



竖式电弧炉高铁水比冶炼分阶段工艺优化

韩生海¹, 魏光升¹, 张亚彬², 钟晓丹³, 张友亮⁴, 王建忠⁵

(1 北京科技大学碳中和研究院, 北京 100083; 2 天津钢管制造有限公司, 天津 300000; 3 本钢集团有限公司特殊钢事业部, 本溪 117000; 4 山东钢铁股份有限公司炼钢厂, 济南 250000; 5 河钢集团张宣科技, 张家口 0751002)

摘要:本研究以新型竖式电弧炉配加铁水工艺为对象, 针对实际生产中出现的吨钢电耗偏高、终点过氧化及冶炼周期较长等问题, 开展了系统性的工艺分析与优化研究。通过深入分析加料节奏、供氧制度及能量输入等关键工艺参数, 本文提出了一种分阶段调控的优化策略, 该策略系统划分为废钢与铁水配比调整部分、氧枪操作策略优化部分和废钢预热强化部分。工业试验结果表明, 经分阶段工艺优化后, 吨钢电耗为 188.7 kWh, 下降了 15.3 kWh, 冶炼周期为 38.45 min, 下降了 3.84 min, 终点氧含量为 5.19×10^{-6} , 过氧化现象得到改善, 能耗效率与生产节奏均得到全面提升。本研究验证了分阶段调控策略的有效性, 为高铁水比条件下竖式电弧炉的高效、稳定生产提供了系统性的技术方案与实践依据。

关键词:竖式电弧炉; 高铁水比; 供氧优化; 加料节奏; 废钢预热;

DOI:10.20057/j.1003-8620.N250558 **中图分类号:**TF741.5

Phased Optimization Process for Shaft Electric Arc Furnace Smelting with High Hot Metal Ratio

Han Shenghai¹, Wei Guangsheng¹, Zhang Yabin², Zhong Xiaodan³,
Zhang Youliang⁴, Wang Jianzhong⁵

(1 Institute of Carbon Neutrality, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China; 2 Tianjin Steel Pipe Manufacturing Co., Ltd., Tianjin 300000, China; 3 Special Steel Business Division, Benxi Iron and Steel Group Co., Ltd., Benxi 117000, China; 4 Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Steelmaking Plant, Jinan 250000, China; 5 Zhang Xuan Technology, Zhangjiakou 075100, China)

Abstract: Focusing on the novel vertical electric arc furnace (EAF) process coupled with hot metal charging, this study conducted a systematic analysis and optimization of the process to address practical production issues such as high electricity consumption per ton of steel, endpoint over-oxidation, and prolonged smelting cycles. Through in-depth analysis of key process parameters including charging rhythm, oxygen supply regime, and energy input, a phased optimization strategy was proposed. This strategy systematically divides the process into three components: adjustment of scrap steel and hot metal ratio, optimization of oxygen lance operation, and enhancement of scrap preheating. Industrial trials demonstrated that after implementing the phased optimization, the electricity consumption per ton of steel was reduced to 188.70 kWh, a decrease of 15.30 kWh, the smelting cycle was shortened to 38.45 min (a reduction of 3.84 min), and the endpoint oxygen content reached 5.19×10^{-6} , indicating significant mitigation of over-oxidation. Both energy efficiency and production rhythm were substantially improved. This study validates the effectiveness of the phased control strategy and provides a systematic technical solution along with practical evidence for achieving efficient and stable operation of vertical EAFs under high hot metal ratio conditions.

Key Words: Shaft Electric Arc Furnace; High Hot Metal Ratio; Oxygen Supply Optimization; Charging Rhythm; Scrap Preheating

钢铁行业的碳排放占全国碳排放的 15% 左右^[1], 电弧炉炼钢在碳排放约为转炉长流程的 1/3^[2], 我国电弧炉炼钢的占比对比国际平均水平偏低, 为实现“双碳”战略目标, 发展电弧炉炼钢有重

要意义。电弧炉通过炼钢过程中产生大量温度达到 1 200~1 500 °C 烟气^[3]预热废钢, 可以提高冶炼的能量效率^[4], 在相同的预热气体条件下, 在竖井中预热的废钢温度明显高于水平炉, 在垂直预热炉当中

基金项目: 国家自然科学基金项目(52322407, 52293392, 52274313, 52074024); 中央高校基本科研业务费专项资金资助(FRF-TP-24-06C); 江西省重点研发计划项目(编号: 20214BBG74005); 中国宝武低碳冶金创新基金资助项目(BWLFCF202108, BWLFCF202201)

作者简介: 韩生海(2001—), 男, 硕士; **E-mail:** m202320324@xs.ustb.edu.cn; **收稿日期:** 2025-10-11

