

Collaborative innovation application of green technologies in steel Metallurgy based on the low-carbon emission reduction situation

Jiao Yang

China Metallurgical Jingcheng Engineering Technology Co., Ltd., Beijing, 100176, China

Abstract

With the in-depth advancement of the “dual carbon” strategy, China’s steel and metallurgy industry, as an energy-consuming and carbon-emission-intensive sector, is facing the pressure of a profound transformation in this era. The goals of peaking carbon emissions and achieving carbon neutrality are compelling the reconstruction of the traditional metallurgical path. The construction of a new technological system centered on green, low-carbon and efficient development is an urgent matter. Under the constraints of low-carbon emission reduction, green metallurgical technology is becoming a key driver for optimizing the industry structure, transforming the energy system and reshaping the emission path. This article conducts a systematic study on the development trends and application status of green technologies in the steel metallurgy industry under the background of low carbon, comprehensively analyzes the carbon reduction tasks currently faced by China’s steel metallurgy industry and the systematic value of green technologies, and focuses on elaborating the specific application paths of six typical green metallurgy technologies, providing technical references for the industry to achieve green transformation and sustainable development.

Keywords

Low-carbon emission reduction; steel metallurgy; green technology; value; application; analysis

基于低碳减排形势下的钢铁冶金绿色技术协同创新应用

杨姣

中冶京诚工程技术有限公司, 中国·北京 100176

摘要

随着“双碳”战略的深入推进,中国钢铁冶金行业作为能源消耗与碳排放密集型产业,正面临深度转型的时代压力。碳达峰与碳中和目标倒逼传统冶金路径重构,以绿色、低碳、高效为核心的新技术体系构建迫在眉睫。在低碳减排约束下,绿色冶金技术正成为推动行业结构优化、能源体系转型与排放路径重塑的关键抓手。本文围绕低碳背景下的钢铁冶金绿色技术发展趋势与应用现状展开系统研究,全面分析当前我国钢铁冶金行业所面临的碳减排任务、绿色技术的系统价值,并重点阐述六项典型绿色冶金技术的具体应用路径,为行业实现绿色转型与可持续发展提供技术参考。

关键词

低碳减排; 钢铁冶金; 绿色技术; 价值; 应用; 分析

1 引言

作为工业的基础支柱,钢铁冶金业为我国基础设施建设、能源安全和重大工程建设提供重要原料物资,但这也无法否认其又是碳排放量最大的行业之一,长期以来钢铁工业一直采用以焦煤为主,这使其始终伴随着高耗能、高污染的问题。面对国家战略要求以及“双碳”目标下,我国钢铁行业必然要走一条低能耗、零排放的绿色低碳转型之路。

2 低碳减排概述

低碳减排就是降低碳密度,减少其排放量,狭义上仅指空气中的碳气排放;广义上则延伸到低碳经济、低碳生活等领域。其核心是提倡一种集约、清洁、健康的生产和生活方式,以实现人与自然、人类社会的全面和谐^[1]。传统的钢铁冶金行业的能耗和污染均比较高,在钢铁冶金行业快速发展的同时,过度消耗不可再生能源,并造成严重污染。虽然我国已经从国外引进以及自研了较多的先进技术和设备,但高污染问题尚未得到彻底解决,并带来一系列严峻的生态问题。

对我国来说,低碳减排是向世界庄严承诺的基础上的必然要求,也是加快转变产业发展方式,调整能源结构,实

【作者简介】杨姣(1986-),女,中国北京人,本科,工程师,从事钢铁冶金方向的研究。

现绿色转型升级的目标导向。同时借助于低碳减排倒逼钢铁冶金行业从原料选择、工艺路线、能源结构以及装备系统全过程的低碳化升级改造,最终实现由过去“高能耗、高排放”的过程变为“节能、低碳与环保”。

