

120 t 转炉高碳出钢工艺研究和应用

管挺 叶磊 万文华

(中天钢铁集团有限公司,常州 213011)

摘要 理论计算高碳出钢冶炼所需的铁水比较常规工艺高 2.9%。研究了转炉冶炼前期的脱磷规律。结果表明:转炉冶炼前期炉渣碱度控制在 1.8~2.2,炉渣 FeO 含量控制在 15% 左右,熔池温度控制在 1 400~1 450 ℃,转炉冶炼前期平均脱磷率可控制在 75%。优化了冶炼过程的供氧制度、加料制度、底吹制度等,转炉终点碳含量可由原来的 0.07% 提高到 0.21%,终点磷含量可由原来 0.016% 降低到 0.011%。

关键词 120 t 转炉 高碳出钢 双渣 脱磷

Technical Study and Application of High Carbon Liquid Tapping of 120 t Converter

Guan Ting, Ye Lei and Wan Wenhua

(Zenith Steel Group Co Ltd, Chang zhou 213011)

Abstract The amount of molten iron for high carbon liquid tapping is 2.9% higher than the conventional process by theoretical calculation. The dephosphorization law at initial smelting period of BOF is studied. The results show that at the first stage with control of (FeO) 15%, slag basicity 1.8 to 2.2 and bath temperature 1 400 ~ 1 450 ℃, then the average dephosphorization rate up to 75% at initial smelting period of BOF. The oxygen blowing system, feeding system and bottom blowing system of smelting process are optimized, that the end-point carbon content can be increased from original 0.07% to 0.21%, and the end-point phosphorus content can be reduced from original 0.016% to 0.011%.

Material Index 120 t BOF, High Carbon Tapping, Double Slag, Dephosphorization

钢厂现有 3 座 120 t 顶底复吹转炉,每年生产的硬线钢、帘线钢、SWRH82B 系列等高碳钢种产量达 300 万 t 以上。转炉采用常规工艺冶炼此类钢种,终点平均碳含量为 0.07%,出钢过程加入大量增碳剂来满足钢种对碳含量的要求。采用低碳出钢的冶炼方法,转炉终点磷含量和温度相对较容易控制,但钢水氧含量高,合金消耗高且后期处理夹杂物超标现象普遍,并且钢铁料消耗相对较高,冶炼成本高且钢水洁净度相对较差。转炉高碳出钢能有效提高钢水洁净度,并降低吨钢成本^[1-3]。

1 现状分析

钢厂转炉常规工艺生产高碳钢种主要采用单渣法,供氧制度和底吹制度如图 1 所示,过程消耗情况如表 1。常规工艺冶炼,转炉终点碳分布在 0.03%~0.20%,均值为 0.07%;出钢温度分布在 1 560~1 700 ℃,均值为 1 635 ℃;出钢磷含量分布在 0.003%~0.04%,均值为 0.016%。

单渣法冶炼工艺生产高碳钢种,主要存在两个方面的问题:(1) 终点磷含量波动大,脱磷效果不稳定;(2) 终点拉碳速度快,碳含量低。

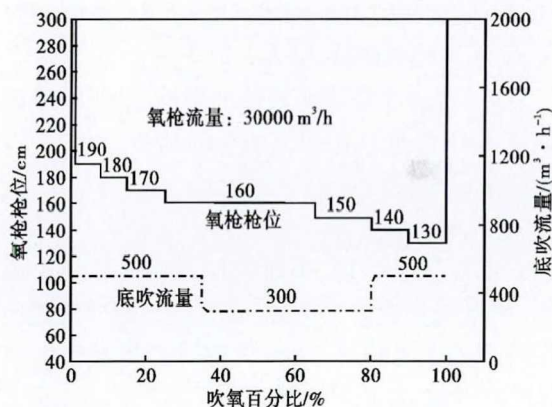


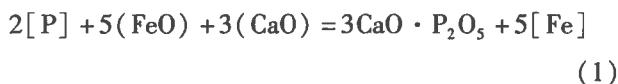
图 1 原常规冶炼工艺供氧制度和底吹制度

Fig. 1 Oxygen blowing system and bottom blowing system of original smelting process

2 工艺改进

2.1 脱磷分析

复吹转炉炼钢的脱磷反应式^[4]为:



$$\lg \frac{(P)}{[P]} = \frac{22350}{T} - 24.0 + 7 \lg(CaO) + 2.5 \lg(TFe) \quad (2)$$