通信作者: 魏光升(1989—), 男, 博士, 教授; **E-mail:** weiguangsheng@ustb.edu.cn

Editorial Office of Special Steel. OA under CC BY-NC-ND 4.0

废钢吸热效率比水平炉中高 28%^[5]。ECOARC 电弧炉的预热温度达到 800 °C 时,可以节约电能 100 kWh/t^[6]、缩短废钢熔化时间^[7-8],节能效果显著。由于我国的废钢不足,很多厂家通过热装铁水来缓解国内废钢资源的不足^[9],铁水每增加 1% 可降低电耗 4 kWh 每吨钢^[10],铁水可以降低电耗,缩短熔池形成的时间,有利于提前实施大功率供电,缩短通电时间,提高冶炼节奏^[11-13],而且 1 400~1 500 °C 的高温铁水与常温废钢的价格相当^[14]。废钢预热与铁水配加对电弧炉实现高效冶炼有重要意义。

在电弧炉热装铁水工艺领域,国内外学者已开展大量研究。谢孝容等^[15]进行 45 t 电炉转炉化改造,计算最佳铁水比取得明显经济效益。吴红光等^[16]在安钢 100 t 电弧炉上进行生产实践,得出结论当铁水比超过 52% 时脱碳速度是缩短冶炼周期的限制性条件。Anton Irawan 等^[17]通过 MATLAB 和计算流体力学(CFD)结合对热装铁水电弧炉的除尘系统进行仿真,使电弧炉效率提高了 16%。Lingzhi Yang 等^[18]对不同电弧炉冶炼方式的碳排进行量化分析,提高铁水比将显著提高电弧炉冶炼的碳排。关于竖式电弧炉的研究,邹安华等^[19]对不同炉料配比 150 t Fuchs 竖式电弧炉的生产效率影响因素进行研究,得出需要根据生铁与海绵铁的加入量调整工艺。朱荣等^[20]对安钢 100 t 竖式电弧炉进行高铁水比生产实际,在满足供氧需求的情况下,电耗下降了 25 kWh/t。关于电弧炉热装铁水和竖式电弧炉结合的研究文献报道较少。

1 工艺描述与问题分析

1.1 工艺描述

本研究以某钢厂的新型竖式电弧炉为研究对象,该电弧炉装备三支氧枪,两支炉壁氧枪,一支伸缩氧枪,每支氧枪各有一支碳枪配合。该电弧炉的基本参数见表 1。

废钢在与炉体刚性连接的竖井中预热,通过加料小车将废钢从竖井上端加入竖井开始预热,竖井下端通过推钢机将预热好的废钢推入电弧炉熔池中,推钢过程可近似视为连续加料。

表 1 电弧炉的基本参数

项目	参数
出钢量/t	110
变压器容量/MVA	75
炉壁氧枪额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	2 500
伸缩氧枪额定流量/(m ³ ·h ⁻¹)	6 000
铁水比/%	37~42
出钢方式	EBT(偏心底出钢)
公称容量/t	89

1.2 问题分析

取该电弧炉 2024 年 9 月加铁水的 137 炉次和同时期全废钢的 213 炉次的数据分析总体情况见表 2。

加铁水的炉次为兑入铁水 45 t,加入废钢 6 车,每车废钢 12 t。每炉加石灰 4 t,白云石 1 t。另外有全废钢 213 炉次的辅料与加铁水炉次相同。

该电弧炉系按全废钢冶炼工艺设计,未考虑铁水热装操作。现行铁水冶炼工艺是在全废钢工艺基础上进行简单调整而来,因而存在一定的适应性缺陷。统计数据显示,同期全废钢炉次的吨钢电耗为 310.68 kWh,而铁水比为 38.1% 的炉次吨钢电耗为 204 kWh。铁水比每增加 1%,吨钢电耗一般降低 4 kWh^[10],在理想条件下,38.1% 的铁水比对应吨钢电耗约为 160 kWh,表明当前热装铁水工艺的电耗明显偏高。参考张雷等^[9]在容量相近的 100 t 常规电弧炉中进行的高比例铁水冶炼实践,其 40% 铁水比炉次的吨钢电耗为 226.0 kWh,仅比本研究所述竖式电弧炉高 22 kWh。然而,该竖炉设计配备废钢预热系统,理论上可将废钢预热至 800 °C,预计可实现吨钢电耗降低约 100 kWh^[6]。由此推测,现行操作工艺可能未充分发挥废钢预热作用。由于入炉废钢的整体预热温度难以直接测量,可通过类似炉况下热装铁水对电耗的影响,间接推估废钢的平均预热温度,进而评估预热系统的实际运行状态。

$$t_{ph} = (W_{en} - \eta \times \phi \times M_m \times \mu \times 100) / M_m / C_{steel,1} \quad (1)$$