3 基于低碳减排要求下的钢铁冶金绿色技术价值

3.1 降低依赖碳基原料的原始需求强度

传统钢铁冶金高度依赖焦煤等碳基能源,绿色技术的发展在原料端引入可再生替代机制成为关键。利用氢基还原、非高炉炼铁及电炉短流程技术,逐步削弱对高碳原料的依赖程度,不仅降低过程碳排放,同时减少焦炭制备、运输、储存等环节的综合能耗。以氢冶金为例,通过氢气还原铁矿石,释放水蒸气代替二氧化碳,大幅减少碳排放。此类技术在实际工业中虽仍处于试点阶段,但其在低碳路径下的应用前景明确,具备从根源削减碳排的能力,为构建低碳冶金体系提供底层支撑。

3.2 提升废钢利用率与再生资源闭环利用水平

在低碳发展浪潮下,通过高纯度废钢预处理、精炼以及分类回收等技术手段提高废钢利用水平,从而进一步提升电弧炉短流程生产的原料替代能力和碳排控制能力,使得该生产工艺能够达到更高的原料替代和更低的碳排效果,同时相比于高炉长流程,该炉碳排放强度更低。另外,借助于再生钢铁资源的闭环循环来打破对于矿石的依赖,从而使原料链由“线性消耗”转变为“循环再生”,进而实现钢铁产业绿色转型过程中的资源闭环与能碳协同的新阶段。

3.3 构建多源协同减碳的耦合体系

绿色冶金技术并非孤立运行,而是在产业链各环节形成系统协同。如通过精细化工艺控制、碳捕集与回收、能源动态调配等措施,实现工序之间热能、气体与碳源的高效流动与再利用,形成“源头-过程-末端”全链条减碳系统。尤其在钢铁与化工、建材等行业间推进能碳资源交叉利用(如钢渣制水泥、焦炉煤气制氢),可实现产业间减碳协同,提升整体系统能效与碳效^[2]。此类系统集成特性是未来绿色冶金发展的关键方向,也是推动钢铁行业从孤立优化向产业协同迈进的重要体现。

4 基于低碳减排要求下的钢铁冶金绿色技术应用

4.1 富氧喷煤与高炉风口热管理集成系统

在国家“双碳”战略背景下,针对高炉炼铁环节碳排放强度高、能源利用效率偏低的问题,集成化应用富氧喷煤技术与高炉风口热管理系统成为推动冶金过程低碳转型的关键路径。富氧喷煤系统通过提升鼓风含氧浓度(一般控制在 28~32%)及喷煤速率(达到 220~250 kg/tHM),有效延伸炉内高温还原区,增强 CO 生成反应驱动力,降低单位焦比。为实现精准调控,需构建以原燃料比、风量波动与煤

种反应性为输入参数的动态富氧比调节模型,结合双参数模糊控制算法,对富氧浓度与喷煤速率进行实时修正,保障炉内热态稳定性与反应热强度协调。同时,区域热流耦合仿真联合高炉风口热管理集成系统,并利用 CFD 手段建立炉缸三维热场模型,找到高温热聚集位置、风口的最合理布置以及风口喷嘴的最佳角度,以避免风口区域炉衬受到局部过热而造成炉衬侵蚀及高温不均等的现象发生。应用高效的多通道水冷风口冷却模块和 PID 控制系统,实时检测风口各点温度的变化率,设定 $\pm 5^{\circ}\text{C}$ 温度波动控制限值,根据温差、流量大小调节冷却水温,以控制风口的热负荷均衡。

4.2 烧结烟气循环利用与多级脱硝集成工艺

在钢铁冶金绿色低碳转型背景下,针对烧结工序中烟气排放量大、氮氧化物治理难度高等问题,构建基于烟气再循环(SGR)与多级低温等离子体协同脱硝的集成工艺体系,已成为提升烧结过程碳减排水平的关键路径。具体技术路径中,首先通过高效旋流式烟气回收单元对高温尾气进行分离与导流,回收温度区间为 180~250 $^{\circ}\text{C}$ 的中高温烟气,借助动态控制装置将其精准引入烧结主风箱替代部分热风系统,从而优化台车温升曲线,降低单位烧结矿燃料比 10% 以上;为确保循环烟气稳定性,回流通道内设置分布式热电偶和流速传感器,实现对温度梯度与流场结构的时序调节^[3]。多级等离子体脱硝系统采用串联分区放电结构,前级施加 10~20 kHz 的高频等离子体激励场,优先裂解 NO 分子键,后级采用 5~10 kHz 中频场以增强对 NO₂ 的还原反应活性,双区场强调节范围控制在 12~25 kV/cm,有效提升 NO_x 裂解与还原协同效率;反应器内壁涂覆高介电常数陶瓷材料以增强电场均匀性,抑制放电偏移现象。