表 1 转炉冶炼原料和辅料消耗及终点情况

Table 1 Averagr auxiliary materials consumption and tapping information of converter steelmaking

铁水/ t	废钢/ t	铁水 硅/%	铁水 磷/%	辅料加入量/(kg·t ⁻¹)			终点温 度/℃	终点 碳/%	终点 磷/%	终渣 T. Fe/%	终渣碱 度
				轻烧白云石	石灰	生白云石					
111	29	0.43	0.12	12.8	28.6	6.1	1 635	0.07	0.016	8.5	3.0

由式(1)和式(2)可知,通过降低熔池温度、提高炉渣氧化钙含量和提高炉渣全铁含量能提高炉渣磷分配比。采用双渣法冶炼,在转炉冶炼前期低温的熔池环境下,控制合适的炉渣碱度、炉渣全铁含量,可有效脱除钢液中的磷,之后倒出富磷渣,再进行后续的脱碳升温并强化脱磷效果,实现转炉终点高碳、低磷出钢的目标^[5]。

宝钢将一次倒渣温度控制在 1 350 ~ 1 400 ℃,炉渣碱度 2.0 ~ 2.5,炉渣 T. Fe 含量控制在 15% ~ 18%,前期脱磷率可控制在 75% 左右^[6];南钢将转炉一次倒渣温度控制在 1 400 ~ 1 430 ℃,炉渣碱度 2.3 左右,炉渣 FeO 含量 15% ~ 18%,前期平均脱磷率约 70%^[7];安钢将一次倒渣温度控制在 1 380 ~ 1 410 ℃,炉渣碱度 2.0 ~ 2.3,前期平均脱磷率为 68.5%^[8];首钢将一次倒渣温度控制在 1 350 ~ 1 400 ℃,炉渣碱度 1.8 ~ 2.0,炉渣 T. Fe 含量 14% ~ 17%,前期平均脱磷率为 63.1%^[9]。

总之,转炉冶炼前期最佳的熔池温度、炉渣碱度和炉渣 FeO 含量应在理论计算的基础上,结合本厂的实际情况进行设定。

2.2 优化铁水比

采用双渣法冶炼,由于前期需要进行一次倒渣操作,热量损失较大。为此,建立热平衡模型理论计算在现有铁水条件下,高碳出钢时的热量输入和满足工艺要求的热量支出情况,如表 2 所示。由表 2 可知,热量输入小于热量支出,热量不足。为满足热量收支平衡,在不使用增热剂的条件下,可通过提高铁水比来实现。对此,计算了不同铁水硅含量与入炉铁水和废钢量的关系,结果如表 3 所示。根据理论计算结果,与常规工艺比较,改进工艺要求铁水装入量增加 4.1 t,废钢装入量相应减少 4.1 t,折算成铁水比为 2.9%。

2.3 转炉前期最佳控制参数的确定

转炉冶炼前期,硅锰优先氧化,磷和碳根据熔池温度选择性氧化,即当熔池温度高于某一范围时,碳优先氧化。随转炉脱磷吹炼过程的进行,转炉钢水

表 2 现有铁水情况热平衡计算结果

Table 2 Result of heat balance calculations in present hot metal condition

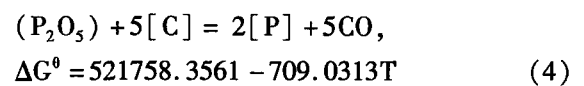
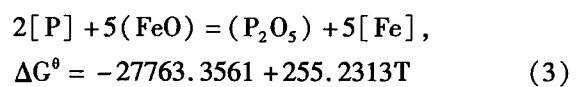
项目	热收入		热支出		
	热量/kJ	百分比/%	项目	热量/kJ	百分比/%
铁水	135845853	52.2	钢水	183260814	68.2
元素反应热	86461000	33.2	炉渣	42274266	15.8
成渣热	4274592	1.6	冷却剂	4235016	1.6
铁的氧化	24042368	9.2	烟气	26010554	10.1
初始热量	9619125	3.8	热损失	11519330	4.3
总量	260242938	100.0	总量	267299980	100.0

表 3 改进工艺后铁水硅含量、铁水量和废钢量的理论计算结果

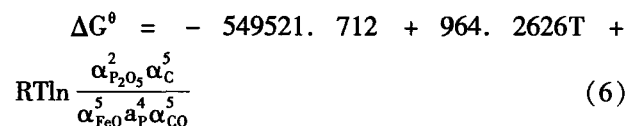
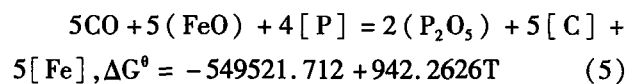
Table 3 Theory calculation result of hot metal weight and scrap weight and silicon content of hot metal after improved process

