

## 复吹转炉双联工艺冶炼 X80 管线钢脱磷试验研究

赵斌<sup>1</sup>, 张娜<sup>1</sup>, 彭国宏<sup>1</sup>, 汪成义<sup>2</sup>, 吴伟<sup>2</sup>, 吴巍<sup>2</sup>

(1 西昌学院, 机械与电气工程学院, 西昌 615000; 2 钢铁研究总院有限公司冶金工艺研究所, 北京 100081)

**摘要:** 结合某厂生产 X80 管线钢实际状况, 对复吹转炉双联工艺的炼钢脱磷过程进行试验, 研究转炉炉渣碱度和氧化性对脱磷的影响。结果表明: 在铁水磷含量为 0.118% 和 0.116%, 脱磷炉和脱碳炉终点渣碱度  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  分别为 1.6~2.0、3.3~4.1, T. Fe 含量分别为 10%~15%、20%~35% 的条件下, 脱磷炉脱磷率最高达 50.85%, 平均为 38.35%, 终点脱磷率最高为 95.69%, 平均为 94.88%, 冶炼终点钢水磷含量控制在 0.007% 以下, 最低 0.005%, 满足 X80 管线钢生产要求。

**关键词:** X80 管线钢; 复吹转炉; 双联工艺; 脱磷

## Experimental Study on Dephosphorization of X80 Pipeline Steel by Duplex Steelmaking Technology for Combined Blowing Converter

Zhao Bin<sup>1</sup>, Zhang Na<sup>1</sup>, Peng Guohong<sup>1</sup>, Wang Chengyi<sup>2</sup>, Wu Wei<sup>2</sup>, Wu Wei<sup>2</sup>

(1 School of mechanical and electrical engineering, Xichang University, Xichang 615000;

2 Metallurgical Technology Research Institute, Central Iron & Steel Research Institute Co., Ltd., Beijing 100081)

**Abstract:** Combined with the actual situation of X80 pipeline steel production in a factory, the dephosphorization process of combined blowing converter duplex process was tested, and the influence of basicity and oxidizability of converter slag on dephosphorization was studied. The results show that when the phosphorus content of hot metal is 0.118% and 0.116%, the alkalinity of the end slag  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  of dephosphorization furnace and decarburization furnace is 1.6-2.0 and 3.3-4.1 respectively, and the content of T. Fe is 10%-15% and 20%-35% respectively, the dephosphorization rate of the dephosphorization furnace is as high as 50.85%, the average is 38.35%, the end dephosphorization rate is the highest 95.69%, the average is 94.88%, and the phosphorus content of the molten steel at the end of smelting is controlled below 0.007%, the minimum is 0.005%, meeting the production requirements of X80 pipeline steel.

**Key Words:** X80 Pipeline Steel; Combined Blowing Converter; Duplex Process; Dephosphorization

对于绝大多数钢种来说, 磷是钢中有害元素之一, 作为杂质元素磷能够恶化钢材使用性能, 必须在冶炼环节尽可能去除。钢中磷含量越高在钢水的凝固过程中产生偏析越严重, 钢材冲击性能降低就越大。磷也能够降低钢水表面张力, 很容易聚集在结晶边界处, 导致钢材的局部组织异常, 降低了钢材的抗热裂纹性能, 容易引起“冷脆”, 对焊接使用功能也有不利影响。

目前低温容器用钢、海洋平台用钢、油井管钢、高级别管线钢等均要求磷含量极低, 采用常规单渣法工艺冶炼无法满足超低磷钢的要求, 高级别的 X80 管线钢对钢中磷含量有严格要求。钢厂结合自身工艺装备特点, 采用转炉双联工艺, 高炉铁水先兑入脱磷转炉, 利用铁水低温条件, 有利于脱磷反应正

向进行, 这个过程先脱除铁水一部分磷, 另一座转炉接受来自脱磷炉的低磷铁水脱碳, 这个过程也会脱去一部分磷, 以上两过程控制钢中磷含量  $\leq 90 \times 10^{-6}$ , 充分发挥转炉双联冶炼的优势<sup>[1-4]</sup>。

