

300 t 转炉 IF 钢低枪位低终点氧冶炼工艺实践

邱在军

(马钢股份公司第四钢轧总厂, 马鞍山 243000)

摘要 在脱磷理论分析基础上, 采用低枪位冶炼和低终点氧出钢, 增大出钢口直径和降低终点温度, 并优化底吹工艺降低碳氧积, 取得了较好的脱磷效果。生产应用结果表明: 采用增大出钢口和优化底吹工艺后, 300 t 转炉出钢时间缩短至 5.1 min, 缩短了 1.9 min; IF 钢终点温度降低至 1 670.6 °C, 降低了 17.4 °C; 碳氧积降低至 13.3, 降低了 8.9; 终点氧降低至 422.5×10^{-6} 。在铁水磷升高 0.010%, 枪位降低 30 cm, 终点氧降低 153.3×10^{-6} 的条件下, 工艺优化后的平均终点磷含量为 0.0124%, 能够满足转炉冶炼 IF 钢对脱磷效果的要求。

关键词 300 t 转炉 脱磷 出钢时间 终点温度 碳氧积 终点氧

Process Practice of 300 t BOF Smelting with Low Lance Position and Low End-Point Oxygen for IF Steel

Qiu Zaijun

(NO. 4 Steelmaking and Rolling General Plant of Masteel Co Ltd, Ma'anshan 243000)

Abstract On the basis of theoretical analysis of dephosphorization, by using low lance position smelting and low end-point oxygen tapping, increasing diameter of tapping hole and reducing the end-point temperature, and optimizing bottom blowing process to reduce the carbon-oxygen equilibrium, a better dephosphorization effect is achieved. The results of production and application show that after adopting large tapping hole and optimizing bottom blowing process, the tapping time of 300 t converter is shortened to 5.1 min, shortened by 1.9 min; the end-point temperature of IF steel is reduced to 1 670.6 °C, reduced by 17.4 °C; the carbon-oxygen product is reduced to 13.3, reduced by 8.9; the end-point oxygen is reduced to 422.5×10^{-6} . Under the condition of increase of hot metal phosphorus by 0.010%, decrease of lance position by 30 cm and decrease of end-point oxygen by 153.3×10^{-6} , the average end-point phosphorus content after process optimization is reduced to 0.0124%, which can meet the requirements of dephosphorization effect of IF steel smelting in converter.

Material Index 300 t BOF, Dephosphorization, Tapping Time, End-Point Temperature, Carbon-Oxygen Equilibrium, End-Point Oxygen

马钢股份公司第四钢轧总厂炼钢分厂现有 3 座 300 t 顶底复吹转炉, 采用低枪位吹炼有效抑制了转炉喷溅。

随着用户对产品性能要求越来越高, 对 IF 钢的洁净度的要求日益严格, 必须尽力减少钢中非金属夹杂物数量和尺寸。转炉终点氧是产生铸坯内生氧化物夹杂的根源, 且转炉终点氧含量过高还会降低钢铁料消耗。因此在转炉冶炼过程中应尽量降低终点氧, 对于提升 IF 钢产品内部质量有着重要意义^[1]。

但转炉低枪位冶炼和低终点氧出钢, 脱磷任务明显加重。因此, 如何有效、稳定地提高转炉冶炼过程的脱磷能力成为解决上述问题的关键。本文通过增大出钢口直径, 缩短出钢时间, 从而降低终点温度, 并严格控制下渣。同时对转炉底吹进行优化, 降低碳氧积, 从而降低终点氧, 工艺优化后转炉终点磷含量低于工艺优化前, 能够满足转炉冶炼 IF 钢对脱磷效果的要求。

