

## 60 t 转炉用含铬铁水冶炼 HRB400 钢的工艺实践

姚娜 兴超

(济源职业技术学院冶金化工系, 济源 459000)

**摘要** 试验研究了铁水中铬含量(0.15%~0.27%)对脱磷率、Cr、Mn回收率和HRB400钢力学性能的影响。通过生产实践得出铁水最佳Cr含量为0.18%~0.25%和炉渣( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ )为2%,通过合理控制炉渣成分(/%: 45.84CaO, 16.10SiO<sub>2</sub>, 8.81MgO, 1.60Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3.48P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1.55Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13.23TFe, R2.84),转炉脱磷率为80.33%,Cr的回收率为71.35%,转炉终点[Cr]为0.13%以上,钢中Si含量可降低0.02%,Mn含量降低0.03%,可有效利用残余元素Cr替代部分Si和Mn,降低了生产成本。

**关键词** 60 t 转炉 含铬铁水 冶炼工艺 实践

### Process Practice on 60 t BOF Steelmaking Steel HRB400 by Using Hot Metal Bearing Chromium

Yao Na and Xing Chao

(School of Metallurgy and Chemical Engineering, Jiyuan Professional and Technological College, Jiyuan 459000)

**Abstract** Effect of chromium content (0.15%~0.27%) in hot metal on dephosphorization rate, yield of Cr and Mn, and mechanical properties of steel HRB400 has been tested and studied. It is obtained by production practice that the optimum Cr content in hot metal is 0.18%~0.25% and the suitable slag ( $\text{Cr}_2\text{O}_3$ ) is 2%, with reasonable controlling slag ingredient (/%: 45.84CaO, 16.10SiO<sub>2</sub>, 8.81MgO, 1.60Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 3.48P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, 1.55Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 13.23TFe, R2.84) the BOF dephosphorization rate of liquid is 80.33% and the yield of Cr is 71.35%, BOF end [Cr] is more than 0.13%, the Si and Mn content in steel may decrease respectively 0.02% and 0.03%, it is available to replace partial Si and Mn by residual Cr to decrease the production cost.

**Material Index** 60 t BOF, Hot Metal Bearing Chromium, Steelmaking Process, Practice

红土镍矿应用于高炉具有较高的降低成本优势,冶炼时其Cr元素被还原到铁水中,影响铁水及转炉终点Cr含量升高,当铁水Cr含量达到0.20%以上时,转炉在吹炼过程中约30%的Cr被氧化成 $\text{Cr}_2\text{O}_3$ 进入炉渣,转炉冶炼过程中普遍出现了炉渣粘稠,化渣困难,脱磷率降低,生产成本升高等问题,转炉冶炼高铬铁水难度较大,如果不解决高铬铁水的冶炼难题,高炉就无法发挥红土镍矿的性价比优势。

#### 1 设备主要参数

转炉工艺参数:公称容量1×60 t,炉容比0.68。冶炼周期24.3 min;铁水碳含量3.9%~4.5%。氧枪参数(Φ180 mm,4孔拉瓦尔型):工作压力0.8~1.2 MPa;马赫数(Ma)1.98;喉口直径Φ27.6 mm;出口直径Φ35.4 mm;扩张角12°。底吹模式:随着冶炼过程的动力学条件执行底吹曲线,供气强度由前期0.03 m<sup>3</sup>/(t·min)→中期0.02 m<sup>3</sup>/(t·min)→后期0.07 m<sup>3</sup>/(t·min)。

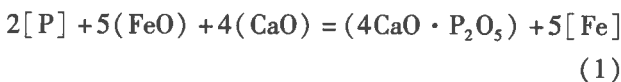
#### 2 应用高铬铁水冶炼工艺研究

转炉应用高铬铁水冶炼工艺研究主要思路是确

定铁水Cr最佳含量,生产过程中实现去磷保铬,生产顺行等目标;同时,合理利用钢中残余Cr元素代替Si、Mn合金,降低生产成本。

##### 2.1 去磷

脱磷反应是在钢-渣界面进行的,其反应为:



由脱磷反应式(1)可以得出:(1)增加渣中(CaO),可以提高脱磷率,但是(CaO)过度增加会导致炉渣碱度增加,炉渣黏稠,流动性变差,降低脱磷效果;(2)脱磷反应是一个氧化放热反应,为提高脱磷效果,较低的熔池温度有利于脱磷反应的进行,但是过低的温度又制约了反应的快速进行,也不利于终点温度的控制;(3)增加渣中(FeO),可以提高脱磷率,但是对于转炉炼钢,不仅会直接增加铁损,使金属料消耗升高,而且,终渣可溅性降低,需对终渣进行改质处理,使成本增加;(4)增加渣量有利于脱磷,但也会增加铁损,同时,良好的动力学条件,有利于改善脱磷效果,提高脱磷率。

根据表 1 铁水 P、S 含量及终点 P、S 含量及以往的终渣控制情况,参考转炉冶炼过程中炉渣成分变化示意图(图 1)及 CaO-SiO<sub>2</sub>-FeO 系相图 1 400 °C 的等温截面图,炉渣控制的总体原则是:过程渣化透,且满足脱磷及溅渣护炉要求,另外,要满足经济要求,避免造渣材料及金属料浪费,即:尽量维持现有炉渣碱度、渣中(MgO)保持不变,小幅调整。

由图 1 可以看出,转炉炼钢过程中,吹炼初期,铁水中 Si、Mn、Fe 氧化,迅速形成含 ΣFeO 浓度很高的初期渣,其组成位于图 1 中的 A 处。为了在吹炼中除去铁水中的磷、硫,造渣料中加有石灰。随着温度的上升及渣中 ΣFeO 的增加,石灰逐渐溶解于初期渣中,而终渣成分要求达到图 1 的 C 处。由 A 处到 C 处的主要路径有:(1) ABC, 必须通过二相区,渣中有固相存在,粘度较大,存在返干现象。(2) AB'C, 渣中 ΣFeO 含量增加较快,炉渣大部分时间在液相区内,炉渣的粘度较小,有利于磷硫的去除。(3) AB''C, 渣中 ΣFeO 含量由高→低→高→低,炉渣大部分时间在液相区内,其 ΣFeO 含量的变化既能满足脱磷的要求,又能满足降低金属料消耗和溅渣护炉的要求。

基于上述情况,选择炉渣控制的总体路径为

表 1 铁水、转炉终点、成品主要化学成分/%

Table 1 Main chemical composition of hot metal, BOF end and finishing product / %

项目	C	S	Si	Mn	P	Cr
铁水	4.27	0.042	0.44	0.20	0.130	0.23
转炉终点	0.08	0.036	0.02	0.086	0.026	0.17
成品	0.24	0.032	0.38	0.93	0.032	0.16 <sup>(1)</sup>

注:(1)Cr 收得率 71.35%

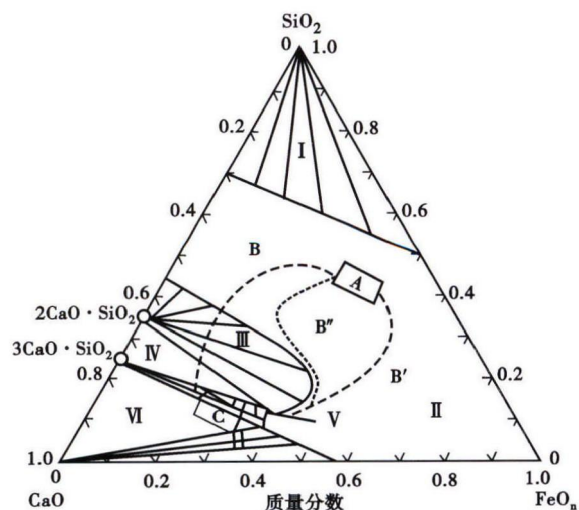


图 1 转炉冶炼过程中炉渣成分变化示意图:A- 初渣;C- 终渣  
Fig. 1 Schematics of variation of slag ingredient in BOF steel-making process; A- initial slag; C- end slag

AB''C 不变,然后在此基础上对造渣制度进行优化,供氧制度与之配合。

铁水中 Cr 含量升高,经转炉吹炼完毕,氧化部分进入炉渣形成高熔点的(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),造成炉渣粘稠,不利于化渣,加重了脱磷的难度。渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在硅酸盐渣中的溶解度是比较低的(约 5%),三元相图的绝大部分区域都有高熔点化合物析出<sup>[1]</sup>。同时,渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)对成渣温度影响较为显著(表 2),渣中含有 2% 的(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),不但不提高成渣温度,反而使成渣温度明显下降,但是,一旦超过 4%,随着(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)增加,成渣温度呈上升趋势。

