

碱金属氧化物对转炉冶炼超低磷钢脱磷效果影响的工业试验

秦哲¹ 张明博^{1,2} 廖建军³ 廖鹏³ 仇圣桃¹

(1 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081;2 河北钢铁集团承钢公司,承德 076001;

3 新余钢铁股份有限公司第二炼钢厂,新余 338001)

摘要 通过 15 kg 真空感应炉试验得出 CaO 基脱磷渣系中分别添加 Li₂O、CaF₂、Na₂O、K₂O 后均有明显的脱磷效果,其中 Li₂O 含量 5% ~ 10% 时脱磷效果最佳。120 t 顶底复吹转炉双渣操作的工业试验结果表明,脱磷前期在加 31.46 kg/t 石灰、3.70 kg/t 白云石和 0.70 kg/t 烧结矿的基础上添加 13.88 kg/t 锂云母矿(∕% :56.41SiO₂, 3.80FeO,4.50Na₂O,4.17K₂O,3.18Li₂O)较未加锂云母矿的渣料(34.58 kg/t 石灰,5.41 kg/t 白云石,3.13 kg/t 的烧结矿)转炉终点渣氧化性低,转炉半钢的脱磷率和磷平衡分配比的平均值分别是未加锂云母矿的 1.67 倍和 2.81 倍,转炉终点的脱磷率和磷平衡分配比的平均值是未加锂云母矿的 1.02 倍和 1.47 倍,与未加锂云母矿相比,转炉吹炼终点[P]可由 0.009% ~ 0.011% 降低到 0.005% ~ 0.006%,能够满足超低磷钢生产要求。

关键词 120 t 顶底复吹转炉 脱磷渣系 超低磷钢 碱金属氧化物 锂云母矿 脱磷

Commercial Pilot Production of Effect of Alkali Metal Oxides on Dephosphorization Results of Converter Smelting Ultra-Low Phosphorous Steel

Qin Zhe¹, Zhang Mingbo^{1,2}, Liao Jianjun³, Liao Peng³ and Qiu Shengtao¹

(1 National Engineering and Research Center of Continuous Technology Center, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081; 2 Chengde Iron and Steel Company, Hebei Iron and Steel Co Ltd, Chengde 076001;

3 Second Steelmaking Plant, Xinyu Iron and Steel Co Ltd, Xinyu 338001)

Abstract By testing in a 15 kg vacuum induction furnace it is obtained that there is obvious dephosphorization effect by respectively adding Li₂O, CaF₂, Na₂O and K₂O in CaO base dephosphorization slag series, of them the CaO base slag containing 5% ~ 10% Li₂O has optimum dephosphorization results. The results of commercial pilot production of 120 t top and bottom combined blowing converter with double slag operation show that as compared with the earlier stage slag without adding lepidolite (∕% : 34.58 kg/t lime, 5.41 kg/t dolomite and 3.13 kg/t sinter), in earlier stage of dephosphorization based on adding 31.46 kg/t lime, 3.70 kg/t dolomite and 0.70 kg/t sinter, with adding 13.88 kg/t lepidolite mineral (∕% : 56.41SiO₂, 3.80FeO, 4.50Na₂O, 4.17K₂O, 3.18Li₂O) the oxidizability of converter end slag is lower, the average dephosphorization rate and phosphorus equilibrium distribution coefficient of converter semi-steel is respectively 1.67 time and 2.81 times that without adding lepidolite, the converter end dephosphorization rate and phosphorus equilibrium distribution coefficient is respectively 1.02 times and 1.47 times that without adding lepidolite, as compared with non-adding lepidolite the converter blowing end [P] decreases from 0.009% ~ 0.011% to 0.005% ~ 0.006% to meet the requirement of ultra-low phosphorus steel.

