钢铁生产全流程中CO_2资源化利用技术进展

孟 鑫，李晨晓，赵 鹏，冯子康，纪志浩，孙华康
（1. 华北理工大学 a. 冶金与能源学院；b. 唐山市特种冶金及材料制备重点实验室，河北 唐山 063210）

摘要：钢铁工业作为国民经济的支柱产业，同时面临着高碳排放量的挑战。本文通过总结钢铁行业的碳排放现状，分析不同钢铁制造流程特点以及不同流程下的碳排放强度；介绍欧盟的 ULCOS、日本的 COURSE 50、韩国的 POSCO 等低碳冶金项目及其开发和应用的新技术，着重对比分析主要的 CO_2 捕集技术的原理、优缺点以及 CO_2 在钢铁冶炼全流程工序中的应用，证实 CO_2 在钢铁冶炼全流程中的应用效果和潜力；详细阐述 CO_2 在烧结机、高炉、电弧炉、转炉以及精炼和连铸等环节中的应用研究进展，从热力学和动力学角度分析 CO_2 在炼钢温度下的性质，指出 CO_2 可以作为氧化剂参与炼钢过程，并具有降低碳排放、提高钢水质量等优势。CO_2 捕集及其资源化利用对于钢铁工业绿色低碳生产具有重要意义。未来应进一步研究 CO_2 的捕集和利用技术，推动其在钢铁冶炼全流程中应用，以实现钢铁行业的可持续发展。

关键词：钢铁行业；碳排放；资源化利用；低碳冶金；碳捕集
中图分类号：TF09 **文献标识码**：A **文章编号**：1000－8764(2024)06－0021－14
doi：10.13403/j.sjqt.2024.06.088

Technological progress of CO_2 resource utilization in whole process of iron and steel production

MENG Xin, LI Chenxiao, ZHAO Peng, FENG Zikang, JI Zhihao, SUN Huakang
(North China University of Science and Technology a. School of Metallurgy and Energy; b. Tangshan Key Laboratory of Special Metallurgy and Material Preparation, Tangshan 063210, Hebei, China)

Abstract: As a pillar industry of the national economy, the steel industry is facing the challenge of high carbon emissions. The current situation of carbon emissions in the steel industry is summarized, the characteristics of different steel manufacturing processes and the carbon emission intensity under different processes are analyzed; low-carbon metallurgical projects such as ULCOS in the European Union, COURSE 50 in Japan, POSCO in South Korea are introduced, the principles, advantages and disadvantages of the main CO_2 capture technologies and the application of CO_2 in the whole process of iron and steel smelting are comparatively analyzed in detail, and the application effect and potential of CO_2 in the whole process of steel smelting are confirmed; the research progress of the application of CO_2 in sinterstrand, blast furnace, electric arc furnace, converter, refining and continuous casting are elaborated, the properties of CO_2 at steelmaking temperature are analyzed from the perspective of thermodynamics and kinetics, and it is pointed out that CO_2 can be used as an oxidant in the steelmaking process, and it has the advantages of reducing carbon emissions and improving the quality of molten steel. CO_2 capture and its resource utilization are of great significance for the green and low-carbon production of the steel industry, and the capture and utilization technology of CO_2 should be further studied in the future, and its

收稿日期：2024－08－02；**修回日期**：2024－09－28
基金项目：国家自然科学基金资助项目(52274334)；河北省高等学校科学技术研究项目(BJK2022059)
作者简介：孟 鑫(1997—)，男，硕士研究生，从事炼钢新技术和品种钢冶炼的研究工作。
通信作者：李晨晓(1988—)，男，博士，副教授，从事炼钢新技术和品种钢冶炼的研究工作。

application in the whole process of steel smelting should be promoted to achieve the sustainable development of the steel industry.

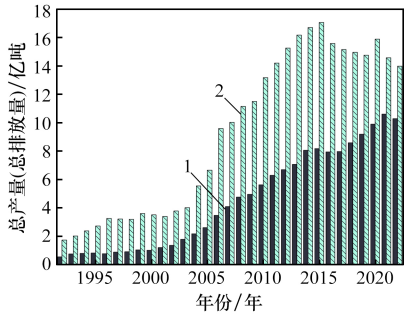
Key words: steel industry; carbon emissions; resource utilization; low-carbon metallurgy; carbon capture

钢铁行业是国民经济的支柱产业，是建设现代化强国的重要支撑，同时也是我国最具国际竞争力的产业之一。2023 年全球粗钢产量为 18.882 亿吨，我国粗钢产量为 10.19 亿吨，在全球的比重约为 53.97%。2023 年全球碳排放总量达到 374 亿吨，我国碳排放量达到 126 亿吨，其中，钢铁行业碳排量达到 18.9 亿吨，约占全国碳排放总量的 15%[1-2]。在当前环境问题日益突出、碳达峰和碳中和成为全球发展关注重点的大背景下，中国钢铁产业仍面临产能过剩、绿色低碳发展水平低以及产业集中度偏低等诸多挑战[3]。减少 CO_2 的排放以及开发 CO_2 资源利用新技术势在必行。CO_2 资源化利用对于减少温室气体排放、推动循环经济、创造经济价值、降低能源消耗和环境影响具有重要作用[4]。

钢铁行业减排的主要途径有 CO_2 资源化利用、CO_2 封存技术的开发、新能源的开发或者新工艺的发展。通过推动新能源的开发和利用，可以减少对传统化石燃料的使用[5]。钢铁行业减少 CO_2 排放的方法主要是工序节能，并实现 CO_2 的资源化利用[6]。本文主要介绍在炼钢温度下 CO_2 的热力学性质及参与炼铁、烧结、炼钢、精炼、连铸等过程中的技术研究进展，对比各类碳捕集技术和各国低碳项目的计划与工艺，为钢铁行业碳减排提供参考与借鉴。

1 钢铁行业碳排放现状

根据国际能源署(IEA)的数据，全球钢铁行业的碳排放量约占全球工业排放总量的 7%。我国钢铁企业生产规模大且属于能源密集型产业，碳排放量较高。我国 CO_2 排放量及粗钢产量如图 1 所示。由图 1 可见，我国粗钢产量从 2015 年的 8.03 亿吨增长至 2023 年的 10.19 亿吨。2023 年，全球平均每生产 1 t 钢材所排放的 CO_2 量大约为 1.91 t，钢铁行业的主要生产方法仍伴随着较高的碳排放水平。在整个炼钢过程中，不同的阶段碳排放量各异，例如，烧结阶段，即将铁矿石粉末与燃料及助熔剂混合并通过烧结设备制成烧结矿的工序，生产每吨烧结矿的碳排放量大致为 0.15 ~ 0.25 t；而在高炉炼铁阶段，碳排放量较高，生产每吨铁的碳排放量约为 1.5 ~ 2.0 t；在转炉炼钢阶段，每吨钢材的碳排放大约为 0.1 ~ 0.2 t；精炼和连铸阶段的碳排放通常较低，因为这些阶段主要涉及对已炼制的钢水进行进一步的纯化和成型。根据《巴黎协定》的温控目标，到 2050 年，全球钢铁行业的直接碳排放总量要比 2019 年减少 55%，碳排放强度下降 60%，钢铁行业所面临的挑战极为严峻[7-8]。在“碳达峰、碳中和”的大背景下，为应对全球气候变化的挑战，钢铁行业的学者们越来越关注 CO_2 的排放问题，探究在减少 CO_2 排放的同时，在炼钢各个工序过程中利用 CO_2 实现钢液冶炼，以达到提高经济效益和推进可持续发展的目的。