如遇铁水 Cr 含量高的情况下(一般在 0.25% 以上时),需采用一定的化渣剂,既可以降低铁水的熔点,也可以改善其流动性,对于脱磷有帮助。目前,常用的化渣剂有 CaF<sub>2</sub>、FeO、MnO 等,添加(MnO),需要使用锰矿或者提高铁水锰含量,使成本升高。如果炼钢采用高(FeO)造渣方法,会造成铁损增加,为保证两者兼得,石横特钢根据自身条件对冶炼过程枪位流量及造渣材料消耗进行调整,过程枪位适当提高以保证过程炉渣化透,最大限度的进行脱磷,遇见铁水硅偏低化渣困难的炉次,过程中可适当采用萤石化渣。

如果不使用助熔剂,为使造渣操作顺利,应尽可能将(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)控制在 4% 以下,较理想的情况是将(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)控制在 2% 左右。如果,控制炉渣碱度在 3.0 左右,(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在 3% ~ 7%,(FeO)控制在 20% 左右,(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)控制在 2% ~ 3%,有利于化渣去磷。

## 2.2 保铬

通过数据统计分析,随着铁水 Cr 含量的逐渐提高,转炉脱磷率呈下降趋势,Cr 回收率呈下降趋势。铁水[Cr]在 0.15% ~ 0.27% 出现一峰值,显示该区间铁水 Mn 含量经转炉吹炼回收率较高。铁水 Cr 含量与脱磷率、Cr、Mn 回收率的关系见图 2。

同时,渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)为 2% ~ 8% 时,随着(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)的增加,不同碱度下初渣熔化温度都明显

表 2 炉渣(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)对成渣温度的影响

Table 2 Effect of slag (Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>) on forming temperature of slag

(Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> )/%	成渣温度 / °C	
	(CaO)/(SiO <sub>2</sub> ) = 2	(CaO)/(SiO <sub>2</sub> ) = 3
0	1 418	1 454
2	1 385	1 366
4	1 429	1 454
6	1 430	1 450
8	1 447	1 340
10	1 464	1 447

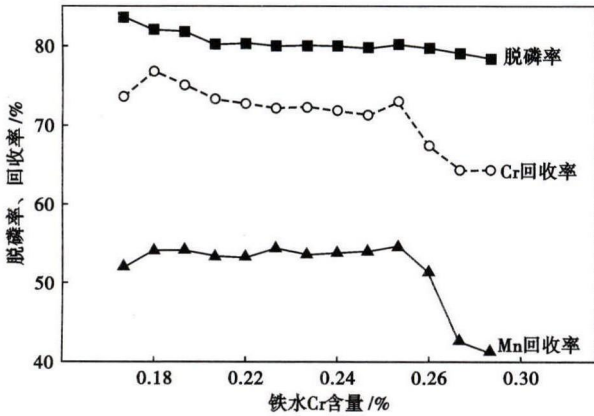


图2 铁水 Cr 含量对 BOF 脱磷率、Cr 和 Mn 回收率的影响  
Fig.2 Effect of Cr content in hot metal on dephosphorization rate, and yield of Cr and Mn of BOF

增加,表明(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在此范围内对不同碱度下初渣熔化温度影响均较大,当(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在2%时,不同碱度下初渣熔化温度均最低<sup>[2]</sup>。渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)在2%的基础上,渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)增加,就有尖晶石相 FeO·Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 增加,致使转炉渣熔化温度升高。渣中(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)高于5%时,向渣中添加一定量的白云石和铁矾土能够促进渣中高熔点相向低熔点相转变,有效降低转炉初渣熔化温度并促进石灰快速溶解。其炉渣主要控制情况为:应控制(MnO)6%~9%,(MgO)7%~9%,(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)2%左右,以及(FeO)20%~30%。

综合确定最佳铁水 Cr 含量控制在 0.18%~0.25%。另外,Cr 回收率的提高,有助于改善炉渣组分,改善转炉化渣及脱磷效果。基于以上情况,对炉渣成分进行优化,适当降低炉渣碱度,重点控制渣中(MgO)、(Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)、(Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub>),如表3所示。

