

120 t 转炉半钢炼钢去磷保碳工艺的生产试验

陈均¹ 李盛² 周明佳² 杨森祥²

(1 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 攀枝花 617000;

2 攀钢集团攀枝花钢钒有限公司提钒炼钢厂, 攀枝花 617067)

摘要 针对攀钢转炉半钢冶炼中高碳钢增碳法增加成本降低钢水质量问题, 采取了半钢增硅化学热补偿工艺, 并根据对转炉脱磷热力学以及钢渣中磷富集规律, 得出炉渣中磷的主要富集相为硅酸二钙。采用快速成渣、降低出钢温度等技术措施后, 增加了炉渣中富磷相的比例, 提高了脱磷效果。试验结果表明, 新的热补偿工艺在提高半钢热源的同时, 使得炼钢转炉成渣时间由 4.1 min 缩短到 2.5 min, 试验炉次转炉终点钢水碳含量平均为 0.18%, 温度平均为 1 653 ℃, 炉渣 TFe 含量平均降低 2.81 个百分点, 终点磷含量均控制在 0.015% 以内。

关键词 120 t 转炉 半钢冶炼 热补偿 脱磷 终点碳

Pilot Production on Dephosphorization and Carbon-Guaranteed Technology for 120 t Converter by Semi-Steel Steelmaking

Chen Jun¹, Li Sheng², Zhou Mingjia² and Yang Senxiang²

(1 State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co Ltd, Panzhihua 617000; 2 Steelmaking Plant of Vanadium Extraction, Pangang Group panzhihua steel & vanadium Co Ltd, Panzhihua 617067)

Abstract According to issue of increasing cost and decreasing liquid quality by BOF recarburization process to melt medium and high carbon steel using semi-steel at Pan Gang, the chemical thermal compensating process by increasing silicon content of semi-steel is adopted, and based on dephosphorization thermodynamics in BOF and enrichment regularity of phosphorus in slag, it is obtained that enrichment phase of phosphorus in slag is $2\text{CaO} \cdot \text{SiO}_2$. By using technologic measures such as fast slagging, reduce tapping temperature, it is obtained that the enrichment phase of phosphorus in slag is increased, which improve the dephosphorization effect. Results of test indicate that the new thermal compensating process improves the thermal resource of semi-steel as well as shorten the slag forming time from 4.1 min to 2.5 min, and the average carbon content of steel at endpoint is of BOF 0.18%, it is obtained that temperature is 1 653 ℃, TFe content of slag is average reduced by 2.81 percent point, phosphorus content of steel is all less than 0.015%.

Material Index 120 t Converter, Semi-Steel Steelmaking, Thermal Compensate, Dephosphorization, Carbon Content at Endpoint

低碳钢冶炼时, 由于钢水碳含量的限制, 转炉终点通常采用增碳法, 该方法渣中 TFe 高, 钢中 [O] 高, 脱氧剂消耗大, 夹杂物增加。拉碳法由于具有吹炼时间短, 氧气消耗少, 吹损少, 合金收得率高及夹杂物少等优点, 多用于中高碳钢生产时转炉终点控制。由于具有冶炼成本低, 钢水质量好的优点, 国内多数企业在中高碳钢生产时均采用拉碳法工艺^[1-8]

攀钢 120 t 转炉由于采用半钢冶炼, 热源不足、成渣慢的特点使其在重轨钢、45 钢等中高碳钢生产时也不得不采用增碳法冶炼。

本文结合攀钢半钢冶炼的实际情况, 采用单渣法开展了转炉冶炼去磷保碳试验, 实现了转炉高拉碳出钢。

1 半钢冶炼转炉去磷保碳难点及思路

攀钢采用钒钛磁铁矿冶炼, 含钒铁水经脱硫提

钒后获得的半钢中碳含量平均仅有 3.32%, 硅、锰等发热成渣元素含量很低, 半钢温度平均仅为 1 321 ℃ (如表 1 所示), 与普通铁水相比, 半钢碳和温度明显偏低, 转炉冶炼热源严重不足。

转炉冶炼保碳的同时要实现去磷。攀钢半钢中硅、锰等发热成渣元素含量很低, 需要依靠外加造渣剂促进成渣, 这就使得转炉成渣慢, 且过程易返干, 脱磷效果不佳。为达到出钢磷含量的要求, 攀钢半钢冶炼长期依赖后期高氧化性脱磷, 终点钢水温度平均达到 1 670 ℃, 终渣 TFe 含量平均高达 20.16%。

