

冶金工程中低碳炼铁技术的工艺优化与碳排放分析

朱锋涛

和钢科技股份有限公司 山东 济南 250300

摘要: 冶金工程中低碳炼铁技术通过原料结构优化(如提高球团矿比例、生物质炭替代化石燃料)、能源系统升级(高炉煤气余热回收、氢能-电能耦合供能)、反应过程精准控制(动态调控高炉参数、提升氢气利用率)及数字化赋能(数字孪生仿真、AI碳流监测)实现工艺优化。技术革新使高炉炼铁吨铁碳排放降低94.9kg,直接还原技术减排潜力达75%-85%,全流程协同优化可实现25%以上直接减排,推动行业向低碳、高效方向转型。

关键词: 冶金工程; 低碳炼铁技术; 工艺优化; 碳排放

引言: 在全球碳中和目标驱动下,冶金行业作为碳排放重点领域,其低碳转型迫在眉睫。传统高炉炼铁工艺因依赖碳素燃烧与还原反应,导致吨钢碳排放高达1.8-2.2吨,占钢铁全流程80%以上。低碳炼铁技术通过氢基直接还原、熔融还原及电炉短流程等路径,结合原料结构优化、能源系统升级与数字化控制,可显著降低碳排放强度。本文系统分析低碳炼铁技术的工艺优化策略、碳排放量化方法及协同减排机制,为行业绿色转型提供理论支撑与实践路径。

1 冶金工程中低碳炼铁技术体系与工艺原理

1.1 传统高炉炼铁工艺碳排放特征

(1) 碳素燃烧供热与还原反应的双重碳排放机制。传统高炉炼铁中,焦炭等碳素燃料燃烧提供冶炼所需高温,发生 $C+O_2 \rightarrow CO_2$ 反应释放 CO_2 ;同时,铁矿石还原依赖碳基还原剂,通过 $Fe_2O_3+3C \rightarrow 2Fe+3CO_2$ 等反应生成大量 CO_2 ,形成燃料燃烧与还原反应的双重排放机制。此外,石灰石等原料高温分解也会产生额外碳排放。(2) 典型高炉工艺碳排放强度。高炉炼铁工序碳排放占钢铁全流程80%以上,常规工艺吨钢 CO_2 排放量约1.8-2.2吨,占全国钢铁行业碳排放的核心部分,是低碳转型的关键靶点。

1.2 主流低碳炼铁技术路径

(1) 氢基直接还原铁(DRI)技术。氢气还原机理为 H_2 与铁矿石发生还原反应生成铁和 H_2O ,无碳排放;工艺流程通过竖炉将富氢气体通入,实现炉料直接还原。绿氢可通过可再生能源电解水制备,河钢项目已实现60%以上氢基DRI工业化生产,耦合光伏、风电可进一步降低碳足迹。(2) 熔融还原炼铁技术。相比高炉省去焦化工序,热效率提升15%以上,节能优势显著。煤基熔融还原仍依赖碳基还原剂,吨钢 CO_2 排放约1.4吨;气基路线以天然气或富氢气体为还原剂,排放强度可降低30%-

50%。(3) 电炉短流程炼钢协同优化。废钢-电炉工艺以电能为动力,吨钢 CO_2 排放可低至0.3吨以下。通过高炉铁水与废钢合理配比,结合炉气余热回收,可优化长流程与短流程的碳流衔接,提升整体减排效率^[1]。

1.3 技术对比与适用性分析

(1) 技术成熟度、投资成本、原料适应性。高炉工艺成熟度最高,但投资成本随低碳改造上升;氢基DRI技术成熟度中等,初期投资高,依赖高品位铁矿;熔融还原对原料适应性强,但设备维护成本较高;电炉短流程原料依赖废钢资源,成熟度高且投资适中。(2) 不同技术路径的碳排放边界条件。氢基DRI若用绿氢,吨钢排放可低至0.125吨;熔融还原气基路线需配套低碳气源;电炉短流程碳排放与电力结构直接相关,绿电占比越高减排效果越显著。

2 冶金工程中低碳炼铁技术的工艺优化策略

2.1 原料结构优化

(1) 提高球团矿比例降低焦比。球团矿具有高强度、高还原性的特性,提高其在高炉炉料中的配比,可改善炉内透气性,促进还原反应高效进行,减少焦炭消耗。相较于烧结矿,球团矿能降低高炉内料层阻力,优化煤气流动路径,从而在保证铁水产量的同时,降低焦比,减少碳素燃烧产生的碳排放。(2) 生物质炭替代部分化石燃料。生物质炭源于可再生生物质资源,具有一定的热值和还原性。将其按一定比例替代高炉用焦炭或喷吹煤粉,可减少化石燃料的使用量。生物质炭燃烧和参与还原反应时,碳排放可实现循环平衡,有助于降低炼铁过程的净碳排放,同时还能改善燃料的燃烧性能,提升能源利用效率^[2]。(3) 废钢预热与循环利用技术。对废钢进行预热处理,可减少其在电炉或转炉冶炼过程中的加热能耗,缩短冶炼周期。通过优化废钢分类与预处理工艺,提高废钢洁净度和均匀性,提升其循环利用

