

报告

钢铁行业供热系统低碳化转型： 技术路径与实践

Decarbonizing Steel Industry Thermal Systems:
Technological Pathways and Practices

2026 年 8 月

关于绿色创新发展研究院 (iGDP)

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP), 2014 年成立于北京, 是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。

iGDP 自成立以来, 根植我国绿色低碳实践, 紧跟全球应对气候变化进程, 服务决策者、实践者、投资者, 通过跨学科、系统性、实证性的研究, 推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化, 与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通, 提供有国际视野和前瞻性的解决方案及公共知识产品, 为全球可持续发展做出贡献。

报告作者

刘雪野 绿色创新发展研究院 项目主任 / 高级分析师	liuxueye@igdp.cn
杨 鹂 绿色创新发展研究院 副主任 / 高级项目总监 / 高级分析师	yangli@igdp.cn
刘晶宁 绿色创新发展研究院 分析师	liujingning@igdp.cn
洪佳玲 绿色创新发展研究院 高级分析师	hongjialing@igdp.cn

联系方式

绿色创新发展研究院 (iGDP) : igdpoffice@igdp.cn

致 谢

本报告研究内容得益于好思汇相关研讨活动、调研活动及专家访谈, 感谢各位参与专家。

感谢 iGDP 同事胡敏、汪燕辉、陈思敏、徐懿情、吕雅宁、张瑛睿对本项目提供的重要建议与反馈。

感谢东北大学低碳钢铁前沿技术研究院副院长张琦教授的审阅并提出宝贵的建议。

由于时间和资源的限制, 目前报告未能充分采纳各位专家的每一项宝贵意见, 我们将在后续的研究工作中不断修正和完善不足之处。

免责声明

本报告内容和观点仅代表作者的个人理解和观点, 旨在加强相关领域的讨论交流, 不代表支持方、作者所属机构、调研专家学者的立场和观点。本报告内容采用数据和信息均来自公开的信息和渠道, 我们力求准确和完整, 但难免偶有疏漏, 敬请谅解并指正。

引用建议

绿色创新发展研究院. 工业领域低碳供热潜力及实施路线图系列报告之二: 钢铁行业供热系统低碳化转型: 技术路径与实践. 202608. 报告. 北京: 绿色创新发展研究院.

封面图源: Luca Upper on Unsplash

目 录

执行摘要	1
Executive Summary:	2
1. 引言	4
2. 钢铁供热低碳转型的政策驱动.....	4
2.1 余热余能回收政策	4
2.2 降低工艺供热相关化石能源消费	4
2.3 提高工艺供热效率	5
3. 钢铁行业低碳供热技术及实践.....	5
3.1 钢铁供热低碳技术路线	5
3.2 余热回收	6
3.3 系统能效提升	12
3.4 氢能冶炼	13
4. 挑战与建议	19
4.1 中国钢铁行业工艺供热低碳转型挑战.....	19
4.2 政策建议	19
4.2.1 强化钢铁行业低碳供热政策体系.....	19
4.2.2 推动绿氢资源丰富地区开展氢基熔融技术规模化应用	19
4.2.3 加速焦炭资源丰富地区电炉钢占比跨越式提升.....	20
4.2.4 推动沿海钢铁企业建设“风光储氢”多能互补及绿电直供	20
4.2.5 强化碳市场约束，引导钢铁产业结构优化.....	20
参考文献	22

执行摘要

本报告针对中国钢铁行业对工艺生产供热¹开展低碳转型的背景、技术路径及政策支撑体系进行了系统性分析。2023年，中国钢铁行业能源消费占全国总量的12%(国家统计局，2025)，其中供热环节高度依赖化石燃料，是行业碳减排的核心难点。

既有研究表明，中国钢铁行业供热低碳转型过程中呈现出显著的阶段性特征，其路径通常遵循“先提升能效挖潜、再推进工艺流程变革、最终实现与绿电系统融合”的递进模式(IEA，2021)。近期(2025-2030年)以极致能效工程为核心，重点突破高炉熔渣显热回收、中低温余热梯级利用及工序界面热能协同技术，旨在存量设备基础上最大化余热回收率。中期(2030-2040年)侧重于工艺流程的结构性调整，通过扩大废钢电弧炉短流程占比及氢基竖炉、氢基熔融还原技术的规模化示范，实现化石燃料的部分替代。远期(2040-2060年)则依赖绿氢冶金、铁矿石直接电解及CCUS技术的深度耦合，构建跨行业能源循环网络，最终实现近零排放。

本报告在全面梳理国内外有关钢铁供热低碳技术的研究成果与报告的基础上，对不同低碳供热技术的适用范围和经济性进行了比较分析，总结了当前学术界普遍认可的中国钢铁行业低碳供热技术发展方向。在每个阶段选取具有深度减排效果与商业可行性的代表性技术，并通过典型案例加以阐述，以便清晰展示不同阶段的技术选择依据与发展逻辑。

通过对河钢氢冶金、首钢京唐界面优化及波士顿金属电解炼钢等案例的深度梳理，报告分析了各项低碳供热相关前沿技术在减碳效果与经济性方面的表现。分析表明，尽管前沿技术具备显著的减排潜力，但目前仍面临绿氢成本高昂、可再生能源供应不稳、存量资产处置难度大以及跨行业协同机制不健全等现实挑战。

基于此，报告提出四点建议：一是加强量化指标约束，建立分阶段、分区域的钢铁行业低碳供热评价标准；二是依托内蒙古、山东等资源禀赋地区，布局“风光储氢”一体化示范项目，降低绿能使用成本；三是在焦炭资源富集区加速短流程转型，完善废钢分类回收体系；四是利用碳市场机制优化产业配额分配，引导资金流向低碳供热技术改造。综上所述，钢铁行业供热系统的脱碳需通过技术迭代与政策驱动双向发力，推动行业向新型能源系统的灵活性调节器转型。



图片来源：Xing Bowen on Unsplash

¹ 本报告所指工业供热范围只包含工业行业工艺生产所需要的热量，不包含工业生产过程中产生的热量用于居民区取暖、工业园区取暖等。

Executive Summary:

This report systematically analyzes the background, technological pathways, and policy support systems pertaining to the low-carbon transition of process heating in China's steel industry. In 2023, the energy consumption of China's steel sector accounted for 12% of the national total (NBS, 2025). The heating processes, which remain heavily reliant on fossil fuels, constitute a primary bottleneck for carbon mitigation within the industry.

Existing studies indicate that the low-carbon transition of thermal systems in China's steel industry unfolds in distinct stages. The trajectory generally follows a progressive paradigm: "initially maximizing energy efficiency potential, subsequently restructuring production processes, and ultimately achieving integration with the green electricity system" (IEA, 2021). In the near term (2025–2030), the strategy centers on ultimate energy efficiency engineering, prioritizing breakthroughs in sensible heat recovery from blast furnace slag, cascade utilization of medium- and low-temperature waste heat, and thermal energy coordination across process interfaces. This phase aims to maximize the waste heat recovery from the existing equipment stock. In the medium term (2030–2040), the focus shifts toward structural adjustments in production processes. Partial substitution of fossil fuels will be achieved by increasing the proportion of the scrap-based electric arc furnace (EAF) short process and scaling up the demonstration of hydrogen-based shaft furnaces and hydrogen-based smelting reduction technologies. In the long term (2040–2060), the transition will rely on the close integration of green hydrogen metallurgy, direct iron ore electrolysis, and Carbon Capture, Utilization, and Storage (CCUS) technologies. This phase aims to construct a cross-sectoral energy circulation network, ultimately achieving near-zero emissions.

Drawing on a comprehensive review of Chinese and international research on low-carbon process-heat technologies in the steel sector, this report conducts a comparative analysis of the applicability and economic viability of various low-carbon process-heat technologies. It summarizes the developmental trajectories for low-carbon process-heat technologies that are widely acknowledged by the academic community. Representative technologies demonstrating profound emission reduction potential and commercial viability are selected for each phase. These are illustrated through case studies to delineate the rationale behind technology choices and the development logic across different stages.

Through an in-depth review of case studies—including HBIS Group's hydrogen metallurgy, Shougang Jingtang's interface optimization, and Boston Metal's electrolytic steelmaking—the report evaluates the performance of various frontier low-carbon thermal technologies regarding their decarbonization efficacy and economic feasibility. The analysis reveals that, despite their significant emission reduction potential, these frontier technologies still face practical challenges, including the high cost of green hydrogen, the intermittency of renewable energy supply, difficulties in stranded asset management, and underdeveloped mechanism for cross-sectoral coordination.

Based on these findings, the report proposes four recommendations: First, strengthen binding quantitative targets and establish phased and regional evaluation standards for low-carbon thermal systems in the steel industry; Second, leverage regions with abundant resource endowments, such as Inner Mongolia and Shandong, to deploy integrated "wind-solar-storage-hydrogen" demonstration projects, thereby reducing the cost of green energy utilization; Third, accelerate the transition toward short-process steelmaking in coke resource-endowed regions, while optimizing the scrap steel classification and recycling system; Fourth, utilize carbon market mechanisms to refine the allocation of sectoral allowances, channeling capital flows toward low-carbon thermal retrofits. In conclusion, the decarbonization of thermal systems within the steel industry necessitates a dual driving force of technological iteration and policy support, ultimately facilitating the industry's transformation into a flexible regulator within the new energy system.



图片来源: Enlightening Images on Unsplash

1. 引言

2023 年，我国钢铁行业能源消费量达 6.83 亿吨标准煤，约占全国能源消费总量的 12%（国家统计局，2025）。目前，钢铁行业供热需求覆盖烧结、炼铁、炼钢等全流程，能源消费高度依赖化石能源。中国钢铁行业低碳供热转型是钢铁行业深度减排的核心抓手。当前中国钢铁行业面临市场、环保、成本等多重压力，钢铁行业低碳供热，既是落实“双碳”目标的必要举措，也是行业突破资源环境限制、培育新质生产力、提升全球竞争力的战略选择。

钢铁行业低碳供热转型面临技术成熟度与经济性的双重挑战：绿氢的应用、大规模电加热等前沿技术还在示范阶段，初期投入高、经济性不强；绿电的稳定性不够，氢能的储运体系也没完全建起来，这些都会影响对化石能源的替代；钢铁生产流程对热工制度稳定性要求高，存量设备改造难度大；政策与市场机制还需进一步完善，才能降低企业转型的风险。

为此，本报告针对中国钢铁行业低碳供热领域当前涌现的前沿或成熟的技术开展案例分析，深度分析各项技术的技术原理、减碳效果及经济性，并提出相应的支持建议，为各级政府与行业企业提供决策建议。

2. 钢铁供热低碳转型的政策驱动

钢铁供热低碳转型包含化石燃料替代与电气化率提升、原料替代与工艺流程优化、余热回收与利用等方面，现有政策围绕上述领域已开展系统性探索，通过设立量化目标、标准细化与鼓励相关技术，为各方向的低碳供热转型指明了方向。

2.1 余热余能回收政策

2024 年 6 月，国家发改委联合有关部门印发《钢铁行业节能降碳专项行动计划》（发改环资〔2024〕730 号）明确提出到 2025 年底，余热余压余能自发电率比 2023 年提高 3 个百分点以上。文件提出要加快推广烧结、焦化等余热发电技术，支持开展冶金渣显热高效回收利用、轧钢加热炉煤气反吹、转炉底吹二氧化碳炼钢、高炉炉顶均压煤气、高温高压干熄焦、中低温余热余能利用等应用，因地制宜推进钢铁低品位余热用于城镇供暖供冷。