Material Index 120 t Top and Bottom Combined Blowing Converter, Dephosphorization Slag Series, Ultra-Low Phosphorus Steel, Alkali Metal Oxides, Lepidolite Mineral, Dephosphorization

随着钢材使用环境变得恶劣和复杂,对钢中[P]要求更为苛刻,例如海洋用钢、抗氢致裂纹钢、9Ni 钢等超低磷钢种,要求磷含量小于 0.010%^[1-3]。目前冶炼超低磷钢主要是采用铁水预脱磷或转炉双渣法冶炼模式,对于渣系的选择主要以 CaO 系或 CaO + BaO 复合渣系^[4-5],以获得较好的脱磷效果。但是 CaO 和 BaO 熔点较高,采用转炉双渣法脱磷时,要快速成渣有一定的困难^[7-8],从而影响前期的脱磷速率,增大了中后期的脱磷难度和回磷量^[9-10],导致转炉终点的[P]成分命中率偏低,往往为了获得较低的[P],吹炼后期补加大量石灰和过量吹氧,

严重恶化钢水质量,并且提高了冶炼周期和生产成本。本文对采用真空感应炉小型实验和工业实验对超低磷钢基本 CaO 渣系中加入含有 Li₂O、Na₂O、K₂O、CaF₂ 和锂云母矿的脱磷效果进行实验研究。

1 试验方法

1.1 真空感应炉实验方案

15 kg 真空感应炉氧化镁质坩埚内径 Φ90 mm, 外径 Φ120 mm, 高 250 mm; 感应炉工作频率为 2 500 Hz, 极限压力 5 × 10⁻² Pa, 采用温控仪连续控温, 并用测温装置进行测温, 使用 Φ15 mm 石英管进行提

取铁样。为了精确控制钢液中的 [O], 采用 Fe₂O₃ 作为固体氧源, 不采用顶吹氧操作。真空感应炉脱磷渣实验配比方案如表 1 所示。

1.2 工业实验方案

采用双渣法在钢厂 120 t 顶底复吹转炉进行工业脱磷试验, 在吹炼前期加入锂云母矿(表 2)。为了验证实验效果, 转炉各炉次将采用同一装入量、废钢比和供氧模式。吹炼前期加入相同重量的石灰、白云石、铁矿石和锂云母矿等造渣原料进行冶炼, 吹炼前期冶炼后, 进行倒炉、测温、取半钢样和渣样操作, 并倒掉一定量的前期脱磷渣; 然后起炉加入第二批渣料(此操作未加锂云母矿)进行中后期冶炼操作, 待吹炼终点进行倒炉、测温、取终钢样和渣样。钢厂铁水的化学成分、平均温度和造渣料加入量分

表 1 真空感应炉脱磷渣实验配比方案

Table 1 Scheme of ingredient of slag for vacuum induction furnace dephosphorization test

序号	CaO/ SiO ₂	实验配比/%						
		CaO	Fe ₂ O ₃	MgO	Li ₂ O	Na ₂ O	K ₂ O	CaF ₂
1	2.5	16.6	77.4	6.0				
2	2.5	16.6	62.4	6.0	15.0			
3	2.5	16.6	62.4	6.0		15.0		
4	2.5	16.6	62.4	6.0			15.0	
5	2.5	16.6	62.4	6.0				15.0
6	2.5	18.0	65.7	6.3	10.0			
7	2.5	19.0	69.3	6.7	5.0			
8	2.5	19.0	71.5	7.0	2.5			
9	2.5	19.0	71.5	7.0		2.5		
10	2.5	19.0	71.5	7.0			2.5	

表 2 锂云母矿主要成分/%

Table 2 Main ingredient of lepidolite /%

SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	Li ₂ O
56.41	3.80	4.50	4.17	3.18

表 3 钢厂铁水成分及平均温度

Table 3 Composition and average temperature of hot metal at steelworks

C	铁水成分/%				平均 温度/℃
	Si	Mn	P	S	
4.0 ~ 4.3	0.44 ~ 0.64	0.22 ~ 0.27	0.11 ~ 0.14	0.017 ~ 0.038	1 290