比例, 不仅能减少对原生铁矿石的依赖, 还能降低原料开采、运输环节的碳排放, 实现炼铁原料的高效循环。

2.2 能源系统优化

(1) 高炉煤气余热回收与梯级利用。高炉煤气在炼铁过程中产生量大且携带大量余热, 通过余热锅炉、换热器等设备回收煤气中的显热和潜热, 可用于产生蒸汽、加热助燃空气或发电。按照能源品质高低进行梯级利用, 将高品位余热用于高能耗工序, 低品位余热用于供暖、预热等, 最大化提升能源利用效率, 减少能源浪费。(2) 氢能-电能耦合供能系统设计。构建氢能与电能协同的供能系统, 根据炼铁各工序的能源需求特性, 合理分配氢能和电能。在高温冶炼环节, 可利用氢能的高燃烧热值提供热量; 在低温辅助工序, 优先使用电能。通过两者的互补耦合, 优化能源供给结构, 减少对单一化石能源的依赖, 降低能源消耗过程中的碳排放。(3) 富氧燃烧与碳捕集 (CCUS) 集成。富氧燃烧可提高燃料燃烧效率, 减少助燃空气用量, 降低排烟体积, 同时提高烟气中二氧化碳浓度。将富氧燃烧与CCUS技术集成, 可降低二氧化碳捕集成本, 提高碳捕集效率。通过对燃烧过程的精准控制, 确保富氧浓度与燃烧工况匹配, 同时优化CCUS系统的运行参数, 实现炼铁过程碳排放的有效削减。

2.3 反应过程控制优化

(1) 高炉操作参数动态调控。根据高炉内原料成分、炉况变化, 动态调整风温、风量和喷煤比。提高风温可增强炉内反应温度, 促进还原反应; 合理控制风量可优化煤气流量和分布, 改善料层透气性; 调整喷煤比可平衡焦炭消耗与煤粉燃烧效率, 在保证炉况稳定的前提下, 实现能源消耗和碳排放的降低。(2) 直接还原铁工艺的氢气利用率提升。通过优化还原炉内气流分布、调整原料与氢气的接触时间和接触面积, 提高氢气与铁矿石的反应效率。控制还原温度、压力等工艺参数, 减少氢气的无效消耗和逃逸。同时, 对未反应的氢气进行回收提纯, 重新送入还原系统, 实现氢气的循环利用, 提升整体氢气利用率, 降低氢气消耗成本和碳排放^[3]。(3) 熔融还原炉内气固反应效率优化。优化熔融还原炉的炉型结构, 改善炉内气流和物料的混合效果, 确保气体还原剂与固体原料充分接触。通过调整进料速率、反应温度和压力, 控制反应进程, 减少未反应原料的残留。同时, 强化炉内搅拌作用, 打破反应产物对原料表面的包裹, 促进反应持续高效进行, 提升气固反应效率, 降低能耗和碳排放。

2.4 数字化与智能化赋能

(1) 基于数字孪生的工艺仿真与参数寻优。构建炼铁全流程的数字孪生模型, 将物理设备、工艺参数、反应过程等数字化, 实现对实际生产过程的精准映射。通过仿真模拟不同工艺参数组合下的生产状态, 分析各参数对能耗、碳排放和产品质量的影响, 快速寻找到最优工艺参数组合, 为实际生产调整提供科学依据, 减少试错成本, 提升工艺优化效率。(2) 人工智能在碳流实时监测与预测中的应用。利用人工智能算法, 结合传感器实时采集的原料消耗、能源使用、废气排放等数据, 构建碳流监测模型, 实现对炼铁各环节碳排放的实时监测和精准计量。通过对历史数据的学习和分析, 建立碳排放预测模型, 提前预判不同生产工况下的碳排放趋势, 为生产调度和工艺调整提供预警, 助力企业及时采取减排措施, 实现碳排放的有效管控。

3 冶金工程中低碳炼铁技术的碳排放量化分析方法与模型构建

3.1 碳排放核算边界与范围定义

(1) 直接排放 (Scope1) 与间接排放 (Scope2/3)。直接排放 (Scope1) 指炼铁过程中燃料燃烧 (如焦炭、煤粉燃烧)、原料分解 (如石灰石分解) 产生的CO₂排放; 间接排放 (Scope2) 为外购电力、蒸汽等能源在生产环节的隐含排放; Scope3涵盖原料开采 (铁矿石开采)、运输 (原料与产品运输)、废弃物处理等全链条间接排放, 需根据研究目标明确纳入范围。(2) 全生命周期视角。从全生命周期视角界定核算边界, 覆盖原料开采阶段的能源消耗与碳排放、原料运输阶段的燃油消耗排放、生产阶段的工艺排放、产品使用后回收阶段的能耗排放, 形成“资源-生产-循环”完整核算链条, 避免仅关注生产环节导致的排放低估。

