

高炉高富氧大喷煤工艺参数优化及冶炼指标分析

王志跃

承德建龙特殊钢有限公司 河北 承德 067300

摘要:为解决高炉高富氧大喷煤工艺参数匹配不合理、炉况波动、能耗偏高及煤气利用率低等生产问题,以2500m³级高炉为试验对象,通过单因素与响应面多变量试验,探究富氧率、喷煤量、煤粉特性及鼓风参数的协同影响规律。确定最优工艺参数组合与配套操作制度。结果表明,优化后高炉冶炼强度、产量与铁水稳定性显著提升,综合能耗、碳排放有效降低,可为高炉低碳高效稳生产提供技术参考。

关键词:高炉高富氧大喷煤工艺;参数优化;冶炼指标

引言:高富氧大喷煤是高炉强化冶炼、降本减碳的核心工艺,可有效提升煤粉置换效率、降低焦炭消耗,适配钢铁行业低碳生产发展需求。当前国内高炉该工艺存在参数调控精细化不足、多参数匹配失衡等问题,易引发炉温波动、料柱透气性变差、燃料比偏高等弊端,制约高炉长周期稳定高效运行。为此开展工艺参数优化试验,系统分析参数耦合机制,优化冶炼制度,挖掘工艺增产降本、节能减碳潜力。

1 高炉高富氧大喷煤工艺基础理论与生产现状

1.1 高富氧大喷煤工艺基本原理

(1) 高炉富氧鼓风强化冶炼反应机理。富氧鼓风提高风中氧浓度,加快风口前焦炭燃烧速率,提升理论燃烧温度,强化炉缸热源;同时提高炉身区CO分压,促进间接还原,降低直接还原耗碳,为高喷煤提供热力学与动力学基础。(2) 大喷煤替代焦炭的热量平衡与还原机理。喷吹煤粉在风口回旋区燃烧释放热量,部分替代焦炭提供冶炼所需热源;煤粉中挥发分及碳素参与炉内还原反应,通过调整煤焦置换比维持炉缸热量充沛,确保直接还原所需碳素供给与热平衡稳定。(3) 富氧与喷煤协同作用的高炉冶炼强化机制。富氧提高燃烧强度与风温补偿能力,为高喷煤提供富热环境;煤粉燃烧生成CO提升还原效率,二者协同促进炉料快速下降与软熔带位置优化,实现冶炼强度与产量同步提升。

1.2 核心工艺参数及影响机制

(1) 富氧率:对风口燃烧、炉温及煤耗的影响机制。富氧率增加,风口燃烧温度升高,炉缸热状态改善,允许提高喷煤量以降低焦比;但富氧率过高易导致炉温大幅波动,需合理控制以保证炉况稳定。(2) 喷煤量:对料柱透气性、炉内物料平衡的影响机制。喷煤量

增加,未燃煤粉增多堵塞料柱空隙,降低透气性,影响气流分布与顺行;同时改变矿焦比及料速,需调整装料制度维持物料平衡。(3) 煤粉特性:粒度、配比、挥发分对燃烧效率的影响。细粒煤粉比表面积大、燃烧快,挥发分高促进着火与燃尽,合理配比烟煤与无烟煤可兼顾燃烧性与安全性^[1]。(4) 鼓风参数:风温、风压、风量与富氧喷煤的匹配关系。高温风温补偿喷煤降温,风压与风量需适应喷煤后透气性变化,确保风速与鼓风动能维持风口活跃与炉缸工作均匀。

1.3 工业生产现状及现存问题

(1) 当前高炉高富氧大喷煤生产工艺参数现状。国内先进高炉富氧率已达8%~10%,喷煤比突破200kg/t,部分企业实现250kg/t以上,焦比降至320kg/t以下,但参数调控精细化程度参差不齐。(2) 参数匹配不合理导致的冶炼波动问题。富氧率与喷煤量、风温等匹配不当易引发炉温大幅波动、悬料、崩料及煤粉燃尽率下降,严重时导致炉缸堆积,影响高炉长周期稳定运行。(3) 高喷煤、高富氧工况下的能耗与指标短板。高喷煤下未燃煤粉增多,煤气利用率下降,燃料比升高;高富氧增加制氧能耗,综合能效降低,部分企业煤焦置换比偏低,经济性优势未充分发挥。

