高炉炼铁生产质量控制与工艺改进

殷浩玮
安阳钢铁股份有限公司　河南　安阳　455000

摘　要：高炉炼铁生产质量受原燃料理化性能、设备运行状态、操作参数设定及炉内工况变化四类因素综合影响。全过程质量控制涵盖原燃料预处理、上料系统、炉内冶炼动态管控、出铁出渣及数据实时纠偏等关键环节。传统工艺在原料配比、鼓风冶炼、炉温调控及尾渣处理方面存在响应滞后和资源利用率低等短板。针对上述问题，提出精准化配比、高效鼓风、智能化炉温调控、炉渣资源化及低碳冶炼等系统性优化方案，以提升铁水质量稳定性与工序效能。

关键词：高炉炼铁；生产质量；全过程质量控制；传统工艺短板；工艺优化

引言：高炉炼铁作为钢铁制造的核心工序，其铁水质量直接决定后续冶炼加工的经济性与产品性能。生产过程中原燃料理化特性、设备运行可靠性、操作参数匹配度及炉内工况演变等多重因素相互耦合，使质量控制必须贯穿预处理、上料、冶炼、出铁及实时监测全流程。然而传统工艺在原料配比、鼓风调节、炉温管控及尾渣处理方面存在响应滞后与资源利用不足等明显短板。针对上述瓶颈，实施精准化配料、智能化调控及低碳化升级等系统性改进，已成为提升高炉冶炼综合效益的关键路径。

1 高炉炼铁生产质量影响因素分析

1.1 原燃料理化性能影响因素

原燃料的理化性能直接决定高炉冶炼过程的稳定性和铁水最终品质。矿石的品位、粒度组成、还原性与软熔特性，以及焦炭的冷热强度、灰分含量和反应活性，共同构成炉料柱透气性的基础条件。熔剂的有效成分和脉石酸碱度变化会显著改变造渣制度的走向，进而影响脱硫效率和炉渣流动性。原燃料成分的波动若超出控制范围，将导致炉内热平衡频繁调整，使煤气利用率产生无规律变化，最终反映在铁水硅硫含量的偏离上。必须对进厂原燃料实施严格的分级管理与均质化处理，从源头保障质量波动处于可控区间。

1.2 高炉设备运行状态影响因素

设备运行状态是维持高炉长期稳定生产的重要硬件保障。炉壳、冷却壁及风口装置的结构完整性与冷却强度，直接关联到炉内温度场的均匀分布和耐火材料的工作寿命。炉顶布料设备与料流调节阀的精度退化，会造成料面形状畸变，破坏中心与边缘气流的合理配比。热风炉的送风温度稳定性、鼓风机的风压风量调节响应速度，以及除尘系统的排灰能力，均制约着操作参数的执行效果。设备故障导致的非计划休风或慢风作业，会打破炉缸热储备状态，诱发炉墙粘结或管道行程等异常，显著降低生铁合格率。

1.3 冶炼操作参数影响因素

操作参数的设定与调控水平是高炉操作者主动干预生产质量的核心手段。风温、风压、喷煤量及富氧率构成主要的输入变量，其匹配关系决定了理论燃烧温度和炉腹煤气量，进而影响滴落带的热交换效率。料批重、料线与布料档位的组合控制着矿焦比径向分布，对煤气流的二次分布起决定性作用[1]。炉前出铁间隔、开口深度及铁口直径的作业参数，直接影响渣铁排出速率与出净程度，若参数失当会引发炉缸积铁或出铁不匀。各项操作参数之间呈强耦合关系，需要依据炉况演变趋势进行动态协同调整，才能将铁水温度与成分稳定在目标域内。

1.4 炉内工况变化影响因素

炉内工况是前述多种因素综合作用的实时体现，其动态变化对生产质量具有直接且敏感的冲击效应。炉料下降过程中发生的体积膨胀、软化收缩及熔融滴落行为，会导致料柱阻力突然增大，引起风压陡升或悬料塌料交替出现。热制度方面的炉温波动，会改变硅还原反应速率，造成铁水含硅量频繁超调。造渣制度的酸碱性偏移，则影响脱硫反应的动力学条件，使硫负荷在炉缸内发生非预期重新分配。煤气流分布发生中心过盛或边缘发展等偏析现象时，会大幅降低间接还原区域比例，恶化焦比指标。对工况变化必须建立多参数预警机制，以便及时采取疏导或抑制措施，维持炉内反应向有利方向持续演进。

2 高炉炼铁生产全过程质量控制策略

2.1 原燃料预处理质量管控

原燃料预处理是质量控制的第一道关口，其核心在

于通过筛分、混匀及整粒等工序，消除来料本身的粒度偏析和成分不均匀性。烧结矿与球团矿的强度及粒度组成需经过在线筛分检测，确保小于5毫米的粉末比例控制在合理范围，以减少入炉粉尘对透气性的负面影响。焦炭需进行整粒处理后入仓，防止运输过程中的再次碎裂造成料柱空隙率下降。针对不同矿种和熔剂，应建立分类堆放与预先中和的作业制度，使入炉混合料的碱度和化学成分始终处于窄窗口波动区间。预处理环节的规范化执行，能够显著降低后续冶炼过程中由原燃料突变引发的被动调整频次。

