资源环境与节能

钢铁低碳技术与绿钢产业布局进展及发展建议

彭景宏*, 羊省儒, 朱宁芳

（攀钢集团攀枝花钢铁研究院有限公司, 四川 攀枝花 617000）

摘　要: 在“碳达峰、碳中和”目标背景下, 我国钢铁企业面临来自需求与政策的双重低碳发展要求。积极转变传统生产理念、发展低碳生产技术、实现产品体系绿色转型是钢铁企业未来高质量可持续发展的必然要求, 开展“绿钢”布局具有重大的经济价值和社会价值。围绕能效提升、资源循环、流程优化方向, 概述了钢铁领域可关注的低碳技术研究进展, 同时梳理了钢铁产业国内外重点企业在绿钢领域的布局发展情况, 并对钢铁企业低碳发展的主要路径进行了探讨, 旨在为钢铁行业的绿色低碳发展策略提供参考。

关键词: 钢铁行业; 低碳; 绿钢; 能效提升; 资源循环; 流程优化

中图分类号: TF089　　**文献标志码:** A　　**文章编号:** 1004−7638(2026)05−0079−10

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2026.05.009　　**开放科学 (资源服务) 标识码 (OSID) :**

听语音 与作者互动 聊科研

Low-carbon technologies and green steel industrial layout progress in the steel industry: Development suggestions

PENG Jinghong*, YANG Xingru, ZHU Ningfang

(Pangang Group Panzhihua Iron and Steel Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: Against the background of the carbon peaking and carbon neutrality goals, Chinese steel enterprises are facing dual low-carbon development requirements from market demand and national policies. Actively transforming traditional production concepts, developing low-carbon production technologies, and realizing the green transformation of product systems are inevitable requirements for the high-quality and sustainable development of steel enterprises in the future. The layout of “green steel” industry possesses significant economic and social value. Focusing on energy efficiency improvement, resource recycling, and process optimization, in this paper the research progress of noteworthy low-carbon technologies in the steel industry had been reviewed. Meanwhile, the layout and development status of global steel enterprises in the field of green steel had been discussed and the main paths for steel enterprises to achieve low-carbon development had been proposed, aiming to provide references for the formulation of green and low-carbon development strategies for the steel industry.

Key words: steel industry; low carbon; green steel; energy efficiency improvement; resource recycling; process optimization

收稿日期: 2026−08−04; **修回日期:** 2026−08−19; **接受日期:** 2026−08−25

基金项目: 四川省科技计划项目(省社科基金委托项目)(SCJJ25RKX035)。

作者简介: 彭景宏, 1989 年出生, 男, 四川绵阳人, 博士, 通信作者, 研究方向: 新材料产业发展研究, E-mail: firpic@126.com。

0 引言

近年来，在国外一些钢铁用户（尤其是汽车、船舶制造等领域企业）提出“绿钢”需求后，绿钢概念开始在全球钢铁行业有了热度[1-4]。关于“绿钢”的定义，目前业内尚无统一的标准概念，一般认为，“绿钢”是指碳排放为零或者接近零的钢铁产品。我国一些钢铁企业也开始收到用户关于绿钢的相关需求，如：2022 年，河钢集团与宝马集团、宝钢股份与北京奔驰通过签署合作备忘录，钢铁企业将基于用户企业对绿色、低碳的汽车用钢材料需求，在供应链上形成长期合作[4]。

在“碳达峰、碳中和”（双碳）目标全面推进的背景下，作为国民经济基础性支柱产业的钢铁行业，因其高能耗、高排放的产业特征，成为我国工业领域绿色低碳转型的重点攻坚行业[3-7]。当前，国内大部分钢铁企业不仅在生产经营方面承压，还同时面临着低碳政策端与下游市场端绿色消费升级的双重要求，绿色低碳已然成为行业发展的核心方向之一。在此行业发展趋势下，钢铁企业积极攻关，落地各类低碳生产技术，推动生产工艺、产线配置及产品体系的全方位绿色升级，是行业实现提质增效、完成低碳转型、达成高质量可持续发展的必然路径。而系统化、规模化推进“绿钢”产业布局，不仅能够助力钢铁企业优化生产结构、降低碳排放成本、提升市场核心竞争力，填补高端绿色钢材市场缺口，更能带动上下游产业链协同降碳，助力全国工业体系低碳化升级，具备极为重要的产业经济价值与生态社会价值。

2022 年，钢铁行业低碳工作推进委员会发布《钢铁行业碳中和愿景和低碳技术路线图》（以下简称《路线图》），明确了中国钢铁工业“双碳”技术路径的六大方向：系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级、捕集封存利用[8]。钢铁行业实现“双碳”，关键的解决途径在于低碳技术进步，核心是技术创新、技术突破和技术推广，实现钢铁工业“双碳”技术路径亦是布局绿钢产品技术体系的主要技术路径。基于上述背景，主要围绕能效提升、资源循环、流程优化三个方面，概述全球钢铁领域在低碳技术方面的重点研究工作进展，同时调研整理了国内外重点企业在绿钢领域的布局及发展情况，并对钢铁企业低碳发展的主要路径进行了思考，旨在为钢铁行业的绿色低碳发展策略提供参考。

1 钢铁低碳技术重点研究工作进展

从更宏观的量化视角来看，钢铁行业碳排放总量主要取决于钢铁行业吨钢碳排放量和钢铁行业粗钢总产量两大因素[9]。《路线图》中指出中国钢铁工业“双碳”六大技术路径——系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新、冶炼工艺突破、产品迭代升级、捕集封存利用（见表 1）[8]。其中，冶炼工艺突破路径侧重从战略发展方向上进行根本的制备流程变革来寻求钢铁工业大幅降碳的目标，典型思路主要包括发展氢基直接还原技术、基于绿电的低碳或零碳熔融还原技术、微波冶金技术、电解法冶炼等新工艺。产品迭代升级路径基于钢铁产品全生命周期评价，开发生产具有更高强度、更高寿命、更高效能等特点的高性能的绿色钢铁产品，从减少钢铁材料用户的使用量，减少钢铁行业粗钢总产量因素的角度实现长期持续降碳。捕集封存利用路径，则立足于将钢铁生产过程中难以通过自身削减的碳排放通过捕集封存与利用等实现最终消纳，实现末端降碳。系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新的路径更多基于当前钢铁生产过程本身进行系统优化达到降碳目的，其中涉及的相关技术研究工作也是科学界和产业界长期以来的关注重点。主要围绕能效提升、资源循环、流程优化方面，对于部分细分方向概述钢铁领域一些可关注的低碳技术研究进展和落地实施情况。