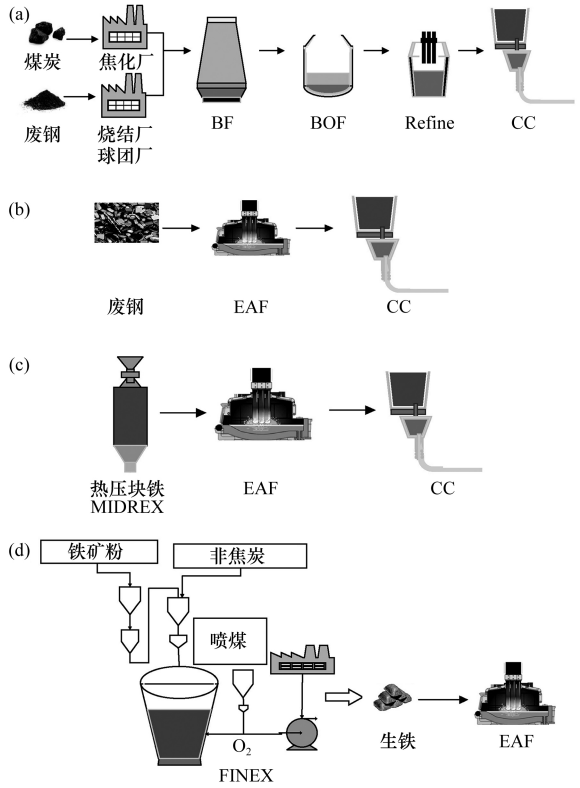
1—粗钢总产量；2—CO_2 总排放量。

图 1 CO_2 排放量及粗钢产量

Fig. 1 CO_2 emissions and crude steel production

当前，全球钢铁生产主要采用四种冶金流程：高炉—转炉(BF-BOF)、全废钢—电弧炉(EAF)、MIDREX-EAF 和 FINEX-EAF[9]。高炉—转炉工艺虽广泛使用，但其依赖焦炭，CO_2 排放强度高达 1.8 ~ 2.0 t/t，如图 2(a)所示。全废钢—EAF 工艺以废钢为原料，不涉及矿石还原，该工艺碳排放显著降低，约为高炉—转炉工艺的 30%，如图 2(b)所示。MIDREX-EAF 工艺结合直接还原铁技术与电弧炉炼钢技术，使用天然气或氢气还原，其 CO_2 排放强度约为 BF-BOF 工艺的 70%，如图 2(c)所示。FINEX-EAF 工艺，由 FINEX 直接还原技术与电弧炉炼钢结合，采用粉矿和煤粉，无需

焦化和烧结，相较于传统高炉工艺，其 CO_2 排放强度有所降低，如图 2(d)所示[10-13]。



（a）“高炉—转炉”流程；（b）“全废钢—电弧炉”流程；（c）“MIDREX- EAF”流程；（d）“FINEX-EAF”流程

图 2　钢铁工艺流程示意

Fig. 2　Schematic diagram of the steel process

根据当前全球钢铁生产的概况，主流的钢铁制造流程包括高炉—转炉和全废钢—电弧炉两种。刘清梅等[9]通过对生产过程中 CO_2 排放强度的计算分析，得出 2001 年—2022 年期间，全球采用高炉—转炉和全废钢—电弧炉流程生产钢铁的 CO_2 排放数据。在这 21 年的时间跨度内，使用高炉—转炉工艺生产的粗钢，其平均 CO_2 排放量大约为 20.612 亿吨/a，而采用全废钢—电弧炉流程生产的粗钢，平均排放量则约为 2.533 亿吨/a。这一数据表明，钢铁产业的碳排放量相对较高，因此，推动钢铁工业流程的低碳化，以及研究和开发碳捕集与新型 CO_2 资源化利用技术，显得尤为迫切和必要。

2　低碳冶炼项目发展与CO_2资源化利用技术

2.1　世界各国低碳项目发展现状及工艺

国际能源署(IEA)在《能源技术展望 2020》中提出，根据可持续发展设想，到 2070 年，能源行业将实现全球 CO_2 净排放量为零。控制和减少钢铁行业的 CO_2 排放量是一个紧迫的问题[14-15]。

2008 年，欧盟排放交易体系通过 SET-Plan 倡议，旨在推动能源密集型行业向清洁、高效、低排放技术转型[16-17]。在此框架下，欧洲钢铁技术平台发起了超低 CO_2 炼钢(ULCOS)项目，涵盖多种生产工艺，包括高炉炉顶煤气循环(ULCOS-BF)、直接还原(ULCORED)、熔融还原(HIsarna)和电解铁矿石(ULCOWIN)[18-19]。炉顶煤气循环(TGR-BF)技术采用氧气替代传统高炉预热空气，通过精确控制氧气供应，降低能源消耗和 CO_2 排放。将 TGR 与 CO_2 捕集与储存(CCS)技术结合，并运用真空压力摆动吸附(VPSA)技术，能够有效去除氮气并捕集 CO_2，实现 26% 的碳减排；试验表明，TGR-BF 技术在高炉运行中展现出高效、安全和稳定的特点。TGR-BF 工艺流程如图 3 所示。

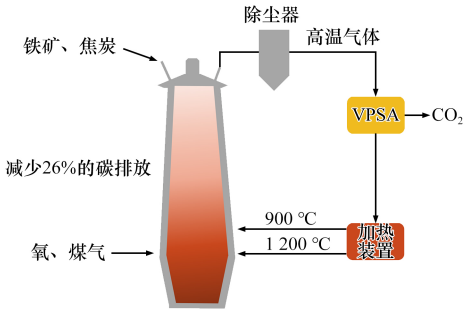


图 3　TGR-BF 工艺流程

Fig. 3　Process flow diagram of TGR-BF

HIsarna 工艺融合了熔融旋风炉与 HIsmelt 冶炼技术，该工艺以煤粉和矿粉替代焦炭，旨在减少碳排放。其核心在于熔化旋风段对矿石和助熔剂的预还原与熔化，随后将煤粉和氧气注入冶炼容器中完成最终还原。HIsarna 工艺优化了原料和燃料的预热，省略焦化和烧结过程，降低了煤炭消耗和碳排放。生物质和氢气可作为替代还原剂，结合 CCS 技术，HIsarna 工艺降低 20%~80% 的碳排放。HIsarna 工艺流程如图 4 所示。

ULCORED 工艺通过使用天然气或生物质气体作为铁矿烧结的还原剂，优化了前处理工艺；相比传统还原剂，新工艺的还原剂可减少 60% 的 CO_2 排放。电解工艺(ULCOWIN 和 ULCOLYSIS)采用碱性电解，利用电能将铁矿石转化为金属铁

和氧气，该工艺没有碳排放，唯一的副产品为氧气。试验表明，电解所得铁的纯度可达 99.98%，反应温度约为 110 ℃。电解工艺原理如图 5 所示。

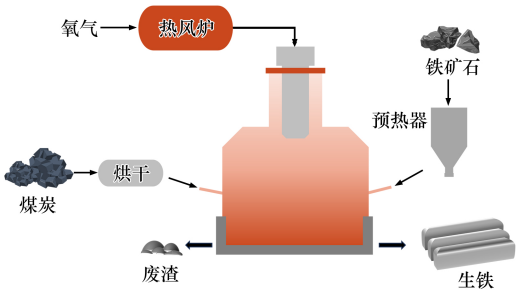


图 4　Hlsarna 工艺系统

Fig. 4　Process system diagram of Hlsarna

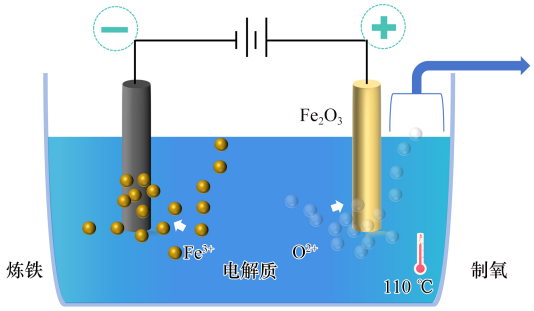


图 5　电解冶金原理

Fig. 5　Schematic diagram of electrolytic metallurgy

北美钢铁行业通过 AISI 突破计划旨在降低 CO_2 排放，其中麻省理工学院开发了熔融氧化物电解技术以生产铁。该技术通过在 1 600 ℃下溶解氧化铁于二氧化硅和氧化钙熔剂中，利用电解产生氧气和铁，铁离子在阴极沉积并收集[20-21]。熔融氧化物电解质原理如图 6 所示。