### 1 钢厂 X80 管线钢生产工艺流程

钢厂热轧部共有 3 座公称容量 200 t 复吹转炉, 一座脱磷炉, 两座脱碳炉, 双工位 LF 两座和两座 RH, 以及 2 台直弧型两流连铸板坯连铸机, 年产合格板坯 600 万 t 左右, 其中大部分是  $[\text{P}] < 0.02\%$  的优质钢, 要求出钢  $[\text{P}] \leq 0.015\%$ 。X80 管线钢生产采用转炉双联工艺, 其成品磷含量控制在  $120 \times 10^{-6}$ , 生产工艺流程为: KR 脱硫 → 脱磷转炉 → 脱碳转炉 → LF 精炼处理 → RH 精炼处理 → 连铸。

2 试验方案

现场首次试验共生产 2 炉 X80 管线钢。根据现场炉况和生产节奏要求,铁水预处理脱硫,控制入炉铁水[S] ≤ 0.005%,将铁水、废钢加入转炉,使用自产优质废钢,不得使用生铁块、钢渣。脱磷炉要在低供氧强度下脱磷脱硅,并抑制铁水升温过高以防止碳的氧化,根据铁水硅含量,脱磷炉使用恒流量吹炼,供氧强度 2.22 m<sup>3</sup>/(t · min),底吹强度为 0.08 m<sup>3</sup>/(t · min)。脱磷炉目标碱度 1.8 ~ 2.2,半钢温度控制在 1 340 ~ 1 380 ℃;脱碳炉终点温度控制在 1 665 ~ 1 685 ℃,终点[P] ≤ 0.009%,全程底吹氩气。生产过程中在脱磷和脱碳炉每炉铁水入炉前、拉碳结束后各取一钢样,另外在转炉出钢时取渣样。铁水成分和温度见表 1。

3 试验结果及分析

3.1 试验结果

脱磷终点和脱碳终点钢、渣成分及温度见表 2 和表 3,由表 3 可知,H01C 脱磷炉渣(CaO)/(SiO<sub>2</sub>) 碱度(R) 是 1.37, T. Fe 为 10.67%, 钢水温度 1 361 ℃,脱磷率 25.85%, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>/[P] 磷分配比 L<sub>p</sub> 是 35; H01D 脱碳炉渣碱度 R 是 4.15, T. Fe 为 33.74%, 钢水温度 1 672 ℃,脱磷率 94.18%, 磷分

配比 L<sub>p</sub> 是 320。H02C 脱磷炉渣碱度 R 是 1.70, T. Fe 为 13.08%, 钢水温度 1 366 ℃, 脱磷率 50.85%, 磷分配比 L<sub>p</sub> 是 36; H02D 脱碳炉渣碱度 R 是 3.27, T. Fe 为 18.35%, 钢水温度 1 684 ℃, 脱磷率 87.93%, 磷分配比 L<sub>p</sub> 是 232。

由表 1 和表 2 数据做图 1, 由图可知钢中碳、磷终点成分变化,图 1(a)为第 1 炉(H01),图 1(b)为第 2 炉(H02)。图 1(b)的脱磷炉终点磷含量比图 1(a)

表 1 铁水温度和成分  
Table 1 Composition and temperature of molten iron

炉号	温度/℃	成分/%				
		C	Si	Mn	P	S
H01	1 306	4.63	0.37	0.11	0.116	0.002
H02	1 403	4.57	0.64	0.15	0.118	0.002

表 2 钢水温度和成分  
Table 2 Composition and temperature of molten steel

炉号	温度/℃	成分/%				
		C	Si	Mn	P	S
H01A	1 361	4.00	0.22	0.04	0.086	0.005
H01B	1 672	0.032	0.005	0.018	0.005	0.004
H02A	1 366	3.50	0.22	0.02	0.058	0.005
H02B	1 684	0.035	0.004	0.012	0.007	0.005