1.1 能效提升

能效提升方面的重点技术主要包括全流程余热余能高效利用[10-12]、铁-钢-轧工序界面优化节能[13-15]、高温高压全干熄焦[16]、冶金渣显热高效回收利用[17]、超厚料层烧结[18-19]、钢铁能量流网络集成优化[20]、烧结矿竖式冷却及烧结烟气一体化治理[21]等技术方向。

1.1.1 全流程余热余能高效利用

Wang 等[10]针对钢厂余热回收利用规划优化问题，构建了一套适配钢铁生产场景的新型余热资源利用规划方法，可实现余热回收设备选型、容量配置与运行策略的自动化优化匹配。该方法引入离散容量选型建模方式，充分考虑设备选型过程中产品品类受限的实际生产约束，弥补了传统规划模型理想化、脱离工业实际的缺陷。数值仿真结果表明，该优化模型可在不同经济工况下输出最优的余热回收设备配置与运行方案。Yan 等[11]通过建立混合整数线性规划优化模型，对钢铁企业蒸汽系统进行

优化调控。优化后, 蒸汽系统㶲效率提升 10.568%, 吨钢能源输入降低 84.30 MJ, 有效挖掘了烧结、热轧与转炉工序的余能利用潜力。通过采用两级有机朗肯循环回收烧结、热轧烟气余热, 搭配饱和蒸汽发电技术回收转炉蒸汽余能, 可实现吨钢发电量提升 15.25 kWh。卢原[12] 分析了炼钢电炉高温烟气特性, 提出对电炉余热回收系统进行“汽化烟道+汽化沉降室+余热锅炉”的余热回收工艺路线改造, 改造后在每炉出钢 90 t、冶炼周期 45 min 的工况下, 两台电炉余热锅炉产汽量达到约 30 t/h。

表 1　中国钢铁工业“双碳”六大技术路径

Table 1　Six major technical paths for achieving carbon peaking and carbon neutrality of China's steel industry

Technical path	Main content	Estimated carbon reduction contribution/%
Systematic energy efficiency improvement	Adopt energy-saving technologies and upgrade equipment to achieve ultimate energy efficiency across the whole system.	10 ~ 15
Resource recycling and utilization	Efficiently reuse solid, liquid and gaseous by-products from steel production and social scrap steel through recycling systems.	15 ~ 20
Process optimization and innovation	Optimize raw material, process and energy structures to innovate processes and improve efficiency.	25 ~ 30
Smelting process breakthrough	Break through constraints of traditional processes and equipment to pursue revolutionary innovation in key technologies.	20 ~ 25
Product iteration and upgrading	Develop high-performance green steel products based on life cycle assessment to reduce steel material demand.	15
Carbon capture, storage and utilization	Separate CO_2 from steel manufacturing emissions for efficient storage, solidification or resource utilization.	

1.1.2　铁-钢-轧工序界面优化节能

肖天顺等[13] 基于建立的铁—钢界面能效评价模型, 利用遗传算法对鱼雷罐—兑铁包生产模式进行了参数优化, 工艺优化后钢厂铁—钢界面能效指数由 1.40 降至 1.19; 鱼雷罐铁水等待时间每缩短 10 min, 能效指数降低 0.04, 兑铁包铁水等待时间每缩短 10 min, 能效指数降低 0.08, 该方法是提升铁—钢界面能效的有效手段。Hu 等[14] 构建了铁钢界面物流-能流耦合仿真模型, 结合设备运行机理、罐包温降模型实现生产过程数值表征, 并将模型应用于一罐制生产场景, 仿真优化方案可使铁水平均温降减少 10 ℃, 吨钢生产成本降低 1.02 元。冯光宏等[15] 围绕单线、多线耦合长型材直轧生产线铸轧界面难题开展了分析, 单线直轧生产线铸坯最低出坯温度需维持 950 ℃, 铸坯头尾温差控制在 50 ℃ 以内, 层流工况直轧率可达 98%, 还提出了 100 万 t、300 万 t 两类产能电炉—直轧生产线层流运行模式, 保障了铸轧界面高效衔接。

1.1.3　能效提升方面的落地应用

能效提升方面, 钢铁行业多维度节能技术已形成多类成熟工业化应用, 节能减碳效益得到生产现场验证。全流程余热余能高效利用技术持续突破, 首钢水城钢铁投运超临界二氧化碳余热发电示范工程, 双机稳定运行后月均发电量约 1 500 万 kWh, 全部用于厂区生产自用, 低品位余热回收效率较传统方式显著提升。长型材连铸直接轧制技术已实现规模化推广, 首钢长钢打通“一机两线”直轧生产路径, 省去加热炉二次加热环节, 吨钢降低煤气消耗 45 m^3, 实现铁钢轧工序界面的协同节能提效。另外, 沙钢投运的超高压参数干熄焦系统, 吨焦发电量较传统中压系统提升约 23%, 焦化工序余热回收能力大幅增强; 首钢京唐建成转炉全干法显热回收项目, 吨钢可额外产出 60 kg 蒸汽, 折合吨钢降标煤约 10 kg, 实现了转炉高温烟气余热的高效回收。

1.2　资源循环

资源循环方面的重点技术主要包括废渣、含铁含碳固废等高效回收资源化利用[22-24], 钢渣有压热闷回收[25], 废钢铁高效智能判定、分级和加工[26-28], 全流程废水资源的综合处理与回收利用[29-31], 基于煤气分离和循环利用的低碳高炉关键技术[32-33], 焦炉煤气、高炉煤气资源化利用[34-36] 等技术方向。

1.2.1　废渣、含铁含碳固废等高效回收资源化利用

Wang 等[22] 以全废钢电弧炉泡沫渣工艺优化实现钢渣资源化循环利用, 通过热力学计算明确钢渣回用条件, 优化后泡沫渣指数可达 2.27 ~ 2.65 s。工业试验结果表明, 通过调控钢渣与辅料掺量、氧气及碳粉用量, 可达到吨钢氧气消耗降低 2.68 Nm^3, 碳粉消耗降低 1.12 kg, 电耗降低 10.12 kWh 的效果, 实现了钢渣规模化工业循环利用。Varanasi 等[23] 将硅锰铝脱氧钢 LF 炉渣替代钙铝系合成渣进行回用, 系统探究了再生 LF 炉渣对脱硫动力学及冶炼工艺参数的影响规律, 证实硅锰铝脱氧体系 LF 炉渣可完全替代传统钙铝系合成渣, 实现规模化循环回用。李保海等[24] 采用冷固结工艺将含铁尘泥、高炉返矿、

