

炉料结构优化对高炉顺行与能耗的影响研究

李响 张风培

建龙北满特殊钢责任有限公司 黑龙江 齐齐哈尔 161041

摘要: 高炉炼铁作为现代钢铁工业的核心环节,其运行效率与能源消耗直接关系到企业的经济效益与环境可持续性。炉料结构作为高炉冶炼过程的基础输入变量,对高炉的顺行状态(即稳定、高效、低故障的运行)和综合能耗具有决定性影响。本文系统论述了炉料结构优化对高炉透气性、软熔带形态、渣铁性能以及热制度稳定性等顺行关键指标的影响机制,并分析了其对燃料比、焦比、煤气利用率等核心能耗指标的作用路径。文章进一步结合当前行业面临的资源约束、环保压力及降本增效需求,提出了以“精料方针”为基础,融合智能配矿、多维协同优化及动态调控策略的炉料结构优化方法论。

关键词: 高炉炼铁; 炉料结构; 高炉顺行; 能耗; 烧结矿; 球团矿; 焦炭; 煤气利用率

引言

在全球气候变化与“双碳”目标下,钢铁工业作为能耗和碳排放大户,面临巨大转型压力。高炉-转炉长流程工艺技术成熟、规模效益显著,未来仍是主流。在此背景下,保障高炉顺行并降低能耗和碳排放,成为钢铁企业生存发展核心课题。高炉是复杂逆流反应器,炉料下降中被高温煤气加热等形成液态生铁和炉渣,其顺畅与否依赖炉料物理状态和化学组成。炉料结构是入炉原料种类、比例及内在质量的综合体现,是高炉操作“第一道工序”和影响整体性能的源头因素。长期以来,“精料方针”是高炉强化冶炼、降低消耗的基础,但如今优质铁矿资源枯竭、进口矿价格波动、环保法规趋严,传统“精料”模式难以为继,给高炉稳定顺行带来挑战。本文旨在梳理炉料结构特性及行为,剖析其对高炉顺行性和能耗的影响机理,构建优化策略体系,为钢铁行业高质量发展提供参考。

1 炉料结构对高炉顺行的影响机理

1.1 对炉料层透气性的影响

高炉内煤气自下而上穿透料柱,料柱的透气性是维持正常冶炼节奏的生命线。炉料结构通过其物理特性深刻影响着这一关键参数。当炉料粒度均匀且机械强度高时,料柱空隙率大、粉末生成少,煤气流动阻力小,压差稳定。反之,若烧结矿的低温还原粉化率(RDI)过高,在炉身上部400~600℃的低温还原区会发生剧烈粉化,产生大量细粉堵塞气流通道的,导致炉顶压差急剧攀升,极易诱发频繁崩料甚至悬料事故^[1]。同样,焦炭若耐磨性差(M10值高),在炉内下降过程中因摩擦碰撞而碎裂,会显著恶化高炉下部软熔带以下区域的透气透液性,阻碍渣铁顺利滴落。此外,不同炉料的几何形态也影响料柱

稳定性。球团矿呈规则球形、表面光滑,在无钟炉顶布料过程中易发生滚动偏析,造成局部区域气流集中,形成管道行程,破坏煤气流的径向均匀分布;而烧结矿棱角分明、相互咬合,有助于形成结构稳定的料床。因此,过高的球团矿比例,尤其在布料调控能力不足的高炉上,会增加气流失稳的风险。天然块矿因强度和还原性差异大,在炉内受热不均易破碎,同样不利于透气性的长期稳定。

1.2 对软熔带形态与性能的影响

软熔带作为炉料从固相向液相转变的关键过渡区,其位置、厚度及焦窗透气性直接决定了高炉能否顺行。理想的软熔带应位于炉腹上部,厚度薄且边缘与中心同步熔融,焦炭层保持开放状态。炉料结构对此具有决定性影响。不同炉料的软熔特性存在显著差异:烧结矿因在烧结过程中已部分预熔,其软化区间窄(ΔT 小),熔融行为集中;而球团矿软化起始温度较低且熔滴区间宽(ΔT 大),熔融过程拖沓。当高比例球团矿与烧结矿混合入炉时,二者软熔不同步,会在软熔带区域形成粘稠、不连续的初渣层,大幅增加煤气穿透阻力(表现为S值升高),不仅导致压差波动,还可能促使炉墙局部结厚甚至形成瘤根。此外,炉料间的碱度匹配亦至关重要。烧结矿通常为高碱度设计,而球团矿和块矿多呈酸性。若炉料结构中酸性炉料占比过高,将导致综合炉渣二元碱度偏低,初渣中FeO和SiO₂活度高,熔点低而粘度大,流动性差,同样会堵塞焦窗,恶化软熔带透气性。反之,若碱度过高,则渣量增大,不仅增加热负荷,还可能因脱硫过度而影响铁水质量,间接干扰热制度稳定。

1.3 对渣铁性能及热制度的影响

炉渣的流动性、脱硫能力以及铁水物理热(温度)