国家发改委与工业和信息化部于 2024 年 6 月 13 日联合发布的《2024-2025 年节能降碳行动方案》重点明确了要推动全流程余能利用。加强钢铁行业余能利用改造，有序开展余能自发电装备更新，优化二次能源直接利用方式，减少能源转换次数。积极推进副产煤气利用，推广燃气—蒸汽联合循环发电、亚临界煤气发电、超高温超高压发电等高效利用技术。加快推广烧结、焦化等余热发电技术，支持开展冶金渣显热高效回收利用、轧钢加热炉煤气反吹、转炉底吹二氧化碳炼钢、高炉炉顶均压煤气、高温高压干熄焦、中低温余热余能利用等应用。因地制宜推进钢铁低品位余热用于城镇供暖供冷。

2.2 降低工艺供热相关化石能源消费

《2024—2025 年节能降碳行动方案》提出：严格管控大气污染防治重点区域煤炭消费总量，推进燃煤锅炉关停整合；新建钢铁项目原则上不再新增自备燃煤机组，支持既有机组清洁能源替代。

2024 年 5 月，工业和信息化部发布《工业重点行业领域设备更新和技术改造指南》，明确支持氢冶金、近零碳排放电炉流程等低碳技术升级改造，推进中试验证及产业化应用。由工业和信息化部、国家发展改革委、

国家能源局三部门于 2024 年 12 月 30 日联合印发的《加快工业领域清洁低碳氢应用实施方案》进一步要求有序提升氢冶金应用水平，以绿氢替代传统化石燃料和原料，从工艺前端降低工业供热造成的碳排放强度。

在工艺流程优化方面，多部政策协同推动短流程替代长流程生产转型，《钢铁行业产能置换实施办法（征求意见稿）》明确将“短流程转型”列为产能布局的核心方向，通过产能置换引导行业能源消费结构向低碳化调整。同时，《2024-2025 年节能降碳行动方案》明确提出加快推广电弧炉余热回收技术，通过提升电炉钢生产比例缩短传统长流程的高能耗工序链，实现从原料到成品全流程低碳化改造，从而降低单位产品能耗与碳排放强度。

2.3 提高工艺供热效率

通过加快替代钢铁行业供热的化石能源与适用设施、技术方向等方式加快钢铁供热低碳转型的速度，为全行业节能降碳做出关键贡献。吨钢综合能耗降低 2% 左右，通过优化二次能源直接利用方式减少能源转换次数，推广燃气 - 蒸汽联合循环发电、超高温超高压发电等高效技术，提升电气化水平。通过政策要求，降低钢铁企业在长流程炼铁和整个工序供热中的化石能源消耗、提高供热效率。

3. 钢铁行业低碳供热技术及实践

3.1 钢铁供热低碳技术路线

本报告在全面梳理国内外有关钢铁供热低碳技术的研究成果与报告的基础上，对不同低碳供热技术的适用范围和经济性进行了比较分析，总结了当前学术界普遍认可的中国钢铁供热低碳转型技术发展方向。在每个阶段选取具有深度减排效果与商业可行性的代表性技术，并通过典型案例加以阐述，以便清晰展示不同阶段的技术选择依据与发展逻辑。

既有研究表明，中国钢铁行业在向低碳供热转型过程中呈现出显著的阶段性特征，其路径通常遵循“先提升能效挖潜、再推进工艺流程变革、最终实现与绿电系统融合”的递进模式（IEA, 2021）。这一认识在多家权威机构针对中国钢铁行业的低碳发展路线图中均有体现。

在近期阶段（2025-2030 年），现有研究多聚焦于中国钢铁行业长流程为主的现存设施的余热资源的深度挖掘。研究显示，2023 年中国钢铁行业平均余热回收率仅为 25% 左右（中国钢铁工业协会，2024 年）。而全国余热利用示范钢厂宝武的回收利用率已经可以达到 48%，首钢京唐的回收利用率为 50%（张欣欣，姜泽毅，张欣茹，2022 年）。中国钢铁行业余热回收潜力²约为 3000 万吨标煤（IEA, 2017）。对现有“高炉 - 转炉”（BF-BOF）路线而言，综合能效改造（BAT BF-BOF）在 2030 年前是最早成熟且最便宜的减排选项，平均减排成本为负，意味着节能带来的成本节约超过减排投入（Wu, 2025）。针对钢铁企业中大量低品位余热长期未充分利用的现状，（中国钢铁工业协会，2022）等文献提出中国钢铁行业要做到余热余能应收尽收，做到全系统极致能效。

针对中期（2030-2040 年）钢铁行业低碳供热，文献多集中于工艺流程的结构性调整与相应的能源替代。研究提出，中期技术部署将重点转向钢铁行业低碳供热前沿技术的规模化应用。根据（生态环境部环境规划院，清华大学碳中和研究院，2025）及（IEA, 2020）的研究预测，随着氢冶金技术的成熟、氢能源价格降

² 包含转炉烟气回收、电弧炉烟气回收、干熄焦、烧结冷却废气热回收，未包括热风炉烟气的显热回收。氧气顶吹转炉烟气回收潜力包括来自烟气的显性能量和化学能。工业余热技术回收潜力是 2013 年工业存量。

低与钢铁行业电弧炉短流程炼钢占比逐渐提升，远期钢铁行业工艺供热中绿电与氢能占比大幅提升，逐步替代部分化石燃料燃烧供工艺热。对 EAF 路线而言，短期内从煤基直接还原电炉（DRI-EAF）转为气基直接还原铁技术（DRI-EAF），或在气基直接还原铁技术（DRI-EAF）上配置碳捕集与封存（CCS）是成本较低的减排方式，中长期则随着绿氢价格下降，气基直接还原铁技术（DRI-EAF）上采用 100% 绿氢的成本在中国逐渐优于 CCS。废钢电弧炉（Scrap-EAF）在部分区域呈现明显成本优势和负减排成本，但全球废钢供给约束限制了其扩张空间（Wu, 2025）。因此，中期不仅是供热的能源结构的优化，更是通过短流程替代长流程和短流程结合绿氢和绿电实现碳排放大幅削减的关键阶段。

针对远期（2040-2060 年）的研究则强调多种零碳与负碳技术的深度耦合。研究认为加强钢铁行业绿色能源、清洁能源的应用，推广富氢冶炼，实现钢铁生产过程的大幅降碳是保障中国钢铁行业零碳目标实现的重要支撑。根据（RMI, 2021）等机构的研究，钢铁企业的生产流程将与绿氢和绿电深度耦合。此外，结合碳捕集、利用与封存（CCUS）技术的使用，钢铁行业工艺供热将实现近零排放。根据（IEA, 2020）的研究，基于现有能源价格的估算，在处于商业化前期、接近零排放的技术中，结合碳捕集、利用与封存（CCUS）的创新熔炼还原工艺，在大多数地区的整体生产成本最低。同时，通过“钢化联产”等跨行业能源循环网络，钢铁行业将与化工、建筑等领域深度融合，共建高效低成本的零碳供热系统。

表 1 钢铁行业低碳供热阶段性技术方向综述

阶段划分	核心目标	关键指标	重点任务
近期（2025-2030） 系统能效提升与余热回收攻坚期	实现碳达峰，系统能效显著提升	吨钢能耗降 2% 以上、余热回收率超 60%、电炉钢占比 15%	深入开展极致能效工程、提升余热回收率、推进节能改造、开展短流程相关技术研发
中期（2030-2040） 流程创新与氢能冶炼突破期	碳排放稳步下降，低碳技术规模化应用	氢基冶金示范成功、电炉钢占比显著提高、碳排放下降 30%	氢冶金商业化、短流程炼钢推广、智能化碳管理
远期（2040-2060） 零碳工艺与系统融合期	近零碳排放，跨行业能源共生	供热系统近零碳、能源循环网络成熟、全价值链碳中和	绿氢冶金主导、CCUS 耦合、钢化联产升级

表源：作者根据公开信息整理

结合以上对中国钢铁行业供热低碳转型路线图的文献综述，针对各工序供热特性与减排潜力的分析，本报告选取近期涌现的前沿且减排效果突出的供热低碳转型技术进行系统梳理与案例说明。鉴于这些技术在近期可率先实现局部示范与规模化应用、中期有望成为供热低碳技术的主流、远期或将主导钢铁行业供热系统的深度脱碳转型，报告将按照近、中、远不同阶段顺序分别阐述这些技术的发展现状、应用场景与案例分析，以期清晰呈现不同阶段的主流技术的优势、挑战与所需助力。

3.2 余热回收

据（张涛，周园园，2023）研究，中低温（100-300℃）余热在钢铁行业中占余热总量的 60.1%，钢铁行业的高温余热量约占钢铁行业余热资源总量的 39.8%。因此，中国钢铁行业中低温余热产生占比高，利用潜力大，然而回收难度大。

钢铁行业的余热资源分布主要集中在焦化、烧结、炼铁、炼钢及轧钢等生产流程。钢铁生产中余热资源产生量由多到少排序为：炼铁、烧结、炼钢、热轧、炼焦；余热资源回收率由大到小排序为：炼钢、热轧、炼焦、烧结、炼铁。烧结和炼铁工艺产生的余热量约为 155.4 千克标煤每吨（kgce/t），占总余热量的 62.19%，但其回收量仅为 16.4 kgce/t，回收率仅为 10.55%，其余热回收有待发展和关注（张涛，周园园，2023）。

高温余热回收技术

按照占中国钢铁行业主导地位的长流程生产工艺来测算，我国钢铁流程的能源利用率仅为 27%，其余 73% 主要以余能余热的形式存在（代铭玉，2017）。其中，铁水预处理（KR 脱硫）渣热态循环利用技术是我国高温余热回收技术中的前沿代表，不仅在于其首次实现了世界范围内 KR 脱硫渣热态直接回用的工业化突破，更在于它从余热回收深度、资源循环模式、装备工程化水平三个维度重新定义了钢铁固废处置的技术边界。该技术既降低了脱硫剂生产环节的化石能源消耗（石灰窑煅烧），又回收了高温物理显热，还减少了废渣处理的环境负担。在国家大力推进“极致能效”工程和碳排放双控的背景下，这种“过程优化型”减排路径具有极其重要的推广价值。

■ 案例 铁水预处理（KR 脱硫）渣热态循环利用技术深度分析——首钢京唐工业化示范

• 技术概述和核心参数

KR 脱硫渣是铁水预处理 KR（Kambara Reactor）机械搅拌脱硫工艺产生的副产品，其产量约为 7~9 千克每吨（kg/t）铁水（孟华栋，杨勇，姚同路，2022）。脱硫渣中主要成分为氧化钙（CaO），并含有一定量的金属铁及硫（朱仁林 李 . 余 .，2022）。传统处理方式采用热泼或热焖冷却后磁选回收渣铁，尾渣仅用于路基料等低附加值应用，不仅浪费了渣中大量未反应的 CaO 和物理显热，还造成环境污染和铁损（朱仁林 李 . 余 .，2022）。

首钢京唐钢铁联合有限责任公司联合首钢技术研究院、首钢国际工程公司等单位，成功开发了铁水脱硫渣热态回吃工艺，并完成了全球首套工业化系统的建设与运行。2023 年 4 月 10 日，首钢京唐钢轧作业部 KR 脱硫渣热态回吃系统热试成功，标志着该技术从实验室走向工程化应用（中国钢铁新闻网，2023）。

该技术的核心思路是将 KR 脱硫产生的约 1300~1400℃ 高温液态渣在热态下直接返回铁水预处理流程，充分利用渣中未反应的游离 CaO 和大量的物理显热，实现“渣中资源”的再循环利用（孟华栋，杨勇，姚同路，2022）。系统核心为国际首套全自动升降倾翻装置，能够实现高温渣的精准取运、快速输送与定量回吃，在保证处理连续性的同时，彻底摆脱了对人工操作的依赖。

