

# 江苏省钢铁产业绿色低碳技术创新发展路径

苏丽娟<sup>1</sup>, 陈婷<sup>1\*</sup>, 张姗姗<sup>1</sup>, 张磊<sup>1</sup>, 郭颖<sup>1</sup>, 董雅文<sup>2</sup>

(1. 江苏省环境工程重点实验室, 江苏省环境科学研究院, 江苏 南京 210036;

2. 中国科学院流域地理学重点实验室, 中国科学院南京地理与湖泊研究所, 江苏 南京 210008)

**摘要:** 钢铁产业作为国民经济的重要基础支柱性产业和高碳排放行业, 其绿色低碳转型对实现碳达峰、碳中和目标具有十分重要的作用。在梳理国内外钢铁产业绿色低碳技术进展的基础上, 阐述了江苏省钢铁产业绿色低碳技术发展的特点及实现“双碳”目标面临的挑战, 提出了由能源结构优化、能效提升、钢化联产协同处置和低碳突破性创新等技术综合集成的绿色低碳技术创新体系发展路径。

**关键词:** 钢铁产业; 绿色低碳技术; 创新发展路径; 江苏省

中图分类号: X324

文献标志码: B

文章编号: 1006-2009(2023)01-0004-05

## Innovative Development Path of Green and Low-carbon Technology in Jiangsu Steel Industry

SU Li-juan<sup>1</sup>, CHEN Ting<sup>1\*</sup>, ZHANG Shan-shan<sup>1</sup>, ZHANG Lei<sup>1</sup>, GUO Ying<sup>1</sup>, DONG Ya-wen<sup>2</sup>

(1. *Jiangsu Provincial Key Laboratory of Environmental Engineering, Jiangsu Provincial Academy of*

*Environmental Sciences, Nanjing, Jiangsu 210036, China*; 2. *Key Laboratory of Watershed*

*Geographic Sciences, Nanjing Institute of Geography and Limnology, Chinese Academy of*

*Sciences, Nanjing, Jiangsu 210008, China*)

**Abstract:** Steel industry is an important basic pillar industry of national economy and a high carbon emission industry, its green and low-carbon transformation plays a very important role in achieving the goal of peak carbon dioxide emissions and carbon neutrality. Based on the progress of green and low-carbon technology in steel industry at home and abroad, this paper expounded the characteristics of green and low-carbon technology development in Jiangsu steel industry and the challenges to achieve the “dual carbon” target, put forward the development path of green and low-carbon technology innovation system integrated by energy structure optimization, energy efficiency improvement, co-processing of steel chemical co-production and low-carbon breakthrough innovation.

**Key words:** Steel industry; Green and low-carbon technology; Innovative development path; Jiangsu Province

习近平总书记在第七十五届联合国大会一般性辩论上庄严承诺: 我国 CO<sub>2</sub> 排放力争于 2030 年前达到峰值, 努力争取 2060 年前实现碳中和。钢铁产业是我国国民经济发展的支柱产业, 是建设现代化制造强国的钢铁脊梁<sup>[1]</sup>, 同时也是碳排放量最高的制造业行业, 是落实碳减排目标的重要责任主体。钢铁产业通过绿色低碳发展实现深度碳减排, 将对碳达峰、碳中和全球气候目标达成具有十

分重要的作用<sup>[2-3]</sup>。我国是世界上最大的钢铁生产国, 据国家统计局公布的数据, 2021 年我国粗钢产量 10.32 亿 t, 占全球粗钢产量的 52.90%, 居世

收稿日期: 2022-07-18; 修订日期: 2022-10-19

基金项目: 江苏省生态环境科研基金资助项目(2019005)

作者简介: 苏丽娟(1989—), 女, 安徽淮南人, 工程师, 硕士, 主要从事环境管理政策与环境战略研究。

\* 通信作者: 陈婷 E-mail: 94784625@qq.com

界首位,远高于印度和日本。钢铁行业是温室气体排放的主要行业,我国钢铁行业温室气体排放约占全球温室气体排放的6%,碳排放量占全国碳排放量的16%。大力发展钢铁产业低碳技术,推广低碳技术的应用,是钢铁行业绿色高质量发展的必然趋势,也是实现“双碳”目标的重要保障<sup>[4]</sup>。

