

## 150 t 转炉脱磷炉渣控制工艺的实践

宋延成<sup>1</sup> 刘吉刚<sup>1,2</sup>

(1 江阴兴澄特种钢铁有限公司特板炼钢分厂, 江阴 214400; 2 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

**摘要** 通过对 150 t 转炉 3 000 炉次冶炼数据的分析, 得出炉渣中 FeO 10% ~ 17%, 炉渣熔点 1 450 °C 以下, 粘度 1.0 ~ 1.2 P 时转炉炉渣氧化性 IOS 和炉渣光学碱度  $A_x$  对渣-钢磷分配比  $L_p$  的影响。为提高炉渣的脱磷能力, 在转炉冶炼模型中动态设定石灰加入量, 促使终渣光学碱度接近目标范围  $A_x = 0.74 \pm 0.01$ , 渣组成接近于  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  相; 当前冶炼模型中优先选择铁水还原性指数 Rli 目标为 5.8 ~ 6.6, 吹氧指数 OMI 设置目标 1.05 ~ 1.20, 优化炉渣氧化性指数 IOS 在 10 ~ 15, 能减少钢铁料损失和保证炉渣良好的脱磷效果。

**关键词** 150 t 转炉冶炼 脱磷 炉渣碱度 氧化性 工艺实践

## Practice of 150 t BOF Dephosphorizing Slag Control Process

Song Yancheng<sup>1</sup> and Liu Jigang<sup>1,2</sup>

(1 Special Steel Plate Steelmaking Plant, Jiangyin Xingcheng Special Steel Co Ltd, Jiangyin 214400;  
2 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083)

**Abstract** By analysis on steelmaking data of 150 t BOF 3 000 heats with 10% ~ 17% FeO in slag, slag melting point less than 1 450 °C and viscosity 1.0 ~ 1.2 P, it is obtained the effect of BOF index of oxidation of slag (IOS) and slag optical basicity ( $A_x$ ) on slag-steel phosphor partition ratio. In order to improve the dephosphorizing capacity, in BOF steel-making model the dynamic amount of lime addition is set to promote the optical basicity  $A_x$  of end slag near to aim  $A_x = 0.7 \pm 0.01$  with slag ingredient near to  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  phase; and in steelmaking model, by priority selecting the aim hot metal reduction index Rli 5.8 ~ 6.6, setting the aim oxygen blowing index OMI 1.05 ~ 1.20, and optimizing the index of oxidation of slag IOS bing 10 ~ 15, the iron loss decreases and the dephosphorization effect is ensured.

**Material Index** 150 t BOF Steelmaking, Dephosphorization, Slag Basicity, Oxidation, Process Practice

海洋工程、工民建筑等工业领域的持续发展对于钢铁材料性能提出了愈加严格的要求, 如海洋石油和海洋平台用钢板等, 为了适应使用条件, 需要保证 -40 °C 甚至是 -80 °C 低温冲击功大于 100 J<sup>[1-2]</sup>, 要求钢中有害元素尤其是低温脆性元素 P  $\leq 0.008\%$ <sup>[3]</sup>。现代转炉双联工艺在洁净钢生产流程中具备良好的脱磷功能, 只要保证预处理脱磷炉半钢 P 含量  $\leq 0.030\%$  即可稳定实现转炉终点 P  $\leq 0.006\%$ <sup>[4-6]</sup>, 而对于国内大多数未实行双联工艺的冶炼厂, 在热力学方面优化转炉造渣提高渣-钢磷分配比, 动力学方面促进渣-钢反应进行, 提高脱磷反应速度两方面改善工作更为重要<sup>[7]</sup>。

为了适应品种结构中低磷钢种比例增加的现状, 满足炼钢车间快节奏生产以及成本控制的要求, 兴澄特钢在公称容量 150 t 转炉大量冶炼数据回归的基础上, 分析实际炉渣性能对于脱磷的影响和工艺操作参数对炉渣的控制作用, 进而优化操作, 并固化冶炼脱磷操作制度。