标注:H01A 是第 1 炉铁水脱磷终点成分和温度,H01B 是第 1 炉铁水脱碳终点成分和温度,H02A 是第 2 炉铁水脱磷终点成分和温度,H02B 是第 2 炉铁水脱碳终点成分和温度。

表 3 炉渣成分和 R  
Table 3 Slag composition and R

炉渣	成分/%								R(CaO/SiO <sub>2</sub> )
	T. Fe	MnO	MgO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	CaO	
H01C	10.67	5.87	3.45	30.03	1.09	2.41	3.06	41.00	1.37
H01D	33.74	0.94	6.82	9.24	0.64	0.22	1.60	38.39	4.15
H02C	13.08	2.93	6.32	25.74	1.43	2.02	2.10	43.86	1.70
H02D	18.35	1.06	8.96	15.23	0.89	0.31	1.63	49.8	3.27

标注:H01C 是第 1 炉铁水脱磷终点炉渣成分,H01D 是第 1 炉铁水脱碳终点炉渣成分,H02C 是第 2 炉铁水脱磷终点炉渣成分,H02D 是第 2 炉铁水脱碳终点炉渣成分。

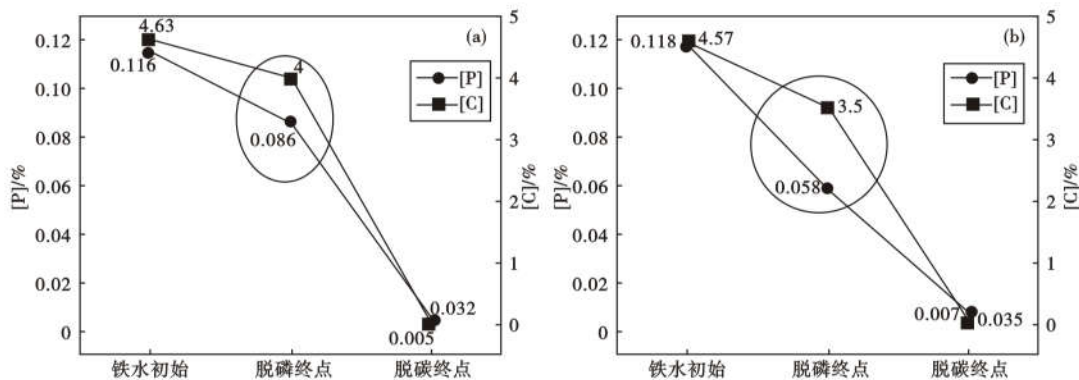


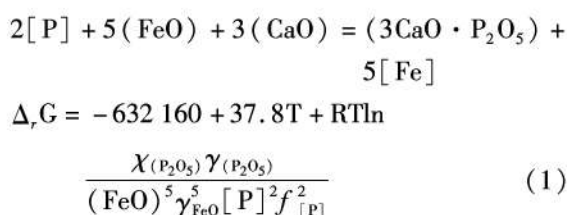
图 1 钢中碳、磷成分变化:(a)第 1 炉(H01);(b)第 2 炉(H02)

Fig. 1 Change of carbon, phosphorus composition in steel: (a) H01; (b) H02

低 32.55%, 碳含量低 12.5%, 由于首次试验, 根据第 1 炉的试验生产实际状况, 采用转炉副枪和烟气分析联合应用动态控制对模型参数调整(供氧强度, 氧枪枪位, 加料过程)降低脱磷转炉终点磷含量。终渣碱度 3.0~4.0, 炉渣中 T. Fe 控制在 20% 左右, 顶吹降低供氧流量、提高氧枪枪位、增加底吹流量, 经约 12 min 的吹炼, 保证转炉终点磷含量控制在  $\leq 75 \times 10^{-6}$ , 试验结果证实, 转炉终点钢水磷控制得较好。

### 3.2 铁水中磷的氧化反应

研究表明<sup>[5]</sup>, 铁水中磷的氧化及其实际自由能变化如式(1)所示。



由式(1)中  $\Delta_r G = 0$ , 可得:

$$37.8T + RT \ln \frac{\chi_{(\text{P}_2\text{O}_5)} \gamma_{(\text{P}_2\text{O}_5)}}{(\text{FeO})^5 \gamma_{\text{FeO}}^5 [\text{P}]^2 f_{[\text{P}]^2}} - 631\,260 = 0 \quad (2)$$

