Ltd., Zigong 643000, China*)

Abstract: The steel industry is a major source of carbon emissions in the global industrial sectors. Driven by the objective of carbon capture, utilization, and storage (CCUS), researchers and industries are developing technologies that are emerging as key solutions, facilitating the transition between traditional blast furnace-basic oxygen furnace (BF-BOF) processes and emerging hydrogen-based metallurgy technologies. This paper provides an overview of the current state of crude steel production and its associated carbon emissions. It also discusses their characteristics in the steel industry. Common carbon capture technologies employed in steel plants, including liquid absorption, solid adsorption, and membrane separation methods, are systematically reviewed and evaluated based on their principles,

收稿日期: 2024-12-10

修回日期: 2025-03-03

接受日期: 2025-03-05

DOI: 10.20078/j.eep.20250316

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(52170112); 东方锅炉股份有限公司资助项目(35G23022)

第一作者: 魏 静(1993—), 女, 陕西咸阳人, 博士研究生, 主要研究方向为气体分离膜。E-mail: 15529589913@163.com

通讯作者: 代忠德(1984—), 男, 云南文山山人, 教授, 主要研究方向为碳中和技术。E-mail: zhongde.dai@scu.edu.cn

benefits, and drawbacks. Additionally, research progress and representative applications of carbon capture technologies in the global steel industry are summarized. Steel companies and academic institutions are actively developing carbon capture processes tailored to the industry's needs, including chemical absorption and physical adsorption for blast furnace gas treatment. International demonstration projects reveal that conventional technologies, such as monoethanolamine (MEA) absorption, can achieve a CO₂ capture rate of 90%, but these technologies require high regeneration energy consumption of 4 - 5 GJ/t CO₂. In contrast, ammonium hydroxide absorption processes can reduce energy consumption to 1.5 GJ/t CO₂. The Japanese COURSE50 project has achieved a 30% reduction in CO₂ emissions per ton of crude steel, while BaYi Iron & Steel has upgraded its molten reduction ironmaking furnace to a European smelting furnace, attaining a CO₂ capture rate of over 97%. However, the global average cost of CO₂ capture remains high. Current challenges include: (1) increased energy consumption (2.5 - 4.0 GJ per ton of steel); (2) infrastructure limitations, as 80% of steel plants lack CO₂ pipeline networks; and (3) insufficient carbon pricing coverage, covering only 30% - 40% of the costs. In the future, technological advancements in novel phase-change absorbents (e.g., eutectic solvents) and metal-organic framework (MOF) adsorption materials are expected to significantly reduce capture costs by 2030 and beyond. This process requires overcoming challenges associated with the collaborative integration of steel plants, chemical industrial parks, and storage sites. For instance, the "hydrogen-carbon co-production" model, a collaboration between HBIS Group and Shell, utilizes captured CO₂ for microalgae cultivation and enhanced oil recovery (EOR), thereby establishing a carbon-negative value chain. With the advancement of global carbon neutrality initiatives, the industrialization of CCUS in the steel sector must rely on policy-driven initiatives and collaborative innovation across the value chain (e.g., hydrogen-carbon co-production models). This review offers a theoretical foundation and practical insights to guide the development of economically viable CCUS pathways, accelerating the steel industry's transition towards carbon neutrality.

Keywords: CCUS; Steel industry; Carbon emissions; Carbon neutrality; Hydrogen-based metallurgy

0 引 言

随着工业化进程的发展,全球 CO₂ 排放量持续增长,成为气候变化的主要驱动因素^[1]。全球 CO₂ 排放主要来源于化石燃料的燃烧,尽管可再生能源比例逐渐上升,煤炭等传统能源仍占主导地位^[2-4]。根据国际能源署(IEA)和全球碳计划(Global Carbon Project)等数据,2023 年全球能源利用和工业过程产生的 CO₂ 排放量达到 374 亿 t^[5]。其中,我国的 CO₂ 排放量增长了约 5.65 亿 t^[6]。

钢铁行业是全球 CO₂ 排放的重要来源,约占全球工业碳排放的 7%~9%^[7]。我国作为全球最大的钢铁生产国,及早推广低碳和零碳技术对于实现碳中和具有重要意义^[8]。碳捕集、利用与封存技术(CCUS)的开展是钢铁行业实现低碳转型的关键途径之一^[9]。尽管 CCUS 技术尚面临高成本和高能耗等挑战,许多钢铁企业已开始积极开展

CCUS 技术的相关研究^[10-12]。

欧盟钢铁业于 2004 年启动超低 CO₂ 排放炼钢工艺研究项目(ULCOS),其中的熔融还原工艺(Hisarna)摒弃了传统高炉工艺中的烧结和焦化 2 个高能耗、重污染的工序,大幅降低煤炭的用量,其与碳捕集技术结合使用,可减少约 70% 的 CO₂ 排放^[13]。2021 年底,韩国浦项钢铁启动了 CCUS 技术示范项目,通过回收生产过程中的 CO₂,每年有望减少 32 万 t 碳排放^[14]。2024 年,美国 CarbonFree 公司将在钢铁公司加里厂新建一座采用 SkyCycle™ 技术的碳捕集装置。该项目预计 2 年后建成并投入使用,每年将捕集 50 000 t 的 CO₂(相当于 12 000 辆轿车的年碳排放量)^[15]。除此之外,美国钢铁公司还与美国国家能源技术实验室合作,在宾夕法尼亚州蒙瓦利厂试点开发了一种先进的膜分离技术,以减少炼铁过程中的碳排放^[16]。近年来,八一钢铁股份有限公司^[17]、

首钢京唐钢铁联合有限责任公司等企业率先将碳捕集技术与实际生产相结合,开展了良好的工业示范^[18]。

随着技术逐步成熟以及政策支持的推动,CCUS 技术有望成为钢铁行业碳减排的关键手段,并为全球碳中和目标的实现提供重要科技支撑。近年来,国内外学者对钢铁行业 CCUS 技术,特别是碳捕集技术进行了广泛研究,取得了大量进展,因此本文对液体吸收法、固体吸附法、膜分离法 3 种主要碳捕集技术进行了概述和比较,重点总结了这些技术在钢铁行业中的典型应用案例,旨在推动碳捕集技术在钢铁企业中的推广与实施,助力钢铁行业实现碳中和目标。

1 钢铁行业粗钢产量及碳排放现状

传统的钢铁生产工艺可分为长流程工艺和短流程工艺,二者在生产路径、原材料使用、能耗和碳排放上有显著区别(图 1)^[19]。长流程工艺是以铁矿石和焦炭为主要原料,通过高炉和转炉完成钢铁生产的传统方法,每吨粗钢排放 1.8~2.2 t CO₂^[20]。短流程工艺是以废钢为主要原料,通过电弧炉熔炼废钢生产钢材的工艺^[21]。短流程工艺利用高温电弧炉将废钢熔化,添加必要的合金元素,调节钢材成分。每吨粗钢排放约 0.3~0.8 t CO₂,具体碳排放量取决于电力来源(清洁能源比例越高,碳排放越低)。截至 2024 年,我国钢铁生产以长流程工艺为主,约 90% 的粗钢通过长流程工艺生产,约 10% 通过短流程工艺生产^[22]。在全球范围内,长流程约占 70%,短流程约占 30%,部分发达国家(如美国)短流程比例更高,甚至超过 60%,这与废钢资源丰富和清洁能源比例较高有关^[23]。随着碳中和目标的推进,我国钢铁行业应大力推进