### 1 脱磷过程的脱磷渣系热力学分析

对于现代碱性氧气转炉 (BOF) 脱磷而言, 无论

是应用分子理论、离子理论<sup>[7]</sup>或是分子离子共存理论指导<sup>[8-9]</sup>, 创造条件提高渣-钢间磷分配比 ( $L_p$ ) 是脱磷操作的首要目标。

转炉熔渣主要组元  $\text{CaO-SiO}_2\text{-FeO-MgO-P}_2\text{O}_5$  渣系, 根据分子离子共存理论, 在炼钢条件下熔渣主要存在  $\text{Ca}^{2+}$ 、 $\text{Fe}^{2+}$ 、 $\text{Mg}^{2+}$ 、 $\text{O}^{2-}$ 、 $\text{SiO}_2$ 、 $\text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{FeO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $3\text{FeO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $4\text{FeO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $3\text{MgO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ 、 $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $2\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $2\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{MgO} \cdot 2\text{SiO}_2$ 。熔渣体系达到反应平衡时, 渣-钢磷分配比可以表示为<sup>[8]</sup>:

$$L_p = \frac{(P)}{[P]} = \frac{2M_p \sum x_{(P_2O_5)}}{\sum M_i x_i} \quad (1)$$

式中: (P)-熔渣中 P 含量/%; [P]-钢液中 P 含量/%;  $M_p$ -P 的摩尔质量/( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $x_{(P_2O_5)}$ -熔渣中化合物中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的摩尔百分数/%;  $M_i$ - $i$  组元的摩尔质量/( $\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$ );  $x_i$ - $i$  组元摩尔百分数/%。

磷在脱磷炉渣中的分布实验研究<sup>[10-11]</sup>表明, 在

脱磷温度(1 300 ~ 1 650 ℃)条件下,炉渣中磷元素主要存在于硅酸二钙( $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$ )和磷酸三钙( $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ )形成的伪二元固溶体中,而铁氧化物和铁酸二钙中 P 含量仅为上述二元固溶体中磷含量的1/7,因此造渣提高硅酸二钙相的形成,是最有效促进渣-钢间  $L_p$  的增加的途径。

## 2 150 t 转炉脱磷炉渣分析

由于兴澄特钢 150 t 生产线设计无预脱磷工序,实际工艺流程中采用转炉一次造渣脱磷的操作方式来实现钢种磷成分目标。转炉冶炼入炉铁水及出钢钢水主要成分如表 1。为实现快速有效脱磷,转炉实际造渣加渣量为钢水量的 6% ~ 8%,其中石灰占比 50% ~ 65%,轻烧白云石及镁球合计占比 25% ~ 30%,在吹氧量 40% 前分 3 ~ 5 批次加入,其余造渣剂主要为球团矿、烧结矿,通常在转炉“返干期”前加入起到调渣作用,转炉终渣主要成分如表 2。根据炼钢渣图集<sup>[12]</sup>,在 FeO 含量 10% ~ 17% 附近,炉渣的熔点处于 1 450 ℃ 以下,粘度在 1.0 ~ 1.2 P 相对稳定,因此本实验认为在转炉炼钢条件下,炉渣熔点、粘度波动对于脱磷的影响较小,主要就一台 150 t 公称容量转炉 2016 年 10 ~ 12 月近 3 000 炉次冶炼数据分析炉渣主要组分化学性能(碱度和氧化性)对于脱磷的作用。

### 2.1 炉渣碱度与脱磷

目前 150 t 转炉已采用计算机模型炼钢,模型主要依据入炉铁水 Si 含量选择吹炼模式。在轻烧白云石等镁质造渣料单炉加入量基本恒定的情况下,模型根据铁水成分、辅料成分、动态调节石灰加入量并调节吹氧量控制炉渣 FeO 含量,以实现设定的目标炉渣特性(式 2),促进钢水脱磷反应的进行。本