磷分配比的定义式如下:

$$L_{\text{P}} = \frac{(\text{P}_2\text{O}_5)}{[\text{P}]} \quad (3)$$

由式(2)和式(3)可得, 磷分配比  $L_{\text{P}}$  的计算式为(4)。

$$\lg \frac{\chi_{\text{P}_2\text{O}_5}}{[\text{P}]} = 5 \lg \alpha_{\text{FeO}} + 5 \lg \gamma_{\text{FeO}} + 2 \lg f_{\text{P}} - \lg [\text{P}] - \lg \gamma_{\text{P}_2\text{O}_5} + 33\,012/T - 1.98 \quad (4)$$

其中:  $\chi_{\text{P}_2\text{O}_5}$ —脱磷渣中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的摩尔分数;  $\alpha_{\text{FeO}}$ —脱磷渣中 FeO 活度;  $\gamma_{\text{FeO}}$ —脱磷渣中 FeO 活度系数;  $f_{\text{P}}$ —铁水中磷的活度系数;  $[\text{P}]$ —铁水中磷的质量分数;  $\gamma_{\text{P}_2\text{O}_5}$ —脱磷渣中  $\text{P}_2\text{O}_5$  活度系数;  $T$ —温度, K。

由式(4)可知, 若要提高 P 在渣铁间的分配比, 可以采取以下方法: ①提高渣中 FeO 含量; ②降低熔池温度; ③降低脱磷渣中  $\text{P}_2\text{O}_5$  的活度系数。

### 3.3 熔渣全铁含量和碱度对脱磷的影响

通过渣中 T. Fe 含量和碱度对磷分配比的影响关系的分析, 第 1 炉(H01)和第 2 炉(H02)脱碳炉与脱磷炉渣中 T. Fe 含量对比, 脱碳炉要高于脱磷炉, 渣/钢间的磷分配比脱碳炉优于脱磷炉, 直观表现为随渣中 T. Fe 含量的增大, 渣/钢间的磷分配比增大; 脱碳炉碱度  $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  大于脱磷炉碱度,

表现为随渣中碱度  $R$  的增大, 冶炼终点渣/钢间的磷分配比增大。

由式(1)~(4)可知, 增加炉渣中 T. Fe 含量, 渣中(FeO)增多有利于增加(CaO)与( $\text{P}_2\text{O}_5$ )反应结合成( $3\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5$ ), (FeO)还能提高石灰溶解反应速度, 生成铁酸钙低熔点化合物, 降低炉渣的黏度, 改善熔渣的流动性, 加快磷在钢渣界面传质, 有利于脱磷的动力学条件, 提高脱磷速率。但是, 渣中 T. Fe 含量不可过高, 否则将稀释(CaO)的脱磷作用, 也会增加铁损, 减少金属收得率。

廖鹏等人研究认为半钢时转炉 T. Fe 含量保持在 14%~20% 较为合适, 转炉终点渣中 T. Fe 含量保持在 16%~18% 较为合适<sup>[6]</sup>。吴伟研究认为前期转炉 T. Fe 含量保持在 35%~40% 较为合适, 转炉终点渣中 T. Fe 含量保持在 20%~25% 较为合适<sup>[7]</sup>。结合以上研究认为, 钢厂脱磷转炉 T. Fe 含量保持在 10%~15% 较为合适, 脱碳转炉终点渣中 T. Fe 含量保持在 20%~35% 较为合适, 含量过低不利于脱磷, 过高造成铁损增加。(FeO)对磷的作用比较复杂, 在脱磷过程中起双重作用, 当(FeO)低时, (CaO)不能很好的熔化, 当过高时, 会稀释炉渣, 影响脱磷效果。