1 IF 钢脱磷面对的问题分析

1.1 环保政策持续收紧形势下的低枪位冶炼

转炉冶炼过程应遵循“炉渣不返干、不喷溅、快速脱碳、熔池均匀升温”的枪位控制原则。枪位过高, 渣中氧化铁含量过高, 加之脱碳速度快, 容易引起大喷或连续喷溅^[2]。马钢 300 t 顶底复吹转炉使用副枪测量, 过程全自动控制炼钢, 实现标准化作业, 工艺优化后的过程氧枪基准枪位降低 30 cm 的流量、底吹流量如图 1 所示。开吹供氧 300 ~ 500 m³ 时加入第一批料, 全部石灰、生白云石用量的 80%, 用于平衡冶炼前期温度, 抑制喷溅, 提高前期脱磷率, 供氧 2 500 ~ 2 800 m³ 时加入第二批料即剩余 20% 的石灰、生白云石。计算机中设定的炉渣碱度不变。与优化前工艺相比, 氧枪基准枪位降低了 30 cm, 有效抑制了转炉喷溅。根据文献[3]研究可知, 氧枪控制是影响脱磷效果的关键因素, 低枪位冶炼增大

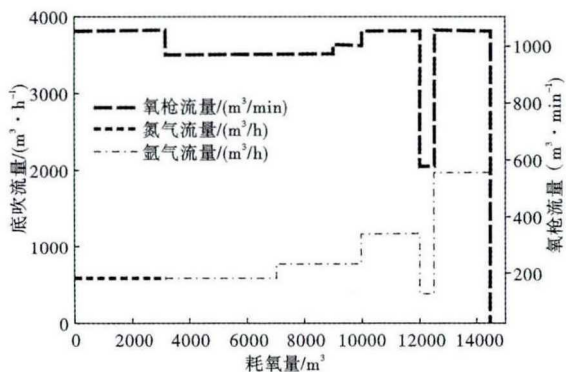


图 1 工艺优化后枪位降低 30 cm 时底吹和氧枪流量示意图
Fig. 1 Schematic diagram of lance and bottom blown flow rate after process optimization with lance position decreasing by 30 cm

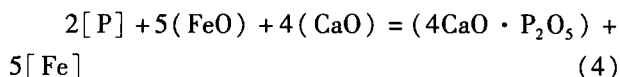
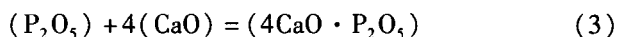
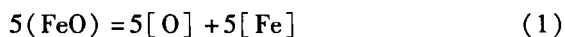
了氧枪穿透深度,升温迅速,使脱碳反应提前到来,缩短了前期低温脱磷效果好的时间,抑制了脱磷反应的进行,低枪位冶炼的终点磷含量将更高。

1.2 高洁净度条件下的低终点氧出钢

在高炉炼铁时,铁矿石中的磷几乎全部被还原进入铁水,可见氧化气氛是影响脱磷效果的关键因素。通常转炉钢中碳含量控制炉渣氧化性和钢水氧含量,炉渣氧化性与钢水氧含量互相影响,并影响终渣全铁含量。随着转炉终点碳的降低,熔池中的氧含量升高,炉渣氧化性增强,有利于脱磷;但转炉终点碳过低,容易造成钢水过氧化,钢铁料消耗增加,同时也增加了脱氧合金化成本以及内生氧化物夹杂^[46]。适宜的转炉终点氧含量区间,在保证脱磷效果同时,尽可能按下限控制,减少内生氧化物夹杂的产生,提高钢水洁净度。

2 脱磷理论分析

脱碳反应在熔池进行,脱磷反应在渣-金界面进行。脱磷反应由式(1)、(2)、(3)环节组成,综合可得式(4),其反应平衡常数 K^{θ} 可表示为式(5)^[7],熔池搅拌能量公式见式(6)^[8]。结合式(1)-(5)可知,高碱度、高(FeO)、大渣量、适当低的温度、良好流动性的炉渣及时形成、超声速氧气射流和底吹搅拌的良好动力学条件,可为脱磷创造良好的条件^[7,9]。



$$\lg K^{\theta} = \lg \frac{a_{4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5}}{[\text{P}]^2 a_{\text{FeO}}^5 a_{\text{CaO}}^4} = \frac{40067}{T} - 15.06 \quad (5)$$

$$\varepsilon = 0.0285 \frac{QT}{W} \cdot \lg \left(1 + \frac{Z}{H} \right) \quad (6)$$

