

· 工艺技术 ·

烟气分析在 100 t 转炉深脱磷工艺的应用

秦登平¹ 杨建平¹ 危尚好¹ 吕延春² 李永生¹

(1 首秦金属材料有限公司, 秦皇岛 066326; 2 首钢技术研究院, 北京 100043)

摘要 基于对脱磷工艺的理论分析, 通过 100 t 转炉烟气分析控制熔炼过程、终点温度、过程化渣控制和预测终点磷含量以获得低磷钢水。首秦金属材料公司 100 t 顶底复吹转炉所用铁水的硅含量为 0.2% ~ 0.8%, 磷含量 0.052% ~ 0.090%, 管线钢的生产结果表明, 烟气分析终点温度(1 580 ~ 1 650 ℃)命中率能达到 95% 以上; 模型预测磷含量与转炉终点实际磷含量分别为 0.007 6% 和 0.007 4%, 通过烟气分析实现了转炉终点磷含量 ≤ 0.010% 的目标。

关键词 100 t 转炉 炼钢 烟气分析 终点控制 低磷钢

Application of Off-Gas Analysis for Deep-Dephosphorization Process of 100 t BOF

Qin Denping¹, Yang Jianping¹, Wei Shanghao¹, Lü Yanchun² and Li Yongsheng¹

(1 Shouqin Metal Materials Co Ltd, Qinhuangdao 066326; 2 Research Institute of Technology, Shougang Group, Beijing 100043)

Abstract Based on theoretical analysis on dephosphorization in steelmaking process, the off-gas analysis is used to control steel melting process and end-point temperature of molten steel, control slag melting process, forecast end-point phosphorus content in steel and get low phosphorus molten steel. For 100 t top and bottom combined blown converter at Shouqin Metal Materials Co Ltd, the silicon content in hot metal is 0.2% ~ 0.8% and the phosphorus content is 0.052% ~ 0.090%, the pipeline steel production results show that by off-gas analysis the percentage of hits for end-point temperature of molten steel (1 580 ~ 1 650 ℃) is more than 95%, and the forecasting by model and the measuring BOF end-point phosphorus content are respectively 0.007 6% and 0.007 4%. The aim of BOF end-point phosphorus content ≤ 0.010% is realized by off-gas analysis.

Material Index 100 t BOF, Steelmaking, Off-Gas Analysis, End-Point Control, Low Phosphorus Steel

首秦金属材料有限公司(首秦公司)现有 100 t 复吹转炉 3 座, 年产钢量 240 万 t, 转炉底吹供气元件分布在炉底同心圆直径 0.40D 位置, 四孔, 毛细金属管式透气元件, 底吹元件夹角分别为 60°、120°, 底吹供气强度设计为 0.03 ~ 0.10 m³/(t · min), 采用前期供氮, 后期供氩强搅。主要冶炼船板、管线、水电用钢等钢种, 其中低磷钢、极低磷钢比例大于 30%。

随着能够快速分析高温炉气的质谱仪的应用, 炉气分析技术逐渐完善, 被越来越多的中型转炉厂引入使用。马钢^[1]、首钢京唐等钢厂都将烟气技术 + 副枪技术实现动态控制。

首秦公司转炉炼钢引进西门子奥钢联 SVAI 公司基于 LOMAS 炉气在线连续分析的自动控制技术, 2009 年初正式投用。通过不断的生产实践, 实现了一键炼钢的功能, 且随着副枪的逐渐成熟, 达到了拉碳不倒炉倒渣, 采用直接出钢, 缩短了冶炼周期, 提高了转炉的利用率。

1 脱磷反应理论分析

磷在钢液中能够无限溶解, 而它的氧化物 P₂O₅ 在钢中溶解度很小, 脱磷只能通过炉渣氧化性脱磷, 脱磷是强放热反应, 降低反应温度, 将使磷的分配系数增大, 冶炼过程温度过高, 容易发生回磷现象, 由于碱性氧化性炉渣迅速形成, 大约在吹炼的 40% 时间内, 磷含量降低至 0.02%。脱磷前期温度控制 ≤ 1 400 ℃, 转炉终点温度控制 1 580 ~ 1 650 ℃^[2]。

