



转炉底吹系统工艺优化实践

宁知常, 苗振鲁, 赵友虎, 赵亮
(山钢股份济南分公司 炼钢厂, 山东 济南 250101)

摘要:针对转炉底吹系统存在的底部气体流量小、不能动态调节以及吹炼模式简单单一等问题, 分析终点碳氧积并进行回归分析, 采取优化底吹 PLC 程序、建立底吹流量控制模型、合理选用底吹曲线等措施。优化后, 平均终点碳氧积由 0.002 76 降为 0.002 64, 终点渣样中(TFe)含量下降 1.16%, 平均脱碳率提高了 3.67%。

关键词:转炉; 底吹系统; 动态模型; 碳氧积; 金属收得率

中图分类号: TF729.5

文献标识码: B

文章编号: 1004-4620(2017)06-0006-03

1 前言

目前, 国内转炉复吹技术仍处于普及和逐步提高阶段, 与国外先进技术相比仍存在不小差距。现转炉底吹系统设定的总耗氧量一般不修正, 装入量、装入制度变化或铁水成分变化时, 过程控制将发生较大变化, 这就意味着切换时机的提前或滞后, 从而影响底吹效果; 同时各个阶段的流量值基本是一成不变的, 不能根据实际需求机动灵活地调整; 原设计思路的底吹流量大小及切换时机, 仅仅考虑到了钢水对氮含量的要求, 却恰恰偏离了顶底复吹转炉复吹冶金效果的真正意义, 限制了转炉顶底复吹冶金功能的更好发挥。为此, 本研究优化转炉底吹工艺专家系统, 使底吹流量实现动态模型控制, 避免了钢水过氧化, 提高了合金、金属收得率和钢水质量。

2 工艺优化实施内容

2.1 存在的问题

过去转炉底吹系统设定的总耗氧量一般不修正^[1], 装入量、装入制度变化或铁水成分变化时, 过程控制(如脱碳速度、返干喷溅期等)将发生较大变化, 这就意味着切换时机的提前或滞后, 从而影响底吹效果; 同时各个阶段的流量值基本是一成不变, 不能根据实际需求机动灵活地调整; 最为关键的是, 原设计思路的底吹流量大小及切换时机, 仅仅考虑到了钢水对氮含量的要求, 根据钢种对氮含量的要求简单地地区分了 3 种底吹模式, 却恰恰偏离了顶底复吹转炉复吹冶金效果的真正意义, 限制了顶底复吹冶金功能的更好发挥。

目前国内转炉复吹技术仍处于普及和逐步提高

阶段, 与国外先进技术相比仍存在不小差距, 主要表现为: 1) 底部气体流量小, 搅拌力不足, 大多数钢厂的气体流量为 $0.03 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$; 2) 底部气体可调范围小, 不能按照冶炼过程需求进行流量调节和动态调整, 国外先进钢厂气体调节比高达 10 左右, 而国内多数 < 3 ; 3) 目前国内尚未形成分钢种的标准吹炼模式, 吹炼模式单一、简单。

转炉增加底吹的真正作用是增加搅拌提高底吹效果, 而判断底吹效果的最容易量化的指标就是碳氧积, 而不是控制钢中氮含量。因此原底吹系统的设计理念出发点是不对的。正确的设计理念应基于吹炼终点出钢温度、熔池深度、炉膛形状及底吹透气砖实际透气效果、吹炼终点枪位、氧气流量、炉底高度的变化而随时对底吹流量进行动态调整, 以进一步改善钢-渣反应, 促进碳的传递, 大大降低脱碳速度特性发生变化时的临界碳含量, 从而降低碳氧积, 更好地发挥顶底复吹的冶金功能, 提高顶底复吹的冶金效果, 进一步提高钢水质量。

2.2 终点碳氧积分析

转炉浴池中脱碳反应主要是: $[\text{C}] + [\text{O}] = \text{CO}$, 其平衡常数为:

$$K = \frac{P_{\text{CO}}}{[\text{C}][\text{O}]} \times \frac{1}{f_{\text{C}} \cdot f_{\text{O}}} \quad (1)$$

