包钢高炉降低铁水 w [P] 的生产实践

高向洲[1,2],罗果萍[1],李 磊[2],郭卓团[2]

(1. 内蒙古科技大学材料与冶金学院,内蒙古 包头 014010;
2. 内蒙古包钢钢联股份有限公司炼铁厂,内蒙古 包头 014010)

摘 要: 根据高炉冶炼过程中磷还原的机理,以及高炉内存在有利于磷还原的条件,结合目前包钢铁水,原燃料含P水平等几方面进行了分析。通过测算改善高炉入炉原料结构,调控炉温等措施,降低了铁水中的 w [P],从而满足了冶炼贝氏体钢的要求。

关键词: 磷负荷; 磷还原; 循环富集
中图分类号: TF542 **文献标识码:** B **文章编号:** 1009-5438(2017)02-0016-04
DOI:10.13647/j.cnki.btgkj.2017.02.006

Production Practice for Reducing w [P] of Hot Metal in Blast Furnace of Baotou Steel

GAO Xiang-zhou[1,2], *LUO Guo-ping*[1], *LI Lei*[2], *GUO Zhuo-tuan*[2]

(1. *School of Materials and Metallurgy, Inner Mongolia University of Science and Technology, Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*;
2. *Iron-making Plant of Steel Union Co. Ltd. of Baotou Steel (Group) Corp.*, *Baotou* 014010, *Nei Monggol, China*)

Abstract: According to the mechanism of phosphorus reduction in the process of blast furnace smelting, and the existence favorable conditions for phosphorus reduction in blast furnace, it is analyzed from the aspects of current hot metal in Baotou Steel and phosphorus levels of crude fuel etc. By measuring and improving raw material structure into the blast furnace, regulating furnace temperature and other measures to reduce w [P] in hot metal, so as to meet the requirement of smelting bainite steel.

Key words: phosphorus loading; phosphorus reduction; cyclic enrichment

为了满足市场形势要求,包钢积极开展冶炼高强度、高韧性的贝氏体钢。由于钢中 w [P] 升高增加了钢的冷脆性,尤其是显著降低钢的低温韧性,增加钢对回火脆性的敏感性,因此要求进入转炉的铁水 w [P] 尽量稳定且低,转炉工艺操作越简单,各项技术经济指标越好[1]。为配合炼钢冶炼贝氏体钢,要求铁水中 w [P] 越低越好,减轻炼钢工序脱磷负荷。满足冶炼贝氏体钢生产的铁水成分要求为:w [P] ≤0.120%,w [S] ≤0.055%,w [Si] ≤0.40%。

1 高炉中P还原机理

1.1 P还原反应热力学分析

磷的存在形态主要是磷酸盐,如 $(CaO)_3 \cdot P_2O_5$、$[(FeO)_3 \cdot P_2O_5] \cdot 8H_2O$ 等。当有 SiO_2 存在时,硅酸根可以取代出磷的氧化物 P_2O_5,从而使磷的还原变得容易[2]。

收稿日期: 2016-12-06
作者简介: 高向洲(1987-),男,内蒙古呼和浩特市人,在读硕士,助理工程师,现从事高炉炼铁工艺工作。

中国知网 https://www.cnki.net

当 $T<950\sim1\ 000$ ℃时:

$$2(3FeO\cdot P_2O_5\cdot 8H_2O)+16CO=3Fe_2P+P+16CO_2+16H_2 \quad (1)$$

当 $T>950\sim1\ 100$ ℃时:

$$2(3FeO\cdot P_2O_5\cdot 8H_2O)+16C=3Fe_2P+P+16CO_2+16H_2O \quad (2)$$

当 $T>1\ 500$ ℃时:

$$(3CaO\cdot P_2O_5)+5[C]=3(CaO)+2[P]+5CO \quad (3)$$

当有 SiO_2 存在时,可促进 $3CaO\cdot P_2O_5$ 的还原:

当 $T>1\ 200$ ℃时:

$$2(CaO)_3\cdot P_2O_5+3SiO_2+10C=3(CaO)_2\cdot SiO_2+4P+10CO \quad (4)$$

磷酸铁比磷酸钙更容易还原,在 900 ~ 1 100 ℃时即可进行。由于还原出来的 P 可以生成 Fe_3P 和 Fe_2P 等化合物并溶于铁水,因而更加有利于磷的还原。

1.2　高炉内存在有利于 P 还原的条件[1]