实验主要以渣-钢磷实际分配比  $L_p$ (式 1)衡量炉渣的脱磷性能,渣中和钢中 P 含量值分别通过渣样 X 射线荧光光谱法(XRF)和直读光谱仪(OES)分析获得。

$$A_x = \sum x_i n_{O_i} \cdot A_i \quad (2)$$

式中: $x_i$ -  $i$  组元摩尔百分数/%; $n_{O_i}$ -  $i$  组元氧化物的氧原子数; $A_x$ - 炉渣的光学碱度值; $A_i$ -  $i$  组元氧化物的光学碱度值。

图 1 为转炉终点实际渣量(8% ~ 11%)条件下随光学碱度变化的渣-钢间  $L_p$  分布图, $L_p$  值主要处于 50 ~ 200,由于转炉炉渣与钢液的反应时间相对较短,实际  $L_p$  远未达到理论平衡  $L_p$  值,炉渣的脱磷潜力尚未完全发挥。在此情况下,当终渣  $A_x$  处于 0.72 ~ 0.76 时,实际渣-钢  $L_p$  处于相对高值,结合实际终渣成分,该范围内炉渣( $A_x = 0.74$ )大量存在的  $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$  具有较大的磷容量特性,确保了实际终渣的良好脱磷性能。在转炉加渣模型中根据炉料和造渣料条件动态设定石灰加入量,促使终渣  $A_x$  接近目标范围( $A_x = 0.74 \pm 0.01$ ),并在冶炼前期早造渣(吹氧量 < 30% 渣量加入 > 80%)尽可能延长渣-钢反应时间,确保脱磷较高的  $L_p$ 。

### 2.2 炉渣氧化性与脱磷

#### 2.2.1 炉渣氧化性(IOS)对脱磷的影响

转炉吹氧过程形成的  $\text{FeO}_x$  对于造渣脱磷起到了关键作用<sup>[13]</sup>,图 2 为转炉终点实际渣-钢  $L_p$  随炉渣氧化性指数(IOS)变化的分布情况,实际  $L_p$  总体随着 IOS 的上升而有所增加。一方面, $\text{FeO}_x$  在化渣过程不仅能够降低炉渣粘度,改善炉渣对于固态渣料的润湿程度和渗透能力,而且可以与石灰中 CaO

表 1 铁水主要成分及转炉出钢钢水成分 / %

Table 1 Chemical composition of hot metal and BOF end liquid / %

项目	C	Si	Mn	P	S
入炉铁水	4.00 ~ 4.50	0.30 ~ 0.70	0.10 ~ 0.40	0.060 ~ 0.100	0.001 ~ 0.020
转炉钢水	0.01 ~ 0.20	0.01 ~ 0.05	0.02 ~ 0.15	0.005 ~ 0.020	0.005 ~ 0.025

表 2 150 t 转炉终渣成分

Table 2 Ingredient of 150 t BOF end slag

终渣成分 / %						光学碱度
CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	MnO	( $A_x$ )
35 ~ 55	10 ~ 18	6 ~ 10	0.5 ~ 2.0	13.0 ~ 18.5	2.3 ~ 3.7	0.65 ~ 0.80

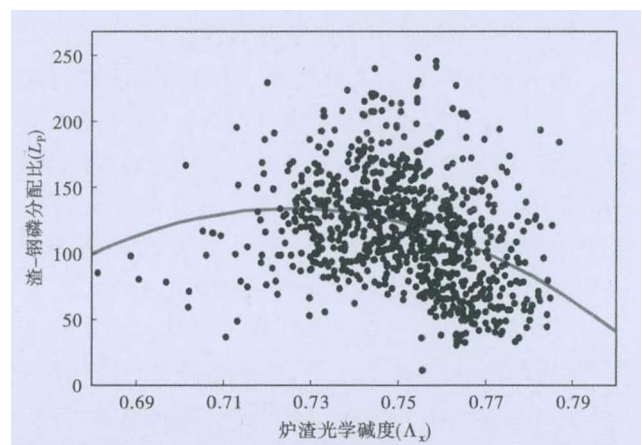


图 1 炉渣光学碱度  $A_x$  对 150 t 转炉终点渣-钢磷分配比  $L_p$  的影响

Fig. 1 Effect of slag optical basicity  $A_x$  on slag-steel phosphorus partition ratio  $L_p$  at end of 150 t BOF