是衡量高炉热制度是否稳定的核心指标，而这些均深受炉料结构制约。炉料结构直接决定了入炉脉石总量（ $\text{SiO}_2+\text{Al}_2\text{O}_3$ ）及碱性氧化物（ $\text{CaO}+\text{MgO}$ ）的平衡，从而影响渣量与成分。渣量过大不仅意味着需要消耗更多热量来熔化，还会缩短渣铁在炉缸内的滞留时间，削弱脱硫反应的充分进行，导致铁水硫含量超标。特别值得注意的是，炉料中 Al_2O_3 含量过高（例如大量使用高铝块矿或某些巴西粗粉）会显著提高炉渣粘度，即使在较高温度下也难以获得良好流动性，极易引发炉缸堆积，严重威胁高炉长寿^[2]。从热平衡角度看，球团矿和块矿的还原过程以间接还原为主，是强吸热反应，而烧结矿因部分已被预还原，吸热量相对较少。因此，在高球团/块矿比例的炉料结构下，炉身中上部需吸收更多热量用于还原，可能导致该区域温度偏低，抑制间接还原的发展，迫使更多还原任务转移至高温区由碳完成，这不仅增加了焦炭消耗，也使得炉腹、炉缸热负荷集中，对热制度的调控精度提出更高要求，稍有不慎便会导致炉温波动，影响顺行。

2 炉料结构对高炉能耗的影响路径

2.1 对煤气利用率（ η_{CO} ）的影响

煤气利用率（ $\eta_{\text{CO}} = \text{CO}_2 / (\text{CO} + \text{CO}_2) \times 100\%$ ）是衡量高炉能量利用效率的黄金指标，其高低直接反映了煤气化学能转化为有效还原功的程度。炉料结构通过影响间接还原的发展水平，深刻作用于 η_{CO} 。炉料的还原性（RI）越强，越能在炉身上部低温区（ $< 900^\circ\text{C}$ ）高效进行 $\text{Fe}_2\text{O}_3 \rightarrow \text{Fe}_3\text{O}_4 \rightarrow \text{FeO}$ 的间接还原反应，此过程能充分利用煤气余热，且不额外消耗固体碳。高RI值的球团矿正是提升高炉整体 η_{CO} 的关键原料。相反，若炉料还原性差（如低品位烧结矿或劣质块矿），大量铁氧化物将被迫在高温区通过直接还原（ $\text{C} + \text{FeO} \rightarrow \text{Fe} + \text{CO}$ ）完成，该反应不仅强烈吸热，消耗宝贵焦炭，还会降低煤气中 CO_2 浓度，从而拉低 η_{CO} 。此外，合理的炉料结构有助于形成均匀、稳定的径向煤气流分布。当料柱透气性良好且无严重偏析时，煤气能与炉料充分接触，最大化反应界面，促进间接还原。反之，由不良炉料引发的管道或边缘气流过盛，会造成煤气短路，大量未参与反应的CO直接逸出炉顶，使 η_{CO} 显著下降，能源浪费严重。

2.2 对燃料比的直接影响

燃料比（ kgce/t ）作为高炉综合能耗的核心表征，直接受炉料结构的多重因素驱动。其中，入炉综合品位（TFe）是最根本的影响因子。“高品位、低渣量”是降低燃料比的不二法则。渣量每减少100kg/t，可降低燃料比约20–30kg/t。因此，提高高品位球团矿的配比，是提

升综合品位、减少渣量的有效手段。此外，炉料的冶金性能亦至关重要。优良的荷重软化性能（高TBS、窄 ΔT ）和低熔滴阻力（低S值）意味着软熔带对煤气的阻碍小，高炉可在维持顺行的前提下采用更高风量、更高富氧率进行强化冶炼，从而在提高产量的同时保持较低的单位燃料消耗。而劣质炉料则迫使操作者采取保守的送风制度，牺牲利用系数以保炉况稳定，导致吨铁能耗被动升高^[3]。更为隐蔽但长期影响巨大的是炉料中有害元素（K、Na、Zn、Pb等）的平衡。这些元素在高炉内循环富集，会侵蚀炉衬、催化焦炭气化反应（ $\text{C} + \text{CO}_2 \rightarrow 2\text{CO}$ ），破坏其强度，并诱发炉墙结厚。这些负面效应最终都会体现为燃料比的持续爬升。因此，优化炉料结构，优先选用有害元素含量低的原料，或通过科学配矿实现有害元素的稀释与平衡，是维持低燃料比长期稳定运行的重要保障。

2.3 对其他能耗指标的间接影响

炉料结构对能耗的影响不仅限于燃料比，还广泛波及到其他能源介质消耗。一个因炉料结构不良而导致压差高企的高炉，往往无法维持高顶压操作，这将直接减少TRT（高炉煤气余压透平发电装置）的发电量，增加外购电力需求。同时，频繁的炉况波动和异常，如崩料、悬料或洗炉，会加速炉衬耐火材料的侵蚀与剥落，缩短高炉寿命，大幅增加大修频率和耐材消耗成本。反之，一个因炉料结构优化而长期保持顺行的高炉，其整体运行处于高效、平稳状态，各类能源介质（风、电、水、气）的消耗均能维持在最优水平，系统能效达到最大化。

