

氢冶金驱动炼铁行业低碳发展的实践探索

欧金雄¹,孙乾²,程欣丽³,李岩²,武晓霞²

(1. 南京钢铁股份有限公司, 江苏 南京 210035; 2. 山东钢铁股份有限公司, 山东 济南 271104; 3. 山东蓝天科技发展集团有限公司, 山东 济南 271104)

摘要:近年来,全球气候变化加剧,低碳经济成为发展趋势,钢铁行业作为碳排放重点领域,其炼铁环节的低碳转型至关重要。现代主流炼铁工艺中,高炉炼铁占据主导地位,但碳排放量高;直接还原铁工艺存在资源依赖、能耗高等问题;熔融还原工艺技术经济性尚未突破。氢冶金是实现“零碳炼铁”的核心路径,氢冶金理论上可减少约90%的二氧化碳排放,但面临制氢成本高、技术成熟度与设备适配性不足等挑战。提出传统工艺低碳化升级与技术创新协同、能源结构转型与产业协同减排等策略。未来传统高炉工艺将加速低碳化改造,非高炉炼铁技术有望规模化突破,氢能产业链成熟度影响转型速度,多方协同将助力钢铁行业实现碳中和目标。

关键词:炼铁;氢冶金;低碳发展;碳减排;碳中和

中图分类号: TF4 **文献标志码:** A **文章编号:** 1006-4613(2026)03-0024-07

DOI: 10.3969/j.issn.1006-4613. 2026. 02. 003

Practical Exploration of Hydrogen Metallurgy Driving Low-carbon Development of Ironmaking Industry

OU Jinxiong¹, SUN Qian², CHENG Xinli³, LI Yan², WU Xiaoxia²

(1. Nanjing Iron & Steel Co., Ltd., Nanjing 210035, Jiangsu, China;

2. Shandong Iron & Steel Co., Ltd., Jinan 271104, Shandong, China;

3. Shandong Blue Sky Science and Technology Development Group Co., Ltd., Jinan 271104, Shandong, China)

Abstract: In recent years, with the intensification of global climate change, a low-carbon economy has become a development trend. As a key area for carbon emissions, the low-carbon transformation of the ironmaking process in the steel industry is of vital importance. Among the contemporary mainstream ironmaking processes, although blast furnace ironmaking dominates, its carbon emissions are high. The direct reduction process has problems such as resource dependence and high energy consumption. The technical economy of the smelt reduction process has not yet been broken through. Meanwhile, hydrogen metallurgy is the core path to achieve “zero-carbon ironmaking”, which is theoretically capable of reducing CO₂ emissions by approximately 90%. However, it faces challenges such as high hydrogen production costs, insufficient technological maturity and equipment compatibility. Strategies such as the synergy between the low-carbon upgrading of traditional processes and technological innovation, and the transformation of the energy structure and the collaborative emission reduction of industries are proposed. In the future, traditional

欧金雄,工程师,2021年毕业于南京理工大学机械工程专业。E-mail: 1917277372@qq.com

通讯作者:孙乾,硕士,工程师,2018年毕业于西安建筑科技大学冶金工程专业。E-mail: sunqian0630@qq.com

blast furnace processes will accelerate their low-carbon transformation, and non-blast furnace ironmaking technologies are expected to achieve large-scale breakthroughs. The maturity of the hydrogen energy industry chain affects the speed of transformation, and multi-party collaboration will help the steel industry achieve the goal of carbon neutrality.

Key words: ironmaking; hydrogen metallurgy; low-carbon development; carbon emission reduction; carbon neutrality

近年来,全球气候变化形势愈发严峻,温室气体排放导致的气温上升、极端气候事件频发等问题,给人类社会和生态环境带来了严重威胁。根据国际能源署(IEA)的数据,2025年全球二氧化碳排放量同比增长1.1%,总量达381.0亿t。钢铁行业作为能源消耗和碳排放的重点领域,在全球碳减排行动中扮演着关键角色^[1-2]。

随着人们对气候变化问题关注度的不断提高,低碳经济已成为全球经济发展的必然趋势。各国纷纷制定碳减排目标,推动经济向低碳、绿色方向转型。例如,欧盟提出,到2030年将温室气体排放量较1990年减少至少55%,到2050年实现碳中和^[3]。中国也明确了“双碳”目标,即2030年前实现碳达峰,2060年前实现碳中和。在这一背景下,钢铁行业的低碳转型迫在眉睫,炼铁作为钢铁生产的核心环节,其低碳发展对于实现全球碳减排目标具有重要意义^[2-3]。