钢渣粉复合制备高炉用球团，在 30% 高炉返矿、10% 含铁尘泥、60% 钢渣粉的原料配比，搭配 5% 黏结剂 A、成型压力 5 MPa 的工艺条件，常温干燥养护 4 d 的冷固结球团抗压强度可达 2 500 N/P 以上；经 80 ℃ 干燥 180 min 处理后，球团抗压强度可达 2 300 N/P。

1.2.2 焦炉煤气、高炉煤气资源化利用

Bushuev[34] 对比分析了焦炉煤气燃烧产物与空气的热力学基础特性，为不同燃料工况下的燃气轮机运行对比提供了理论支撑，明确了不同空燃比条件下焦炉煤气与天然气混合燃料的燃烧温度变化规律，探究了不同配比混合燃料燃烧产物的焓值区间差异。河北河钢材料技术研究院有限公司等的实用新型专利[35] 公开了一种高炉煤气与焦炉煤气制甲醇和醋酸联产 LNG 的系统，包括高炉煤气提供装置、净化装置、CO_2 提纯装置、CO 提纯装置、醋酸合成系统、H_2 提纯装置、混气装置、甲醇合成装置、精馏装置、焦炉煤气提供装置等及压缩机，通过相应的连接和机构设置，该系统可使钢厂煤气中的多种有效组分得到最大程度的资源化综合利用，实现多种化产品的生产合成。何相君等[36] 提出了钢化联产绿色产业链构建模式，针对千万吨级钢焦联合企业测算得出每年可优化利用转炉煤气 13 亿 m^3、焦炉煤气 16 亿 m^3。通过效益核算，焦炉煤气制甲醇成本较传统煤制甲醇降低 24%，相关示范项目投资回收期仅为 1 ~ 2 年。

1.2.3 资源循环方面的落地应用

资源循环方面，钢铁副产煤气与冶金固废的高值化循环利用已形成成熟工业化路径，多项技术实现规模化落地并取得明确减碳降本成效。副产煤气高值化利用领域，包钢股份焦炉煤气提纯制氢联产示范项目建成投运，可年产高纯氢气 2 000 万 m^3，将焦化副产煤气转化为清洁能源与生产原料，年减排二氧化碳约 30 万 t，实现副产资源的价值升级。太钢集团完成了副产煤气高效利用升级改造，配套建成高炉煤气二氧化碳捕集产线，捕集的二氧化碳回用于转炉冶炼工序，同步提升煤气回收效率与碳循环利用水平，年节约标准煤近 20 万 t。冶金固废厂内闭路循环技术持续升级，迁安金隅首钢建成冶金固废梯级资源化产线，可同步处理钢渣、尘泥等多类固废并回收有价组分，配套余热回收系统年发电超 2 200 万 kWh，构建起固废全流程闭环消纳体系。

1.3 流程优化

流程优化方面的重点技术主要包括高炉大比例球团炼铁技术[37-40]、节能环保型电炉炼钢短流程技术[41-43]、近终形全连续制造关键工艺技术[44-45]、基于大数据的全流程智能化冶炼[46-49]、转炉高废钢比高洁净度高效冶炼[50-52] 等技术方向。

1.3.1 高炉大比例球团炼铁技术

Zhao 等[37] 通过构建数学模型，系统探究了球团配比对高炉布料特性的影响机制。研究发现球团配比由 10% 提升至 50% 时，高炉炉料平台宽度由 1.081 m 缩减至 0.895 m，炉料堆角由 34.00°降至 31.63°；球团配比提升会降低炉料整体孔隙率，同时使炉壁至炉中心的径向孔隙率呈现梯度下降特征。He 等[38] 探究了多环布料制度与不同球团配比下的高炉炉料分布演变规律。研究发现提升球团配比会增大溜槽出口炉料流速与料流宽度，使炉料落点平均半径增大；当球团配比由 0 提升至 100% 时，炉料层峰值位置相对半径由 0.491R 增至 0.639R，料层峰值高度由 0.860 m 降至 0.543 m。同时高比例球团布料会产生径向与纵向偏析现象，径向方向球团相较烧结矿更集中于炉中心，且在相对半径 0.590R 处无偏析现象，纵向方向球团多富集于料层底部，上部分布较少。该研究可为高炉高比例球团布料制度优化提供理论参考。马明鑫等[39] 基于大规模带式焙烧机氧化球团生产线，对高炉炉身、炉腰、炉缸结构进行了优化设计。通过系统性调整高炉装料、送风、造渣、热制度及排料制度，优化后的工业生产数据显示，高炉燃料比、焦比分别稳定至 513.2、374.2 kg/t，利用系数达 2.92 t/(m^3·d)，实现高比例球团冶炼模式下高炉长期稳定顺行。

1.3.2 基于大数据的全流程智能化冶炼

Fu 等[46] 针对转炉炼钢高温、高危导致过程监测难度大、生产稳定性与成材质量难以保障的问题，依托数字孪生技术构建转炉炼钢全流程管控体系。通过剖析转炉炼钢工艺特征，搭建了全流程监测数字孪生框架，集成点云建模、可视化展示、终点预判等核心技术，实现炼钢过程高精度、全维度智能监测。基于该理论体系开发的数字孪生冶炼管控系统，可覆盖转炉全冶炼工序。应用实践表明，该系统可使企业月产能提升 77.7%，冶炼物料损耗率由 34% 降至 7.8%，显著优化了炼钢生产效率。近期，一些研究团队也报道了基于大语言模型的智能化炼钢相关工作[47-49]。Chen 等[48] 提出了融合动静知识图谱与大语言模型的钢铁智能工艺规划方法。相关研究工作首先构建了静态冶炼工艺知识图谱，并引入 CBAM-PFKAN 网络实现知识组织；依托预设规则搭建动态工况知识图谱，将实时冶炼信息转化为结构化知识三元组；同时设计规划求解提示策略，引导大模型拆解复杂优化目标、双向调取动静知识并分

步输出工艺方案。工业案例验证表明, 相较于基准算法, 该方法工艺策略生成精度在 DeepSeek 平台提升 11.13%, 在 ChatGPT-3.5 平台提升 8.63%。

