

## 100 t 转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的留渣 + 单渣操作实践

翟勇强<sup>1</sup> 王建伟<sup>1</sup> 张毅<sup>1</sup> 夏朝开<sup>1</sup> 王琳松<sup>1</sup> 高长益<sup>2</sup>

(1 水城钢铁集团公司,六盘水 553028;2 水城钢铁集团公司制造管理部,六盘水 553028)

**摘要** 针对 100 t 转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的前期成渣难于熔化、脱磷率低的问题,分析了含钛铁水转炉炼钢的成渣过程和炉渣的物理特性,开发了留渣 + 单渣工艺技术。循环利用终点炉渣,充分发挥渣中 10% ~ 13% FeO 高 (FeO) 含量的特点,快速把含钛铁水冶炼前期的 CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 三元渣系转变为 CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-FeO 四元渣系,脱除钢中大部分磷。控制终渣碱度大于 3.2、(TiO<sub>2</sub>) 含量小于 5%,使转炉出钢 [C] ≥ 0.20%、[P] ≤ 0.014%,转炉炼钢脱磷率达到 88% ~ 92%,石灰消耗下降到 28 kg/t<sub>钢</sub>。

**关键词** 100 t 转炉 含钛铁水 高碳钢 留渣操作 单渣操作

## Operational Practice of Heel Slag + Single Slag for Steelmaking High Carbon Steel in 100 t BOF with Titanium-Bearing Hot Metal

Zhai Yongqiang<sup>1</sup>, Wang Jianwei<sup>1</sup>, Zhang Yi<sup>1</sup>, Xia Chaokai<sup>1</sup>, Wang Linsong<sup>1</sup> and Gao Changyi<sup>2</sup>

(1 Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028; 2 Manufacture Management Department, Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028)

**Abstract** Aiming at the problems such as difficult melting of slag and low dephosphorization rate at the early stage of steelmaking high carbon steel in 100 t BOF (basic oxygen furnace) with titanium-bearing hot metal, the slagging process and the slag physical characters of BOF steelmaking with titanium-bearing hot metal are analyzed, the technology of heel slag + single slag is developed, i. e. The terminal slag is recycled to use, to full play the character of high FeO content of 10% ~ 13% FeO in the terminal slag, the CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> ternary slag system in the early stage of steelmaking of titanium-bearing hot metal is rapidly converted into the CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-FeO quaternary slag system, so that most of phosphorus in steel is removed. The basicity of terminal slag is controlled to be more than 3.2, the TiO<sub>2</sub> content in terminal slag is controlled to be less than 5%, the BOF tapping [C] ≥ 0.20% and tapping [P] ≤ 0.014%, the dephosphorization rate of steelmaking in BOF reaches to 88% ~ 92%, and the consumption of lime decreases to 28 kg per ton of steel.

**Material Index** 100 t BOF, Titanium-Bearing Hot Metal, High Carbon Steel, Slag Heel Operation, Single-Slag Operation

水城钢铁集团公司(下称水钢)为了降低高炉炼铁原料成本,扩大含铁原料的来源,充分利用西部地区丰富的钒钛磁铁矿资源,在高炉配料中加入了一定量含有 V、Ti、Cr 的铁矿石,导致铁水中带有一定量的含有 V、Ti、Cr 的微量元素。其特点主要是:(1) 铁水 [Ti] 0.15% ~ 0.45%、[V] 0.02% ~ 0.15%、高炉渣 (TiO<sub>2</sub>) 16% ~ 19%,导致转炉终渣熔点低、渣稀,溅渣护炉效果差且溅渣层不抗侵蚀;(2) 铁水 [P] 在 0.10% ~ 0.20%,远高于国内同类型钢厂的铁水 [P] = 0.07% 左右的水平。转炉直接吹炼含有微量元素 V、Ti、Cr 等的铁水,容易出现吹炼前期起渣快、泡沫化及喷溅严重<sup>[1]</sup>。

转炉冶炼高碳钢,若采用传统双渣工艺,存在前期渣化不透,脱磷效果差<sup>[2]</sup>;二次造渣转炉终点碳低、终渣 (FeO) 高、石灰消耗高、炉龄降低等一系列问题<sup>[3]</sup>。含 V、Ti 铁水使得高温下熔渣对炉衬的侵