铁水硅含量/%	铁水量/t	废钢量/t
0.2	119	21
0.3	117	23
0.4	115	25
0.5	113	27
0.6	111	29
0.7	109	31

成分和炉渣组成均发生变化,转炉内的碳、磷选择性氧化温度亦发生变化^[7]。研究表明,转炉冶炼过程,脱磷反应的动态平衡可理解为反应式(3)和反应式(4)同时进行,当(3)式的 ΔG° 和(4)式的 ΔG° 相等,脱磷反应处于平衡,此时计算的熔池温度即为某一组分下的平衡温度。



将反应式(1)和反应式(2)耦合可得:



式中: α_i -反应物或生成物组元 i 的活度; P_{CO} -炉气中 CO 的分压。

P_2O_5 , 碳, 磷和炉渣 FeO 的活度分别按文献 [10], [7], [7] 和 [11] 给出的公式计算。

表 4 铁液中各组分与磷活度的相互作用系数(1873K)

Table 4 Coefficients of interaction between element and phosphorus activity in hot metal at 1873K

e_P^C	e_P^{Si}	e_P^{Mn}	e_P^S	e_P^P
0.13	0.12	0	0.028	0.062

表 5 转炉一次倒渣时半钢的化学成分/%

Table 5 Chemical component of semi metal at BOF first deslagging/%

C	Si	Mn	S	P
3.5	0.05	0.15	0.02	0.03

表 6 转炉一次倒渣时炉渣成分、熔点和碳磷选择性氧化温度

Table 6 Ingredient and melting point of slag and selective oxidation temperature of carbon and phosphorus at BOF first deslagging

炉渣组成/%						碱度	熔点/℃	碳磷选择性氧化温度/℃	选择性温度与熔点的差值/℃
CaO	MgO	MnO	FeO	SiO ₂	P ₂ O ₅				
41.0	8.1	4.7	10.7	26.7	2.9	1.54	1329	1384	55
35.2	6.4	5.6	15.2	20.5	3.4	1.72	1349	1403	54
38.9	8.0	6.1	16.8	20.5	3.9	1.90	1361	1411	50
40.2	6.7	5.8	14.6	20.1	3.5	2.00	1380	1438	58
41.2	6.8	5.6	15.3	18.7	4.1	2.20	1392	1445	53
40.9	7.2	6.2	15.6	17.8	3.3	2.30	1435	1457	22

P_{CO} 通常认为转炉冶炼过程中 CO 分压为 1 个大气压。

转炉冶炼脱磷反应为液态炉渣与钢水发生反应, 固态炉渣不直接参与反应。为保证转炉内的炉渣为液态炉渣, 炉渣的熔点应较熔池温度低 50 ~ 100 ℃。

在转炉双渣冶炼一倒过程中, 采用金属棒通过转炉炉口插入到转炉内粘取炉渣, 待炉渣冷却磨匀后通过 X 射线荧光光谱仪进行成分分析, 同时采用型号为 ND-II 的高温物性测试仪对炉渣进行半球点温度测定, 测定结果如表 6 所示。同时计算相应炉渣组分的碳、磷选择性氧化温度, 计算的一次倒渣的半钢成分如表 5 所示, 采用式(4)对脱磷反应的平衡温度进行计算, 计算结果列于表 6。由表 6 可知,

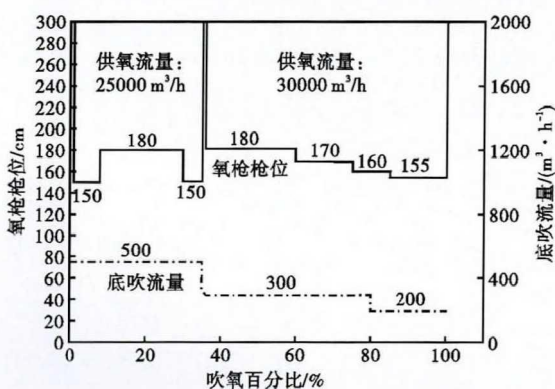


图 2 改进工艺的供氧制度和底吹制度

Fig. 2 Oxygen blowing system and bottom blowing system for optimized process

在炉渣 FeO 含量相近的情况下, 随着炉渣碱度的升高, 炉渣熔点逐渐升高, 对应的熔池动态的碳、磷转变温度亦逐渐升高, 但当碱度超过 2.2 时, 碳、磷动态转化温度低于 50 ℃, 不利于液态渣的形成, 不利于脱磷。由此分析可知, 转炉高效脱磷炉渣组成应为: 转炉炉渣碱度控制在 1.8 ~ 2.2, 炉渣 FeO 控制在 15% 左右, 同时一次倒渣温度控制在 1400 ~ 1450 ℃, 转炉前期脱磷效果最佳。