表 2 生产指标

Table 2 Production indicators

模式	料篮数量/个	炉数/炉	出钢量/t	吨钢电耗/kWh	吨钢氧耗/m ³	冶炼周期/min	铁水/t	铁水比/%
加铁水	6	137	109.49	204	35.26	46.29	45	38.1
全废钢	10	213	110.51	310.68	28.28	50.70	0	0

$$W_{en} = C_{iron} M_{iron} t_{iron} + M_{iron} ([C_{iron}] - [C_{steel}])(\mu_{CO} \Delta H_{CO} + \mu_{CO_2} \Delta H_{CO_2}) \quad (2)$$

式中, t_{ph} 为废钢的预热温度, $^{\circ}\text{C}$; W_{en} 为铁水的物理热与化学热的和, kJ ; η 为每 1% 铁水降低的吨钢电耗, kWh ; ϕ 为金属料的铁水占比, $\%$; M_m 为熔池中的金属量, kg ; μ 为金属料的收得率, $\%$; C_{iron} 为铁水的热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; M_{iron} 为铁水质量, kg ; t_{iron} 为铁水温度, $^{\circ}\text{C}$; $[C_{iron}]$ 为铁水的 $w[\text{C}]$, $\%$; $[C_{steel}]$ 为熔池中钢水的 $w[\text{C}]$, $\%$; μ_{CO} 为铁水中碳氧化为 CO 的比例, $\%$; μ_{CO_2} 为铁水中碳氧化为 CO_2 的比例, $\%$; ΔH_{CO} 为碳氧化生产 CO 的焓变, kJ/kg ; ΔH_{CO_2} 为碳氧化生产 CO_2 的焓变, kJ/kg ;

该电弧炉的炉内金属量为 120 t, 收得率为 90%。铁水初始碳含量为 4.3%, 目标钢水 $w[\text{C}]$ 为 0.06%, 铁水入炉温度为 1 300 $^{\circ}\text{C}$ 。废钢与铁水的比热容分别取 0.699 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 和 0.837 $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$ 。根据热平衡计算得出, 当前废钢的平均预热温度为 647.57 $^{\circ}\text{C}$, 低于该竖式电弧炉设计可达到的 800 $^{\circ}\text{C}$ 预热水平。结果表明, 现行工艺下废钢预热效果未达预期, 预热效率存在提升空间。研究显示, 废钢预热效果主要受预热时间、竖井内烟气温度等因素影响^[21-22]。因此, 预热工艺需综合考虑上述因素, 以实现更接近设计的废钢预热温度。

在该竖式电弧炉中, 废钢预热时间主要受加料节奏制约。具体工艺流程如图 1 所示, 每炉冶炼开始时, 铁水通过兑铁车经炉门加入电弧炉内, 在此期间, 电弧炉暂停通电, 但推钢机保持运行, 可继续执行推料操作。本设备采用分批加料制度: 向前三车加入竖井的废钢将参与本炉冶炼, 而推钢后续加入的三车废钢则作为下一炉的第一批料。因此, 从通电开始至推钢操作前的时间段, 为本炉第二批废钢的带电预热阶段; 推钢之后至停电时段, 则为下一炉第一批废钢的带电预热阶段。已于竖井内预热完毕的第一批废钢, 在通电前加铁水过程中被推入熔池。综上, 废钢在竖井内的总预热时间取决于其进入竖井的时刻与推钢时间点之间的间隔, 这一时序关系直接影响废钢的预热效果。

电弧炉系统中的谐波特征可作为推断熔池熔清状态的有效辅助判据^[23]。图 2 展示了某一典型炉次的谐波变化情况。该炉次中, 前三车废钢结合上一炉加料时序, 其带电预热时间至少持续 13 min (即从进入竖炉至停电出钢的时段)。由于预热时间充足, 熔化阶段用时较短。在此情况下, 推钢操作起

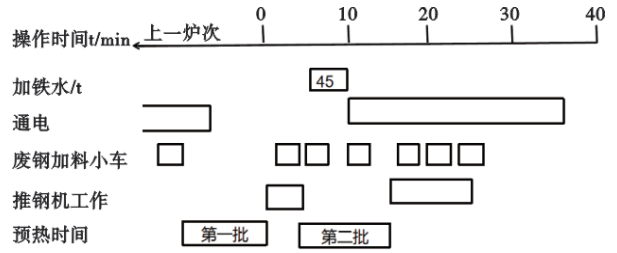


图 1 电弧炉典型炉次的操作图

Fig. 1 Operational diagram of a typical heat in an electric arc furnace

始时间较早, 符合常规冶炼逻辑。然而, 后续三车炉料的实际带电预热时间仅为 5 min 至 11 min, 明显短于前三车, 导致其预热效果较差。因此, 该批炉料熔化时间延长 (约 8 min), 该过程中电弧稳定性下降, 电能利用率较低。