表 4 造渣料的加入量和废钢比

Table 4 Adding amount of slagging material and scrap ratio

试验 工艺	造渣料加入量/(kg·t ⁻¹)								废钢 比/%
	石灰		白云石		烧结矿		锂云母矿		
	倒渣 前	倒渣 后	倒渣 前	倒渣 后	倒渣 前	倒渣 后	倒渣 前	倒渣 后	
添加 炉次	31.46	14.00	3.70	5.54	0.70	23.40	13.88	0	15
未加 炉次	34.58	17.45	5.41	5.34	3.13	23.74	-	-	15

别如表 3 和表 4 所示。

2 真空感应炉试验结果与讨论

2.1 脱磷剂组成对铁水脱磷效果的影响

CaO 脱磷基本渣系中分别添加 15% 含量的 Li₂O、Na₂O、K₂O、CaF₂ 和无添加试剂的 5 组混合脱磷渣, 在 15 kg 真空感应炉内脱磷反应 25 min, 间隔 5 min 取铁水样, 并检测铁水中 [P], 以发现每组脱磷剂与各阶段相应铁水 [P] 的变化趋势。由图 1(a) 可知:

(1) 在脱磷剂加入的前 5 min 时脱磷速率最快, 与其他配比方案相比, Li₂O 在前 5 min 的脱磷速率最快, 磷含量在 10 ~ 15 min 时间内达到最低值, 且在 20 ~ 25 min 时, 上述 5 种实验方案均有铁水回磷趋势, 尤其是 Na₂O、K₂O 和无添加剂回磷量较高, Li₂O 和 CaF₂ 稍有回磷。

(2) 添加 15% Li₂O 的脱磷渣, 在 0 ~ 5 min 的脱磷速率最快, 在 10 min 时铁水中 [P] 下降至最低值为 0.003%, 脱磷率最高 97.3%, 25 min 时 [P] 回升 0.0048%, 回磷量为 0.0018%, 回磷量较小。

(3) 添加 15% CaF₂ 的脱磷渣, 在 0 ~ 5 min 的脱磷速率较快, 仅次于 Li₂O, 随着反应的进行脱磷速率减弱, 直至 20 min 时铁水中的 [P] 才达到最低值 0.0050%, 25 min 铁水中 [P] 由 0.0050% 增加到 0.0060%, 回磷量为 0.0010%, 最大脱磷率 96.3%, 回磷量最小。

(4) 添加 15% Na₂O 的脱磷渣, 在 0 ~ 5 min 的脱磷速率较慢, 反应 10 min 后铁水中的 [P] 达到最低值 0.0088%, 最大脱磷率为 93.0%; 随着反应的进行, 在 10 ~ 25 min 铁水中 [P] 由 0.0088% 逐渐回升到 0.0206%, 回磷量为 0.0118%, 回磷量较高。

(5) 添加 15% K₂O 的脱磷渣, 在 0 ~ 5 min 的脱磷速率居中, 在反应 5 ~ 10 min 时铁水中的 [P] 达到最低值 0.024%, 最大脱磷率 79.6%。10 ~ 25 min 铁水中 [P] 呈现出增加的趋势, 由 0.0244% 增加到 0.0370%, 回磷量为 0.0136%, 回磷量高。

(6) 无添加脱磷剂的渣系, 0 ~ 5 min 的脱磷速率最慢, 随着反应的进行在 15 min 是降到最低值为 0.0314%, 脱磷率最大仅为 76.3%, 脱磷效果最差。15 ~ 25 min 回磷量高达 0.0246%, 回磷量最大。