1.3.3　流程优化方面的落地应用

流程优化方面, 钢铁行业炉料结构升级、近终形制造、全流程智能管控等方向的工艺技术加速落地, 多项工业化应用取得明确的提质降本减碳成效。首钢迁钢建成投运带式焙烧机球团生产线, 配套优化高炉布料、送风等操作制度, 高炉球团矿配比稳定在 50% 以上, 入炉品位提升带动燃料比同步下降, 吨铁碳排放较传统炉料结构显著降低, 形成了可复制的高比例球团低碳冶炼范式。玉昆钢铁 QSP-DUE 全连续铸轧产线采用无头轧制工艺实现铸轧一体化生产, 相较传统热轧流程大幅缩减生产工序与加热能耗, 可稳定生产薄规格高端带钢产品, 生产效率与成材率同步提升。宝钢股份投用高炉 AI 大模型, 融合全工序传感数据与冶炼专家经验实现炉温精准预测调控, 2 h 炉温预测命中率超过 90%, 每吨铁水可节约燃料 2 kg, 炉热控制精度与铁水质量稳定性显著提升。

2　钢铁产业重点企业在绿钢领域的布局发展情况

安赛乐米塔尔、日本制铁、浦项制铁、蒂森克虏伯、宝武集团、鞍钢集团、河钢集团等国内外重点钢铁企业在低碳发展方面均有制定成型的战略规划及可实施的行动方案, 显示出行业对绿色优化转型的重视[53]。另外, 一些新兴钢铁企业, 如瑞典的 Stegra 公司, 专注聚焦于绿色低碳的产品特色, 也代表着目前正快速发展落地的绿钢产业。

2.1　传统钢企的绿钢发展情况

安赛乐米塔尔集团的钢铁生产主要以长流程生产工艺为主, 已宣布计划在 2030 年之前将其欧洲业务的排放量减少 30%。在其发布的到 2050 年净零碳路线中, 降碳措施主要包括五个关键因素: 炼钢转型、能源转型、增加废钢使用、采购清洁电力、抵消剩余排放。在绿钢布局方面, 安赛乐米塔尔的绿钢布局路线主要是绿氢直接还原铁(DRI)+电弧炉(EAF)路线, 其在绿钢方面主要布局的相关项目基本情况见表 2。

表 2　安赛乐米塔尔主要绿钢相关项目概况

Table 2　Overview of major green steel-related projects of ArcelorMittal

Start year	Location	Investment scale $\times10^{-9}$/EUR	Basic information
2021	Spain	1.0	A 2.3 Mt green hydrogen direct reduction iron (DRI) unit and a 1.1 Mt hybrid electric arc furnace (EAF) to be built at Gijón plant.
2022	France	1.7	Investment by 2030 to accelerate decarbonization of steel plants in Fos-sur-Mer and Dunkirk while maintaining production capacity.
2022	Germany		Cooperate with RWE to develop offshore wind farms and hydrogen facilities, supplying renewable energy and green hydrogen for low-emission steel production.
2022	Belgium	0.2	Steelanol project in partnership with LanzaTech, converting carbon-rich steel off-gas into advanced ethanol via bio-based technology.

数据来源: 安赛乐米塔尔项目公告。

日本制铁从产品生产到运输, 以及在产品最终使用阶段, 通过降低能源消耗、减少碳排放以及提高整个供应链的能源使用效率。在绿钢布局方面, 日本制铁多次表示正在考虑和寻求开展基于氢能源或其它低碳技术的绿钢项目投资及合作: 在 2022 年 4 月与淡水河谷签署的协议中, 双方将从炼钢原料解决方案、在炼铁过程中使用绿色型煤和其它低碳产品方面来开展合作; 2022 年 12 月, 日本制铁表示计划开始生产包括利用氢气生产的“还原铁”在内的低碳原料, 以满足市场对绿钢产品日益增长的需求。2025 年, 日本制铁在其政府的《绿色转型促进法》支持下, 宣布将开展一项总投资额约合 64.8 亿美元的工艺转型计划, 决定从传统的高炉—转炉工艺向电弧炉转型, 目的是大幅减少钢铁生产导致的碳排放。

浦项制铁以高炉-转炉长流程生产工艺为主, 其主要布局的低碳技术包括低碳炼铁 FINEX 技术、碳捕获与分离技术、利用废气热能发电技术、富氢高炉炼铁技术等。2022 年 12 月, 浦项制铁表示正计划在澳大利亚投资 400 亿美元, 用于氢气制取和绿色钢铁, 并计划在 2040 年前制取 100 万 t 的氢气。其中大部分投资(280 亿美元)用于可再生能源和水电解, 120 亿美元被分配给绿色钢铁生产, 具体是以太阳能、风能等具有竞争力的大规模可再生能源为基础生产绿色氢气, 并将其用于生产热压块铁(HBI)。2026 年 7 月, 据悉其光阳制铁所年产能 250 万 t 单体电弧炉正式建成, 为当前韩国规模最大电弧炉产线, 项目于 2024 年 2 月份启动建设, 配套投资 6 000 亿韩元, 标志着其以高炉为核心的生产体系转向结构性调整。

宝武集团是我国钢铁行业的典型标杆企业，在低碳发展方面也一直走在全球前列。2021 年，宝武提出低碳冶金路线图：2023 年力争实现碳达峰，2025 年具备减碳 30% 工艺技术能力，2035 年力争减碳 30%，2050 年力争实现碳中和[53]。其低碳冶金技术主要关注极致能效、富氢碳循环高炉、氢基竖炉、近终形制造、冶金资源循环利用和 CO_2 回收及利用等方面（见表 3）。

表 3 宝武在低碳冶金方面主要关注的技术

Table 3 Key technologies focused by China Baowu in low-carbon metallurgy

Low-carbon metallurgy technology	Basic overview	Main progress
Ultimate energy efficiency	Focuses on slag sensible heat utilization, torpedo ladle turnover, and hot charging & direct rolling.	Multiple efficiency upgrades completed; core process energy consumption outperforms industry benchmarks.
Hydrogen-rich carbon cycle blast furnace	Covers green electric heating, microwave sinter pre-reduction, full-process electric heating, and new burden technologies.	Hydrogen injection ratio rising; industrial tests of gas decarbonization & reinjection ongoing; coke reduction effect verified.
Hydrogen-based shaft furnace	Closed-loop process with green power-hydrogen energy; all-hydrogen ultra-short process planned with offshore green hydrogen.	Million-tonne demonstration line stable;more than half carbon reduction vs. conventional long process.
Near-net-shape manufacturing	Covers thin slab, thin strip, bar & wire continuous casting & rolling; thin strip technology developed.	Thin strip technology verified for multiple steel grades; stable production of high-end thin-gauge strips.
Metallurgical resource recycling	Recovers iron & carbon from metallurgical wastes; maximizes scrap utilization; utilizes biomass resources.	Full high-value utilization of BF slag; stable slag & dust processing; rising closed-loop ratio; improving regional scrap system.
CO_2 recovery and utilization	Low-cost CO_2 capture explored; CO_2 separation unit commissioned to reduce coke ratio.	COREX CO_2 separation & reinjection system stable; coke reduction effect clear; BF gas carbon capture under industrial test.