式中: ε - 搅拌能量/($\text{W} \cdot \text{t}^{-1}$); Q - 底吹气体量/($\text{m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$); W - 钢水质量/t; T - 钢水温度/K; Z - 钢水深度/cm; $H = 148 \text{ cm}$, 相当于 $1 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时钢水的深度。

3 铁水条件

工艺优化前后铁水成分平均值如表 1 所示,可见工艺优化后的铁水中的磷含量比工艺优化前的铁水磷含量高 0.010%。

4 工艺优化措施

4.1 降低终点温度

温度对脱磷的影响从热力学角度分析,脱磷反应是放热反应,高的熔池温度会导致渣-金磷分配比降低,对磷从钢水向炉渣的转移不利,高温不利于化学反应向脱磷方向进行;但从动力学角度分析,高温将降低炉渣粘度,加速石灰、轻烧白云石、烧结矿等造渣料的熔化,加强渣-金界面反应,高温有利于提高脱磷反应速度^[10]。随着终点出钢温度的降低,脱磷反应平衡常数增大,渣-金磷分配比增大,炉渣脱磷能力增强。降低终点出钢温度有利于降低终点磷含量,是提高脱磷效率的重要途径^[11]。

为了降低终点出钢温度,在满足进 RH 温度不降低的条件下,可以通过降低出钢过程温降来实现。增大出钢口直径,采用大出钢口出钢,缩短出钢时间,减少出钢过程温降,从而降低转炉终点温度。采用大出钢口出钢后生产 1064 炉,与优化前 880 炉出钢时间和转炉终点温度进行了对比分析,优化效果如图 2、图 3 所示。由图 2 可知,平均出钢时间由出钢口优化前的 7.0 min,减少到出钢口优化后的 5.1 min,平均出钢时间减少了 1.9 min。作业指导书中 IF 钢转炉终点连浇温度由优化前的 1 665 ~ 1 685 $^{\circ}\text{C}$,调整为优化后的 1 660 ~ 1 675 $^{\circ}\text{C}$;单开或者换中间包第一炉温度由优化前的 1 675 ~ 1 695 $^{\circ}\text{C}$,调整为优化后的 1 665 ~ 1 680 $^{\circ}\text{C}$ 。由图 3 可知,IF 钢平均终点温度由出钢口优化前的 1688.0 $^{\circ}\text{C}$,减少到优化后的 1 670.6 $^{\circ}\text{C}$,

表 1 工艺优化前后铁水成分对比/%

Table 1 Comparison of hot metal compositions before and after process optimization/%

工艺	C	Si	Mn	P	S
优化前	4.58	0.41	0.18	0.108	0.022
优化后	4.42	0.39	0.14	0.118	0.023

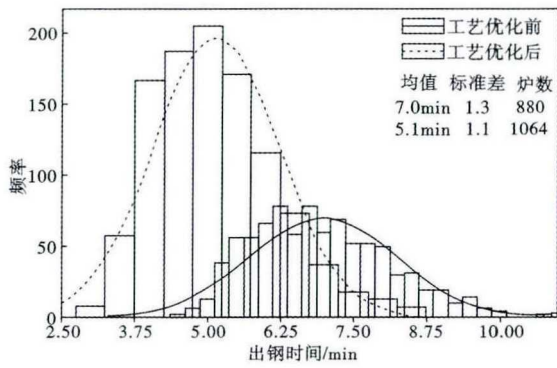


图2 工艺优化前后转炉出钢时间对比

Fig. 2 Comparison of BOF tapping time before and after process optimization

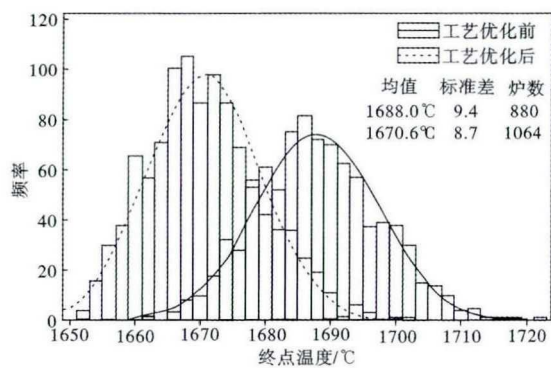


图3 工艺优化前后转炉钢水终点温度对比

Fig. 3 Comparison of BOF liquid end-point temperature before and after process optimization