吹炼前期, 增加石灰溶解速率, 炉渣碱度变化, 氧化铁含量升高, 脱磷速度比较快, 脱磷反应速度式为:

$$-\frac{d[P]}{dt} = K_p([P] - [P]_f) \quad (1)$$

K_p 为脱磷速度常数, 时间由 0 到 t, 金属含磷量从初始磷到硅氧化结束时含磷量进行上下积分。100 t 转炉上得到 K_p 的回归方式^[3]为:

$$K_p = -0.000 25T + 0.002(\sum Fe) + 0.001 6(CaO)^1 + 0.16V_c + 0.18h^{1/4} \cdot Q_{O_2} + 0.028G + x \quad (2)$$

式中: T - 脱硅后金属熔池的温度, 1 305 ~ 1 634 ℃; ΣFe - 渣中含铁总量(13% ~ 38%); CaO - 渣中自由 CaO 浓度, $(\text{CaO})^1 = (\text{CaO}) - 1.87(\text{SiO}_2) - 1.58(\text{P}_2\text{O}_5)$; V_{C} - 脱硅期间的脱碳速度(0.05% ~ 0.54% C/min); Q_{O_2} - 供气强度, 0 ~ 6 $\text{m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$; G - 搅拌侧吹供氧强度; h - 顶吹氧枪高度, 69 ~ 157 mm; x - 系数包括其他影响因素。

2 烟气分析在脱磷过程应用

首秦公司铁水硅含量为 0.2% ~ 0.8%, 平均 0.52%; 磷含量为 0.052% ~ 0.090%, 平均 0.075%; 冶炼管线钢时, 转炉终点碳控制 $\leq 0.04\%$, 终点磷含量 $\leq 0.015\%$, 出钢温度 1 660 ~ 1 680 ℃; 烟气分析在脱磷过程中主要采用动态控制技术, 利用炉气中 CO 浓度, 监测炉内化渣情况, 化好过程渣, 防止炉渣返干和过程喷溅溢渣, 其中喷溅溢渣的主要原因为, 熔池内 (FeO) 聚积, C-O 反应不平衡, 瞬时产生大量 CO 气体, 同时首秦转炉炉容比较小; 另一方面通过烟气分析仪动态配加原料, 控制过程温度变化, 保证前期温度不过低, 后期温度不过高, 直到吹炼结束前 2 min, 提前下枪、增加供氧强度进行强搅拌, 均匀钢水和提高脱磷动力学条件。

2.1 过程温度的控制

转炉中熔池温度计算要充分考虑熔池反应的各种原料、产物, 并且要考虑到过程中的各种热损失, 热平衡的计算式如下^[1]:

$$H_{\text{steel}}^i + H_{\text{slag}}^i + H_{\text{add}}^i + H_{\text{gas}} = H_{\text{steel}}^{i+1} + H_{\text{slag}}^{i+1} + H_{\text{add}}^{i+1} + H_{\text{off-gas}} + Q_{\text{PC}}^{\text{bath}} + Q_{\text{loss}} + Q_{\text{adj}} \quad (3)$$

式中: H_{steel} - 液态钢水熔池总热焐/J; H_{slag} - 渣的总热焐/J; H_{add} - 未溶解辅料的总热焐/J; H_{gas} - i 到 $i+1$ 时间段吹入气体的总热焐/J; $H_{\text{off-gas}}$ - i 到 $i+1$ 时间段产生废气的总热焐/J; $Q_{\text{PC}}^{\text{bath}}$ - i 到 $i+1$ 时间段的二次燃烧热/J; Q_{loss} - i 到 $i+1$ 时间段的总热损/J; Q_{adj} - i 到 $i+1$ 时间段的热调整量/J。

首秦公司二级系统中温度计算同样是按上式原理进行, 通过静态计算出熔池成分, 再由此计算各反应热焐变化, 建立各种热损失参数, 如倒渣热损、炉口辐射热损等, 并设立熔池反应各阶段温度调整系数, 生产实践中通过调整系数使预测结果更加接近实际情况。