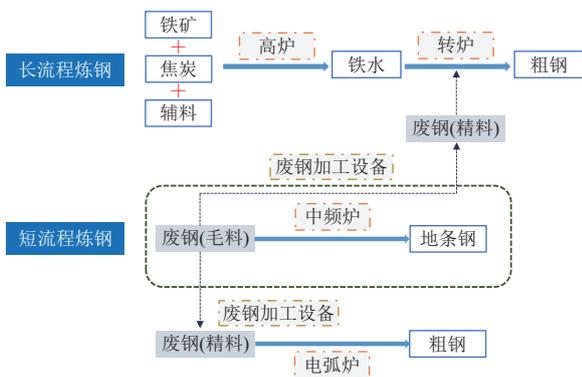


图 1 钢铁生产工艺流程^[19]

Fig. 1 Steel production process flow^[19]

废钢回收体系建设,鼓励电弧炉工艺在资源丰富、环境要求高的地区发展。同时引入低碳技术(如氢还原、高效能高炉)降低碳排放,配套 CCUS 技术,提高绿色生产能力^[24]。

1.1 粗钢产量

根据世界钢铁协会统计数据(图 2)^[25],2000—2010 年,全球钢铁产量呈增长趋势,从 2000 年的 8.5 亿 t 增长到 2010 年的 14.35 亿 t。然而,增速相对平缓,尤其是发达国家(如美国、欧盟等)受到制造业外移、产能过剩等因素的影响,增幅较小。这一时期,我国钢铁产量增长迅速,从 2000 年的约 1.5 亿 t 增至 2010 年的 6.4 亿 t,年均增速超过 10%。这一阶段我国经济迅速增长以及钢铁需求的急剧上升是主要驱动因素^[26]。

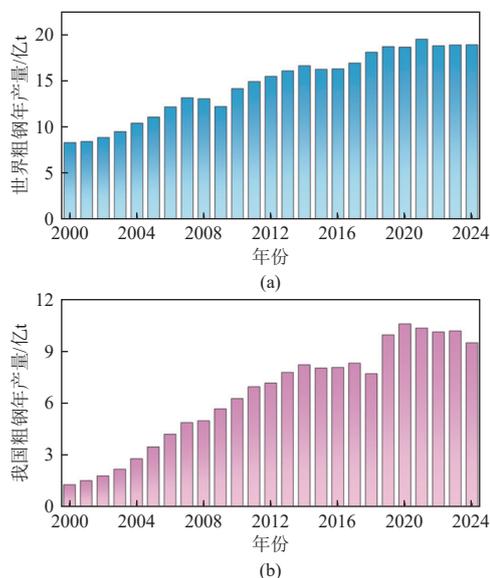


图 2 世界(a)及我国(b)钢铁行业粗钢年产量,数据来源:IEA^[25]

Fig. 2 Annual crude steel production in the global (a) and Chinese (b) steel industries. Data source: IEA^[25]

2010—2020 年,全球钢铁产量总体上升,但增速逐年降低。2010—2014 年,全球粗钢产量年均增长约 4.5%,但从 2015 年起,全球钢铁产量增速放缓,部分年份增幅低于 1%。特别是 2020 年,受到新冠疫情的影响,全球钢铁生产遭遇了短期的生产中断和需求下降。这一阶段,我国的钢铁产量呈现持续增长的趋势,年均增速约为 4%~6%。我国的钢铁产量在全球市场的占比从 2010 年的 47% 增加到 2020 年的 54% 以上。然而受到产能过剩等因素的影响,我国粗钢产量在 2015 年后逐渐趋于饱和。

全球钢铁产量在 2020 年因疫情暂时回落,但

随着全球经济逐步复苏,产量再次上升。2021年,全球粗钢产量达到19.63亿t,并维持在较高水平。这一阶段,我国钢铁行业一度迎来了生产恢复的高峰,产量增长至10亿t。然而,随后我国推行产能淘汰、绿色转型和环保政策,导致了我国钢铁产量的回落^[27]。2022年产量回落至约9.9亿t,预计2024年将继续下降至9.4亿t。

1.2 钢铁行业碳排放特征

钢铁行业是全球碳排放的主要贡献者之一,占全球工业碳排放的25%左右,占全球总碳排放量的7%~9%^[28]。我国作为全球最大的钢铁生产国,钢铁行业在全国碳排放总量中占有重要地位。

长流程生产工艺(高炉-转炉法)是目前全球钢铁行业的主导工艺,占全球粗钢产量的70%以上^[29]。在我国,该工艺的产量占比更高,达90%以上。在长流程工艺中,我国的CO₂排放强度约为1.8~2.2 t CO₂/t 钢,高于全球平均值^[30]。根据德国蒂森克虏伯钢铁公司(Thyssenkrupp Steel)的统计数据,各工序的CO₂排放比重如图3所示^[31]。其中,高炉炼铁阶段的碳排放量占73.6%,这是因为该过程需要大量的焦炭作为还原剂和热源,焦炭的燃烧和还原反应都伴随着大量的CO₂排放。因此,为减少CO₂排放,当前的碳减排技术在替代燃料和低碳还原剂方面进行了广泛探索。首先可以使用H₂替代焦炭作为还原剂进行铁矿石还原反应,生成的副产品是H₂O而非CO₂,这大大减少了高炉工序的碳排放^[32]。另一方面,结合CCUS技术将高炉工序中产生的CO₂捕集并压缩,转运到地下深层岩石储层或其他封存设施进行长期储存,从而避免其进入大气。其次,将捕集到的CO₂转化为化学品(如合成燃料、化肥、塑料等)或用于增强油气开采等工艺,以实现碳循环利用。

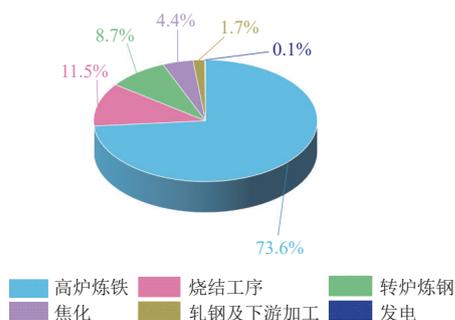


图3 长流程工艺各工序 CO₂ 排放所占比重^[31]

Fig. 3 Proportion of CO₂ emissions from each process in the long process^[31]

2 钢铁行业主要的 CO₂ 捕集技术

钢铁行业的 CO₂ 捕集技术为燃烧后捕集^[33],是指在钢铁生产过程中,燃料(如焦炭或天然气)与 O₂ 反应,生成 CO₂ 和水蒸气,这些气体是最主要的 CO₂ 排放源。由于废气中的 CO₂ 浓度较低,捕集效率较低,且需要大量能源来驱动溶剂再生和压缩过程,CO₂ 捕集的能耗和成本较高,但设备投资和维护成本较低,是目前最常见的 CO₂ 捕集技术之一^[34]。常见的燃烧后捕集包括溶液吸收法^[35]、固体吸附法^[36]和膜分离法^[37]等。

2.1 溶液吸收法

溶液吸收法是一种通过液体溶剂与气体中的目标组分(如 CO₂)发生物理或化学反应,从而实现气体分离和捕集的技术^[38]。在此过程中,气体通过吸收塔与液体溶剂接触,目标气体溶解到溶剂中,形成溶液或发生化学反应,之后可以通过压力或温度变化将溶解的气体从溶剂中释放出来^[39]。按吸收原理分为物理吸收法^[40]、化学吸收法^[41]以及物理-化学混合溶液吸收法^[42]等,各方法的性能对比见表1。

物理吸收法是利用 CO₂ 在低温、高压条件下于溶剂(如甲醇、N-甲基吡咯烷酮、聚乙二醇二甲醚等)中具有较高溶解度的特性,将其从气体混合物中分离出来。吸收后,通过降低压力或升高温度实现溶剂的再生,并释放捕获的 CO₂^[43]。在低温、高压条件下,溶剂对 CO₂ 的吸收效果较好,比如超低温 Rectisol 工艺使用低温甲醇溶剂高效吸收并去除气体中的 CO₂、H₂S 等酸性气体,是一种广泛应用于天然气净化、废气处理和 CO₂ 捕集的成熟技术,具有高效、低能耗、适应性强等优点^[44]。