平均出钢温度降低了 $17.4\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

减少出钢过程下渣是减少后工序回磷的关键措施。为降低大出钢口对转炉下渣回磷的影响,在生产IF钢时采用红外下渣检测,首先在出钢前带挡渣帽减少前期下渣;其次出钢后期采用挡渣锥挡渣,防止出钢后期炉渣进入钢包;最后在挡渣锥挡渣效果较差时,使用气动挡渣,控制转炉出钢的下渣量。在出钢过程中将小粒石灰加入钢包,增加钢包中炉渣碱度,抑制钢水回磷。同时,每炉出完钢查看出钢口形状,加强对出钢口的喷补维护,保证出钢口形状规则,从而保证挡渣效果。

4.2 优化底吹搅拌

底吹搅拌可提高反应效率,促进反应趋于平衡。由式(6)可知,增加底吹强度,可增大搅拌能,缩短混匀时间,促进渣-金间的脱磷反应,提高脱磷效果。但据文献[12]研究,底吹搅拌对脱磷的影响不仅与底吹强度

有关,还与底枪的使用状况有明显的关系。在相同的底吹强度条件下,底枪被炉渣覆盖后造成部分堵塞,气流阻力增加,流速减小,底吹气体的搅拌能力减弱,底枪畅通时的磷的分配比明显高于底枪部分堵塞时的磷的分配比^[12]。

在相近的转炉终点碳含量条件下,要获得较低的终点氧含量,必须有较低的终点碳氧积,而碳氧积的高低与转炉复吹效果有直接的关系^[13]。底吹供气元件是底吹发挥效果的核心部件,马钢300 t转炉底吹采用环缝式供气元件,工艺优化前后底吹风口布置如图4所示(单位:mm)。兑铁水、加废钢、硅锰氧化期、翻渣、溅渣护炉过程底吹气体为氮气,碳氧化期、辅吹、后搅拌、副枪测量、出钢过程底吹气体为氩气,底吹搅拌强度为 $0.02\sim 0.16\text{ m}^3/(\text{t}\cdot\text{min})$ 。工艺优化前到炉役中后期,熔池部位侵蚀较快,进行补炉底作业,容易造成底吹风口被覆盖或堵塞,难以保证底吹气体畅通,实际底枪吹入的气体从炉衬耐火材料间隙形成的支路散失,并未进入熔池,导致复吹效果变差。

结合上述问题,在优化底吹方面采取了如下措施:(1)将底枪由12支调整为16支,减少单支底枪的流量,缓解底枪气体出口处流量对底吹枪周边耐火材料的局部后坐力冲刷;(2)将底枪布置在炉底双圆环上调整到三圆环上;(3)将底枪布置在耳轴两侧的,向炉底中心转移,有效缓解了熔池、耳轴部位的侵蚀;(4)辅吹阶段,随着熔池碳含量的降低,熔池搅拌减弱,适时增加了底吹氩气供气量,流量由 $792\sim 1\,188\text{ m}^3/\text{h}$ 提高至 $1\,188\sim 1\,980\text{ m}^3/\text{h}$,改善了辅吹阶段反应动力学条件;(5)适当增加了溅渣护炉阶段底吹氮气供气量,流量由 $396\sim 792\text{ m}^3/\text{h}$ 提高至 $792\sim 990\text{ m}^3/\text{h}$,减少底吹枪上渣层厚度,改善底枪的裸露程度;(6)规定炉长将接班底吹状况拍照上传,督促和强化了操作工维护底吹意识。