蚀机理及侵蚀程度发生改变,并影响到溅渣护炉的效果。

针对上述问题,为了冶炼高碳 82B、60 ~ 80 钢,水钢 100 t 转炉开发了“留渣 + 单渣”操作的保碳出钢工艺,出钢钢水 [C] 控制在 0.20% ~ 0.40%、[P] ≤ 0.014%,形成转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的保碳出钢工艺技术。

水钢“留渣 + 单渣”保碳出钢工艺的核心技术为:一是循环利用上一炉终点炉渣,充分发挥渣中高 (FeO) 含量特点<sup>[4]</sup>,快速地把下一炉含钛铁水冶炼前期的 CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 渣系转变为 CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-FeO 四元渣系,提高前期炉渣利用效率,消除了钛的不利影响,在冶炼前期脱除钢中大部分磷,减少中后期造渣料加入量;二是合理控制终渣碱度,采用较大底吹流量使钢与渣充分接触,为脱磷提供良好的动力学条件<sup>[5]</sup>;三是冶炼末期的压渣操作,促使钢-渣

表 1 水钢含钛铁水的成分/%  
Table 1 Composition of titanium-bearing hot metal at Shuigang/%

项目	C	Si	Mn	P	S	Ti	V	Cr
范围	4.51~6.45	0.19~0.72	0.22~0.36	0.10~0.20	0.03~0.06	0.15~0.45	0.02~0.15	0.02~0.07
均值	5.26	0.32	0.30	0.14	0.04	0.32	0.06	0.05

界面的铁珠与渣分离,提高金属铁的收得率。

### 1 含钛铁水炼钢的成渣过程及炉渣的物理特性

水钢含钛铁水的成分见表 1。[Ti]强烈地降低铁液中[S]和[H]的活度,使之有效浓度降低,不利于炼钢过程[S]和[H]的脱除。[Ti]还降低磷的活度系数,不利于脱[P]。铁水中 Ti 还增大铁水的粘度,是非表面活性元素,表面张力大,会造成渣与铁之间混合困难,反应界面减小。

根据 Ellingham 氧位图,铁水中 Ti 最先被氧化,其次是 Si、V、Mn、Cr、P、S 等元素,Ti 形成的氧化物首先进入渣中,其次是 Si、V、Mn、Cr、P 的氧化物在气体搅拌下依次进入渣中。在转炉冶炼条件下,其成渣的形成顺序为:FeO-TiO<sub>2</sub> 二元渣系;TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 二元渣系;CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 三元渣系;TiO<sub>2</sub>-FeO-MnO 三元渣系;冶炼后期加入白云石而形成的 TiO<sub>2</sub>-MgO-SiO<sub>2</sub> 三元渣系。

吹炼初期,熔池温度较低,在 1 300~1 400 °C,铁已经熔化,被氧化形成 FeO<sub>n</sub>,石灰刚刚开始溶解;Ti 元素优先氧化形成 TiO<sub>2</sub>,与液态 FeO<sub>n</sub> 最先生成 FeO-TiO<sub>2</sub> 二元渣系物质<sup>[6]</sup>:最先生成的初渣为大量郁氏体(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> 溶于 FeO 的固溶体,其熔点低于 1 371 °C)+少量钛尖晶石(TiO<sub>2</sub>),熔点在 1 312 °C;随着 TiO<sub>2</sub> 含量的增加,其渣系也渐变为钛尖晶石、钛铁矿、铁板钛矿、金红石类型,其对应的熔点为 1 395 °C、1 400 °C、1 494 °C、1 830 °C。

铁水中[Ti]快速氧化的中后期,铁水[Si]开始氧化反应,生成 SiO<sub>2</sub> 进入渣中,此时熔化的石灰量较少,SiO<sub>2</sub> 与少量熔化的石灰形成低熔点的铁酸钙(CaO·FeO·SiO<sub>2</sub>);渣中的相对过剩的 SiO<sub>2</sub> 与[Ti]氧化后期形成的 TiO<sub>2</sub> 形成了局部区域 TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub> 二元渣系物质<sup>[6]</sup>:随着 SiO<sub>2</sub> 含量的增加,形成 SiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 不同比例的熔渣,基本上都是固态颗粒物,只有当 SiO<sub>2</sub> 与 TiO<sub>2</sub> 质量比为 9:1 时才形成熔点温度为 1 550 °C 熔渣。因此,只有到冶炼中后期温度超过 1 550 °C 时,该类型熔渣才能熔化。