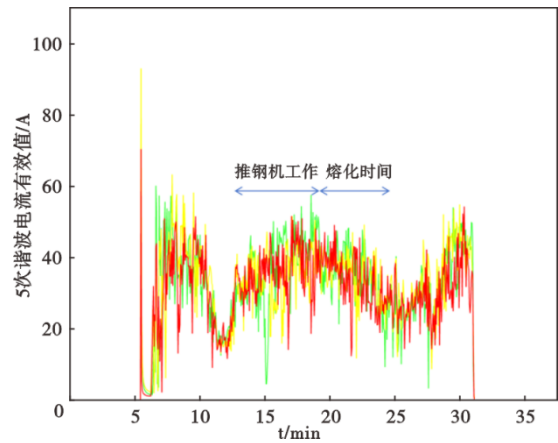


图 2 电弧炉典型炉次的操作与谐波图

Fig. 2 Operational and Harmonic Diagram of a Typical Heat in an Electric Arc Furnace

竖井内的烟气温度与供氧操作制度密切相关。在电弧炉炼钢过程中, 能量损失的一个重要原因在于熔池内 CO 二次燃烧率偏低。研究表明, 碳发生二次燃烧所释放的热量可达一次燃烧的 2.3 倍^[24], 其对冷废钢的传热效率可达到 65%^[25]。在高铁水比冶炼条件下, 熔池内生成足量 CO , 通过优化供氧制度可促进 CO 在竖井内发生二次燃烧, 这不仅有助于提升废钢预热温度, 也能显著提高铁水化学能的利用效率。该电弧炉的具体供氧制度如图 3 所示。

可以看出, 对于铁水比为 38% 的炉次, 高氧操作起始时间明显滞后, 通常在通电约 20 min 后才过渡至高氧阶段。然而, 基于该炉次的熔池条件, 前期已具备实施高氧脱碳的工艺基础。此外, 从图 3

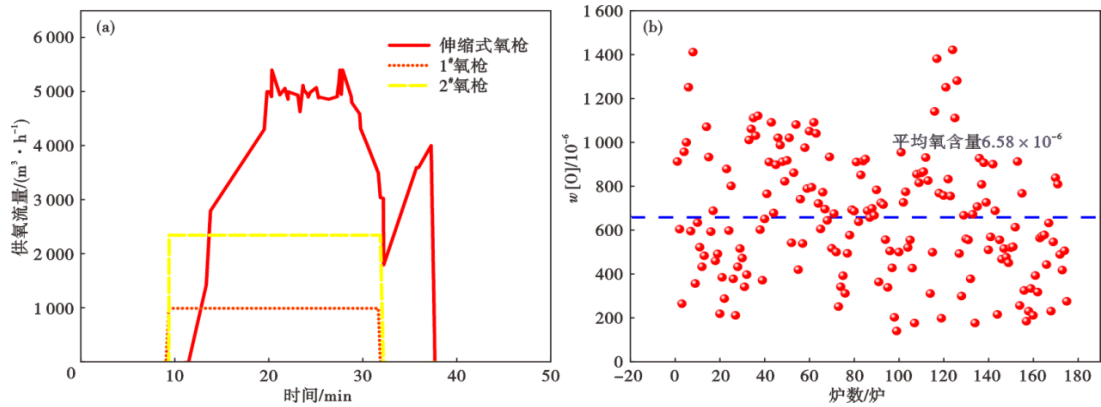


图3 加铁水炉次的典型供氧操作曲线(a)和终点氧分布(b)

Fig. 3 Typical oxygen blowing curve (a) and endpoint oxygen distribution (b) in hot metal charging heat

所示的供氧曲线可推断,冶炼终点存在过氧化现象。在冶炼末期,熔池碳含量已显著降低,但供氧强度仍维持在较高水平,导致钢水过氧化^[26]。

现有工艺的问题在于冶炼电耗高,供氧制定不合理,以及终点过氧化。

2 新工艺制定

基于前文对现有工艺的分析,新工艺的优化应聚焦于冶炼过程中的加料节奏与供氧制度的协同调控。如图4所示,无废钢预热的条件下,当铁水比为47.68%时,电能占总能量输入中占比约23%,而化学能占比超过45%^[1]。高铁水比并配合废钢预热的冶炼条件下,电能的作用转为辅助,主要用于补偿物理热与化学热的不足。

电炉加铁水炉况通常在冶炼的开始加入,铁水的温度低于熔池中留钢的钢液温度因此可以迅速开启氧枪增加化学能的输入来使炉温迅速升高,但是当高铁水比时供氧迅速提高会导致炉渣返干,这是因为碳氧反应剧烈消耗过多FeO。在冶炼的后

期因为C含量的下降,氧气会选择性地氧化Fe,导致炉渣变差,需要降低供氧流量。所以供氧策略为在不返干的情况下尽快提高供氧量,然后在脱碳的转变点逐步降低供氧量。供氧的总量应稍高于脱碳的需要,便于充分发挥二次燃烧利于废钢预热。