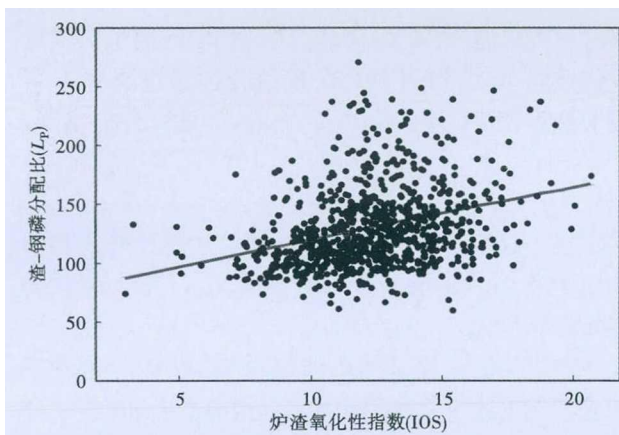


图 2 炉渣氧化性指数 IOS 对 150 t 转炉渣-钢磷分配比  $L_p$  的影响

Fig. 2 Effect of index of oxidation of end slag IOS on slag-steel phosphorus partition ratio  $L_p$  at end of 150 t BOF

生成低熔点化合物,加速固态渣料溶解快速成渣;另一方面,FeO<sub>x</sub> 在炉渣中间接供氧与钢中 P 反应起到脱磷作用,并使炉渣与钢液 P 保持平衡。

$$IOS = C_1 \cdot (FeO)\% \quad (3)$$

式中:IOS-炉渣氧化性指数;C<sub>1</sub>-炉渣氧化性系数;(FeO)%-炉渣中 FeO 百分含量。

然而对于炼钢金属消耗而言,炉渣中过高的 FeO 含量带走了大量的金属,导致收得率和出钢量下降,增加了冶炼成本。因此,在合理的炉渣氧化性区间保证化渣和脱磷效果同时,尽可能走下限控制,减少金属消耗成本损失。

对于实际转炉冶炼操作,为了保证脱磷需要炉渣 IOS 通常控制  $\geq 10$ ,兼顾转炉金属收得率,IOS 要求  $\leq 15$ ,实践证明,该氧化区间内,能够达到生产脱磷要求。

### 2.2.2 入炉铁水对炉渣氧化性的影响

为了控制转炉炉渣氧化性,使其达到脱磷性能要求,转炉冶炼模型会根据原料条件-主要是入炉铁水还原性指数(RIi)和成品 C、P 目标自动切换到相对应的冶炼模式。然而,由于冶炼模式数量有限,模型设置条件 RIi 跨度区间较大,在单区间内同样的吹炼方式对于炉渣的氧化性波动仍然较大。

转炉终渣 IOS 与铁水 RIi 分布趋势(如图 3)表明,在当前冶炼模型条件下,IOS 随着 RIi 自 5.6 ~ 7.0 增加,先逐渐升高到一个顶点,然后逐渐下降。这与模型中转炉氧枪枪位和阶段供氧强度设置相关,为了满足脱磷造渣需要,当前冶炼优先选择和向铁水供应部门提出铁水 RIi 目标为 5.8 ~ 6.6,但在这一原料目标区间内仍然存在大量 IOS < 10 的炉

