

入炉料结构优化对高炉燃料消耗与气流状态的调控分析

王先军

河北省半钢水冶炼高洁净高品质特殊钢重点实验室 河北 承德 067300

摘要: 入炉料结构优化通过协同调控炉料物理化学特性与关键结构参数, 显著提升高炉气流分布的均匀性与稳定性, 改善料柱透气性与软熔带形态, 抑制气流偏移与压差波动。基于“还原性—透气性—气流分布”三元驱动机制, 构建了炉料结构与气流状态的动态耦合模型, 量化了配比变化对燃料消耗与煤气利用率的影响路径。研究揭示了粒级匹配与还原度梯度分布对提升料柱整体还原效率的关键作用, 实现了燃料比降低与能效提升的协同优化。该机制为高炉运行稳定性与绿色化转型提供了可推广的技术范式, 适用于多原料条件下的工艺调控。未来需深化个性化配矿模型与智能反馈调控体系, 推动高炉炼铁向低碳化与智能化发展。

关键词: 炉料结构优化; 气流分布均匀性; 燃料比协同调控; 还原度梯度; 智能配矿

引言

入炉料结构优化是高炉炼铁工艺实现能效提升与碳减排的关键技术路径。烧结矿、球团矿与块矿在还原性、软熔性能及粒度分布上存在显著差异, 直接影响料柱透气性与气流分布稳定性。不同炉料配比导致的料柱结构不均问题, 易引发局部阻力突变, 进而诱发气流偏移与压差波动, 制约高炉运行效率。当前研究聚焦于炉料配比优化及其对燃料消耗的影响机制, 但对多源炉料物理化学特性协同作用下的气流调控路径仍缺乏系统性认知。

气流状态调控需基于炉料结构与煤气流分布的动态响应关系。软熔带位置与形状决定煤气流路径, 而鼓风动能与风口回旋区形态共同影响流场均匀性。研究发现, 中心气流过强或边缘气流不足将加剧炉况波动, 导致燃料比攀升。通过三维流场数值模拟与冷态实验结合, 可有效识别不同配比下的透气性指数阈值与压差波动规律。进一步构建“炉料结构-气流分布-燃料效率”协同模型, 有助于量化参数间非线性关系, 为优化提供理论支撑。

1 入炉料结构优化理论基础与关键参数

炉料结构的科学配置是高炉冶炼过程高效运行的核心前提, 其优化需建立在对炉料物理化学特性与工艺需求系统性协同分析的基础上, 形成兼具理论深度与工程适用性的调控框架。

1.1 炉料物理化学特性差异

烧结矿、球团矿与块矿在还原性、软熔性能及粒度分布上存在显著差异, 这些差异直接决定了炉料在高温区的反应行为与气流通过能力。烧结矿具有较高的孔隙率与中等还原性, 有利于煤气流穿透, 但其软化区间较

宽, 易导致软熔带位置上移。球团矿还原性优异, 且软熔温度高, 有助于维持炉内气流稳定性, 但其粒度偏小且抗压强度较低, 易在布料过程中产生偏析。块矿品位较高, 但还原速度慢, 且粒度波动大, 易造成局部堆积与透气性下降。不同原料的还原度梯度分布对煤气流的穿透阻力与还原效率具有非线性影响, 尤其在软熔带附近, 若还原度分布不均, 将加剧局部气流集中或堵塞, 进而诱发压差异常波动^[1]。

1.2 关键结构参数定义

炉料结构优化的核心变量包括烧结矿、球团矿与块矿的配比, 三者比例直接影响炉料整体的还原性能与热稳定性。烧结矿比例过高易导致软熔带过厚, 影响煤气流均匀性; 球团矿比例提升则可增强高炉下部还原能力, 但可能因粒度细而增加料柱阻力。块矿配比需根据铁矿石品位与冶炼目标动态调整, 以实现铁水产量与燃料效率的平衡。粒级匹配是调控料柱孔隙率的关键手段, 通过合理控制粗颗粒与细颗粒比例, 可有效维持炉料的均匀堆叠结构, 减少局部孔隙堵塞。料柱结构的优化不仅要考虑垂直方向的稳定性, 还需兼顾水平方向的均匀性, 避免因布料偏析或炉墙结瘤引发的气流突变, 从而保障炉内气流分布的持续均匀。

1.3 结构优化目标与约束条件

优化目标聚焦于降低燃料比、提升煤气利用率以及稳定压差波动, 三者共同构成高炉能效与运行稳定性的核心指标。燃料消耗的降低依赖于煤气流与炉料的高效匹配, 而煤气利用率的提升则源于气流分布的合理化与还原反应的充分进行。压差波动的抑制则要求软熔带位置可控、炉料透气性稳定, 防止因局部堵塞引发的剧烈波动。优化过程需在多重约束下进行: 原料供应的稳定