当 $P_{\text{CO}} = 1.013 25 \times 10^5 \text{ Pa}$ 时, $m = [\text{C}] \times [\text{O}]$ 。m 称为平衡的碳氧积。当 C 含量不高, 温度 $1 600 \text{ }^\circ\text{C}$ 左右时, $m = 0.002 5$ 。因此可由钢液的 C 含量估计氧浓度。由式(1)知, 碳氧积随 P_{CO} 的降低而减小, 所以在真空下, 钢液的碳浓度可进一步降低。

f_{C} 和 f_{O} 与浓度有关。随着碳浓度的增加, f_{O} 下降而 f_{C} 上升, 但 $[\text{C}]$ 在 $0.02\% \sim 2\%$ 范围内, $f_{\text{C}} \cdot f_{\text{O}}$ 的积变化不大, 接近于 1。因而在实际生产中取 $f_{\text{C}} \cdot f_{\text{O}} = 1$ 。则式(1)变为:

$$K = \frac{P_{\text{CO}}}{[\text{C}][\text{O}]} \quad (2)$$

收稿日期: 2017-10-10

作者简介: 宁知常, 男, 1973 年生, 1995 年毕业于山东冶金工业学校钢铁冶金专业; 后进修北京科技大学冶金工程专业。现为山钢股份济南分公司炼钢厂 210t 转炉区域责任工程师, 从事炼钢工艺技术工作。

此时炉底处 CO 气泡所受的压力简化式为:

$$P_{CO}=K[C][O]=1+H_m \rho_m g \times 10^{-5} \quad (3)$$

式中 H_m 为 CO 气泡上钢液层的厚度, m ; ρ_m 为钢液的密度, kg/m^3 。可见, 当反应达到平衡时, $[C][O]$ 除与钢水温度有关外, 也与钢液的平均深度有关, 钢液平均深度越大碳氧积也就越高。因此, 生产中要合理控制炉底形状和熔池深度, 促进碳氧反应进一步达到平衡, 提高底吹的冶金效果。

资料表明: 在复合吹炼中, 虽然从底部吹入的气量很小, 而钢中与 $[C]$ 相对应的自由氧却远远低于顶吹转炉。停吹 $w[C]$ 在 0.10% 以上时, 自由氧大致为 $P_{CO}=10^4$ Pa 的平衡值, $w[C] \leq 0.04\%$ 时, 自由氧接近于 $P_{CO}=0.4 \times 10^4$ Pa 的平衡值, 即远小于 $P_{CO}=10^4$ Pa 的平衡值。而且 C 含量越低, 达到平衡的 P_{CO} 值也越低。由式(2)可见, 达到平衡的 P_{CO} 值越低, 其 $[C][O]$ 也就越低, 复吹的冶金效果也就越好。

在低碳区中钢的自由氧含量的显著差别主要是由于顶底复吹转炉熔池中, 因通入底吹气体而使反应带气相中的 CO 分压 P_{CO} 显著降低造成的, 熔池中较低的氧含量有利于提高钢的纯净度和合金收得率。因此吹炼终点包括吹炼过程的枪位、氧气压力及流量、出钢温度、熔池深度、炉膛形状、炉底高度的变化将直接影响到炉渣状况, 影响终点氧化性, 影响反应带气相中的 CO 分压 P_{CO} , 从而直接影响复吹效果。

2.3 回归分析

借助 minitab 对原始数据进行分析^[2], 推导终点碳氧积与终点温度、终点碳含量、终点氧含量、熔池液位的关系, 便于程序设计和实际运作。

1) 碳氧积与终点碳含量的关系近乎呈反比。回归方程:

$$C \cdot O = 0.00336 - 0.000069 C_{-1},$$

$$S = 0.000365487, R-Sq = 8.8\%, R-Sq(\text{调整}) = 7.9\%。$$

2) 碳氧积与终点氧含量的关系。回归方程为:

$$C \cdot O = 0.00186 + 0.000002[O]_{-1},$$

$$S = 0.0000997419, R-Sq = 93.2\%, R-Sq(\text{调整}) = 93.1\%。$$

3) 碳氧积与终点温度的关系。回归方程:

$$C \cdot O = -0.0123 + 0.000009 T_{-1},$$

$$S = 0.000362584, R-Sq = 10.3\%, R-Sq(\text{调整}) = 9.4\%。$$

4) 碳氧积与熔池液位的关系。回归方程:

$$C \cdot O = 0.00184 + 0.000001 \text{ 液位},$$

$$S = 0.000382453, R-Sq = 0.2\%, R-Sq(\text{调整}) = 0.0\%。$$

5) 碳氧积与终点温度、熔池液位的关系。回归方程为:

$$C \cdot O = -0.0132 + 0.000009 T_{-1} + 0.000001 \text{ 液位},$$

$$S = 0.000364157, R-Sq = 10.4\%, R-Sq(\text{调整}) = 8.6\%。$$

2.4 优化思路

将每炉副枪测量的 $[C]$ 、 $[O]$ 及熔池液位进行回归分析, 建立动态模型, 根据模型运算结果及时调整底吹流量, 从而实现底吹流量的动态控制。

通过对原始数据的回归分析, 推导归纳出终点碳氧积与终点温度、终点碳含量、终点氧含量、熔池液位的关系。为便于程序设计和实际运作, 汇总成 9 条曲线, 归并形成 3 个系列: 即高流量、中流量、低流量系列, 结合 3 种模式组合共计 9 种基本曲线, 同时每种曲线又是动态的, 与终点碳氧积、熔池液位、炉龄等有关, 即流量曲线值 $f=f(m/m_0, a, b)$, 其中 m/m_0 为终点碳氧积修正系数, a 为熔池液位修正系数, b 为炉龄修正系数。

每炉副枪测量完毕后, 根据测量的碳氧积、熔池液位以及定期修正或输入的炉龄系数, 结合近 10 炉的数据进行动态计算, 从而决定下一炉的底吹流量参数。3 种模式及 3 种系列同样需要吹炼前根据钢种规程要求进行手动选择, 首先选择模式, 其次选择系列, 然后根据程序设定的流量曲线进行调整和切换。3 个系列设定基准值见表 1。

表 1 不同流量系列设定基准值

系列	1	2	3	4	5	6	7	8
低流量	216	200	360	400	144	144	216	144
中流量	240	224	400	440	216	144	216	144
高流量	264	240	440	480	240	144	216	144

各系列对应的 8 个数值设定点分别标识为 $F_{低1} \sim F_{低8}$; $F_{中1} \sim F_{中8}$; $F_{高1} \sim F_{高8}$; 根据液位的波动范围(系列内约 70 cm)及流量的波动范围(系列内约 40 Nm^3/h), 确定各点的流量关系式为:

$$F_{低i} = 216 + (h - 860) \times 0.57 +$$

$$(m/m_0 - 1) \times 0.0025 \times 40 / 0.0011 - b。$$

其中: $m=[C] \cdot [O]$, $m_0 = -0.0132 + 9 \times 10^{-6} \times T + 10^{-6} \times a$, h 为熔池液位, b 为炉龄修正系数(-1 cm/千炉——手动定期调整)。T 为终点温度。且 $[C]$ 、 $[O]$ 、 T 、 a 均为前 10 炉的平均值。副枪测量失败时的取值: $T=1651$ $^{\circ}C$, $a=880$ cm, $[C]$ 或 $[O]$ 有 1 个无数值, 则取 $m=[C] \cdot [O] = 0.0025$ 。其他各点依次类推。

2.5 实施方案

根据底吹自动化生产控制系统工艺需求, 通过对底吹 PLC 程序进行优化设计, 对相关 PLC 进行数据采集, 得到底吹所需工艺数据; 通过底吹流量模型进行模型计算, 得出最符合钢种需要的底吹流量模式。通过 MP7.2 上位监控软件编制上位 HMI 操作画面, 对底吹流量模式进行选择操作, 实现底吹功能的优化, 进一步提高底吹冶金效果。

1) 优化底吹 PLC 程序, 撰写程序设计规格说明

书。通过 Concep 软件开发、设计底吹 PLC 程序,完成 L1 级基础自动化控制功能,实现底吹功能的优化,达到项目的设计预期目标。

2) 编制、优化上位监控画面(HMI)的设计。根据底吹工艺流程要求,通过 Monitor Pro7.2 上位监控软件设计出符合底吹工艺流程要求的上位监控画面(HMI),通过对上位监控画面的操作,实现底吹流量模式的调整。

3) 根据底吹工艺流程和数学模型建立底吹流量控制模型。根据实际出钢量、副枪测出的实际熔池液位及渣中(FeO)含量变化,结合吹炼过程各元素反应规律及反应特点,调整完善底吹流量模式参数值。