化学吸收法是通过碱性吸收剂(通常是胺类溶液,如 MEA)与废气中 CO₂ 反应,形成可逆的盐类物质。吸收 CO₂ 的溶剂经过加热再生以循环使用^[45]。化学吸收法工艺成熟且应用广泛,捕集效率高,能够处理低浓度 CO₂。典型的化学吸收工艺如图4所示,预处理烟气首先通过吸收塔与吸收液接触,CO₂ 与溶剂反应生成可逆的碳酸氢盐或胺复合物,实现有效捕集。吸收后的溶剂被输送到再生塔(或脱附塔),通过加热释放溶剂中的 CO₂。再生后的溶剂被冷却后送回吸收塔,继续循环使用。整个系统形成封闭循环,溶剂被不断吸收、再生和重复使用。

表 1 溶液吸收法性能比较

Table 1 Performance comparison of solution absorption methods

溶液吸收法	
吸收剂种类	a. 水溶性胺类: MEA、DEA、MDEA、DGA等 b. 水溶性有机溶剂: 醇类、醚类、酮类等 c. 离子液体: 如[BMIM]PF ₆ 、[EMIM]EtSO ₄ 等
吸收性能	a. 高选择性: 高效分离CO ₂ 、H ₂ S和NH ₃ 等气体, 尤其适用于低浓度气体的吸收, CO ₂ /N ₂ 选择性: 50~200; H ₂ S/CH ₄ 选择性: 500~1 000 b. 适用范围广: 可处理多种气体, 适用于气体分离和废气处理 c. 吸收效率高: 适合高浓度气体的吸收, 尤其是工业排放的CO ₂ 等, 吸收率可达90%~99%
吸收机制	a. 物理吸收: 通过气体与溶剂之间的物理相互作用力(例如范德华力或氢键)来实现 b. 化学吸收: 气体与溶剂中的化学物质发生反应而被吸收 c. 物理-化学吸收: 通过结合物理溶解和化学反应的双重机制, 提高了气体的吸收效率和选择性
优点	a. 高效气体分离: 尤其适用于CO ₂ 等气体的吸收 b. 操作简单: 设备简单, 操作直观 c. 选择性强: 溶剂可以根据目标气体进行优化, 具备较高的选择性 d. 适用于高浓度气体
缺点	a. 能耗高: 需要加热溶液再生溶剂, 再生能耗较大, 约为2~4 GJ/t CO ₂ b. 溶剂损失: 溶剂可能挥发或降解, 需要定期补充和更换 c. 溶剂老化: 使用过程中溶剂逐渐失去吸收能力 d. 溶剂腐蚀性: 某些溶剂可能对设备造成腐蚀

注: Monoethanolamine(MEA): 乙醇胺; Diethanolamine(DEA): 二乙醇胺; N-MethyldiethanolaMine(MDEA): N-甲基二乙醇胺; 2-(2-Aminoethoxy)ethanol(DGA): 二甘醇胺; [BMIM]PF₆: 1-丁基-3-甲基咪唑六氟磷酸盐; [EMIM]EtSO₄: 1-乙基-3-甲基咪唑乙基磺酸盐。

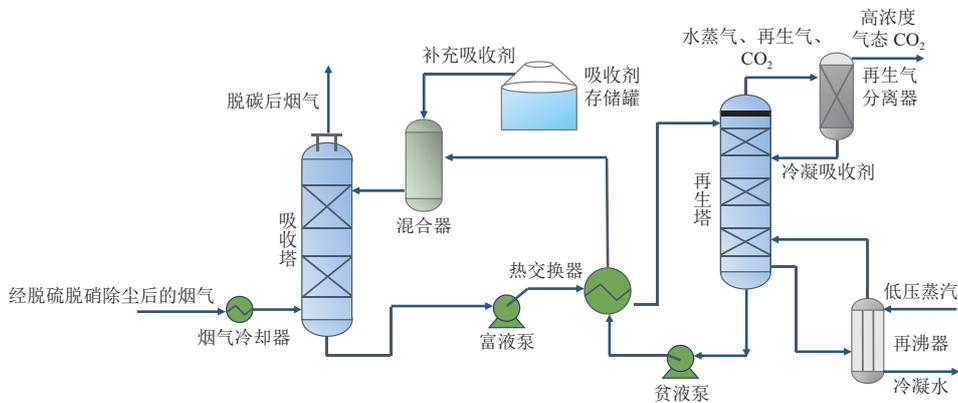


图 4 化学吸收法碳捕集工艺流程图

Fig. 4 Process flow diagram of CO₂ capture using chemical absorption

2.2 固体吸附法

固体吸附法作为碳捕集领域的重要技术手段,其核心机理是通过固体吸附剂表面活性位点与CO₂间的相互作用实现选择性捕集^[46]。典型的固体吸收工艺如图5所示^[47],根据吸附作用力的本质差异,可分为物理吸附^[48]与化学吸附^[49]2类典型机制。物理吸附是CO₂通过范德华力与固体表面相互作用的过程,通常发生在较低的温度和压力条件下。与化学吸附不同,物理吸附的结合

力较弱,不会导致吸附物的化学结构变化。其主要特征是吸附热较低,吸附过程通常可逆,且吸附量受温度和压力的影响较大。在物理吸附过程中,气体分子与固体表面之间的相互作用力主要包括伦敦力、静电力及偶极-偶极作用力,这些作用力不需要能量的显著变化,通常在常温和低压条件下即可实现吸附。物理吸附广泛应用于气体分离、催化、储能等领域,其优势在于吸附剂的可重复使用性和成本效益。然而,由于吸附力较弱,

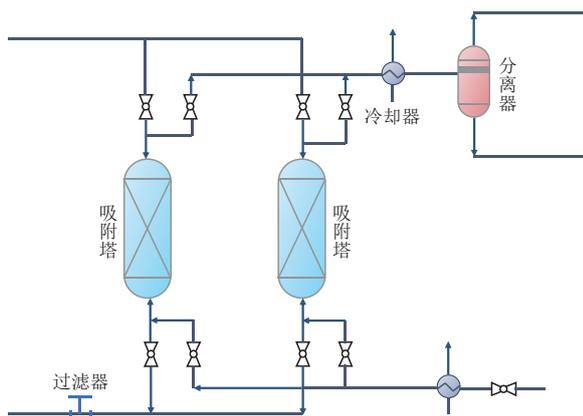


图 5 固体吸附法工艺流程图^[47]

Fig. 5 Process flow diagram of CO₂ capture using solid adsorption^[47]

物理吸附的选择性和吸附量相较于化学吸附较低。因此在需要高选择性和高容量的应用场景中,物理吸附可能受到一定的限制。总体而言,物理吸附是一种高效、经济的吸附机制,适用于低能耗、可逆吸附需求的应用领域,但仍需结合表面设计和吸附材料的开发优化性能。常见的吸附剂有活性炭、沸石、金属有机框架(MOF)材料、活性铝土矿和硅藻土等。各方法的性能对比见表 2。

化学吸附是指分子或原子在固体表面形成强烈的化学键合(如共价键、离子键或金属键),是一

种比物理吸附更为紧密的吸附过程。例如,气体 H₂、O₂ 和 N₂ 在金属表面的化学吸附会通过原子交换或电子转移形成稳定的吸附态。常见的化学吸附方法包括通过碱性或氨基功能化的吸附剂与 CO₂ 反应^[50]。常见的吸附剂有固体胺、硅酸盐和碳酸盐等^[51]。化学吸附的吸附量通常低于物理吸附,主要受限于单层吸附机制和表面化学反应导致的活性位点饱和(如氨基改性 SiO₂ 的 CO₂ 容量为 1~2 mmol/g^[52], 低于活性炭的 2~4 mmol/g^[53])。然而,化学吸附凭借其高选择性(如 ZnO 脱硫的 H₂S/CH₄ 选择性>1 000^[54])和特异性,在痕量气体分离(如直接空气捕集 CO₂)和催化领域具有不可替代性;物理吸附则因高容量(活性炭 CO₂ 吸附量可达 10 mmol/g@1 MPa^[55])和快速再生特性,更适用于工业废气处理等高效场景。通过材料改性(如 MOFs 功能化提升容量至 3 mmol/g^[56])和工艺优化(多级动态吸附),可突破化学吸附的容量瓶颈,实际应用中需根据目标气体浓度、选择性和能耗要求综合权衡吸附机制。