表 2 核心技术参数

指标项目	传统冷态处理	热态回吃技术	改善幅度
脱硫剂（石灰）消耗	基准值	降低 30%~50%	减少 30%~50%
铁水温降	基准值	减少 10~15℃	显著降低热能损失
新生脱硫渣产生量	基准值	减少 30%~40%	显著减少固废排放
铁损	较高	明显降低	钢铁料回收增加
脱硫效率	基准值	保持稳定或略有提升	不降低冶金效果

表源：作者根据公开信息整理

• 供热系统的重构

第一环节：脱硫剂（石灰）煅烧供热的替代

石灰石（ CaCO_3 ）在石灰窑中煅烧生产活性石灰（ CaO ）的过程，需要消耗大量化石燃料（通常为焦炉煤气、高炉煤气或煤炭），属于化石能源供热。

KR 脱硫渣中含有大量未反应的游离 CaO （约 40%~50%），这是因为在铁水脱硫过程中，石灰颗粒表面会形成 CaS 和 Ca_2SiO_4 的致密反应壳层，阻止内部 CaO 继续参与反应，导致脱硫剂利用率偏低（孟华栋，杨勇，姚同路，2022）。传统冷态处理将这些未反应的 CaO 随渣废弃，而热态回吃技术将高温液态渣直接返回铁水包，使渣中游离 CaO 重新参与脱硫反应，替代了部分新石灰的消耗。实际运行数据显示，脱硫剂消耗可降低 30%~50%，意味着石灰窑的煅烧负荷相应减少，直接削减了石灰生产环节的化石燃料消耗（世界金属导报，2025）。

第二环节：铁水热能补给的替代

铁水在预处理、运输和等待过程中会产生温降。传统冷态脱硫渣处理流程中，红热的脱硫渣冷却至常温后，其携带的大量物理显热完全散失。同时，渣中铁珠被废弃或低效回收，导致铁损，而铁水补热（如通过转炉增加废钢比或铁水罐加热）需要消耗额外能源。这一部分热能补偿来自外购电力或自产二次能源，本质仍属于化石能源的间接消耗。

热态回吃技术将约 1300~1400℃ 的液态脱硫渣直接返回铁水罐，渣中显热被有效带入铁水体系，显著减少了铁水的辐射散热和整体温降。实测数据表明，铁水温降减少 10~15℃（世界金属导报，2025）。这意味着：铁水罐在后续运输和等待过程中保持更高温度，减少了转炉冶炼前的额外加热需求；液态金属铁（渣中夹带的铁珠）被直接回收，避免了铁损，按钢铁料消耗折算相当于节约了高炉铁水的能源消耗。

第三环节：废渣处理与运输能耗的替代

传统处理工艺需要对冷态脱硫渣进行破碎、磁选、筛分等加工，以及尾渣的运输和堆存，这些环节消耗大量电力（主要来自火电）和运输用柴油。同时，渣中硫化钙（Calcium sulfide）在堆存过程中遇水会释放硫化氢（ H_2S ）等有毒气体，造成环境风险，处理达标也需要额外能耗（孟华栋，杨勇，姚同路，2022）。

热态回吃技术使新生渣量减少 30%~40%，意味着进入后续加工流程的废渣量显著降低，直接减少了破碎磁选的电耗、渣罐运输的柴油消耗以及堆存场地和环保处理的负担（刘延强、罗磊、张鹏、王皓、袁天祥、张丙龙，2018）。更根本的是，由于实现了高温渣的直接循环利用，部分原本需要外排的尾渣被“消灭”在源头，从全生命周期角度实现了能源消耗的削减。

• 供热效率提升幅度

传统 KR 脱硫工艺中，石灰的利用率通常仅为 50%~60%，大量未反应 CaO 随渣外排。热态回吃技术通过将含游离 CaO 的高温渣返回反应体系，使这部分“废渣”重新发挥脱硫功能。烧结态脱硫渣经热态返回后，其 CaO 的反应活性因处于高温状态而更高，参与脱硫反应的动力学条件更优。根据迁钢的研究，脱硫渣可重复利用 2~3 次后才需要外排（朱仁林 李 余，2022）。首钢京唐的实践表明，这一技术使得脱硫剂利用效率较传统方式提高 30~50 个百分点——即同等脱硫效果下，新石灰消耗量降低 30%~50%（世界金属导报，2025）。

按脱硫渣由约 1300℃ 冷却至常温、比热容约 1.0 kJ/(kg·℃) 估算，其物理显热约为 1.3MJ/kg 渣。该技术可以使渣中物理显热（约 1.3MJ/kg 渣）被有效带入铁水熔池，避免了传统冷却—加工—堆存过程中的全部热量散失。与此同时，传统工艺中后续处理高炉铁粉冷压球团所需的烘干等工序能耗也被削减。

- **整体工序能耗优化**

综合来看，热态回吃技术通过“物料替代 + 热能回收 + 流程简化”三重路径，使 KR 脱硫工序的整体能源消耗显著下降。

- **化石燃料供热削减量**

公开资料显示，该技术可使铁水温降减少 10–15℃。若按中值 12.5℃、铁水比热容 0.92 kJ/(kg·℃) 计算，则吨铁可减少热量损失约 11.5 MJ，折合约 0.39 kgce/t。按年处理 800 万吨铁水计，则年可节约标准煤约 3120 吨（刘延强、罗磊、张鹏、王皓、袁天祥、张丙龙，2018）。这部分热量原本需通过提高铁水入炉温度、优化废钢比或其他方式进行热补偿，因此本质上减少了系统额外能量补给需求。

在固废减量方面，公开报道和文献摘要表明，KR 脱硫渣热态回吃可使新生渣量减少 30%~40%。若按原脱硫渣产生量 8 kg/t 铁水、年处理铁水 800 万吨计算，则年产生脱硫渣约 6.4 万吨；若按区间中值 35% 估算，年可减少新生渣量约 2.24 万吨。若进一步按传统渣处理（破碎、磁选、运输）综合电耗 35 kWh/t 估算，则年可节约电力约 78.4 万 kWh。按电力当量值折算，约为 96 吨标准煤；若按等价值折算，则约为 317 吨标准煤。

- **余热回收增加量**

与传统冷态处理相比，热态回吃技术能够带来额外的显热回收。若按年产生脱硫渣 6.4 万吨、其中 70% 实现热态返回估算，并按脱硫渣由约 1300℃冷却至常温时显热约为 1.3 MJ/kg 渣计算，则年可回收显热约 5824 GJ，折合约 199 吨标准煤。若按 80% 实现热态返回，则对应年可回收显热约 6656 GJ，折合约 227 吨标准煤。

- **碳排放下降幅度**

石灰石分解生产 CaO 的过程是典型的过程排放源，每使用 1 吨石灰石约排放 0.440 吨二氧化碳。首钢京唐每炉节省石灰 3.2 吨，可减少过程排放约 1.4 吨二氧化碳（刘延强、罗磊、张鹏、王皓、袁天祥、张丙龙，2018）。若按首钢京唐年产 1000 万吨铁水估算，并假定其中 80% 的铁水进入脱硫预处理环节，则年处理铁水量约为 800 万吨。若原脱硫剂单耗约为 5 kg/t 铁水，则年消耗石灰约 4 万吨。根据公开报道和文献摘要，KR 脱硫渣热态回吃技术可使脱硫剂消耗降低 30%–40%。若按上限值 40% 估算，则年可节省石灰约 1.6 万吨；若按区间中值 35% 估算，则年可节省石灰约 1.4 万吨，即 0.6 万吨二氧化碳。此外，铁水补热与电力替代也将带来碳排放的降低。

这一减排效益是在不额外投入能源、不建设大型环保设施的前提下实现的，属于典型的“源头减量 + 过程优化”型减排路径。

中低温余热回收利用技术

■ 案例 烧结矿双级冷却及余热回收

• 技术概述和核心参数

烧结工艺是我国钢铁生产的重要环节，其碳排放量约占钢铁流程碳排放总量的 15%，工序能耗约占钢铁流程总能耗的 10%，其中 75% ~ 80% 为固体化石燃料 (HAMMAM A, 2021)。据统计，我国每年需要冷却的烧结矿近 10 亿吨，携带的显热达 2000 亿千卡，折合标煤 2800 万吨，余热利用潜力巨大 (中国金属学会, 2025)。

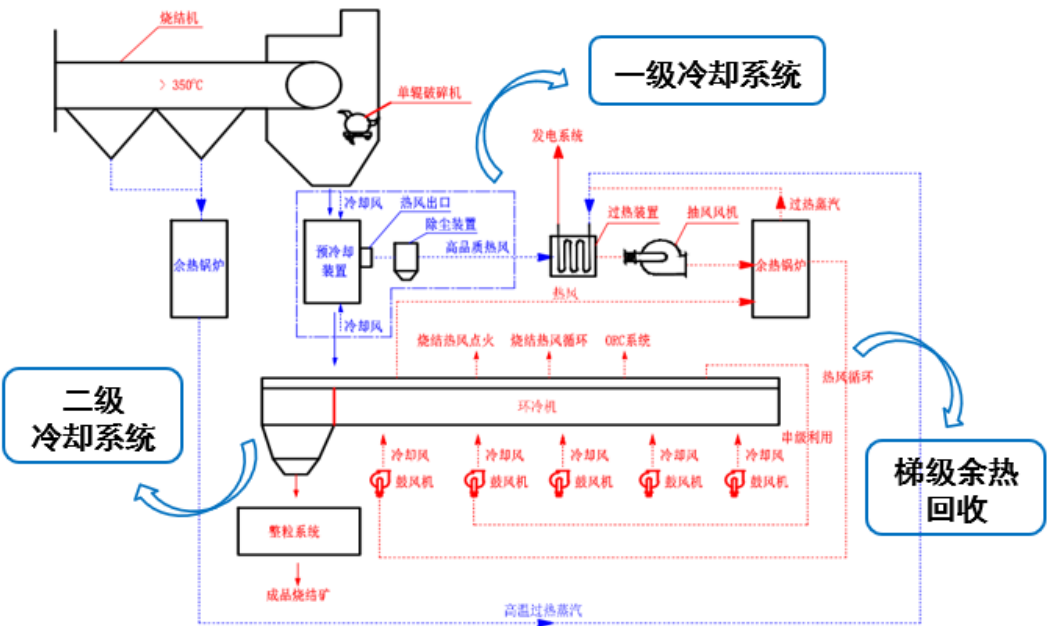
在传统的烧结余热回收系统中，主要采用由液密封环冷机、直联炉罩锅炉和环冷机余热梯级利用技术耦合形成的余热回收方案。该方案可将烧结矿显热回收效率提升至 50% 以上，回收的高温烟气温度可达 340℃至 400℃ (中国金属学会, 2025)。然而，传统冷却方式存在冷却废气品质不高、热量集中度不够等突出问题，大量除尘散熟余热被浪费，低温废气无组织排放，显热回收率难以进一步提高。

为破解上述技术瓶颈，中冶长天国际工程有限责任公司联合相关科研单位，成功开发了烧结矿双级冷却及余热回收技术与装备。该技术的核心思路是将环冷机装备系统与厚料层冷却技术相结合，在保留传统环冷机冷却功能的基础上，在烧结机尾部增设预冷却装置 (中国金属学会, 2025)。

预冷却装置集成了气凝胶保温材料、柔性板防震、耐磨板耐磨三位一体的复合保温技术，并设计了冷却气流等压等流速供给技术，确保热量回收过程稳定可控 (中国金属学会, 2025)。