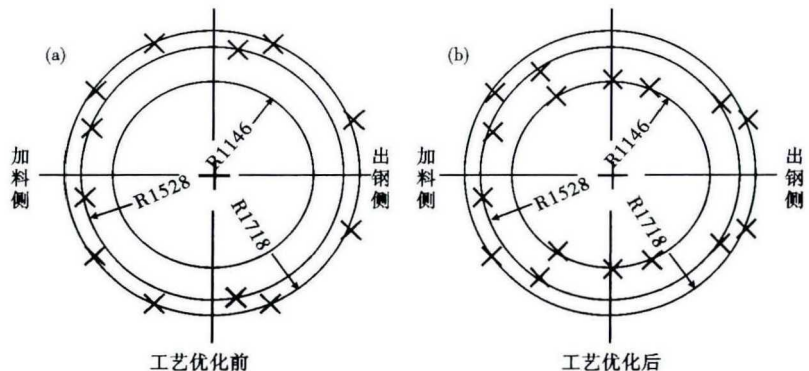


图4 工艺优化前(a)后(b)转炉底吹风口布置对比

Fig. 4 Comparison of BOF bottom blowing tuyeres arrangement before (a) and after (b) process optimization

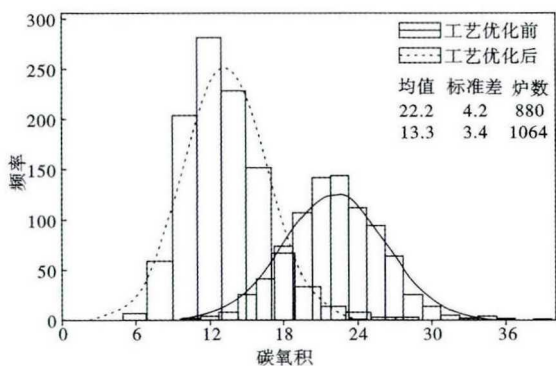


图 5 工艺优化前后转炉钢水碳氧积对比

Fig. 5 Comparison of BOF liquid carbon-oxygen product before and after process optimization

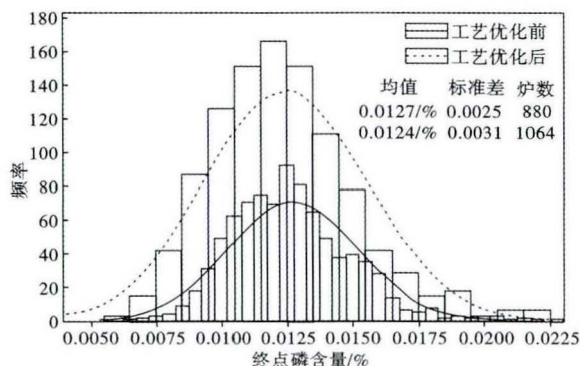


图 7 工艺优化前后转炉钢水终点磷含量对比

Fig. 7 Comparison of BOF liquid end-point phosphorus content before and after process optimization

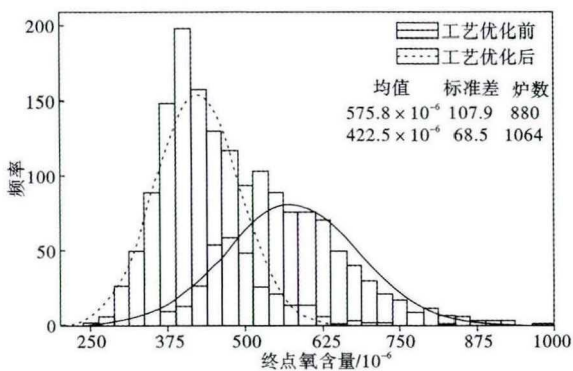


图 6 工艺优化前后转炉钢水终点氧含量对比

Fig. 6 Comparison of BOF liquid end-point oxygen content before and after process optimization

