

· 工艺技术 ·

100 t 转炉“留渣 + 双渣”提钒半钢冶炼低磷钢渣成分控制的工艺实践

韩宇¹ 张明博^{1,2} 何晴¹ 王鹏¹ 张东¹

(1 河钢股份有限公司承德分公司,承德 067002;2 钢铁研究总院连铸技术国家工程研究中心,北京 100081)

摘要 4.28% ~ 5.02% C, 0.19% ~ 0.24% V 铁水经提钒后的半钢成分为 3.30% ~ 3.80% C, $\leq 0.037\%$ V。“留渣 + 双渣”法为留上一炉渣,兑入提钒半钢和 50 ~ 70 kg/t 废钢加入石灰和白云石进行吹炼 5 ~ 6 min,倒渣,并加入适量石灰和白云石继续吹炼至终点。结果表明,吹炼前期随着炉渣碱度或温度的增加,钢水脱磷率先增加后降低,而随着渣中(FeO)增加脱磷率先增加后稳定,前期最佳控制条件为炉渣碱度 3.0 ~ 3.5, (FeO) 10.0% ~ 15.0%,倒渣温度 1480 ~ 1510 °C;转炉吹炼后期,随着炉渣碱度的增加脱磷率升高,而随着温度的增加脱磷率降低,(FeO)对脱磷率的影响与前期较为相近,转炉吹炼终点控制碱度 3.5 ~ 4.0, (FeO) 8.0% ~ 10.0%,温度 ≤ 1630 °C 为宜,脱磷率在 90.0% 以上;此工艺可将钢水终点[P]控制在 0.015% 以内,满足低磷钢冶炼的需求。

关键词 100 t 转炉 提钒半钢 低磷钢 炉渣成分 温度控制 留渣 + 双渣法

Practice on Control of Slag Ingredient for Extracted-Vanadium Semi-Steel 100 t BOF Steelmaking Low Phosphorus Steel by “Slag-Remaining + Double Slag” Process

Han Yu¹, Zhang Mingbo^{1,2}, He Qing¹, Wang Peng¹ and Zhang Dong¹

(1 Chengde Branch, Hesteel Co Ltd, Chengde 067002; 2 National Engineering Research Center of Continuous Casting Technology, Central Iron and steel Research Institute, Beijing 100081)

Abstract The chemical composition of semi-steel after extracted-vanadium from hot metal with 4.28% ~ 5.02% C and 0.19% ~ 0.24% V is 3.30% ~ 3.80% C and $\leq 0.037\%$ V. The “slag-remaining + double slag” process is remaining the slag of previous heat, charging extracted vanadium semi-steel and 50 ~ 70 kg/t scrap, adding lime and dolomite, blowing for 5 ~ 6 min, then tapping slag, adding suitable lime and dolomite and continuous blowing to end. Results show that in early blowing period, with increasing slag basicity or liquid temperature, the dephosphorization rate of liquid earlier increases and later decreases, and with increasing (FeO) in slag the dephosphorization rate of liquid earlier increases and later is constant, and the optimal control conditions are slag basicity 3.0 ~ 3.5, (FeO) 10.0% ~ 15.0% and liquid temperature at tapping slag 1480 ~ 1510 °C; in later blowing period, with increasing slag basicity the dephosphorization rate increases, while with increasing liquid temperature the dephosphorization rate decreases, the effect of (FeO) on dephosphorization is similar to that in the earlier blowing period, it is available to control the slag basicity 3.5 ~ 4.0, (FeO) 8.0% ~ 10.0% and liquid temperature ≤ 1630 °C at BOF blowing end and the dephosphorization rate is more than 90.0%; and the liquid end [P] shall be controlled less than 0.015% to meet the requirement for low phosphorus steel steelmaking.