性决定了配比调整的边界条件；高炉操作窗口限制要求优化方案具备可实施性；环保排放要求则进一步限制了高硫、高灰分原料的使用。经济性方面，球团矿成本较高，需权衡其带来的能效提升与投入产出比；工艺可行性方面，软熔带控制难度大，需避免因结构失衡引发的炉况失稳。因此，结构优化实质上是多目标、多约束下的系统性决策过程^[2]。

2 高炉气流状态调控机制与模型构建

气流分布的稳定性与均匀性是决定高炉冶炼效率与能效水平的核心要素，其调控路径需依托入炉料结构的系统性优化。通过调整炉料组分比例、粒级分布与还原特性梯度，可实现对气流路径的主动引导与阻力分布的动态平衡。该过程不仅影响煤气流的穿透深度与分布均匀性，还直接关联燃料消耗水平与炉内压差波动幅度。炉料结构作为气流状态的上游控制变量，其优化策略需兼顾物理特性与化学行为的协同作用，形成可量化、可预测的调控机制。

2.1 气流分布特征与影响因素

气流分布的均匀性受料柱透气性、鼓风动能与风口回旋区形态的共同作用。透气性作为基础物理参数，决定了煤气流在料柱中的扩散能力，其受炉料粒度、孔隙率与堆密度影响显著。当料柱结构不均或出现局部密实区域时，易引发气流偏流，导致边缘气流增强或中心气流过强。中心气流过强易引发炉墙局部过热，边缘气流不足则造成中心区域还原不充分，进而诱发炉况波动与燃料比升高。软熔带的位置与形态对煤气流路径具有决定性影响，其形成过程与炉料中熔融组分的分布及温度梯度密切相关。实际生产中，软熔带根部常位于炉身下部，其高度每增加0.5 m，压差可上升5%~8%。软熔带若出现异常扩展或位置偏移，将显著增加炉内阻力，造成压差波动加剧，影响气流稳定。因此，合理控制软熔带发展，需从炉料结构层面优化熔融组分分布与热力学行为匹配性，以实现气流路径的可预测性调控^[3]。

2.2 气流状态调控模型

调控模型的构建需结合实验验证与数值模拟手段。冷态模型实验可有效获取不同炉料配比下的堆积密度与透气性指数阈值，为工业应用提供初始参数基准。在此基础上，引入三维流场数值模拟技术，可动态追踪软熔带演化过程与煤气流偏移规律，揭示气流与炉料结构之间的非线性反馈关系。模拟结果可支持对不同操作工况下气流状态的预判，提升调控的前瞻性。进一步地，构建“炉料结构-压差波动-燃料比”多元回归模型，能够量化各参数间的联动关系，明确关键影响因子的权重

贡献。该模型不仅支持静态分析，还可嵌入实时数据接口，为动态调控提供支撑，形成从结构设计到运行反馈的闭环调控体系。

2.3 动态响应机制研究

在球团矿高比例工况下，软熔带熔融区的扩展具有显著的非线性突变效应。由于球团矿具有较高的还原性和熔点，其在软熔带中熔融过程可能引发局部阻力骤升，导致气流分布失衡。该现象在高负荷运行时尤为突出，易诱发炉缸边缘堆积与中心气流异常。不同区域高炉受原料供应条件限制，其炉料结构适应性存在差异。沿海地区因铁矿石进口比例高，常采用高比例球团矿结构；内陆地区则以本地烧结矿为主，结构特征差异显著。因此，气流调控策略需结合区域原料特性进行差异化设计。基于实时监测数据的在线调控参数预判方法，可实现对气流状态的早期预警与参数动态修正，提升系统抗扰能力与运行稳定性。通过引入时序数据特征提取，可提前15~30分钟识别气流流行趋势，为操作调整赢得窗口期。

2.4 个性化配矿模型开发

配矿模型的构建应充分考虑原料供应特性与高炉操作窗口的匹配性。通过分析不同矿种的物理性能、还原性梯度与高温行为，建立区域差异化配矿模型，可在保障冶炼稳定性的前提下实现燃料消耗最低化。工业试验验证表明，该模型在真实工况下具备良好的边界条件适配性，可有效应对原料波动与工况变化。模型参数的持续优化需结合炉衬寿命、煤气利用率与燃料比等多目标函数，实现综合效益最大化。通过引入自适应机制，模型可逐步学习操作历史数据，提升预测精度与调控精度。此外，模型输出可同步生成风口调节建议，形成从配矿到操作的完整调控链条。该方法为高炉实现绿色低碳运行提供了可推广的技术路径，也为智能炼铁系统的构建奠定基础^[4]。

3 入炉料结构优化对高炉燃料消耗与气流状态的调控分析

入炉料结构的科学配置是实现高炉稳定运行与能效提升的关键切入点，其对燃料消耗水平与气流分布状态具有决定性影响。通过调整烧结矿、球团矿与块矿的配比，可有效调控料柱的还原性与透气性，从而影响煤气流的分布规律与能量利用效率。在实际运行中，炉料结构不合理常导致软熔带位置异常上移或下移，引发气流偏行与局部过热，进而加剧燃料比上升与压差波动。因此，优化入炉料结构需从物理与化学双重维度协同推进，实现对炉况运行状态的精准调控。