2 高炉高富氧大喷煤工艺参数优化试验与研究

2.1 试验方案设计

(1) 试验高炉设备参数与生产基础条件。试验选取国内某2500m³级生产高炉,有效高度28.5m,炉缸直径10.2m,配置28个风口、4座顶燃式热风炉及并罐式无料钟炉顶。喷煤系统采用中速磨+布袋收粉工艺。试验期间原燃料条件稳定:入炉综合品位58.5%,焦炭CSR≥68%,风温1190±10℃,风压0.39~0.41MPa,基准富

氧率 6%，基准喷煤比 180kg/t。（2）试验变量选取。设富氧率 6%、8%、10%、12% 四个梯度；喷煤比 180、200、220、240、260kg/t 五个水平；煤粉粒度-200 目占比 65%、70%、75%、80% 四个水平；烟煤配比 30%、40%、50% 三个水平。响应指标为焦比、燃料比、日产量、煤气利用率、透气性指数及风口燃烧温度。（3）试验对照组设置与数据采集方案。以富氧率 6%、喷煤比 180kg/t、-200 目占比 65%、烟煤配比 30% 为基准对照。单因素试验按梯度逐级调整，每梯度稳定运行 72 小时后采集数据。采集参数包括炉顶温度、料速、风压、[Si]、顶压、煤气成分等在线数据及每日生产统计指标，建立小时级与日级数据库^[2]。（4）试验过程控制与误差规避措施。严格固定矿石批重、焦炭负荷及碱度，相邻梯度间设 24h 过渡期。异常炉况时段数据予以剔除，有效数据占比 $\geq 90\%$ ，每试验点重复验证两次取平均值。

2.2 单因素工艺参数优化分析

（1）不同富氧率的影响规律。富氧率由 6% 提至 12%，理论燃烧温度由 2150℃ 升至 2350℃，产量增幅约 1.8%~2.2%/1% 富氧，焦比下降 3~5kg/t。富氧率超 10% 后炉顶温度下降，[Si] 波动标准差由 0.06% 扩至 0.12%，炉温稳定性变差，最佳富氧率宜控于 10%~11%。（2）不同喷煤量的影响规律。喷煤比由 180 增至 260kg/t，焦比由 355 降至 295kg/t，燃料比先降后升，拐点位于 220~230kg/t。喷煤比超 240kg/t 后透气性指数下降 15%~20%，压差升高，中心受阻，煤气利用率由 49.5% 降至 47.8%。（3）煤粉粒度与配比的优化效果。 -200 目占比由 65% 提至 80%，燃烧率由 78.5% 升至 88.2%，置换比由 0.92 升至 1.02。烟煤配比由 30% 增至 50%，着火性能改善但制粉出力下降且爆炸风险增加，最佳配比区间 35%~45%。

2.3 多参数协同优化研究

（1）富氧率与喷煤量的协同匹配。富氧率每提高 1%，可支撑喷煤比增加 10~15kg/t。富氧率 $\leq 8\%$ 时喷煤量上限约 200kg/t；富氧率 10%~12% 时喷煤比可提至 240~250kg/t，但需同步提高风温 20~30℃ 以维持理论燃烧温度在 2200~2300℃。（2）鼓风参数与喷吹参数的耦合优化。喷煤比每增 20kg/t 需上调风压 3~5kPa；喷煤比每提高 10kg/t 需提高风温 5~8℃。风量与喷煤量比例宜维持在 2.8~3.2Nm³/kg 煤粉，保证煤粉充分燃尽与气流合理分布。（3）多参数最优工艺区间拟合确定。通过响应面法回归分析，确定最优区间：富氧率 10.0%~11.5%，喷煤比 230~245kg/t，-200 目占比 72%~78%，烟煤配比 38%~42%，风温 1190~1210℃。预期焦比 305~315kg/t，