Material Index 100 t BOF, Extracted Vanadium Semi-Steel, Low Phosphorus Steel, Slag Ingredient, Temperature Control, Slag-Remaining + Double Slag Process

钢中磷对绝大多数钢种来说有害,P 会显著降低钢的韧性^[1-2],过量的 P 会在晶界偏析,在加工过程中形成冷脆,极大地影响钢材的使用性能。一般钢材对 P 的要求都在 0.015% 以下^[3],随着用户对低磷钢的需求明显增加,特别是深冲钢和高级别管线钢等对磷含量要求苛刻的钢种,常规转炉炼钢法已难以低本地组织生产^[4-7]。

提钒半钢冶炼低磷钢存在前期化渣困难和脱磷率较低的问题,为了解决这一问题,转炉多采用加入 SiC、铝矾土或留渣操作方式进行快速化渣以提高脱

磷率,但是由于 SiC 和铝矾土成本较高,直接影响成材价格,因此,目前采用较多的是留渣操作,但是仅仅留渣操作冶炼低磷钢效果欠佳,故探讨和研究了“留渣 + 双渣”工艺技术冶炼低磷钢。

1 提钒半钢成分及“留渣 + 双渣”法

1.1 提钒半钢成分

含钒铁水经提钒转炉提钒后的钢水称为提钒半钢。由于在提钒过程中会使钢液中的 C 含量下降,并且钢液中 Si、Mn 等元素伴随着氧化进入钒渣,造

成钢液中残余的 Si、Mn 含量极低。当炼钢转炉冶炼半钢时,由于半钢中的 Si、Mn 金属元素极少,形成渣系成分较为单一,致使转炉冶炼半钢炉渣熔点较高,造成半钢炼钢过程中前期炉渣融化和前期脱磷较为困难。由于提钒转炉不具有脱磷功能,因此在转炉冶炼半钢过程中既要完成脱碳任务还要完成脱磷任务,半钢炉渣的快速融化是提高脱磷效果的保证,才能取得较好的脱磷效果。目前承钢公司 100 t 铁水及半钢成分和温度如表 1 所示。

1.2 “留渣 + 双渣”法冶炼工艺及工业实验要求

(1)“留渣 + 双渣”法冶炼工艺。承钢炼钢工艺流程为:铁水预脱硫→铁水提钒→100 t BOF→LF 或 RH 精炼→连铸。

“留渣 + 双渣”法即上一炉次吹炼终点炉渣全部保留,进行溅渣护炉,溅渣护炉后不再进行倒渣操作,直接兑入提钒半钢和废钢,加入石灰、白云石等造渣料进行吹炼,待将本炉次吹炼 5 ~ 6 min 后,再将大部分炉渣倒出。然后再加入适量石灰、白云石等造渣料继续吹炼,直至终点成分和温度合格,满足出钢要求,形成的终渣留给下一炉次继续循环使用。“留渣 + 双渣”概括为一句话为“吹炼终点不倒渣,吹炼前期倒渣”。

(2)工业实验要求。半钢中 [C] 质量分数一般在 3.3% ~ 4.0%,半钢温度在 1 360 ~ 1 420 ℃。依据半钢碳含量和半钢温度,炼钢转炉废钢加入量控制在 50 ~ 70 kg/t,半钢装入量控制在 102 ~ 110 t/炉。前期化渣枪位控制在 2.2 ~ 2.9 m,供氧 5 ~ 7 min 时,倒炉倒出全部高磷渣,取前期渣样和钢样,测出炉内温度。后期根据各类渣料降温情况,通过调整机烧矿、白云石、石灰石等加入时机和加入量,控制熔池内热量,吹炼终点测温、取渣样和钢样。出完钢后,不倒渣,进行溅渣护炉操作,将炉渣溅成粘稠状态不倒渣,装料冶炼下一炉,将该炉渣作为下炉初渣利用。

2 结果分析与讨论

2.1 实验数据

本次工业实验共进行 28 炉次,由于实验炉次较多,仅列出代表性炉次 9 炉,并将所检测相关数据分别列入表 2 和表 3,表 3

表 1 含钒铁水及提钒半钢成分和温度

Table 1 Composition and temperature of vanadium-containing hot metal and extracted vanadium semi-steel