该技术在理论层面建立了烧结矿预冷却风量、风温、冷却时间与矿温之间的对应关系，构建了烧结矿流动过程及气固换热过程的数值分析模型。与此同时，该技术还实现了预冷却与环冷机冷却的耦合匹配，开发了两级冷却热量平衡及效益优化技术，通过参数优化实现烧结矿显热的高效回收 (中国金属学会, 2025)。该技术将竖冷与环冷结合起来，首创了“烧结矿双级冷却技术”，通过存料缓入、高温出风、减少摔损等方式，将烧结矿余热回收效率提升至 70% 以上，在提高烧结矿成品率的同时，折合降低了工艺过程综合工序能耗约 7% (中冶长天, 2024)。

图 1 烧结矿双级冷却技术示意图



图片来源：中国金属学会, 2025

• 供热系统的重构

湘潭钢铁一烧 360m² 烧结机是烧结矿双级冷却技术的首个工业化应用载体。该项目于 2022 年 7 月投入运行，预冷却装置在湘钢一烧 360m² 烧结机上实现稳定连续运行，目前已连续运行两年半以上（中国金属学会，2025）。

改造后，高温烧结矿首先进入预冷却装置，冷却风与烧结矿气固逆流换热，将高品质余热集中回收，烟气温度明显提升且趋于稳定。预冷却装置回收的高温烟气进入余热锅炉用于发电，环冷机仅承担烧结矿的最终冷却任务，冷却负荷下降，环冷机废气温度也明显提高，实现余热锅炉蒸汽产量的大幅增加。这一改造实现了从“单级冷却 + 单一发电”到“双级冷却 + 热量品质跃升”的根本转变。

从工艺供热替代角度来看，该项目实现了三个层面的替代：首先，提温替代——双级冷却将进入余热锅炉的烟气温度由传统模式进一步提升，形成了高品质热风（> 450°C），实现了热量的“品质提升”，使同一台余热锅炉能够产生更多的高参数蒸汽；其次，电量替代——新增发电量直接替代了原本需要从电网购入的部分电力，降低了企业的外购电成本；最后，效率替代——在同等烧结矿产量和同等冷却效果的前提下，双级冷却技术比传统冷却方式能耗更低、余热回收率更高，相当于用更少的冷却风量实现了更多的余热回收（世界金属导报，2021）。

• 经济效益与商业模式

烧结矿双级冷却及余热回收技术的开发与应用采用了产学研协同创新的模式。该技术由中冶长天国际工程有限责任公司主导研发，联合中国金属学会等科研机构进行技术验证与推广。湘潭钢铁作为首个应用单位，在新建或改造项目中投入相应资金，预冷却装置于 2022 年 7 月应用于湘潭钢铁一烧 360m² 烧结机。中冶长天作为技术提供方，通过设备销售和技术服务获取收益，同时通过示范工程的顺利运行推动该技术在行业内的大规模推广。

经济效益方面，该技术在湘钢一烧 360m² 烧结机的应用取得了显著效益。余热锅炉蒸汽产量由吨矿 34t/h 增至 40t/h，增加发电量约 1200kW，年经济效益约 400 万元（中国金属学会，2025）。从投资回报来看，基于湘钢实际运行数据，项目一般在 3 年左右即可收回投资，具有显著的经济吸引力。

• 节能降碳效果与推广价值

从供热系统的优化效果来看，双级冷却技术的核心价值体现在热量品质提升而非简单的热量总量增加”。通过预冷却装置将烧结矿显热集中回收，使原本分散排向大气的低品质余热“聚能”为集中、稳定、高品质的热源，实现“用更少的冷却风回收更多的热量”。这不仅提高了余热锅炉的蒸汽产量和发电量，还显著降低了环冷机的冷却负荷，使环冷机冷却风量减少、电耗下降、设备磨损减轻，在提升能源利用效率的同时，也延长了关键设备的使用寿命。

在碳减排方面，按我国 2023 年粗钢产量约 10 亿吨、烧结矿产量约 9 亿至 10 亿吨计算，若将烧结矿双级冷却技术在全国烧结工序中全面推广，按湘钢每吨烧结矿蒸汽产量增加 6 吨估算，全国每年可新增回收烧结余热级达到数百万吨标准煤，对应碳减排量可达数千万吨。若将该技术与环冷机废气近“零”排放设计相结合，还可大幅减少区域热污染和粉尘排放，对改善钢铁厂周边空气质量具有直接作用。

此外，该技术对于新建烧结机具有额外的经济价值。由于双级冷却技术使环冷机的冷却负荷大幅下降，新建烧结机可选用规模更小的环冷机设备，从而节省工程投资成本。该技术已在宝钢、梅钢、涟钢、建龙集团、沙钢、中天钢铁、南钢等多家钢铁企业获得高度关注，并于 2024 年 11 月进一步在江苏鑫鑫钢铁 265m² 烧结机上实现应用，验证了该技术对不同规模烧结机的良好适应性（中国金属学会，2025）。

3.3 系统能效提升

(中国钢铁工业协会, 2022) 明确, 2030 年前钢铁行业降碳的核心技术路径为系统能效提升, 该路径蕴含着 15% 的降碳潜力。随着智能制造与冶金流程工程学的深度融合, 叠加数智赋能技术, 为钢铁行业提升系统能效提供了新技术。

■ 案例 钢铁生产流程系统优化及界面技术与装备: 首钢京唐公司

• 项目概述与技术方案

北京科技大学郭占成教授团队承担的“钢铁生产流程系统优化及界面技术与装备”项目, 以首钢京唐公司钢铁生产流程为载体, 应用流程工程学原理, 针对炼铁 - 炼钢、炼钢 - 连铸、连铸 - 轧钢三大关键界面开展系统优化。项目团队由钢铁冶金新技术国家重点实验室牵头, 整合了多学科研发力量, 涵盖冶金工程、自动化控制、热能工程等专业领域。

项目核心目标是开发覆盖全流程的物质流与能量流协同优化系统, 并通过中间包电磁加热装备的创新, 解决连铸过程的温度精准控制难题。

• 技术原理与系统组成

项目技术体系基于冶金流程工程学理论, 将钢铁制造流程视为一个完整的物质、能量转换系统, 通过界面技术的优化实现全流程节能。主要技术创新包括:

炼铁 - 炼钢界面“一罐到底”优化技术: 项目创新应用了铁水罐动态调度与智能分配系统, 通过建立“仿真模型 - 过程模型 - 大数据挖掘 - 反馈控制”的架构, 开发了跨工序数据融合、智能联动的数学模型。该技术减少了铁水运输过程中的温降, 提高了铁水罐周转效率, 使炼铁 - 炼钢界面物流更加连续紧凑。在实际应用中, 首钢京唐公司通过该技术实现了从高炉出铁至进 KR 铁水温降减少 13.3% 的显著效果 (冶金自动化研究设计院有限公司, 2024)。

中间包电磁加热技术与装备: 针对炼钢出钢温度与连铸中间包钢水温度的精准控制需求, 项目成功开发了具有自主知识产权的中间包电磁加热装备, 填补了国内技术空白。该技术通过电磁感应加热原理, 对中间包内钢水进行精准温度补偿, 解决了连铸过程钢水温度波动大的行业难题。

• 系统集成与智能控制

项目通过构建从高炉炼铁到热轧全过程多层级网络化智能体动态仿真模型和一体化流程网络仿真平台, 实现了全流程物质流运行、设备状态及铸坯库存变化的完整呈现。仿真模型将复杂系统按功能任务细分拆解为单智能体, 由工艺规则及事件驱动智能体间的动态连接与协作, 命中率高达 95% 以上, 显著减少了工艺试错成本。

项目还首创了融合物质、能量、时间、空间、信息等要素的从高炉炼铁到热轧全过程动态甘特图, 实现全过程一图贯通、生产状态一图描述和智能化调控一图指挥。这一创新技术以全流程动态仿真和工艺规则库为基础, 结合调度模型协同优化技术, 自动生成全流程多维甘特图, 并根据现场实时信息进行实时优化调整, 实现了全流程一体化动态调度。

• 投资与推广模式

投融资结构

项目采用了产学研协同创新的投融资模式, 资金主要来源于国家重点研发计划“煤炭清洁高效利用和新型节能技术”专项支持, 同时获得首钢京唐公司等合作企业的配套投入。这种国家引导、企业主体的投入机制, 有效降低了技术研发和示范应用的风险, 加速了科技成果的产业化进程。

项目在首钢京唐公司的示范工程投资主要包括技术改造费用、设备购置与安装费用、系统集成与调试费用三大类。其中，中间包电磁加热装备作为核心技术投资占比较大，但因其能效高于进口设备，投资回收期显著缩短。全系统投资回收期预计在 2-3 年以内，具有明显的经济可行性。

商业模式创新

项目采用技术集成与服务输出相结合的商业模式，既提供界面技术优化整体解决方案，也提供关键设备（如中间包电磁加热装置）和持续技术服务。针对不同钢铁企业的特点和需求，项目团队可提供定制化技术方案，确保技术能够快速适应不同企业的生产流程。

对于资金紧张的企业，项目团队可协助设计合同能源管理（EMC）模式，由投资方先行投入技术改造资金，通过节能效益分成方式回收投资。这种模式降低了企业前期投入压力，提高了技术推广的可行性。在首钢京唐公司的成功示范下，已有多个钢铁企业表达了技术引进意向。

- 节能降碳效果与推广价值

环境效益评估

项目环境效益显著，在首钢京唐公司实现年节能 20 万吨标准煤，相应减排二氧化碳约 52 万吨（科学技术部，2020）。这一减排量相当于种植约 286 万棵树一年的碳汇量，环境效益突出。技术推广至全国钢铁行业，年节能潜力可达 2500 万吨标准煤，减排二氧化碳约 6500 万吨，对实现钢铁行业碳达峰碳中和目标具有重要意义。

除了直接的节能降碳效果，项目还带来多重环境协同效益：首先，通过流程优化减少了物料损耗和废弃物产生；其次，提高了能源利用效率，降低了单位产品污染物排放强度；最后，通过智能化管控减少了生产过程中的无组织排放，改善了车间工作环境。

技术对不同生产规模和企业类型具有良好的适应性，既可用于现有产线技术改造，也可纳入新厂区规划设计。特别是中间包电磁加热技术，对提升连铸坯质量、扩大品种钢生产能力具有显著效果，适用于生产高附加值钢种的企业。

3.4 氢能冶炼

随着绿氢价格下降，基于绿氢的直接还原铁制造技术在中国的成本将逐渐优于基于煤基或者气基的直接还原铁制造技术配置碳捕集与封存（CCS）。废钢电弧炉技术路线（Scrap-EAF）作为当前唯一成熟的近零排放路线在部分区域呈现明显成本优势和负减排成本，但全球废钢供给约束限制了其扩张空间（Wu, 2025）。

纯氢竖炉直接还原：

在纯氢冶金领域，河钢集团百万吨级氢冶金示范工程已实现连续稳定运行。河钢集团 120 万吨氢冶金示范工程一期于 2022 年 12 月 16 日全线贯通，并于 2023 年 5 月实现安全顺利连续生产。据河钢集团公开数据，与同等规模的传统“高炉 + 转炉”长流程工艺相比，该工程每年可减少二氧化碳排放约 80 万吨，减排比例达到 70% 以上（央视网，2024）。

■ 案例 氢基竖炉直接还原铁：河钢集团

河钢全球首例 120 万吨氢冶金示范工程一期于 2022 年 12 月 16 日全线贯通，标志着中国钢铁工业从传统“碳冶金”向新型“氢冶金”转变的重要里程碑。项目位于河钢集团张宣科技，是全球首个大规模应用的氢基竖炉直接还原铁项目，为钢铁行业绿色转型提供了实践样板。

• 项目概述与技术方案

河钢氢冶金示范工程采用焦炉煤气作为初始还原气，在全球首次应用以焦炉煤气为还原气体的高压竖炉零重整氢冶金技术。项目创新性地构建了“氢基竖炉 - 近零碳排电炉”新型短流程工艺路线。2024 年 3 月，全球首例“氢基竖炉—近零碳排电弧炉”新型短流程项目在张宣科技正式启动实施，这是世界前沿八大低碳共性技术方向之一。该流程将氢冶金制备的直接还原铁与电炉炼钢相结合，形成完整的近零碳排钢铁生产工艺。

