

烧结矿冶金性能对高炉顺行及能耗的影响机制

魏国新 董宝华 强 超 刘玉龙 赵海军
承德建龙特殊钢有限公司 河北 承德 067300

摘要: 本文以烧结矿低温还原粉化、还原、荷重熔滴核心冶金性能为研究对象,剖析其耦合高炉料柱结构、气流分布、热制度的作用机制,探明性能劣化诱发高炉崩料、悬料、气流偏析等顺行故障,以及推高燃料热耗、设备电耗的传导路径。结合烧结工艺调控手段划定最优性能参数,工业试验表明优化原料后高炉炉况稳定性大幅提升,吨铁综合能耗下降6.1%,兼顾生产稳控、降本与低碳冶炼需求,为高炉高效节能冶炼提供理论与工艺支撑。

关键词: 烧结矿冶金性能;高炉顺行;能耗影响机制

引言: 高炉炼铁是钢铁生产核心工序,炉况顺行与能耗管控是降本减碳关键,烧结矿作为高炉主导入炉原料,冶金性能直接决定炉内料柱工况与冶金反应效率。当下工业生产中烧结矿性能波动,极易引发高炉软熔带畸变、粉料富集、燃料消耗超标等生产痛点。为此本文系统探究烧结矿各项冶金性能对高炉顺行、工序能耗的深层影响机理,配套适配高炉工况的烧结优化工艺,破解原料性能与高炉冶炼适配性不足的行业生产难题。

1 烧结矿核心冶金性能及高炉冶炼基础理论

1.1 烧结矿常规冶金性能指标界定

(1) 低温还原粉化性能(RDI)指标内涵与分级标准:该指标表征烧结矿500℃低温还原后机械碎裂程度,核心反映高炉上部低温区矿石抗粉化能力,国内工业按RDI-3.15mm数值划分为优、良、合格三级,数值越低粉化抗性越强,可规避炉顶粉料堵塞气流通道问题。(2) 中高温还原性能(RI)反应机理与评价体系:依托铁氧化物逐级还原反应机理,中温阶段铁氧化物间接还原、高温阶段耦合固相反应,以还原度、还原速率构建两级评价体系,还原指数越高,矿石还原剂利用率越高,高炉焦炭消耗越低。(3) 荷重软化、熔滴性能核心参数与冶炼判定依据:核心参数为软化起始温度、滴落温度、软化温度区间,依据高炉中下部软熔带工况判定,温度区间越窄、滴落温度越高,软熔带厚度越小,料柱透气阻力越低。(4) 高温熔融特性、碱度与矿物组成配套性能:烧结矿二元碱度匹配钙铁橄榄石、铁酸钙主矿相,合理碱度可优化高温熔融温度,平衡液相生成量,规避液相过多粘连炉料、过少降低烧结矿强度两类缺陷^[1]。

1.2 高炉顺行核心判定指标与扰动因素

(1) 高炉顺行量化评价指标:以料柱透气性指数、日均悬料频次、崩料次数为核心量化指标,透气性稳定、无频繁悬料崩料为高炉顺行核心标准。(2) 高炉内

部料柱结构、气流分布运行机理:炉料分层堆叠形成块状带、软熔带、滴落带,煤气流沿料柱孔隙、软熔带焦窗定向分布,气流与炉料逆向换热完成冶金反应。(3) 入炉原料引发高炉运行失稳核心诱因:烧结矿粉化率超标、熔滴温度波动、碱度失衡,会压缩气流通道、打乱软熔带结构,直接诱发气流偏析、炉况波动。

1.3 高炉炼铁能耗构成与原料关联机理

(1) 高炉综合能耗分项:拆分固体燃料能耗、工艺热耗、设备电耗三大模块,燃料热耗为核心能耗占比超75%,电耗主要依托鼓风、除尘配套设备消耗。(2) 烧结矿冶金性能与高炉热制度、还原剂消耗耦合关系:烧结矿还原性能提升可降低焦炭还原剂用量,优良高温性能稳定高炉热制度,减少热补偿额外燃料投入。(3) 原料性能优化实现高炉节能降耗底层逻辑:优化烧结矿冶金参数稳定炉况、提升反应效率,弱化炉况扰动热损耗,削减冗余燃料与动力消耗,实现源头节能。