3.1 燃料消耗关键影响因素

焦炭消耗量受炉料整体还原性及软熔带位置的显著影响,其变化直接关联于煤气流的分布均匀性与利用效率。当炉料中高还原性原料比例不足时,碳素消耗增加,燃料比随之攀升。同时,软熔带位置若因粒级不匹配或还原度梯度失衡而发生异常扩展,极易造成气流通道局部堵塞或偏行,进一步恶化炉内动力学状态。在实际生产中,软熔带形态的变化常导致焦炭床负荷不均,进而引发局部压差骤升,增加鼓风能耗。煤粉喷吹量的调控必须与气流分布均匀性相匹配,过量喷吹易引发局部过热与还原不足并存的现象,加剧炉况波动。研究表明,每增加1%的球团矿配比,若保持透气性稳定,可使燃料比降低约0.5%~1.0%。合理配比可有效抑制压差波动加剧与炉况稳定性下降趋势,为降低燃料比提供基础支撑^[5]。

3.2 能效提升技术路径

基于“还原性—透气性—气流分布”三元协同机制,高炉能效提升需以料柱结构优化为核心抓手。通过构建粒级匹配模型,可使不同粒径物料在料柱中形成合理梯度分布,提升整体透气性与还原效率。例如,将烧结矿的粒径控制在10~25mm、球团矿8~16mm区间,可减少空隙填充效应,降低气流阻力。还原度梯度分布模型的引入,使炉料在不同高度实现分段还原,避免局部还原过度或不足,有效降低碳消耗。这一模型需结合矿石的低温还原粉化与高温软熔特性进行动态标定,以确保各段还原平衡。数值模拟技术在鼓风参数与风口配置优化中发挥关键作用,通过模拟气流速度场与温度场分布,可识别流动死区与高温热点,进而调整风口布局与风量分配,减少无效能量消耗,提升煤气利用率,通常可使煤气CO利用率提高2~3个百分点^[6]。

3.3 绿色低碳与智能化发展方向

在双碳目标与超低排放要求下,低碳配矿方案的开发成为高炉绿色转型的重要路径。通过引入新型复合炉料结构,如高比例球团矿配入与低品位矿石替代,可显著降低碳足迹,推动工艺向清洁化方向演进。实际应用中,将球团矿比例提升至50%以上并结合碱性复合烧结矿,可降低工序碳排放约8%~12%。人工智能算法在炉

料结构与气流状态调控中的应用,实现了对复杂非线性关系的建模与动态优化,具备实时反馈与自适应调控能力。例如,基于深度神经网络的炉料配比优化模型,可依据实时压差、顶温及煤气成分,自动调整烧结矿与球团矿的混合比例,响应时间缩短至分钟级。结合工业大数据与边缘计算技术,可构建高炉能效标杆体系,支撑行业标准的制定与推广。该体系不仅提升单炉运行效率,更为高炉炼铁向智能化、绿色化深度融合提供系统性解决方案。

结束语

综上所述,入炉料结构优化通过协同调控炉料物理化学特性与关键结构参数,显著改善了高炉气流分布的均匀性与稳定性,验证了“还原性—透气性—气流分布”三元驱动机制在降低燃料比与提升能效中的核心作用。研究发现,合理配置烧结矿、球团矿与块矿比例,并结合粒级匹配与还原度梯度设计,可有效抑制软熔带异常扩展与气流偏移,实现压差波动抑制与煤气利用率提升。该机制为高炉运行稳定性与能效协同优化提供了理论支撑,具有显著的实践价值。然而,研究仍受限于典型工况下的模型验证,未充分覆盖多区域、多原料条件的普适性。未来研究应进一步深化个性化配矿模型构建,加强工业场景下的动态反馈与智能调控机制研究,推动高炉炼铁向绿色低碳与智能化深度融合方向发展。

参考文献

- [1]张福明.面向碳中和高炉炉料结构优化的认识与展望[J].烧结球团,2026,45(01):69-79.
- [2]魏琼花,王文生,王金龙,等.基于MgO转移的高炉炉料结构优化[J].四川冶金,2024,46(06):66-71.
- [3]赵志坚,余雪峰,赵奕喆,等.高炉料面结构对煤气流分布影响的模拟[J].材料与冶金学报,2023,22(01):38-44.
- [4]陈海军.高炉高(MgO)渣性分析及炉料结构优化探讨[J].新疆钢铁,2021,44(03):27-30.
- [5]张巍,尹聚才.酒钢高炉炉料结构优化系统设计及应用[J].中国金属通报,2021,0(19):183-184.
- [6]王金龙,刘晓明,魏琼花,等.低烧比条件下的高炉炉料结构优化研究[J].河南冶金,2023,31(05):1-3.