项目采用分阶段实施策略：一期使用焦炉煤气作为过渡方案，最终目标是实现 100% 绿氢冶炼。2024 年 9 月，项目成功应用绿氢作为还原气实现稳定生产，产品合格率 100%，验证了“绿电 - 绿氢 - 绿钢”技术路线的可行性。

项目还应用了数字化和智能化技术，中冶京诚正在开发基于数字孪生技术的氢冶金智能控制系统数字模型，将产线“克隆”到云端，打造新一代智能管控模式。这一系统实现了对复杂工艺的精准控制，确保了高温高压条件下氢冶金过程的安全稳定运行。

该技术的特点是工艺气体中氢碳比高达 8:1 以上，是目前氢气比例最高的冶金工程示范生产线。技术原理是利用氢气在竖炉内与铁矿石发生还原反应，生成直接还原铁（DRI），反应产物为金属铁和水蒸气，从源头上避免了二氧化碳生成。

表 3 河钢氢基竖炉项目关键技术指标

技术指标	传统高炉工艺	河钢氢冶金工艺	提升幅度
碳排放强度	基准	减少 70%	显著改善
还原气氢碳比	低	8:1 以上	革命性提升
产品金属化率	-	94.5% 左右	达到国际一类标准
能源效率	基准	提高 10% 以上	明显提升
原料适应性	要求高品位矿	适应性更广	有所改善

表源：根据公开信息整理

• 工艺供热环节替代优化

在传统高炉工艺中，热风炉通过燃烧焦炉煤气、高炉煤气或混合煤气，将鼓风加热至 1000~1200℃，为高炉冶炼提供热风。这一过程消耗大量化石燃料，属于化石能源供热。热风炉本身的效率约为 75%~85%，且燃烧产生大量二氧化碳。氢基竖炉彻底取消了热风炉系统，竖炉所需热量来源于：①氢气与铁矿石还原反应；②还原气体本身携带的物理热；③竖炉内氢气的部分燃烧放热。2024 年 3 月启动的“氢基竖炉—近零碳排电弧炉”新型短流程项目，进一步将供热方式从气基燃烧转向电炉电能供热，标志着供热系统的二次跃升。

传统高炉炼铁中，焦炭既是还原剂也是主要热源。焦炭在风口前燃烧，提供高炉冶炼所需热量的 70% 以上。每生产 1 吨生铁约消耗 400~600 千克 (kg) 焦炭，焦炭由煤炭高温干馏制得，属于化石能源衍生燃料，

其生产过程本身也产生大量碳排放（中国炼焦行业协会，2024）。氢基竖炉以氢气为还原剂和主要热源，完全替代了焦炭的供热功能。焦炉煤气中的氢气经“零重整”工艺自催化裂解为氢气和一氧化碳。竖炉反应器针对高比例氢含量进行了优化设计，预留了绿氢切换功能，可为未来实现 100% 绿氢竖炉直接还原提供基础。

传统长流程工艺中，高炉需要烧结矿或球团矿作为炉料，烧结过程和球团焙烧过程消耗大量固体燃料和气体燃料，属于化石能源供热。氢基竖炉可直接使用块矿或球团矿，无需烧结工序。在流化床氢冶金工艺中，甚至可以直接使用粉矿，彻底取消了烧结和球团造块工序。这一转变从全流程角度实现了“工序级”的供热替代——烧结 / 球团工序的燃料消耗和碳排放被完全消除。结合 CCUS 技术，项目生产每吨直接还原铁（DRI）可捕集二氧化碳约 125 千克，进一步实现了碳的源头削减。

在长流程冶炼设施中，煤的能量多达 75% 消耗在高炉里，它以焦炭的形式承担多项功能，包括化学还原剂、高炉炉料骨架和作为燃料。剩余部分则为烧结和焦化设备供热，在各种后续生产阶段以共生产品煤气的形式作为能量源取代其他燃料（steel, 2021）。氢冶金项目配套建设电炉短流程生产线，DRI 产品直接进入电炉冶炼。电炉以电能为主要热源（辅以少量化学热），电能可来自可再生能源，实现了从“化学能供热”向“电能供热”的根本转变。2024 年 9 月，项目成功应用绿氢作为还原气实现稳定生产，产品合格率 100%，验证了“绿电—绿氢—绿钢”技术路线的可行性。

• 投资模式与商业模式

投融资结构

河钢氢冶金项目采用了多元化投融资模式，总投资规模显著。项目依托河钢集团作为实施主体，同时获得国家政策支持和国际合作资源。这种“企业主体、国际合作、政府支持”的模式有效分散了创新风险，加速了技术落地。

项目一期工程于 2021 年 5 月开工，2022 年 12 月建成投产，建设周期为 19 个月，体现了高效的项目执行能力。在资金配置上，项目注重关键设备国产化与国际技术引进的平衡，在保证技术先进性的同时控制投资成本。

商业模式创新

河钢集团创造了“技术 + 产品 + 认证”一体化商业模式。在技术层面，项目验证了氢冶金技术的可行性；在产品层面，成功开发出低碳高端钢材产品；在认证层面，积极推进产品绿色认证和国际认可。

2023 年 7 月，我国首卷应用高品质高比例氢冶金洁净原料 DRI 产品生产的超低排放低碳材料汽车用钢，在河钢集团唐钢公司成功下线，产品检验合格后向德国宝马集团提供数据包，正式开启材料认证。这表明河钢不仅关注技术本身，更注重构建从技术到产品的完整价值链。

同时，河钢集团联合冶金工业规划研究院共同制定了《河钢集团低碳排放产品发展规划（2023-2026）》，致力于构建形成“6+6+5”的低碳排放钢、绿钢、近零碳排钢产品矩阵。这一规划为氢冶金产品的市场化提供了清晰路径。

• 节能降碳效果与推广价值

环境效益评估

与传统“高炉 - 转炉”长流程工艺相比，河钢氢冶金示范工程每年可减少二氧化碳排放 80 万吨，减排比例达到 70%（央视网，2024）。此外，项目还创新应用 CCUS 技术，生产每吨直接还原铁（DRI）可捕集二氧化碳约 125 千克，进一步强化了碳减排效果。

氢能供热系统耦合：

内蒙古赛思普科技有限公司实施的“氢基熔融还原技术研发与工业示范”项目，年产 30 万吨氢基熔融还原法高纯铸造生铁。在约 1500°C 以上的熔融池内，铁矿石（氧化铁）同时与氢气（H₂）和碳（来自煤粉）发生反应。该过程主要依赖化学反应释放的热量及补充燃料维持。每年实现喷氢 1 万吨，减少二氧化碳排放 11.2 万吨（内蒙古自治区科学技术厅，2024）。

■ 案例 氢基熔融还原：赛思普

• 项目概况与技术方案

氢基熔融还原技术是不同于氢基竖炉的另一种氢冶金路径，其特点是能够直接使用非焦煤粉和普通铁矿粉作为原料，省去了传统高炉工艺中的焦化和烧结工序。内蒙古赛思普科技有限公司实施的“氢基熔融还原技术研发与工业示范”项目，是内蒙古自治区“双碳”科技创新重大示范工程的“揭榜挂帅”项目，旨在突破传统高炉工艺的局限。

该项目位于内蒙古乌海市，总投资 10.9 亿元，年产 30 万吨氢基熔融还原法高纯铸造生铁。项目于 2021 年 4 月 12 日正式产出高纯铸造生铁水，标志着世界首创的氢基熔融还原冶炼技术成功落地转化。2024 年，项目实现重大突破，成功实现高纯生铁连续稳定月产 5.3 万吨，产品完全符合 C1、C2 行业标准，部分产品达到超高纯铸造生铁标准（内蒙古自治区科学技术厅，2024）^[69]。

图 2 赛思普（CISP）工艺生产高纯铸造生铁



图片来源：乌海日报

• 核心技术原理

赛思普氢基熔融还原技术核心是 CISP（Combined Investment Smelting Process）新工艺，该工艺由建龙集团联合北京科技大学等科研单位开发，是世界首创的氢基熔融还原技术。与传统高炉炼铁工艺不同，CISP 工艺将“氢冶金”与“熔融还原”相结合。在约 1500°C 以上的熔融池内，铁矿石（氧化铁）同时与氢气（H₂）和碳（来自煤粉）发生反应。由于氢气的还原速率远大于一氧化碳（CO），引入氢气能极大地加速还原过程，并减少对碳的依赖。该过程主要依赖化学反应释放的热量及补充燃料维持。每年实现喷氢 1 万吨，减少二氧化碳排放 11.2 万吨（内蒙古自治区科学技术厅，2024）。

该技术具有原料适应性广、工艺流程短的特点，能够直接使用普通煤粉和矿粉，摆脱了对焦煤资源的依赖。该技术取消了焦化、烧结、球团三个高能耗、高污染工序。这意味着在生产源头就消除了大量的二氧化硫、氮氧化物和粉尘排放。二氧化硫排放量减少 38%，氮氧化物排放减少 48%，颗粒物排放减少 89%。此外，工艺在冶炼过程中可产生大量高温可燃气体，这些气体经过换热和燃烧二次利用，能够自发电，除了满足自身用电以外，还可以向外网每小时输送 4 万度电，实现了能源的梯级利用（内蒙古自治区科学技术厅，2024）。

• 关键装备创新

项目团队通过“揭榜挂帅”机制，成功研制出包括热风喷枪、富氢喷枪、正压余热锅炉等国内首台套核心装备 18 项，授权专利 67 项，其中发明专利 9 项。关键设备及零部件实现完全国产化，摆脱了国外技术装备“卡脖子”问题。

表 4 赛思普氢基熔融还原项目关键指标

技术指标	传统高炉工艺	赛思普氢基熔融还原	优势特点
原料要求	需焦煤和高品位矿	可用普通煤粉和矿粉	适应性广
工艺流程	长流程（烧结 - 焦化 - 高炉）	短流程	工序简化
能源效率	基准	可自发电并外输	能源综合利用
产品品质	普通生铁	高纯铸造生铁	产品附加值高
国产化率	部分设备依赖进口	关键设备完全国产化	自主可控

表源：作者根据公开信息整理

• 投资模式与经济效益

投融资结构

赛思普项目采用了“揭榜挂帅”的创新机制，由企业作为出题方，整合科研资源进行联合攻关。项目总投资 10.9 亿元，属于重大技术示范项目。这种模式通过市场化机制引导创新资源向关键领域集聚，提高了创新效率（内蒙古自治区科学技术厅，2024）^[69]。

项目获得了自治区“双碳”科技创新重大示范工程的支持，体现了政府引导与市场主导相结合的特点。资金配置上注重关键装备的自主研发，避免了高昂的国外技术引进成本，提高了投资效益。

商业模式与市场定位

赛思普项目专注于高端铸造材料市场，产品可用于风电、高铁、汽车和核电等领域的高端装备制造。这种市场定位避开了与普通钢材的正面竞争，突出了产品的差异化和高附加值特点。

项目生产的铸造高纯生铁是高端装备制造的基础材料，可广泛用于高铁、核电、风电铸件、蒸汽轮机和各种抗低温冲击铸件及球墨铸铁产品的深加工等领域。这种专业化、高端化的市场定位，为项目创造了良好的经济效益前景。

项目还注重资源的循环利用，在冶炼过程中产生的高温可燃气体可用于发电，形成能源自给的良好循环。据测算，项目除了满足自身用电外，还可以向外网每小时输送高达 4 万度的电力，创造了额外的经济效益（内蒙古自治区科学技术厅，2024）^[69]。