项目	成分/%							温度/ ℃
	C	Si	Mn	P	S	V	Ti	
铁水	4.28 ~	0.10 ~	0.16 ~	0.12 ~	≤	0.19 ~	0.09 ~	1 250 ~
	5.02	0.35	0.25	0.17	0.045	0.24	0.16	1 300
半钢	3.30 ~	≤	≤	0.12 ~	≤	≤	≤	1 360 ~
	3.80	0.03	0.03	0.17	0.045	0.037	0.005	1 420

中 R 为二元碱度 $(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$ 。

2.2 留渣 + 双渣法对转炉前期脱磷效果的影响

(1)留渣 + 双渣法前期炉渣碱度 R 对脱磷率影响。由图 1(a) 可以看出,随着前期炉渣碱度的增加,脱磷率整体呈现出先增加后降低的变化趋势。当 $R = (\text{CaO})/(\text{SiO}_2) = 3.5$ 时,前期的脱磷率最高。当碱度 $(R) \leq 3.5$ 时,随着炉渣碱度的增加脱磷率逐渐增加,产生这种现象的主要原因符合脱磷热力学条件,致使提高了脱磷效果;当炉渣继续增加时,脱磷率反而降低,主要是由于炉渣碱度增加致使炉渣的粘度增加,脱磷动力学条件恶化,从而降低了脱磷能力,造成脱磷率有所下降,通过上述分析可以看出,留渣 + 双渣法操作工艺前期炉渣的碱度 (R) 控制在 3.0 ~ 3.5 较为适宜。

(2)留渣 + 双渣法前期温度对脱磷率影响。图 1(b) 给出了留渣 + 双渣法前期温度对脱磷率的影响,由图 1(b) 可以看出,随着前期炉渣温度的增加,脱磷率整体呈现出先增加后降低的变化趋势。前期温度为 1 510 ℃ 时,脱磷率最高,当温度 $< 1 510$ ℃,随着温度的升高脱磷率逐渐升高,由于转炉脱磷反应为放热反应,在热力学意义上高温抑制脱磷反应的进行,但是炉温的升高有助于石灰熔化和溶解,有助于炉渣流动性提高,优化脱磷动力学条件,因而在一定温度范围内提高温度可以增大磷在炉渣和钢水

表 2 留渣 + 双渣法工艺冶炼低磷钢提钒半钢、BOF 前期和终点钢水成分和温度

Table 2 Composition and temperature of extracted vanadium semi-steel and liquid at earlier period and end of BOF for low phosphorus steel steelmaking by slag-remaining + double slag process

实验 炉次	提钒半钢				BOF 前期				BOF 终点			
	成分/%			温度/ ℃	成分/%			温度/ ℃	成分/%			温度/ ℃
	[C]	[P]	[S]		[C]	[P]	[S]		[C]	[P]	[S]	
1	3.75	0.147	0.040	1 389	1.33	0.048	0.030	1 545	0.07	0.008	0.026	1 627
2	3.54	0.174	0.033	1 366	1.93	0.037	0.027	1 534	0.07	0.012	0.027	1 625
3	3.62	0.148	0.034	1 378	1.74	0.037	0.032	1 473	0.11	0.009	0.030	1 622
4	3.62	0.139	0.038	1 394	1.91	0.028	0.032	1 506	0.07	0.011	0.022	1 632
5	3.57	0.141	0.040	1 367	1.76	0.038	0.035	1 507	0.06	0.012	0.022	1 605
6	3.76	0.149	0.038	1 367	1.31	0.017	0.037	1 511	0.08	0.013	0.021	1 618
7	3.75	0.115	0.039	1 391	1.55	0.031	0.021	1 503	0.07	0.011	0.015	1 634
8	3.56	0.135	0.032	1 368	2.01	0.035	0.029	1 510	0.06	0.010	0.023	1 619
9	3.78	0.129	0.035	1 399	1.54	0.045	0.027	1 483	0.09	0.006	0.017	1 645

