

炼铁高炉高效低耗冶炼技术优化研究

高汉青 王晓东 屈自恒
安阳钢铁股份有限公司 河南 安阳 455000

摘要：高炉炼铁是钢铁冶金生产的核心工序，其能耗水平与冶炼效率直接决定冶金生产综合经济性。现阶段，冶金原料品质波动、炉内反应协同性不足、能量利用不均衡等问题，制约了高炉冶炼降耗提质发展。本文以高炉冶炼机理为基础，剖析高炉冶炼现存技术短板，从炉料结构、操作制度、炉内气流调控、余热回收等维度，系统性探究高效低耗优化技术。结合冶金反应规律，梳理各类优化技术的作用机理与适配逻辑，明确技术优化核心控制点，完善高炉精细化冶炼调控体系。研究旨在改善炉内还原反应环境，提升燃料利用效率，弱化原料波动带来的冶炼负面影响，为高炉实现低能耗、高效率、稳工况生产提供技术参考。

关键词：高炉炼铁；炉料优化；气流调控；能耗控制；冶炼工艺

引言：在冶金行业产能迭代进程中，高炉炼铁凭借工艺成熟、运行稳定的优势，仍是生铁制备的主流工艺。随着原料开采难度加大与能耗管控要求提升，传统粗放冶炼模式弊病凸显，燃料消耗高、炉内反应失衡、能量损耗偏大等问题制约生产效益。为协调冶炼效率与能耗成本，行业着重改良炉内调控手段与外围生产工艺，突破能耗发展瓶颈。结合现代冶金技术发展现状，围绕冶炼全流程开展优化分析，挖掘炉料、操作、设备及能源回收环节改良潜力，搭建适配现代生产的低耗冶炼技术体系，推动高炉冶炼向精细化、节能化方向发展。

1 炼铁高炉冶炼基础概述

高炉冶炼属于连续式高温物化反应过程，依靠炉内逆流换热原理，完成铁矿石还原、造渣、渗碳、熔化等一系列反应，最终产出液态生铁。完整冶炼流程涵盖炉料入炉、气体循环、热能传递、渣铁分离等核心环节，各环节相互耦合，共同决定高炉利用系数与燃料消耗水平。从冶炼结构来看，高炉内部可划分为炉喉、炉身、炉腰、炉腹、炉缸五大区域，不同区域温度梯度、物料形态、反应类型存在明显差异，间接影响还原反应速率与能量利用效率。炉料作为冶炼基础原料，其粒度、成分、冶金性能直接决定炉内透气性与反应活性，而鼓风参数、燃料配比、布料方式则调控炉内气流分布与温度场结构。当前多数高炉存在软熔带结构紊乱、煤气利用率偏低、炉缸热状态波动等共性问题，本质是物料、气流、热能三者协同匹配度不足。唯有厘清高炉冶炼基础机理，明确各工艺参数的内在关联，才能精准定位优化方向，为后续技术改良筑牢理论基础^[1]。

2 炼铁高炉冶炼现存技术问题分析

2.1 炉料结构配比合理性不足

炉料是高炉冶炼的物质基础，炉料结构直接影响炉内透气性、还原反应速率及炉渣理化性能。现阶段冶炼生产中，炉料配比缺乏精细化调控，酸性炉料与碱性炉料搭配失衡，极易造成炉渣黏度异常，弱化渣铁分离效果。部分生产流程中，烧结矿、球团矿入炉比例把控不当，低品质杂料掺杂比例过高，致使炉料综合冶金性能下降。同时，炉料粒度分级管控不完善，粗细物料混杂堆积，炉内空隙率降低，煤气上升阻力增大，气流分布出现偏析现象。除此之外，炉料预处理工艺精细化程度不足，物料表面杂质、结晶水去除不彻底，入炉后会额外消耗炉内热能，打乱温度场稳定平衡，间接提升焦炭、煤粉等燃料消耗量。

2.2 高炉操作制度调控精度偏低

操作制度是调控高炉冶炼工况的核心手段，包含送风、装料、热制度、造渣制度四大模块。目前部分高炉采用传统经验化调控模式，参数调整滞后于炉内工况变化，动态适配性较差。送风层面，风温、富氧率、鼓风湿度匹配不合理，回旋区形态紊乱，中心气流与边缘气流配比失衡，高温热能集中于局部区域，造成热量浪费。装料层面，布料角度、批重、料线参数固化，未结合原料性质波动实时调整，炉料堆积形态不合理，软熔带厚度增加且位置偏移。热制度层面，炉缸温度管控区间宽泛，高温稳定性不足，温度波动会抑制还原反应进行，降低生铁产出质量。造渣层面，熔剂添加量把控粗放，炉渣碱度波动幅度大，脱硫、排杂能力下降，加剧炉内衬侵蚀损耗^[2]。