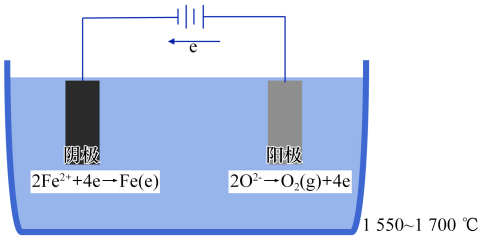


图 6　熔融氧化物电解质原理

Fig. 6　Principle of molten oxide electrolyte

日本为减少炼钢过程 CO_2 排放，于 2007 年启动 COURSE 50 计划[22]，旨在开发节能技术以促进环境保护和经济发展。项目目标是通过使用氢作为还原剂减少 10% 的碳排放，并通过从高炉煤气中分离和回收 CO_2 减少 20% 的碳排放[23]。该技术减排系统如图 7 所示。

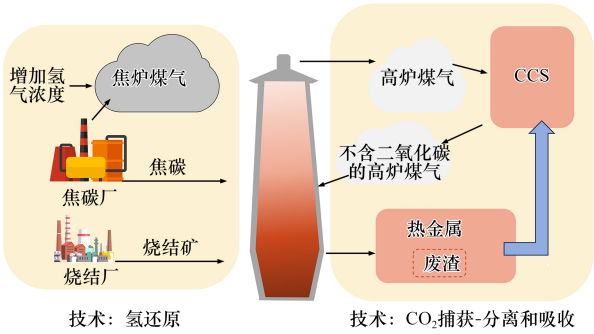


图 7　COURSE 50 CO_2 总减排系统

Fig. 7　Total CO_2 reduction system of COURSE 50

POSCO 是韩国低碳减排的主要项目。该项目已经开发了更节能的炼钢工艺以及用于从大气中捕获 CO_2 的新技术。它分为 4 个技术框架，即炼钢过程中的废气和副产品制氢、海洋生物有机废弃物固定 CO_2、氨捕集 CO_2 和余热回收、烧结矿的低碳还原。韩国的 POSCO 节能减排计划促进了技术创新和废物利用[24-26]。图 8 为氨捕集工艺系统。该系统利用低浓度的氨水(10% 以下)吸收高炉煤气中的 CO_2 并进行分离，同时利用钢铁厂内未有效利用的中低温废热作为 CO_2 再生所需的热源。

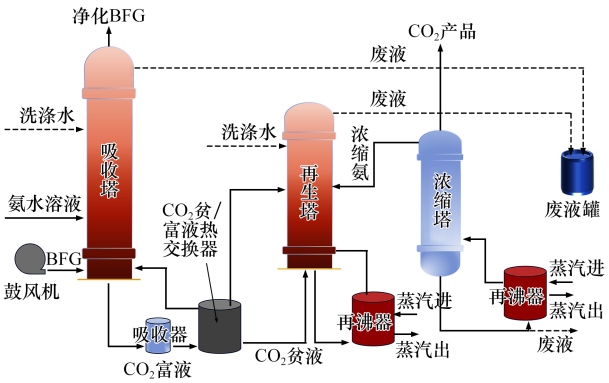


图 8　氨捕集工艺系统

Fig. 8　Process system of ammonia capture

澳大利亚在 2006 年底启动 CO_2 突破计划(CO_2 BTP)，该计划于 2015 年结束。主要研究两个领域：一是使用专门设计的生物质衍生炭作为煤和焦炭的替代品；二是无需水淬火的熔融炉渣造粒，即干渣造粒(DSG)。

2007 年，宝钢引进并优化了 COREX 3000 炉，该设备在八一钢铁投入使用，包含预还原竖炉和熔炉两个主要部分，通过高效预还原和螺旋卸料

器输送海绵铁至熔炉，实现了低焦炭消耗和高气体利用率的炼铁工艺，显著降低了碳排放。河钢集团于 2022 年建成并运行了全球首个 120 万吨/a 富氢气体零重整竖炉直接还原氢冶金示范工程，采用有机胺法(MDEA)捕集竖炉煤气中的 CO_2，实现了 6 万吨/a 的 CO_2 捕集量。截至 2023 年 5 月 30 日，该工程已连续稳定生产绿色直接还原铁，标志着中国乃至全球钢铁行业从传统碳冶金向氢冶金的转变。

2022 年，宝武湛江钢铁启动了氢基竖炉系统项目，旨在利用焦炉煤气、氢气及天然气作为主要气源，进行高氢比例原料气试验。相比传统高炉炼铁，该系统有望每年减少 CO_2 排放超过 50 万吨。2023 年 12 月 23 日，湛江钢铁的百万吨级氢基竖炉成功投产，成为中国首套此类设备，也是国内最大的全氢工业化直接还原铁竖炉。

全球钢铁行业正积极应对气候变化的挑战，通过研发和应用多种减排技术，如氢气还原、碳捕捉与储存以及电解铁矿石等，致力于实现低碳甚至零碳排放的目标。展望未来，这一行业的发展将更加注重技术创新、数字化和自动化的融合，推动循环经济以及产品创新，同时响应政策和法规的引导，加强国际合作，以期在保护环境、提高资源效率的同时，确保经济效益的最大化，为全球可持续发展做出更大的贡献。

2.2　CO_2 捕集技术对比

在钢铁行业中，CO_2 资源化利用是将 CO_2 从钢铁生产过程中捕集或回收，并将其转化为有用的化学产品、材料或能源[27]。这些技术旨在减少钢铁行业的碳排放，提高资源的利用率，并促进低碳经济的发展。其技术路线如图 9 所示。

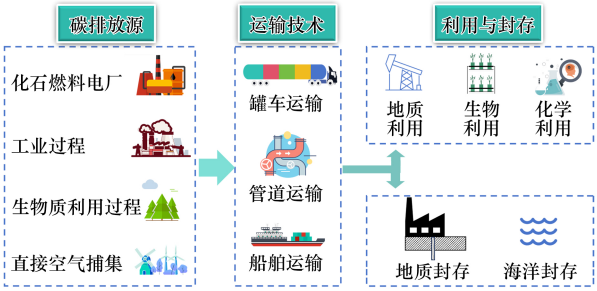


图 9　CO_2 资源化利用技术路线图

Fig. 9　Technology roadmap of CO_2 resource utilization

在钢铁碳减排的众多途径中，CCUS(carbon capture，utilization and storage)是一种针对 CO_2 的综合技术，旨在减少大气中的温室气体排放，并将 CO_2 利用或储存起来。CCUS 技术包括三个主要方面：碳捕集、碳利用和碳储存[28-29]。碳捕集是指将 CO_2 从工业排放源、能源生产或其他大气排放源中捕集出来的过程，主要的捕集方法包括化学吸收法、物理吸收法、膜分离和吸附法等[30-34]，如图 10 所示。主要碳捕集技术对比如表 1 所示。

3　CO_2 治理在钢铁全流程工序中的理论基础与应用现状

在钢铁全流程工序中，主要实现 CO_2 排放减少和资源化利用，以应对中国钢铁生产每年约 18.9 亿吨的 CO_2 排放挑战。行业正通过改进炼钢工艺、采用转炉复吹炼钢等技术减少炼钢烟尘和提升能源效率，同时探究在烧结、高炉、转炉等