1 炼铁行业碳排放现状与低碳需求

1.1 炼铁行业在全球经济中的地位与碳排放现状

炼铁行业是全球工业体系的重要组成部分,为建筑、机械、汽车、能源等众多领域提供基础原材料。据世界钢铁协会(World Steel Association, WSA)统计,2025年全球粗钢产量预计达到20.1亿t,生铁产量同步攀升至13.5亿t。中国作为全球最大钢铁生产国,2025年生铁产量达7.6亿t,占全球总产量比重约56.3%。然而,炼铁过程的高能耗和高碳排放问题十分突出,传统高炉炼铁工艺主要以焦炭为燃料和还原剂,铁矿石还原过程产生大量二氧化碳。据相关研究,每生产1t生铁,高炉炼铁工艺二氧化碳排放量约为1.5~2.0t。钢铁行业碳排放约占全球人为碳排放总量的7%~9%,而炼铁的碳排放占钢铁行业总排放量的60%~70%。表1为2020—2025年全球及中国生铁产量与碳排放趋势^[3-5]。

表1 2020—2025年全球及中国生铁产量与碳排放趋势
Table 1 Trends of Global and Chinese Pig Iron Production and Carbon Emissions from the Year 2020 to 2025

年份	全球生铁 产量/亿t	全球炼铁 碳排放量/亿t	中国生铁 产量/亿t	中国炼铁 碳排放量/亿t
2020	11.5	17.3~23.0	8.9	13.3~17.7
2021	11.8	17.7~23.6	8.7	13.0~17.4
2022	11.5	17.3~23.0	8.1	12.1~16.2
2023	12.0	18.0~24.0	7.8	11.7~15.6
2024	12.8	19.2~25.6	7.7	11.6~15.4
2025	13.5	20.3~27.0	7.6	11.4~15.2

由表1看出,炼铁碳排放量居高不下,在全球积极应对气候变化、推动低碳经济发展的大背景下,必须加快低碳炼铁技术研发和应用,降低碳排放,实现可持续发展。

1.2 低碳炼铁技术发展的必要性和前景

面对日益严格的环保要求和全球碳减排目标,发展低碳炼铁技术已成为炼铁行业可持续发展的必然选择。一方面,传统炼铁工艺的高碳排放使其面临巨大的环境压力,若不进行技术革新,将难以满足未来环保法规的要求,甚至可能面临限产、停产等风险。另一方面,随着低碳经济的发展,市场对低碳钢铁产品的需求逐渐增加,企业通过采用低碳炼铁技术,能够提高产品的市场竞争力,开拓新的市场空间^[4-5]。

从技术发展前景来看,近年来,全球在低碳炼铁技术研发方面取得了一系列进展。如氢基直接还原铁(H_2 -DRI)技术,以氢气代替传统的焦炭作为还原剂,理论上可实现近零碳排放,被认为是未来低碳炼铁的重要发展方向。碳捕集、利用与封存(CCUS)技术在炼铁领域的应用研究也在逐步深入,通过捕集炼铁过程中产生的二氧化碳并进行有效利用或封存,可显著降低碳排放强度^[5]。此外,全球在新型炼铁原料的开发、高效低耗的烧结技术和球

团矿的应用等方面也取得了重要突破。

预计未来,随着技术的不断进步和成本的逐步降低,低碳炼铁技术将得到更广泛的应用。这不仅有助于钢铁行业实现碳减排目标,还将推动整个产业链向绿色、低碳方向升级,为全球可持续发展做出积极贡献^[5-6]。

2 现代主流炼铁工艺分析

2.1 高炉炼铁工艺

高炉炼铁凭借技术成熟与规模效应优势,在全球钢铁生产中占据主导地位,2025年,中国生铁产量达7.6亿t,其中高炉炼铁贡献约93.5%,高炉炼铁工艺流程如图1所示。