因此, 半钢冶炼中后期氧化脱磷在转炉脱磷过程起着重要的作用。提高终点钢水碳含量后, 终点钢水及钢渣氧化性会明显降低, 同时冶炼时间也会适当缩短。半钢冶炼时如何将冶炼中、后期的脱磷任务转移到冶炼前期, 最终实现去磷保碳是本研究

表 1 铁水和半钢化学成分和温度
Table 1 Chemical component and temperature of hot metal and semi-steel

项目	成分/%						温度/℃
	C	Si	Mn	P	S	V	
半钢	2.50~4.00	≤0.02	≤0.02	0.04~0.09	0.01~0.03	0.02~0.06	1 280~1 360
普通铁水	4.00~5.50	0.25~0.70	0.15~0.50	0.05~0.12	0.01~0.04	-	1 300~1 380

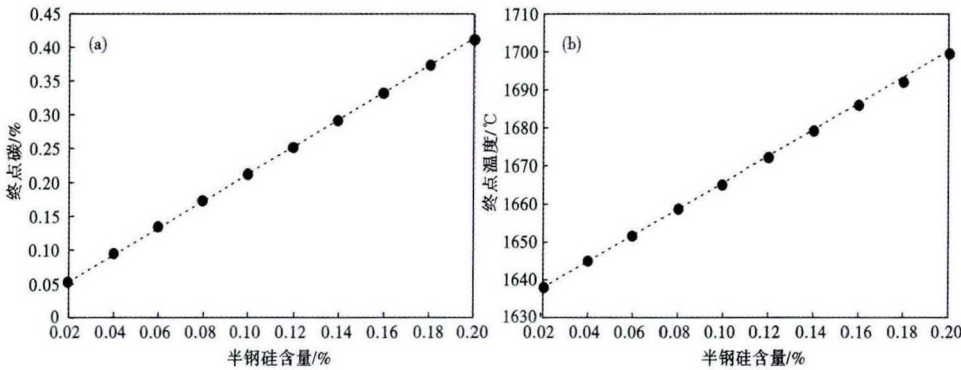


图 1 半钢硅含量对转炉钢水终点碳含量(a)和终点温度(b)的影响

Fig. 1 Effect of silica content in semi-steel on BOF liquid end carbon content (a) and end temperature (b)

的难点。

结合攀钢半钢冶炼实际情况,要实现转炉去磷保碳,具体思路如下:

(1)有效的半钢热补偿技术。采用传统的热补偿方式并不能达到理想的热补偿效果,可考虑适当增加半钢中的硅含量,不但可以提高半钢热源,硅氧化后还可以促进快速成渣脱磷。

(2)转炉快速去磷保碳技术研究。充分利用低温脱磷的热力学条件,快速成渣脱磷,降低出钢温度。

2 半钢化学热补偿

攀钢曾采用无烟煤增碳剂在转炉炉内进行热补偿^[9-11],但由于热效率不高且加入后大量消耗渣中 FeO 导致过程返干使得脱磷效果不佳。为此,结合攀钢半钢冶炼的特殊性提出在提钒出半钢时加入硅铁对半钢进行化学热补偿,可在提高半钢热源的同时加速转炉前期成渣,有利于提高脱磷效果。按照表 1 中半钢成分及温度对攀钢 120 t 炼钢转炉进行热平衡计算,得出半钢硅含量与终点钢水温度、终点碳含量的关系如图 1(a)和(b)所示。从图 1 中可以看出,单从热源方面考虑,转炉终点碳和终点温度随着半钢中增加的硅含量的升高而升高。但是,随着半钢硅含量的增加,炼钢辅料以及冶炼成本也会明显增加。经测算,半钢中硅含量的适宜范围为 0.10%~0.15%,在半钢中硅含量达到 0.15% 时终点钢水碳含量可提高到 0.20% 以上。

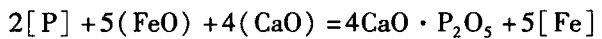
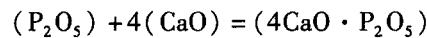
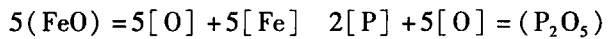
按照半钢中硅含量为 0.15%,吨钢废钢消耗量

为 45 kg 计算,得出增硅后不同终点温度下平衡碳含量如图 2 所示。从图 2 中可以看出,半钢化学热补偿后,热源一定的情况下,降低出钢温度,转炉终点钢水碳含量逐渐提高,出钢温度为 1 650 °C 时,理论终点碳含量可达到 0.25%。