化学吸附的速率通常由表面反应控制,即吸附质分子与表面原子之间的相互作用决定。吸附过程的速率常常受到温度、压力和表面催化性质等因素的影响。其中,表面的活性位点是决定化学吸附发生与否的关键。金属催化剂、氧化物、

表 2 固体吸附法性能比较

Table 2 Performance comparison of solid adsorption methods

固体吸附法	
吸附剂种类	<ul style="list-style-type: none"> a. 活性炭: 颗粒活性炭、纤维活性炭等 b. 分子筛: 如沸石、SiO₂、Al₂O₃等 c. MOFs: ZIF-8、UiO-66等 d. 碳材料: 如碳纳米管、高温炭黑等
吸附性能	<ul style="list-style-type: none"> a. 高比表面积: 如MOFs、活性炭等材料具有较高的比表面积,适合高浓度气体的吸附 b. 吸附容量: 具有较高的吸附容量,适用于处理大量气体 c. 调节性: 分子筛和MOFs可以通过孔径设计和功能化进行优化,增强气体的选择性
吸附机制	<ul style="list-style-type: none"> a. 物理吸附: 通过范德华力、偶极相互作用等弱力进行吸附,使用Langmuir/Freundlich模型分析 b. 化学吸附: CO₂与固体吸附剂表面发生化学反应,形成化学键(如共价键、离子键) c. 分子筛效应: 基于孔隙结构和分子尺寸、形状选择性吸附气体。CO₂动力学直径: 0.33 nm, CH₄动力学直径: 0.38 nm(孔径<0.38 nm时选择性吸附CO₂)
优点	<ul style="list-style-type: none"> a. 能量消耗低: 固体吸附剂需要较低的能耗进行再生 b. 循环性能好: 吸附剂可以多次再生使用,性能保持稳定 c. 成本相对较低: 常见吸附剂(如活性炭、分子筛等)成本较低
缺点	<ul style="list-style-type: none"> a. 再生过程复杂: 固体吸附剂再生可能需要高温、低压气体等特殊条件 b. 选择性较差: 某些吸附剂对某些气体的选择性较差 c. 吸附容量有限: 当吸附剂饱和后,需要再生或更换 d. 环境影响: 如温度、湿度对吸附性能影响较大,温度每升高10 °C,容量下降5%~20%

碳材料等都有不同的表面结构和性质,会对化学吸附产生显著影响。另外,当温度升高时,化学反应的活化能降低,吸附过程更容易进行;压力增大时,气体分子更容易接近固体表面,吸附量通常会增加。在催化反应中,催化剂表面的化学吸附是促进反应进行的关键。例如,在催化剂表面,反应物的吸附和活化可大幅降低反应的能垒。尽管化学吸附在许多领域表现出优异的性能,但仍然面临一些挑战。在复杂环境中,如何实现对特定气体的选择性吸附仍然是一个亟待解决的问题。另一方面,某些吸附材料在长期使用过程中可能会发生衰退或失活,导致其吸附性能下降。

2.3 膜分离法

气体膜分离是在压力驱动下,由于2种或多种混合气体(如CO₂, CH₄和N₂等)透过膜的传输速率不同而产生分离效果的气体分离技术,具有

高效、绿色的特点(图6)^[57]。表3列举了膜分离法的分离特征,与其他分离工艺相比,膜分离技术具有占地面积小、能耗低、易于扩大规模并融入现有技术等固有优势。这些因素能够简化操作,降低建设和运营成本,使膜分离法成为工业CO₂捕集的可行方法。

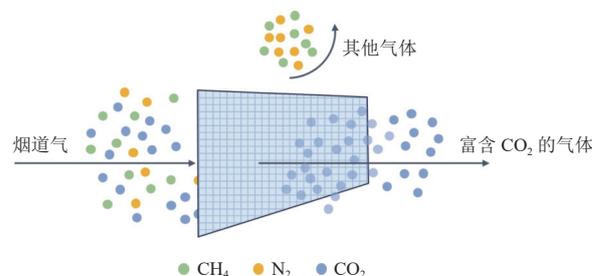


图6 膜分离法工作原理示意图

Fig. 6 Schematic diagram of the working principle of membrane separation method

表3 膜分离法分离特征

Table 3 Separation characteristics of membrane separation methods

膜分离法	
膜材料种类	a. 聚合物膜: 如Pebax、PTFE、PI等。CO ₂ 渗透性: 10~100 MPa, CO ₂ /N ₂ 选择性: 20~50(Pebax) b. 无机膜: 陶瓷膜、金属膜等 c. 复合膜: MOFs、纳米材料复合膜等
膜性能	a. 适用于多种气体的分离: 如CO ₂ /N ₂ 、CO ₂ /CH ₄ 等, 适应性强 b. 膜的选择性和渗透性可调: 通过改变膜的孔径和材料可以调节分离效率 c. 高分离效率: 膜材料可以通过不同的制备方式获得较高的选择性。单级膜CO ₂ 回收率达80%~95%
分离机制	a. 分子筛分: 基于分子或颗粒的尺寸差异, 选择性通过膜孔 b. 溶解-扩散: 气体分子在膜中溶解, 并扩散到膜的另一侧 c. 促进传递: CO ₂ 与膜内特异性反应基团间发生的可逆化学反应, 显著促进CO ₂ 在膜内的转运
优点	a. 设备简单: 操作灵活, 设备较简单, 占地面积小(比吸收塔减少50%~80%) b. 节能高效: 与其他分离方法(吸收法的2~4 GJ/t CO ₂)相比, 膜分离法能量消耗较低(0.1~0.5 GJ/t CO ₂) c. 可调节性强: 膜孔径可以根据需要调节, 分离效果可调 d. 适用于高纯度气体分离
缺点	a. 膜污染: 膜容易被有机物、尘土等污染, 影响长期使用 b. 选择性差: 相比液体吸收法或固体吸附法, 某些气体的分离效果较差 c. 膜稳定性差: 部分膜在极端条件下(如高温、高压)易损坏或老化 d. 部分膜材料成本较高: 特别是高性能膜和复合膜材料的成本较高 e. 膜寿命: 聚合物膜更换周期: 2~5 a; 膜更换成本占总运营成本的30%~60%

注: Pebax: 聚醚嵌段酰胺; PTFE: 聚四氟乙烯; PI: 聚酰亚胺。

将膜分离与液体吸收相结合的膜吸收技术,是通过气体在液体中的溶解和膜的选择性传输特性实现气体的分离与吸收^[58]。膜吸收法利用膜的选择透过性,使气体通过膜的表面进入膜的另一侧,与液体发生吸收反应。气体通过膜的扩散作用传递到膜的另一侧,然后与液体发生溶解或化

学反应,从而达到气体分离的目的。膜在此过程中起到分隔作用,并提高气体和液体的接触效率^[59]。

膜材料在气体分离中扮演着至关重要的角色,是实现高效气体分离过程的核心^[60]。目前,常见的气体分离膜材料包括有机聚合物膜^[61]、无机膜^[62]和混合基质膜(MMMs)^[63]。高分子聚合物膜