(1) SiO_2 的存在,促进了 P 的还原。

(2) 从 $3CaO\cdot P_2O_5$ 中置换出的 P_2O_5 易于挥发(300 ℃升华),与 C 相遇而被还原。

(3) [P] 可与 [Fe] 结合成稳定的化合物 [Fe_2P]、[Fe_3P]。

(4) 高炉内的强还原气氛,利于 P 的还原

(5) 还原产物容易气化挥发,形成 $P_2(g)\uparrow$ 和 $P_4(g)\uparrow$,循环富集,造成铁水磷含量增加。

长期冶炼实践表明,低磷矿石冶炼炉料中的 P 几乎全部还原进入生铁,只是在冶炼磷铁或磷锰铁时,有少量的磷(入炉量的 4% ~ 8%)进入炉渣[3]。因此在冶炼炼钢铁和铸造铁时,只有通过配矿控制生铁中的磷。

1.3　高炉冶炼 P 的富集[1]

铁水中 Si 含量升高,会促进磷的还原和气态磷的循环富集:

$$2(3CaO\cdot P_2O_5)+5[Si]=6(CaO)+5(SiO_2)+2P_2(g)\uparrow$$

$$\Delta G^0=90\ 702.4-187.57T_{开始}\ J/mol$$

$$T_{开始}=211\ ℃$$

表 1　形成不同形态还原产物的反应开始温度

反应式	反应开始温度/℃		
	[P]	$P_2\uparrow$	$P_4\uparrow$
$(P_2O_5)+5[C]=2[P]+5CO$	874	777	749
$(3CaO\cdot P_2O_5)+5[C]=3(CaO)+2[P]+5CO$	1 620	1 502	1 540
$2(CaO)3\cdot P_2O_5+3SiO_2+10C=3(CaO)2\cdot SiO_2+4P+10CO$	1 249	1 175	1 183
$2(3CaO\ P_2O_5)+5[Si]=6(CaO)+5(SiO_2)+2P\uparrow$		211	

由表 1 可知,当铁水硅含量较高时,磷还原温度呈现降低趋势,并极易形成气态磷挥发,造成磷在高炉内的循环富集。

从 $3CaO\cdot P_2O_5$ 中置换出的 P_2O_5 可在 300 ℃发生气化,在炉内循环富集,也会使单位生铁的磷负荷增大,铁水磷含量升高。

还原形成磷蒸气时,即 $P_2(g)\uparrow$ 和 $P_4(g)\uparrow$,磷还原反应的进一步降低,开始温度也进一步降低,磷在高炉内的循环富集加重。

2　包钢目前铁水含 P 水平

2.1　炼铁厂高炉铁水 w [P] 基本情况

进入 2016 年以来,包钢炼铁厂各高炉铁水 w [P] 一直处于较高水平,尤其 4#、6#高炉铁水 w [P] 均在 0.140% 以上,表 2 为 2016 年 2 月份炼铁厂各高炉铁水成分及不同 w [P] 所占比例情况。

表 2　铁水成分及不同 w [P] 所占比例

炉号	物理温度/℃	w [Si]/%	w [Mn]/%	w [S]/%	w [P]/%	不同 w [P] 所占比例/%		
						≤0.13	≤0.14	≤0.15
4#	1 514	0.53	0.55	0.039	0.143	3.8	39.8	81.9
5#	1 484	0.62	0.59	0.041	0.139	14.0	60.0	90.9
6#	1 502	0.54	0.54	0.037	0.144	3.9	38.8	81.1

由表 2 可知,2016 年 2 月份炼铁厂各高炉平均铁水 w [P] 在 0.140% 左右,4#和 6#高炉铁水 w [P] 处于更高水平,达到了 0.143% 和 0.144%;从不同 w [P] 所占比例看,4# 和 6# 高炉铁水 w [P] ≤ 0.130% 所占比例仅为不到 4%,w [P] ≤0.140% 所占比例不到 40%,w [P] ≤0.150% 所占比例为 81% 左右。

2.2　入炉原燃料中 P 基本情况

中国知网　https://www.cnki.net

表3 2016年2月高炉入炉原料及生铁P负荷及所占比例

炉号	烧结		球团		蒙古矿		矿石		焦炭		煤粉	
	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%	P负荷/(kg·t^{-1})	比例/%
4#	0.75	52.75	0.26	18.34	0.03	1.90	1.03	72.98	0.34	24.18	0.04	2.84
5#	0.66	47.15	0.21	15.14	0.03	2.27	0.91	64.56	0.45	32.18	0.05	3.26
6#	0.76	52.26	0.24	16.61	0.03	1.98	1.03	70.85	0.38	26.48	0.04	2.66