2 烧结矿冶金性能对高炉顺行的影响机制

2.1 低温还原粉化性能对高炉上部料柱顺行影响

(1) 烧结矿低温粉化机理与炉内粉料生成规律:高炉上部400~600℃低温还原区间内,烧结矿内部赤铁矿发生晶格相变,Fe₂O₃还原生成Fe₃O₄产生晶格体积膨胀,撑开矿相晶界与微裂纹,叠加炉内上升煤气冲刷、炉料自重挤压作用,骨料颗粒解离形成细粉料。生产工况下RDI指标越差,相变开裂程度越高,炉身上部块状带粉料生成速率越快,粉料粒径集中在1~3mm,沿料柱自上而下逐步富集。(2) 过量粉料堵塞空隙、恶化料柱透气性作用路径:高炉上部块状带依靠炉料颗粒孔隙完成煤气流均匀分布,烧结矿低温粉化产生的微细粉料会填充炉料颗粒间原生孔隙,缩减有效透气孔隙率,提升炉内煤气流通阻力。同时粉料极易发生偏析堆积,局部料柱压实度提升,气流流通截面收缩,整体料柱透气性指数大幅

下降,增加高炉鼓风运行负荷^[2]。(3) RDI指标不达标诱发高炉崩料、管道气流形成机制: RDI劣化后上部料柱骨架强度失效,粉料堆积层结构松散、承载力不足,炉料自重与煤气向上托力失衡,诱发间歇性崩料;局部孔隙堵塞迫使煤气流避开密实料层,沿薄弱料层高速穿行,形成固定管道气流,打乱上部气固换热节奏,进一步加剧炉料受力不均,恶化高炉上部顺行状态。

2.2 还原性能与荷重软化性能对高炉中下部顺行调控

(1) 还原速率失衡导致炉内化学反应滞后、炉温波动机理: 烧结矿RI还原性能不达标时,中温区间铁氧化物间接还原反应速率放缓,固相还原反应滞后,煤气CO利用率降低,冗余未反应煤气下移至炉身中下部。化学反应放热区间偏移、热量释放不均,打破高炉原有热制度稳态,引发炉温区域性波动,干扰炉料匀速下降节奏。(2) 软化温度区间过窄引发软熔带结构畸变原理: 烧结矿荷重软化温度区间是软熔带成型核心依据,软化起止温差过窄时,炉内烧结矿同步快速软化、黏结,纵向软化分层界限消失,规整层状软熔带转变为团块状杂乱结构,焦质透气窗分布杂乱、有效数量锐减,破坏中下部料柱分层结构。(3) 软熔带形态异常对高炉煤气流、炉料下降协同扰动机制: 畸变软熔带阻碍煤气流横向、纵向均匀分布,中心气流与边缘气流配比失衡;同时软化黏结矿相粘连周边焦炭与铁矿料,增大炉料向下滑动摩擦力,炉料下降速率不均,出现局部滞料问题,实现气流、炉料双向协同扰动。

2.3 熔滴性能与矿物结构对高炉整体顺行耦合作用

(1) 烧结矿熔滴温度、压差特性对滴落带运行影响: 熔滴温度偏低、熔融压差值过大时,烧结矿过早熔融滴落,液态渣铁提前渗入焦炭孔隙,堵塞滴落带焦炭通道,提升炉内全压差;适宜熔滴温度可固定滴落带纵向范围,保障渣铁匀速分离、向下滴落,维持滴落带工况稳定。(2) 铁酸钙、硅酸盐矿物相对烧结矿高温性能调控规律: 烧结矿主流黏结相为铁酸钙时,高温荷重强度、熔滴性能优异,高温工况下结构稳定性强;硅酸盐矿物占比过高会降低熔融温度,提升液相流动性,弱化烧结矿高温骨架强度,加剧炉内高温区矿相黏结概率,劣化原料高温冶金适配性^[3]。(3) 多性能协同缺陷诱发高炉悬料、结瘤故障机理: 当烧结矿低温粉化、还原、熔滴、矿相结构多重性能同步劣化时,上部粉料堵塞气道、中下部软熔带畸变、滴落带渣铁流受阻多重问题叠加,炉内料柱阻力突破临界值,炉料停滞诱发悬料;异常液相依附炉壁富集结晶,最终形成炉壁结瘤,彻底破坏高炉整体顺行体系。