2.3 炉内气流与传热体系紊乱

高炉冶炼过程中，煤气承担热量传递与还原剂输送的双重作用，气流运行状态直接决定能量利用效率。当

前多数高炉普遍存在煤气利用率偏低的问题,气流偏析、短路现象频发,边缘气流过度发展,中心气流贯通性不足,大量高温煤气未充分参与还原反应便排出炉体。同时,炉内传热体系匹配失衡,辐射换热、对流换热比例不合理,上部低温区域热能补给不足,下部高温区域热量过度富集,温度梯度分布杂乱。气流与传热紊乱不仅会拉长冶炼周期,降低高炉利用系数,还会造成燃料燃烧不充分,残碳含量升高,形成能耗浪费。长期气流异常还会诱发炉墙结厚、风口破损等设备故障,破坏冶炼工况稳定性。

2.4 余热回收与能耗管控体系不完善

高炉冶炼伴随大量余热资源产出,其中高炉煤气、高温炉渣、热风烟气均具备较高回收利用价值。现阶段余热回收技术应用存在局限性,回收设备适配性不足,高温烟气余热仅完成初级回收,低品位余热直接散失,整体热能回收利用率偏低。高炉煤气净化处理工艺简单,可燃组分未充分富集,重复利用过程中燃烧效率不足。与此同时,能耗管控缺乏系统性,冶炼全流程能耗监测点位覆盖不全,燃料损耗、热能散失的溯源分析难度较大。能耗管控多聚焦于末端治理,未实现冶炼过程动态调控,无法从根源上降低无效能耗,制约高炉低耗生产目标落地。

3 炼铁高炉高效低耗冶炼优化技术

3.1 优化炉料结构,提升物料冶金性能

炉料优化聚焦结构配比精细化与物料品质标准化两大改良方向,通过改善物料透气性与高温反应活性,从冶炼源头实现燃料消耗管控。在物料配比层面,需科学统筹烧结矿、球团矿及块矿的入炉掺配比例,严格限制低品位杂料的使用占比,以此提升入炉物料整体纯度。结合矿物本身理化特性,合理搭配碱性氧化物调控炉渣综合性能,改善高温环境下炉渣流动特性,强化脱硫能力,为渣铁高效分离创造良好条件。在预处理工艺层面,完善筛分、除尘、烘干一体化处理流程,剔除原料中的微细粉末与表面附着杂质,精准管控物料含水率,规避水分汽化过程中产生的无效热能损耗。同时规范物料粒度分级标准,采用粗细颗粒合理搭配的堆放模式,优化炉内物料堆积空隙率,削减煤气传输过程中的通行阻力。熔剂调配环节需遵循动态适配原则,依据原燃料成分波动规律,实时调整石灰石、白云石投放剂量,维持炉渣碱度处于合理区间,弱化原料成分波动对冶炼工况的干扰。经多重手段改良优化后,炉料综合冶金性能得到改善,反应活性明显提高,物料还原反应触发周期有所缩短,能够切实降低冶炼燃料单耗,持续稳定炉内

热力学反应环境,为高炉长期平稳、低耗运行筑牢物料基础^[3]。

3.2 改良操作制度,实现参数精准调控

以智能化调控逻辑为优化导向,对高炉四大核心操作制度进行系统性完善,依靠多参数协同制衡维持炉内工况稳态,进一步提升冶炼精细化管控水平。在送风制度优化层面,借助热风换热设备保障高风温持续供给,对富氧率及鼓风湿度进行合理化把控,适度拓宽风口回旋区空间,优化内部燃烧环境,切实增强煤粉燃烧反应效率。同时对风口结构参数进行适配调整,择优匹配风口直径与插入深度,均衡管控中心气流与边缘气流的发育态势,杜绝局部气流过度富集、气流偏析等异常现象,保证炉内气流分布均匀有序。装料制度改良采用灵活的差异化布料方式,结合原燃料理化性质与炉内温度场波动规律,动态调节布料角度、料线高度及物料批重,重塑炉料堆积结构,缩减软熔带纵向厚度,减小煤气流穿行产生的通行阻力。热制度改良将炉缸热状态稳定作为核心目标,划定科学合规的温度管控区间,削弱外部生产波动对炉内热环境的扰动,保障含铁矿物还原反应连续且平稳开展。造渣制度优化过程中,精准管控熔剂添加量与投放节奏,维持炉渣碱度处于合理区间,充分发挥炉渣排杂净化、隔热保温与防护炉衬的作用,减缓高温熔体对耐火内衬的侵蚀磨损,延长高炉设备服役年限。四大操作制度形成联动调控体系,相互协同、动态适配,能够有效规避传统人工经验化操作带来的各类弊端,提高冶炼工艺参数匹配精度,为高炉达成高效低耗的生产目标筑牢工况基础。