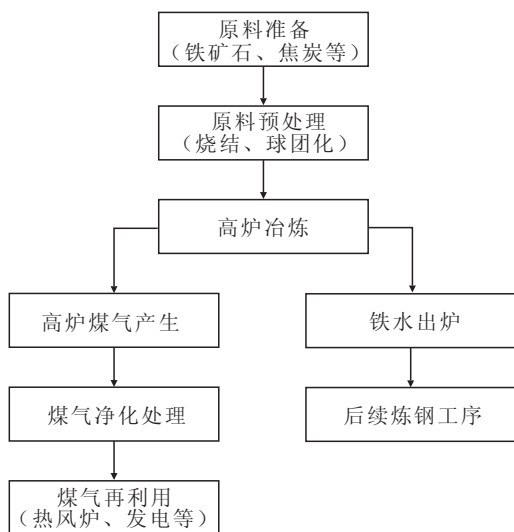


图1 高炉炼铁工艺流程

Fig. 1 Process Flow of Blast Furnace Ironmaking

全球范围内,高炉生铁产量占比长期稳定在80%以上。高炉炼铁工艺以精料技术为基础,通过对铁矿石、焦炭等原料进行深度预处理,实现低渣比、低硅冶炼,为后续炼钢工序提供优质铁水。在配套设施方面,先进热风炉结合脱湿鼓风、富氧鼓风与喷吹煤粉技术,显著优化燃料结构,使现代大型高炉焦比降低至330 kg/t以下,单炉日产铁水可达1万t以上,炉役寿命延长至15~20年^[5-7]。

然而,高炉炼铁的碳基还原本质使其成为碳排放核心环节。每生产1t生铁,高炉工艺产生的二氧化碳排放量约1.8 t,2025年中国高炉炼铁碳排放量约11.6亿t(按7.6亿t生铁产量及吨铁1.52 t碳排放计算)。面对全球碳中和目标,该工艺亟需技术革

新以降低碳排放^[8-9]。

2.2 直接还原铁工艺

直接还原铁工艺在非高炉炼铁技术中发展较为成熟,分为气基和煤基两种路线,2024年分别占比75%和25%。气基直接还原以Midrex和HYL-III工艺为代表,利用天然气重整产生的氢气和一氧化碳还原铁矿石,生产固态直接还原铁(DRI)。全球气基DRI产量在2025年达到1.45亿t,占直接还原铁总产量的78%。该工艺最大单台设备年产能达250万t,但依赖天然气资源,若使用煤制气替代则存在设备投资高、气体净化成本大等问题^[8-10]。

煤基直接还原则以回转窑工艺为主,将铁矿石与固体还原剂混合加热还原,但因单台设备规模小(通常低于50万t/a)、能耗高,在中国7条已建生产线均因成本问题停产。直接还原铁工艺虽摆脱对焦炭的依赖,但整体能耗较高炉工艺高15%~20%,其应用仍局限于天然气资源丰富或电价低廉地区^[9-10]。

2.3 熔融还原工艺

熔融还原工艺旨在以非焦煤为燃料生产液态铁水,典型熔融还原工艺流程如图2所示。

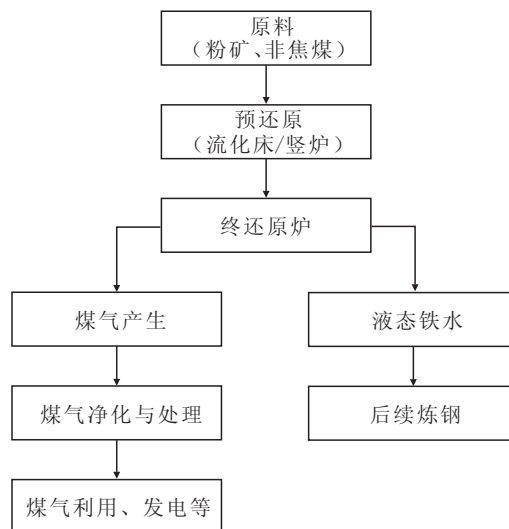


图2 典型熔融还原工艺流程

Fig. 2 Typical Smelting Reduction Process Flow

典型熔融还原技术包括Corex、Finex、HISarna和Hmelt。Corex工艺作为最早实现工业化的熔融还原技术,通过预还原竖炉和终还原炉分步还原铁矿石,但因能耗比高炉炼铁高10%~15%,且需使用块矿或球团矿,全球产能始终未突破千万吨,截至

2025年,全球Corex工艺总产能约680万t/a(受技术优化及局部产能扩容影响小幅增长)。Finex工艺采用流化床预还原技术,可处理粉矿,但设备复杂、运行稳定性不足。最新的HISarna工艺简化流程,实现一步法熔融还原,但其吨铁能耗仍高于高炉炼铁10%左右。HImelt工艺则采用铁浴熔融还原技术,以粉煤和铁矿粉为原料,通过喷枪将粉煤和氧气直接喷入铁浴炉内完成还原与熔融反应,无需对原料进行造块处理,原料适应性强;该工艺单炉年产能可达80万t,但存在炉衬侵蚀严重、喷枪寿命短(平均使用寿命约3000h)、操作稳定性有待提升等问题,目前全球仅澳大利亚、印度等国建有少量工业示范装置^[9-11]。