是目前应用最为广泛的气体分离膜材料,具有可加工性好,价格低廉等优势,在气体分离膜市场中占比较高^[64]。相比于聚合物膜,无机膜在高温下表现出优异的稳定性,并且具有更高的气体通量或选择性,例如 MOF 膜、沸石膜、陶瓷膜和二氧化硅膜等^[65]。然而,无机膜的生产成本较高,其孔径分布难以精确调控,这阻碍了无机膜的全面商业化^[66]。为了结合聚合物和无机填料在气体分离方面的优势,同时弥补各自的不足,将 2 种材料相结合制备 MMMs,有望得到高性能的气体分离膜材料^[67]。

3 碳捕集技术在钢铁行业的工程应用

钢铁行业中,尤其是在高炉、转炉等烟气处理过程中,最常用的 CO₂ 捕集方法是溶液吸收法,因其技术成熟、分离效率高,并且能够处理大量低浓度 CO₂ 烟气。固体吸附法通常用于小规模或中等规模的 CO₂ 捕集,目前在钢铁行业中的应用不如溶液吸收法普及。膜分离法在钢铁行业的应用还在发展阶段,但由于其能效较高、占地面积小,也逐渐成为研究热点。

阿联酋政府、马斯达尔(Masdar)清洁能源公司、阿布扎比国家石油公司(ADNOC)及阿联酋钢铁公司合作,于 2016 年建成全球钢铁行业首个实现全流程商业化运行的 CCUS 工业项目^[68]。针对阿联酋钢铁公司位于阿布扎比的钢铁厂,捕集高炉和转炉产生的烟气。该项目采用 MEA 吸收工艺,并将捕集的 CO₂ 经加压、脱水处理后得到纯度达 98% 的 CO₂。该项目每年可捕集 80 万 t CO₂,使碳排放量大幅降低 22%,再生能耗为 4~5 GJ/t CO₂。捕集端(钢铁厂)、运输(ADNOC 管道网络)、封存端(油田 EOR)形成闭环,降低边际成本,捕集的 CO₂ 经提纯后可用于提高石油采收率。

COURSE50 是由日本钢铁联合会(JISF)主导的一项研究项目,旨在通过创新技术减少钢铁生产过程中的 CO₂ 排放量^[69]。COURSE50 项目通过富氢还原和捕集回收高炉煤气中 CO₂ 降低碳排放。前者是在传统高炉中引入 H₂ 作为还原剂替代部分焦炭,以减少 CO₂ 排放;后者是采用新日铁住金公司开发的 ESCAP(能源节约 CO₂ 吸收工艺)化学吸收工艺(图 7),使用新型胺液吸收剂对炼钢厂高炉中产生的 CO₂ 进行分离和捕集^[70]。2005 年,新日铁住金在君津厂建设了 CO₂ 回收量

为 1 t/d 的试验装置,成功后又于 2010 年建设了 30 t/d 回收量的装置,提升了吸收剂性能,能耗降低了 40% 以上,未来目标将 CO₂ 单位分离成本降低至 2 000 JPY(1 JPY≈0.05 RMB)。该项目的再生能耗为 2.3 GJ/t CO₂,运行成本为 18 USD/t CO₂(1 USD≈7.33 RMB)。相比传统溶剂,ESCAP 工艺采用了优化的溶剂配方,显著提高了 CO₂ 的吸收率和吸收速度。

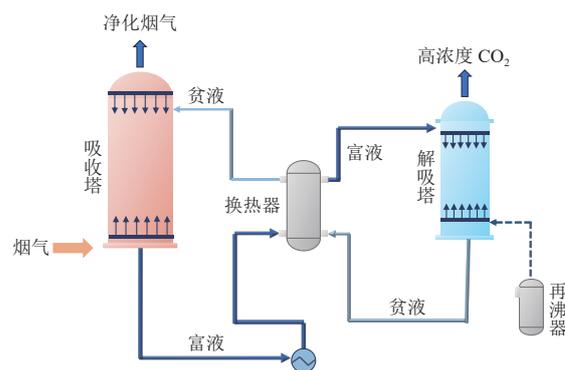


图 7 ESCAP 化学吸收工艺^[70]

Fig. 7 ESCAP chemical absorption process^[70]

2011 年,韩国浦项产业科学研究院在浦项钢铁厂建立了氨水吸收捕集 CO₂ 的中试项目,将钢铁厂中的低温废热作为吸收剂再生的热能^[71]。该装置自运行以来,其 CO₂ 捕集率超过 90%,CO₂ 纯度高于 95%,吸收剂再生能耗为 1.5~2.5 GJ/t CO₂,捕集装置的运行成本低至 20 USD/t。与传统 MEA 吸收工艺相比,氨水溶液适用于低浓度 CO₂ 烟气的捕集。它的吸收能力较强且能耗较低,但面临氨气泄漏、腐蚀性强和废水处理等问题。

国内钢铁企业中,台湾中钢公司采用 MEA 溶液进行 CO₂ 捕集试验并取得了显著成果。CO₂ 回收率超过 95%,能耗为 5.4 GJ/t^[72]。2020 年,八一钢铁公司将熔融还原炼铁炉改造升级为欧冶炉,并使用有机胺吸收技术(NCAM)捕集煤气中的 CO₂^[73]。经过调试,该项目的年碳捕集量达到约 2.5 万 t,CO₂ 捕集率超过 97%。脱碳后的煤气 CO₂ 浓度(以体积分数计)小于 1%,捕集的 CO₂ 纯度高于 99%。碳捕集系统的稳定运行率超过 98%,吸收剂循环利用率高于 99%。该系统捕集到的高纯 CO₂ 可以在高温冶炼过程中作为气体介质用于钢铁内部,提高冶炼过程的能源利用效率。相比传统的胺类溶液,NCMA 技术所用的溶剂具有较低的挥发性和腐蚀性,减少了对设备的

腐蚀,同时产生的废物较少,对环境的影响较小。2022年底,河钢集团张宣科技120万t氢冶金示范工程一期全线贯通。该工程(以下简称河钢氢冶金示范工程)是全球首例富氢气体(焦炉煤气)零重整竖炉直接还原氢冶金示范工程,该工程采用有机胺法捕集竖炉煤气的CO₂,以MDEA作为吸收剂,竖炉煤气中的CO₂浓度约为6%,CO₂年捕集量为6万t。

与单一胺吸收法相比,通过合理选择和搭配不同胺类溶液,能够优化CO₂捕集过程,具有提高吸收效率、降低能耗、减少腐蚀性、提升系统稳定性等多重优势^[74]。徐冬等^[75]选取了再生热耗低空间位阻胺AMP(A)和三级胺(MDEA)(C)作为主剂,添加一级胺(E)与环状胺(U)制备了新型CEU型混合胺吸收剂,通过200m³/h中试与万吨级工业装置测试优化运行参数并完成工业验证。结果表明吸收剂的CO₂脱除率达90%,最优再生热耗达2.42GJ/tCO₂,比30%MEA标准吸收剂降低了36.3%,并在1万t/a工业装置上完成了720h的稳定运行。日本三菱重工开发了以位阻胺为主要成分的KS-1吸收剂,与传统的胺类吸收剂(如MEA)相比,KS-1吸收剂的热稳定性较好。再生能耗约为3.0GJ/tCO₂,相比MEA吸收剂能耗可降低20%以上^[76]。英国Carbon Clean Solutions公司开发了APBS吸收剂,并在碳捕集规模为6t/d的中试装置进行了测试,其中CO₂能耗可低至2.5GJ/tCO₂^[77]。南化集团研究院在胜利电厂4万t/a的碳捕集装置上测试了新开发混合胺吸收剂,结果显示再生能耗相比MEA法降低了30%以上^[78]。

