

# 高效炼钢工艺在转炉冶金中的应用与优化

陈 旭

安钢集团信阳钢铁有限责任公司 河南 信阳 464194

**摘要：**为提升转炉冶金效率与经济性，本文分析100吨转炉普通钢生产工艺现状，围绕高效炼钢工艺内涵与评价体系，从供氧、造渣、温控、原料协同四方面展开应用研究，并结合设备改造、能源回收、操作管理进行辅助优化。结果表明，优化后转炉冶炼周期缩短，钢铁料消耗降低，钢水成分合格率提升。该研究为中小型钢铁企业转炉高效炼钢提供实用技术路径，实现质量、效率与成本的协同提升。

**关键词：**高效炼钢工艺；转炉冶金；应用；优化

**引言：**转炉冶金是钢铁生产核心环节，中小型企业100吨转炉受技术与成本限制，多采用传统顶吹工艺，存在冶炼周期长、成分控制精度低、能源利用率不足等问题，难以适配现代钢铁工业高效低碳需求。高效炼钢工艺以“适配性、协同性、经济性”为核心，可通过多环节优化突破生产瓶颈。本文结合安钢集团信阳钢铁实践，构建转炉高效炼钢评价体系，研究核心工艺应用与辅助优化策略，旨在解决现有工艺短板，为同类转炉高效生产提供可借鉴的技术方案，推动转炉冶金高质量发展。

## 1 转炉冶金中高效炼钢工艺的内涵与评价体系

### 1.1 转炉高效炼钢工艺的内涵及特征

转炉高效炼钢工艺的内涵以以下方面为核心。（1）在适配性层面，要贴合转炉设备能力与生产需求，通过优化冶炼时序、调整工艺参数，实现冶炼节奏与设备承载的匹配，避免因参数失衡导致的流程中断或效率损耗。（2）协同性体现在供氧、造渣、温控等环节的联动，确保各工艺环节相互支撑，提升整体冶炼效率；（3）经济性则聚焦资源与能源的高效利用，在保障钢水质量的基础上，降低原料单耗与能源消耗，控制生产成本，适配转炉冶金的工业化生产属性。

### 1.2 转炉高效炼钢核心评价指标

转炉高效炼钢的评价体系要围绕“效率、质量、能耗”三大维度构建可量化指标。效率指标以冶炼周期为核心，衡量从装料到出钢的整体时间成本，重点关注各环节衔接效率，反映工艺流程的紧凑性；质量指标聚焦钢水成分稳定性与温度精准度，通过控制成分波动范围、缩小出钢温度偏差，保障钢水满足后续加工需求；能耗指标涵盖原料与能源消耗，包括造渣剂单耗、氧气消耗量、煤气回收量等，通过量化数据直观反映工艺的资源利用效率，为工艺优化提供明确方向<sup>[1]</sup>。

## 2 100吨转炉普通钢现有生产工艺现状

100吨转炉作为中小型钢铁企业生产普通钢的核心设备，受限于企业成本投入与技术水平，整体工艺以传统顶吹模式为主，部分配备简易顶底复吹系统，流程围绕“满足基础生产、控制低成本”展开，精细化与自动化程度较低，具体如下：（1）工艺流程上，遵循“装料-吹炼-造渣-出钢”常规路径。装料时，铁水与废钢配比根据铁水温度、成分及成本需求调整，铁水占比通常在85%-95%，炉容比控制在0.7-0.9t/m<sup>3</sup>，装料过程依赖人工协调设备节奏，辅助时间较长。吹炼环节以超音速氧枪为核心，供氧强度维持在3.0-4.0Nm<sup>3</sup>/(t·min)，氧枪枪位通过操作人员经验判断调整，缺乏精准动态控制逻辑，纯供氧时间约10-12分钟。造渣采用石灰-萤石或石灰-白云石简易体系，石灰加入量按铁水硅含量估算，吨钢消耗25-45kg，二元碱度控制在2.0-3.0，造渣时机与加料量依赖人工经验，易出现造渣滞后或过度造渣问题。（2）生产指标方面，综合冶炼周期普遍为38-45分钟，钢铁料消耗约1050-1070kg/t，终点控制依赖热电偶测温与人工取样分析，碳含量与温度偏差较大，碳氧浓度积约0.0026%-0.0030%，需通过出钢后补加合金微调成分，增加生产时间与成本。（3）现存短板如下：一是复吹系统效能不足，底吹气体流量调节精度低，部分设备因维护不到位常处于半停用状态，实际以顶吹为主，钢水搅拌均匀性差；二是自动化水平低，无智能控制模型，关键参数如氧压、枪位、造渣料添加量均依赖人工操作，稳定性差；三是能源与物料管控粗放，烟气余热回收仅满足基础供暖，渣料消耗波动大，金属收得率待提升<sup>[2]</sup>。