2.4 工艺改进措施

转炉终点高碳、低磷出钢措施:

(1) 采用双渣法冶炼替代原来的单渣法冶炼。

(2) 改进工艺的吹氧制度和底吹制度如图 2 所示。吹炼前期(脱磷期)采用低—高一低的供氧枪位, 供氧流量为 25 000 m³/h, 采用大流量 500 m³/h 底吹, 加强熔池搅拌;

吹炼中期采用高一低—低的供氧枪位, 供氧流量为 30 000 m³/h, 底吹流量为 300 m³/h; 吹炼末期采用高枪位、低底吹流量模式拉碳, 供氧流量为 30 000 m³/h, 底吹强度为 200 m³/h。

(3) 脱磷期控制熔池温度 1400 ~ 1450 ℃, 炉渣碱度 1.8 ~ 2.2, 炉渣 MgO < 8%, 当铁水硅含量较高时, 为保证炉渣碱度, 石灰加入量相应较大, 此时为促进石灰熔化, 可在转炉加铁水之前加入一定量的石灰进行垫料。

(4) 脱磷期冶炼结束进行倒渣操作, 倒渣量控制在 60% 以上, 倒渣时间控制在 4 min 以上。

(5) 控制转炉冶炼终点炉渣碱度在 3.0 ~ 3.5, 转炉冶炼后期加入 2.0 ~ 2.5 t 的石灰, 并加入 1.5 ~ 2.0 t 的轻烧白云石, 后期加料在倒渣后一次性加入 60% 的渣料, 剩余渣料分 3 批均匀加入; 冶炼中后期少量多批次加入球团矿, 球团矿每次加入量 200 ~ 300 kg, 后期球团矿总量控制在 2 t 以内。

与原工艺相比较, 优化后的改进工艺具有如下特点: ①采用双渣法冶炼; ②根据钢厂的实际情况结合理论计算, 确定一次倒渣时的炉渣碱度 1.8 ~ 2.2、熔池温度 1400 ~ 1450 ℃ 和炉渣 FeO 含量 15% 左右, 尽可能提高一次倒渣时的脱磷效率; ③一次倒渣量控制在 60% 以上; ④冶炼中后期少量多批次的加入球团矿, 提高化渣效果; ⑤冶炼终点采用高枪位和低底吹流量。

表 7 改进工艺和原工艺冶炼情况
Table 7 Smelting situation of improved process and original process

工艺		脱磷期				脱碳期			
		半钢温度/℃	炉渣碱度	(FeO)/%	半钢磷含量/%	前期脱磷率/%	终点温度/℃	终点碳/%	终点磷/%
改进工艺	范围	1 400 ~ 1 450	1.7 ~ 2.3	13 ~ 22	0.02 ~ 0.04	66 ~ 82	1 610 ~ 1 670	0.12 ~ 0.29	0.005 ~ 0.013
	均值	1 425	2.1	16	0.03	75	1 636	0.21	0.011
原工艺 (单渣法)	范围						1 560 ~ 1 700	0.03 ~ 0.20	0.003 ~ 0.04
	均值						1 635	0.07	0.016