综合可得, 脱磷效果由好到差依次为添加 15% Li₂O → 15% CaF₂ → 15% Na₂O → 15% K₂O → 未添加其他脱磷剂。在加入脱磷剂 6 ~ 12 min 后, 铁水中 [P] 基本降到最低值, 并随着冶炼时间的进行铁水中会产生回磷现象, 即在实验室条件下脱磷时间控制在

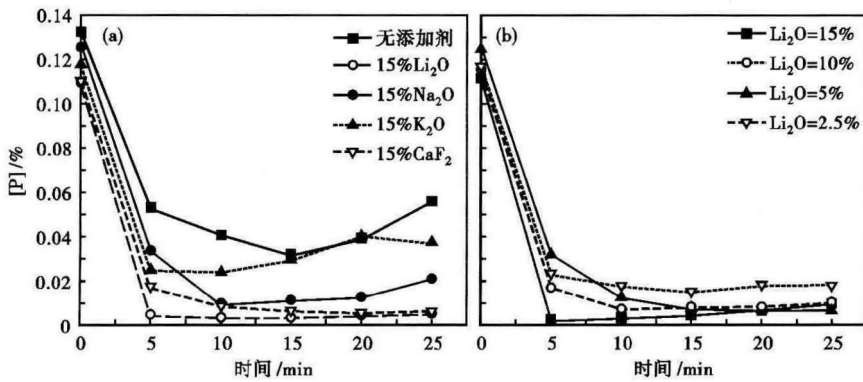


图1 脱磷剂组成(a)和Li₂O含量(b)对铁水脱磷效果的影响

Fig. 1 Effect of ingredient of dephosphorizing slag (a) and Li₂O content (b) on hot metal dephosphorization results

6~12 min为宜。由于现场转炉生产脱磷动力学条件比实验室脱磷更加优越,现场转炉生产半钢脱磷时间可控制在4~6 min较为合适,确定碱性金属氧化物选择在转炉吹炼前期加入。

2.2 脱磷剂中Li₂O含量对脱磷效果的影响

CaO脱磷基本渣系中添加Li₂O,其添加量分别为2.5%、5.0%、10.0%和15.0%。在15 kg真空感应炉内脱磷反应25 min,间隔5 min取铁水样,以判断不同Li₂O含量的脱磷剂随着时间变化对脱磷效果的影响,由图1(b)可知,脱磷率随着脱磷剂中Li₂O含量的增加而逐渐升高,铁水中磷含量都在脱磷剂加入的0~5 min时间内迅速下降;当脱磷剂中Li₂O含量不同时,铁水达到最低磷含量所需的时间也不一样,Li₂O含量由2.5%增加到15.0%时,铁水中磷含量达到最低水平时间由20 min降低到5 min;随着Li₂O含量由2.5%增加到15.0%时,铁水脱磷率增加,铁水中磷含量最低值达0.002%。由试验结果可知,脱磷剂中含Li₂O为15%时脱磷效果最优,10%Li₂O和5%Li₂O效果次之,2.5%Li₂O脱磷效果最差。

综合评价Li₂O脱磷效果较好,随着Li₂O含量的增加既能提高脱磷速率又能提高脱磷的效果,对于120 t顶底复吹转炉一般的吹炼时间在4~6 min,并且在Li₂O含量大于5%时,均能将钢水终点[P]控制在0.010%以内,满足超低磷钢冶炼的需求,所以超低磷转炉炼钢渣系中的Li₂O含量控制在5%~7%即可,综合考虑锂云母矿中的Li₂O、Na₂O、K₂O成分和脱磷效果,确定工业试验中锂云母矿的加入量为总渣量加入量的15%。