尽管熔融还原工艺在减少焦炭依赖方面取得进展,但技术经济性尚未突破。2025年,全球熔融还原铁产量约630万t,仅占生铁总产量的0.42%。这些工艺的发展困境表明,在技术成熟度、成本控制和规模效应方面,非高炉炼铁仍难以撼动高炉炼

铁的主导地位^[9-11]。

3 国内外炼铁低碳发展的情况

3.1 国内钢铁企业低碳技术创新实践

近年来,国内钢铁企业积极响应“双碳”目标,在低碳技术研发与应用方面取得显著进展。河钢集团通过构建碳资产管理体系,2024年完成碳排放配额交易规模超250万t,同时建成全球首座富氢气体直接还原铁工厂,实现焦炉煤气制氢与DRI生产的技术突破,年减排二氧化碳约40万t。宝武集团作为行业龙头,2022年启动核能制氢-氢气炼铁中试项目,并成立世界低碳冶金创新研究中心,计划到2035年实现碳排放量较2020年降低30%。日照钢铁与中国钢研合作开展全氢竖炉试验,2024年完成中试装置建设,预计吨铁碳排放较传统工艺降低85%^[10-12]。山西建龙提出“氢冶金+熔融还原”产业规划,规划建设年产100万t氢基竖炉,配套煤气化制氢系统。表2为国内典型钢铁企业低碳项目进展。

表2 国内典型钢铁企业低碳项目进展

Table 2 Progress of Low-carbon Projects of Typical Domestic Steel Enterprises

企业名称	项目名称	技术路线	建设进度	预计减排量/(万 t/a)
河钢集团	富氢直接还原铁项目	焦炉煤气重整制氢	已投产	40
宝武集团	核能制氢炼铁项目	核能电解水制氢	中试阶段	—
日照钢铁	全氢竖炉项目	可再生能源制氢	中试完成	85
山西建龙	氢冶金示范工程	煤气化制氢+竖炉还原	规划阶段	120

3.2 国外钢铁行业低碳转型典型案例

国外钢铁企业在低碳转型方面起步较早,形成多个具有示范效应的技术路线。表3为国外典型低碳炼铁项目的技术特点。

欧盟ULCOS(超低二氧化碳炼钢)计划自2008年启动,累计投入超过15亿欧元,开发出氢气直接还原、熔融还原结合CCUS等技术,预计2030年可实现吨钢碳排放较传统工艺降低30%。德国蒂森克虏伯于2021年投产H₂Future项目,采用天然气重整制氢结合CCUS技术,年生产低碳海绵铁10万t^[12-13]。瑞典HYBRIT项目作为全球首个无化石燃料炼铁试点,2023年实现全流程试运行,采用风电电解水制氢还原铁矿石,预计2030年建成年

产500万t零碳钢厂。

表3 国外典型低碳炼铁项目的技术特点

Table 3 Technology Characteristics of Typical Low-carbon Ironmaking Project Abroad

项目名称	所属国家及地区	核心技术	减排目标
ULCOS	欧盟	氢气还原+CCUS	2030年减排30%
H ₂ Future	德国	天然气重整制氢+CCUS	近零排放
HYBRIT	瑞典	风电制氢还原	2030年零排放
COURSE50	日本	高炉煤气循环+CCUS	2050年减排80%

3.3 国内外低碳技术发展对比与启示

对比国内外低碳炼铁技术发展看出,国内企业更侧重现有工艺的低碳化改造与氢能替代试点,而国外更倾向于颠覆性技术的全流程研发。在政策支持方面,欧盟通过碳边境调节机制(Carbon Border Adjustment Mechanism, CBAM)倒逼企业减排,美国《通胀削减法案》对低碳钢铁提供税收优惠,而中国主要依赖碳排放权交易市场与财政补贴^[11-13]。

从技术经济性角度看,国外氢气直接还原项目受制于高成本电价,部分项目仍需依赖政府补贴;国内CCUS技术虽取得突破,但捕集成本仍高于国际水平。未来,国内外需加强技术协同创新,

推动可再生能源制氢、低成本CCUS等关键技术突破,同时完善低碳政策体系,加速钢铁行业绿色转型进程^[11-13]。

4 传统冶金技术向氢冶金技术的转变

4.1 氢冶金技术优势与发展现状

表4为氢冶金技术与传统碳冶金技术的关键指标对比。氢冶金技术以氢气作为主要还原剂,通过化学反应式 $\text{Fe}_2\text{O}_3+3\text{H}_2=2\text{Fe}+3\text{H}_2\text{O}$ 实现铁矿石还原,与传统碳冶金($\text{Fe}_2\text{O}_3+3\text{CO}=2\text{Fe}+3\text{CO}_2$)相比,理论上可减少约90%的二氧化碳排放。从还原效率看,氢气反应产物的扩散系数是一氧化碳的3.8倍,能显著提高反应速率,缩短冶炼时间。