由表 3 可知渣中的(CaO)含量较高, (CaO)具有较强的脱磷能力, 高温条件下生成稳定磷酸钙化合物, 降低渣中( $\text{P}_2\text{O}_5$ )含量。(CaO)是使( $\text{P}_2\text{O}_5$ )活度降低的主要成分, 增加渣中(CaO)可增大其活度, 获得高碱度、高氧化铁熔渣, 有利于增大磷分配比。因此, 从这个角度出发, 提高炉渣碱度可大幅提高脱磷效率。但加入量不宜过大, 否则炉渣的粘度增加, 导致炉渣流动性减弱, 影响在钢-渣间脱磷反应进行, 从而降低脱磷效率。所以, 对于脱磷过程应该保持合适的碱度。廖鹏等人研究认为半钢时渣碱度保持在 2.0~2.3, 终点渣碱度在 3.6~3.8 较为合适<sup>[6]</sup>。吴伟等研究认为前期转炉碱度保持在 2.0, 转炉终点渣碱度保持在 3.5~4.0 较为合适<sup>[7,9]</sup>。结合以上研究钢厂脱磷转炉碱度保持在 1.6~2.0 较为合适, 脱碳转炉终点渣中碱度保持在 3.3~4.1 较为合适。

### 3.4 转炉终点炉渣矿相分析

炉渣岩相分析主要是确定炉渣的矿相组成和分布, 把矿相分析与炉渣化学成分结合起来, 可以更全面地了解炉渣的性质。图 2 和表 4 分别为脱磷炉终点炉渣和脱碳炉终点炉渣矿相微观结构和分析。由图可知, 两炉炉渣的矿相特征是:

(1)两种炉渣的矿相组成基本一致,主要包括 C2S(硅酸二钙)、C3S(硅酸三钙)、RO 相、CF(铁酸钙)、fCaO(自由氧化钙)。由于终点温度不同,低温条件矿相结构还没有形成稳定组织,从图中可以得出,炉渣终点温度越高矿相晶体组织越明显,脱碳炉终点温度较高,渣(CaO)和(SiO<sub>2</sub>)反应充分,形成的 C3S 相也较粗大,而脱磷炉温度较低,渣中形成的 C3S 相对较少,粒状分布的 C2S 相含量较多,炉渣中形成硅酸二钙和硅酸三钙固溶体,热力学条件有利

于反应的正向进行<sup>[10-14]</sup>。

(2)脱碳炉终渣的岩相组成中以长条状及板柱状存在的 C3S 数量比脱磷终点炉渣的比例高 15%;以灰褐色粒状分布的 C2S 数量比脱磷终点炉渣的比例高 10%。

(3)脱磷炉终渣的岩相组成中 CF 数量比脱碳终点炉渣的比例高 15%,两种终渣中 RO 和 fCaO 相比比例基本相当。

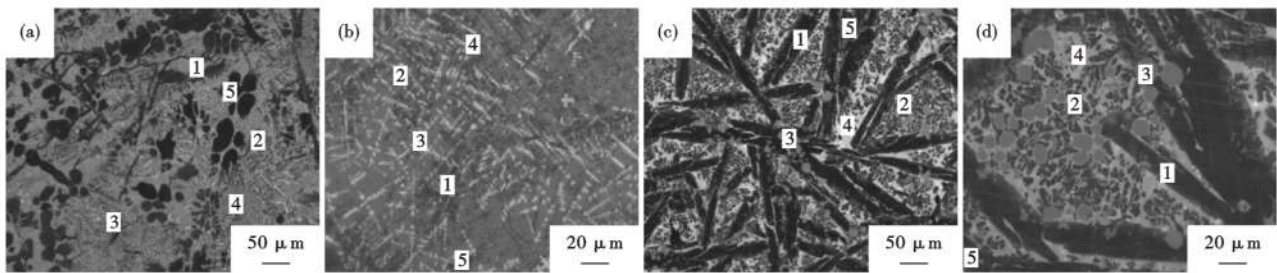


图 2 转炉终点炉渣矿相微观结构:(a)(b)脱磷炉终点炉渣;(c)(d)脱碳炉终点炉渣

Fig. 2 Microstructure of ore phase in the final slag of converter: (a)(b)Final slag of dephosphorization furnace; (c)(d)Final slag of decarbonization furnace