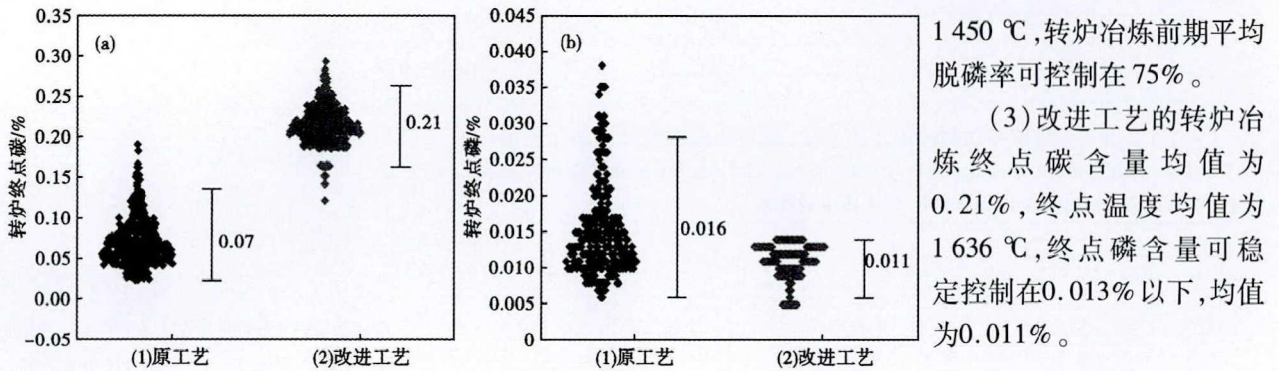


图 3 工艺优化前(1)和工艺优化后(2)转炉终点碳含量(a)和终点磷含量(b)的分布

Fig. 3 Distribution of BOF end carbon content (a) and end phosphorus content (b) before optimization (1) and after optimization (2) of process

1 450 ℃, 转炉冶炼前期平均脱磷率可控制在 75%。

(3)改进工艺的转炉冶炼终点碳含量均值为 0.21%, 终点温度均值为 1 636 ℃, 终点磷含量可稳定控制在 0.013% 以下, 均值为 0.011%。

参考文献

3 生产实践效果

应用改进工艺在 C72DA 钢种开展高碳出钢生产试验, 取得了较为显著的效果, 生产试验结果如表 7 和图 3 所示。由表 7 和图 3 可知, 改进工艺转炉第一次倒渣的熔池温度控制在 1 400 ~ 1 450 ℃, 均值为 1 425 ℃; 炉渣碱度控制在 1.7 ~ 2.3, 均值为 2.1; 半钢磷含量可控制在 0.02% ~ 0.04%, 均值为 0.03%, 平均脱磷率可控制在 75%。转炉冶炼终点温度控制在 1 610 ~ 1 670 ℃, 均值为 1 636 ℃; 终点碳含量控制在 0.12% ~ 0.29%, 均值为 0.21%; 终点磷含量控制在 0.005% ~ 0.013%, 均值为 0.011%。与原工艺相比, 采用新工艺冶炼, 在终点温度相近的情况下, 转炉终点碳含量更高, 磷含量更低, 且数据的波动范围更小, 取得明显进步。

4 结论

(1)改进工艺的转炉热平衡情况为高碳出钢, 冶炼铁水比较常规工艺高 2.9%。

(2)转炉冶炼前期炉渣碱度控制在 1.8 ~ 2.2, 炉渣 FeO 含量控制在 15% 左右, 熔池温度在 1 400 ~

[1]田志红,李永东,王海宝,等.非脱磷铁水在 210 t 转炉高拉碳发冶炼高碳钢的生产工艺研究及实践[J].钢铁,2009,44(2):36-39.

[2]姚志超,吕成洵.高拉碳法冶炼 80B 系列钢的生产实践[J].炼钢,2010,26(3):34-36.

[3]潘秀兰,王艳红,梁慧智,等.国内外转炉脱磷炼钢工艺分析[J].世界钢铁,2010(1):19-21.

[4]黄希祜.钢铁冶金原理[M].北京:冶金工业出版社,2011:363-364.

[5]Yang Xiao,Sun Fengmei,Yang Jinli,et al.Optimization of Low Phosphorus Steel Production With Double Slag Process in BOF[J].Journal of Iron and Steel Research,2013,20(8):41-47.

[6]徐文杰,李安东,刘国勇.复吹转炉冶炼 X65 管线钢脱磷工艺研究[J].上海金属,2009,31(4):21-24.

[7]周朝刚,李晶,武贺,等.转炉双渣脱磷一次倒渣温度研究[J].钢铁,2014,49(3):24-28.

[8]宋万平,贾旭岗.复吹转炉高碳洁净钢脱磷工艺研究与应用[J].河南冶金,2015,23(5):21-24.

[9]王杰,曾加庆,杨利彬.复吹转炉双渣法脱磷冶炼工艺一次倒渣温度最优化选择[J].炼钢,2015,31(4):34-37.

[10]王新华.钢铁冶金—炼钢学[M].北京:高等教育出版社,2007:25-29.

[11]刘锟,刘浏,和平,等.转炉生产低磷钢的脱磷反应热力学[J].钢铁,2012,47(1):34-39.

管挺(1985-),男,硕士(2017年重庆大学),工程师,河南科技大学(本科)毕业,转炉炼钢工艺开发。

E-mail: guanting1999@163.com

收稿日期:2020-08-19