2.1 制定新操作工艺

根据该电弧炉的能量输入特性,可将整个冶炼过程划分为三个主要阶段:第一阶段为铁水温度恢复期,其核心任务是将铁水迅速加热至设定的熔池目标温度;第二阶段为废钢熔化期,重点在于完成推钢操作并实现废钢的充分熔解;第三阶段为熔清升温期,旨在将熔池温度进一步提升至目标出钢温度。

对于采用热装铁水工艺的电弧炉,在第一阶段需特别考虑开始加入电炉热装铁水与电弧炉熔池内留驻钢液之间的温度差异,为确保冶炼过程顺利启动,需在初始几分钟内将熔池温度迅速提升至1530℃左右的目标值。因此,在冶炼起始阶段还需计入为补偿铁水温度而需额外投入的能量,记为

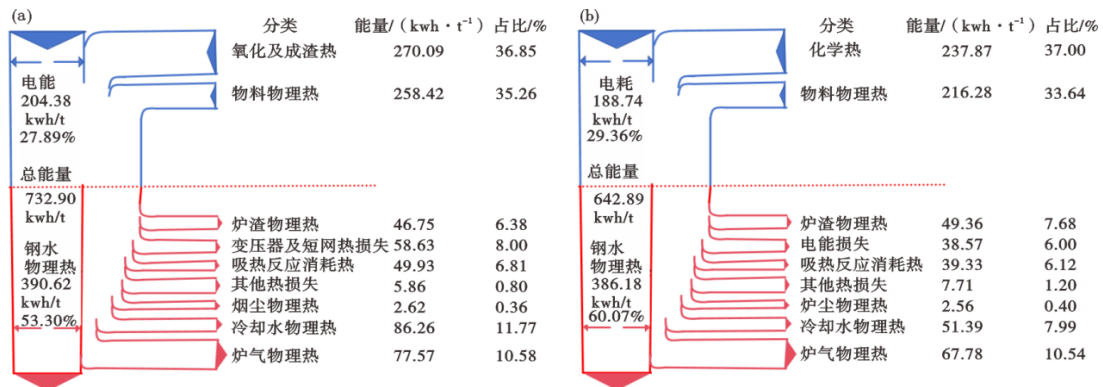


图4 工艺优化之前的热平衡(a)和工艺优化之后的热平衡(b)

Fig. 4 Heat balance before process optimization (a) and heat balance after process optimization (b)

W_{iron} , 以满足热补偿所需。

$$W_{iron} = C_{iron} M_{iron} (t_{mb} - t_{iron}) \quad (3)$$

式中, t_{mb} 为熔池的保持温度变化, $^{\circ}\text{C}$ 。

在第二阶段, 即废钢熔化期, 该过程主要包括推钢机运行时间及熔池内废钢的熔化时间。为实现高效冶炼, 需实施恒炉温操作策略, 确保能量输入速率与加料节奏精确匹配。电弧炉系统的热损失包括通过炉门逸散、冷却水带走以及热辐射等形式损失的能量, 同时还需供给废钢熔化所需的热量。电弧炉实际热损失难以直接测定, 通常无加热条件下钢液的温降速率估算系统总热损失。据此, 为维持目标炉温, 需向电弧炉输入的能量可表示为:

$$W_1 = C_{steel} M_{steel} \Delta t \quad (4)$$

式中, C_{steel} 为钢液的比热容, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; M_{steel} 为电弧炉中钢液的质量, t ; Δt 为温度变化, $^{\circ}\text{C}$ 。 W_{steel} 为单位时间进入电弧炉熔池中的废钢熔化然后升温至熔池温度需要的能量。

$$W_{steel} = M_{steel} [C_{steel,1} (t_m - t_{ph}) + C_{steel} (t_{mb} - t_m)] + \Delta H \quad (5)$$

式中, $C_{steel,1}$ 为废钢的热容, $\text{kJ}\cdot(\text{kg}\cdot\text{K})^{-1}$; t_m 为废钢的熔点, $^{\circ}\text{C}$; ΔH 为废钢的熔化焓, kJ/Kg 。

第三阶段升温期则在预定时间将钢液升温到出钢温度。在电弧炉冶炼的后期炉料已经熔化, 钢水的一定时间内升温到出钢温度, 升温需要的能量为 W_{tr} 。

$$W_{tr} = C_{steel} M_{steel} (t_{tp} - t_{mb}) \quad (6)$$

式中, t_{tp} 为电弧炉的出钢温度, $^{\circ}\text{C}$ 。

根据冶炼的脱碳任务简化得到氧气的用量 V_{O_2} 。

$$V_{O_2} = ([C_{steel}] M_{steel} + [C_{iron}] M_{iron}) (0.5\mu_{CO} + \mu_{CO_2}) / 22.4 \quad (7)$$

氧枪的化学热为 W_{O_2}

$$W_{O_2} = \sum_i Q_i \cdot m_i + m_{ng} J_{ng} \quad (8)$$

式中, m_i 为第 i 元素的质量, kg ; Q_i 为第 i 元素的氧化放热, kJ ; m_{ng} 为天然气的质量, kg ; J_{ng} 为天然气的热值, kg/kJ 。