3 工业试验结果与讨论

在120 t顶底复吹转炉采用双渣法进行了此脱磷渣系的脱磷实验,未添加锂云母矿和添加锂云母矿脱磷试验各5炉,共计10炉。试验数据分别如表5所示。

3.1 含锂云母矿渣系对半钢脱磷效果的影响

由图2(a)可以看出,未加锂云母矿炉次半钢中的[P]在0.063%~0.082%,而加锂云母矿的炉次半钢中的[P]在

0.027%~0.044%,其平均[P]仅为未加锂云母矿炉次的48.5%。由图2(b)可以看出,未加锂云母矿炉次半钢的脱磷率在36.14%~44.73%,其前期的脱磷率不足45%;而加锂云母矿炉次半钢的脱磷率在61.26%~76.17%,其半钢平均脱磷率高达67.71%,是未加锂云母渣系的1.5倍,显著降低了吹炼后期脱磷难度并有效的防止回磷。

由图2(c)可以看出,未加锂云母矿和加锂云母矿时吹炼前期磷分配比L_p的平均值分别为13.13和36.89,加锂云母矿的炉次L_p是未加炉次的2.81倍。在吹炼前期加入锂云母矿的半钢[P]、半钢脱磷率,半钢磷分配比L_p明显优于未加锂云母矿的炉次,充分发挥了转炉前期脱磷的特点,对于冶炼超低磷钢终点的控制具有重要的作用。

3.2 含锂云母矿渣系对终点脱磷效果的影响

由图3(a)可以看出,未添加锂云母矿的5炉实

表5 未添加锂云母矿和添加锂云母矿脱磷试验结果,120 t顶底复吹转炉,双渣法

Table 5 Dephosphorization pilot production results with adding and without adding lepidolite mineral, 120 t top and bottom combined blowing converter, double slag operation

试验工艺	炉次	[P] / %			脱磷率 / %		磷分配比 L _p	
		铁水	半钢	终点	半钢	终点	半钢	终点
未加锂云母矿	1	0.114 7	0.063 4	0.008 0	44.73	93.03	16.11	136.44
	2	0.136 4	0.079 2	0.010 0	41.94	92.67	11.52	113.08
	3	0.127 9	0.077 0	0.009 0	39.80	92.96	11.91	143.11
	4	0.128 4	0.082 0	0.009 0	36.14	92.99	10.01	148.94
	5	0.110 9	0.066 0	0.011 0	40.49	90.08	16.08	112.33
	平均值	0.123 7	0.074 0	0.009 0	40.62	92.35	13.13	130.78
加锂云母矿	1	0.114 0	0.044 0	0.006 0	61.40	94.74	25.60	163.73
	2	0.109 8	0.033 0	0.006 6	69.95	93.99	39.69	183.25
	3	0.105 9	0.032 0	0.005 0	69.78	95.28	51.58	232.28
	4	0.113 3	0.027 0	0.005 9	76.17	95.85	39.94	132.62
	5	0.111 0	0.043 0	0.005 0	61.26	95.50	27.62	248.00
	平均值	0.110 8	0.036 0	0.006 0	67.71	94.85	36.89	191.98