### 2.3 利用残余 Cr 代替 Mn、Si 等合金元素

以高线 HRB400(Φ8 mm)为例,统计 2015 年 3~5 月份钢材成分及对应性能,随着钢中 Cr、Ni 含量的逐渐增加,对应 Mn、Si 含量逐渐降低,其性能基本维持不变,均满足标准要求,铁水 Cr 含量与屈服强度、抗拉强度之间的关系见图 3。以 Cr 含量 0.13% 为界,Cr≥0.13% 的炉次较 Cr≤0.12% 的炉次,其 Si 含量降低 0.02%,Mn 含量降低 0.03%。按照当前市场价,钢中 Si 含量每降低 0.01%,生产

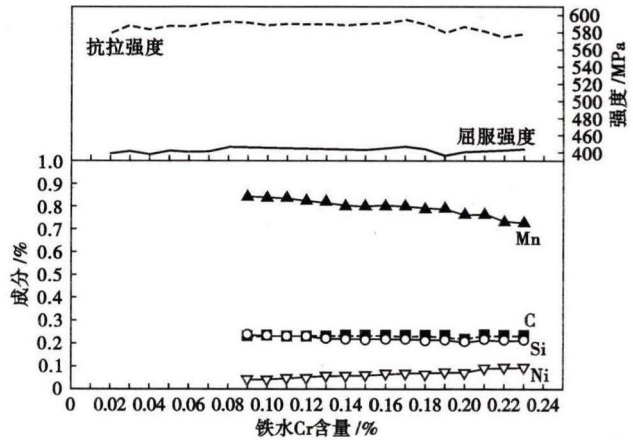


图3 铁水 Cr 含量对 Φ8 mm HRB400 钢屈服和抗拉强度的影响  
Fig.3 Effect of Cr content in hot metal on yield and tensile strength of Φ8 mm hot-rolled products of steel HRB400

成本降低 0.61 元/t,钢中 Mn 含量每降低 0.01%,生产成本降低 0.43 元/t,其综合效益为 2.51 元/t。

3 应用高铬铁水冶炼工艺研究取得的成果

### 3 应用高铬铁水冶炼工艺研究取得的成果

(1) 实现了转炉应用高铬铁水的生产顺行,提高了 Cr 回收率。选取高线 HRB400 钢项目开展最初 2 月份(1522 炉)的指标与工艺较为成熟的 5 月份(1477 炉)指标进行对比,转炉成功克服了化渣困难的难题,转炉脱磷率由 73.61% 提高至 80.33%,Cr 回收率由 67.17% 提高至 71.35%。

(2) 完善了化学成分体系,有效利用残余元素 Cr 代替 Si、Mn 元素,降本增效。有效利用了铁水中的 Cr 经转炉吹炼完毕残存在钢中能够提高钢材性能的特点,来降低钢中 Si、Mn、V 等合金元素含量,以降低生产成本。制定了 Cr 联动制度和铁水、钢坯中的 Cr 含量控制标准,转炉终点 Cr 含量在 0.13% 以上的,单独执行一套化学成分标准。

(3) 确定铁水 Cr 含量最佳控制范围在 0.18%~0.25%。

### 参考文献

[1] 张圣弼,高峰.含铬铁水炼钢的实验室配渣试验[J].钢铁,1997,14(3):161-168.  
[2] 赵小波,闫威,陈伟庆.含 Cr<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 转炉渣熔化温度的试验研究[J].河南冶金,2013,21(4):7-8.

表3 工艺优化前后炉渣成分和碱度  
Table 3 Control of ingredient and basicity of slag before and after process optimization

工艺	渣成分 /%								碱度 (R)
	TFe	SiO <sub>2</sub>	CaO	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MnO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	
优化前	13.68	17.20	51.78	9.12	3.11	3.28	3.33	0	3.01
优化后	13.23	16.10	45.84	8.81	1.60	3.48	3.40	1.55	2.84

姚娜(1979-),女,硕士(2009年安徽工业大学),2002年辽宁科技学院(专科)毕业,冶金技术研究。

E-mail:yaon0416@163.com

收稿日期:2016-12-17