2.2 工艺优化

加料小车开始操作时, 每车的间隔时间是程序固定的, 通过减少通电过程中的加料时间减少加料对炉内扰动来保证电弧的热效率, 将每炉加废钢从 6 车废钢, 每车废钢 12 t 调整为 5 车废钢, 每车 14 t 废钢。铁水从 45 t 调整为 48 t, 理论铁水比从 38.46% 增加到 40.68%。新的工艺流程如图 5 所示

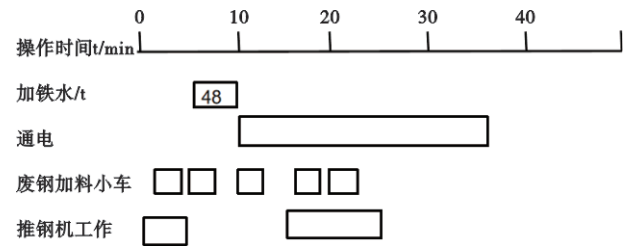


图 5 新工艺操作图

Fig. 5 Operational diagram of the new process

在本工艺中, 后两车加入竖井的废钢将于下一炉次中投入熔池, 因此, 本炉次的废钢熔化与熔清升温阶段所持续的时间, 实质上决定了下一炉次中前三车废钢的最短带电预热时间。由此可见, 该阶段影响电耗与废钢预热的效果, 为优化两阶段之间的平衡, 将该阶段时间适当延长至 10 min 左右, 以保障后续料车中所加入废钢获得足够的预热时间。在以总通电时间 24 min、吨钢电耗 188.36 kWh、总电耗 20 720 kWh 为基准的条件下, 冶炼阶段的划分及相应电耗分配见表 3。

供氧制度满足开始时从低流量启动避免炉渣返干, 在冶炼末期降低流量避免终点过氧化的原则, 喷碳视情况在升温期喷, 以与伸缩氧枪匹配的碳枪为主 供氧操作: 伸缩氧枪, 通电第 3 min 启动, 选择流量 1 500 m^3/h , 3 min 后过渡到 4 000 m^3/h 保持

表 3 冶炼阶段的划分及相应电耗分配

Table 3 Division of smelting stages and corresponding power consumption allocation

冶炼阶段	时间长度/min	电耗区间/kWh	累计电耗/kWh	平均功率/MW	主要功能
兑铁水阶段	6-8	0	0	0	兑入铁水 推入前 3 车废钢
启动-恢复阶段	8	7 500	7 500	50	通电, 熔化第一批炉料, 恢复炉温
推钢阶段	5	4 000	11 500	48	推入第二批炉料, 熔化期
熔化阶段	5	4 720	16 220	56.64	主熔化期
升温阶段	5	4 500	20 720	54	
合计	30-32	20 720		51.8	-

5~6 min 在推钢进行到一半时切换到 6 000 m³/h, 在升温末期最后 2~3 min 降到 5 000 m³/h。2 号氧枪通电第 3 min 启动, 选择流量 1 200 m³/h, 过渡 2 min 后切换到 2 500 m³/h 使用到结束。喷碳视情况在升温期喷, 以与伸缩氧枪匹配的碳枪为主。辅料操作: 在通电之后视情况, 采取多次加入的原则。操作曲线如图 6 所示

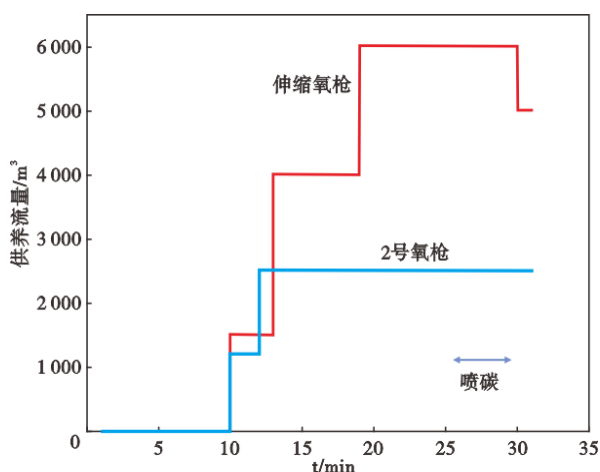


图6 供氧喷碳操作曲线

Fig. 6 Oxygen blowing and carbon injection operation curve

3 结果与讨论

于 2025 年 3 月 10 日至 3 月 20 日期间开展了工业试验, 冶炼过程整体运行平稳。在采用优化工艺后所生产的炉次中, 共计统计 202 炉。为排除非典型生产状态的干扰, 剔除开炉、停炉阶段及废钢投加量异常的炉次, 最终选取投加 5 车废钢及 48 t 铁水的炉次作为有效样本, 共计 135 炉。整体生产情况见表 4。