## 1 国内外钢铁产业绿色低碳技术进展

生产技术是钢铁行业实现绿色低碳发展的关键。在传统的高炉-转炉长流程中,化石能源的使用造成炼铁、炼钢过程中CO<sub>2</sub>和CO的大量排放<sup>[5]</sup>。因此,加快低碳转型,优化用能与产品结构、产业协同处置、突破性绿色低碳等技术是钢铁行业碳减排的重要抓手。

日本自20世纪70年代初石油危机之后,不断加强钢铁行业工艺创新和改进,以及副产煤气和余热回收利用。20世纪90年代中期,深入推广“3个ECO”低碳社会实施计划,钢铁工业逐步从节能降本转变为降低CO<sub>2</sub>和温室气体排放,积极开发降低CO<sub>2</sub>排放新技术,加强废弃物回收,开展生命周期评价。2008年启动COURSE50项目,重点研发基于氢还原的高炉煤气分离、回收CO<sub>2</sub>技术,计划在2030年降碳30%<sup>[6-7]</sup>。此外,还推动核电、可再生能源等零排放发电技术及无碳制氢技术等基础性研究,挑战“零碳钢”目标。

美国自1990年以来,钢铁工业实施平炉淘汰、落后设备关停,连铸比显著提高,工艺技术改善,在节能减碳方面取得显著成效<sup>[8]</sup>。其低碳技术主要为氢气闪速熔炼法和熔融氧化物电解法<sup>[9]</sup>,根据钢铁生产流程形成一套完备的废弃物采集、回收、储存、运输、转化处理系统。2021年,电炉钢占比已达68%,在能耗水平和CO<sub>2</sub>排放方面具备优势。此外,还建成全美首座100%风能供电炼钢厂和100%太阳能供电炼钢厂。

德国钢铁工业经过设备大型化改造、淘汰碱性底吹空气转炉和平炉炼钢工艺、发展连铸技术、缩短生产流程、应用节能技术、加强回收利用等措施,明显降低了能耗和CO<sub>2</sub>排放。2010年发布的《能源规划》明确提出,2050年彻底实现环保型能源供给,温室气体排放在1990年基础上减少80%~95%。Carbon2Chem项目将废气转化为化工产品原材料,CO<sub>2</sub>将不再外排。2019年启动氢能冶金测试,第一次在炼铁工艺中使用氢气替代煤炭<sup>[10]</sup>。

2020年8月,将综合钢厂产生的富氢焦炉煤气输入高炉,用氢取代部分以碳为还原剂的工艺技术。低碳冶炼SALCOS项目通过风电制氢+直接还原,使用绿氢和生物甲烷生产钢铁。

我国钢铁工业绿色低碳发展近年来取得了明显进步<sup>[11]</sup>。20世纪八九十年代,钢铁工业通过氧气转炉取代平炉、连铸取代模铸等生产结构调整及工艺流程优化,实现了降耗提效。20世纪90年代,转炉炼钢进入高速发展期,至2002年底,平炉炼钢被全部淘汰。近年来,干熄焦、干式压差发电与烧结余热回收等节能技术得到推广应用,氢冶金及碳捕集、利用与封存(CCUS)等突破技术得到示范应用<sup>[12]</sup>。河钢宣钢氢能源开发和利用工程示范项目——全球首例120万t规模氢冶金项目于2021年开工建设,建立了世界最大的400m<sup>3</sup>氧气高炉工业试验基地,氢基熔融还原法高纯铸造生铁项目成功落地转化<sup>[10]</sup>。

## 2 江苏省钢铁产业绿色低碳技术研发应用进展

### 2.1 江苏省钢铁产业绿色低碳发展基础

多年来,江苏省钢铁产业产量稳居全国第二。近年来,在生态文明建设、高质量绿色发展的进程中,得益于发改、工信、生态环境和财政金融等部门协同发力、攻坚克难,扎实推进去产能、优结构、降排放、促转型、强创新等工作,有序推动了钢铁产业的绿色低碳发展。