- 节能降碳效果与推广价值

环境效益评估

氢基熔融还原 CISP 工艺从源头上减少了碳排放，相比传统高炉工艺，碳减排效果显著。项目成功实现高纯生铁连续稳定生产，产品品质达到超高纯铸造生铁标准，为下游高端制造提供了绿色材料基础。

工艺过程中产生的可燃气体全部回收利用，用于发电，实现了能源梯级利用，最大限度地提高了能源利用效率，减少了外部能源需求。项目的成功运行证明了氢基熔融还原技术在工业规模应用的可行性，为钢铁行业低碳转型提供了新的技术路径。

总结与对比

两种技术路径的比较分析

氢基竖炉直接还原和氢基熔融还原代表了氢冶金的两条主要技术路径，各有特点和适用场景。河钢氢基竖炉技术更适合与电炉短流程配套，生产高端低碳钢产品，其技术成熟度较高，已实现大规模产业化应用。赛思普氢基熔融还原技术则可以直接生产铁水，能与现有转炉流程衔接，且原料适应性更广，适合焦煤资源缺乏但非焦煤资源丰富的地区。

从成熟度看，氢基竖炉技术在国际上已有较多应用实例，而氢基熔融还原技术创新性更强，国产化程度更高。从产品定位看，河钢侧重汽车板等高端钢材，赛思普专注高纯铸造生铁市场，两者都避开了普通钢材的竞争。

中国氢冶金技术已进入产业化示范阶段，未来十年将是技术成熟和推广的关键期。通过持续的技术创新和政策支持，氢冶金有望成为钢铁行业绿色转型的重要支撑，为全球钢铁工业低碳发展提供中国方案。

4. 挑战与建议

4.1 中国钢铁行业工艺供热低碳转型挑战

目前在我国，钢铁行业的供热低碳转型面临着成本高昂，稳定性不足以满足连续大规模生产要求，技术不成熟及装备工艺适配性不足、政策力度有待加强的挑战。

根据中国钢铁工业协会与国际能源署（IEA）的研究，中国现有的高炉-转炉长流程设备资产重、运行周期长，在 2030 年以前很难实现大规模的设备更替。这意味着短期内中国钢铁行业工艺供热方面的减排必须首先依赖对复杂余热资源的深度回收。然而随着余热回收率逐步提升，依靠传统节能手段获取的减排增量也在逐渐下降。

氢基冶金规模化应用中的氢能价格高昂与氢的制备储运安全性是制约近中期氢基冶金技术部署的重要因素。根据清华大学及洛基山研究所（RMI）的研究，氢能替代化石燃料供工艺热在技术上虽已具备示范条件，但大规模商业化受限于绿氢的制备成本、储运效率以及可再生能源电力的稳定供应。同时，从长流程向电炉短流程的转型不仅涉及工艺重构，还对废钢供应量、废钢价格和电力负荷响应提出了极高要求。

远期实现钢铁行业落实碳中和目标需依赖“钢化联产”、铁矿石电解技术、碳捕集、利用与封存（CCUS）技术、大容量长时间储能技术的深度耦合。然而，以上技术的技术成熟度及高昂成本仍存挑战，且跨行业之间能源流、物质流的循环网络尚未建立成熟的利益分配与标准机制。如何建立起能够支撑能源共生的能源与热力基础设施网络并降低碳移除技术的运行成本，将决定钢铁行业能否支持碳中和目标的实现。

4.2 政策建议

4.2.1 强化钢铁行业低碳供热政策体系

现阶段，中国钢铁行业低碳供热领域的政策目标多为定性描述，量化指标设定不足，导致实施路径与考核标准不够清晰，相关政策亟需加强系统性和可操作性。本报告建议在目标层面制定分区域、分阶段的低碳供热减排指标体系，明确节能率、余热回收率、电气化率、绿电使用比例等关键指标的年度或五年目标值，并延伸至原料替代率、工艺流程能效提升幅度、CCUS 耦合率等细分领域，对高温热泵、ORC、TRT、CDQ 等重点技术设定普及率或节能量要求，同时建立动态评估与滚动修订机制，每三年开展第三方评估并根据技术与成本变化及时调整目标，以保持先进性与可实现性。在配套措施方面，应健全钢铁低碳供热技术导则与能效标杆值标准，推动余热回收、绿电直供、数字化热力网络优化等关键技术规范化。加大财税与金融支持力度，对达标或超额完成任务的企业实施阶梯式税收减免、绿色信贷贴息和设备投资补贴，设立专项转型基金投向技术研发、示范工程与跨行业能源循环项目。

4.2.2 推动绿氢资源丰富地区开展氢基熔融技术规模化应用

以内蒙古为代表的可再生资源富集地区，可依托其得天独厚的风光资源优势，布局建设一批具有示范引领效应的低碳项目，并制定“风光制氢-氢基钢铁”专项扶持政策，推动绿氢与 CISP 氢基熔融技术的深度耦合，打造从清洁能源生产到钢铁冶炼全过程的绿色产业链。

应在内蒙古等风光资源富集区统筹规划一批“风光制氢+氢基直接还原铁”一体化示范项目，并在项目用地、电网接入及绿氢生产等环节给予专项政策支持与补贴，保障项目顺利落地与规模化发展。在此基础上，本报告建议各级政府主动支持企业建设低成本、大规模的绿氢储运基础设施（如低压输氢管道、液氢储运

装置等），着力破解绿氢供给瓶颈，并可由政府牵头推进关键基础设施的投资与建设，形成稳定的绿氢供应能力。同时，各级政府、科研单位及行业协会应加强协同，围绕绿氢在钢铁行业应用的碳排放核算方法学及其与国际标准的对接开展联合攻关，建立健全统一、可核查的计量与认证体系；积极推动将氢基钢铁产品纳入国家和地方绿色采购目录，通过财政奖励、税收优惠与绿色市场需求双重驱动，加速氢基钢铁技术的商业化进程与推广应用。

4.2.3 加速焦炭资源丰富地区电炉钢占比跨越式提升

针对河北、山西、山东等焦炭资源富集地区，应以政策为引领，推动焦化与钢铁企业由“高碳依赖”向“低碳协同”转型，各级政府需加快构建系统完备的政策框架，统筹产业布局、能源结构与低碳路径。

山西、河北已分别在各自达峰方案中明确 2030 年电炉钢产量占全省粗钢总产量的目标为 10% 与 15%。为支撑“双碳”目标的高质量实现，建议两省适度提高该目标定位，力争实现跨越式提升。本报告建议应组织科研机构深入开展量化分析，科学测算在“双碳”引领下两省分阶段电炉钢占比的合理提升幅度，为政策制定提供数据支撑。同时，建议两省立足各自绿电资源禀赋、产业基础与技术发展规划，制定差异化的短流程产能替代长流程推进策略。河北省可重点强化钢铁产业集群对北部风光资源的就近消纳能力，建设绿电直供专线，提升电炉钢绿电消费占比。山西省则应优先在太原、运城等具备一定废钢保障与电力条件的区域布局示范电炉项目，积累建设与运营经验，为后续规模化推广奠定基础。

在山西铸造业已完成 95% 燃煤熔炉改电炉的基础上，本报告建议应进一步聚焦钢铁轧钢工序的感应加热炉替代燃气炉、建材水泥窑“电助熔”等关键技术攻关（iGDP, 2025）。本报告建议山西各级政府联合金融机构，对上述改造项目给予财政补贴或转型金融支持，降低企业技改成本与资金压力，加快低碳工艺的普及应用，形成可复制、可推广的区域示范效应。

4.2.4 推动沿海钢铁企业建设“风光储氢”多能互补及绿电直供

本报告建议以山东省为代表的沿海钢铁集中省份，充分发挥其区位与港口优势，统筹布局“风光储氢”多能互补系统，构建绿电直供体系，实现清洁能源与短流程炼钢的深度耦合。建议相关主管部门抓紧研究并出台支持“绿电 + 电炉”发展的专项政策，在清洁能源富集区域规划建设电炉短流程“零碳园区”，通过绿电就近直供、储能调峰与氢能备用，形成稳定、低成本的能源供给模式。此举可显著降低电炉炼钢用电成本——研究表明，电费在电炉钢加工成本中占比较高，绿电的稳定供给与价格优势是突破成本瓶颈的关键因素之一。

针对当前国内废钢资源供应总体偏紧、回收加工体系尚不健全的现状，建议在沿海地区优先布局大型废钢加工配送中心，并推动建立全国统一或区域协同的废钢分类回收标准，提升资源收集与流通效率。同步推广废钢智能判级技术，实现精准分类、品质可控与定向配送，增强废钢质量的稳定性与一致性，进而提升其利用效能，切实保障短流程炼钢对优质废钢的持续稳定供应，为电炉钢产能扩张提供坚实的原料支撑。

4.2.5 强化碳市场约束，引导钢铁产业结构优化

随着碳排放双控制度的逐步完善，全国碳市场也将从强度控制转向总量控制，并逐步提高配额有偿分配比例。这一政策导向为实施差异化激励创造了条件，核心在于通过碳市场机制精准引导产业结构优化。

建议全国碳市场在现有“工序法”配额分配框架下进行优化，即为短流程电炉炼钢设定更宽松的碳排放基准值，使其更容易获得富余配额；同时收紧长流程各工序的基准值，增加其碳排放成本。此举可实质性地降低短流程炼钢的合规成本，形成明确的市场激励信号。

此外，建议各级政府考虑配套实施综合性政策：一是强化产能置换与碳配额管理的联动，从源头严控高碳产能；二是推行绿色采购和低碳钢材产品认证，以市场需求拉动绿色技术应用；三是完善碳市场稳定机制，为企业提供更可预期的政策环境，系统化推动钢铁行业迈向低碳未来。

总结：

未来工业低碳供热的电气化转型，绝非单一技术的线性替代，而是一个从技术创新到流程替代再到跨行业能源使用协同的复杂进程。中国钢铁行业将被重新定位为未来以可再生能源为主体的新型能源系统的核心组成部分与关键灵活性调节器，可以通过先进的电气化技术、储热装置和智能控制系统，转变为能够主动响应电网信号、消纳波动性可再生能源、甚至提供辅助服务的柔性资源。



图片来源：Kilian Murphy on Unsplash

参考文献

[1] Beyond Zero Emissions. (2018). Zero carbon industry plan: Electrifying industry. Beyond Zero Emissions.

[2] FormanMuritala, I. K., Pardemann, R., & Meyer, B.C.,. (2016). Estimating the global waste heat potential. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 页 1568–1579.

[3] HAMMAM AY, EL-GEASSY A, et al.CAO. (2021). Non-Isothermal Reduction Kinetics of Iron Ore Fines with Carbon-Bearing Materials . Journal of Metals.

[4] HasanbeigiLu, H., Zhou, N.A.,. (2023.). Net-Zero Roadmap for Chinese Steel Industry. . Lawrence Berkeley National Laboratory, and Global Efficiency Intelligence. LBNL-2001506.

[5] HasanbeigiPrice, L., & Lin, C. (2012)A., (2012). Technologies and practices for energy efficiency in the iron and steel industry (Report No. LBNL-5733E). Lawrence Berkeley National Laboratory.

[6] HumbertBrooks, G.A., Duffy, A.R. et al.M.S.,. (2024 年 10 月). Economics of Electrowinning Iron from Ore for Green Steel Production. . J. Sustain. Metall. , 页 1679–1701.

[7] IEA. (2017). Energy Technology Perspectives 2017.

[8] IEA. (2020). Iron and Steel Technology Roadmap.

[9] IEA. (2021). Iron and Steel Technology Roadmap: Towards more sustainable steelmaking.

[10] IEA. (2022). 热泵的未来 .