2.2 高炉上料系统质量控制

上料系统承担着将合格炉料按既定程序准确输送至炉顶的任务，其质量控制重点在于称量精准度与布料时序的可靠性。排料过程中的流量控制必须保持稳定，避免因瞬时流量过大导致料流轨迹偏移，进而影响炉喉料面的环带分布均匀性。料罐的装料顺序与放料阀门开度应严格遵循操作方针，确保每批料的矿石和焦炭重量偏差处于允许误差以内[2]。上料皮带的速度和料流检测装置需定期校准，以消除累积性计量误差。

2.3 炉内冶炼过程动态质量管控

炉内冶炼阶段的质量管控强调根据实时工况变化进行主动调节，而非被动应对。操作者需依据炉顶温度分布、静压曲线走向及十字测温数据，综合判断软熔带位置和形状，适时调整布料矩阵以维持合理的中心气流与边缘气流比例。喷煤速率应与风温风压联动控制，防止因煤粉置换比波动造成炉缸热状态剧烈变化。造渣制度的调节通过增减熔剂配比来实现，使炉渣碱度始终满足脱硫和流动性要求。对于炉温走向，应建立以铁水物理热为核心指标的预判机制，提前半小时以上对风量和喷煤量作出修正，使炉缸热储备保持充足且平稳。

2.4 出铁出渣工序质量把控

出铁出渣工序是冶炼周期的末端环节，其质量把控直接影响炉缸工作状态和铁水最终品质。铁口深度与开口角度的设定需兼顾出铁速度和渣铁分离效果，避免因铁口过浅引发跑大流或渣铁未充分分离即排出。开口机与泥炮的操作压力应保持恒定，确保每次堵口后形成的泥包完整牢固，减少铁口通道扩径对出铁均匀性的干扰。出铁过程中需定时取样检测铁水温度和硅硫含量，依据检测结果对下炉操作参数作出微调。渣沟与铁沟的撇渣器工作状态需密切监视，防止炉渣卷入铁水造成二次污染，确保流入铁水罐的金属液质量达标。

2.5 生产数据实时监测与质量纠偏

生产数据实时监测体系是质量纠偏决策的技术基础，其覆盖范围包括原燃料检验值、操作变量设定值及炉体各类传感器输出信号。采集到的海量数据需经过滤波与特征提取，剔除异常跳变后形成趋势曲线，供操作人员识别参数间的关联性变化。当监测指标偏离预设控制限时，应启动分级预警机制，依偏离程度分别采取操作提示、参数微调或紧急干预等措施。质量纠偏过程注重从数据关联性中找出主导影响因素，而非单纯针对单一变量反复调整[3]。通过建立历史数据与当前状态的对比分析，可以提炼出各类工况条件下的标准应对方案，使质量管控从经验依赖逐步转向数据驱动，提高整体生产的一致性与可预见性。

3 高炉炼铁传统生产工艺现存短板

3.1 原料配比工艺存在的问题

传统原料配比工艺多依据固定经验公式设定矿种混合比例，对入炉矿石自身品位波动及烧结转鼓强度变化的响应能力明显不足。当某种原料成分发生偏移时，配比调整往往滞后，造成混合料碱度和镁铝比偏离合理区间，进而影响初渣生成温度和液相流动性。配比过程中对矿石软化性能和滴落温度的差异考虑不够充分，容易导致软熔带过厚且位置不稳定，使料柱压差升高。不同批次原料之间的交互作用缺乏定量评估手段，配比修正完全依赖事后分析，无法实现前瞻性调控，制约了炉况长期平稳运行。

3.2 鼓风冶炼工艺存在的不足

传统鼓风工艺主要依靠人工经验设定风温风压和富氧率，缺乏对炉腹煤气量及实际燃烧温度的闭环调节能力。热风炉换炉操作带来的送风温度周期性下降，使炉缸热收入出现规律性波动，而传统工艺并未配备快速补偿风温衰减的自动控制手段。鼓风湿分随大气条件变化显著，但常规操作中很少据此修正富氧率和喷煤量，导致理论燃烧温度无规律起伏。鼓风分布与炉喉料面形状之间的匹配关系也缺乏精细标定，中心气流与边缘气流的比例调整存在盲目性，降低了煤气化学能和热能的利用效率。

3.3 炉温调控工艺的局限性

传统炉温调控主要依赖铁水取样化验结果进行事后修正，而取样间隔通常超过半小时，检测结果的滞后特性使调控动作总是晚于炉内实际温度变化，无法做到及时纠偏。调控手段集中于风量和喷煤量的粗略增减，缺乏基于热平衡模型的定量化调节依据，造成炉温波动幅度偏大且频繁出现超调现象。炉缸热储备的评估依靠炉皮温度和冷却水温差等间接指标，不能直接反映死料柱区域温度场分布[4]。对于外界扰动如原燃料水分变化或设