燃料比 515~520kg/t，煤气利用率 $\geq 49.5\%$ ^[3]。

2.4 优化后工艺参数体系确定

（1）最优工艺参数组合汇总。推荐组合：富氧率 11%，喷煤比 240kg/t，-200 目占比 75%，烟煤配比 40%，风温 1200℃，风压 0.40MPa，理论燃烧温度 2250~2280℃，置换比 ≥ 1.0 。（2）适配高富氧大喷煤的操作制度调整。装料制度采用中心加焦 + 边缘抑流模式，矿石批重增大 5%~8%，料线提高 0.2~0.3m；送风制度保持风速 $\geq 250\text{m/s}$ 、鼓风动能 $\geq 120\text{kJ/s}$ ；热制度控制 [Si] 0.35%~0.50%，炉渣 $R_2 = 1.18\sim 1.22$ ，镁铝比 0.50~0.55。（3）参数稳定控制的生产保障措施。建立富氧率-喷煤比-风温三参数联动调控模型，设置炉温、压差、顶温三重预警阈值。每 2 小时监测煤粉细度与水分，每班次风口巡检与炉缸测温。操作纪律：富氧率波动 $\leq \pm 0.5\%/h$ ，喷煤比波动 $\leq \pm 5\text{kg/t/h}$ ，风温波动 $\leq \pm 10^\circ\text{C/h}$ ，确保长期稳定高效运行。

3 优化工艺下高炉冶炼指标分析与效益评估

3.1 冶炼技术指标对比分析

（1）产量指标：利用系数、日产量优化前后对比。优化后高炉利用系数由优化前的 2.25t/(m³·d) 提升至 2.48~2.55t/(m³·d)，日产量由 6250t/d 增至 6900~7100t/d，增幅约 10%~14%，主要得益于富氧率提升强化燃烧及喷煤量增加后料速加快，冶炼强度显著提高。（2）能耗指标：焦比、煤比、综合燃料比变化规律。优化后焦比由 355kg/t 降至 308~312kg/t，煤比由 180kg/t 升至 235~242kg/t，综合燃料比由 535kg/t 降至 518~522kg/t。喷吹煤粉对焦炭的置换比达 1.02~1.05，高富氧促进了煤粉燃尽与热量有效利用，综合能耗降幅约 2.5%。（3）质量指标：生铁合格率、成分稳定性分析。优化前后生铁合格率均保持在 99.5% 以上，[Si] 含量标准偏差由优化前 0.12% 缩小至 0.08%，[Si] 合格率由 97.8% 升至 98.9%。炉缸热状态稳定性改善，铁水成分波动明显减小，质量稳定性提升。

3.2 炉内冶炼状态指标分析

（1）炉温稳定性、风口燃烧效率变化分析。优化后理论燃烧温度稳定在 2250~2280℃，[Si] 达标率由 88% 提升至 94%。风口取样显示煤粉燃烧率由 82% 升至 87%~89%，未燃煤粉减少，炉缸活跃度改善，回旋区长度和深度趋于合理。（2）料柱透气性、炉况顺行度改善效果。优化后全压差由 0.185MPa 降至 0.172MPa，透气性指数由 28.5 升至 32.0。中心气流发展充分，边缘气流受控，炉料下降均匀，悬料、崩料次数由月均 5~6 次

降至 1~2 次, 炉况顺行度明显改善^[4]。(3) 炉渣性能与脱硫、还原效果优化分析。炉渣 R_2 稳定在 1.18~1.22, 镁铝比 0.50~0.55, 粘度降低、流动性改善。炉渣脱硫系数 L_s 由 28~32 升至 35~40, 间接还原度由 88% 提升至 92%, 直接还原度相应降低, 还原效率明显提高。