[11] iGDP. (2025 年 5 月 13 日). ACTION 2035|“十五五”时期，山西省工业发展如何以“电”促转型？ . 检索来源：对话 2049: <https://mp.weixin.qq.com/s/cgeEDD2ci5tsQ6LYFg7IPg>

[12] LBNL. (2023). 中国工业热能电气化 .

[13] LecompteHuisseune, H., Broek, D. Van den, De Schamphelleire, S., & Lemort, V.S.,. (2015). Review of organic Rankine cycle (ORC) architectures for waste heat recovery. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 页 448–461.

[14] Li& Chen, G.J.,. (2021). Digitalization-driven optimization of steam and thermal networks in steel plants. Journal of Cleaner Production.

[15] MetalBoston. (2026 年 5 月 20 日). Boston Metal Raises \$75 Million to Scale Critical Metals Business. 检 索 来 源 : globenewswire: <https://www.globenewswire.com/news-release/2026/05/20/3298554/0/en/boston-metal-raises-75-million-to-scale-critical-metals-business.html>

[16] RMI. (2021). 碳中和目标下的中国钢铁零碳之路 ,.

[17] RMI. (2023). 中国新一代清洁低碳技术展望 .

[18] steelWorld. (2021). 资料概览 钢铁行业的能源利用 .

[19] WangLi, H., & Zhang, QX.,. (2014). Potential assessment of waste heat recovery in China's iron and steel industry. Energy Policy, 页 389–398.

[20] Worldsteel. (2024 年 1 月 25 日). 2023 年 12 月及全年全球粗钢产量 . 检索来源： <https://worldsteel.org/zh-hans/media/press-releases/2024/december-2023-crude-steel-production-and-2023-global-totals/#:~:text=%E6%8E%92%E5%90%8D%E4%BE%9D%E6%8D%AE%E4%B8%BA%E6%9C%AC%E5%B9%B4%E5%BA%A6%E7%B4%AF%E8%AE%A1%E7%B2%97%E9%92%A2%E4%BA%A7%E9%87%8F%E3>

[21] WuMeng, J., Liang, X. et al.X.,. (2025). Technological pathways for cost-effective steel decarbonization. Nature, 页 647, 93–101 .

[22] 安能翼科（北京）能源咨询发展中心（CCEEE）. (2022). 主要工业行业节能低碳技术研究与评估：钢铁和水泥 .

[23] 巴斯夫中国 . (2022 年 September 月 7 日). 巴斯夫、沙特基础工业公司与林德启动建设全球首座大型电加热蒸汽裂解炉示范装置 . 检索来源： https://www.basf.com/cn/zh/media/news-releases/global/2022/09/BASF_SABIC_Linde

[24] 北京大学能源研究院气候变化与能源转型项目 . (2022 年 11 月). 中国石化行业碳排放减排路径研究报告 . 检索来源： <https://file.51315.org.cn/site/10203/upload/fzzx/upload/20230428/6381829371013857169550444.pdf>

[25] 北京科技大学等 . (2021). 我国钢铁行业绿色低碳发展战略研究 .

[26] 陈昌海, 曹军锋, 侯成军 . (2014). 蒸汽喷射式热泵在化工厂的应用小结 . 化肥设计 , 页 55–57.

[27] 大唐内蒙公司锡盟新能源事业部 . (2025 年 3 月 6 日). 大唐多伦 15 万千瓦风光制氢一体化示范项目取得突破性进展 . 检索来源： <https://mp.weixin.qq.com/s/4e9aWv7s3S5mhssMRIsM2Q>

- [28] 代铭玉 . (2017 年 2 月). 钢铁制造全流程余热余能资源的回收利用现状 . 节能减排, 页 52-56.
- [29] 戴宝华 . (2021 年 10 月). “双碳”目标约束下炼化产业转型发展思考 . 石油炼制与化工, 页 25-30.
- [30] 戴厚良, 陈建峰, 袁晴棠, 刘佩成 . (2024). 我国化工石化产业绿色低碳转型发展研究 . 中国工程科学, 页 223-232.
- [31] 德勤, 中国石化石油化工科学研究院 . (2022 年 4 月). 迈向 2060 碳中和 石化行业低碳发展白皮书 . 检索来源: <https://proa22984e2-pic11.ysjianzhan.cn/upload/shsn.pdf>
- [32] 邓琳 . (2024). 原油直接裂解制化学品技术进展研究 . 石化技术 .
- [33] 电力圆桌项目课题组 . (2024). “双碳”目标下加快工业领域终端电气化 - 钢铁行业 .
- [34] 多伦多发展和改革委员会 . (2025 年 1 月 18 日). 多伦多唐 15 万千瓦风光制氢一体化示范项目正式并网投产 . 检索来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/SGLf8b7vD-fi67ouZuZFsq>
- [35] 多伦多新闻 . (2025 年 11 月 8 日). 绿色动能再提速! 大唐多伦 15 万千瓦风光制氢一体化科技示范项目满负荷调试 . 检索来源: https://mp.weixin.qq.com/s/eZ_PWZ7jcf0Gwy_w_X4M2Q
- [36] 钢铁工业协会 . (2022). 2021 年中国钢铁行业经济运行报告 .
- [37] 工信部节能与综合利用处 . (2021). 《国家工业节能技术应用指南与案例 (2021)》之八——余热余压利用技术 .
- [38] 工业和信息化部节能与综合利用司 . (2024). 国家工业节能降碳技术应用指南与案例 (2024 年版) .
- [39] 宫超 . (2009). 应用低温热潜力系数快速评价炼油低温热利用潜力 . 炼油技术与工程, 页 50-52.
- [40] 光明地方 . (2023 年 12 月 26 日). 国家电投日照山钢余热综合利用项目正式投运 . 检索来源: https://difang.gmw.cn/sd/2023-12/26/content_37053355.htm
- [41] 国家工业和信息化部 . (2024). 国家工业和信息化领域节能降碳技术装备推荐目录 (2024 年版) .
- [42] 国家能源局能源节约和科技装备司, 中国石油和化学工业联合会 . (2025 年 2 月). 炼油行业节能降碳先进技术汇编 . 检索来源: https://www.nea.gov.cn/20250305/9fb4f96d15374b0385b1701747f1bdef/202503059fb4f96d15374b0385b1701747f1bdef_0793d91d418ef649dfb3a839e15847ccb3.pdf
- [43] 国家统计局 . (2022). 中华人民共和国 2021 年国民经济和社会发展统计公报 .
- [44] 国家统计局 . (2023). 《中华人民共和国 2022 年国民经济和社会发展统计公报》 .
- [45] 国家统计局 . (2023,2024,2025). 中华人民共和国 2022-2024 年国民经济和社会发展统计公报 .
- [46] 国家统计局 . (2024). 中国统计年鉴 2024.
- [47] 国家统计局 . (2025). 中国统计年鉴 .
- [48] 黄彦平 . (2025). 二氧化碳如何变身“发电高手”? “超碳一号”总师揭秘 . 检索来源: 光明网 . Retrieved from https://kepu.gmw.cn/2025-04/28/content_37995406.htm
- [49] 交汇点新闻 . (2025 年 11 月 19 日). 未来产业新观察 | “碳捕手”崛起, 江苏玩转“点碳成金”新赛道 . 检索来源: <https://www.xhby.net/content/s691dac56e4b054d8a6b8c69d.html>
- [50] 经济日报 . (2022). 六部门发布《工业能效提升计划》—推进重点行业绿色低碳发展 . 检索来源: 人民网: https://www.gov.cn/zhengce/2022-07/04/content_5699082.htm
- [51] 科技新进展: 烧结矿双级冷却及余热回收技术与装备 . (2025 年 4 月 14 日). 检索来源: 中国金属学会: https://www.csm.org.cn/col/col6317/art/2025/art_d225616d62a541959b2e6ff64db6f9b6.html
- [52] 科 普 中 国 . (2021). 二 氧 化 碳 发 电 . 检 索 来 源 : 科 普 中 国 : . Retrieved from https://www.kepuchina.cn/article/articleinfo?business_type=100&classify=0&ar_id=253754
- [53] 科学技术部 . (2020 年 6 月 27 日). 科学技术部: 煤炭清洁高效利用和新型节能技术专项十项研究成果助力节能降碳 . 检索来源: 中华人民共和国国家发展和改革委员会: https://www.ndrc.gov.cn/xwdt/ztzl/qgjncx/bmjncx/202006/t20200626_1232118.html
- [54] 李承卓, 马丹竹, 牛皓等 . (2024). 炼化行业复杂性与碳排放之间的关系 . 石油学报 (石油加工), 页 239-247.
- [55] 李晋等 . (2022). 碳中和背景下中国钢铁行业低碳发展路径 . 中国环境管理 .
- [56] 李丽旻 . (2025 年 9 月 14 日). 工业供热如何焕“绿”? . 检索来源: 中国能源报: <http://paper.people.com.cn/zgnyb/pc/attachement/202508/04/0551bd1d-2a17-4ccb-894c-bb1a985acd82.pdf>
- [57] 李新创 . (2023). 中国钢铁行业碳中和路线图与技术改造策略 . 北京: 冶金工业规划研究院 .
- [58] 李雅婷, 张化天 . (2022 年 November 月 11 日). 探索碳管理 | 新形势下推动现代煤化工产业节能降碳减排 . 检索来源: <https://wri.org.cn/insights/decarbonizing-coal-chemical-industry>
- [59] 连云港发改 . (2024 年 5 月 16 日). 【典型案例】节能降碳典型项目 (一): 江苏斯尔邦石化有限公司 CO₂制绿色甲醇项目 . 检索来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/KaAJDql9yh6jeafw-cW11A>