氧枪吹炼进行到 3~4 min 后,铁水中的 Si 大部分氧化完毕,Mn 的氧化还没有剧烈反应,熔池温度依然保持在 1 400 °C 这个阶段,这时的炉渣特点是:

渣中 TiO<sub>2</sub> 和 SiO<sub>2</sub> 含量较高,伴随着石灰融化加快,供给的液态石灰量增加,熔渣成为 CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 三元渣系(见图 1<sup>[6]</sup>):三组元质量比接近 1:1:1,形成 CaTiSiO<sub>5</sub> 时的熔渣熔点是 1 382 °C,其余各组元熔渣熔点大部分高于 1 400 °C。转炉冶炼在此阶段,只有三组元质量比例接近 1:1:1 时才能形成低熔点的液态渣,其它成分炉渣基本上保持固态,没有熔化的液态渣物质存在。水钢 100 t 转炉吹炼至 3 min

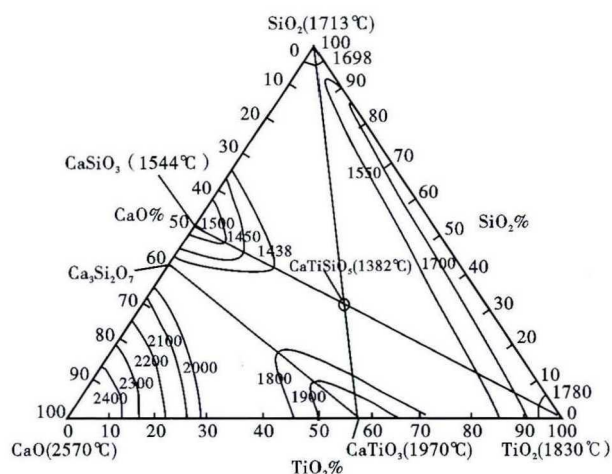


图 1 CaTiSiO<sub>5</sub> 液态渣在 CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub> 三元渣系相图中的位置

Fig. 1 Position of liquid slag CaTiSiO<sub>5</sub> in ternary slag phase figure of CaO-SiO<sub>2</sub>-TiO<sub>2</sub>

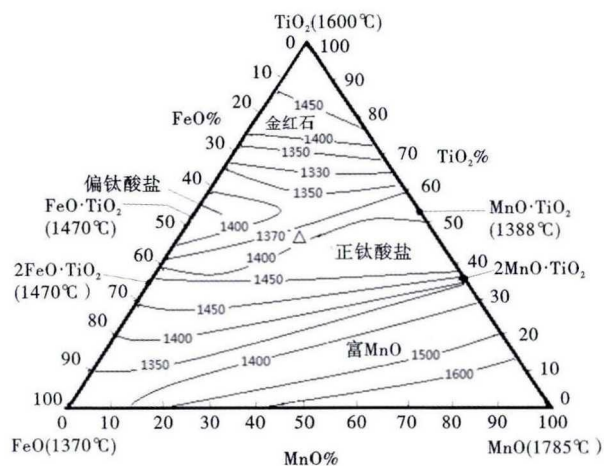


图 2 BOF 吹炼 4 min 熔渣在 FeO-MnO-TiO<sub>2</sub> 三元渣系相图中的位置

Fig. 2 Position of liquid slag in ternary slag phase figure of FeO-MnO-TiO<sub>2</sub> as BOF blowing for 4 min

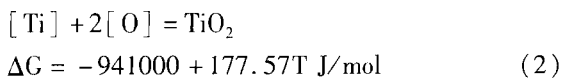
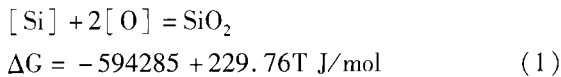
时,实际熔渣中的(CaO)为25%~35%、(SiO<sub>2</sub>)为15%~25%、(TiO<sub>2</sub>)为15%~25%,三组元比例接近1:1:1,形成了低熔点的CaTiSiO<sub>5</sub>液态渣(见图1中的小圆圈)。