数据来源：中国宝武钢铁集团有限公司。

2.2 瑞典 Stegra 公司的绿钢布局概况

在绿钢产业方面，瑞典 Stegra（前身为 H2 Green Steel）公司是一家典型代表的新兴企业（基本情况见表 4）。其成立于 2021 年，总部位于瑞典斯德哥尔摩，旨在利用绿色氢气加速钢铁行业的脱碳，目前在瑞典北部的博登建立了一个综合型数字化的直接还原铁钢厂以实现绿钢生产，工厂还将包括一个利用可再生能源电解水制绿氢设施，将生产出的氢气用于直接还原铁的工厂原料。相较于传统的炼钢工艺，可减少约 95% 的二氧化碳排放量。其在 2022 年已与不同行业客户预签署了超过 150 万 t 的绿钢供应协议，最初计划的年产量为 250 万 t，计划从 2025 年起开始生产，在 2026 年逐步达产，到 2030 年将在博登每年生产 500 万 t 绿钢。前期与 H2 Green Steel 签署了钢铁产品供应协议的客户主要包括：Adient、Bilstein Group、BMW Group、Electrolux、Kingspan、Marcegaglia、Mercedes-Benz、Roba Metals、Scania、Schaeffler、ZF Group 等。

表 4 瑞典 Stegra（原 H2 Green Steel）的基本情况

Table 4 Basic information of Stegra (formerly H2 Green Steel) in Sweden

Raw materials & equipment	Basic information
Ore resources	Mostly high-grade ore from nearby northern Swedish iron fields; MIDREX shaft furnace capable of processing low-grade ore in later stage.
Green hydrogen	Produced via green power water electrolysis; mature alkaline electrolyzers for main demand, high-efficiency SOEC for small-scale applications utilizing EAF waste heat steam.
Energy supply	Hydropower sourced from nearby rivers; site in Boden well connected to national power grid.
Ironmaking	One MIDREX direct reduction shaft furnace supplied by Paul Wurth and MIDREX, with an annual capacity of 2.1 million tonnes.
Steelmaking equipment	Two EAFs with energy recovery, two twin-ladle furnaces and one RH furnace; hot-charged DRI process adopted; two energy recovery units for steam supply to electrolyzers and downstream processes.
Rolling	CSP Nexus continuous casting & rolling line, pickling line, 3 processing lines, annealing-galvanizing combined line, continuous galvanizing line and batch annealing furnaces, supplied by SMS Group.

数据来源：瑞典Stegra（原H2 Green Steel）项目公开资料。

2026 年 6 月，据悉其已成功完成由 Wallenberg Investments 领投的财团主导的 14 亿欧元融资。更名 Stegra 后，该公司计划将博登基地沉淀的这一整套“绿氢+重工业绿色转型”的系统集成方法论进行模块化复制，输出给化学工业、重型交通甚至航空燃料制造等同样难以脱碳的垂直行业。

3 钢铁企业低碳发展的主要路径思考

《路线图》中所述技术路径的降碳潜力基本体现在钢铁生产的主要两大工艺——高炉-转炉长流程与全废钢电炉短流程的区别之中，系统能效提升、资源循环利用、流程优化创新都与短流程对于降碳

的决定作用密不可分。由于钢铁行业碳排放总量主要取决于钢铁行业吨钢碳排放量和钢铁行业粗钢总产量两大因素[9], 其中, 未来的粗钢产量无法单靠钢铁行业自身能够决定, 主要是受国民经济发展水平和国家的投资导向影响。由于粗钢产量不能由钢铁企业本身直接影响和控制, 那么对于企业来说, 实现整体降低碳排、布局发展绿钢体系的主动权基本需要聚焦于降低吨钢碳排放量。短流程吨钢碳排放显著低于长流程, 另外短流程的其它各资源环境指标(铁矿石消耗、能耗、废气排放等)大多也更具优势。因此, 对于钢铁企业, 特别是高炉-转炉长流程企业, 合理利用废钢、调整流程结构来降低吨钢碳排放量是最主要的途径。

具体来说, 综合考虑碳排放范围 1(指直接温室气体排放)和范围 2(指由电力产生的间接温室气体排放), 由于我国钢铁行业生产方式目前仍以长流程为主[54], 为快速、稳健、高效推进布局发展绿钢产品, 应着重关注炼铁全系统流程(包含焦化、烧结和高炉炼铁)的减碳。这不仅能够直接决定企业绿钢布局发展, 还能够大大促进企业降本增效。并且, 对于低碳排放尤其是零碳排放的钢材, 已有众多钢铁下游行业客户表示愿意接受溢价, 这意味着绿钢标签可以带来更高附加值属性, “绿色溢价”能够进一步助力钢铁行业实现高效益、高质量发展。

4　结论与发展建议

4.1　结论

1)从理想的技术发展路线上来说, 要真正实现零碳绿钢的生产, 基本就是要将煤基燃料/还原剂体系向氢基转变, 通过改用绿氢并结合废钢这一炼钢技术路线升级, 与高炉炼钢路线相比将带来 75% 的减排量, 剩余的排放实际上是来自于直接还原和电弧炉路线(DR-EAF)炼钢所使用的电力背后的间接排放, 取决于电网的碳排放系数。最终真正实现零碳绿钢, 要进一步将电力、热力和运输过程都逐步实现无化石能源使用。

2)结合目前实际生产条件和经济技术发展现状, 绿钢的布局发展实际上就是在当前钢铁生产过程中的整体碳减排, 除全社会减少对于钢材的需求量以外, 对于钢铁企业来说直接取决于降低吨钢碳排放强度。

3)由于炼铁全系统流程在直接碳排放、能耗上的决定性占比, 对于以长流程为主的企业, 布局绿钢就会涉及到技术路线的转化。通过增加电炉炼钢的比例, 与之相关的就是增加废钢的利用比例, 进一步选择使用基于绿色电力的电网, 辅以碳捕集利用与封存(CCUS)技术的应用, 从而逼近实现“零碳”绿钢的生产。