表4 氢冶金技术与传统碳冶金技术的关键指标对比

Table 4 Comparison of Key Indicators between Hydrogen Metallurgy and Traditional Carbon Metallurgy

技术类型	还原剂	主要副产物	吨铁碳排放量/t	反应温度/℃	能量利用率/%
氢冶金技术	氢气	水	<0.1	600~800	65~70
传统碳冶金技术	焦炭/一氧化碳	二氧化碳	1.8~2.2	1 400~1 600	40~45

2025年,全球氢冶金相关专利申请量较2020年增长210%,其中中国占比达48%,显示出该领域技术研发的活跃态势。

在工业化应用方面,瑞典HYBRIT项目2024年完成首座氢基竖炉建设,采用风电制氢技术,试点产能达10万t/a,吨铁氢耗约3 500 m³,碳排放趋近于零^[13-14]。宝武集团2023年启动的“氢基竖炉-电炉短流程”示范项目利用焦炉煤气提氢技术,实现吨钢减排二氧化碳1.2 t,目前已进入工业试验阶段。

4.2 氢冶金技术面临的挑战与突破方向

尽管氢冶金技术具有显著低碳优势,但其大规模应用仍面临多重挑战。首先是制氢成本问题,2025年全球88%的氢气仍来自化石燃料重整,灰氢生产成本稳定在2.2~2.3美元/kg,而绿氢(可再生能源制氢)成本降至2.8~3.5美元/kg,中国多个试点项目已实现绿氢成本3美元/kg以下的目标,达到“十四五”规划要求,其中电解水制氢成本低至20~30元/kg^[1,11-13]。

其次是技术成熟度与设备适配性。氢冶金对炉体材料抗氢腐蚀性能要求极高,瑞典SSAB公司开发的特种不锈钢炉衬使用寿命较传统材料提升

3倍,但成本增加40%。此外,氢气易燃易爆的特性对储运安全提出更高要求,欧盟制定的《氢安全法规》要求输氢管道压力等级提升至10 MPa以上,导致基础设施投资成本增加20%~30%^[10-12]。

为突破上述瓶颈,国内外正聚焦以下技术方向:

(1) 低成本制氢。中国在内蒙古布局的光伏制氢项目,通过“光伏-电解水-储氢”一体化设计,将绿氢成本降至3.5美元/kg,2025年实现万吨级产能。

(2) 氢能储运技术。日本开发的液氢储氢技术,储氢密度达176 kg/m³,较高压气态储氢提升3倍,且运输成本降低50%。

(3) 工艺集成创新。德国蒂森克虏伯的H₂FIRE项目,将氢基直接还原与熔融还原结合,实现全流程氢冶金,预计2030年产能突破百万吨级^[13-15]。表5为氢冶金关键技术的突破进展与商业化时间。

氢冶金技术作为颠覆性低碳技术,其发展不仅依赖技术创新,更需要政策支持与产业链协同。中国“双碳”政策中明确提出“支持氢能在钢铁行业的

替代应用”,预计到2035年,氢冶金将贡献钢铁行业碳减排量的20%~25%。未来十年,随着绿氢成本持续下降与工艺成熟度提升,氢冶金技术有望逐步从试点走向规模化应用,推动钢铁行业向“零碳”目标迈进^[12-15]。

表5 氢冶金关键技术的突破进展与商业化时间

技术方向	突破点	商业化时间	预期成本降幅/%
绿氢制备	光伏电解水效率提升至25%	2025年	30~40
储氢材料	金属有机框架(MOF)储氢	2026年	20~25
炉体材料	复合陶瓷抗氢腐蚀涂层	2027年	15~20
工艺集成	氢基竖炉-电炉短流程	2030年	10~15

5 炼铁低碳发展策略

5.1 传统工艺低碳化升级与技术创新协同

优化高炉炼铁工艺是现阶段炼铁低碳发展的重要基础。2020—2025年,中国钢铁企业通过强化精料技术应用,平均入炉矿品位从62%提升至64%,降低渣比10~15 kg/t,减少能源消耗约3%。先进热风炉技术的推广使风温提升至1 250~1 300 °C,配合富氧喷煤技术,高炉焦比从2020年的380 kg/t降至2025年的318 kg/t,吨铁二氧化碳排放量减少约10%^[15-16]。