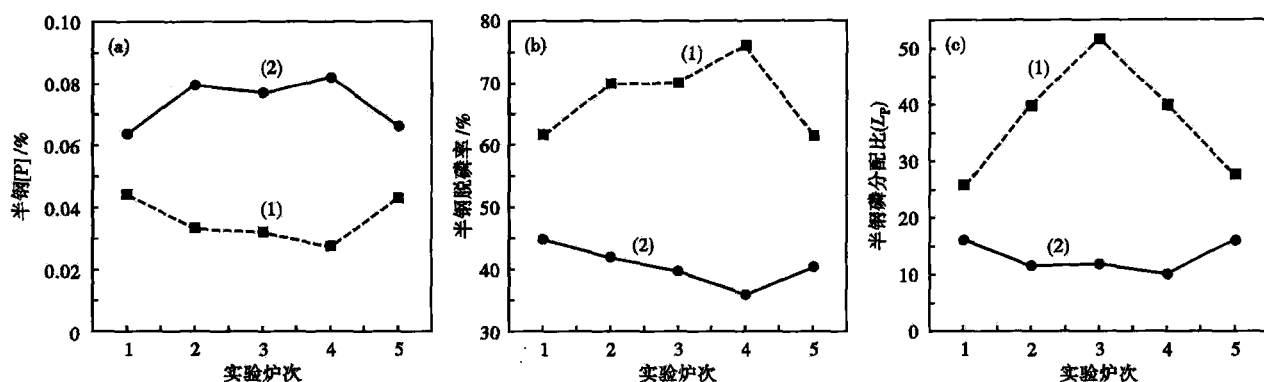


图 2 加锂云母矿(1)与未加(2)炉次对半钢[P](a),半钢脱磷率(b)和半钢磷分配比 L_p(c)的影响

Fig. 2 Effect of heats adding (1) and non-adding (2) lepidolite mineral on semisteel [P] (a), semisteel dephosphorization rate (b) and semisteel phosphorus partition (c)

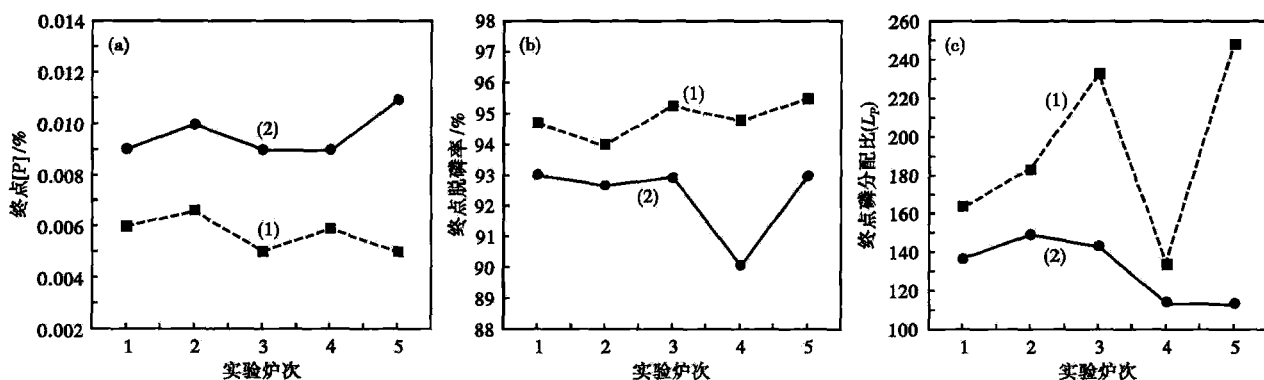


图 3 加锂云母矿(1)与未加(2)炉次对终点[P](a),终点脱磷率(b)和终点磷分配比(c)的影响

Fig. 3 Effect of heats adding (1) and non-adding (2) lepidolite mineral on end [P] (a), end dephosphorization rate (b) and end phosphorus partition (c)

验中的终点[P],1炉为0.008%、2炉为0.009%,2炉为0.011%,对于一般的超低磷钢而言,要求其[P]小于0.010%,通过上述成分分析可以看出,有2炉[P]终点成分不合,2炉在[P]边缘部分,在此后的精炼和连铸工序阶段稍有回磷,会导致成品钢中[P]不合,仅有1炉满足成分要求,其[P]成分的合格率仅为80%。而加入锂云母矿的炉次最高的[P]较低,仅为0.066%,全部[P]命中。

由图3(b)可以看出,未加锂云母矿炉次的终点最高脱磷率仅为93.03%,而加入锂云母矿炉次的终点平均脱磷率为94.85%,明显高于未加锂云母矿的脱磷率,虽然两者仅仅相差1.82%,但是对于超低磷钢的冶炼尤为关键,正是因为相差0.002%~0.003%的[P],使钢水[P]成分的不合格率大幅提高,严重影响成材质量和冶炼成本。