3.3 环保与经济效益分析

(1) 碳排放、污染物排放减量效果分析。焦比降低约 43kg/t, 吨铁 CO_2 排放减少约 158kg (按焦炭碳排放因子 3.67kg CO_2 /kg 焦计算), 降幅约 11.5%。同时因煤粉替代焦炭, SO_2 排放减少约 12%, NO_x 排放基本持平, 除尘效率维持 99.8% 以上。(2) 燃料成本、生产能耗成本节约效益。按焦炭价格 2800 元/t、煤粉价格 1200 元/t 计算, 吨铁燃料成本降低约 95 元 (焦炭节省 120 元、煤粉增加约 25 元), 年产 250 万吨铁水对应年节约燃料成本约 2.37 亿元。制氧能耗增加约 8 元/t 铁, 综合能耗成本净节约约 87 元/t 铁。(3) 增产降耗带来的综合生产效益评估。日增产约 600~850 吨, 年增产约 18~25 万吨, 增产增效约 1.2~1.7 亿元/年。综合燃料成本节约与增产效益, 年产 250 万吨规模下年综合效益约 3.6~4.0 亿元, 投资回收期约 6~8 个月, 经济效益十分显著。

3.4 工艺应用存在的问题与改进建议

(1) 优化工艺实际应用中的不稳定因素。原燃料质量波动 (入炉品位 $\pm 1\%$ 、焦炭 $CSR \pm 3\%$) 时, 炉况适应性变差, $[Si]$ 波动扩大至 0.15%。此外喷煤系统煤粉粒度波动 $\pm 5\%$ 时, 燃烧率下降 2%~3%, 需加强前端质量控制。(2) 高富氧大喷煤工艺的精细化调控改进方向。建议引入炉缸热状态在线监测及人工智能炉况预警系统, 建立富氧率-喷煤比-风温-湿度多变量前馈控制模型, 实

现参数动态协同优化。同时开发煤粉燃烧率在线检测技术, 指导煤粉粒度与配比的实时调整^[5]。(3) 长期稳定生产的工艺优化完善建议。完善原燃料预警机制, 制定焦炭 $CSR \geq 66\%$ 、入炉品位波动 $\leq \pm 0.5\%$ 的窄窗口控制标准。建立周期性炉缸测温与侵蚀监测制度, 每季度进行炉缸压浆维护。定期校核风量、煤粉计量系统精度, 确保操作参数真实可靠, 保障高富氧大喷煤工艺长期安全稳定高效运行。

结束语

本次研究完成高炉高富氧大喷煤关键参数的单因素及多协同优化, 确定了适配现场的最优工艺区间与操作制度, 有效改善炉况顺行度与冶炼指标, 实现增产、降耗、减碳多重效益。针对生产中原燃料波动、参数调控精度不足等问题, 提出智能化调控、原燃料精细化管理等改进方案。研究成果可为同类高炉优化生产工艺、提升综合经济效益与绿色冶炼水平提供实践依据。

参考文献

- [1] 周丽, 李强. 高炉面向低碳富氧-氢跃升路径及工作窗口分析 [J]. 钢铁, 2025, 60(08): 55-67.
- [2] 崔桂梅, 李舒琪, 张运强. 基于 T-S 模型的高炉喷煤协同优化控制策略研究 [J]. 钢铁研究学报, 2022, 34(03): 222-230.
- [3] 曾宇, 姜喆, 张建良. 高炉大喷吹燃料工况下冶炼参数匹配特性研究 [J]. 炼铁, 2023, 42(02): 45-50.
- [4] 张福明, 曹超真, 孟祥龙. 高炉高富氧大喷煤工艺提质降本关键技术 [J]. 冶金能源, 2024, 43(04): 36-41.
- [5] 王广伟, 滕海鹏. 富氧率与喷煤量耦合对高炉冶炼效率的影响 [J]. 钢铁钒钛, 2024, 45(06): 98-104.