一是分散产能整合有力推进。重点实施环太湖、沿江、沿运河等区域的相对落后冶炼产能退出和搬迁,整合分散冶炼产能。全省钢铁企业2017年49家,2021年整合形成32家装备水平高、长短流程结合、能耗排放低的大型钢铁联合企业,大力提升钢铁产业集中度。

二是产品结构不断升级优化。全省钢铁产业在高端特钢生产方面不断取得突破,螺纹钢等低端钢材占比大幅下降,优特钢棒线材、中厚板、优质钢管等优特钢产量占比接近70%,其中高端特钢占比近20%,在国内处于领先水平。徐州钢铁企业通过整合,压减粗钢产能30%以上。沙钢成功重组东北特钢,抢占技术制高点,普钢变“特”。中信特钢重组青岛特钢,构建了全球最大的专业化特钢龙头企业集团。

三是空间集聚新格局逐步构建。大力推进钢铁产业兼并重组、搬迁改造、区域严控等整治工作,

整合弱小散、发展沿海港。整合后的32家钢铁企业产能主要分布于沿江地区的苏州、无锡、常州、南京等地(23家),炼钢产能约8000万t,占全省总产能的73%左右;沿海地区钢铁冶炼企业6家,炼钢产能约2500万t;徐州原18家钢铁企业整合优化为3家,炼铁产能压减至880万t左右。随着中天南通沿海精品钢基地和盐城德龙二期项目的实施,以及环太湖地区分散产能的退出和搬迁,初步形成沿江、沿海钢铁产业集聚协调发展新格局。

四是高度重视绿色低碳技术研发和推广应用。近年来,全省重点钢铁企业研发投入在钢铁主业营业收入中的占比达到2.0%以上,自主研发了“高品质特殊钢绿色高效电渣重熔关键技术的开发和应用”“高性能细晶粒钢筋的规模化生产及应用关键技术”“热轧板带钢新一代控轧控冷技术及应用”等项目。持续增加在节能环保领域的投资,推广应用国内外先进环保技术,推进节能减排和资源综合利用,发展循环经济,促进减污降碳增效。

江苏省钢铁产业产品从初级生产到深度加工、区域从分散向空间集聚、企业从单体向集群发展,在去产能水平、产品结构、空间布局、技术工艺等方面均处于全国前列<sup>[13]</sup>,全省钢铁产业体系发展的新格局对绿色低碳转型具有重要的支撑作用。

## 2.2 绿色低碳技术研发应用的典型案例

江苏省重点钢铁企业锚定“双碳”目标,通过不断探究和推动钢铁产业绿色低碳技术研发和推广应用,走出一条富有江苏特色的绿色低碳转型升级之路<sup>[14]</sup>。

沙钢集团已建成全国最大的短流程电炉钢生产基地,采用世界薄带前沿技术建成全国首条超薄带工业化生产线,单位燃耗减少95%,电耗减少90%,从源头减少污染物排放、降低能耗。自主开发建成全球最大的转底炉循环利用含铁锌尘泥示范工程,率先将钢铁制造流程由“资源-产品-废物”单向直线型转变为“资源-产品-再生资源”圆周循环型,探索出一套发展绿色产业链的模式。全面启动沿江钢铁精品基地高质量发展,重点建设“基于铸轧薄带工艺的高品质硅钢项目”“高效智能精品板材提升项目”,打造高标准钢铁产业集聚区。

南钢集团针对现有长流程产线进行优化,充分利用废钢资源,2022年初顺利投运废钢预热项目,严格执行低铁耗运行模式。深入推进烧结系统节

能改造,采用新环冷机传动方式和密封系统,突破360烧结工序工艺瓶颈,余热回收增幅66.7%,月可增加发电量280万kW·h。实现焦炉烟气超低排放,成为国内首家焦炉煤气废液制酸单位,首家在电炉炼钢工序采用汽化冷却技术。大力推进跨领域全产业链CCUS重点示范项目,成立产业研究院,建设钢铁、石油、化工联合的工业应用示范基地,开展碳捕集运用到钢渣固化的技术研究工作。