由图3(c)可以看出,未加锂云母矿炉次的磷分配比 L_p 在112.33~148.94,而加锂云母矿炉次的磷分配比在132.62~248,其平均磷分配比 L_p 是未加锂云母矿的1.47倍。含有锂云母矿渣系可以提高

终渣的磷分配比 L_p,致使终渣具有较高的磷容量,能够有效的提高脱磷效率,防止因终渣氧化性降低和温度较高而产生的回磷现象。

3.3 熔渣氧化性对半钢脱磷效果的影响

由图4可以看出,冶炼半钢没有加入锂云母矿的炉次,随着渣中 TFe 含量的增加,半钢脱磷率逐渐升高,并且脱磷率的变化波动较大,在33.73%~71.93%,而冶炼半钢加入锂云母矿的炉次,随着渣中 TFe 含量的增加,半钢的脱磷率稍有降低,脱磷率较为稳定,在58.48%~54.72%,说明加入的锂云母矿改变了半钢渣的理化性能,不再依靠增大炉渣的氧化性提高脱磷率,使渣中 TFe 含量对半钢渣脱磷效果的影响减弱,其原因是锂云母矿中碱金属氧化物 Li₂O、Na₂O、K₂O 促进了半钢渣的快速形成,达到了半钢渣早化渣、化好渣的要求,若此时增大半钢渣中 TFe 含量, CaO 活度下降,反而会使脱磷效果变差。

根据图4两条拟合曲线相交位置可以看出,当渣中 TFe 含量大于15.30%时,未加入锂云母矿炉

次的脱磷率高于加入锂云母矿的炉次,但是当渣中的 TFe 含量小于 15.30% 时,加入锂云母矿炉次的脱磷率明显高于未添加锂云母矿的炉次,并且 TFe 含量在 8.75% ~ 15.30%,加入锂云母矿的半钢脱磷率多半在 58.48% 以上,可以得出,加入锂云母矿双渣法冶炼超低磷钢时,适当降低前期渣中的 TFe 含量,不仅可以大幅提高半钢的脱磷率,而且降低铁耗,提高金属收得率。

因此,从脱磷效果上来看,含有碱金属氧化物的半钢渣应适当的降低 TFe 含量,同时也能提高金属收得率,对转炉终渣而言,由于前期脱磷率的提高,降低了半钢的 [P] 减轻了后期的脱磷任务和减少终点的回磷量,因此对于中后期的冶炼操作可以适当

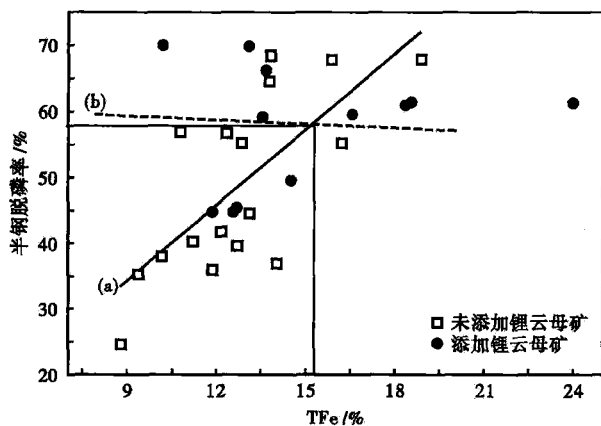


图4 未加锂云母矿(a)与加锂云母矿(b)时渣中 TFe 含量对半钢脱磷效果的影响

Fig. 4 Effect of TFe content in slag on dephosphorization rate of semisteel: (a) non-adding lepidolite mineral; (b) adding lepidolite mineral