中的分配比,提高脱磷率;当温度 $> 1510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,随着炉温的继续升高脱磷率呈降低趋势,炉渣已具有了良好的动力学条件,但此时热力学条件又制约脱磷反应的进行,致使脱磷率有所下降,因此应严格要求控制前期的倒炉温度,以便最大限度将前期高磷炉渣倒出,提高前期脱磷率,为后期造渣和脱磷奠定基础,通过上述分析得出,前期的最佳温度应控制在 $1480 \sim 1510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)留渣+双渣法前期炉渣(FeO)对脱磷率的影响。由图2(a)可以看出,随着前期炉渣(FeO)增加,脱磷率整体呈现出先增加后稳定的趋势。当炉渣中(FeO) $\leq 10.0\%$ 时,随着(FeO)的增加脱磷率逐渐提高,产生这种现象的主要原因有两方面,一是(FeO)的增加有利于降低炉渣熔点,提高脱磷的动力学条件,二是(FeO)的增加,有利于脱磷反应 $4(\text{CaO}) + 2[\text{P}] + 5(\text{FeO}) = (4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5) + 5[\text{Fe}]$ 向正反应方向进行,继而提高脱磷率;当(FeO) $> 10.0\%$,随着炉渣中(FeO)增加,由于炉渣中CaO含量是一定的,脱磷反应处于平衡状态,即使继续提高了(FeO),脱磷速率和脱磷率也不会继续增加,因此(FeO)控制在 10.0% 即可,但是考虑到脱磷期过后,脱碳期会大量消耗渣中的FeO,为防止炉渣中后期返干,造成钢水回磷,应适当提高前期(FeO),但是(FeO)过高会加剧炉衬的侵蚀,钢铁料消耗上升,使冶炼成本上升。通过上述分析,前期(FeO)控制在 $10.0\% \sim 15.0\%$ 较为合理。

2.3 留渣+双渣法对转炉终点脱磷效果的影响

(1)留渣+双渣法终渣碱度对脱磷率影响。由图2(b)可以看出,随着炉渣终点碱度(R)的增加,

表 3 留渣+双渣法工艺 BOF 前期和终点炉渣主要成分

Table 3 Main ingredient of slag at earlier period and end of BOF by slag-remaining + double slag process

实验炉次	BOF 前期						BOF 终点					
	炉渣成分 /%					$R=(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$	炉渣成分 /%					$R=(\text{CaO})/(\text{SiO}_2)$
	(CaO)	(MgO)	(SiO ₂)	(FeO)	(P)		(CaO)	(MgO)	(SiO ₂)	(FeO)	(P)	
1	36.01	13.75	13.88	9.43	1.93	2.59	37.24	15.91	10.96	15.87	1.86	3.40
2	36.24	11.56	11.93	8.83	2.29	3.04	40.28	11.27	10.75	12.25	1.77	3.75
3	32.07	10.90	16.44	10.64	2.16	1.95	38.27	10.40	10.75	15.01	1.71	3.56
4	36.71	13.75	13.88	16.82	2.25	2.60	36.67	11.42	10.98	19.34	1.74	3.34
5	39.07	12.48	11.95	6.29	2.21	3.30	38.17	15.36	11.44	8.48	1.51	3.34
6	38.48	12.43	11.62	10.19	2.19	3.31	38.25	15.46	10.93	14.53	1.72	3.49
7	37.42	11.56	12.93	11.60	2.23	2.89	38.40	18.88	10.35	10.91	1.72	3.71
8	38.75	14.15	13.23	7.49	2.22	2.93	35.75	15.33	10.48	11.28	1.78	3.41
9	38.39	12.71	10.46	15.25	1.92	3.67	37.20	12.46	13.01	14.50	1.36	2.87