兴澄特钢应用高炉热风炉燃烧控制模型,实施3200m<sup>3</sup>大高炉热风炉模型改造工程,增设一二级接口,实现高炉热风炉全自动燃烧控制与监控。改造后可节约煤气2556万m<sup>3</sup>/a(标准状态下),折合约2.9万t/a(标准煤当量),减排CO<sub>2</sub>约145万t/a。采用烧结机头脱硫、脱硝、脱二噁英与重金属烟气综合净化技术,简化生产工艺,增加材料利用率,降低能耗,实现装备轻量化和智能化。持续致力于高端轴承钢的研发和应用,突破高端轴承国产化的技术瓶颈。

中新钢铁采用富氧烧结技术,配套布设步进式烧结机、高炉、方坯连铸机、高速线棒材生产线等相关设施。为实现绿色低碳发展,对烧结机点火炉进行富氧燃烧技术改造,改造后富氧量为300m<sup>3</sup>/h(标准状态下),可节约燃气约1000m<sup>3</sup>/h(标准状态下),当富氧度为4%时,产量提升2%,点火环节可节约能耗8.3%,减排CO和NO<sub>x</sub>10%以上。

## 2.3 绿色低碳技术创新发展的挑战

“双碳”目标下江苏省钢铁产业绿色低碳技术体系的完善与创新将面临以下挑战。

一是亟须提升突破性绿色低碳技术支撑能力。江苏省钢铁行业绿色低碳发展已经开展了诸多实践探索,绩效和能耗水平均处于全国前列。然而,作为全国第二大钢铁生产基地,下游需求向好,产量压减难度较大,且在“双碳”目标下,要实现更高水平、更具深度的脱碳,还存在绿色低碳突破技术研发应用基础设施建设成本较高的约束、氢能冶炼技术若使用电解水制氢则依赖于零碳电力、CO<sub>2</sub>分离储存利用技术成本较高且不够成熟等问题。因此,亟须提升突破性低碳技术支撑能力,长期探究示范应用突破创新技术<sup>[15-16]</sup>。

二是以长流程为主的工艺结构有待优化。江苏省长流程炼钢企业占比为68.7%,转炉产能占粗钢总产能的85%,电炉产能占17%左右,而美国、韩国、德国、日本等发达国家短流程电炉钢占比

分别为68%、40%、26%、25%。江苏省钢铁生产工艺结构以高炉-转炉长流程为主,以废钢为原料的电弧炉短流程工艺占比较美国、欧洲等西方发达国家相对偏低。长流程炼钢的吨钢CO<sub>2</sub>排放量约为2.2 t,而采用短流程则约为0.8 t。长流程生产工艺已成为CO<sub>2</sub>和大气污染物排放居高不下的的重要原因。

三是末端治理技术存在“天花板”效应。在世界最严的超低排放要求下,江苏省钢铁企业虽然已投入大量资金开展末端治理,但减排空间不断压缩,治理成效有限。末端治理虽然在局部降低了污染物排放,但从全生命周期考虑,无论是动力消耗还是药剂消耗,都间接增加了碳和其他污染物排放,存在可持续性难以保障的风险。规避末端治理的“天花板”效应有一定难度,单纯依靠末端治理难以达到当前减污降碳的要求<sup>[17]</sup>。

四是绿色低碳技术发展政策激励有待加强。相关部门虽然提出了鼓励发展电炉短流程炼钢的产业政策方向,但缺少提高短流程企业市场竞争力的综合支持政策,钢铁上下游产业链循环发展和突破性绿色低碳技术的激励政策也相对缺乏。氢冶金和CCUS等突破性技术探索、示范应用及推广难度大,前期运行成本较高,令很多企业望而却步。

### 3 江苏省钢铁产业绿色低碳技术创新发展路径

#### 3.1 钢铁产业绿色低碳技术集成

在“双碳”目标下,强化用能与产品结构优化、实施全流程节能与提升能效、推进产业协同处置、攻克突破性与关键性技术等综合集成功能效益,是推进钢铁行业绿色低碳高质量发展的必选之路。