通过动态调节原料加入量控制钢水过程温度和终点温度, 即前期钢水温度保持在 1 280 ~ 1 400 ℃, 动态调整转炉在前期的过程温度, 提高前期脱磷效

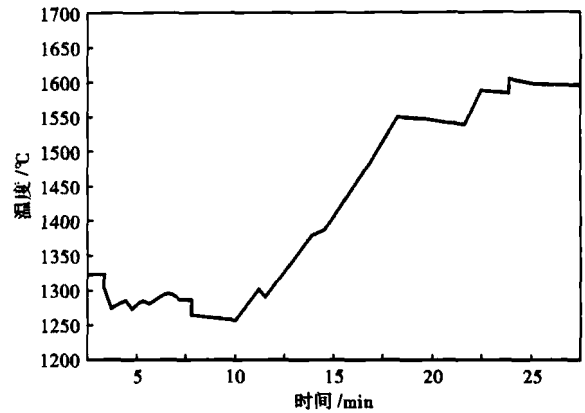


图 1 转炉吹炼过程钢水温度的变化

Fig. 1 Chang of molten steel temperature during BOF blowing process

表 1 转炉钢水终点温度命中率

Table 1 Percentage of hits for end temperature of BOF molten steel

终点 C/%	温度偏差/℃	命中率/%
≤ 0.06	$\leq \pm 24$	95
> 0.06	$\leq \pm 28$	100

率, 目标为前期脱磷率必保 60% 以上, 预测钢水终点温度, 提高终点温度命中率; 终点温度范围控制为 1 580 ~ 1 650 ℃, 终点磷含量小于 0.010%, 如图 1 为一炉次在实际吹炼过程温度变化趋势图。

通过对实际生产数据进行统计, 烟气分析系统预测温度的命中情况如表 1 所示。

由表 1 得出, 终点温度命中情况达到不错的水平, 为冶炼低磷钢的终点命中率提供了保证。

2.2 利用炉中烟气 CO 浓度曲线监控过程化渣

吹炼开始进入脱硅、脱锰阶段, 碳开始少量氧化, 炉温上升到 1 450 ℃, 碳的氧化速度增加很快, 脱磷期的 CO 浓度增加到 40%, 当耗氧量为 14 m^3/h 时, 提枪双渣倒渣, 进入高速脱碳阶段, 根据烟气中 CO 浓度曲线, 保证 CO 浓度曲线波动平稳, 二级模型不断预测喷溅发生的可能性, 其中按照等级可分为 1 ~ 5 级, 这个值会显示给现场操作人员。如果喷溅的可能性超出一个等级的水平, 将会按照模型内设定的规则, 调整氧枪的高度和供氧强度, 进行适当修正。保证吹炼过程的平稳, 不发生喷溅和溢渣, 调整后新的值会发送到计算机一级系统。如果仍发生喷溅或溢渣, 重复上述动作, 同时这一数据还会被用来作系统自学习的反馈; 如图 2 为一炉次实际吹炼过程烟气变化趋势。通过烟气中 CO 浓度变化趋势曲线(整个吹炼过程平均的 CO 浓度为 52%)的判断, 提高了化渣效果和脱磷效率。

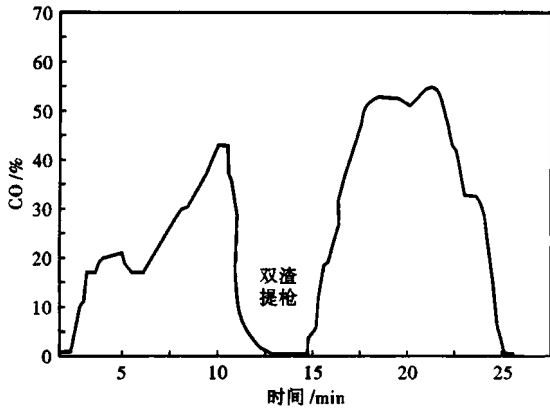


图2 转炉吹炼过程烟气中CO浓度的变化

Fig.2 Change of CO concentration in off-gas during BOF blowing process

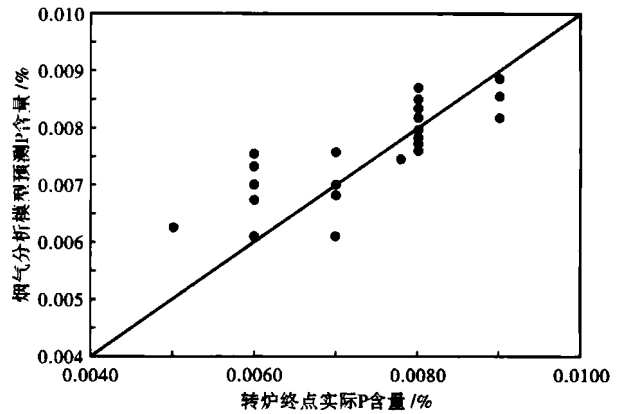


图4 实测转炉终点磷含量与烟气分析模型预测终点磷含量
Fig.4 Measured BOF end-point phosphorus content in molten steel and forecasted end-point phosphorus content by off-gas analysis model