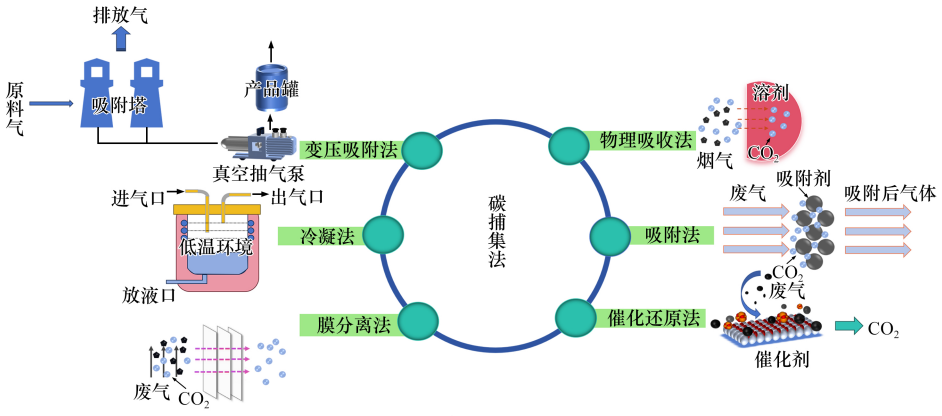


图 10　碳捕集法原理示意

Fig. 10　Schematic diagram of carbon capture method

表 1 碳捕集法技术对比

Table 1 Comparison of carbon capture techniques

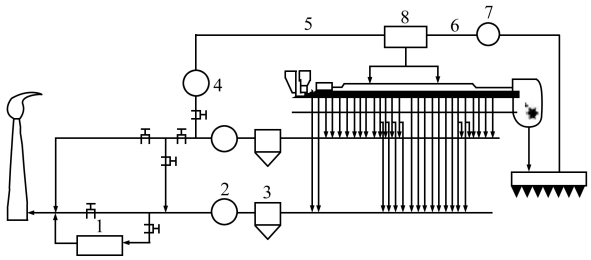
捕集技术	原理	优点	缺点
物理溶剂吸收法	利用 CO_2 气体与其他气体在某一种溶液中的溶解度不同而进行分离	高效捕集;可靠性高;操作性好	能源消耗较高;设备和运营成本较高;需要大量的设备和空间
化学溶剂吸附法	通过溶液来吸收 CO_2,使其溶解在溶剂中净化气体	回收效率高;热稳定性好;溶剂挥发性小;溶液对碳钢设备的腐蚀性弱;工艺成熟,操作简单	能源消耗高;设备复杂,操作复杂;炼钢工艺成本高
变压吸附法	利用不同压力下吸附剂对不同成分有选择性吸附和解吸	高效分离;操作灵活;能源消耗较低;技术成熟	周期长;效率低;系统操作和控制复杂
有机膜分离法	不同成分因其在半透性有机膜中传输速率上的差异而实现分离	高效捕集;设备简单;操作稳定,有机膜可以进行再生和回收利用	受到气体流量的限制;较低的耐受性;寿命低;成本较高
吸附精馏法	利用 CO_2 的沸点与其他气体不同进行分割	高效捕集;技术成熟;可靠性高	能源消耗较高;设备和运营成本较高;设备系统相对较复杂
直接空气捕集	空气通过吸附器,吸附剂吸附其中的 CO_2	无场地限制	能源消耗较高;技术不成熟;成本高
碳酸化矿化法	使 CO_2 与碱性矿物质反应形成稳定的碳酸盐化合物	永久储存;产生矿物产品	反应速度相对较慢;需要大量的矿物资源,储存地点有限
电化学 CO_2 捕集法	利用电解池中的阳极和阴极,在适当的电位或电流作用下,吸附或溶解 CO_2	能源消耗低;低碳足迹	技术不成熟;成本高
催化转化法	通过电化学方法将 CO_2 直接转化为 CO	转化为化学品或燃料	技术不成熟;工艺复杂;能源消耗高
生物质碳捕集法	通过生物质燃烧产生能源,通过碳捕集技术,从燃烧过程中的废气中捕集 CO_2	来源广泛;可再生	需要大量土地和水资源;技术不成熟

工序中利用 CO_2 进行洁净冶炼的理论基础与技术应用，旨在降低排放的同时提高钢铁产品质量和生产效率，以实现环境保护与产业发展的双赢。

3.1 CO_2 在烧结、高炉中的应用

烧结过程中的主要燃烧气体产物是 CO_2。典型的烟气再循环(FGR，图 11)烧结包括新日铁开发的废气区域再循环工艺[35-36]，Hata 开发的废气再循环(EGR)烧结技术[37]，荷兰 Corus IJmuiden 开发的排放优化烧结(EOS)工艺，HKM 开发的 LEEP(低排放和能量优化烧结工艺)和 Siemens VAI 开发的 EPOSINT(环境工艺优化烧结)工艺[38-40]。

郭晓庆等[41]提出以 CO_2 作为输送介质向高炉输送煤粉的方法，工艺流程如图 12 所示。由图 12 可见，将 CO_2 引入喷煤载气供气系统，代替 N_2 作为高炉喷煤载气，进行煤粉的输送和喷吹。混合煤粉在高炉风口替代焦炭提供热量，可起到还原剂的作用，减少通过高炉的废气总量。



1—脱硫系统；2—主抽风机；3—除尘器；4—循环风机；5—大烟道循环烟气；6—环冷废气；7—环冷回热风机；8—烟气混合室。

图 11 烧结烟气循环工艺系统流程示意

Fig. 11 Schematic flow diagram of the flue gas circulation sintering process system

符政学等[42]提出向高炉鼓风混入热风炉废气的炼铁方法。将 CO_2 或含 CO_2 的废气吹入高炉冷风管，在热风炉内加热后，通过热风管道将 CO_2 吹入高炉风口区。吹出的 CO_2 和燃烧的碳发生反应，可实现较高的富氧。生成的 CO 将成为冶炼的

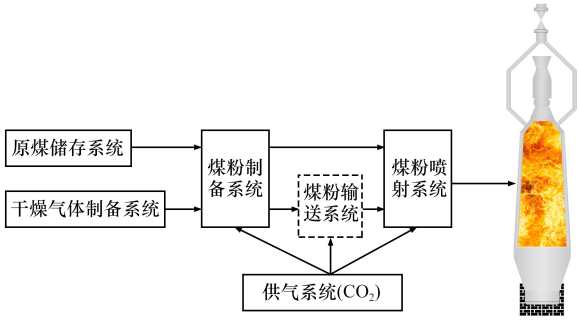


图 12　高炉喷煤流程

Fig. 12　Flow chart of blast furnace coal injection

还原剂，提高了高炉的还原率和生产效率。洪永刚[43]使用 CO_2 作为氧化剂去除铁水中硅元素，开展了向铁水喷吹 CO_2 脱硅的试验研究，探讨了使用 CO_2 作为铁水脱硅剂的可行性。刘锦周[44]对全氧高炉煤气循环的机理及应用进行了研究。与传统高炉相同的是，氧气高炉炼铁工艺在炉顶装入含铁原料和焦炭，在风口鼓入常温氧气并喷吹大量煤粉，既可以生产熔融铁水又可以提供高热量煤气；与传统高炉不同的是，热风中氧气含量极高并且炉顶煤气循环至炉缸风口重新吹入高炉，该工艺技术可以在热量平衡不变的条件下，提高炉内热量的利用效率，降低吨铁焦比，提高高炉产量，降低 CO_2 的排放。WU 等[45]提出了富 CO_2 高炉炼铁－化学工业耦合的 CO_2 资源化利用新流程，将 CO_2 作为喷煤载气或者混入到输入高炉的热风中，提高炉内间接还原度；将输入的 CO_2 约 50% 转化为 CO，并从炉顶煤气中排除，有效提高了炉顶煤气热值及 CO 气体浓度；此外，将炉顶煤气提纯得到的 CO 气体可用作化工制备流程的原料。

在烧结过程中，CO_2 是主要的燃烧气体产物。近年来，多种烟气再循环技术如新日铁的废气区域再循环工艺、Hata 的废气再循环烧结技术、Corus IJmuiden 的排放优化烧结工艺、HKM 的 LEEP 工艺以及 Siemens VAI 的 EPOSINT 工艺等被开发，以降低 CO_2 排放并提高能源利用效率。在此基础上，行业人员也研究了使用 CO_2 作为输送介质向高炉输送煤粉的方法、向高炉鼓风混入热风炉废气的炼铁方法、向铁水喷吹 CO_2 脱硅的方法、全氧高炉煤气循环方法等。这些研究表明，通过技术创新，将 CO_2 应用于高炉炼铁过程，不仅有助于提高高炉的生产效率和还原率，还能实现 CO_2 的资源化利用，为钢铁工业的绿色低碳发展提供新思路。

3.2　CO_2 在转炉中的应用

CO_2 作为一种弱氧化性气体，在高温条件下，可以与钢液中的[C]、[Fe]、[Si]、[Mn]等元素发生氧化反应。在钢铁行业中，CO_2 的应用有助于降低碳排放量、降低生产成本和提高钢水质量。因此，CO_2 可以替代底吹的氮气和氩气，作为转炉炼钢过程中的氧化剂。CO_2 参与的反应是吸热或微放热反应，其热效应较低。这使得向转炉顶吹一定比例的 CO_2，能够实现对脱磷过程温度的控制。通过计算得到在 1 350 ~ 1 650 ℃时，CO_2 与铁水中各元素反应得到简单氧化物的 ΔG^θ 变化与温度 T 的关系，如图 13 所示。