4.3 转炉煤气干法回收与动态调能匹配技术

转炉煤气干法回收和动态调能匹配技术是提高钢铁冶金能效、实现碳减排的有效措施。考虑到转炉吹炼过程高温煤气间歇释放的特征,在前期开展高温烟气干法预处理实验的基础上,通过高压高温急冷旋流装置、旋流式高温惰性气氛稳定器以及旋流喷射器在风区出口产生高速旋转流场配合换热单元,将煤气初始状态下的 1600 $^{\circ}\text{C}$ 在 50ms 内降低至 350 $^{\circ}\text{C}$ 以下,同时控制降温速度以避免焦油析出和粉尘再团聚。随后煤气经过设定温度的过渡段进入高精度多级干式除尘系统,先通过粗颗粒过滤器,在 260 $^{\circ}\text{C}$ 环境下将大于 5 μm 颗粒初步去除;再进入高温覆膜布袋过滤系统,在恒压工况下,亚微米级颗粒能够被高效捕集,煤气含尘量能够被降至 10mg/Nm³ 以下,满足发电级煤气质量要求。在煤气储运过程中,设置高密封性缓冲罐和稳压导气装置,利用变压控制阀、气体分配器实现煤气通道节拍式的定量调节^[4]。结合冶炼节奏模型搭建动态调能匹配模块,嵌套在转炉主控调度系统中,解析出冶炼节拍、出钢顺序、余热等特性,实时调节煤气输配策略,如根据出钢节拍实时调节进气分配比例、改变中压煤气管网开闭策略以及耦合高炉富氧燃烧并辅

助燃等,从而使煤气的剩余能量得到充分利用。

4.4 电弧炉超高功率节能熔炼与炉料智能配比技术

在我国钢铁行业“双碳”战略驱动下,电弧炉短流程工艺作为实现低碳冶金的重要路径,其节能降耗技术成为研究重点。基于此,开展电弧炉超高功率节能熔炼与炉料智能配比一体化优化技术研究具有现实意义。在熔炼工艺方面,采用电极负载密度大于 1.5 A/cm^2 、一次侧变压器容量提升至 1.2 倍的高功率设计,结合三级短网电气结构及高导热率铜质电极夹持机构,实现熔炼阶段的高效能量注入。熔池热能利用方面,配置新型高热反射氧化锆复合炉盖材料,同时在炉衬内衬结构中引入碳化硅涂层可控导电炉衬,增强热辐射聚集效应与壁面热反射效率,降低无效散热损失,提升单位电耗转化率。炉料智能配比控制环节,利用电磁感应谱图废钢成分在线检测装置对来自不同来源、不同粒度级别的废钢进行碳、硅、磷、杂质等含量作分类和归档,并且建立含杂废钢炉料多维数据库。同时结合提前计算好加入量的氧化性调蓄剂(如氧化铁粉)和中温还原剂(如碳化钙)采用基于熔池氧势动态模型的智能算法调控配料顺序与比例。随后再通过轻重料搭配方案来优化配料顺序和比例,如重废占比控制在 60% ~ 70%,碎钢块度大小控制在 50 ~ 100mm 之间,从而在保证熔炼初期高热负荷的前提下兼顾一定的传热效率,尽可能减少炉渣碱度波动、金属氧化损失。