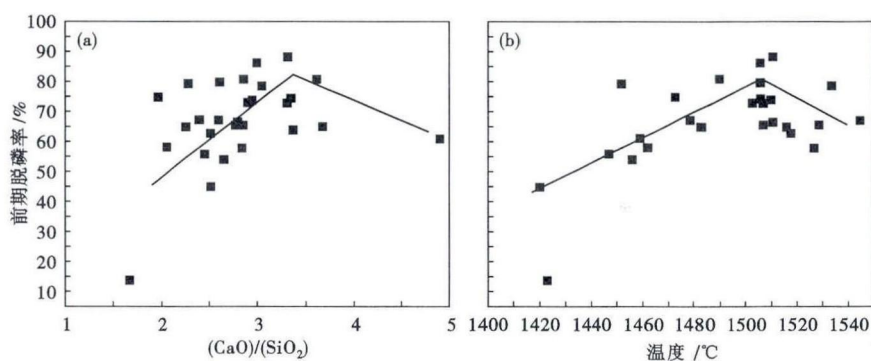


图 1 留渣+双渣法 BOF 前期炉渣碱度(a)和前期温度(b)对钢水脱磷率的影响
Fig. 1 Effect of BOF earlier period slag basicity (a) and earlier period liquid temperature (b) on dephosphorization rate of liquid by slag-remaining + double slag process

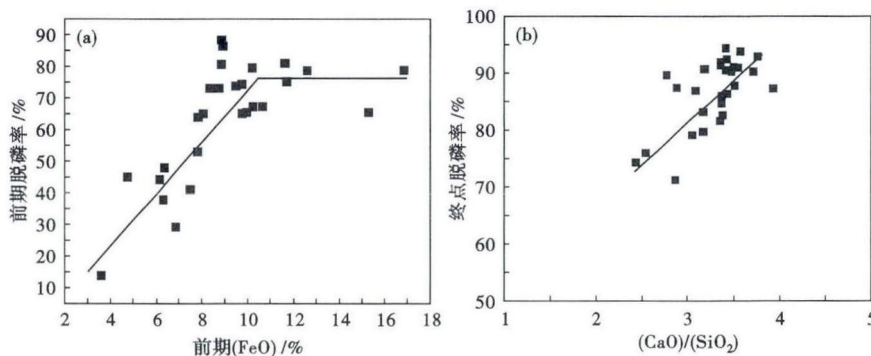


图 2 留渣+双渣法 BOF 前期(FeO)(a)和终点炉渣碱度(b)对钢水脱磷率影响
Fig. 2 Effect of BOF earlier period (FeO) (a) and end slag basicity (b) on dephosphorization rate of liquid by slag-remaining + double slag process

终点脱磷率呈现出逐渐增加的变化趋势。终点碱度与前期碱度对脱磷率的影响规律不同,主要是由于前期温度较低,碱度增加对炉渣的粘度的影响较大,而转炉吹炼终点的温度基本控制在 $1600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以上,因此即使稍微碱度增加对炉渣的流动性几乎没有太大的影响,因此吹炼后期随着炉渣碱度的增加脱磷率逐渐升高。通过上述分析,为了保证脱磷率稳定在

90.0%上,此外考虑采用全部留取脱碳渣,即使提高终点碱度也不会造成石灰的浪费,吹炼终点炉渣碱度(R)应控制在3.5~4.0。

(2)留渣+双渣法终点温度对脱磷率影响。由图3(a)可以看出,随着炉渣终点温度的增加,终点脱磷率呈现出逐渐降低的变化趋势,出现这种现象主要是由于受到脱磷热力学的影响。当终点温度 $<1630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,终点脱磷率基本稳定在90.0%以上,但是当终点温度 $>1630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,脱磷率会出现下降,大部分炉次在90.0%以下,虽然仅仅是脱磷率90.0%左右的区别,但是对于低磷钢的冶炼却显得尤为关键。通过上述分析,留渣+双渣法控制终点温度应小于 $1630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

(3)留渣+双渣法终渣(FeO)对脱磷率影响。由图3(b)可以看出,随着炉渣终点(FeO)的增加,终点脱磷率呈现出先增加后持平的变化趋势。前期和后期炉渣(FeO)对脱磷率的影响变化趋势较为一致。当终点(FeO)为10.0%时脱磷率较高已经满足要求,即使再增加(FeO)对脱磷率的提高意义不大,考虑溅渣护炉的效果、防止下渣回磷和降低钢铁料消耗,转炉终点(FeO)应控制在8.0%~10.0%。