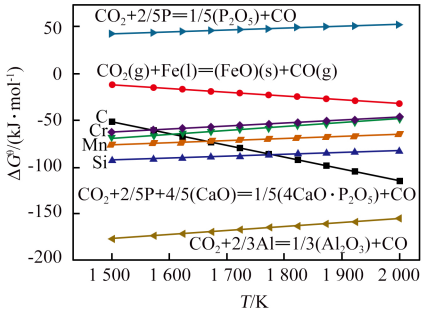


图 13　CO_2 与各元素反应的 ΔG^θ 与温度 T 的关系

Fig. 13　ΔG^θ vs. temperature T for the reaction of CO_2 with each element

在 1 350 ~ 1 650 ℃时，各元素和 CO_2 反应的标准吉布斯自由能均为负值，因此 CO_2 可以作为氧化剂用于炼钢。CO_2 与[C]反应的吉布斯自由能曲线斜率为负值，与[Si]、[Mn]、[Cr]都存在选择性氧化的情况。CO_2 与[C]、[Fe]的反应是吸热反应，而与[Mn]、[Si]、[Cr]等元素的反应则是放热反应。CO_2 与炼钢中的元素反应时，根据选择性氧化原理，ΔG^θ 越低，对应的元素越容易先发生反应。因此，CO_2 的引入改变了体系的氧化条件，有助于实现元素的选择性氧化。这样的反应条件调控有助于控制熔池温度。

$CO_2(g)+[C]=2CO(g)$。当 1 mol CO_2 与铁水中的碳发生反应时，体系会产生 2 mol CO，气体体积会增加一倍。生成的 CO 导致熔池内部气体体积的增加，熔池中的气泡数量增加，最终气泡

群会上浮到熔池表面。这种气泡的上浮运动引起了搅拌效应，增强了熔池的搅拌能力。通过搅拌，熔池中的温度分布更均匀，不同组分得到更好混合。气泡的形成和上浮也促进了物质和热量的传递，有助于加快冶炼过程中的反应速率和平衡。图 14 为气泡搅拌机理。

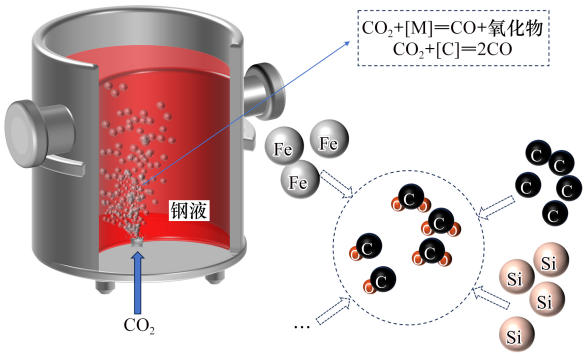


图 14 气体搅拌动力学机理

Fig. 14 Mechanism of gas stirring dynamics

张伟等[46]通过喷吹 CO_2 的试验研究发现，喷吹 CO_2 可以降低熔池的温度，减少元素的蒸发；CO_2 的通入可以增强熔池的搅拌，使得气泡带走熔池中更多的元素。吕明等[47]进行 30 t 转炉顶底复吹 CO_2 试验，发现顶底复吹 CO_2 后，烟尘量减少 11.15%，烟尘中 TFe 质量分数降低了 12.98%，炉渣铁损降低 3.10%，试验终点钢液中[N]、[P]质量分数分别降低了 50% 和 23.33%。于春强[48]在转炉底吹 CO_2 的试验研究中，生产低碳钢采用了前中期吹 CO_2 和后期吹 N_2 供气模式，而生产中高碳钢则采用了全程吹 CO_2 供气模式。结果表明，采用转炉底吹 CO_2 工艺后，转炉冶炼过程中钢水的搅拌能力增强，脱 P 率也得到了提高。陈双冰等[49]进行了 CO_2 和 Ar 作为保护性气体和搅拌气体的对比试验，发现两种气体的保护效果相同，并且试验中钢的含氧量去除效果接近；工业试验中，用 CO_2 参与搅拌，钢水温度和钢水成分均匀，钢中夹杂物总量由原来的 0.012 2% 降为 0.010 9%。靳任杰等[50]进行了 CO_2 喷吹炼钢的可行性试验，发现在炼钢过程中喷入 CO_2，同样可以脱除钢中的碳。李宏等[51]在氧气转炉用石灰石代替石灰的方法，对转炉吹炼前期石灰石分解及 CO_2 氧化作用进行了热力学分析。在转炉吹炼初期 CO_2 是氧化性气体，随着吹炼过程中温度的逐渐升高，CO_2 与铁水中的[C]、[Si]、[Mg]、[Fe]都可以发生反应。在转炉炼钢吹炼初期供氧量不变的情况下，CO_2 的比例较小，因此认为石灰石分解出来的 CO_2 全部与铁水中诸多元素反应。李智峥等[52]进行了炼钢过程中底吹不同气体的试验，研究了底吹 O_2、CO_2、Ar 和 N_2 的冶炼效果。研究结果表明，底吹氧气或 CO_2 时，脱碳速率和钢中氮、氢质量分数基本相同；和底吹氧气相比，CO_2 减少炼钢烟尘的产生，冶炼终点炉渣中 TFe 质量分数降低 2.50%，O 质量分数降低 90.2%。李亚华[53]研究了转炉用石灰石代替石灰炼钢，通过试验分析可知，石灰石在炼钢过程中，通过反应产生的 CO_2 使炉内的含碳量降低，从而降低氧化反应所需的氧气消耗量，进而减少了 CO_2 的排放，降低了能源消耗和生产成本。王玉刚等[54]进行了转炉炼钢中用石灰石代替部分石灰的试验，结果表明：石灰石在钢液高温下发生煅烧分解，产生大量的 CO_2 并迅速膨胀，提高了炉内熔渣的泡沫化程度；此外，产生的 CO_2 继续反应(1 mol CO_2 气体在高温下产生 2 mol CO)，炉内溶液的搅拌增加，熔池内反应动力学条件改善。

以上研究揭示了在炼钢过程中喷吹 CO_2 的多方面优势，包括降低熔池温度、减少元素蒸发以及增强熔池搅拌作用，从而有效去除熔池中的元素。转炉底喷吹 CO_2 工艺能增强钢水的搅拌能力并提高脱磷率，CO_2 作为保护性和搅拌气体，可以降低钢中夹杂物总量。综上所述，CO_2 在炼钢过程中的应用不仅有助于提高钢液质量和减少环境污染，还能优化冶炼工艺，降低生产成本。

3.3 CO_2 在精炼工序中的应用

ANDERSON 等[55]对电弧炉出钢过程及钢包运转过程中容易吸氮的问题开展研究，在电弧炉出钢过程中使用 CO_2 作为覆盖及保护气体，试验过程中 CO_2 使用量为 1.86 ~ 3.46 kg/t 的情况下，全流程钢液氮元素吸收量降低 40% ~ 87%。谷云岭等[56-57]在 LF 精炼过程中，基于底吹 CO_2 气体的搅拌机制，进行了 Ar 和 CO_2 不同比例混合的吹炼试验。研究发现，CO_2 气体在钢液中停留时间极短，不会导致钢液元素的大量氧化，其中平均每炉碳氧化量为 0.3 ~ 0.8 kg，锰元素的氧化量降

低，炉渣平均 FeO 质量分数均小于 0.5%，均满足精炼过程对炉渣氧化性的要求。董凯等[58]进行 LF 炉底吹 CO_2 气体试验，发现钢液中夹杂物的种类、形貌和组成变化较小；利用光学显微镜观察和统计夹杂物的数量和尺寸分布，并计算夹杂物的当量密度，发现夹杂物当量密度减少，钢液洁净度升高，底吹 CO_2 气体不会加重钢包透气砖的侵蚀。魏光生等[59]使用 CO_2 作为 RH 的提升气体，在极限真空条件下，若单纯考虑 CO_2 与碳反应，当钢液含碳量低于 1.8×10^{-6}时，CO_2 仍然有可能与钢液中的碳元素发生反应，具有参与 RH 精炼超低碳钢的潜力；同时，采用 CO_2 作为 RH 提升气体可以达到与使用 Ar 相当甚至更好的脱氢效果，而且喷吹 CO_2 并不会引起钢液的大幅降温。