4) 配合转炉溅渣护炉制度,合理选用底吹曲线,控制炉底高度及形状,保证底吹良好的应用效果。

5) 优化、完善自动化炼钢模型的数据采集、信息传递,提高炼钢终点温度、终点[C]含量的双命中率,提高自动化炼钢水平。

6) 根据不同钢种终点控制要求(终点[C]含量的控制),选取相应钢种对应的后期流量曲线。

7) 启动“后搅”模式,尤其是低碳钢种,以进一步促进 C-O 反应,降低碳氧积,提高钢水质量。

8) 进一步优化底吹模型的各个参数,提高底吹元件的寿命,完善自动化炼钢模型的自学习功能。

3 优化效果

3.1 降低了吹炼终点碳氧积

底吹流量实现动态模型控制,改善了底吹气体对熔池的搅拌作用,使得复吹时钢-渣反应好,吹炼过程平稳,不易发生喷溅,吹炼终点碳氧积更接近平衡值。对比优化前后的终点碳氧积水平,结果表明:当炉龄为 10 000 炉左右时,在终点 C 含量为 0.07%、温度为 1 650 ℃ 的条件下,优化前碳氧积平均为 0.002 76,优化后平均为 0.002 64。测定结果表明:在相同终点温度和 C 含量条件下,优化后的碳氧积平均值比优化前低 0.000 12。优化前后碳氧积对比(各 30 个样本)见图 1。

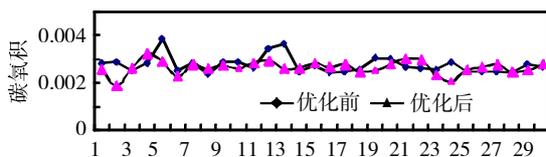


图 1 优化前后碳氧浓度积对比

由于低碳钢种比例的增加,吹炼终点碳氧积水平普遍升高,但优化前后及各个流量系列的水平对比,碳氧积降低效果仍然较为明显,优化前终点碳氧积平均水平 0.003 106;优化后,低流量 0.003 000,中流量 0.002 896,高流量 0.002 766。

3.2 提高了金属收得率

通过底吹优化,加强了熔池的搅拌力,使熔池内成分和温度的不均匀性得到有效改善,碳氧反应更进一步接近平衡,避免了钢水的过氧化。对终点渣样成分分析对比发现,优化后终点渣样中(TFe)含量下降 1.16%,从而减少了渣中的金属损失,提高了金属收得率。

3.3 提高了吹炼终点残锰含量

通过优化前后对比,吹炼终点残锰含量提高 0.03%,其原因是由于顶底复吹降低了终点炉渣的氧化性,渣中氧化铁的降低抑制了下述反应式(FeO)+[Mn]=(MnO)+[Fe]向锰被氧化的方向进行,提高了吹炼终点残锰含量,从而可以减少脱氧和合金化的锰铁用量和提高钢的质量。

3.4 提高了脱磷、脱硫率

顶底复吹转炉可以在(FeO)较低含量条件下把钢水中的 P 去除到与顶吹转炉相同的水平,用较低的碱度或较少的渣量把钢水中的 S 去除到与顶吹转炉相同的水平。这主要是由于顶底复吹加强了熔池搅拌,使化渣加速,传质加快,金属和炉渣迅速接近平衡。不少研究者用赫利等人提出的关系式:

$$\text{Lg}(w(\text{P})/w[\text{P}])=22\ 355/T-16.0+$$

$$2.5\text{Lg}w(\text{TFe})+0.08w(\text{CaO}),$$

进行过计算,证明顶底复吹的 P 分配系数与赫利平衡值很接近。同时,顶底复吹转炉的复吹效果越好,渣钢之间的温度差就越小,这一点对脱磷反应是有利的。优化前后吹炼终点脱 S、脱 P 情况见表 2,优化后平均脱 S 率提高了 3.67%。

表 2 优化前后吹炼终点脱 S、脱 P 情况

项目	吹炼终点 P 含量 /%	平均脱 S 率 /%
优化前	0.012 3	48.63
优化后	0.010 1	52.30
差值	0.002 2	3.67

4 结 语

通过对转炉底吹工艺专家系统进行优化,底吹流量实现动态模型控制,进一步优化了过程熔池搅拌,使熔池内成分和温度的不均匀性得到有效改善,碳氧反应更进一步接近平衡,提高了终点温度和成分的命中率,降低了吹炼终点碳氧积,避免了钢水的过氧化,提高了合金、金属收得率和钢水质量。

参考文献:

- [1] 许刚,雷洪波,李惊鸿,等.转炉炼钢终点控制技术[J].炼钢,2011,27(1):8.
- [2] 王超,袁守谦,杨双平,等.冶金传输原理教学方法改革[J].中国冶金教育,2009(4):42-43.