首钢京唐钢铁联合有限责任公司建成了国内外首例“CO₂绿色洁净炼钢技术及应用”项目^[79]。该项目采用变压吸附法从石灰窑尾气中回收CO₂,成功解决了炼钢脱磷、脱氮和控氧等工艺难题,应用于转炉吹炼,每年可减排5万tCO₂,提高了炼钢工序的冶金效果,形成了内部碳素流的小循环,开辟了炼钢过程中CO₂规模化消纳利用的新路径。结合加压液化技术可以使CO₂提纯至99.8%。项目完成工程示范并推广应用后,近3年合计产钢3879.2万t,实现工业利用CO₂31.5万t,共计减排86.0万tCO₂、10.3万t烟尘,为生态环境治理做出实质性贡献。该项目的运行成本为18USD/tCO₂。瑞典LKAB公司基于欧盟超低CO₂炼钢(ULCOS)项目开发的顶煤气循环高炉试验装置,结合真空变压吸附技术捕集高炉煤气中的

CO₂,是钢铁行业突破性低碳技术的重要尝试。整体工艺可实现76%的CO₂减排潜力,远超传统末端捕集项目。尽管仍需攻克规模化与成本难题,该技术为欧洲乃至全球钢铁行业提供了一条渐进式脱碳路径,尤其在现有高炉占主导的市场中意义重大^[13]。

钢铁产业作为碳减排重点领域,近年来围绕高炉尾气展开多项碳捕集技术验证。从现有工程案例来看,液态胺法在含碳烟气处理中占据主导地位,即便传统MEA溶剂易受硫化物影响,但经配方优化的复合胺基溶剂已显著提升抗硫性能。相较于需要二次提纯的固态吸附工艺,液相法可产出超高纯度的CO₂,大幅简化了后续封存或资源化流程。尽管该技术体系趋于完善,其再生环节的能源消耗仍制约推广进程,当前技术迭代聚焦于开发低能耗溶剂体系,并耦合钢铁生产余热回收网络实现系统能效跃升。

4 结论与展望

本文从钢铁行业碳减排出发,总结了国内外粗钢产量变化及碳排放现状。对钢铁行业常见的几种碳捕集技术进行了总结对比。同时,收集并分析了国内外钢铁行业的典型碳捕集案例。基于现有研究,未来可以考虑从以下方面进行拓展。

(1)在粗钢生产过程中,积极推广电炉炼钢,利用废钢循环,减少高炉-转炉长流程的CO₂排放。通过H₂直接还原铁矿石,减少化石燃料的使用。同时增加可再生能源在钢铁冶炼中的应用,减少煤炭依赖。

(2)为提高碳捕集系统的综合性能,应开发具有多种功能的材料。例如,将吸附和催化性能结合,可以在捕集CO₂的同时将其转化为有价值的化学品或燃料。也可以将不同类型的捕集技术(如吸附法、吸收法和膜分离法)进行集成,提高整体捕集效率。例如,复合材料和多层结构的膜材料能够在不同的阶段进行有效分离,达到更高的CO₂捕集效果。

(3)为了提升吸附性能,可将MOFs与活性炭、沸石等传统吸附材料复合制备复合吸附剂,同时提高吸附容量和吸附速率。此外,一些新型复合材料(如纳米结构材料、功能化吸附剂)能够增加吸附剂的比表面积和孔隙结构,从而进一步提高吸附性能。未来,吸附剂的研发可以与现有碳捕集技术(如化学吸收、膜分离、深冷法等)集成,

例如,使用吸附剂进行预处理或深度去除 CO₂ 后与化学吸收法结合,实现高效碳捕集。

(4)捕集材料的微观结构设计 with CO₂ 捕集-再生性能之间的耦合匹配机制是未来工业碳捕集技术发展的关键。通过优化材料的孔隙结构、化学官能团、热稳定性以及湿气适应性,能够实现高效的 CO₂ 捕集和低能耗的再生过程。随着纳米技术、智能材料和人工智能等新兴技术的应用,捕集材料的微观结构设计将趋向智能化、自适应和高效化。通过这些创新,捕集材料有望在实际工业碳捕集工艺中发挥更大的作用,推动碳减排技术向着更低成本、更高效能的方向发展。

参考文献 (References) :

- [1] BEN AMARA D, QIAO Jiajun. From economic growth to inclusive green growth: How do carbon emissions, eco-innovation and international collaboration develop economic growth and tackle climate change?[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 425: 138986.
- [2] LIU Lijing, JIANG Hongdian, LIANG Qiaomei, et al. Carbon emissions and economic impacts of an EU embargo on Russian fossil fuels[J]. *Nature Climate Change*, 2023, 13: 290-296.
- [3] XIAO Yaping, MA Dalai, ZHANG Fengtai, et al. Spatiotemporal differentiation of carbon emission efficiency and influencing factors: From the perspective of 136 countries[J]. *Science of the Total Environment*, 2023, 879: 163032.
- [4] EGERER J, FARHANG DAMGHANI N, GRIMM V, et al. The industry transformation from fossil fuels to hydrogen will reorganize value chains: Big picture and case studies for Germany[J]. *Applied Energy*, 2024, 358: 122485.
- [5] CHEN Tianyu, WANG Chaoqiang, CHENG Linxiao, et al. Carbon dioxide resource utilization in methanol products: Carbon emission projections, visual analysis, life cycle assessment[J]. *Journal of the Indian Chemical Society*, 2024, 101(10): 101336.
- [6] FLORES R, MOORE T. Coal and coalbed gas future directions and opportunities (second edition) [M]. Amsterdam: Elsevier Science, 2024.
- [7] XIN Haojin, WANG Shanshan, CHUN Tiantian, et al. Effective pathways for energy conservation and emission reduction in iron and steel industry towards peaking carbon emissions in China: Case study of Henan[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 399: 136637.
- [8] ZHANG Jingshu, SHEN Jialin, XU Lisong, et al. The CO₂ emission reduction path towards carbon neutrality in the Chinese steel industry: A review[J]. *Environmental Impact Assessment Review*, 2023, 99: 107017.
- [9] SAXENA A, PRAKASH GUPTA J, TIWARY J K, et al. Innovative pathways in carbon capture: Advancements and strategic approaches for effective carbon capture, utilization, and storage[J]. *Sustainability*, 2024, 16(22): 10132.
- [10] ZHANG Yingyi, YU Laihao, CUI Kunkun, et al. Carbon capture and storage technology by steel-making slags: Recent progress and future challenges[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2023, 455: 140552.
- [11] SUBRAVETI S G, RODRÍGUEZ ANGEL E, RAMÍREZ A, et al. Is carbon capture and storage (CCS) really so expensive? An analysis of cascading costs and CO₂ emissions reduction of industrial CCS implementation on the construction of a bridge[J]. *Environmental Science & Technology*, 2023, 57(6): 2595-2601.
- [12] SUN M, PANG K, SHAO S, et al. Application, challenges, and prospects of CCUS technology in steel industry[J/OL]. *Journal of Sustainable Metallurgy*: 1-18. <https://doi.org/10.1007/s40831-024-00997-x>.
- [13] ABDUL QUADER M, AHMED S, DAWAL S Z, et al. Present needs, recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide (CO₂) steelmaking (ULCOS) program[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 55: 537-549.
- [14] YANG Yang, XU Wenqing, WANG Yan, et al. Progress of CCUS technology in the iron and steel industry and the suggestion of the integrated application schemes for China[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2022, 450: 138438.
- [15] 植恒毅. 美国钢铁公司开展碳捕集和利用 [N]. 世界金属导报, 2024-07-09(09A03 版).
ZHI Hengyi. U. S. steel corporation launches carbon capture and utilization[N]. *World Metal Herald*, 2024-07-09(09A03 版).
- [16] 工艺简单降成本: NETL 与美国钢铁合作开发碳捕获新技术 [N]. 中国宝武报, 2023-10-31(04 版).
Simplified process reduces costs: NETL and U. S. steel collaborate on new carbon capture technology[N]. *China Baowu Herald*. 2023-10-31(04 版).
- [17] 银雨. 八一钢铁公司低碳物流路径优化的研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2020: 1-56.
YIN Yu. Study on low-carbon logistics path optimization of Bayi steel company[D]. Urumqi: Xinjiang University, 2020: 1-56.
- [18] 张福明. 首钢绿色低碳炼铁技术的发展与展望 [J]. 钢铁, 2020, 55(8): 11-18.
ZHANG Fuming. Development and prospect of green and low carbon ironmaking technologies in Shougang[J]. *Iron and Steel*, 2020, 55(8): 11-18.
- [19] QUADER M A, AHMED S, GHAZILLA R A R, et al. A comprehensive review on energy efficient CO₂ breakthrough technologies for sustainable green iron and steel manufacturing[J]. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2015, 50: 594-614.
- [20] CAVALIERE P. Blast furnace: Most efficient technologies