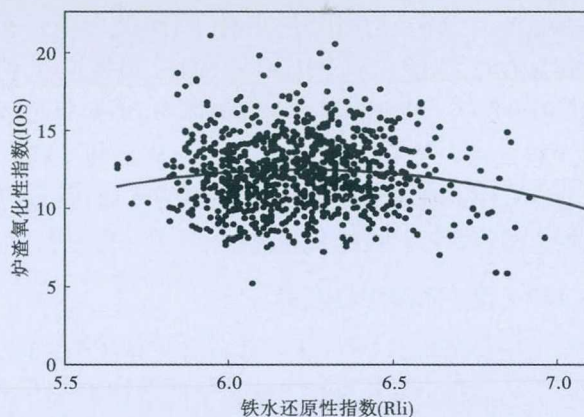


图 3 终渣氧化性指数 IOS 与铁水还原性指数 RIi 的关系  
Fig. 3 Relation between index of oxidation of end slag IOS and hot metal reduction index RIi

次,据此可以判断转炉模型中冶炼模式尚需根据原料、成品要求进一步细分区间,以更好地适应初始变量条件。

$$RIi = C_2 \times [C] + C_3 \times [Si] + C_4 \times [Mn] \quad (4)$$

式中:RIi-入炉铁水还原性指数;C<sub>2</sub>, C<sub>3</sub>, C<sub>4</sub>-铁水中 C、Si、Mn 元素还原指数系数;[C],[Si],[Mn]-铁水中 C、Si、Mn 元素百分含量/%。

### 2.2.3 供氧量对炉渣氧化性的影响

转炉吹入的氧气与铁水、废钢带入元素反应的同时,FeO<sub>x</sub> 含量伴随着氧化反应的进行逐渐变化,然而在当前吹炼模式选择条件下,氧气吹入量(吹氧指数 OMI)与炉渣 IOS 存在密切的关联。

$$OMI = \text{实际吹氧量} / \text{理论需氧量}$$

OMI-转炉吹氧指数;

理论需氧量-根据铁水中元素氧化反应计算得到的需氧量,其中转炉终渣 FeO 当量按照 IOS = 10

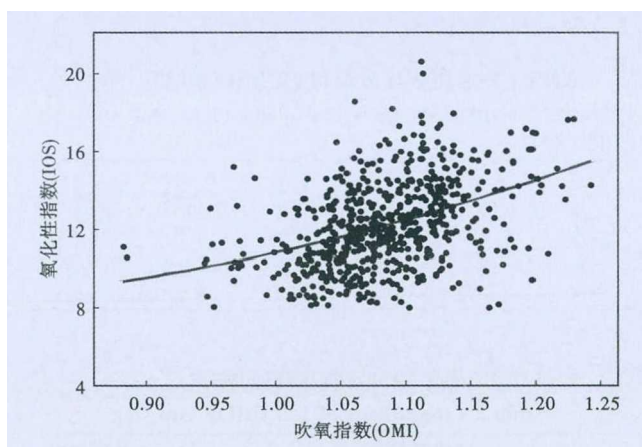


图 4 终渣氧化性指数 IOS 与吹氧指数 OMI 的关系  
Fig. 4 Relation between index of oxidation of end slag IOS and oxygen blowing index OMI

进行设定。

转炉终渣 IOS 与实践吹氧指数分布趋势(图 4)表明,在当前冶炼模型条件下,IOS 随着吹氧指数 OMI 自 0.8 ~ 1.2 增加逐渐升高,实际冶炼模型设置时考虑到诸多冶炼环节会降低氧气的利用率,为了保持良好的脱磷效果,转炉吹氧指数 OMI 设置为 1.05 ~ 1.20 变化。然而,在这一 OMI 目标区间内仍然存在大量 IOS < 10 的炉次,据此可以判断转炉模型中冶炼模式可以进一步优化以提高氧气利用率,减少氧气的无效浪费。

