

高炉炼铁过程中炉况智能诊断与优化控制研究

贺南宁

首钢京唐公司 河北 唐山 063200

摘要: 本文聚焦高炉炼铁过程, 阐述其工艺流程与炉况参数影响机制, 剖析炉况波动原因及危害。构建智能诊断技术体系, 涵盖多源数据融合、传统智能算法、深度学习及数字孪生技术。提出基于炉况诊断的前馈控制、多变量协同反馈控制及低碳导向优化控制策略, 旨在通过精准预测与动态调整, 实现高炉高效、稳定、低碳运行, 为钢铁行业智能化转型与绿色发展提供理论支撑与实践路径。

关键词: 高炉炼铁; 炉况智能诊断; 优化控制

引言: 在钢铁行业迈向智能化与绿色化的进程中, 高炉炼铁作为核心生产环节, 其炉况的稳定高效运行至关重要。然而, 高炉炼铁过程复杂, 受原料性质、操作制度及设备状态等多因素影响, 炉况波动频繁, 导致产量下降、能耗升高及设备损坏等问题。为此, 本文聚焦高炉炼铁过程, 深入剖析其工艺流程与炉况参数影响机制, 构建智能诊断技术体系, 并提出优化控制策略, 以实现高炉高效、稳定、低碳运行。

1 高炉炼铁过程基础理论

1.1 高炉炼铁工艺流程

高炉炼铁是以铁矿石、焦炭、石灰石为原料, 经高温还原将铁氧化物转化为液态生铁的传统工艺, 核心设备是高炉, 其炉体由炉喉、炉身等五段构成, 有耐火内衬与冷却系统保护。工艺流程分五大环节: 原料处理时, 对铁矿石破碎、筛分、磁选, 焦炭筛分去粉末, 石灰石破碎至合适粒径; 布料控制采用无钟炉顶布料技术, 按比例和分布装料形成合理料层; 高温还原阶段, 焦炭在风口区燃烧生成 CO, 与铁矿石中的氧化铁发生气固还原反应, 生成铁和 CO₂, 热量维持炉内约 1500℃, 促进矿石熔化; 渣铁分离时, 熔融铁水与炉渣在炉缸分层, 分别从出铁口和出渣口排出; 产品处理阶段, 铁水送转炉炼钢或铸锭, 炉渣水淬成水渣作水泥原料, 高炉煤气经处理回收利用。现代高炉引入煤粉喷吹、软水密闭循环冷却、INBA 法渣处理等技术, 工艺涵盖十大系统, 通过自动化控制提升能效, 大型高炉日产生铁超万吨, 炉渣处理量达数千吨, 焦比控制在较低水平。

1.2 炉况参数及其影响因素

高炉炉况参数是反映炉内物理化学状态的核心指标, 主要包括温度、压力、气流分布、料速、透气性指数及铁水成分等。温度参数: 炉身中上部温度反映矿石预热与软化状态, 炉腰温度体现软熔带位置, 炉缸温度

决定铁水流动性。温度分布受风温、富氧量、喷煤量及炉料热强度影响^[1]。例如, 风温提升可提高炉缸温度, 但需匹配适宜的煤气流分布以避免局部过热。压力参数: 炉顶压力反映煤气生成与排放平衡, 炉腹压力体现炉料下降阻力。压力波动可能由炉料透气性变化、煤气流分布异常或设备故障引起。例如, 炉料粉末增多会导致透气性下降, 引发炉顶压力升高。气流分布参数: 煤气利用率 (CO₂含量) 反映还原效率, 初始气流分布 (风口回旋区形状) 决定炉内反应区域。气流分布受布料方式、风口直径及喷吹物影响。例如, 中心加焦布料可改善中心气流, 但需控制焦炭比例以避免炉芯温度不足。料速与透气性指数: 料速指单位时间内炉料下降高度, 透气性指数为风量与压差之比, 二者共同反映炉料运动状态。料速过快可能导致炉温波动, 透气性差会引发悬料。例如, 焦炭强度不足会导致炉料粉末增多, 透气性下降。铁水成分参数: 铁水硅含量反映炉缸热状态, 硫、磷含量体现脱硫脱磷效率。硅含量受风温、喷煤量及炉料碱度影响。例如, 高硅含量可能由炉温不足或炉料碱度失衡引起, 需通过调整风温或加入熔剂校正。

2 高炉炼铁过程中炉况波动的原因与危害

2.1 炉况波动原因

炉况波动源于原料性质变化、操作制度失调及设备故障三类因素。(1) 原料性质波动: 铁矿石品位波动会导致还原剂需求变化, 焦炭灰分升高会降低燃烧效率, 石灰石活性不足会影响脱硫效果。例如, 钢厂因焦炭灰分突增, 导致炉缸温度下降, 铁水硅含量超标^[2]。(2) 操作制度失调: 送风制度与装料制度不匹配会破坏煤气流分布, 热制度与造渣制度失衡会引发炉温波动。例如, 风量过大而喷煤量不足会导致炉缸温度下降, 炉料碱度过高会生成高熔点炉渣, 阻碍渣铁分离。(3) 设备故障: 风口堵塞会导致局部气流不足, 冷却壁漏水会引