4.2　发展建议

若要考虑在短中期内布局发展绿钢产品体系, 实现行业整体绿色低碳发展, 对于当前仍占主流的长流程钢铁企业来说, 较为合理的方式为充分进行炼铁全流程能效提升、科学评估废钢比例提升所带来的绿色收益与相关配套投资成本之间的平衡关系、开展 CCUS 技术研究及应用落地、增强碳核算能力等。对钢企的主要发展建议如下:

1)重点开展炼铁全系统能效提升、CCUS、氢冶金等技术方向的研发及应用, 加强相关领域科研及产线人才队伍建设, 布局建立“氢还原绿钢”的研发生产试验平台, 进行绿氢制备相关技术储备。

2)合理使用废钢, 提前考虑废钢资源收集系统、废钢预热系统等的配套布局, 科学评估废钢比例提升所带来的绿色收益与相关配套投资成本之间的平衡关系, 从资源端角度进行脱碳; 考虑调整用电结构, 采用更多比例光伏、风电、水电等绿色电力供应, 从能源端角度进行脱碳。

3)加快数字化、信息化技术赋能绿色化的推广应用进程, 一方面智能管控进一步提升整体能效, 另一方面助力高效、实时、精准掌控各产品系列碳排放水平, 配备专业人才团队增强碳核算能力, 摸清“碳足迹家底”。

4)密切关注脱碳立法、碳排放配额、碳交易、碳税等相关国际国内政策法规, 研究制定相关发展规划。

参考文献

[1] 卓昕. 基于绿钢的钢铁企业新增长曲线的构建[J]. 冶金管理, 2023(16): 41-44.
Zhuo Xin. Construction of new growth curve for iron and steel enterprises based on green steel[J]. China Steel Focus, 2023(16): 41-44.

[2] 何格钢. 未来 10 年中国钢铁行业发展趋势展望[J]. 冶金管理, 2023(12): 57-66.
He Gegang. Prospect on development trend of China's iron and steel industry in the next 10 years[J]. China Steel Focus, 2023(12): 57-66.

[3] 王素平, 黄贺林, 杨华. “双碳”目标下我国钢铁行业低碳转型路径研究[J]. 河北经贸大学学报 (综合版), 2024, 24(3): 64-72.
Wang Suping, Huang Helin, Yang Hua. Research on the low-carbon transformation path of China's steel industry under the "dual carbon" goal[J]. Journal of Hebei University of Economics and Business (Comprehensive Edition), 2024, 24(3): 64-72.

[4] 毛新平, 卢军, 汪水泽. 碳中和背景下汽车用钢发展的思考[J]. 现代交通与冶金材料, 2025, 5(6): 1-10.
Mao Xinping, Lu Jun, Wang Shuize. Reflections on the development of automotive steel under the carbon neutrality background[J]. Modern Transportation and Metallurgical Materials, 2025, 5(6): 1-10.

[5] 刘含笑, 吴黎明, 赵琳, 等. 钢铁行业 CO_2 排放特征及治理技术分析[J]. 烧结球团, 2022, 47(1): 38-47.
Liu Hanxiao, Wu Liming, Zhao Lin, et al. Analysis on CO_2 emission characteristics and treatment technologies in iron and steel industry[J]. Sintering and Pelletizing, 2022, 47(1): 38-47.

[6] 张敬, 张芸, 张树深, 等. 钢铁行业二氧化碳排放影响因素分析[J]. 现代化工, 2009, 29(1): 82-85,87.
Zhang Jing, Zhang Yun, Zhang Shushen, et al. Analysis of factors influencing the carbon dioxide emission in iron and steel industry[J]. Modern Chemical Industry, 2009, 29(1): 82-85,87.

[7] 董金池, 汪旭颖, 蔡博峰, 等. 中国钢铁行业 CO_2 减排技术及成本研究[J]. 环境工程, 2021, 39(10): 23-31,40.
Dong Jinchi, Wang Xuying, Cai Bofeng, et al. Mitigation technologies and marginal abatement cost for iron and steel industry in China[J]. Environmental Engineering, 2021, 39(10): 23-31,40.

[8] 李毅仁, 邢奕, 孙宇佳, 等. 钢铁工业低碳绿色发展路径与实践[J]. 工程科学学报, 2023, 45(9): 1583-1591.
Li Yiren, Xing Yi, Sun Yujia, et al. Low-carbon green development path and practice of the iron and steel industry[J]. Chinese Journal of Engineering, 2023, 45(9): 1583-1591.

[9] 上官方钦, 刘正东, 殷瑞钰. 钢铁行业“碳达峰”“碳中和”实施路径研究[J]. 中国冶金, 2021, 31(9): 15-20.
Shangguan Fangqin, Liu Zhengdong, Yin Ruiyu. Study on implementation path of "carbon peak" and "carbon neutrality" in steel industry in China[J]. China Metallurgy, 2021, 31(9): 15-20.

[10] Wang Ronggen, Zhang Wei, Yang Shaowei, et al. A novel approach for utilizing waste heat resources in the steel industry[J]. Frontiers in Energy Research, 2023, 11: 1257344.

[11] Yan Tianyi, Sun Jingchao, Qiu Ziyang, et al. Energy optimization based on steam system analysis and waste energy recovery for iron and steel industry[J]. Energy Technology, 2022, 10(12): 2200191.

[12] 卢原. 电炉烟气余热回收利用节能改造[J]. 工业锅炉, 2025(4): 40-43.
Lu Yuan. Design of electric furnace waste heat boiler[J]. Industrial Boilers, 2025(4): 40-43.

[13] 肖天顺, 那洪明, 袁喻兴, 等. 铁—钢界面 (鱼雷罐—兑铁包模式) 能效优化及分析[J]. 冶金能源, 2025, 44(5): 10-16.
Xiao Tianshun, Na Hongming, Yuan Yuxing, et al. Energy efficiency optimization and analysis of iron-steel interface (torpedo tank-iron pack mode)[J]. Energy for Metallurgical Industry, 2025, 44(5): 10-16.

[14] Hu Z C, Zheng Z, He L M, et al. Simulation-based optimization of coupled material-energy flow at ironmaking-steelmaking interface using One-Ladle Technique[J]. Advances in Production Engineering & Management, 2021, 16(3): 348-358.