一是推进用能与流程结构优化技术。优化原燃料结构,鼓励企业开展高效球团矿生产工艺、熔剂性球团生产、高炉大比例球团矿冶炼、高炉高效使用块矿等先进技术研究与应用,减少烧结矿用量;加强高炉低焦比、高煤比冶炼技术研究与应用,减少焦炭用量。有序引导电炉短流程发展,加强废钢资源回收利用,鼓励高炉-转炉长流程企业转型为电炉短流程企业;推广应用新型节能电炉冶炼、废钢预热等先进工艺,进一步降低原材料和能源消耗。发展新能源与可再生能源,鼓励钢铁企业充分利用风能、太阳能、生物质能等,实现多能互补。加大绿色高性能钢材生产研发力度,加强特钢产业链建设。

二是强化节能与能效提升技术。加快提升钢铁企业余热余能自发电率,积极推广应用《国家重点节能低碳技术推广目录》中先进适用、成熟可靠的技术,促进高能效转化工艺、装备、管理技术创新开发与应用,实现降耗和提效;鼓励钢铁企业及以钢铁为核心的工业园区建设智慧绿色微电网。推进能源管控系统优化,构建设备、工艺、系统“三位一体”的能源管理模式,建立能源预测与调度优化模型,实现对能源产生和消耗的预测、平衡与优化调度,通过能源配置智慧化和精益化管理为节能降碳赋能<sup>[18]</sup>。引导企业优先采用具有更好协同治理效果的技术,实现减污降碳协同治理。

三是持续发展产业协同处置技术。大力推广以高炉渣、钢渣为原料的矿渣微粉、钢渣微粉生产技术应用,鼓励钢铁企业与水泥企业协同合作,延伸产业链,打造绿色低碳水泥与制品。鼓励开展高活性矿渣微粉、钢渣微粉技术研发与应用,提高水泥熟料替代率。推动钢化联产,依托钢铁企业副产——焦炉煤气、转炉煤气、高炉煤气富含的大量H<sub>2</sub>和CO资源,生产高附加值化工产品。研究建立钢化联产“产学研用”创新平台,统筹推进钢铁与石化、化工行业协同发展,研发推广钢化联产先进技术。

四是突破关键性低碳技术。重点围绕以高炉富氢(或纯氢)冶炼和气基竖炉富氢(或纯氢)冶炼为主的技术路线,形成成熟的低成本制氢和富氢(或纯氢)冶炼商业化、产业化应用模式。鼓励有条件的钢铁企业利用现有高炉开展氧气高炉低碳冶金工业化研究试验。积极探索CO<sub>2</sub>资源化利用途径、技术和方法,结合地质利用或封存、化工利用、生物利用等,形成完整的CCUS一体化试点示范项目工程。

#### 3.2 钢铁产业绿色低碳技术集成推广路径

从资源消耗、能源消耗、碳排放等方面,遵循科学实用、全过程控制、因地制宜、降碳增效原则,遴选出符合江苏省实际的16项绿色低碳技术,按照技术成熟度,分近期(2021—2025年)、中期(2026—2030年)、远期(2031—2050年)推广应用。近期推广应用技术成熟度较高的富氧烧结、焦炉荒煤气回收利用、1 000 mm超厚料层低碳烧结、碳循环及跨行业联产、薄板坯无头轧制、烟气多污染物集并吸附脱除及资源化等先进技术,提高能源和资源效率;中期聚焦调整原燃料结构,发展微波

烧结、电炉炼钢、金属化球团焙烧、铁焦 (Ferro Coke)、高炉热风炉燃烧控制模型等技术,优化能源结构;远期开发应用低碳突破性创新技术,发展氢冶金、全氧高炉炉顶煤气循环、非高炉炼铁工艺欧冶炉、生物质炼和钢铁行业 CCUS 等技术,实现深度减碳。