吹炼进行到4 min左右,Si氧化优先完成,Mn开始大量氧化反应,炉渣中的MnO含量开始增加,MnO是碱性氧化物,随着渣中FeO含量增加,与SiO<sub>2</sub>形成FeO-MnO-SiO<sub>2</sub>三元渣系(属于常规低熔点渣系)。与酸性氧化物TiO<sub>2</sub>形成FeO-MnO-TiO<sub>2</sub>三元渣系(见图2<sup>[6]</sup>):无论是偏钛酸盐,还是正钛酸盐在此温度区间的渣系都是低熔点、液态的熔渣(熔点1400℃以下),即,当冶炼进行到Mn开始大量氧化的时间节点,含Ti炉渣相比常规炉渣的熔点更低。水钢100 t转炉吹炼至4 min时,实际熔渣中的(FeO)为15%~25%,(MnO)为10%~20%,(TiO<sub>2</sub>)为15%~25%,见图2中的三角形。

由上述可知,在含Ti铁水炼钢的成渣过程中,Mn大量氧化前,生成的钛类氧化物全是高熔点物质,炉渣粘度大,成渣过程中的炉渣流动性差。

## 2 含钛铁水炼钢的热平衡计算和调整原则

钢中Ti、Si元素发生氧化时的反应式如下:



在式(1)和(2)中, $\Delta G$ 表示反应焓变,T表示反应温度。依据(1)、(2)式,可以计算出,在1873 K时,在1 kg钢液中[Si]和[Ti]氧化反应的质量分数为0.10%时放出的热量基本相当,分别是21.2245 J和19.6533 J。在转炉冶炼的热平衡计算时,可将钛的放热量看作等同于相同量硅的放热量,即0.10% [Ti]等同于0.10% [Si]。

铁水温度的变化是造成转炉热量波动的主要原因

因,铁水温度波动10℃影响冷却剂加入量120 kg/t<sub>钢</sub>,水钢铁水温度波动范围大,为1250~1420℃,温度范围大导致一罐到底(铁水罐中的铁水不倒入混铁炉而直接兑入转炉)和混铁炉铁水入炉热量的差异,如何保证和减少铁水温度、[Si]含量波动导致的操作异常,制定热平衡调整原则如下:(1)当无高硅铁水冲兑时,低硅铁水优先采用一罐到底直接兑入转炉;(2)铁水温度低于1300℃时,采用一罐到底;(3)铁水温度高于1350℃时,铁水进混铁炉;(4)对于热量差的转炉(转炉炉壳温度高),铁水采用一罐到底;(5)对于热量好的转炉(转炉炉壳温度低),转炉冶炼采用混铁炉铁水。

## 3 含钛铁水冶炼高碳钢的留渣 + 单渣操作的成渣特点

根据含Ti铁水转炉炼钢前期成渣难于熔融化、脱磷率低的特点,采用高氧化铁的成渣路线,即“全留渣或部分留渣 + 单渣”的炼钢工艺,将上一炉高(FeO)含量和高物理热量的终渣用于下一炉吹炼初期氧化钛炉渣的助融和脱磷<sup>[7-10]</sup>。与双渣工艺相比,优点为:(1)含Ti炉渣的渣排出由双渣操作的前期倒渣(高(TiO<sub>2</sub>)含量的初期渣往往出现渣与铁不分离,因此,倒初期渣时造成铁损大)改成转炉终渣的部分倒出;(2)循环利用上一炉的低(TiO<sub>2</sub>)、高(FeO)的转炉终渣,快速地将下一炉冶炼前期的CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>渣系转变为CaO-TiO<sub>2</sub>-SiO<sub>2</sub>-FeO-MnO渣系,消除(TiO<sub>2</sub>)的不利影响,提高前期炉渣的脱磷效率,减少中后期造渣料的加入量,使吹炼过程和吹炼终点的渣中有较高的(FeO)含量;(3)合理控制终渣碱度,采用较大的底吹气体流量使钢与渣充分接触,为脱磷提供良好的动力学条件;(4)控制转炉终点的留渣量,使循环使用的终渣(TiO<sub>2</sub>)含量在5%以下;(5)冶炼末期的压渣操作,促使含钛炉渣的渣-铁界面的分离,提高金属铁的收得率;(6)冶炼末期采取拉碳操作,达到保碳出钢的目的。