3 脱磷理论分析

脱磷分子理论认为脱

磷反应是界面反应,由下列反应组成:



(1)

$$\lg K = \lg \frac{a_{4\text{CaO} \cdot \text{P}_2\text{O}_5}}{[\text{P}]^2 a_{\text{FeO}}^5 a_{\text{CaO}}^4} = \frac{40067}{T} - 15.6 \quad (2)$$

从离子理论角度表述的脱磷反应如下:

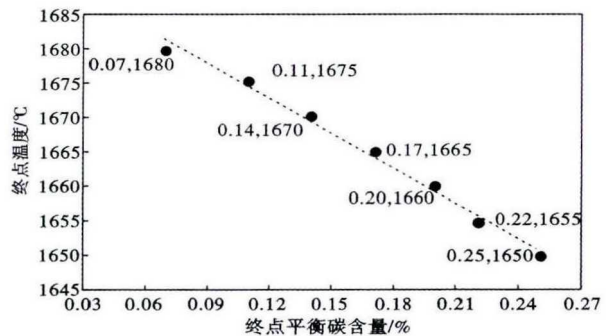
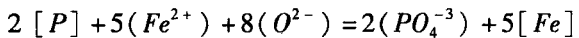
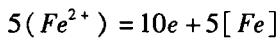
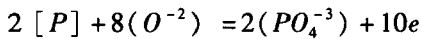


图 2 转炉钢水终点平衡碳含量与温度的关系

Fig. 2 Relationship between BOF liquid end carbon content and temperature

$$K = \frac{a_{P_2O_5}^2}{a_p^2 \cdot a_{Fe_2}^5 \cdot a_{O_2}^8} = \frac{a_{P_2O_5}^2}{X_p^2 X_{Fe_2}^5 X_{O_2}^8} \quad (3)$$

从熔渣离子反应式可推导出下列计算公式:

$$\lg L_p = \lg \left(\frac{P}{[P]} \right) = \frac{22350}{T} - 21.876 + 5.6 \lg(CaO) + 2.5 \lg(\Sigma Fe) \quad (4)$$

式中: ΣFe —熔渣中铁的含量

由式(2)及式(4)可知,无论是脱磷分子理论还是离子理论均认为:低温、高碱度、高氧化性是有利于脱磷的热力学条件。而通过岩相分析得出,炉渣中物相主要为硅酸二钙和铁酸钙相、硅酸三钙和 RO 相,分别为 84.37%、9.76%、3.45% 和 2.72%,炉渣中磷在硅酸二钙中含量高达 83.47%,而在铁酸钙相、RO 相和硅酸三钙中含量相对较少。可见,要提高转炉脱磷效率必须尽可能多的生成硅酸二钙(2CaO · SiO₂)富磷相,而依靠后期高氧化性生成的铁酸钙相并不具备良好的脱磷效果。

根据 CaO-SiO₂-FeO 液相等温相图^[12]可知,在 2CaO · SiO₂ 饱和区内,要实现液态炉渣中大量析出 2CaO · SiO₂ 富磷相,必须降低钢水温度和适当降低炉渣 FeO 含量。攀钢半钢冶炼要实现转炉终点保碳出钢,降低出钢温度是重要手段之一。半钢冶炼长期依靠铁质成渣,降低渣中 FeO 含量则会显著缩短初期渣成渣时间,而半钢增硅后初渣中 SiO₂ 含量的升高,可促进前期快速成渣。

4 去磷保碳试验效果

(1)造渣。采用单渣法留渣加料操作,前期碱度按照 1.5~2.0 控制,冶炼中期通过多批次少量加入含铝复合造渣剂缓解返干。

(2)供氧及底吹搅拌。为延长低温脱磷时间,前期氧枪采用低供氧强度。为促进渣-钢间界面反应,前期采用高底吹供气强度,中期低供氧强度,后期采用后搅工艺,增强脱磷反应动力学条件。

(3)终点控制。终点温度降低至 1650 °C 以内,终点碳 ≥ 0.15%。

4.1 过程时间

半钢中加入硅铁后增加了半钢热源,兑铁及转

表 2 转炉冶炼工艺操作

项目	初期渣形成时间/min	吹氧时间/min	样本数/炉
试验工艺	2.5	10.1	15
	2.0~4.0	9.6~10.8	
原工艺	4.1	11.42	25
	3.0~5.5	10.3~13.5	