- for greenhouse emissions abatement[M]//Clean Ironmaking and Steelmaking Processes. Cham: Springer International Publishing, 2019: 167-273.
- [21] HERNÁNDEZ J D, ONOFRI L, ENGELL S. Modeling and energy efficiency analysis of the steelmaking process in an electric arc furnace[J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2022, 53(6): 3413-3441.
- [22] QIU Ziyang, SUN Jingchao, DU Tao, et al. Impact of hydrogen metallurgy on the current iron and steel industry: A comprehensive material-exergy-emission flow analysis[J]. *Applied Energy*, 2024, 356: 122452.
- [23] 邵雁, 谢颖, 刘子豪, 等. 钢铁行业碳捕集与利用技术研究进展 [J/OL]. 发电技术: 1-12[2025-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.tk.20241203.1543.004.html>.
SHAO Yan, XIE Ying, LIU Zihao. Research progress on carbon capture and utilization technology in steel industry[J/OL]. *Power Generation Technology*: 1-12[2025-02-27]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1405.tk.20241203.1543.004.html>.
- [24] 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.
- [25] LAVRENNENKO V, YANHOL H, STEPANENKO A, et al. Global data toolbox for estimation export-import potential based on world steel association statistic [C]//2021 11th International Conference on Advanced Computer Information Technologies (ACIT). IEEE, 2021: 402-405.
- [26] AGENCY I E. Energy Statistics of Non-OECD Countries 2014[M]. Paris: OECD, 2014.
- [27] HUSSEIN ALI A. Effect of iron and steel industry on the gross domestic production in the GCC states for the period 2010-2020: Gobb doglas function[J]. *Kurdish Studies*, 2023, 11(3): 817-824.
- [28] ZHANG Xinyu, JIAO Kexin, ZHANG Jianliang, et al. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2021, 306: 127259.
- [29] ZHANG Fucheng, HONG Lukuo, XU Ying. Prospects for green steelmaking technology with low carbon emissions in China[J]. *Carbon Energy*, 2024, 6(2): e456.
- [30] XU Wenqing, WAN Bin, ZHU Tingyu, et al. CO₂ emissions from China's iron and steel industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2016, 139: 1504-1511.
- [31] 王维兴. 钢铁企业 CO₂ 排放计算方法探讨 [C]//中国金属学会. 第八届(2011)中国钢铁年会论文集. 北京, 2011: 1938-1940.
WANG Weixing. Discussion on calculation methods of CO₂ emissions in iron and steel enterprises[C]//Chinese Society for Metals (Ed.). Proceedings of the 8th China Iron and Steel Annual Conference. Beijing, 2011: 1938-1940.
- [32] HEIDARI A, NIKNAHAD N, ILJANA M, et al. A review on the kinetics of iron ore reduction by hydrogen[J]. *Materials*, 2021, 14(24): 7540.
- [33] PERPIÑÁN J, PEÑA B, BAILERA M, et al. Integration of carbon capture technologies in blast furnace based steel making: A comprehensive and systematic review[J]. *Fuel*, 2023, 336: 127074.
- [34] 陈斌, 吴梦莉, 樊雄, 等. 利用膜分离技术捕集燃烧后烟气 CO₂ 的工艺研究及应用现状 [J]. 膜科学与技术, 2023, 43(6): 232-242.
CHEN Bin, WU Mengli, FAN Xiong, et al. Research and application status of using membrane separation technology to capture CO₂ from post combustion flue gas[J]. *Membrane Science and Technology*, 2023, 43(6): 232-242.
- [35] RAGANATI F, AMMENDOLA P. CO₂ post-combustion capture: A critical review of current technologies and future directions[J]. *Energy & Fuels*, 2024, 38(15): 13858-13905.
- [36] HASAN H F, AL SUDANI F T, ALBAYATI T M, et al. Solid adsorbent material: A review on trends of post-combustion CO₂ capture[J]. *Process Safety and Environmental Protection*, 2024, 182: 975-988.
- [37] WANG Zihan, ZHANG Zhien, SOLTANIAN M R, et al. Facilitated transport membranes in post-combustion carbon capture: Recent advancements in polymer materials and challenges towards practical application[J]. *Green Energy & Environment*, 2025, 10: 500-517.
- [38] AL DHAWI B N S, KUTTY S R M, BALOO L, et al. Lithium adsorption from aqueous solution using aluminum hydroxide: Characterization, optimization by response surface methodology, kinetic modelling, and isotherm studies[J]. *Case Studies in Chemical and Environmental Engineering*, 2023, 7: 100350.
- [39] ZHOU Chenyang, ZHANG Chen, ZHANG Teng, et al. Single-atom solutions promote carbon dioxide capture[J]. *Applied Energy*, 2023, 332: 120570.
- [40] KHAN U, OGBAGA C C, ABIODUN O O, et al. Assessing absorption-based CO₂ capture: Research progress and techno-economic assessment overview[J]. *Carbon Capture Science & Technology*, 2023, 8: 100125.
- [41] TIMOSHENKO J, HAASE F T, SADDELER S, et al. Deciphering the structural and chemical transformations of oxide catalysts during oxygen evolution reaction using quick X-ray absorption spectroscopy and machine learning[J]. *Journal of the American Chemical Society*, 2023, 145(7): 4065-4080.
- [42] TAVARES R M, DA CUNHA J P A R. Pesticide and adjuvant mixture impacts on the physical-chemical properties, droplet spectrum, and absorption of spray applied in soybean crop[J]. *AgriEngineering*, 2023, 5(1): 646-659.
- [43] DE GUIDO G. Cryogenic CO₂ capture from oxy-combustion