[15] 冯光宏, 张宏亮, 上官方钦, 等. 长型材直接轧制的铸轧界面技术[J]. 钢铁, 2025, 60(7): 157-166,241.
Feng Guanghong, Zhang Hongliang, Shangguan Fangqin, et al. Cast-rolling interface technology for direct rolling of long profiles[J]. Iron and Steel, 2025, 60(7): 157-166,241.

[16] 李晓琴. 浅谈 70 t/h 高温高压干熄焦余热锅炉设计[J]. 能源与环境, 2022(3): 65-67.
Li Xiaoqin. Design on 70 t/h high temperature and high pressure CDQ waste heat boiler[J]. Energy and Environment, 2022(3): 65-67.

[17] 高文涛. 高炉熔渣显热干式直接回收工艺分析[J]. 世界有色金属, 2019(21): 164-165.
Gao Wentao. Analysis of direct dry recovery process of blast furnace slag sensible heat[J]. World Nonferrous Metals, 2019(21): 164-165.

[18] Wu Wangping, Wang Rui, Zeng Junjie, et al. Synergistic injection of hydrogen-rich gas with steam and oxygen based on thick-bed sintering[J]. International Journal of Hydrogen Energy, 2010, 142: 70-79.

[19] 杨聪聪, 刘浩, 朱德庆, 等. 不同配矿结构厚料层烧结反应带特性剖析[J]. 钢铁研究学报, 2026, 38(1): 13-24.
Yang Congcong, Liu Hao, Zhu Deqing, et al. Analysis of characteristics of reaction zones in deep-bed sintering of various ore blending structure[J]. Journal of Iron and Steel Research, 2026, 38(1): 13-24.

[20] 孙彦广, 盛刚. 物质流能量流协同的钢铁企业能源系统动态调控[J]. 钢铁, 2025, 60(7): 167-179.
Sun Yanguang, Sheng Gang. Energy system dynamic regulation in iron and steel enterprises with material-energy flow

synergy[J]. Iron and Steel, 2025, 60(7): 167-179.
[21] 王为术, 甄娟, 郭嘉伟, 等. 烧结矿竖式冷却炉气固传热影响因素研究[J]. 烧结球团, 2023, 48(5): 33-42.
Wang Weishu, Zhen Juan, Guo Jiawei, et al. Research on influencing factors of gas-solid heat transfer in sinter vertical cooling furnace[J]. Sintering and Pelletizing, 2023, 48(5): 33-42.
[22] Wang Yan, Li Jing, Yan Wei, et al. Efficient utilisation of waste steel slag in slag-making process of all-scrap electric arc furnaces[J]. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications, 2025, 52(9): 1115-1128.
[23] Varanasi S S, Rao M V M, Santanu D, et al. Effect of recycling ladle furnace slag as flux on steel desulphurization during secondary steel making[J]. Ironmaking & Steelmaking: Processes, Products and Applications, 2022, 49(8): 813-820.
[24] 李保海, 杨涛. 固废制备高炉冷固结球团矿技术[J]. 烧结球团, 2024, 49(3): 74-80.
Li Baohai, Yang Tao. Technology of preparing cold-solidified pellets of blast furnace from solid waste[J]. Sintering and Pelletizing, 2024, 49(3): 74-80.
[25] 梁鹏飞, 史凡, 武超. 基于合同能源管理的某钢铁厂钢渣有压热焖余热回收探析[J]. 节能, 2020, 39(12): 78-80.
Liang Pengfei, Shi Fan, Wu Chao. Analysis on the recovery of waste heat from steel slag under pressure in a steel plant based on contract energy management[J]. Energy Conservation, 2020, 39(12): 78-80.
[26] 李磊. 智能验质系统在废钢检验领域的应用研究[J]. 山西冶金, 2025, 48(5): 215-217,222.
Li Lei. Research on the application of intelligent quality inspection system in the field of scrap steel inspection[J]. Shanxi Metallurgy, 2025, 48(5): 215-217,222.
[27] 王超, 肖鹏程, 朱立光, 等. 基于密集小目标检测的废钢智能判定模型[J]. 中国冶金, 2025, 35(3): 155-167.
Wang Chao, Xiao Pengcheng, Zhu Liguang, et al. Intelligent acceptance model for steel scrap based on dense small object detection[J]. China Metallurgy, 2025, 35(3): 155-167.
[28] 吉孟扬, 施凯旋, 郭宇, 等. 基于改进 DeepLabv3+卷积神经网络的废钢智能判定算法[J]. 轧钢, 2025, 42(5): 150-158.
Ji Mengyang, Shi Kaixuan, Guo Yu, et al. Scrap steel intelligent determination algorithm based on improved DeepLabv3+ convolutional neural network[J]. Steel Rolling, 2025, 42(5): 150-158.
[29] Liang Siyi, Du Ye, Liu Qi, et al. Wastewater reuse and recycling of the steel industry in China: history, current situation, and future perspectives[J]. Water Reuse, 2023, 13(2): 162-179.
[30] 刘东. 全膜法技术在钢铁行业废水处理中的应用[J]. 冶金动力, 2026(1): 94-98.
Liu Dong. Application of full membrane technology in wastewater treatment in the steel industry[J]. Metallurgical Power, 2026(1): 94-98.
[31] Ante A, Brücher P, Kiessling-romanus J, et al. Recycling of water and valuables in steel production[J]. Chemie Ingenieur Technik, 2019, 91(10): 1434-1444.
[32] 程立, 金锋, 陈树华, 等. 一种炉顶煤气分离回收再利用的方法: CN202311281787.9[P]. 2024-08-20.
Cheng Li, Jin Feng, Chen Shuhua, et al. A method for separation, recovery and recycling of blast furnace top gas: CN202311281787.9[P]. 2024-08-20.
[33] 高峰, 李红全, 宗金虎, 等. 一种高炉用煤气分离装置: CN202320376676.5[P]. 2023-08-15.
Gao Feng, Li Hongquan, Zong Jinhu, et al. A gas separation device for blast furnaces: CN202320376676.5[P]. 2023-08-15.
[34] Bushuev A N. (2024). Recycling of coke oven gas in gas turbines at Ural Steel[J]. Coke and Chemistry, 2024, 67(10): 591-595.
[35] 李鹏阳, 张彩东, 李兰杰, 等. 高炉煤气与焦炉煤气制甲醇和醋酸联产 LNG 的系统: CN202420287665.4[P]. 2024-10-11.
Li Pengyang, Zhang Caidong, Li Lanjie, et al. A system for co-production of methanol, acetic acid and LNG from blast furnace gas and coke oven gas: CN202420287665.4[P]. 2024-10-11.
[36] 何相君, 雷婧, 彭宝祥, 等. 钢铁副产煤气资源化利用技术及效益分析[J]. 现代化工, 2026, 46(6): 252-256,261.
He Xiangjun, Lei Jing, Peng Baoxiang, et al. Technologies and comprehensive benefit analysis for resource utilization of steel by-product gases[J]. Modern Chemical Industry, 2026, 46(6): 252-256,261.
[37] Zhao Zhijian, Saxén H, Wang Shuhua, et al. Simulation study on the effect of increasing pellet proportion on burden distribution in the blast furnace[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2024, 51(1): 23-32.
[38] He Liang, Jiang Xin, An Haiwei, et al. Effects of pellet ratio on the burden movement and distribution characteristics in the BF throat[J]. Powder Technology, 2024, 432: 119130.
[39] 马明鑫, 葛玉春. 高比例球团矿高炉冶炼实践[J]. 河北冶金, 2024(5): 66-70.
Ma Mingxin, Ge Yuchun. Practice of high ratio pellet blast furnace smelting[J]. Hebei Metallurgy, 2024(5): 66-70.
[40] 杨雪婷, 张笛, 李宗旭, 等. 包钢 1#高炉大比例球团矿冶炼节能降碳分析[J]. 包钢科技, 2025, 51(1): 33-35.