炉冶炼过程硅的氧化提高了炉内温度,同时有利于初期渣的形成。表 2 为在 45 钢试验时过程时间控制情况,从表 2 中可以看出,试验炉次初期渣形成时间平均仅为 2.5 min,较原工艺缩短 1.6 min。同时,提高终点碳后纯吹氧时间平均缩短 1.32 min。

4.2 终点控制及脱磷效果

采用转炉半钢增硅补偿半钢热源后,开展了 15 炉转炉去磷保碳试验,试验炉次终点钢水碳含量平均为 0.18%,终点温度平均为 1653 °C。图 3 为试验炉次终点碳及温度分布情况。从图 3 中可以看出,试验炉次终点钢水碳含量在 0.15%~0.20% 的比例达到 73.3%,仅有 3 炉到达 0.20% 以上;而终点温度在 1640~1660 °C 的比例达到 80%,达到了降低出钢温度提高终点碳的目的。

试验炉次终点钢水磷含量表明,试验炉次终点钢水磷含量为 0.009%~0.015%,平均为 0.012%,全部控制在 0.015% 以内,达到了转炉去磷保碳的目的。

4.3 炉渣成分及物相变化

表 3 为转炉终点炉渣成分及碱度的对比情况。从

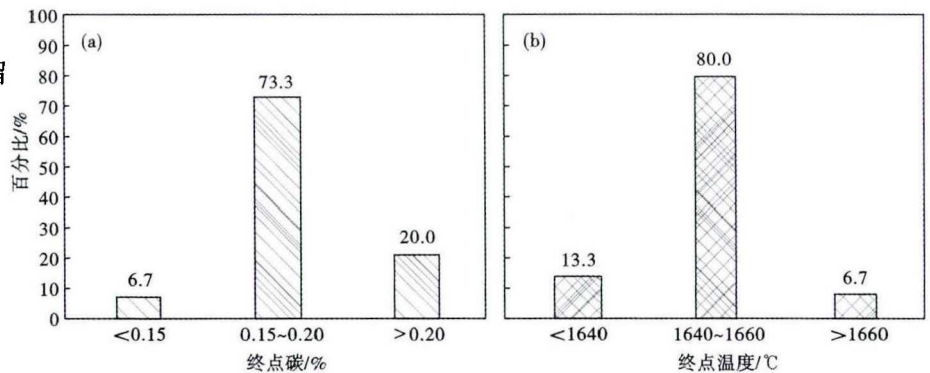


图 3 转炉钢水终点碳(a)和终点温度(b)的分布
Fig. 3 Distribution of BOF liquid end carbon (a) and end temperature (b)

表 3 试验工艺和原工艺转炉终点渣成分和碱度
Table 3 Ingredient of BOF end slag and basicity of test process and original process

工艺	渣样成分/%					碱度(R)
	TFe	CaO	SiO ₂	MgO	fCaO	
试验工艺	17.35	40.58	11.26	11.36	5.68	3.60
原工艺	20.16	40.75	11.02	11.78	9.46	3.70

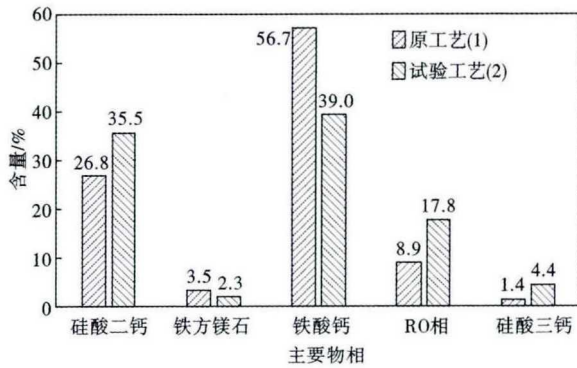


图4 转炉原工艺(1)和试验工艺(2)炉渣中物相含量

Fig. 4 Phase content in slag with BOF original process (1) and test process (2)

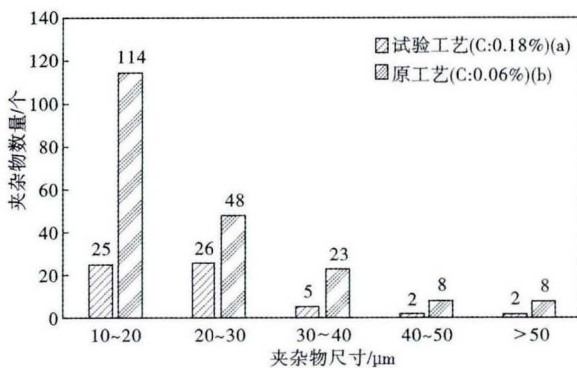


图5 试验工艺(a)和原工艺(b)转炉钢水夹杂物分布

Fig. 5 Distribution of inclusions in BOF liquid by test process (a) and original process (b)