在非高炉炼铁技术创新方面,国内企业积极探索直接还原铁工艺的改进。河钢集团2024年建成的富氢直接还原铁项目采用焦炉煤气重整制氢技术,相较于传统气基直接还原铁工艺,能耗降低15%,碳排放量减少30%。表6为2020—2025年中国炼铁工艺技术升级的关键指标变化^[15-17]。

此外,产学研协同创新机制加速了低碳技术的研发与应用。宝武集团联合高校、科研机构开展氢基竖炉-电炉短流程技术攻关,2024年完成中试,预计该技术全面应用后,可使钢铁生产流程碳排放降低40%~50%。图3为传统高炉炼铁工艺低碳化升级的技术路径^[16-17]。

表6 2020—2025年中国炼铁工艺技术关键指标变化

Table 6 Key Indicators Changes of Chinese Ironmaking Process Technology from the Year 2020 to 2025

年份	入炉矿品位/%	渣比/(kg/t)	焦比/(kg/t)	吨铁CO ₂ 排放量/t
2020	62.0	300	380	1.85
2021	63.0	285	365	1.78
2022	63.5	275	345	1.72
2023	64.0	265	330	1.65
2024	64.0	265	325	1.60
2025	64.0	260	318	1.52

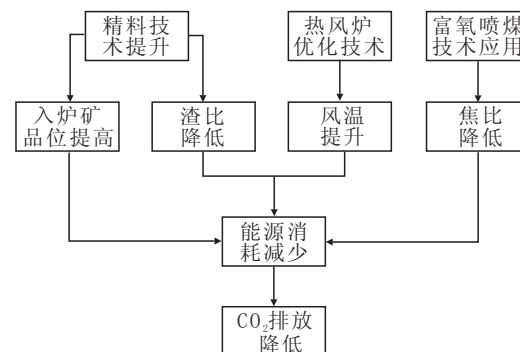


图3 传统高炉炼铁工艺低碳化升级的技术路径

Fig. 3 Technology Path for Low-carbon Upgrade of Traditional Blast Furnace Ironmaking Process

5.2 能源结构转型与产业协同减排

推动能源结构调整是实现炼铁低碳发展的核心方向。2025年,中国钢铁行业可再生能源用电量占比达13.5%,较2020年提高8.3个百分点。宝武集团湛江钢铁基地光伏发电项目扩容后,年发电量达1.5亿kW·h,替代部分传统电力,减少二氧化碳排放约12.5万t。在氢能应用方面,山西建龙规划的氢能炼铁项目,计划配套建设50万kW风电制氢系统,2025年投产后,可实现年减排二氧化碳80万t。

碳捕集、利用与封存(CCUS)技术的发展为炼铁低碳化提供了重要补充。截至2024年底,全球已投运的钢铁行业CCUS项目达15个,年捕集二氧化碳能力约1 000万t。中国首个钢铁行业CCUS示范项目——华能石洞口第二电厂,通过捕集高炉煤气中的二氧化碳用于食品加工,年利用量达10万t。图4为钢铁行业能源结构转型与CCUS技术应用的协同减排模式^[17-19]。

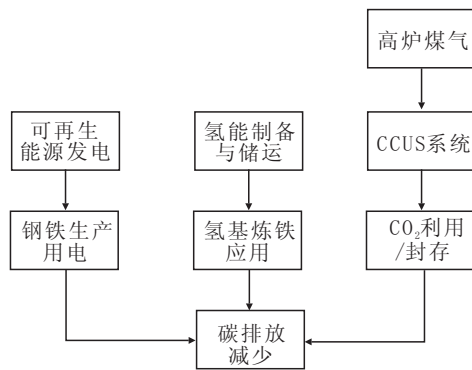


图4 钢铁行业能源结构转型与
CCUS技术应用的协同减排模式

Fig. 4 Energy Structure Transformation of the Steel
Industry and CCUS Synergistic Emission Reduction Model

产业协同减排方面,钢铁企业与化工、能源企业合作开发余热余能回收利用技术。2025年,中国钢铁行业余热余能自发电率提升至45%,较2020年提高13个百分点,较2023年提高3个百分点,完成国家节能降碳专项行动阶段性目标^[3]。表7对比了不同能源结构转型路径下的减排效果。

表7 不同能源结构转型路径的减排效果

Table 7 Emission Reduction Effects of Different
Energy Structure Transformation Paths

转型路径	减排原理	典型案例	CO ₂ 年减排量/ 万t
可再生能源替代	减少火电使用	宝武集团湛江光伏项目	10
氢炼铁	以氢代碳	山西建龙氢能项目(规划)	80
CCUS技术	捕集封存CO ₂	华能石洞口项目	10