3 新时代背景下炉料结构优化的策略与方法

3.1 坚持“精料”内涵的深化与拓展

面对资源、成本与环保的三重压力，新时代的“精料方针”必须超越传统认知，走向更深层次的内涵拓展。它不再片面追求单一炉料的极致高品位或高强度，而是强调“性能匹配、经济合理、绿色低碳”的系统最优。这意味着在选料配矿时，需注重不同炉料间的性能互补与协同。例如，可利用高软化温度、窄软熔区间的优质烧结矿来“托住”软化温度较低的球团矿，通过混合形成综合冶金性能均衡的炉料柱，从而规避单一炉料的短板。同时，评价体系必须引入全生命周期成本理念，建立基于性价比的综合评估模型。不仅要计算吨铁矿石的采购成本，更要核算其带来的燃料、熔剂、能耗、设备维护乃至产量损失等隐性成本。有时，采购单价略高的高性能炉料，因其能显著降低燃料比和稳定炉况，反而带来更低的吨铁综合成本。此外，绿色属性日益成为“精料”的新维度，炉料生产过程中的碳足迹、能耗及污染物排放应纳入评价体系，优先选择低碳排的球团矿而非

高能耗、高排放的烧结矿，以契合企业绿色发展战略。

3.2 构建多维协同的炉料结构优化模型

炉料结构优化本质上是一个复杂的多目标、多约束决策问题，亟需借助系统工程方法进行科学求解。应构建一个集成化的优化模型，其目标函数可设定为最小化吨铁炉料综合成本，而约束条件则需全面覆盖高炉顺行与能耗的核心要求。具体而言，模型必须包含顺行约束，确保混合炉料的RDI、RI、荷重软化性能等关键冶金指标处于安全阈值之内；同时设置能耗约束，如燃料比上限或煤气利用率下限，以保证能效目标的达成^[4]。此外，模型还需考虑现实的资源约束（各种炉料的月度可用量、港口库存、运输能力）和环保约束（限制K、Na、Zn等有害元素的总入炉量）。在此框架下，可运用线性规划、非线性规划等数学规划方法，或引入遗传算法、粒子群优化等智能算法进行求解，从而得到在给定条件下理论上的最优炉料配比方案，为生产决策提供量化依据。

3.3 推进智能配矿与动态调控

静态的、基于月度计划的配矿模式已难以应对瞬息万变的市场与生产环境，炉料结构优化必须迈向智能化与动态化。首先，应建设智能配矿系统，该系统需集成完整的矿石数据库、基于机理或数据驱动的冶金性能预测模型、实时成本计算模块以及前述的多目标优化引擎。系统可根据每日矿价、库存及高炉需求，自动生成最优的烧结/球团用料结构及高炉入炉结构建议。其次，必须打通高炉生产大数据的闭环反馈通道。通过高炉专家系统、炉顶红外成像、炉身静压矩阵、煤气在线分析仪等先进感知手段，实时监控高炉内部状态，并对当前炉料结构下的顺行性与能效水平进行动态评估。一旦发现指

标偏离预设目标，系统能立即反向推演，自动调整后续炉料配比建议或联动调整操作制度（如风温、富氧量、喷煤量），形成“感知-分析-决策-执行”的智能闭环控制。最后，针对炉料质量不可避免的短期波动（如某船进口矿成分异常），应建立快速响应与动态调剂机制，通过微调其他炉料比例或临时性操作干预，有效补偿质量偏差，将对高炉的冲击降至最低，确保生产的连续稳定。

4 结语

炉料结构是高炉冶炼基石，优化对保障高炉顺行、降低能耗意义重大。其是多维综合体，影响源于组分协同或拮抗效应；不良结构会破坏高炉稳定运行，推高能耗；通过多种手段可提高煤气利用率，降低燃料比；面对挑战，炉料结构优化要摒弃经验主义，采用系统工程思维，融合多种技术实现范式转变。展望未来，在较长过渡期，高炉流程仍是钢铁生产主力，持续深化炉料结构优化、深挖节能降碳潜力，是钢铁工业绿色低碳转型的现实有效路径。未来，炉料结构优化研究将与数字孪生等前沿技术深度融合，向更精准、智能、绿色方向演进，为构建现代钢铁工业体系贡献核心力量。

参考文献

- [1]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+53.
- [2]董相娟,滕召杰,武建龙,等.基于交互反应优化高球比炉料结构的研究及应用[J].炼铁,2024,43(01):59-62.
- [3]王宏伟.高炉炼铁中炉料结构的智能优化研究[J].山西冶金,2022,45(03):161-162+179.
- [4]陈伟,武鹏飞,王宝祥,等.烧结-高炉炼铁全过程炉料结构智能优化系统[J].烧结球团,2020,45(05):8-13+24.