发炉缸侵蚀，布料器故障会导致料层偏析。例如，高炉因冷却壁漏水未及时处理，导致炉缸碳砖侵蚀，被迫停炉检修。

2.2 炉况波动危害

炉况波动会引发产量下降、能耗升高及设备损坏三类后果。一是产量下降：悬料会导致炉内料柱停滞，管道行程会引发煤气流失，炉凉会导致铁水流动性变差。例如，高炉因悬料处理不及时，日产量下降，经济损失显著。二是能耗升高：炉温波动会引发焦比升高，煤气利用率下降会导致热风炉能耗增加。例如，炉温不足时需额外喷吹煤粉，导致燃料比上升。三是设备损坏：炉缸侵蚀会缩短炉役寿命，炉墙结厚会增加清理成本，冷却壁漏水会引发炉体开裂。例如，高炉因炉缸侵蚀未及时护炉，导致炉底穿孔，被迫提前大修。

3 高炉炉况智能诊断技术体系

3.1 多源数据融合技术

多源数据融合技术作为提升高炉运行智能化水平的关键手段，通过整合高炉本体运行参数、附属设备状态数据及环境监测信息，构建覆盖全生产流程的立体化数据模型。其数据来源呈现多元化特征，既包含炉顶温度场分布、炉身动态压力、风口喷吹状态、铁水成分实时分析等工业传感器数据，也涵盖原料库存动态、能源介质消耗、设备运行效率等管理信息系统数据，形成从物理层到管理层的完整数据链。技术实现采用四层架构体系：数据采集层依托工业光纤与5G双通道实现毫秒级数据传输；预处理层运用移动平均滤波算法消除传感器噪声干扰；特征提取层通过主成分分析（PCA）将百维级原始数据压缩至关键特征维度；融合层采用动态加权平均算法与深度神经网络相结合的方式，生成炉况稳定性指数、能源利用效率等核心指标^[1]。一大型钢铁企业应用该技术后，通过融合炉顶煤气CO浓度梯度、炉身热电偶温度场及鼓风动能参数，成功构建炉况劣化预警模型，将炉凉事故预警时间提前2小时，吨铁能耗降低3.2%。

3.2 基于传统智能算法的炉况诊断

传统智能算法包括专家系统、模糊逻辑及神经网络，通过规则库与推理机实现炉况判断。专家系统：基于高炉操作经验构建规则库，例如“炉顶压力持续升高且透气性指数下降→判断为管道行程”。推理机采用正向链式推理，结合实时数据匹配规则，输出诊断结果。例如，高炉专家系统通过整合操作工经验，成功预警悬料事故。模糊逻辑：将炉况参数（如温度、压力）转化为模糊集，通过隶属度函数描述参数状态。例如，将炉缸温度分为“低温”“中温”“高温”三档，通过模

糊规则（如“若温度为低温且风量为高，则增加喷煤量”）生成控制指令。模糊逻辑适用于非线性、时变系统，但规则库更新需依赖专家经验。神经网络：采用多层感知机（MLP）或循环神经网络（RNN）训练炉况模型。输入层接收温度、压力等参数，隐藏层提取特征，输出层预测炉况类别（如正常、悬料、炉凉）。例如，某研究通过LSTM网络预测铁水硅含量，准确率较高。神经网络需大量标注数据，且模型可解释性较差。

3.3 基于深度学习的炉况诊断

深度学习通过卷积神经网络（CNN）、图神经网络（GNN）及生成对抗网络（GAN）实现高精度诊断。CNN应用：将高炉三维温度场、压力场数据转化为图像，通过CNN提取空间特征。例如，系统采用3D-CNN分析炉身温度分布，识别软熔带位置偏移，预警炉墙结厚。GNN应用：构建高炉设备关联图，节点代表传感器，边代表参数相关性。通过图卷积网络（GCN）挖掘参数间隐藏关系。例如，研究通过GNN发现炉顶压力与炉身温度的滞后关联，优化控制策略。GAN应用：生成正常炉况数据以扩充训练集，通过判别器识别异常模式。例如，系统采用WGAN生成炉缸温度分布，结合实时数据检测异常侵蚀。

3.4 基于数字孪生的炉况动态诊断

数字孪生技术通过构建高炉虚拟模型，实现物理实体与数字模型的实时交互。模型构建：三维实体模型还原高炉结构，工艺模型集成物料平衡、热平衡方程，智能算法层融合LSTM与随机森林。例如，系统通过数字孪生模型预测炉缸侵蚀速率，误差较小。状态监控：设置三级预警机制：初级预警基于单参数阈值（如冷却壁温差超限），中级预警关联多参数趋势（如透气性指数与压差背离），高级预警依托智能算法预判异常^[4]。例如，系统提前预警悬料，避免非计划休风。优化决策：工艺调优模块推荐风温、喷煤量调整方案，设备维护模块预测冷却壁寿命，能效管理模块优化能源分配。例如，钢厂应用数字孪生后，燃料比降低，利用系数提高。