## 3 转炉冶金中高效炼钢核心工艺的应用

### 3.1 高效供氧工艺在转炉冶金中的应用

针对100吨转炉生产普通钢的现状，高效供氧工艺的应用核心在于通过以下参数适配与操作规范实现氧气利

用率提升。(1)在供氧强度控制方面,结合普通钢脱碳需求与设备承载能力,通常将供氧强度稳定在 $2.8\text{-}3.2\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ 的区间内,既避免因强度过高导致喷溅加剧、炉衬侵蚀加速,又防止强度不足延长冶炼周期。枪位调控采用分阶段变枪位操作模式,冶炼前期保持 $1200\text{-}1500\text{mm}$ 的高枪位,扩大氧气流股与熔池的接触面积,为造渣反应创造条件;中期将枪位降至 $1000\text{-}1200\text{mm}$ ,增强熔池搅拌效果;后期进一步降至 $800\text{-}1000\text{mm}$ ,聚焦高效脱碳反应,通过这种简化的枪位控制逻辑适配人工操作为主的生产场景。(2)底吹系统的应用以基础搅拌功能发挥为目标,在设备精度有限的情况下,采用恒流量控制模式,将底吹气体流量稳定在 $0.03\text{-}0.05\text{m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ ,优先选择氮气作为底吹介质以控制成本。通过优化顶底吹协同节奏,在吹氧前期增强顶吹作用促进成渣,中期提升底吹强度均匀熔池成分,后期降低底吹流量减少喷溅风险,形成适配普通钢冶炼的顶底复吹协同机制。

### 3.2 高效造渣工艺在转炉冶金中的应用

100吨转炉生产普通钢的造渣工艺优化,以“快速成渣、适度精炼、低成本运行”为核心原则,具体如下:

(1)造渣剂选型侧重经济性与适配性,以活性石灰为核心造渣剂,要求其活性度不低于 $280\text{mL}$ ,同时通过预处理降低水分含量至 $1\%$ 以下,减少冶炼过程中的温度损失。针对普通钢脱硫、脱磷的基础需求,采用“石灰+少量复合造渣剂”的配比方案,复合造渣剂占比控制在 $5\%\text{-}8\%$ ,替代部分萤石以降低炉衬侵蚀,将石灰单耗稳定在 $60\text{-}70\text{kg/t}$ 的合理区间。(2)造渣操作采用“分批加入、阶梯成渣”的实用方法,第一批造渣剂在吹氧开始后 $3\text{-}5$ 分钟内加入,占总量的 $40\%\text{-}50\%$ ,快速形成初始渣层;第二批在脱碳反应中期加入,占总量的 $30\%\text{-}40\%$ ,强化脱硫脱磷效果;最后 $10\%\text{-}20\%$ 作为调整渣在倒炉前加入,控制终渣成分。结合留渣少渣冶炼模式,每炉保留 $10\%\text{-}15\%$ 的终渣作为下一炉的初始渣,缩短成渣时间,同时将总渣量控制在吨钢 $80\text{-}100\text{kg}$ ,避免过多渣量导致的能耗增加与炉衬侵蚀加剧。通过控制终渣碱度在 $3.5\text{-}4.5$ 之间,确保基础精炼效果的同时,降低造渣剂消耗与工艺控制难度。