表3中可以看出,试验炉次采用去磷保碳工艺后终点钢水的碳含量明显提升,炉渣 TFe 含量由原来的 20.16% 降低到 17.35%,且渣中 fCaO 含量降低,说明炉渣熔化较好,石灰利用率较高。通过对炉渣岩相分析得出物相变化,如图4所示。从图4中可以看出,采用去磷保碳的试验工艺后炉渣硅酸二钙相

含量明显提升,而铁酸钙相含量显著降低,即炉渣中富磷相增多,脱磷效果更好,进一步验证了脱磷效果。

4.4 钢水质量

对出钢后钢水试样进行金相检测,在相同放大倍数下,观察视场内(25 mm × 25 mm)夹杂物数量变化情况及不同尺寸夹杂物数量变化情况(图5),得出相同视场内试验工艺炉次夹杂较对比原工艺炉次明显减少,且相同尺寸下的夹杂物数量也有明显的减少。

5 结论

(1)结合攀钢半钢冶炼实际情况,提出对半钢进行增硅化学热补偿工艺,提高炼钢转炉热源的同时促进了前期快速成渣脱磷,转炉成渣时间由原来的 4.1 min 缩短到 2.5 min。

(2)通过对转炉脱磷热力学分析以及半钢冶炼钢渣中磷富集规律的研究,确定了终渣中磷的主要富集相为硅酸二钙相,磷在铁酸钙、硅酸三钙及 RO 相富集量相对较少,通过降低出钢温度和适当降低渣中 FeO 含量可促进硅酸二钙相的析出,进而提高脱磷效率。

(3)在采用半钢增硅热补偿工艺的条件下,通过对冶炼工艺参数的优化,试验工艺炉次转炉终点钢水碳含量平均达到 0.18%,温度平均为 1653 °C,炉渣 TFe 含量平均降低 2.81 个百分点,渣中硅酸二钙相显著提升,脱磷效率提高,试验炉次终点磷含量均控制在 0.015% 以内,实现了转炉去磷保碳。

(4)采用转炉去磷保碳试验工艺后,钢水夹杂物明显减少,提高了钢水洁净度。

参考文献

- [1]李德军,许孟春,李晓伟,等.提高高碳钢高拉一次补吹成功率工艺优化[J].钢铁研究学报,2016,28(12):35-40.
- [2]魏宝森,刘书超.转炉冶炼中高碳钢种高拉碳工艺生产实践[J].金属材料与冶金工程,2017,4(2):29-32.
- [3]吴全明,李瑛,刘广君,等.高碳钢转炉冶炼过程高拉碳工艺研究[J].炼钢,2015,31(3):1-4.
- [4]曾兴富,方宇荣,黄标彩,等.复吹转炉两炉双联冶炼 65 钢工艺研究与应用[J].炼钢,2014,30(3):5-8.
- [5]左启伟,杨静波,安霞,等.胎圈钢丝 C72DA 钢转炉高拉碳操作实践[J].炼钢,2014,30(4):1-4.
- [6]焦玉莉.120 t 复吹转炉单渣法高拉碳工艺[J].钢铁,2014,49(10):30-33.
- [7]高文芳,陈钢,王金平,等.顶底复吹转炉高效脱磷研究[J].钢铁,2009(9):36-40.
- [8]范连明,李锡峰,胡维铸.150 t 转炉高拉碳冶炼 GCr15 轴承钢的

工艺实践[J].特殊钢,2010,31(5):39-41.

- [9]潘树范.LD 转炉半钢炼钢的温度问题探讨[J].钢铁钨钛,1996,17(1):37-46.
- [10]袁章福,万天骥,李华.转炉炼钢热补偿技术[J].炼钢,1991,7(3):44-49.
- [11]古隆建,许立志,刘南平.转炉以煤代焦吹炼半钢的试验研究[J].钢铁钨钛,1990,7(3):7-10.
- [12]黄希祐.钢铁冶金原理[M].北京:冶金工业出版社,2013.

陈均(1986-),男,硕士(2018年北京科技大学),高级工程师,2009年内蒙古科技大学(本科)毕业,炼钢工艺研究。
E-mail:foresttiger119@163.com

收稿日期:2020-5-22