### 3 结论

(1)兴澄特钢 150 t 转炉冶炼模型中动态设定石灰加入量,促使终渣  $A_x$  接近目标范围( $A_x = 0.74 \pm 0.01$ ),渣相接近  $2CaO \cdot SiO_2$ ,并在冶炼前期早

造渣尽可能延长渣-钢反应时间,确保脱磷较高的  $L_p$ 。

(2)炉渣 IOS 增加有助于促进  $L_p$  提高,实际转炉冶炼操作中为了兼顾脱磷和生产成本控制,炉渣 IOS 通常控制 10 ~ 15,实践证明,该氧化区间内能够满足生产脱磷要求。

(3)当前冶炼模型条件下,转炉终渣 IOS 随着  $R_{li}$  (5.6 ~ 7.0) 的增加有先升高后逐渐下降的趋势,IOS 随着吹氧指数 OMI (0.8 ~ 1.2) 范围内的增加持续升高。为了保证转炉脱磷的正常进行,当前冶炼优先选择铁水还原性指数  $R_{li}$  目标为 5.8 ~ 6.6,转炉模型吹氧指数 OMI 设置目标为 1.05 ~ 1.20。

(4)鉴于冶炼脱磷实践的波动性,转炉模型冶炼模式尚需根据原料、成品要求进一步细分区间,以更好地适应初始变量条件,满足转炉冶炼脱磷要求。

### 参考文献

[1] 周砚磊,徐洋,陈俊,等. FH550 级海洋平台用钢冲击断裂行为试验研究[J]. 金属学报,2011,47(11):1382-1387.

[2] 蒋金星,唐荻,武会宾,等. E550 级海洋平台用钢二次裂纹扩展机理研究[J]. 材料工程,2013(6):35-39.

[3] 吴晓川,陈雨来,武会宾,等. 620 MPa 级海洋平台钢的连续冷却转变[J]. 材料热处理学报,2013,33(Sup. II):53-58.

[4] 徐匡迪,肖丽俊,干勇,等. 新一代洁净钢生产流程的理论解析[J]. 金属学报,2012,48(1):1-10.

[5] 杨福,毕学工,罗松志. 环保型高磷铁水预处理脱磷剂的试验研究[J]. 炼钢,2012,28(1):33-36.

[6] 何肖飞,王新华,书浩,等. 攀钢转炉双渣法脱磷的试验研究[J]. 钢铁,2012,47(4):33-38.

[7] 黄希祜. 钢铁冶金原理(第三版)[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:370-380.

[8] 张鉴. 冶金熔体的计算热力学[M]. 北京:冶金工业出版社,2007:331-334.

[9] 周勇,李正邦,郭培民.  $CaO-SiO_2-V_2O_5$  三元系活度模型及其

应用[J]. 钢铁研究学报,2007,19(6):30-33.

[10] 王刚,安胜利,彭军. P 在非均相脱磷剂中分布的研究[J]. 内蒙古科技大学学报,2012,31(3):209-215.

[11] 韩啸,周朝刚,李晶,等. 转炉脱磷渣物相结构对脱磷的影响[J]. 钢铁研究学报,2016,28(9):10-19.

[12] 西德. 德国钢铁工程师协会编. 渣图集[M]. 王俭,彭育强,毛裕文,译. 北京:冶金工业出版社,1989:292-295.

[13] 王雅珍,张岩,张文红. 氧气顶吹转炉炼钢工艺与设备[M]. 北京:冶金工业出版社,2001:73-75.

宋延成(1973-),男,工程师,2012年东北大学(本科)毕业,特殊钢炼钢连铸研究. E-mail:sync.1@163.com

收稿日期:2017-08-28

# 欢迎订阅 2018 年《特殊钢》杂志

全国各地邮局均可订阅(可破订)

邮发代号:38-183

定价:16.00 元/期 96.00 元/年

邮编:435001

地址:湖北省黄石市黄石大道316号新冶钢-大冶特殊钢股份有限公司《特殊钢》杂志社