韩宝臣等[60-63]对 RH 精炼过程中引入 CO_2 气体代替 Ar 作为提升气体的可行性进行了研究，发现真空条件下 CO_2 的脱碳极限与真空度密切相关，较低的环境压力会导致钢液在平衡状态下的含碳量降低；此外，CO_2 对碳和铝元素的选择性氧化受到多种因素影响，包括初始含碳量、气泡压力和钢液温度。随着初始铝含量的增加，CO_2 的反应优先级从碳元素转向铝元素。工业试验表明，CO_2 会氧化钢液中的铝元素，但不会显著增加氧元素含量。此外，与氩气相比，CO_2 能够提高 RH 真空精炼炉的循环流量，减少钢液中的氢元素含量，并降低非金属夹杂物的密度。

陈固军等[64]研究了 CO_2 作为提升气体在超低碳钢 RH 脱碳过程中的作用。结果表明：通过热力学分析，在低于 100 kPa 和超低碳条件下，Ar-CO_2 混合气体中的 CO_2 仍可能与钢水中碳反应，从而促进 RH 脱碳和脱气；工业性试验表明，喷吹 100% CO_2、50% Ar + 50% CO_2 和 100% Ar 炉次出站平均碳质量分数分别为 0.001 50%、0.001 57% 和 0.001 19%，因而混合喷吹 Ar-CO_2 并不会显著影响 RH 脱碳效率。同时，由于 CO_2 与钢水中碳反应十分有限，在超低碳钢 RH 脱碳时，可以采用 CO_2 取代部分或全部氩气作为提升气体。

在钢铁工业的精炼过程中，众多研究者对 CO_2 在电弧炉出钢、LF 精炼和 RH 真空精炼中的应用进行了深入研究。在 LF 精炼过程中，采用底吹 CO_2，对钢液中元素的氧化影响较小，有利于提高钢液洁净度，且不会加重钢包透气砖的侵蚀。而 CO_2 作为 RH 的提升气体，能有效降低钢液中的碳和铝元素，提高循环流量，有助于减少氢元素含量及非金属夹杂物密度，具有良好的脱氢效果，在超低碳钢精炼中具有潜力。综上所述，CO_2 在钢铁精炼过程中应用具有显著优势，值得进一步推广和研究。

3.4　CO_2 在连铸中的应用

在连铸工艺中，钢液由钢包流入中间包采用的长水口及由中间包流入结晶器采用的浸入式水口都需要采用 Ar 来保护，以防止钢液二次氧化和增氮，一些研究学者探讨了使用 CO_2 代替传统连铸工艺中作为保护气体的 Ar 的可能性。李全等[65]进行了关于 CO_2 作为连铸保护气体的试验研究。试验在某钢厂连铸水口处，向原有保护气管道中通入纯度为 99.9% 的 CO_2 代替 Ar 作为保护气体。与传统的 Ar 保护相比，CO_2 保护浇注并不会加剧二次氧化的发生，保护效果与 Ar 相当，同时夹杂物及大型夹杂物的形貌、组成没有变化。

3.5　CO_2 在电弧炉中的应用

电弧炉底吹是一种常见的冶炼工艺，起源于 20 世纪的 80 年代，在这种精炼工艺中，通过底部供气元件向炉底喷吹惰性气体，例如 N_2、Ar 等。这样做可以有效控制炉内气氛，提高熔池搅拌能力，改善炉内反应的效果。

近些年来，国内外学者尝试将 CO_2 作为底吹气体引入电弧炉底吹工艺中。王欢等[66]进行了向电弧炉底部吹入 CO_2 取代 Ar 的可行性试验。采用电弧炉底部吹 CO_2 的工艺可以增强熔池的搅拌效果，提高炉渣的碱度，降低渣中的 FeO 含量；此外，利于脱除磷等有害元素（电弧炉的脱硫率提高了 7%），提高炉内反应的效率，改善炉渣的性质。李层等[67]在 115 t 量子电弧炉上进行了 CO_2 喷吹代替传统喷吹的工艺试验，发现使用 CO_2 喷吹工艺后，电弧炉出钢氮质量分数由 8.14×10^{-5} 降低至 5.08×10^{-5}、冶炼电能消耗降低 5.6 kW·h、冶炼周期缩短 3.2 min、平均出钢碳氧积降低 4.4×10^{-4}、渣中 FeO 质量分数降低 4.5 个百分点、碳排放降低 8.45%。

在钢铁生产全流程中，CO_2 的资源化利用呈现出显著的节能减排效果与工艺创新特点。从烧结工序的烟气再循环技术，到高炉工序中以 CO_2 替代传统载气，再到转炉、精炼、连铸及电弧炉等环节中 CO_2 的多样化利用，均体现了其在减少碳排放和提高生产效率方面的作用。CO_2 的应用不仅限于传统观念中的排放物，而是转变为工艺过程中的重要参与者，通过替代 N_2、Ar 等传统气体，创新了钢铁行业的冶炼技术。这些技术的应用不仅优化了生产流程，降低了能源消耗，还提高了钢水的质量，展现了 CO_2 在促进钢铁行业绿色低碳转型中的潜在价值。因此，CO_2 在钢铁全流程工序中的资源化利用，为钢铁行业的可持续发展提供了新的技术路径和创新思路。

4 结论及展望

CO_2 捕集及其资源化利用对于钢铁行业绿色低碳生产具有重要意义。本文介绍了钢铁行业目前碳排放现状以及面临碳减排的挑战，理论分析了 CO_2 用于炼钢过程的可行性。在炼钢温度下 CO_2 可以与钢液中的［C］、［Si］、［Mn］等元素反应，其参与的反应是吸热或微放热反应，热效应较低。顶吹一定比例的 CO_2，可实现对脱磷过程温度的控制。此外，总结了当前碳捕集技术，归纳了其原理及优缺点；详细阐述了当前钢铁行业低碳项目的计划与工艺，着重介绍了 CO_2 在炼钢温度下参与炼铁、烧结、炼钢、精炼、连铸等过程中的技术研究进展。

钢铁行业是一个高碳排放的行业，CO_2 资源化利用具有广阔的前景，对于应对气候变暖和实现可持续发展具有重要意义。基于现有的研究，主要展望如下：① 钢铁行业的资源化利用方式主要是碳捕捉利用与封存技术和 CO_2 直接利用两种方法。在现有碳捕集技术中，综合经济、环保等因素考虑，化学吸收法具有较好的前景，但未来需要进一步研究降低其能源消耗和成本的技术。② 在钢铁行业碳减排的压力下，多国制定了相应的技术路线规划，但在现有的技术阶段，CCUS 技术对实现钢铁行业碳减排尤其重要，在未来中将发挥重要作用。③ 在炼钢温度下，1 mol CO_2 与 1 mol［C］参与反应生成 2 mol CO，形成弥散气泡，加强熔池的搅拌效果，且在精炼过程中喷吹 CO_2 脱碳过程中形成小气泡对夹杂物的去除有优势，可以加深 CO_2 在转炉、精炼过程中的应用研究。CO_2 在炼钢、烧结、高炉、转炉、精炼、连铸和电弧炉等环节的应用均具有显著的节能减排效果和工艺创新特点，未来需要进一步研究 CO_2 在这些环节中的应用效果和潜力。

钢铁行业应积极响应碳达峰和碳中和目标，加大低碳技术研发和应用力度，推动钢铁工业的绿色低碳转型，为全球可持续发展做出贡献。

参考文献：

［1］ World Steel Association. Steel Statistical Yearbook 2023［M］. Brussels：World Steel Association，2023.

［2］ NA H M，YUAN Y X，DU T，et al. Multi-process production occurs in the iron and steel industry，supporting ‘dual carbon’ target：An in-depth study of CO_2 emissions from different processes［J］. Journal of Environmental Sciences，2024，140：46－58.

［3］ ZHANG S，CHEN W Y. China’s energy transition pathway in a carbon neutral vision［J］. Engineering，2022，14：64－76.