通过传统工艺升级、技术创新、能源结构转型与产业协同等多维度策略的实施,炼铁行业正逐步构建起多元化的低碳发展体系。未来,随着技术的持续突破和政策的进一步支持,炼铁行业将加速向绿色低碳目标迈进^[19-20]。

6 结论与展望

当前,炼铁行业正处于传统工艺主导与低碳技术革新并行的关键转型期。高炉炼铁凭借技术成熟度与规模效应,仍是全球主流工艺,2025年中国

高炉生铁产量占比约93.5%(受非高炉工艺小幅替代影响微降),但碳基还原特性使其面临严峻的减排压力,吨铁二氧化碳排放量降至1.52 t。非高炉炼铁工艺中,气基直接还原与熔融还原虽在局部实现突破(如全球气基DRI产量2025年达1.45亿t),但受成本、技术稳定性限制,尚未形成规模替代能力。国内外低碳实践表明,氢冶金技术是实现“零碳炼铁”的核心路径,瑞典HYBRIT项目已实现风电制氢竖炉还原规模化运行,国内宝武集团、河钢集团等企业试点项目吨铁减排提升至0.6~2.3 t,展现出显著潜力。

未来十年,炼铁低碳发展将呈现三大趋势:一是传统高炉工艺加速低碳化改造,通过精料技术、富氢喷吹等手段,预计2030年中国高炉吨铁碳排放可降至1.3 t以下;二是非高炉炼铁技术进入规模化突破期,气基直接还原与氢冶金结合的短流程工艺,有望在2035年占据全球生铁产量的15%~20%;三是氢能产业链成熟度决定转型速度,随着中国“十四五”规划中绿氢成本目标(2025年≤3美元/kg)的落地,氢基竖炉-电炉流程将在2030年后逐步实现商业化普及。此外,CCUS技术与可再生能源的协同应用(如光伏制氢+CO₂封存),将进一步提升减排效率,助力钢铁行业在2060年前实现碳中和目标。炼铁行业的低碳转型,不仅是技术革命,更是产业生态的重构,需政策、资本、技术三方协同,推动“碳冶金”向“氢冶金”的系统性变革。

参考文献

- [1] 王太炎,王少立,高成亮. 试论氢冶金工程学[J]. 鞍钢技术,2005(1):5-7.
- [2] 范铁军. 厚植钢铁行业新型工业化的绿色底蕴[J]. 中国钢铁业,2023(11):13-18.
- [3] 李敏. 节能材料应用于建筑设计中的价值及实践[J]. 新材料与新技术,2024(10):38-40.
- [4] 郭琼. 氢冶金对冶金工业碳排放的减缓效果评估[J]. 冶金与材料,2024,44(3):133-135.
- [5] 乔俏. 区块链技术在能源交易市场的应用与推广策略[J]. 中国经贸导刊,2025(4):13-15.
- [6] 冯相昭,黄晓丹,李欢,等. “双碳”背景下氢冶金发展面临的机遇,挑战及对策建议[J]. 可持续发展经济导刊,2024(1):45-49.
- [7] 周美洁,艾立群,洪陆阔,等. 氢冶金基础研究和新工艺探索[J]. 材料导报,2023,37(13):164-169.
- [8] 杜一鸣,郭豪,游高,等. 绿色低碳氢冶金技术研究进展[J]. 矿业工程,2024,22(2):62-65.

(下转第37页)

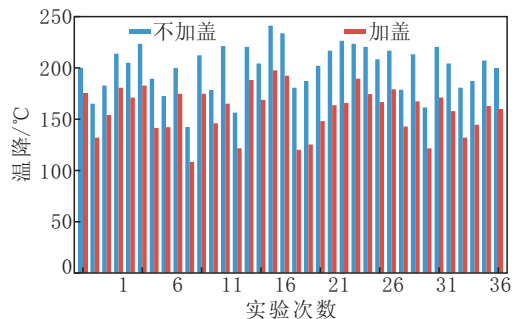


图8 铁水罐敞口运输与加盖保温铁水温降对比

Fig. 8 Comparison of Molten Iron Temperature Drop during Transport with and without Cover Insulation