Yang Xueting, Zhang Di, Li Zongxu, et al. Analysis on energy conservation and carbon emission reduction for 1# blast furnace smelting of Baotou Steel with large proportion of pellets[J]. Science and Technology of Baotou Steel, 2025, 51(1): 33-35.

[41] 毛晓波, 沈博文, 於慧敏. 碳中和目标下炼钢用电炉节能减排自动控制方法[J]. 自动化应用, 2023, 64(23): 206-208.
Mao Xiaobo, Shen Bowen, Yu Huimin. Automatic control method of energy-saving and emission reduction of electric furnace for steelmaking under carbon neutralization target[J]. Automation Application, 2023, 64(23): 206-208.

[42] Chen Weizhen, Hu Hang, Wang Shuai, et al. Numerical study on heat transfer characteristic of hot metal transportation before EAF steelmaking process[J]. Metals, 2024, 14(6): 673.

[43] 刘璐华, 刘永刚, 周伟, 等. 电弧炉炼钢高效节能技术的发展现状[J]. 工业加热, 2024, 53(1): 1-5.
Liu Luhua, Liu Yonggang, Zhou Wei, et al. Development status of high-efficiency energy-saving technology for electric arc furnace steelmaking[J]. Industrial Heating, 2024, 53(1): 1-5.

[44] 杨春政. 全连续铸轧一体化技术的流程特征分析[J]. 钢铁, 2025, 60(7): 100-108.
Yang Chunzheng. Analysis for process characteristics of integrated technology of continuous casting and rolling[J]. Iron and Steel, 2025, 60(7): 100-108.

[45] 张凤泉, 曾春, 骆忠汉. 短流程炼钢及近终形连铸连轧的产业化进展[J]. 武钢技术, 2016, 54(1): 57-62.
Zhang Fengquan, Zeng Chun, Luo Zhonghan. Industrialization progress of short-route steelmaking and near-net shape continuous casting and rolling[J]. Wisco Technology, 2016, 54(1): 57-62.

[46] Fu Tianjie, Liu Shimin, Li Peiyu. Digital twin-driven smelting process management method for converter steelmaking[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2025, 36(4): 2749-2765.

[47] Fu Tianjie, Liu Shimin, Li Peiyu. Intelligent smelting process, management system: Efficient and intelligent management strategy by incorporating large language model[J]. Frontiers of Engineering Management, 2024, 11(3): 396-412.

[48] Chen Yuxuan, Rao Jiangping, Zeng Yonglong, et al. Dynamic-static knowledge graph enhanced LLM reasoning for intelligent process planning in steel manufacturing[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2026, 86: 203-217.

[49] 韩德浩, 彭一帆, 杨志浩, 等. 大模型驱动冶金行业智能化转型: 技术路径与应用前瞻-以转炉炼钢过程为例[J]. 冶金自动化, 2025, 49(4): 36-48.
Han Dehao, Peng Yifan, Yang Zhihao, et al. LLMs driven intelligent transformation of metallurgical industry: technological path and application prospects-taking converter steelmaking process as an example[J]. Metallurgical Industry Automation, 2025, 49(4): 36-48.

[50] 王睿之, 任鑫, 蒋晓放. 转炉高废钢比冶炼工艺关键技术研究[J]. 炼钢, 2026, 42(3): 21-31.
Wang Ruizhi, Ren Xin, Jiang Xiaofang. Research on key technologies of high scrap ratio steelmaking process in converter[J]. Steelmaking, 2026, 42(3): 21-31.

[51] 李洋洋, 刘洋, 闫丽. 面向转炉高废钢比对炼钢产品的碳足迹研究[J]. 工业加热, 2025, 54(8): 66-71.
Li Yangyang, Liu Yang, Yan Li. Study on carbon footprint of steel products with high scrap ratio in converter[J]. Industrial Heating, 2025, 54(8): 66-71.

[52] 杨建平, 姚柳洁, 高攀, 等. 面向转炉高废钢比冶炼工艺的废钢比与碳排放理论计算[J]. 中国冶金, 2023, 33(6): 133-140.
Yang Jianping, Yao Liujie, Gao Pan, et al. Theoretical calculation of scrap ratio and carbon emissions for high scrap ratio smelting process in BOF[J]. China Metallurgy, 2023, 33(6): 133-140.

[53] 张琦, 沈佳林, 籍杨梅. 典型钢铁制造流程碳排放及碳中和实施路径[J]. 钢铁, 2023, 58(2): 173-187.
Zhang Qi, Shen Jialin, Ji Yangmei. Analysis of carbon emissions in typical iron- and steelmaking process and implementation path research of carbon neutrality[J]. Iron and Steel, 2023, 58(2): 173-187.

[54] 汪旭颖, 李冰, 吕晨, 等. 中国钢铁行业二氧化碳排放达峰路径研究[J]. 环境科学研究, 2022, 35(2): 339-346.
Wang Xuying, Li Bing, Lü Chen, et al. China's iron and steel industry carbon emissions peak pathways[J]. Research of Environmental Sciences, 2022, 35(2): 339-346.

编辑 唐肖