- flue gas by a hybrid distillation + physical absorption process[J]. *Chemical Engineering Research and Design*, 2023, 199: 639-658.
- [44] SUN Xiaojing, LIU Linlin, ZHANG Tong, et al. Multi-objective optimization of a rectisol process integrated with compression-absorption cascade refrigeration system and ORC for waste heat recovery[J]. *Applied Thermal Engineering*, 2024, 244: 122611.
- [45] WANG Pin, LIU Zhiming, PAN Zhen, et al. Advances in life cycle assessment of chemical absorption-based carbon capture technologies[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 346: 127252.
- [46] ZHENG Shudong, TAO Mengna, LIU Qing, et al. Capturing CO₂ into the precipitate of a phase-changing solvent after absorption[J]. *Environmental Science & Technology*, 2014, 48(15): 8905-8910.
- [47] 凌江华. 工业烟气中二氧化碳吸附捕集过程的研究 [D]. 沈阳: 东北大学, 2015: 1-153.
LING Jianghua. CO₂ capture from industrial flue gases by adsorption process[D]. Shenyang: Northeastern University, 2015: 1-153.
- [48] TAO Jianmin, RAPPE A M. Physical adsorption: Theory of van der waals interactions between particles and clean surfaces[J]. *Physical Review Letters*, 2014, 112(10) : 106101.
- [49] DUAN X, SONG G, LU G, et al. Chemisorption and regeneration of amine-based CO₂ sorbents in direct air capture[J]. *Materials Today Sustainability*, 2023, 23: 100453.
- [50] MOHAMED HATTA N S, HUSSIN F, GEW L T, et al. Enhancing surface functionalization of activated carbon using amino acids from natural source for CO₂ capture[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 313: 123468.
- [51] YAN Huangyu, ZHANG Guojie, LIU Jun, et al. Investigation of CO₂ adsorption performance of amine impregnated adsorbents using amine-support matching strategies[J]. *Separation and Purification Technology*, 2023, 310: 123178.
- [52] WANG Junkai, FENG Jiali, ZHANG Mei, et al. Amine-modified SiO₂ aerogel for efficient adsorption of low-pressure CO₂: Response surface methodology optimization and adsorption mechanism[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2024, 12(6): 114274.
- [53] CAGLAYAN B S, AKSOYLU A E. CO₂ adsorption on chemically modified activated carbon[J]. *Journal of Hazardous Materials*, 2013, 252: 19-28.
- [54] YU Tao, CHEN Zhuo, LIU Zhendong, et al. Review of hydrogen sulfide removal from various industrial gases by zeolites[J]. *Separations*, 2022, 9(9): 229.
- [55] DENG Lihua, SHI Jianbo, ZHAO Yijun, et al. Straw-based biochar prepared from multi-step KOH activation and its structure-effect relationship of CO₂ capture under atmospheric/pressurized conditions *via* experimental analysis and MD/DFT calculations[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 495: 153403.
- [56] GAIKWAD S, KIM Y, GAIKWAD R, et al. Enhanced CO₂ capture capacity of amine-functionalized MOF-177 metal organic framework[J]. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 2021, 9(4): 105523.
- [57] LI Shuo, HAN Weiyao, AN Quanfu, et al. Defect engineering of MOF-based membrane for gas separation[J]. *Advanced Functional Materials*, 2023, 33(38): 2303447.
- [58] LIANG Bin, HE Xiao, HOU Junjun, et al. Membrane separation in organic liquid: Technologies, achievements, and opportunities[J]. *Advanced Materials*, 2019, 31(45) : 1806090.
- [59] KIANFAR E. A review of recent advances in carbon dioxide absorption–stripping by employing a gas–liquid hollow fiber polymeric membrane contactor[J]. *Polymer Bulletin*, 2023, 80(11): 11469-11505.
- [60] CHEN Guining, LIU Guozhen, PAN Yang, et al. Zeolites and metal-organic frameworks for gas separation: The possibility of translating adsorbents into membranes[J]. *Chemical Society Reviews*, 2023, 52(14): 4586-4602.
- [61] FAJAL S, DUTTA S, GHOSH S K. Porous organic polymers (POPs) for environmental remediation[J]. *Materials Horizons*, 2023, 10(10): 4083-4138.
- [62] ZHANG Chen, LU Wanheng, XU Yingfeng, et al. Mechanistic formulation of inorganic membranes at the air-liquid interface[J]. *Nature*, 2023, 616(7956): 293-299.
- [63] SHAN Meixia, GENG Xiumei, IMAZ I, et al. Metal- and covalent-organic framework mixed matrix membranes for CO₂ separation: A perspective on stability and scalability[J]. *Journal of Membrane Science*, 2024, 691: 122258.
- [64] KURNIAWAN T A, RIAZ M, MOHYUDDIN A, et al. Inorganic membrane: A game changer for gas separation and purification[J]. *Chemical Papers*, 2024, 78(12) : 6787-6820.
- [65] AL SHAELI M, ORHUN TEBER O, AL JUBOORI R A, et al. Inorganic layered polymeric membranes: Highly-ordered porous ceramics for surface engineering of polymeric membranes[J]. *Separation and Purification Technology*, 2024, 350: 127925.
- [66] DOROSTI F, GE Lei, WANG Hao, et al. A path forward: Understanding and mitigating defects in polycrystalline membranes[J]. *Progress in Materials Science*, 2023, 137: 101123.
- [67] NIU Zhenhua, HE Naiyong, YAO Yingfeng, et al. Mixed matrix membranes for gas separations: A review[J]. *Chemical Engineering Journal*, 2024, 494: 152912.
- [68] DIAZ S, JAIN S, ALIHASSAN M, et al. Unlocking the potential of carbon transportation: Paving the way for CCUS service in the UAE[C]//ADIPEC. Abu Dhabi: SPE, 2024: D031S094R004.
- [69] ONODA M, MATSUZAKI Y, CHOWDHURY F A, et al.

- Sustainable aspects of ultimate reduction of CO₂ in the steel-making process (COURSE50 project) , part 2: CO₂ capture[J]. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 2016, 2(3): 209-215.
- [70] 杨阳, 李毅仁, 刘娟, 等. 钢铁行业二氧化碳捕集技术研究及应用进展 [J]. 能源环境保护, 2024, 38(3): 52-64.
YANG Yang, LI Yiren, LIU Juan, et al. Research and application progress of carbon capture technology in the iron and steel industry[J]. *Energy Environmental Protection*, 2024, 38(3): 52-64.
- [71] KIM J Y, HAN K, AHN C K, et al. Operating cost for CO₂ capture process using aqueous ammonia[J]. *Energy Procedia*, 2013, 37: 677-682.
- [72] 中钢公司. 2012 企业社会责任报告书 [R]. 台湾: 中钢公司, 2012.
China Steel. 2012 corporate sustainability report [R]. Taiwan: China Steel, 2012.
- [73] YU Jiyong, XU Runsheng, ZHANG Jianliang, et al. A review on reduction technology of air pollutant in current China's iron and steel industry[J]. *Journal of Cleaner Production*, 2023, 414: 137659.
- [74] RAHIMI M, DIEDERICHSEN K M, OZBEK N, et al. An electrochemically mediated amine regeneration process with a mixed absorbent for postcombustion CO₂ capture[J]. *Environmental Science & Technology*, 2020, 54(14): 8999-9007.
- [75] 徐冬, 黄艳, 宋俊朝, 等. 低能耗 CO₂ 混合胺吸收剂复配筛选与工业验证 [J]. 洁净煤技术, 2024, 30(8): 90-98.
XU Dong, HUANG Yan, SONG Junchao, et al. Screening and engineering verification of a low energy consumption CO₂ mixed amine absorbent[J]. *Clean Coal Technology*, 2024, 30(8): 90-98.
- [76] IDEM R, SUPAP T, SHI Huancong, et al. Practical experience in post-combustion CO₂ capture using reactive solvents in large pilot and demonstration plants[J]. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 2015, 40: 6-25.
- [77] BUMB P, KUMAR R, KHAKHARIA P, et al. Demonstration of advanced APBS solvent at TNO's CO₂ capture pilot plant[J]. *Energy Procedia*, 2014, 63: 1657-1666.
- [78] 毛松柏, 江洋洋, 叶宁, 等. 新型高效低耗 CO₂ 捕集配方溶剂的开发及工业应用 [J]. 化学反应工程与工艺, 2016, 32(6): 559-564.
MAO Songbai, JIANG Yangyang, YE Ning, et al. Development and industrial application of a new type of high efficiency and low energy consumption CO₂ capture solvent[J]. *Chemical Reaction Engineering and Technology*, 2016, 32(6): 559-564.
- [79] 龚奂彰, 黄秀玉. 钢铁行业碳捕集技术的典型应用 [J]. 低碳化学与化工, 2023, 48(5): 103-108.
GONG Huanzhang, HUANG Xiuyu. Typical application of carbon capture technology in steel industry[J]. *Low-Carbon Chemistry and Chemical Engineering*, 2023, 48(5): 103-108.