3 烧结矿冶金性能对高炉能耗的影响机制及优化策略

3.1 还原性能对高炉燃料消耗与热耗的直接影响

(1) 还原度偏低提升焦炭、煤粉还原剂消耗量机制: 烧结矿还原度RI不达标,铁氧化物间接还原反应转化率下降,高炉内未还原氧化铁占比提升,想要完成既定生铁冶炼产能,需额外补充焦炭、喷吹煤粉作为还原剂,弥补CO还原介质供给缺口。同时未还原固相铁矿下移至高温区,依靠碳直接还原反应冶炼,该反应还原剂损耗量远高于间接还原,直接拉高固体燃料整体消耗。(2) 还原反应吸热失衡扰动高炉热制度、增加无效热耗: 铁氧化物间接还原为中温吸热反应,烧结矿还原性能劣化会导致吸热反应区间后移、反应速率失衡,打破高炉上部既定热量收支平衡。炉内区域热量分布紊乱,高炉为维持风口理论燃烧温度、保证渣铁物理熔融,需提升热风温度、增加燃料供热,产生大量无法参与冶金反应的无效散热,加剧工序热耗浪费。(3) 优质还原性能实现高炉燃料比压降量化规律: 结合钢铁企业高炉工业试验数据,烧结矿还原度每提升3%,煤气化学能利用率提升3.5%~4.2%,间接还原占比显著提升。规避高耗直接还原反应后,高炉吨铁焦炭消耗量降低1.9~2.5kg,喷吹煤粉消耗量降低1.2~1.6kg,综合燃料比下降3~4kg/t;同时炉顶煤气余热回收率提升,形成原料性能优化—还原剂减量—热耗降低—燃料比压降的线性耦合量化规律^[4]。

3.2 高温冶金性能对高炉工序综合能耗传导机制

(1) 料柱透气性恶化提升高炉鼓风能耗、风机电耗机理: 烧结矿低温粉化、高温软化、熔滴性能缺陷叠加后,炉内块状带、软熔带孔隙被微细粉料、黏结液相填充,料柱透气孔隙率降低15%~20%,高炉煤气流通阻力大幅上涨。为保障冶炼所需风量、风压,主引风机、热风鼓风机需提升运行功率,设备负荷持续增加,同时配套除尘、冷风输送、管道调压辅助设备电耗同步攀升,直接抬高高炉生产动力电耗成本。(2) 炉况波动、不顺行引发高炉能耗冗余损耗规律: 烧结矿高温性能不达标,极易诱发管道气流、崩料、局部滞料等工况问题,高炉原有稳态冶炼节奏被打破。生产人员需频繁调剂鼓风参数、喷煤速率、热风温度对冲炉况扰动,工况调剂阶段煤气热能、风压势能快速损耗,炉内热制度反复重构,产生大量非冶炼性冗余能耗。数据显示炉况波动频次提升1倍,高炉吨铁冗余能耗占比提升6%~8%。(3) 软熔带合理排布降低高炉综合工序能耗原理: 烧结矿荷重软化区间窄、熔滴温度适宜时,炉内形成薄而平整、横向分布均匀的软熔带,内部焦炭透气窗结构完整、排布规整。煤气流可实现气固逆向均匀换热,渣铁分离速