-
- [60] 凌逸群、戴宝华（主编）. (2025). 炼化企业碳达峰碳中和路线图. 中国石化出版社.
- [61] 刘国瑞, 岳勇. (2012). 炼化企业低温余热回收利用探讨. 中国石油和化工标准与质量.
- [62] 刘延强、罗磊、张鹏、王皓、袁天祥、张丙龙. (2018). 钢京唐热态渣、钢绿色循环利用体系开发. 中国冶金.
- [63] 刘耀权. (2025). “双碳”目标下煤化工低碳转型发展方向研究. 上海节能, 页 586-590.
- [64] 刘钰雯, 孙文强. (无日期). 钢铁厂蒸汽系统平衡调控方法. 第十三届全国能源与热工学术年会.
- [65] 落基山研究所 (RMI). (2022 年 4 月). 碳中和目标下的 中国化工零碳之路. 检索来源: <https://rmi.org.cn/wp-content/uploads/2022/04/final-RMI-化工报告 China-Chemicals-Decarbonization-CN-Full-Web-0909.pdf>
- [66] 落基山研究所, 中国企业联合会企业绿色低碳发展推进工作委员会, 中国企业管理科学基金会. (2023). 企业碳中和: 战略选择、行动框架及最佳实践——以重工业为例.
- [67] 毛显强, 邢有凯, 高玉冰, 何峰等. (2020). 钢铁、水泥行业深度脱碳的协同控制效果评估与路径设计.
- [68] 孟华栋, 杨勇, 姚同路. (2022). 转炉及 KR 循环利用钢包热态铸余渣工艺试验. 中国冶金.
- [69] 内蒙古自治区科学技术厅. (2024 年 4 月 25 日). 创新求变, 竞逐新赛道 “揭榜挂帅”助力实现“双碳”目标. 检索来源: 内蒙古自治区科学技术厅: https://kjt.nmg.gov.cn/kjdt/mtjj/202404/t20240425_2499890.html
- [70] 内蒙古自治区科学技术厅. (2024 年 1 月 5 日). 赛思普: 科技赋能 低碳转型. 检索来源: 内蒙古自治区科学技术厅: https://kjt.nmg.gov.cn/kjdt/mtjj/202401/t20240105_2437428.html
- [71] 庞凌云, 翁慧, 常靖, 李永亮等. (2022 年 2 月). 中国石化化工行业二氧化碳排放达峰路径研究. 环境科学研究, 页 356-367.
- [72] 蒲田, 胡建清, 周红军等. (2023 年 8 月). 炼化工业碳减排路径与电化工 / 电供能技术发展综述. 石油科学通报, 页 445-460.
- [73] 齐景丽, 申传龙, 霍正元. (2025 年 5 月 14 日). 化工新材料引领我国石化产业 高质量转型升级 ——“十五五”石化产业总体发展思路. 检索来源: https://www.ciecc.com.cn/art/2025/5/14/art_2218_113889.html
- [74] 清华大学碳中和研究院. (2021). 2021 全球能源基础设施碳排放及锁定效应.
- [75] 上海石油天然气交易中心. (2021 年 10 月 3 日). 盛虹集团启动全球首套二氧化碳制新能源材料产业链项目. 检索来源: <https://finance.sina.com.cn/money/future/roll/2021-10-03/doc-iktzscyx7735950.shtml>
- [76] 沈潺潺, 赵东风, 李石. (2012). 炼油企业低温余热回收利用的研究进展. 现代化工, 22-26.
- [77] 沈潺潺, 赵东风, 李石等. (2012 年 11 月). 炼油企业低温余热回收利用的研究进展. 现代化工, 页 22-26.
- [78] 生态环境部环境规划院, 清华大学碳中和研究院. (2025). 中国碳中和目标下的工业低碳技术展望.
- [79] 石油和化学工业规划院. (2022). 石化化工行业低碳发展报告. 检索来源: <http://www.npcpi.com/UploadFile/files/2022/9/28/01 李志坚 - 石化化工行业低碳发展报告 .pdf>
- [80] 世界金属导报. (2021 年 10 月 13 日). 中冶长天多项硬核技术助力钢铁行业绿色低碳发展. 检索来源: 搜狐: https://www.sohu.com/a/494851198_313737
- [81] 世界金属导报. (2025). 首钢工程两项成果亮相中国钢铁年会以技术创新赋能钢铁绿色发展.
- [82] 宋世杰, 杨岚. (2022). “双碳”背景下煤化工产业绿色低碳发展路径探讨. 新西部, 页 23-27.
- [83] 孙健, 马世财, 霍成等. (2021 年 10 月). 碳中和目标下热泵技术应用现状及前景分析. 华电技术, 页 22-30.
- [84] 涂永善, 山红红, 纽银林 (主编). (2019). 炼油工艺基础知识. 中国石化出版社.
- [85] 王弘历, 龚燕, 郭彦等. (2017). 炼化过程低温余热利用技术的应用及进展. 石油规划设计, 页 14-17.
- [86] 王红秋. (2025 年 4 月 8 日). 生产转型 + 产品优化 乙烯工业再出发. 检索来源: <https://news.cnpc.com.cn/system/2025/04/08/030160237.shtml>
- [87] 王梦颖. (2023). “双碳”目标下低温余热利用技术研究进展. 当代石油石化, 页 44-49.
- [88] 王强, 徐向阳. (2021 年 11 月). “双碳”背景下现代煤化工发展路径研究. 现代化工.
- [89] 魏小林等. (2024). 氧气转炉煤气节能降碳原理及全干法技术. 龙门书局.
- [90] 魏志强, 曹建军, 孙丽丽等. (2024). 中国炼化产业实现碳达峰与碳中和路径及支撑技术. 石油学报 (石油加工), 1-11.
- [91] 吴春华. (2014). 钢铁企业余热余能资源利用现状分析. 冶金能源.
- [92] 吴叶凡. (2025). 全球首台商用超临界二氧化碳发电机组完成并网调试. 检索来源: 科技日报.: https://www.stdaily.com/web/gdxw/2025-11/10/content_429892.html
- [93] 锡林郭勒盟格林蓝环境科技有限公司. (2023 年 12 月). 中国大唐集团新能源股份有限公司多伦 15 万千瓦风光制氢一体化示范项目 (制氢) 环境影响报告书. 检索来源: <https://sthjj.xlgl.gov.cn/sthjj/hjgl/hpsp/xmslqk/2024031110113440298/2024031317163251339.pdf>
- [94] 锡盟融媒. (2025 年 6 月 9 日). 风光“混动” “氢”装前行 草原绿电“净化”出绿色化工. 检索来源: https://mp.weixin.qq.com/s/AIGli6_oYUXBQAaJnxQOrw
-

- [95] 谢尚青, 王丹宁. (2025). 山东绿氢耦合煤化工研究. 山东宏观经济, 页 93-100.
- [96] 许友好, 汪夔卿, 舒兴田. (2019). 原油最大化生产化工原料的技术思考及相关技术开发. 石油炼制与化工, 页 1-10.
- [97] 宣根海, 张英, 厉勇等. (2018). 炼油厂低温热系统利用潜力快速评价方法研究. 炼油技术与工程, 页 59-64.
- [98] 严刚. (2025 年). 中国碳中和目标下的工业低碳技术展望.
- [99] 央视网. (2024 年 6 月 5 日). 【冀冀录·高质量发展的河钢答卷】绿色河钢——厚植绿色低碳 推动高质量发展新飞跃. 检索来源: 央视网: <https://local.cctv.cn/2024/06/05/ARTI6xmlgvmY8sYiBFx2otsd240605.shtml>
- [100] 杨超, 龚剑洪, 谢朝钢等. (2025 年 5 月). 原油催化裂解技术工艺研发. 石油学报 (石油加工), 页 744-751.
- [101] 杨超, 龚剑洪, 姚日远等. (2024 年 12 月). 原油催化裂解 (CCPP) 技术的工业应用. 石油炼制与化工, 页 59-65.
- [102] 冶金工业规划研究院. (2024 年 5 月 12 日). MPI 专家观点 | 现阶段我国废钢资源产出情况分析. 检索来源: https://mp.weixin.qq.com/s?__biz=MzA4NDA4MDgyNw==&mid=2651076852&idx=3&sn=5490edc608b6430ccfadf3a8aad7e52e&chksm=850b26d4ab405b9723a2977108561e0da79fbd9f134a7faee6e47a5d8d5e956f75c3ffa88ebd#rd
- [103] 冶金自动化研究设计院有限公司. (2024 年 2 月 22 日). 科技新进展: 信息物理系统融合的钢铁制造流程智能化研发及应用. 检索来源: 中国金属学会: https://www.csm.org.cn/col/col6317/art/2024/art_dc075bf080684e41b9fd9c82313d992e.html
- [104] 殷瑞钰. (2004). 冶金流程工程学 (第二版). 冶金工业出版社.
- [105] 张丙龙罗磊, 张鹏, 王皓, 袁天祥, 刘延强. (2018 年 6 月). 首钢京唐热态渣、钢绿色循环利用体系开发. 中国冶金.
- [106] 张飞. (2024). 耦合新能源为现代煤化工增绿. 中国石化, 页 33-35.
- [107] 张涛, 周园园贾楠楠. (2023). 钢铁行业余热资源分布与特点. 冶金动力.
- [108] 张向农, 孙鹏程, 杨志刚, 等. (2025 年 6 月). 石化企业热电系统节能技术应用. 石油石化绿色低碳, 页 60-65.
- [109] 张欣欣, 姜泽毅, 张欣茹. (2022 年). 钢铁制造流程 能源高效转化与利用.
- [110] 招商银行研究院. (2024 年 11 月 15 日). “双碳”研究之化工降碳篇——迈向零碳的挑战与途径. 检索来源: <https://mp.weixin.qq.com/s/TEtPBaQXWZ1gEUncRtl5Dg>
- [111] 赵彤阳, 龚华俊, 朱彬彬. (2023 年 1 月). 我国石化化工原料低碳化发展路径. 化学工业, 页 1-11.
- [112] 赵欣梅, 刘国瑞, 霍雪艳. (2011 年 8 月). 炼化企业低温余热利用技术探讨. 油气田环境保护, 页 1-3.
- [113] 中国钢铁工业协会. (2022). 钢铁行业节能降碳改造升级实施指南.
- [114] 中国钢铁工业协会. (2022). 中国钢铁工业“双碳”愿景及技术路线图.
- [115] 中国钢铁工业协会. (2024 年). 钢铁行业节能减排方向及措施.
- [116] 中国钢铁新闻网. (2023 年 4 月 11 日). 首钢京唐钢轧作业部 KR 脱硫渣热态回吃项目热试成功. 检索来源: 中国钢铁新闻网: http://www.csteelnews.com/qypd/jnhb/202304/t20230411_73623.html
- [117] 中国钢铁新闻网. (2025 年 3 月 28 日). 排氧不排碳, 美式“绿铁”出炉. 检索来源: 新浪财经: <https://finance.sina.com.cn/money/future/wemedia/2025-03-28/doc-inerehfx1476816.shtml>
- [118] 中国金属学会. (2025 年 4 月 14 日). 科技新进展: 烧结矿双级冷却及余热回收技术与装备. 检索来源: 中国金属学会: https://www.csm.org.cn/col/col6317/art/2025/art_d225616d62a541959b2e6ff64db6f9b6.html
- [119] 中国金属学会. (无日期). 烧结矿双级冷却工艺及装备技术研发与应用.
- [120] 中国炼焦行业协会. (2024 年 11 月). 温室气体 产品碳足迹量化方法与要求 冶金焦炭.
- [121] 中国信息通信研究院. (2023 年 12 月). 新发展阶段工业绿色低碳发展路径研究报告. 检索来源: <https://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202312/P020240326612959632275.pdf>
- [122] 中华人民共和国发展和改革委员会. (2024 年 6 月 7 日). 检索来源: 专家解读之一 | 深入实施节能降碳专项行动 推动钢铁行业绿色低碳高质量发展.
- [123] 中冶长天. (2024 年 10 月 3 日). 中冶长天: 奏响铁前低碳: “三部曲”, 助推行业新质生产力发展. 检索来源: 搜狐: https://news.sohu.com/a/813590672_313737
- [124] 周红军, 周颖, 徐春明. (2022). 中国碳达峰碳中和目标下炼化一体化新路径与实践. 化工进展, 2226-2230.
- [125] 周瑾. (2024 年 5 月 10 日). 国网江苏电力: 聚资源促协同, 建设现代智慧配电网. 检索来源: 中国储能网: <https://www.esccn.com.cn/news/show-1666979.html>
- [126] 周园园, 贾楠楠. (2023). 钢铁行业余热资源分布与特点. 冶金动力.
- [127] 朱仁林, 余岳, 朱航宇, 李建立. (2022). KR 脱硫渣的综合利用现状及其氧化去硫研究进展. 钢铁研究学报, 页 189-199.
- [128] 朱仁林, 余岳, 朱航宇, 李建立. (2022). KR 脱硫渣的综合利用现状及其氧化去硫研究进展. 钢铁研究学报, 页 189-199.

关于绿色创新发展研究院

绿色创新发展研究院 (Institute for Global Decarbonization Progress, iGDP), 2014 年成立于北京, 是专注绿色低碳发展的公益性国际化智库。

iGDP 自成立以来, 根植我国绿色低碳实践, 紧跟全球应对气候变化进程, 服务决策者、实践者、投资者, 通过跨学科、系统性、实证性的研究, 推动能源和气候变化解决方案的科学化和精细化, 与多方合作推动绿色低碳议题的多元化和国际化的沟通, 提供有国际视野和前瞻性的解决方案及公共知识产品, 为全球可持续发展做出贡献。

联系方式:

电话: 86-10-8532 3096

邮箱: igdpoffice@igdp.cn

网站: www.igdp.cn

地址: 中国北京市朝阳区秀水街 1 号建外外交公寓 6-2-62