### 3.3 转炉冶炼过程高效温控与成分精准控制技术应用

在缺乏先进在线检测设备的条件下,100吨转炉的温控与成分控制依赖“静态模型+人工调控”的实用技术路径。(1)温度控制以建立简易热平衡静态模型为基础,根据入炉铁水温度、成分(主要是碳、硅含量)及废钢加入量,提前计算理论冶炼温度,将模型计算误差控制在 $\pm 30^\circ\text{C}$ 以内。冶炼过程中通过“前控为主、后调为辅”的方式调控温度,前期通过调整废钢比例(通常控制在

$15\%\text{-}20\%$ )平衡初始温度,中期根据炉口火焰颜色变化判断温度趋势,必要时加入少量白云石等冷却剂,后期在倒炉前 $3\text{-}5$ 分钟通过取样测温确认,将出钢温度波动控制在 $\pm 15^\circ\text{C}$ 的范围内,满足普通钢连铸需求。(2)成分精准控制聚焦核心元素的基础达标,前期依赖铁水预处理质量把控,确保入炉铁水硫含量 $\leq 0.03\%$ 、磷含量 $\leq 0.08\%$ ;冶炼中期通过造渣工艺调整实现脱硫脱磷,结合供氧强度控制脱碳速率,避免成分波动过大;后期采用快速取样分析方法,在倒炉后 $1\text{-}2$ 分钟内完成钢水成分检测,针对碳含量偏差,通过补吹或加入增碳剂调整,针对合金元素偏差,精准补加锰铁、硅铁等合金,将钢水成分合格率提升至 $98\%$ 以上。

### 3.4 转炉高效炼钢的原料协同优化应用

原料协同优化的核心是实现铁水、废钢等原料与转炉冶炼节奏的适配,在原料质量波动较大的情况下保障工艺稳定,具体应用如下:(1)铁水预处理以“基础脱除、稳定成分”为目标,针对普通钢需求,将铁水脱硫控制在 $0.03\%$ 以下,脱硅控制在 $0.3\%$ 以下,预处理后的铁水需在 $30$ 分钟内入炉,避免温降超过 $50^\circ\text{C}$ 影响热平衡。通过建立铁水成分快速检测机制,每炉铁水入炉前检测碳、硅、硫、磷含量,为后续冶炼参数调整提供依据,减少因原料成分未知导致的工艺波动。(2)废钢优化聚焦“配比适配、质量筛选”,根据铁水温度和成分确定废钢加入量,通常控制在转炉装入量的 $15\%\text{-}20\%$ ,其中轻薄料占比不超过 $30\%$ ,避免加入过多导致冶炼温度不足。对废钢实施分类堆放管理,按成分(低硫、低磷、普通废钢)和厚度分区存放,入炉前进行简单分拣,去除泥沙、油污等杂质,减少对冶炼过程的干扰。同时,通过调整废钢加入时机,在铁水入炉后分批次加入,避免一次性加入导致的熔池温度骤降,保障冶炼节奏稳定。(3)原料衔接工艺注重“时序匹配、状态稳定”,制定铁水与废钢的装料顺序,采用“铁水先入、废钢跟进”的模式,装料时间控制在 $5$ 分钟以内。针对工艺不先进导致的原料输送效率低问题,通过优化装料间隔,确保前一炉出钢与后一炉装料的间隔不超过 $10$ 分钟,减少转炉待料时间。建立原料质量预警机制,当铁水硫含量超过 $0.04\%$ 或废钢杂质含量超标时,及时调整冶炼参数或暂停装料,避免影响高效炼钢进程<sup>[3]</sup>。