［4］ ZENG N，JIANG K J，HAN P F，et al. The Chinese carbon-neutral goal：Challenges and prospects［J］. Advances in Atmospheric Sciences，2022，39（8）：1229－1238.

［5］ FU L P，REN Z K，SI W Z，et al. Research progress on CO_2 capture and utilization technology［J］. Journal of CO_2 Utilization，2022，66：102260.

［6］ ABDUL Q M，AHMED S，DAWAL S Z，et al. Present needs，recent progress and future trends of energy-efficient ultra-low carbon dioxide（CO_2）steelmaking（ULCOS）program［J］. Renewable and Sustainable Energy Reviews，2016，55：537－549.

［7］ LIU X M，PENG R，BAI C Q，et al. Technological roadmap towards optimal decarbonization development of China’s iron and steel industry［J］. Science of the Total Environment，2022，850：157701.

［8］ 张攀路，都沁军，张凯旋，等. 中国钢铁行业碳排放：达峰情景与中和路径［J］. 环境科学，2024，45（11）：6336－6343.
ZHANG Panlu，DU Qinjun，ZHANG Kaixuan，et al.

Carbon emission for China's iron and steel industry: Peak scenarios and neutralization pathways[J]. Environmental Science,2024,45(11):6336 – 6343.

[9] 刘清梅,张福明. 钢铁工业减碳与 CO_2 资源化利用技术的研究进展[J]. 钢铁,2024,59(2):13 – 24.
LIU Qingmei, ZHANG Fuming. Research progress of carbon reduction and CO_2 resource technology utilization in iron and steel industry[J]. Iron & Steel, 2024, 59(2):13 – 24.

[10] 苏步新,苏长永,林严. 优化钢铁产业布局 助力高质量发展[J]. 中国冶金,2022,32(8):1 – 6;24.
SU Buxin, SU Changyong, LIN Yan. Optimize layout of iron and steel industry to promote high-quality development[J]. China Metallurgy,2022,32(8):1 – 6;24.

[11] ARIYAMA T, TAKAHASHI K, KAWASHIRI Y, et al. Diversification of the ironmaking process toward the long-term global goal for carbon dioxide mitigation[J]. Journal of Sustainable Metallurgy,2019,5(3):276 – 294.

[12] 邵远敬,徐蕾,刘校平,等. 中国钢铁生产"碳中和"解决方案探讨[J]. 中国冶金,2022,32(4):1 – 8.
SHAO Yuanjing,XU Lei,LIU Xiaoping,et al. Discussion on solution of "carbon neutrality" in China's steel production[J]. China Metallurgy,2022,32(4):1 – 8.

[13] 兰臣臣,高艳甲,吕庆,等. 我国熔融还原炼铁技术发展现状及展望[J]. 矿产综合利用,2024(3):96 – 101.
LAN Chenchen, GAO Yanjia, LÜ Qing, et al. Development status and prospect of smelting reduction ironmaking technology in China[J]. Multipurpose Utilization of Mineral Resources,2024(3):96 – 101.

[14] LIN B Q, WANG X L. Carbon emissions from energy intensive industry in China: Evidence from the iron & steel industry[J]. Renewable and Sustainable Energy Reviews,2015,47:746 – 754.

[15] 于贵瑞,郝天象,朱剑兴. 中国碳达峰、碳中和行动方略之探讨[J]. 中国科学院院刊,2022,37(4):423 – 434.
YU Guirui,HAO Tianxiang,ZHU Jianxing. Discussion on action strategies of China's carbon peak and carbon neutrality[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022,37(4):423 – 434.

[16] FISCHEDICK M,MARZINKOWSKI J,WINZER P,et al. Techno-economic evaluation of innovative steel production technologies[J]. Journal of Cleaner Production,2014,84:563 – 580.

[17] PARDO N, MOYA J A. Prospective scenarios on energy efficiency and CO_2 emissions in the European Iron & Steel industry[J]. Energy,2013,54:113 – 128.

[18] MEIJER K, DENYS M, LASAR J, et al. ULCOS: Ultra-low CO_2 steelmaking[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2009,36(4):249 – 251.

[19] DANLOY G, BERTHELEMOT A, GRANT M, et al. ULCOS-pilot testing of the low-CO_2 blast furnace process at the experimental BF in Luleå[J]. Revue de Métallurgie,2009,106(1):1 – 8.

[20] KIM H, PARAMORE J, ALLANORE A, et al. The influence of electrolyte basicity on the performance of an iridium anode for the electrolysis of molten iron oxide [J]. J Electrochem Soc,2011,158:E101 – 5.

[21] PINEGAR H K, MOATS M S, SOHN H Y. Process simulation and economic feasibility analysis for a hydrogen-based novel suspension ironmaking technology [J]. Steel Research International,2011,82(8):951 – 963.

[22] ZHANG X, JIAO K, ZHANG J, et al. A review on low carbon emissions projects of steel industry in the World [J]. Journal of Cleaner Production,2021,306:127259.

[23] SAIMA W H, MOGI Y, HARAOKA T. Development of PSA system for the recovery of carbon dioxide and carbon monoxide from blast furnace gas in steel works[J]. Energy Procedia,2013,37:7152 – 7159.

[24] KIM J Y, HAN K, AHN C K, et al. Operating cost for CO_2 capture process using aqueous ammonia[J]. Energy Procedia,2013,37:677 – 682.

[25] RHEE C H,KIM J Y,HAN K,et al. Process analysis for ammonia-based CO_2 capture in ironmaking industry[J]. Energy Procedia,2011,4:1486 – 1493.

[26] BIRAT J P, MAIZIERE-LES-M D. Steel sectoral report, contribution to the UNIDO roadmap on CCS(fifth draft) [C]//Global Technology Roadmap for CCS in Industry-Sectoral Experts Meeting. Amsterdam:UNIDO,2010,24.

[27] DONG K,WANG X L. CO_2 utilization in the ironmaking and steelmaking process[J]. Metals,2019,9(3):273.

[28] LIU H J,WERE P,LI Q,et al. Worldwide status of CCUS technologies and their development and challenges in China[J]. Geofluids,2017,2017:6126505.

[29] LI X Y,GAO X,XIE J J. Comparison and clarification of

China and US CCUS technology development[J]. Atmosphere,2022,13(12):2114.

[30] WILBERFORCE T, OLABI A G, SAYED E T, et al. Progress in carbon capture technologies[J]. Science of the Total Environment,2021,761:143203.

[31] WILBERFORCE T, BAROUTAJI A, SOUDAN B, et al. Outlook of carbon capture technology and challenges [J]. Science of the Total Environment,2019,657:56 – 72.

[32] ZHANG Z, BORHANI T N G, EI-NAAS M H. Carbon capture[M]//DINCER I, COLPAN C O, KIZILKAN O. Exergetic, Energetic and Environmental Dimensions. Pittsburgh:Academic Press,2018:997 – 1016.

[33] GIBBNS J, CHALMERS H. Carbon capture and storage [J]. Energy Policy,2008,36(12):4317 – 4322.

[34] RACKLEY S A. 碳捕集与封存[M]. 北京:科学出版社,2012.
RACKLEY S A. Carbon capture and storage[M]. Beijing:Science Press,2017.

[35] 于恒,王海风,张春霞. 铁矿烧结烟气循环工艺优缺点分析[J]. 烧结球团,2014,39(1):51 – 55.
YU Heng,WANG Haifeng,ZHANG Chunxia. Analysis on advantages and disadvantages of sintering waste gas recirculation process[J]. Sintering and Pelletizing,2014,39(1):51 – 55.

[36] EISEN H P,HUSIG K R,KOFLER A. Construction of the exhaust recycling facilities at a sintering plant[J]. Stahl Undsen,2004,124(5):37 – 40.

[37] 胡兵,贺新华,王兆才,等. 烟气循环烧结过程风氧平衡[J]. 钢铁,2014,49(9):15 – 20.
HU Bing, HE Xinhua, WANG Zhaocai, et al. Wind and oxygen balance based on flue gas circulation sintering process[J]. Iron & Steel,2014,49(9):15 – 20.

[38] MENAD N, TAYIBI H, CARCEDO F G, et al. Minimization methods for emissions generated from sinter strands: A review[J]. Journal of Cleaner Production, 2006,14(8):740 – 747.