率提升,减少炉壁热辐射、炉顶煤气余热散失;同时炉料匀速下降,无需额外能耗补偿气流与物料扰动,从供热、鼓风、物料转运多维度降低高炉综合工序能耗。

3.3 烧结矿冶金性能协同优化工艺策略

(1) 原料配比、碱度调控优化烧结矿低温粉化性能方案:优化粗细铁矿粉级配比例,搭配高铝熔剂、白云石辅料,将烧结矿二元碱度精准控制2.0~2.2区间;提升复合铁酸钙粘结相占比,抑制游离赤铁矿生成,削弱低温还原阶段晶格膨胀应力,修复矿相内部微裂纹,从原料配方层面改善RDI低温抗粉化性能,降低炉内粉料生成量。(2) 烧结温度、矿相重构提升中高温还原与熔滴性能工艺:把控烧结机终点温度1290~1330℃,延长恒温烧结保温时长,减少脆性硅酸盐玻璃相生成;重构烧结矿微孔结构,提升开口孔隙占比,强化煤气还原接触面积,同时优化高温渣相黏度,提升荷重软化起始温度与熔滴温度,同步改良还原、软化、熔滴三项核心高温冶金性能。(3) 适配高炉炉型的烧结矿冶金性能参数最优区间划定:针对大中型工业高炉高料柱负荷、大风量冶炼工况,划定最优参数:低温粉化指标 $RDI-3.15mm \leq 30\%$,还原度 $RI \geq 83\%$,软化温度1130~1170℃,熔滴压差 $\leq 42kPa$,兼顾上部抗粉化、中部还原、下部高温耐受性能,实现原料参数与高炉冶炼工况精准匹配^[5]。

3.4 工业应用验证与效益分析

(1) 优化烧结矿入炉后高炉顺行指标实测对比:优化工艺制备烧结矿批量投用15天工业试验后,高炉日均崩料、悬料频次下降93%,料柱综合透气性指数提升17.2%,煤气流偏析、管道气流问题彻底消除,炉壁无新生结瘤,高炉料柱下降速率均匀,全流程炉况稳定性大幅提升。(2) 高炉燃料比、综合能耗降幅工业数据验

证:实测工业生产数据可得,优化烧结矿入炉后,高炉吨铁综合燃料比下降4.6kg,工艺热风热耗降低5.4%,鼓风系统设备电耗下降7.6%,吨铁综合工序能耗整体下降6.1%,原料性能优化降耗效果具备稳定性与可复制性。

(3) 生产降本、低碳排放综合效益分析:燃料与动力能耗削减后,单座450m³高炉月度焦炭、煤粉原料采购成本降低19.2万元,设备运维能耗成本同步下降;化石燃料燃烧消耗量缩减,吨铁CO₂碳排放降低5.2kg,契合钢铁行业低碳冶炼政策要求,实现生产经济效益、设备运维效益与生态环保效益三重提升。

结束语

综上,烧结矿全维度冶金性能自上而下调控高炉块状带、软熔带、滴落带运行状态,性能协同优化是保障高炉顺行、削减冗余能耗的核心抓手。依托碱度调控、矿相重构、烧结温度优化工艺,可同步改良烧结矿高低温冶金性能,实现炉况维稳、燃料降耗、减碳增效多重收益。后续可结合不同炉型冶炼参数,细化烧结矿定制化性能标准,进一步完善原料-高炉耦合调控体系,助力钢铁行业绿色高效生产。

参考文献

- [1] 邹志雄.烧结矿FeO含量对高炉透气性及冶炼能耗的影响机理[J].矿产综合利用,2024,7(3):161-166.
- [2] 吕庆,王龙浩.烧结矿软熔滴落特性与高炉炉料压差、燃料消耗关联性研究[J].钢铁,2023,58(8):32-38.
- [3] 谢洪恩.高炉炉料中烧结矿冶金性能匹配性对炉况顺行及能耗优化研究[J].钢铁钒钛,2023,44(1):119-128.
- [4] 张卫华,刘怀路.优化烧结矿冶金指标改善高炉顺行状态及降碳降耗实践[J].金属世界,2022,4(1):45-49.
- [5] 王杏娟.高碱度烧结矿冶金性能劣化对高炉能耗波动的影响机制[J].河北冶金,2025,12(1):118-123.