由表3可知,各高炉入炉原燃料中带入P所占比重由高到低依次为烧结矿>焦炭>球团矿>煤粉>蒙古块,矿石带入的P最高,所占比例达到60%~75%,而矿石中主要由烧结矿带入,所占比例大约为45%~55%,焦炭带入P负荷所占比例30%左右。

表4 2016年2月四烧原燃料带入P负荷及所占比例

名称	巴润	澳粉	外购	杨迪	高返	钢渣	焦粉	生石灰	白云石	石灰石
w[P]/%	0.063	0.076	0.020	0.040	0.070	0.60	0.080	0.034	0.002	0.003
配比/%	40.0	7.50	15.0	7.5	10.5	5.0	5.5	3.3	3.5	1.0
P负荷/(kg·t^{-1})	0.252	0.057	0.030	0.030	0.068	0.30	0.044	0.011	0.001	0.001
所占比例/%	31.7	7.2	3.8	3.8	8.6	37.8	5.5	1.4	0.1	0.1

由表4可知:四烧烧结矿原燃料带入P负荷由高到低顺序为:钢渣>巴润精矿>高返>澳矿>焦粉>外购精矿>杨迪粉>生石灰>白云石。四烧烧结矿原燃料带入P所占比例最高的为钢渣,达到37.8%,其次是巴润精矿,所占比例为31.7%,澳粉带入P所占比例为7.2%,其余为焦粉、生石灰等。

3 降低生铁w[P]的措施

3.1 生铁中w[P]测算

根据冶炼要求,首先对入炉原料或者烧结用铁料配比进行调整,其次通过调整入炉烧结矿、球团矿和块矿的比例来降低铁水w[P],适当减少P较高的烧结矿和澳矿块的比例,增加P较低的球团矿的比例,表5是以计算包钢5#高炉不同入炉原料比例对应铁水w[P]的分析。

表5 不同入炉原料比例对应铁水w[P]计算分析 %

方案	烧结矿	球团矿	澳矿	蒙古块矿	理论铁水w[P]
现配比	67.0	23.0	8.0	2.0	0.128
方案1	67.0	33.0			0.121
方案2	60.0	40.0			0.120

由表5可见,通过调整入炉铁料结构可以降低铁水w[P],但是降低的幅度有限,需通过进一步调整炉温降低铁水w[P],同时避免较大范围的炉温波动,以免对高炉顺行产生影响。

3.2 高炉变料方案

5月27日配合炼贝氏体钢,5月27日10:00要求铁水w[Si]=0.40%,w[P]≤0.120%,w[S]≤0.055%。

变料方案分三步进行,具体如下:

第一步:5月26日14:00变配比为方案一。根据热平衡计算,理论需要减少焦炭280 kg/批,实际变料未减焦炭,用煤粉调节炉温。

第二步:5月26日23:00变配比为方案二。需加灰石700 kg/批,根据热平衡计算,理论上需要加焦炭80 kg/批,实际不加焦炭,用煤粉调节。27日5:00减煤控制炉温,负荷按2.76控制。

第三步:5月27日7:00开始加焦炭300 kg/批,加15批。11:00开始负荷2.73控制。

3.3 高炉综合负荷调整

按照冶炼计划27日10:00要求的铁水成分,根据冶炼周期及煤粉热滞后性测算(如图1所示),高炉于27日5:00开始减煤粉操作,由20 t/h到19 t/h,综合负荷2.73→2.78;6:00煤粉由19 t/h→18 t/h,综合负荷2.78→2.81;7:00—10:00煤粉由18 t/h→17 t/h,综合负荷2.81→2.84;11:00开始加煤至20 t/