表 4 复吹转炉炉渣矿相组成/%

Table 4 Mineral phase composition of combined blown converter slag/%

炉渣	C3S	C2S	RO	CF	fCaO
脱磷渣	10 ~ 15	20 ~ 25	10 ~ 20	30 ~ 35	0 ~ 5
脱碳渣	25 ~ 30	20 ~ 35	10 ~ 15	15 ~ 20	0 ~ 5

标注:C2S-硅酸二钙、C3S-硅酸三钙、RO 相、CF-铁酸钙、fCaO-自由氧化钙

#### 4 结语

(1)采用转炉双联顶底复吹,加持转炉副枪和烟气分析联合应用计算机动态控制智能化自动炼钢技术,生产的 X80 钢水洁净度对比传统工艺(只能静态计算无法实时动态成分跟踪)技术有较大幅度提高,终点钢水[P] + [S]最低控制可达到 90 × 10<sup>-6</sup>。

(2)双联工艺复合吹炼条件下冶炼过程中炉渣成渣快,渣钢反应充分,脱磷转炉 T. Fe 含量保持在 10% ~ 15%,炉渣碱度保持在 1.6 ~ 2.0 较为合适,脱碳转炉终点渣中 T. Fe 含量保持在 20% ~ 35%,炉渣碱度保持在 3.3 ~ 4.1 较为合适。

(3)复合吹炼工艺条件下,炉渣矿相为 C2S(硅酸二钙)、C3S(硅酸三钙)、RO 相、CF(铁酸钙)、fCaO(自由氧化钙),脱碳炉终渣的岩相组成中的 C3S 数量比脱磷终点炉渣的比例高 15%,炉渣组元反应充分,以灰褐色粒状分布的 C2S 的数量比脱磷终点炉渣的比例高 10%。

#### 参考文献

[1] 杨春政,魏 钢,刘建华,等. 高效低成本洁净钢平台生产实践[J]. 炼钢,2012,28(3):1-10.  
 [2] 罗 磊,赵长亮,陈玉鑫,等. 300 t 复吹转炉冶炼 X80 管线钢磷含量控制[J]. 钢铁,2014,49(9):49-54.  
 [3] 智建国,吴 伟,高 琦,等. 大型转炉优化造渣工艺提高脱磷的效果[J]. 钢铁,2020,55(7):72-77.  
 [4] 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.  
 [5] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2008:370-380.  
 [6] 廖 鹏,秦 哲,侯泽旺,等. 复吹转炉冶炼低磷钢试验研究[J]. 钢铁钨钛,2012,33(4):51-55.  
 [7] 吴 伟. 复吹转炉冶炼中高磷铁水的应用基础研究[D]. 沈阳:东北大学,2003,61-85.  
 [8] 高 琦,智建国,吴 伟,等. 关键. 100 t 转炉留渣双渣法冶炼高硅高磷铁水试验[J]. 特殊钢,2020,41(6):41-45.  
 [9] 陈 均,李 盛,周明佳,等. 120 t 转炉半钢炼钢去磷保碳工艺的生产试验[J]. 特殊钢,2020,41(6):32-35.  
 [10] 李 勇,吴 伟,朱启柱,等. 转炉顶吹与复合吹炼条件下冶金效果的对比[J]. 钢铁研究学报,2011,23(12):13-17.  
 [11] 孟华栋,刘 浏. 转炉炼钢成渣过程的岩相研究[J]. 钢铁,2010,45(6):26-30.  
 [12] 杨文远,王明林,崔淑贤,等. 炉渣的岩相研究在转炉炼钢中的应用[J]. 钢铁研究学报,2007,19(12):10-15.  
 [13] 董文亮,潘宏伟,罗 磊,等. 磷在多相脱磷转炉渣中的分布[J]. 钢铁,2020,55(2):75-81.  
 [14] 陈 均,梁新腾. 200 t 转炉半钢冶炼提高转炉废钢消耗的试验研究[J]. 特殊钢,2021,42(6):32-36.