#### 4 结语

目前,我国正处于实现“双碳”目标的关键时期,钢铁产业作为我国国民经济的重要基础产业,是实现绿色低碳发展的重要领域。江苏省已经初步形成钢铁产业绿色低碳技术体系发展的基础,进一步完善优化钢铁产业绿色低碳技术体系,是实现“双碳”目标的基本任务。今依据国家与江苏省钢铁产业高质量发展的需要,提出绿色低碳技术创新体系的基本框架及 16 项建议技术推广应用的时序运作方案,为有序推进全省钢铁产业绿色低碳技术研发和应用推广提供参考与借鉴。科技创新是推进产业生产力提升与绿色低碳发展的关键所在,江苏省应进一步加大科技创新投入力度,构建涵盖科研院所、上下游产业链的技术研发应用生态圈,以钢铁产业需求为出发点,加快研发应用低碳冶炼、节能降耗、能源综合利用等前沿技术,充分发挥减污降碳的协同效益。

#### [参考文献]

- [1] 张永杰,黄军. 钢铁低碳高效共性难题技术研发与应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2019:13-14.
- [2] 孟凡君. 提升低碳转型能力 钢铁业将成碳交易主力[R/OL]. (2018-07-05)[2022-04-10]. [http://www.cinn.cn/headline/201807/t20180705\\_194938.html](http://www.cinn.cn/headline/201807/t20180705_194938.html).
- [3] 郭春梅,卞晨航,孟冲,等. 天津生态城低碳体验中心碳排放及减碳潜力研究[J]. 环境监测管理与技术,2022,34(2):

7-11.

- [4] 李新创. 双碳目标下,中国钢铁产业如何高质量发展?[J]. 资源再生,2021(10):28-29.
- [5] 王国栋,储满生. 低碳减排的绿色钢铁冶金技术[J]. 科技导报,2020,38(14):68-75.
- [6] 张利娜,李辉,程琳,等. 国外钢铁行业低碳技术发展概况[J]. 冶金经济与管理,2018(5):30-33.
- [7] SHIRO W, KAZUYA M. Operation trial of hydrogenous gas injection of COURSE50 project at an experimental blast furnace[J]. ISIJ International,2013,3(12):2065.
- [8] 李冰,李新创,李闯. 国内外钢铁工业能源高效利用新进展[J]. 工程研究——跨学科视野中的工程,2017,9(1):68-77.
- [9] 赵沛,董鹏莉. 碳排放是中国钢铁业未来不容忽视的问题[J]. 钢铁,2018(8):1-7.
- [10] 左海滨. 我国钢铁行业碳减排之路怎么走?[N]. 中国冶金报,2021-05-25(11).
- [11] 邱瀚莹. 碳政策下的钢铁结构性投资机会[R/OL]. (2021-03-19)[2022-04-12]. <https://www.baogaoting.com/info/31819>.
- [12] 唐珏,储满生,李峰,等. 我国氢冶金发展现状及未来趋势[J]. 河北冶金,2020(8):1-6.
- [13] 周扬,李盈语,严彬. 江苏省钢铁行业建设项目环保准入门槛浅析[J]. 绿色科技,2021,23(2):174-176.
- [14] 袁燕. 推动江苏钢铁向新型工业化发展对策研究[J]. 现代冶金,2020,48(3):5-7.
- [15] 姚珺,陈华,田珺,等. 江苏省钢铁行业环境问题分析及对策建议[J]. 江苏科技信息,2018(3):14-16.
- [16] LIN B Q, WU R X. Designing energy policy based on dynamic change in energy and carbon dioxide emission performance of China's iron and steel industry[J]. Journal of Cleaner Production,2020,256:1-18.
- [17] 聂海亮. 关于推进钢铁行业绿色高质量发展的建议[J]. 中国能源,2021(1):39-41.
- [18] 郭志达. “互联网+”时代环境污染治理转型发展的问题与对策[J]. 环境监测管理与技术,2017,29(2):4-6.

本栏目编辑 姚朝英

## 启 事

本刊已加入《中国学术期刊(光盘版)》、万方数据-数字化期刊群、重庆维普中文科技期刊数据库,凡被录用的稿件将同时在相关数据库产品中进行网络出版或提供信息服务,其作者著作权使用费与本刊稿酬一并支付。如作者不同意将文章编入数据库,请在来稿中注明,本刊将做适当处理。