中国知网 https://www.cnki.net

h，综合负荷按 2.73 控，把炉温提高到合适水平。

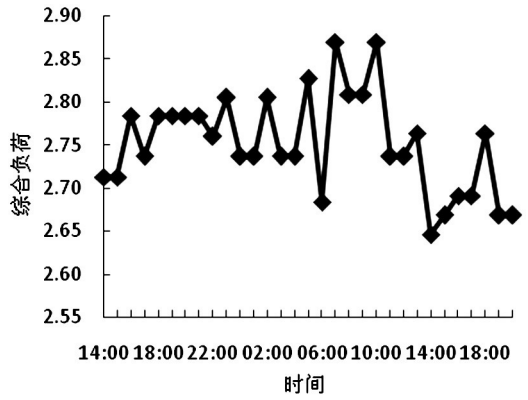


图 1　高炉变料冶炼周期综合负荷调整

3.4　冶炼效果

根据变料冶炼周期及负荷的调控，高炉冶炼铁水成分完成效果见图 2、图 3、图 4。

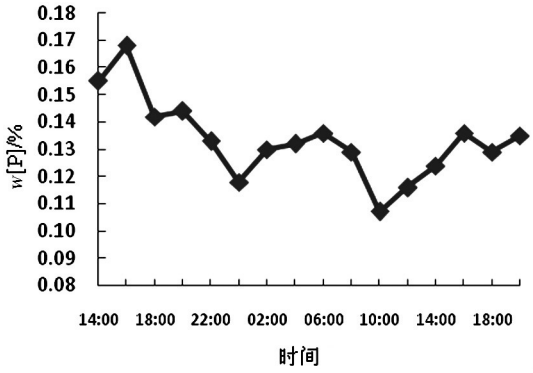


图 2　高炉变料冶炼周期铁水 w [P] 的变化

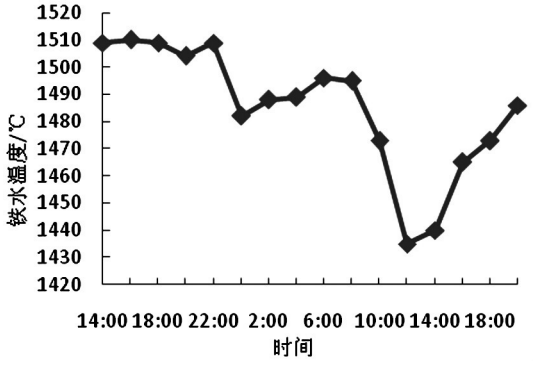


图 3　高炉变料冶炼周期铁水温度的变化

由图 2、图 3、图 4 可见，高炉按制定的变料方案以及对负荷进行调控，于 27 日 10:00 将铁水 w [P] 由变料前的 0.168% 降至 0.107%；铁水物理温度从变料前 1 510 ℃ 降至 1 473 ℃；w [Si] 由变料前 0.77% 降至 0.37%，铁水各成分在规定时间点均达到目标值，满足了炼钢冶炼贝氏体钢的要求。

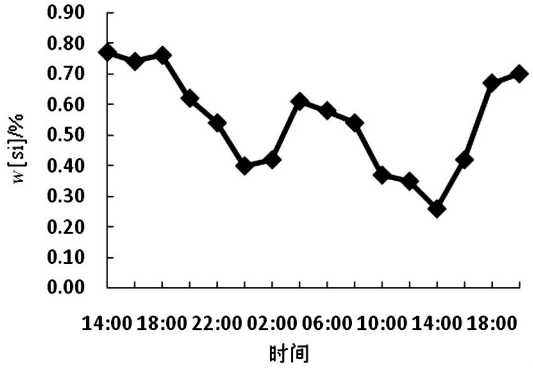


图 4　高炉变料冶炼周期铁水 w [Si] 的变化

3.5　冶炼实践的不足之处

此次冶炼低硅铁水，由于负荷调控不准确，减煤时间略长，导致低炉温时间偏长，超出计划两次铁时间，炉缸热损失大，给后期提炉温增加了困难。

高炉冶炼期间铁水 w [P] 与 w [Si] 对应性不是很稳定，要求我们在稳定原燃料化学成分方面做的还要更细一些。

4　结论

(1) 高炉中磷主要由矿石和焦炭带入，而矿石中主要由烧结矿带入，所占比例大约为 45% ~ 55%，焦炭带入 P 负荷所占比例 30% 左右。因此，根据冶炼要求，首先 对入炉原料或者烧结用铁料配比进行调整，其次通过调整入炉烧结矿、球团矿和块矿的比例来降低铁水 w [P]，适当减少 P 较高的烧结矿和澳矿块的比例，增加含 P 较低的球团矿的比例，建议烧结: 球团 = 60%∶40%。

(2) 从本次高炉冶炼实践看，适当降低炉温且保持稳定，能有效降低铁水中的磷含量。根据冶炼周期及煤粉热滞后性测算，建议综合负荷控≤2.84，铁水物理温度 1 470 ~ 1 475 ℃，w [Si] ≥0.35% ~ 0.40%。

参　考　文　献

[1]　杨吉春，罗果萍，董方. 钢铁冶金 600 问 [M]. 北京: 化学工业出版社，2008.

[2]　周传典. 高炉炼铁生产技术手册 [M]. 北京: 冶金工业出版社，2012.

[3]　张寿荣，王筱留，毕学工，等. 高炉高效冶炼技术 [M]. 北京: 冶金工业出版社，2015.

中国知网　https://www.cnki.net