4.5 炼钢精炼阶段多元合金预处理与渣系优化减排技术

在满足国家“双碳”战略背景下,炼钢精炼阶段引入多元合金预处理与渣系优化技术对于实现本质减排具有重要工程意义。通过在真空感应熔炼系统对 FeCr、FeNi、FeSi、FeMn 等多种高纯度合金进行预合金化处理,形成稳定的低杂质预熔合金块体,可显著降低传统分批次合金添加引发的二次氧化和合金烧损问题,配合合金块一次性精确投加工艺,在 VD 或 LF 精炼初期快速完成合金化过程,缩短保温时间,降低加热能耗^[5]。同时,采用基于 FactSage 热力学数据库和模拟平台建立的多元炉渣平衡相图模型,动态调整炉渣碱度($R = \text{CaO/SiO}_2$)与 Al_2O_3 、MgO 含量,优选 $\text{CaO-SiO}_2\text{-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 体系中熔点较低且具备高硫容量的区域,避免高温下渣中形成高粘度黏滞相,提升炉渣脱硫动力学性能。对 CaF_2 等高能耗助熔剂进行比例约束,辅以 B_2O_3 替代策略控制渣中熔点,确保熔渣流动性。精炼过程中通过渣泡反应模式优化顶渣动态更新机制,利用氧气枪辅助搅拌强化反应界面更新,提升吸杂速率并减少辅助加热频次。在操作层面引入基于渣温-渣粘-化学组分多参量反馈模型,联动调控造渣节奏与合金释放速率,确保高温区反应均质化

发展,实现高效脱硫、合金利用率提升与能耗同步削减。

4.6 无酸除磷技术突破及智能油气润滑冷轧应用再升级

在“双碳”目标驱动下,冷轧行业通过技术革新与模式创新,形成了覆盖全流程的低碳、环保、绿色技术体系。酸洗作为冷轧前的关键工艺,一直是环保关注的重点环节。中冶京诚紧跟技术发展方向,吸收国内外无酸除磷生产线的优点,高效集成先进的湿式抛砂除磷单元技术,研发推出湿式抛砂除磷工艺,并先后在江西新余、鞍钢成功投用,实现了板卷的批量化生产。通过钢砂与水的高速混合喷射替代传统盐酸酸洗,完全消除废酸、废水排放。该技术解决了 3mm 以下薄带钢穿带难题,机组作业率提升 20%,产品表面粗糙度均匀性达 $\text{Ra}0.8\text{-}1.2 \mu\text{m}$,可覆盖汽车大梁钢、集装箱板等高端领域,吨钢综合成本降低 15% 以上。

而中冶京诚的智能油气润滑技术通过精准润滑、智能监控与绿色制造的三重突破,成为冷轧行业降本增效的核心抓手。其技术价值不仅体现在头部企业的标杆项目中(如宝钢、首钢的辊耗降至 0.18kg/t),更通过数字化平台与模块化设计,为中小企业提供了可复制的升级路径。未来,随着氢基冷轧、直接轧制等颠覆性技术的应用,智能油气润滑系统将在低碳冶金全流程中发挥更关键的作用。

5 结语

综上所述,面对碳达峰、碳中和约束趋严,钢铁冶金行业应以绿色技术为核心,打造贯穿原料、能源、工艺和系统全流程的低碳生产技术体系。本文基于钢铁行业碳排特征及绿色冶金发展现状,立足于政策要求,在解析钢铁行业绿色冶金技术优势的基础上研究分析了流程优化、能源替代、资源循环利用和协同耦合等方面的价值所在,并探讨 6 条技术路线在具体实践应用方面的典型做法,旨在为钢铁行业绿色发展和“双碳”目标的达成献策献力。

参考文献

- [1] 梁志钢.基于低碳减排要求下的钢铁冶金绿色技术应用探讨[J].山西冶金,2023,46(2):50-51.
- [2] 李成峰.低碳减排的绿色钢铁冶金技术要点探讨[J].电脑校园,2023:10273-10274.
- [3] 云茂帆.低碳减排的绿色钢铁冶金技术研究[J].冶金管理,2023(5):15-17.
- [4] 刘宁宁,魏兵兵,范斌,等.低碳减排的绿色钢铁冶金技术要点探讨[J].冶金管理,2023(3):26-28.
- [5] 陈丽云.钢铁行业绿色低碳发展现状及技术路径[J].中国经贸导刊,2023(7):20-21.