## 4 转炉冶金中高效炼钢工艺的辅助优化

### 4.1 转炉关键设备适配性优化

针对100吨转炉工艺现状,设备优化以“低成本改造、适配高效工艺”为核心。(1)氧枪系统方面,对现有超音速氧枪喷头进行改良,采用收缩-扩张型喷头结

构,将氧气流速提升10%-15%,同时控制喷头孔径偏差在±0.5mm以内,确保氧气流股稳定性,适配2.8-3.2m<sup>3</sup>/(t·min)的供氧强度需求。炉体维护上,采用镁碳砖局部修补技术,重点针对炉口、出钢口等易侵蚀区域,每炉出钢后检查侵蚀深度,当磨损超过30mm时及时修补,延长炉衬整体寿命15%-20%,减少因炉衬更换导致的生产中断。(2)底吹系统修复聚焦基础功能恢复,对堵塞的底吹透气砖采用高压氮气反吹清理,每月定期检测透气砖透气性,确保底吹气体流量稳定在0.03-0.05m<sup>3</sup>/(t·min);对流量控制阀门进行校准,将流量调节误差控制在±5%以内,保障顶底复吹协同效果。此外,对转炉倾动系统进行润滑与参数调整,将倾动速度优化至0.8-1.0r/min,缩短倒炉、出钢时间,适配高效冶炼节奏。

#### 4.2 转炉烟气与余热高效回收利用优化

在现有设备基础上,通过简易改造提升能源回收效率。(1)烟气回收系统方面,优化烟气净化管道布局,减少管道阻力,将煤气回收量从原有60-80m<sup>3</sup>/t提升至80-100m<sup>3</sup>/t;同时调整煤气柜压力控制范围,将压力波动控制在±2kPa以内,提高煤气回收纯度(CO含量≥60%),满足厂区自用燃料需求。(2)余热利用方面,对转炉烟道余热锅炉进行清灰与换热管维护,每月清理一次受热面积灰,提升换热效率10%-12%;将余热产生的蒸汽优先用于铁水预处理保温、车间供暖,剩余蒸汽通过背压式汽轮机发电,吨钢发电量提升至15-20kWh,降低外购电依赖。(3)建立烟气与余热回收联动机制,根据吹炼节奏调整回收系统运行参数,避免因参数不匹配导致的能源浪费,适配普通钢间歇式生产特点。

#### 4.3 转炉高效炼钢操作规范与管理优化

针对人工操作占比高的现状,通过规范操作流程提

升工艺稳定性。(1)制定《转炉高效炼钢操作手册》,明确供氧、造渣、温控等关键环节的操作标准,如供氧阶段每3分钟记录一次枪位与氧气流量,造渣剂分批次加入的时间节点偏差控制在±1分钟内,确保操作一致性。

(2)建立操作人员技能提升机制,每月开展2次实操培训,重点培训炉口火焰判断、参数调整应急处理等技能,通过“老带新”模式提升新员工操作熟练度,将操作失误率降低至3%以下。(3)实施生产过程动态监控,每炉冶炼过程中安排专人巡检,记录关键参数,每日统计冶炼周期、能耗、合格率等指标,分析偏差原因并制定改进措施,形成“操作-监控-改进”的闭环管理,适配工艺不先进条件下的高效生产需求<sup>[4]</sup>。

结束语:本文围绕100吨转炉高效炼钢展开研究,通过明确工艺内涵与评价指标,在供氧、造渣等核心环节实现参数优化,结合设备改造、能源回收与操作管理,有效解决传统工艺效率低、能耗高、质量波动大的问题,验证了高效炼钢工艺在中小型转炉的适配性与实用性。未来需持续完善工艺体系,推动转炉冶金向更高效、更低碳、更智能方向发展,助力钢铁行业绿色转型。

#### 参考文献

- [1]徐震,胡帅,崔应秦.对留渣和双渣转炉炼钢工艺高效脱磷技术的思考[J].冶金与材料,2024,44(1):142-144.
- [2]刘昕,王仲亮,包燕平.转炉钢渣资源化利用研究现状与应用展望[J].工程科学学报,2025,47(4):668-681.
- [3]杜占其,杨坤,贾东东.转炉回余钢炼钢工艺开发与应用实践[J].中国金属通报,2020(8):108-109.
- [4]王杰,曾加庆,杨利彬,等.转炉炼钢过程的精细化控制及协同优化[J].钢铁,2022,57(5):55-63.