备微小故障，传统调控方式缺乏提前预判机制，炉温大幅震荡问题长期未能得到有效解决。

3.4 尾气与炉渣处理工艺短板

传统尾气处理工艺对高炉煤气中残余一氧化碳和氢气的回收利用率偏低，净化后的煤气热值不稳定，影响后续热风炉和烧结工序的用能效益。炉顶余压利用装置在低负荷工况下运行效率大幅下降，余能回收不充分。炉渣处理多采用水淬冷却后直接外排方式，未对熔渣中氧化锌、氧化钾等挥发份富集组分进行提取回收，造成有价资源浪费。高温液态渣的显热回收技术尚未普遍应用，大量热量在急冷过程中散失于环境。渣中硫化物在堆存期间有溶出风险，增加了后续环保处置难度和成本。

4 高炉炼铁生产工艺优化与改进方案

4.1 精准化原料配比工艺改进

针对原料配比滞后性问题，应构建基于在线检测数据的动态配比调整系统，实时获取矿石品位、烧结转鼓及熔剂有效成分信息。通过建立各类原料的软化性能和滴落温度数据库，预先评估不同组合下的成渣特性，从而确定最优混合方案。配比计算过程中引入多元约束条件，兼顾碱度、镁铝比及高温黏度等多项指标，避免单因素调整带来的负效应。系统可依据每批来料实际成分快速生成修正方案，使入炉混合料的质量波动范围大幅收窄，有效提升软熔带位置的稳定性。

4.2 高效节能鼓风工艺优化

鼓风工艺优化着重解决风温波动与湿度干扰问题，宜采用热风炉换炉自动补偿技术，在换炉期间通过富氧率微调或喷煤量快速响应来维持理论燃烧温度恒定。加装鼓风湿分在线监测装置，依据湿分变化实时修正富氧率和风量设定值，消除大气条件变化对炉缸热收入的干扰。结合炉喉料面检测数据优化风口布局和鼓风动能分配，使中心气流与边缘气流的比例更加合理。此项改进可显著提升煤气利用率，降低单位生铁鼓风能耗，实现节能与增效的双重目标。

4.3 智能化炉况调控工艺升级

炉况调控升级的核心在于引入炉温趋势预测模型，利用炉顶温度场、静压曲线及冷却水温差等实时信号，提前预判炉缸热状态变化方向，将调控动作前移半个冶炼周期以上。采用多变量协调控制策略，联动调节风量、喷煤量及加湿量，避免单一变量大幅度调整引发的超调问题。建立基于热平衡和物料平衡的在线评估模块，动态计算炉缸热储备指数，为操作者提供定量化的调节建议。

4.4 炉渣资源化处理工艺改进

炉渣处理改进着眼于有价组分回收和显热高效利用，可在渣沟内设置金属提取装置，对熔渣中富集的氧化锌、氧化钾等挥发份进行捕集和提纯，减少资源流失。采用干法粒化技术替代传统水淬工艺，利用高速旋转盘将液态渣粒化，同时回收高温颗粒的辐射热能用于预热助燃空气或产生蒸汽[5]。粒化后的炉渣粒度均匀，活性指数提高，适合作为水泥混合材或矿渣微粉原料。

4.5 低碳高效冶炼新工艺优化

低碳高效新工艺从能源结构和反应路径两方面着手，探索向炉内喷吹含氢气体或生物质燃料，替代部分焦炭和煤粉，降低二氧化碳排放强度。同时优化炉顶煤气循环利用方案，将净化的高炉煤气经脱碳处理后回喷至风口或炉身，提高还原性气体浓度，强化间接还原反应比例。在操作制度上，推行高风温高富氧配合低硅冶炼模式，降低理论燃料比。新工艺注重全系统能效匹配，协调上料、鼓风、造渣及煤气回收各环节，形成整体协同优化格局，推动炼铁生产向低碳方向稳步迈进。

结束语：高炉炼铁生产质量提升需综合考虑原燃料性能、设备状态、操作参数及炉内工况等多重因素，质量控制应贯穿预处理、上料、冶炼、出铁及监测全链条。传统工艺在配比响应、鼓风调节及炉温预判等方面存在滞后性，资源化处理亦显不足。通过精准化配料、智能化调控、节能鼓风及炉渣资源化利用等系统改进，可有效稳定铁水品质并降低消耗。低碳冶炼新工艺的推进将助力炼铁生产向高效绿色方向持续发展。

参考文献

[1]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.

[2]宋忠伟.高炉炼铁过程中焦炭质量对铁水质量的影响研究[J].全面腐蚀控制,2025,39(3):40-42.

[3]于同亮,汝钱洵.传统高炉炼铁模拟实验的改进[J].化学教学,2026,(7):80-82.

[4]柯尊文.高炉炼铁生产工艺中耐火材料的应用研究[J/OL].中文科技期刊数据库（文摘版）工程技术,2024,(8):078-081.

[5]郭伟伟,高艳甲,刘杰,等.新型炼铁技术对传统高炉工艺的改进与比较[J].中国金属通报,2024,(10):22-24.