3.1 电耗

工艺优化之后, 吨钢电耗分布如图 7 所示。

吨钢电耗的平均值从 204 kWh 下降到 188.7 kWh, 吨钢电耗下降了 15.3 kWh。铁水比从 38.1% 上升到 40.9%, 上升了 2.8%。工艺优化之前每增加 1% 的铁水吨钢电耗下降 2.8 kWh, 则排除铁水比的影响工艺优化使吨钢电耗下降了 7.46 kWh。如果采用增加 1% 的铁水降低吨钢电耗 4 kWh 的经验值, 则排

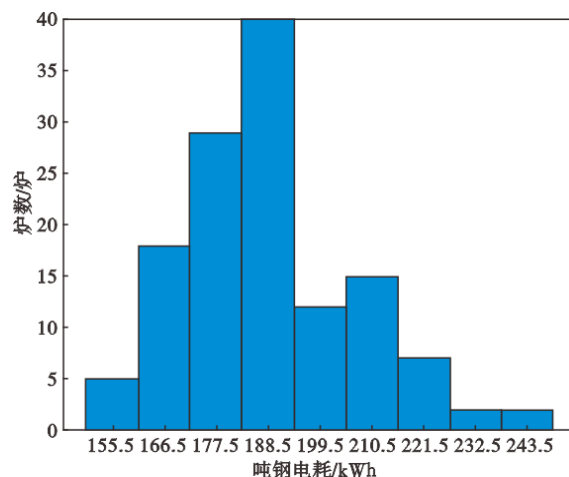


图7 吨钢电耗分布图

Fig. 7 Distribution of electricity consumption per ton of steel

除铁水比的影响工艺优化使吨钢电耗下降了 4.1 kWh。采用新工艺之后吨钢电耗显著下降。

3.2 冶炼时间

工艺优化之后的冶炼周期相较工艺优化之前大幅降低, 平均冶炼周期从 46.29 min 降低到 38.45 min。通电时间也从 26 min 降低到 23 min, 吨钢电耗降低的主要途径是通电时间的有效缩短, 原工艺与新工艺冶炼时间见表 5。

3.3 供氧分析

如图 8 所示, 终点 $w[O]$ 从工艺优化之前的 6.58×10^{-6} 降低到 5.19×10^{-6} , 降低了 $1.39 \times 10^{-4} \%$ 。终点过氧化情况得到改善。

4 结论与展望

1) 通过对电弧炉冶炼工况的分析, 发现当前基于全废钢工艺简单调整而来的操作模式难以适应高铁水冶炼要求, 主要问题体现在两方面: 其一, 冶炼电耗仍处于较高水平, 铁水的加入未能实现预期的降耗效果; 其二, 冶炼终点存在明显的过氧化现象。针对上述问题, 本研究通过系统优化加料节奏、供氧制度及加料小车运行模式, 制定了一套适应高铁水冶炼的新工艺。

2) 针对现有工艺的不足, 本研究实施了旨在优化加料节奏与精细化冶炼进程的改进方案: 一方面, 将每炉加料车次由 6 车精简至 5 车, 以优化加料

表4 生产指标

Table 4 Production performance metrics

料篮数量/个	炉数/炉	出钢量/t	吨钢电耗/kWh	吨钢氧耗/m ³	终点 $w[O]/10^{-6}$	冶炼周期/min	铁水/t	铁水比/%
5	130	109.82	188.70	26.01	519.09	38.45	48 t	40.9

表5 原工艺与新工艺冶炼时间表

Table 5 Smelting timeline: conventional vs. novel process

工艺	平均时间	最大时间	最小时间
原工艺	46.29	56	35
新工艺	38.45	52	36

制度;另一方面,将冶炼过程系统性解构为“温度恢复期”、“废钢熔化期”与“升温期”三个阶段,并据此进行分段工艺调控。实践结果表明,上述措施有效缩短了冶炼周期。

3)工艺优化后,生产指标显著改善:吨钢电耗由 204 kWh 降低至 188.7 kWh;冶炼周期由 46.29 min 缩短至 38.45 min;终点氧含量由 6.58×10^{-6} 降至 5.19×10^{-6} 。