2.3 烟气分析预测磷含量与实际磷含量

在吹炼过程,当氧耗在 14 m³/t时,转炉脱磷率能达到 50% 以上,其余脱磷重点在终点降枪时,此时的脱磷率能达到 80% 以上。图 3 为烟气分析钢水中磷含量的变化趋势图,当吹炼开始至结束时磷的分配比接近平衡,根据磷质量守恒,进入转炉内磷的质量总数等于炉渣中磷的质量总数加钢水中炉渣总数和 OG 系统物质的总和^[5],即:

$$W'_{steel} \cdot [P]_t + W'_{slag} \cdot (P)_t = \sum W_i^0 \cdot [P]_i^0 \quad (4)$$

式中:W'_{steel}、W'_{slag}- 钢水、炉渣的质量/kg; [P]_t、(P)_t- 钢水、炉渣磷的含量/%; \sum W_i^0 \cdot [P]_i^0- 铁水、废钢和各种辅料质量以及磷含量。

联立式(2)和式(4)解得:

$$[P] = \frac{\sum W_i^0 \cdot [P]_i^0}{W'_{steel} + W'_{slag} \cdot k_p} \quad (5)$$

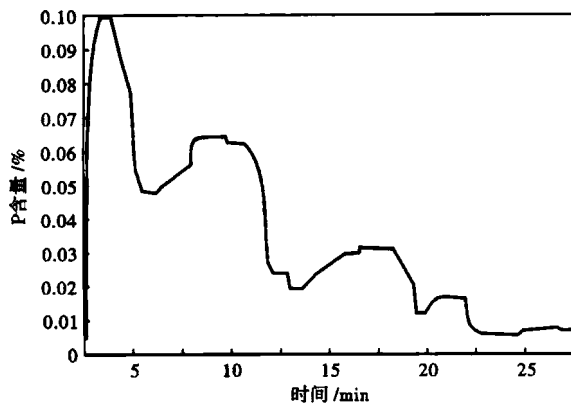


图3 转炉吹炼过程钢水中磷含量的变化

Fig.3 Change of phosphorus content in molten steel during BOF blowing Process

由公式(5)得出,烟气分析模型预测钢水磷含量与转炉终点实际磷含量的关系如图 4(样本数为 29 炉),平均转炉实际终点磷为 0.007 4%,模型预测值为 0.007 6%,低磷钢的一次命中率达到 90% 以上,实现了终点磷含量 ≤ 0.010% 的控制目标。

3 结论

(1) 烟气分析利用炉气中 CO 浓度变化趋势,监测炉内化渣情况,化好过程渣,防止炉渣返干和过程喷溅溢渣。

(2) 动态调节原料加入量控制过程温度和终点温度,使终点温度命中率在 95% 以上。

(3) 烟气分析模型预测钢水磷含量与转炉终点实际磷含量分别为 0.007 6% 和 0.007 4%。

(4) 烟气分析对过程化渣、温度和磷含量的预测,保证了低磷钢的一次命中率能达到 90% 以上,实现了转炉终点磷含量 ≤ 0.010% 的目标值。

参考文献

[1] 石知机,汪国才,李应江. 炉气分析终点控制技术在马钢转炉的应用[J]. 钢铁,2007,42(4):24-26.
 [2] 曹东,万雪峰,李德刚,等. 100 t 顶吹转炉双渣深脱磷工艺研究与实践[J]. 鞍钢技术,2011(6):17-22.
 [3] 陈家祥. 钢铁冶金(炼钢部分)[M]. 北京:冶金工业出版社,2004.
 [4] 王令福. 炼钢厂设计原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2009.
 [5] 万雪峰,张贵玉,林东,等. 应用炉气分析预测转炉冶炼终点磷和锰[J]. 材料与冶金学报,2006,5(4):243-246.

秦登平(1978-),男,硕士研究生,高级工程师,转炉炼钢工艺; E-mail:Qindp171@126.com