优化转炉底吹工艺后生产 1064 炉,与优化前 880 炉碳氧积、终点氧含量进行了对比分析,优化效果如图 5、6 所示。由图 5 可知,平均碳氧积由底吹工艺优化前的 22.2,减少到底吹工艺优化后的 13.3,平均碳氧积减少了 8.9。由图 6 可知,平均终点氧含量由底吹工艺优化前的 575.8×10^{-6} ,减少到底吹工艺优化后的 422.5×10^{-6} ,平均终点氧含量减少了 153.3×10^{-6} 。

5 生产应用效果

采用增大出钢口、优化转炉底吹工艺后生产 1064 炉,与优化前 880 炉转炉终点磷含量进行了对比分析,优化效果如图 7 所示,由图 7 可知工艺优化后转炉终点磷含量的平均值为 0.012 4% 略低于工艺优化前 0.012 7%,能够满足转炉冶炼 IF 钢对脱磷效果的要求,为马钢 300 t 转炉 IF 钢的稳定高质量生产打下了坚实的基础。

6 结论

(1) 通过增大出钢口直径,平均出钢时间缩短至 5.1 min,平均出钢时间缩短了 1.9 min,IF 钢平均终点

温度降低至 1 670.6 ℃,平均终点温度降低了 17.4 ℃。

(2) 通过优化转炉底吹工艺,平均碳氧积降低至 13.3,平均碳氧积降低了 8.9;平均终点氧降低至 422.5×10^{-6} ,平均终点氧降低了 153.3×10^{-6} 。

(3) 面对环保和洁净度提升的双重压力,在铁水磷含量升高 0.010%,冶炼枪位降低 30 cm,平均终点氧降低 153.3×10^{-6} 的条件下,通过增大出钢口直径,优化底吹工艺后转炉终点磷含量的平均值为 0.012 4% 略低于工艺优化前 0.012 7%,能够满足转炉冶炼 IF 钢对脱磷效果的要求。

参考文献

- [1] 冯捷,包燕平,岳峰,等. 转炉冶炼 IF 钢终点氧含量控制分析[J]. 钢铁钒钛, 2010, 31(1): 74-78 + 92.
- [2] 卢凯,李具中. 炼钢用氧对转炉喷溅的影响[J]. 炼钢, 2009, 25(6): 20-21 + 49.
- [3] 张思维,曹锟,殷享兵,等. 80 t 转炉冶炼高磷钢生产实践[J]. 炼钢, 2015, 31(6): 53-56.
- [4] 林路,包燕平,王敏,等. 转炉冶炼 CaO-SiO₂-FeO 渣系中磷的行为[J]. 北京科技大学报, 2013, 35(6): 720-724.
- [5] 宋延成,刘吉刚. 150 t 转炉脱磷炉渣控制工艺的实践[J]. 特殊钢, 2018, 39(1): 44-47.
- [6] 汪成义,杨利彬,林腾昌,等. 顶底复吹转炉双渣冶炼“脱磷窗口”温度控制模型[J]. 特殊钢, 2017, 38(6): 1-5.
- [7] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2008: 370-378.
- [8] 陈家祥. 钢铁冶金学(炼钢部分)[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2009: 186.
- [9] 刘浏. 超低磷钢的冶炼工艺[J]. 特殊钢, 2000, 12(6): 20-24.
- [10] 李正嵩,张毅,谢祥,等. 水钢 100 t 转炉单渣法脱磷工艺冶炼优质钢的生产实践[J]. 特殊钢, 2016, 37(3): 39-45.
- [11] 阿不力克木·亚森,罗开敏,李晶,等. 100 t 复吹转炉终点温度控制对脱磷的影响[J]. 钢铁钒钛, 2015, 36(6): 113-116.
- [12] 康复,陆志新,蒋晓放,等. 宝钢 BRP 技术的研究与开发[J]. 钢铁, 2005, 40(3): 25-28.
- [13] 李小云,邹继新,赵元,等. 250 t 复吹转炉脱磷的研究与应用[J]. 炼钢, 2010, 26(1): 7-12 + 57.

邱在军(1987-),男,硕士(2014年昆明理工大学),工程师,2011年昆明理工大学(本科)毕业,炼钢生产技术研究。
E-mail: 844205954@qq.com

收稿日期: 2020-05-17