4 高炉炉况优化控制策略

4.1 基于炉况诊断的前馈控制

前馈控制作为高炉炼铁过程的核心控制策略之一，其核心在于通过精准预测炉况变化趋势，提前对操作参数进行动态调整，从而将炉况波动控制在萌芽状态。在预测模型构建方面，LSTM（长短期记忆）网络凭借其处理时序数据的独特优势，成为预测铁水硅含量、炉顶压力等关键参数的主流工具。该模型输入层接收风温、喷煤量、炉料成分等历史数据，通过记忆单元捕捉参数间

的长期依赖关系，输出层则预测未来多个时间步的参数值。例如，钢厂采用的LSTM模型，通过整合过去24小时的炉况数据，成功预测铁水硅含量未来4小时的变化趋势，预测准确率较高，为操作人员提供了充足的调整窗口。在控制策略层面，系统根据预测结果自动生成调整指令：若预测硅含量将升高，则提前增加风温或喷煤量以强化还原反应；若预测炉顶压力将超限，则通过调整布料角度或风量优化气流分布。前馈控制虽能有效减少炉况波动，但其性能高度依赖预测模型的精度，需通过持续优化网络结构、扩充训练数据集来提升鲁棒性。

4.2 多变量协同反馈控制

多变量协同反馈控制通过构建参数关联模型，实现高炉操作的多目标优化，其本质是在复杂系统中寻找动态平衡点。在模型构建阶段，状态空间模型成为描述参数间动态关系的核心工具。例如，针对风量、风温、喷煤量与炉缸温度、煤气利用率的耦合关系，研究人员建立了包含状态方程与输出方程的数学模型，通过最小二乘法辨识模型参数，确保模型能准确反映参数间的交互作用。在控制算法层面，模型预测控制（MPC）凭借其处理多变量约束的能力脱颖而出。该算法在风量上限、喷煤量下限、炉缸温度安全范围等约束条件下，通过滚动优化求解未来控制序列，使目标函数（如产量最大化、能耗最小化）达到最优。例如，某钢厂引入MPC系统后，通过协调风量与喷煤量的动态调整，成功将铁水产量提升，同时焦比下降，显著提升了经济效益。多变量协同控制的实施需解决模型精度、计算效率与实时性的矛盾，需通过简化模型结构、优化求解算法来提升实用性。

4.3 低碳导向的优化控制

低碳导向的优化控制通过技术创新与工艺改进，推动高炉炼铁向绿色低碳转型，其核心路径包括焦炭替代、煤气利用优化、余热回收与碳捕集。在焦炭替代技术方面，煤粉喷吹与氢基还原成为主流方向。例如，某高炉通过提高煤粉喷吹量，使焦比显著降低，CO₂排放

强度大幅下降，同时氢基还原技术利用氢气替代部分焦炭，进一步减少了碳排放。煤气利用优化则聚焦于气流分布的精准调控，通过中心加焦布料、扩大风口直径等措施，提高煤气与炉料的接触效率，从而提升煤气利用率，间接降低CO₂排放。余热回收技术方面，高炉煤气发电与炉顶余压发电（TRT）成为关键手段^[5]。例如，钢厂TRT装置年发电量较高，相当于减少标准煤消耗，显著降低了化石能源依赖。碳捕集技术作为末端治理方案，通过胺法、钙循环法等化学吸收工艺，捕集高炉煤气中的CO₂并转化为合成燃料，实现碳的循环利用。例如，某项目通过胺法捕集CO₂，年捕集量较高，为钢铁行业碳减排提供了可行路径。低碳控制的实施需平衡减排成本与经济效益，需通过政策引导、技术迭代与产业协同来推动规模化应用。

结束语

高炉炼铁作为钢铁生产核心环节，其炉况智能诊断与优化控制对提升效率、降低成本及实现低碳目标意义重大。本文通过系统研究，构建了涵盖多源数据融合、智能算法及数字孪生的诊断技术体系，并提出了前馈、反馈及低碳导向的控制策略。未来，需进一步融合新兴技术，优化模型精度与控制策略，推动高炉炼铁向智能化、绿色化深度转型，助力钢铁行业可持续发展。

参考文献

- [1]殷晓辉,王玉婷.高炉冶炼过程计算机控制系统优化[J].工业加热,2024,53(09):13-16.
- [2]张亚楠,吴战林,彭元飞.低碳背景下高炉炼铁工艺的挑战与机遇[J].冶金与材料,2024,44(09):139-141.
- [3]白文广,杨帆,侯全师,杨洛镇.高炉炼铁中数据驱动建模及生产智能化升级分析[J].现代工业经济和信息化,2024,14(05):73-75+92.
- [4]孙宏伟,何一鸣.基于自动化控制的高炉煤气利用优化策略[J].能源与环保,2021,32(6):158-164.
- [5]王海峰,陈伟.高炉煤气利用率提升的关键技术及其经济效益分析[J].钢铁生产,2022,54(2):45-51.