3 结语

对铁水罐烘烤补热和加盖保温都可以达到提高铁水温度目的,无论是烘烤补热还是加盖保温均通过控制或者弥补罐衬散失的热量来提高铁水温度。烘烤补热可提高铁水温度约 31.0°C ,是提高铁水温度的重要途径,吨铁水减少碳排放 1.30 kg 。加盖保温几乎不需要消耗外部能源,铁水温度可提升 38.9°C ,同时可减少铁水罐烟尘排放对环境的污染,吨铁水减少碳排放 1.64 kg ,是节能减排的最佳模式,千万吨级钢铁企业可减少碳排放量 $16\ 000\text{ t}$ 以上。补热并不是节能减排的最佳模式,但对转炉的促进作用和经济效益要远大于其能源投入,生产中需灵活处理各种温度状态的铁水罐,对于不具加盖条件或者铁水运输线过长加盖效果不好的情况,可同时实施烘烤补热和加盖保

温以进一步提升铁水温度。利用高炉煤气补热能实现传统炼铁工艺的高炉煤气自循环,对于碳减排具有重大意义,是实现超低碳排放的重要手段,能够促进低碳绿色生产模式的实现。

参考文献

- [1] 杨天钧,张建良,刘征建,等. 关于新形势下炼铁工业发展的认识[J]. 炼铁,2020,39(5):1-9.
- [2] 刘然,张智峰,刘小杰,等. 低碳绿色炼铁技术发展动态及展望[J]. 钢铁,2022,57(5):1-10.
- [3] 张继文,牛禄青. 百年首钢绿色低碳发展的实践探索与启示[J]. 新经济导刊,2021(2):41-46.
- [4] 邵玉良,池桂兴. 铁水降耗综合分析[J]. 钢铁,1996(12):55-57,61.
- [5] 殷瑞钰,上官方钦,崔志峰. 钢铁行业低碳发展对策研究:回顾与展望[J]. 中国冶金,2025,35(3):1-15.
- [6] 徐春柏,徐大勇,刘常鹏. 铁水保温输送现状及提高铁水到达钢厂温度的技术和管理措施[J]. 鞍钢技术,2005(1):9-11.
- [7] 吴小弟,佟岗,张永杰,等. T/CISA 087—2021 高炉—转炉界面能效评价技术规范[S]. 北京:中国钢铁工业协会,2021.
- [8] 徐春柏,徐大勇,刘常鹏. 铁水罐在线烘烤工艺试验[C]//2004 全国能源与热工学术年会论文集(2). 云南:中国金属学会能源与热工分会,2004:511-514,517.
- [9] 张寿荣,潘国友,柳萌. “双碳”目标下我国炼铁技术发展路径[J]. 炼铁,2022,41(6):1-7.
- [10] 刘常鹏,徐大勇,张宇,等. 铁水装运过程的温降分析[J]. 冶金能源,2009,28(5):10-12.

(编辑 查松妍)

修回日期:2025-09-22

(上接第30页)

- [9] 张真,杜宪军. 碳中和目标下氢冶金减碳经济性研究[J]. 价格理论与实践,2021(5):65-68.
- [10] 姜周华,杨策,朱红春,等. 氢冶金炼铁技术的研究现状与展望[J]. 钢铁,2024,65(9):18-19.
- [11] 张颖,王莹,查松妍,等. 钢铁行业氢冶金技术路线及发展现状[J]. 烧结球团,2023,48(4):8-15.
- [12] 卢立金,王海风,王锋,等. 氢冶金工艺技术发展现状及应用[J]. 钢铁,2024,59(3):183-196.
- [13] 王晓飞. 基于Deltav系统的串级控制在氢冶金工程中的应用[J]. 冶金信息导刊,2024,19(3):13-16.
- [14] 鲁雄刚,张玉文,祝凯,等. 氢冶金的发展历程与关键问题[J]. 自然杂志,2022,44(4):251-266.
- [15] 郭学益,陈远林,田庆华,等. 氢冶金理论与方法研究进展[J]. 中国有色金属学报,2021,31(7):16-18.
- [16] 鞠茂奇,程水明,夏昌勇,等. 氢冶金用耐火材料体系综述与展望[J]. 陶瓷学报,2024,45(3):437-445.
- [17] 魏炜,饶文涛. 氢冶金场景下规模化固态氢储运技术的开发及应用[J]. 科技导报,2024,42(15):40-48.
- [18] 佟帅,艾立群,洪陆阔,等. 30·60目标下中国氢冶金发展现状及应用前景[J]. 材料导报,2023,37(23):113-120.
- [19] 杨倩鹏,仲理科,王辉,等. 面向氢能冶金的风光互补制氢系统优化配置与经济性分析[J]. 青海科技,2024,31(4):53-60,109.
- [20] 白晓光,冯聪,李玉柱. 低碳氢冶金炼铁技术进展及包钢氢能炼铁技术途径探讨[J]. 包钢科技,2024,50(4):14-20.

(编辑 许营)

修回日期:2025-05-10