(下转第 14 页)

Development and Production Practice of Atmospheric Corrosion Resisting Steel 09CuPCrNi-A for Railway Rolling Stock

WANG Xiaoke

(The Technology Center of Laiwu Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Laiwu 271105, China)

Abstract: The anti-atmospheric corrosion hot rolled strip steel 09CuPCrNi-A was produced in Shandong Iron and Steel Group Co., Ltd. by hot metal pretreatment-converter melting in 120 t furnace-LF refining-No.2/No.3 continuous casting-1 500 mm hot roll process. The quality results of the real product showed that the steel strips have reasonable composition and excellent mechanical property. The yield strength and tensile strength reach to 395 MPa and 548 MPa respectively. The average value of elongation is about 31%. Besides, the impact absorbing energy is about 98 J tested at -40 °C. The relative corrosion rate is lower than 45% which indicated that the steel have remarkable anti-atmospheric corrosion property. It can be concluded that 09CuPCrNi-A steel produced by Shandong Iron and Steel Group Co., Ltd. achieved the technical requirements of steels for railway vehicle.

Key words: steels for railway vehicle; hot rolled strip steels; 09CuPCrNi-A steel; anti-atmospheric corrosion property; mechanical property

(上接第5页)

Practice of Long Time Blowing Down and Reblowing of Jinan Steel's No.1 1 750 m³ BF

SHI Yongkui, AN Ming, ZOU Jincheng

(The Ironmaking Plant of Jinan Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: In October 2016, operation of long-time blowing-down and reblowing for 3 days has been carried out at first 1 750 m³ blast furnace in Jisteel. Much experience such as the preparation of blowing-down, operation of blowing-down, operation of recovery blast furnace conditions of reblowing etc. has been summed up. The preparations of blowing-down such as raising coke ratio, reducing acid-to-base ratio of batch and so on have been ensured regular furnace conditions and hearth working condition well. After starting-up, fast recovery blast furnace conditions of reblowing has been realized by control critical joints such as blast volume, pulverized coal injection, tapping iron and so on.

Key words: blast furnace; blowing-down and reblowing; coke ratio; air volume

(上接第8页)

Process Optimization Practice of Converter Bottom Blowing System

NING Zhichang, MIAO Zhenlu, ZHAO Youhu, ZHAO Liang

(The Steelmaking Plant of Jinan Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Jinan 250101, China)

Abstract: Due to the gas flow in the bottom of converter bottom blowing system is smaller, there are the problems of unable dynamic regulation and the simple and single mode of blowing, the end carbon oxygen product was analyzed and the regression analysis was carried out. The measures were taken that included the PLC procedure is optimized for the bottom blowing, bottom-blow flow control model is established, the reasonable bottom blow curve and other were selected. After optimization, the average finish carbon oxygen product decreased from 0.002 76 to 0.002 64, the terminal slag sample (TFe) decreased by 1.16%, the average desulfurization rate increased by 3.67%.

Key words: converter; bottom blowing system; dynamic model; carbon and oxygen product; metallic yield

(上接第11页)

参考文献:

- [1] 刘浏. 炉外精炼工艺技术的发展[J]. 炼钢, 2001, 17(4): 1-7.
- [2] 张鉴. 炉外精炼的理论与实践 [J]. 北京: 冶金工业出版社, 1993: 321-324.
- [3] 王展宏. 钢包炉(LF)精炼渣的作用和特性分析[J]. 钢铁研究, 1996(3): 11-16.
- [4] 余志祥, 郑万, 汪晓川, 等. 洁净钢的生产实践[J]. 炼钢, 2000, 16(3): 11-15.

Development and Application of Refining Process Technology of Narrow Composition Slag System for All Kinds of Steel

LIU Wenping

(The Steelmaking Plant of Laiwu Branch of Shandong Iron and Steel Co., Ltd., Laiwu 271104, China)

Abstract: In order to solve the problem of the lack of scientific and reasonable target slag system for different varieties of steel, and to solve the problems of slow slag speed and large fluctuation of slag components in the refining process, the narrow composition slag system was determined for different varieties of steel in the refining process. At the end of the converter, dynamic deoxidation and slag treatment process are applied to stabilize the oxidation of LF refining steel. The composition of slag is controlled by silicon equilibrium method. The application of this technology makes the fluctuation of the alkalinity of the secondary refining slag in the upper and lower furnaces within 0.5, and the total level of inclusions is less than 95%.

Key words: refining slag system; narrow component control; alkalinity; inclusion; process control