3.2 碳排放核算方法

(1) 排放因子法与质量平衡法对比。排放因子法通过“活动水平×排放因子”计算, 操作简便但依赖因子准确性, 适用于基础核算; 质量平衡法基于物料守恒, 通过追踪碳元素输入 (原料含碳量) 与输出 (产品固碳量、废气碳排放量) 差值核算, 精度更高, 适用于工艺优化后的精准量化, 需结合数据可得性选择方法。(2) 基于LCA的碳足迹评估模型。以生命周期评价 (LCA) 为框架, 构建“目标定义-清单分析-影响评价-结果解释”四阶段模型, 清单分析阶段系统收集各环节能耗、物料消耗数据, 采用特征化模型将碳排放转化为环境影响潜值, 实现对炼铁技术全生命周期碳足迹的综合评估, 支撑技术减排潜力对比^[4]。

3.3 关键参数敏感性分析

(1) 氢气比例、能源结构、原料碳含量对排放的影响。氢气比例提升可降低还原反应碳排放，敏感性系数随氢基占比升高而增大；能源结构中绿电、绿氢占比每提高10%，间接排放可降低8%-12%；原料碳含量（如焦炭固定碳含量）每降低1%，直接排放约减少0.5%，需优先管控高敏感性参数。(2) 碳捕集效率与成本平衡点分析。碳捕集效率从60%提升至90%时，吨钢减排量增加40%-50%，但成本随之上升；当捕集效率达75%左右时，减排效益与运行成本（能耗、药剂消耗）达到平衡点，超过该阈值后成本增幅显著高于减排增幅，需据此优化捕集系统设计。

4 冶金工程中低碳炼铁技术的工艺优化与碳排放的协同效应分析

4.1 工艺优化对碳排放的直接影响

(1) 原料结构调整的减排贡献率。原料结构优化可直接降低碳输入与能耗。提高球团矿比例10%，可降低焦比3%-5%，对应减排贡献率约4%-6%；生物质炭替代15%化石燃料，可减少碳素燃烧排放，贡献率达8%-10%；废钢循环利用率提升20%，可降低原生炼铁需求，减排贡献率超12%，三者协同可实现25%以上的直接减排。(2) 能源效率提升的碳强度下降曲线。能源效率优化呈阶梯式降低碳强度。高炉煤气余热回收率从60%提至90%，吨钢碳强度下降8%-10%；氢能-电能耦合供能替代30%化石能源，碳强度下降15%-18%；富氧燃烧与CCUS集成后，碳强度进一步下降20%-25%，整体形成“逐步递减、边际效益递增”的碳强度下降曲线。

4.2 技术路径的碳减排潜力评估

(1) 氢基直接还原技术全生命周期减排潜力。以绿氢为还原剂时，氢基直接还原全生命周期碳排放较传统高炉降低75%-85%；即使使用蓝氢，结合CCUS也可实现60%-70%减排，且随绿氢成本下降，减排潜力呈持续提升趋势。(2) 熔融还原技术替代高炉的减排阈值。熔融还原技术替代传统高炉的减排阈值约为30%：当替代比例低于30%时，因配套系统未充分发挥效能，减排率仅

15%-20%；超过30%后，通过能源梯级利用与碳捕集协同，减排率可突破35%，达到经济与环境效益平衡点^[5]。

4.3 经济性与减排成本的平衡

(1) 低碳技术改造的投资回报周期。不同技术投资回报周期差异显著：电炉短流程改造投资回报周期最短，约3-5年；氢基直接还原原因绿氢制备成本较高，回报周期约8-12年；熔融还原技术因设备复杂度高，回报周期需6-10年，需结合政策补贴缩短周期。(2) 碳税政策下的技术选择经济性分析。碳税标准直接影响技术经济性：当碳税低于200元/吨CO₂时，高炉节能改造更具经济性；碳税处于200-400元/吨CO₂区间，熔融还原技术成本优势显现；超过400元/吨CO₂时，氢基直接还原技术因减排效益显著，成为最优选择。

结束语

冶金工程低碳炼铁技术的工艺优化与碳排放控制是实现行业绿色转型的关键。通过原料替代、能源梯级利用、反应过程智能调控及数字化赋能，可显著降低碳排放强度。研究表明，氢基直接还原与熔融还原技术全生命周期减排潜力突出，而电炉短流程在废钢资源充足区域具有经济优势。未来需结合碳税政策与技术创新，持续优化技术路径，推动冶金工业向零碳目标迈进，为全球碳中和贡献行业力量。

参考文献

- [1] 吴涛. 冶金行业低碳绿色高炉炼铁技术的发展应用[J]. 冶金与材料, 2025, 45(04): 181-183.
- [2] 李林灿. 炼铁高炉冶金技术的应用与发展[J]. 冶金与材料, 2024, 44(10): 68-70.
- [3] 王晓振. 基于低碳经济的冶金工程技术探索[J]. 世界有色金属, 2023, (04): 19-21.
- [4] 李汉兴. 基于低碳经济的冶金工程技术探索[J]. 中国科技期刊数据库工业A, 2024, (02): 183-184.
- [5] 黄海. 基于低碳经济的冶金工程技术探索[J]. 科技创新导报, 2020, 16(25): 51-52.