3.3 调控炉内气流,优化热能传递体系

炉内气流分布状态直接决定传热效率与冶炼稳定性,气流偏析、热量利用率低下是限制高炉降耗提质的常见难题。为改善这类工况缺陷,可搭建精细化气流调控体系,对炉内温度场与气流场进行统筹优化,营造合理的炉膛热力分布环境。在气流组织优化方面,依托布料工艺调整煤气流运动趋势,配合中心加焦的布料手段,增强中心气流通透能力,适度压制边缘气流的无序扩张趋势,促使高温煤气在料层之间均匀弥散。合理的气流布局能够延长煤气滞留时间,强化气固两相接触反应程度,保障含铁矿物还原反应充分开展。在热能管控层面,结合高温冶炼工况优化内部换热架构,合理调配对流换热与辐射换热的占比,弱化炉膛纵向温度差值,改善局部高温与局部低温并存的不良现象。炉墙长期冶炼生成的结厚附着物会挤占气流通道,需及时清理维护,减少气流短路、紊流等非正常流动形态,保证气流

运动平稳顺畅。实施多元化气流调控措施后,高炉煤气利用水平得到明显提升,碳热还原反应强度持续增强,有效削减冶炼过程中的无效热损耗。稳定的气流结构还能够优化炉内压力制度,弱化各类因素造成的炉况波动,降低异常工况诱发的额外燃料消耗。该优化方式能够持续改善高炉运行品质,提升冶炼利用系数,为高炉实现平稳、低耗、高效生产夯实内在工况基础^[4]。

3.4 升级炉体设备,强化工况稳定能力

硬件设备综合性能是保障高炉长期稳态、低耗运行的基础条件,通过对炉体结构进行改良并优化运维管理模式,能够有效削减设备热损耗,降低构件故障带来的生产波动。在炉体改造层面,优先升级内衬耐火材料,选用耐高温、抗侵蚀且低导热系数的复合型耐火材质,抑制炉壁热量向外散失,稳定炉膛内部高温热力学环境。冷却系统采用分区管控的优化思路,依据炉体不同区域的受热特征差异化调节冷却强度,缓解局部过热产生的结构损伤,延长耐火内衬的服役周期。针对风口、渣口等高频损耗构件,优化自身结构形式并改良制作材质,提升密封性能与耐高温冲刷能力,减少鼓风泄漏、熔渣渗漏等不良问题,维持炉内压力制度稳定。同时,结合智能化监测思维完善设备管控体系,在高炉关键点布设监测元件,持续采集温度、压力、气流及料位等运行参数,实现异常工况的提前识别与预判。依托实时监测数据开展精细化运维调整,及时排查构件潜在隐患,规避设备故障诱发的能耗抬升与炉况扰动。设备系统化升级能够显著增强高炉抗干扰能力,强化冶炼过程稳定性,保障冶炼工序长时间连续运行,依托硬件优化实现冶炼综合能耗的间接压降。

3.5 完善余热回收,构建循环利用体系

为最大化利用冶炼余热资源,搭建多维度余热回收体系,挖掘高炉煤气、高温炉渣、烟气余热利用潜力。高炉煤气回收环节,优化除尘、净化工艺,剔除煤气中粉尘杂质,富集一氧化碳可燃组分,提升煤气燃烧热

值,回收后的煤气可用于热风加热、物料烘干等工序,实现能源内部循环。高温烟气回收层面,加装高效换热装置,捕获烟气中低品位余热,将热能转化为热风、热水,适配冶炼辅助生产需求。炉渣余热利用采用缓冷换热模式,回收炉渣固化过程中释放的热量,同时优化炉渣后续加工工艺,实现固废资源化利用。除此之外,构建能耗溯源管控体系,统计冶炼各环节能耗数据,分析热能、燃料损耗成因,针对性优化能耗管控方案。余热循环体系的完善,能够降低外部能源输入量,压缩冶炼生产成本,达成高效低耗的生产目标^[5]。

结束语:本文立足于高炉冶炼生产现状,系统梳理炉料、操作、气流、设备、能源层面的技术短板,结合冶金反应机理制定针对性优化方案。通过炉料结构精细化配比、操作制度精准调控、气流传热体系优化、炉体设备升级、余热资源循环利用等技术手段,可有效改善高炉内部冶炼环境,提升燃料与热能利用效率,弱化原料波动带来的生产负面影响。各类优化技术相互协同、互为补充,能够在保障生铁品质与生产稳定性的前提下,降低冶炼综合能耗。未来,高炉冶炼技术将持续向精细化、节能化、智能化方向迭代,需进一步深挖多工艺协同优化逻辑,完善智能调控体系,持续压缩能耗成本,推动冶金行业绿色高效发展。

参考文献

- [1]孙鹏龙,黄一凡,谭康康.高炉低硅冶炼技术及其智能预测模型研究进展[J].冶金能源,2026,45(1):3-10+69.
- [2]张翔禹.高炉高比例球团矿冶炼关键工艺技术与应用研究[J].冶金与材料,2026,46(1):85-87.
- [3]王凯一.冶金焦质量对高炉炼铁过程的影响机理研究[J].冶金与材料,2026,46(3):169-171.
- [4]徐秀丽,姜雨,张世东.大中型高炉高效低耗冶炼用焦炭质量评价研究进展[J].煤质技术,2022,37(6):26-31.
- [5]石泉,唐珏,储满生.基于工业大数据的智能化高炉炼铁技术研究进展[J].钢铁研究学报,2022,34(12):1314-1324.