4)上述优化实践表明,通过调整关键工艺参数,可实现能耗降低、生产节奏加快和钢水质量提

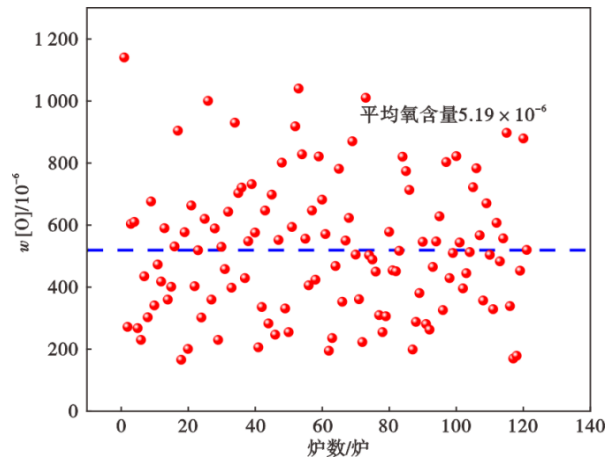


图8 加铁水炉次终点氧分布

Fig. 8 Endpoint oxygen distribution in hot metal charging heat

升,为竖式电弧炉高铁水比冶炼的高效化生产提供了有益的技术思路与实践依据。

参考文献

[1] 徐阿帆,杨俊峰,王小平,等. 100 t 电弧炉能效优化工艺实践[J]. 中国冶金,2023,33(3):109-116.

[2] 刘璐华. 水平连续加料电弧炉废钢预热及能量结构优化的研究[D]. 赣州:江西理工大学,2024.

[3] 胡航. 多元炉料条件下电弧炉炼钢过程炉体传热数值模拟研究[D]. 长沙:中南大学,2022.

[4] Schubert C, Büschgens D, Eickhoff M, et al. Development of a fast modeling approach for the prediction of scrap preheating in continuously charged metallurgical recycling processes [J]. Metals, 2021, 11(8): 1280.

[5] Xiao P C, Jin Y X, Zhu L G, et al. Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods[J]. Metals, 2024, 14(8): 913.

[6] 王少强,操龙虎. 电炉废钢预热技术及其节能效益分析[J]. 工业加热,2022,51(7):41-45.

[7] 姚聪林. 全废钢连续加料电弧炉快速熔炼的基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2023.

[8] 习小军. 电弧炉熔池内废钢快速熔化机理[D]. 北京:北京科技大学,2021.

[9] 张雷,王小平,蔺学浩. 100 t 电弧炉提高铁水比生产实践与讨论[J]. 河南冶金,2020,28(6):51-53.

[10] 张海霞,杨密平,杨波,等. 莱钢 50 t 电弧炉最佳铁水比的研究[J]. 冶金丛刊,2010,(3):4-6.

[11] 田博涵,魏光升,朱荣,等. 电弧炉电能需求的生产实践与评价[J]. 中国冶金,2023,33(1):131-138.

[12] 吴耀光,肖步庆,朱立光,等. 电炉炼钢钢铁原料的现状分析与展望[J]. 钢铁,2021,56(11):55-62.

[13] 朱薛辉,朱庆桂,周旋,等. 90 吨电弧炉高效化研究与生产实践[J]. 工业加热,2023,52(5):7-10+20.

[14] 刘征,张文怡,花皓. 铁水热装电弧炉的运行优势[J]. 冶金设备,2015,(3):53-57.

[15] 谢孝容,陈代兵,钟文根. 45 t 电弧炉转炉化改造与生产实践[J]. 工业加热,2023,52(5):15-20.

[16] 吴红广,王新志,蔺学浩. 安钢 100 t 电弧炉高效冶炼技术的研究与应用[J]. 河南冶金,2021,29(6):38-41.

[17] Irawan A, Kurniawan T, Alwan H, et al. An energy optimization study of the electric arc furnace from the steelmaking process with hot metal charging [J]. Heliyon, 2022, 8(11): e11448.

[18] Yang L Z, Hu H, Yang S, et al. Life cycle carbon footprint of electric arc furnace steelmaking processes under different smelting modes in China [J]. Sustainable Materials and Technologies, 2023, 35: e00564.

[19] 邹安华,王新华. 150 t Fuchs 竖式电弧炉的炉料配比对生产效率 and 产品质量的影响[J]. 特殊钢,2010,31(2):35-37.

[20] 朱荣,王新江,牛重军,等. 安钢 100 t 竖式电弧炉高热装铁水比的工艺实践[J]. 特殊钢,2008,29(1):40-42.

[21] Xiao P C, Jin Y X, Zhu L G, et al. Comparative study of heat transfer simulation and effects of different scrap steel preheating methods[J]. Metals, 2024, 14(8): 913.

[22] 潘涛. 连续加料电弧炉废钢预热效率的研究[D]. 沈阳:东北大学,2019.

[23] 方昕玥,王斌,喻敏,等. 交流电弧炉的间谐波检测及状态判断[J]. 电测与仪表,2020,57(13):137-143.

[24] 张殿军,梁世勇,吴红广. 竖式电弧炉节能降耗技术研究[J]. 中国冶金,2005,15(12):34-36.

[25] 杨春梅,颜慧成. 电弧炉炼钢中碳氧二次燃烧的影响因素和应用[J]. 特殊钢,2004,25(6):36-38.

[26] 赵舸,胡砚斌,王雪明,等. 电炉铁水比对供氧量及其利用系数的影响研究[J]. 山东冶金,2023,45(4):22-24.