综上所述,转炉吹炼前期随着炉渣碱度脱磷率都呈现先增加后降低的趋势,炉渣碱度控制在3.0~3.5;随着前期渣中(FeO)的增加脱磷率呈现出先增加后稳定的变化趋势,前期的(FeO)在10.0%~15.0%为宜;前期倒炉温度不宜过高,会降低炉渣中的磷含量,前期倒炉温度 $T=1480\sim 1510\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。转炉吹炼后期,随着炉渣碱度的增加脱磷率逐渐升高,而随着温度的增加脱磷率逐渐降低,渣中(FeO)对脱磷率的影响与前期较为相近,转炉吹炼终点控制碱度(R)=3.5~4.0,(FeO)=8.0%~10.0%,温度 $T\leq 1630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 为宜,冶炼效果较好,脱磷率在90.0%以上。

3 结论

(1)在转炉吹炼前期,控制熔渣碱度在3.0~3.5,前期炉渣(FeO)在10.0%~15.0%,前期倒炉

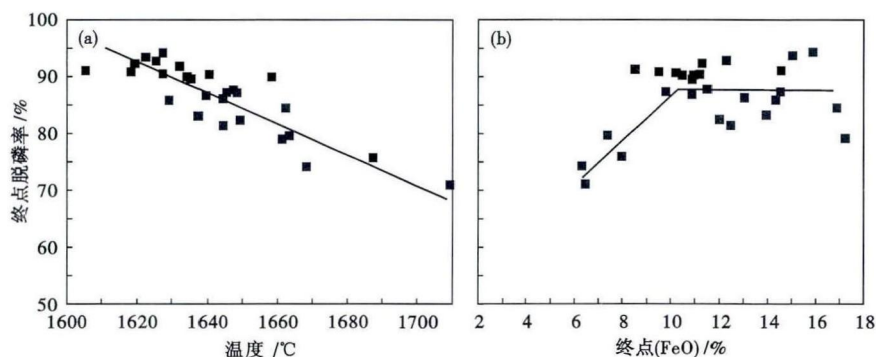


图3 留渣+双渣法 BOF 终点温度(a)和终点炉渣(FeO)(b)对钢水脱磷率的影响
Fig.3 Effect of BOF end liquid temperature (a) and end slag (FeO) on dephosphorization rate of liquid by slag-remaining + double slag process

温度控制在 $1480\sim 1510\text{ }^{\circ}\text{C}$,是较为适宜的成分和温度。

(2)在转炉吹炼后期,脱磷率随碱度的增加而提高,终渣碱度控制在3.5~4.0,终期炉渣(FeO)控制在8.0%~10.0%,出钢温度控制在 $1630\text{ }^{\circ}\text{C}$ 以内,可以获得较好的脱磷效果。

(3)转炉半钢冶炼低磷钢时,采用留渣+双渣法工艺,不仅提高了脱磷效率,并且没有增加冶炼成本,可以将转炉终点[P]稳定控制在0.015%以下,满足了冶炼低磷钢的需要。

参考文献

- [1] 王新华. 钢铁冶金-炼钢学[M]. 北京:高等教育出版社,2007.
- [2] 李正嵩,张毅,谢祥,等. 水钢100t转炉单渣法脱磷工艺冶炼优质钢的生产实践[J]. 特殊钢,2016,37(3):39-45.
- [3] 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.
- [4] 何肖飞,王新华,梁秀兰,等. 低碱度脱磷渣在转炉少渣冶炼中的作用[J]. 东北大学学报(自然科学版),2015,36(7):947-951.
- [5] Zhang L, Brian C Thomas. State of the Art in Evaluation and Control of Steel Cleanliness[J]. ISIJ International, 2003, 43(3): 223-228.
- [6] 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):19-21,41.
- [7] 秦登平,杨建平,危尚好,等. 100t顶吹氧气转炉石灰石造渣炼钢技术的分析和工艺实践[J]. 特殊钢,2014,35(5):34-36.

韩宇(1984-),男,工程师,2007年华北理工大学(专科)毕业,转炉提钒及炼钢工艺研究。
E-mail: xx_xg_hany@cdvt.com.cn

收稿日期:2016-08-01