参考文献

- [1] 廖鹏,候泽旺,秦哲,等.复吹转炉双渣吹炼脱磷试验[J].钢铁,2013,48(1):30-36.
- [2] Ishii H, Fruehan R J. Dephosphorization Equilibria between Liquid Iron and Highly Basic CaO-based Slags Saturated With MgO[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1997, 24(2): 47-55.
- [3] 乐可襄,王世俊,王海川,等.在铁水预处理中 CaO-Fe₂O₃-CaF₂ 基粉剂脱磷工艺和影响因素的探讨[J].钢铁,2002,37(7):20-22,32.
- [4] 田志红,孔祥涛,蔡开科,等. BaO-CaO-CaF₂ 系渣用于钢液深脱磷能力[J].北京科技大学学报,2005,27(3):294-299.
- [5] Suito H, Inoue R. Thermodynamic Assessment of Hot Metal and Steel Dephosphorization with MnO-containing BOF Slags[J]. ISIJ International, 1995, 35(3): 258-265.
- [6] Somnath B, Ashok K L, Seshadri S. A Model for Activity Coefficient of P₂O₅ in BOF Slag and Phosphorus Distribution between Liquid Steel and Slag[J]. ISIJ International, 2007, 47(8): 1236-1238.
- [7] 林路,包燕平,王敏,等.转炉冶炼 CaO-SiO₂-FeO 渣系中磷的行为[J].北京科技大学学报,2013,35(6):720-724.
- [8] Liu Kun, Liu Liu, He Ping, et al. Thermodynamics of Dephosphorization Reaction for Producing Low Phosphorus Steel in Converter[J]. Iron and Steel, 2012, 47(1): 34-39.
- [9] Tripathy P, Banerjee A, Bhim S, et al. Approaches for Conversion of High Phosphorus Hot Metal to Steel for Flat Products[J]. ISIJ International, 2008, 48(5): 578-583.
- [10] Kazuyo Y, Hironari K, Kazuhiro M, et al. Separation and Recovery of Phosphorus From Steelmaking Slags with the Aid of a Strong Magnetic Field[J]. ISIJ International, 2007, 47(10): 1541-1548.

降低终点的 TFe 含量,加入锂云母矿冶炼超低磷钢,不仅能够提高脱磷率,还能提高金属的收得率。

通过上述的工业试验结果表明,在冶炼超低磷钢时,在冶炼前期向基本脱磷渣系中加入一定量的锂云母矿不仅可以大幅提高半钢脱磷率和磷分配比 L_p ,降低半钢中 [P],并且可以提高吹炼终点脱磷率、磷分配比 L_p 和终点 [P] 命中率,取得了较好脱磷效果,满足冶炼超低磷钢种的成分要求,并且能够降低渣中的 TFe 含量,提高了金属收得率。

4 结论

(1)综合脱磷效果、脱磷速率、铁水回磷程度几个方面因素:脱磷效果由好到差依次为添加 15% Li₂O→15% CaF₂→15% Na₂O→15% K₂O→未添加其他脱磷渣系。

(2)锂云母矿应该在吹炼前期加入,加入量为总渣量的 15%,在反应 4~6 min 时的脱磷率最高,可获得 [P] 较低的半钢。

(3)无论是在脱磷期还是在转炉终点,添加锂云母矿的炉次的脱磷率和磷分配比 L_p 都要优于未添加锂云母矿的炉次,未添加锂云母矿的炉次控制的终点 [P] 在 0.009%~0.011%,不能够全部满足达到 0.010% 以下,而在转炉脱磷期加入锂云母矿可以显著提高转炉脱磷效果,转炉终点 [P] 最高值仅为 0.0066%,能够满足超低磷钢的冶炼。

(4)添加锂云母矿冶炼超低磷钢,降低吹炼前期炉渣的氧化性对于脱磷效果影响较小,形成的脱磷渣系可提高金属收得率和减轻炉衬冲刷,对于提高炉衬寿命和超低磷钢的洁净度具有重要的意义。

秦哲(1977-),男,博士,高级工程师,2001年鞍山钢铁学院(本科)毕业,精炼工艺与钢水洁净度控制。

E-mail: beikeqinzhe@126.com

收稿日期:2015-05-04