[39] FLEISCHANDER A. MEROS-Improved dry sintering waste gas treatment process[J]. Rev. Métall, 2006, 29: 481 – 484.

[40] FLEISCHANDERL A,AICHINGER C,ZWITTAG E. 环保型烧结生产新技术:Eposint and MEROS[J]. 中国冶金,2008,18(11):41 – 46.
FLEISCHANDERL A, AICHINGER C, ZWITTAG E. New developments for achieving environmentally friendly sinter production: Eposint and MEROS[J]. China Metallurgy,2008,18(11):41 – 46.

[41] 郭晓庆,袁林,张军,等. 使用二氧化碳作传输介质进行高炉喷煤的方法:201010268748.1[P]. 2010 – 08 – 30.
GUO Xiaoqing,YUAN Lin,ZHANG Jun,et al. Method of coal injection in blast furnace using carbon dioxide as transfer medium:201010268748.1[P]. 2010 – 08 – 30.

[42] 符政学,符晓. 向高炉鼓风混入热风炉废气的炼铁方法:201210169816.8[P]. 2012 – 05 – 20.
FU Zhengxue,FU Xiao. Ironmaking method of mixing hot blast furnace exhaust gas to blast furnace blast air: 201210169816.8[P]. 2012 – 05 – 20.

[43] 洪永刚. 铁水喷吹 CO_2 脱硅的试验研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
HONG Yonggang. Experimental study on desiliconization of hot metal with carbon dioxide injection[D]. Shenyang:Northeastern University,2012.

[44] 刘锦周. 氧气高炉炉身煤气和循环煤气行为基础研究[D]. 北京:北京科技大学,2015.
LIU Jinzhou. Fundamental research on shaft and cycle gas behaviors in oxygen blast furnace[D]. Beijing: University of Science and Technology Beijing,2015.

[45] WU W H,ZHU R,WEI G S,et al. Modeling on the blast furnace with CO_2-enriched hot blast[J]. Journal of Cleaner Production,2021,319:128690.

[46] 张伟,李智峥,朱荣,等. 炼钢过程喷吹CO_2的实验研究[J]. 工业加热,2015,44(2):41 – 44.
ZHANG Wei, LI Zhizheng, ZHU Rong, et al. Experimental study of CO_2 blowing in steelmaking process[J]. Industrial Heating,2015,44(2):41 – 44.

[47] 吕明,朱荣,毕秀荣,等. 二氧化碳在转炉炼钢中的应用研究[J]. 北京科技大学学报,2011,33(增刊1):126 – 130.
Lü Ming, ZHU Rong, BI Xiurong, et al. Study on application of carbon dioxide in converter steelmaking [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing,2011,33(Suppl 1):126 – 130.

[48] 于春强. 转炉底吹二氧化碳技术的应用[J]. 河北冶金,2022(10):35 – 38;44.
YU Chunqiang. Application of converter bottom blowing carbon dioxide technology[J]. Hebei Metallurgy, 2022 (10):35 – 38;44.

[49] 陈双兵,白斌,郑新国,等. CO_2 替代 Ar 净化钢液工艺研究[J]. 山西冶金,2014,37(3):22 – 23.
CHEN Shuangbing, BAI Bin, ZHENG Xinguo, et al. Investigation on process of cleaning molten steel with CO_2 as substitute for Ar[J]. Shanxi Metallurgy, 2014, 37(3):22 – 23.

[50] 靳任杰,朱荣,冯立新,等. 二氧化碳 – 氧气混合喷吹炼钢实验研究[J]. 北京科技大学学报,2007,29(增刊 1):77 – 80.
JIN Renjie, ZHU Rong, FENG Lixin, et al. Experimental study of steelmaking with CO_2 and O_2 mixed blowing [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 29(Suppl 1):77 – 80.

[51] 李宏,冯佳,李永卿,等. 转炉炼钢前期石灰石分解及 CO_2 氧化作用的热力学分析[J]. 北京科技大学学报,2011,33(增刊 1):83 – 87.
LI Hong, FENG Jia, LI Yongqing, et al. Thermodynamic analysis of limestone decomposition and CO_2 oxidation effect in the early stage of BOF steelmaking[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2011, 33(Suppl 1):83 – 87.

[52] 李智峥,朱荣,刘润藻,等. 炼钢过程底吹气体的冶炼效果对比[J]. 钢铁,2016,51(9):40 – 45.
LI Zhizheng, ZHU Rong, LIU Runzao, et al. Comparison of smelting effects by bottom blowing different gases[J]. Iron & Steel, 2016, 51(9):40 – 45.

[53] 李亚华. 氧气转炉炼钢用石灰石代替石灰节能减排初探[J]. 冶金与材料,2023,15(10):13 – 15.
LI Yahua. Preliminary study on energy saving and emission reduction of limestone instead of lime in oxygen converter steelmaking[J]. Metallurgy and Materials, 2023, 15(10):13 – 15.

[54] 王玉刚,樊赛,陈东宁,等. 转炉炼钢中用石灰石部分代替石灰的生产实践[J]. 河北冶金,2017(11):54 – 57.
WANG Yugang, FAN Sai, CHEN Dongning, et al. Production practice of partial limestone instead of lime in converter steelmaking[J]. Hebei Metallurgy, 2017(11): 54 – 57.

[55] ANDERSON S H, FOULARD J, LUTGEN. N. Inert gas technology for the production of low nitrogen steel[C]// 47th Electric Furnace Conference Proceedings. Orlando: The Electric Furnance Division of the Iron and Steel Society, 1989:365 – 375.

[56] GU Y L, WANG H J, ZHU R, et al. Study on experiment and mechanism of bottom blowing CO_2 during the LF refining process[J]. Steel Research International, 2014, 85(4):589 – 598.

[57] 谷云岭,朱荣,吕明,等. LF 精炼炉底吹CO_2气体的工业探索性研究[J]. 钢铁,2013,48(8):34 – 39.
GU Yunling, ZHU Rong, LÜ Ming, et al. Exploratory research on bottom blowing CO_2 during the LF refining process[J]. Iron & Steel, 2013, 48(8):34 – 39.

[58] 董凯,王春阳,朱荣,等. 转炉底吹 O_2 – 石灰粉技术的发展现状及展望[J]. 钢铁,2023,58(8):13 – 24.
DONG Kai, WANG Chunyang, ZHU Rong, et al. Development status and prospects of bottom-blown O_2-CaO technology in converter steelmaking process [J]. Iron & Steel, 2023, 58(8):13 – 24.

[59] 魏光升,韩宝臣,朱荣. CO_2 作为 RH 提升气的冶金反应行为研究[J]. 工程科学学报,2020,42(2):203 – 208.
WEI Guangsheng, HAN Baochen, ZHU Rong. Metallurgical reaction behavior of CO_2 as RH lifting gas [J]. Chinese Journal of Engineering, 2020, 42(2): 203 – 208.

[60] HAN B C, ZHU R, ZHU Y Q, et al. Research on selective oxidation of carbon and aluminum with introduction of CO_2 in RH refining of low-carbon steel process[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2018, 49(6):3544 – 3551.

[61] HAN B C, ZHU R, FENG C, et al. CO_2 effective conversion in Fe-C-Al-Si molten steel under vacuum conditions[J]. Vacuum, 2020, 179:109520.

[62] HAN B C, ZHU R, WEI G S, et al. Theoretical and experimental research on the mass changes of elements in molten steel with CO_2 used as RH lifting gas[M]//The Minerals, Metals & Materials Series. Cham: Springer International Publishing, 2020:99 – 110.

[63] HAN B C, WEI G S, ZHU R, et al. Utilization of carbon dioxide injection in BOF-RH steelmaking process[J]. Journal of CO_2 Utilization, 2019, 34:53 – 62.

[64] 陈固军,杨江,李龙,等. 超低碳钢 RH 混合喷吹 Ar-CO_2冶金反应特性[J]. 钢铁,2022,57(3):55 – 60.
CHEN Gujun, YANG Jiang, LI Long, et al. Metallurgical reaction behavior of Ar-CO_2 mixed injection during RH refining process[J]. Iron & Steel, 2022, 57(3):55 – 60.

[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.