表2 转炉吹炼过程的加料情况  
Table 2 Charging situation during blowing process in BOF

铁水成分		开吹枪位/m	加料时的氧气流量/(m <sup>3</sup> ·h <sup>-1</sup> )	前期加料种类及数量					全过程总量	
P/%	Si/%			石灰/kg	轻烧白云石/kg	烧结返矿/kg	污泥球/kg	冷固球/kg	石灰/kg	轻烧白云石/kg
≤0.140	<0.2	1.6~1.8	17500	600	400	1000~2000	-	-	≤2800	400
	0.2~0.3	1.4~1.6	18500	700	500	500~1000	1000~2000	-	≤3000	500
	0.3~0.4	1.3~1.4	19500	1600	600	-	1000~2000	500	≤3200	600
	0.4~0.5	1.3~1.4	19500	1800	700	-	1000~2000	1000	≤3600	700
	0.5~0.7	1.3~1.4	19500	2800	800	-	1000	1000~2000	≤4600	800
	≥0.7	1.3~1.4	19500	3400	900	-	1000	2000~3000	≤5400	900

表 3 转炉造渣制度  
Table 3 Slagging operation scheme in BOF

铁水条件	操作难点	转炉操作制度
Si ≤ 0.30%, Ti ≤ 0.30%, P < 0.15%。	热量差,起渣晚,易粘枪、粘烟道。	1、铁水装入 95 t,根据热量情况调整铁水、废钢比例;2、采用全留渣操作,第一批料加入烧结返矿、石灰分两次加入;3、开吹氧气流量 17 000 m <sup>3</sup> /h,过程氧气流量 16 000 m <sup>3</sup> /h;4、前期枪位 1.6~1.8 m,过程采用高枪位操作。
Si > 0.30%, Mn ≥ 0.30%, Ti ≤ 0.35%, P < 0.15%。	热量足,前期起渣、升温快,渣量大,易喷溅。	1、铁水按 90 t 控制,过程冷料控制在 2 500~3 000 kg;2、半留渣操作,第一批料一次性加入石灰总量的 2/3,前期冷料以冷固球为主,前期升温不要过快;3、前期枪位 1.2~1.3 m;4、吹炼过程产生爆发性喷溅必须无条件提枪;5、Si + Ti > 1.0%,喷溅无法控制时,采用双渣操作。
Si ≤ 0.30%, Mn ≤ 0.25%, Ti ≤ 0.30%。	起渣慢,化渣困难。	1、铁水装入 95 t,根据热量情况调整铁水、废钢比例;2、采用半留渣操作,冷料采用污泥球和烧结返矿,增大前期渣量;3、前期枪位 1.4~1.6 m。
Si ≤ 0.3%, P > 0.15%, Ti ≥ 0.35%。	起渣慢,化渣、去磷困难。	1、留三分之一渣操作;2、吹炼过程严禁使用冷固球;3、前期石灰加入量按总石灰加入量的 2/3 控制,剩余石灰在吹炼终点 7 min 之前加完,终渣碱度按 4~5 控制,目标碱度 4.5;4、过程防止返干;5、铁水 P ≥ 0.18%,根据情况采用双渣操作。

表 4 烧结返矿组成/%

Table 4 Ingredient of return sinter/%

TFe	CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	S	TiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	P
54.3	11.85	6.22	2.06	0.027	0.183	2.28	0.23	0.066

#### 4 不同铁水条件的加料及造渣制度

根据铁水的热量和杂质元素含量情况,以“热平衡”为中心,细化装入制度。根据铁水中的 Si、Ti、P 的含量,有针对性改变炉料结构,对转炉后期的脱磷保碳操作至关重要。转炉吹炼过程加料情况见表 2。转炉造渣制度见表 3,控制终渣碱度在 3.2 以上。

#### 5 烧结返矿的使用

烧结返矿就是烧结矿筛下的粒度 ≤ 5 mm 的部分,成分见表 4。烧结返矿主要是由含铁矿物及脉石两大类组成的液相粘接在一起的多种矿物的复合体,其中含铁矿物有磁铁矿(Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>)、方铁矿(Fe<sub>x</sub>O)和赤铁矿(Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)。此外,还有少量反应不完全的游离石英(SiO<sub>2</sub>)和游离石灰(CaO)等。烧结返矿是一种反应性良好具有一定碱度的低熔点含铁熟料,其硫磷含量低,物理化学成分稳定,并且熔点较低。

烧结返矿使用方案为:

(1) 转炉开吹点火正常后,压低枪位至 1.3~1.6 m 加料,加完头批料后立即降低枪位至 1.3 m 以下,起渣前调节氧气流量至 16 500 m<sup>3</sup>/h,起渣后根据喷溅情况让枪(幅度不宜过大),发生爆发性金属喷溅立即无条件提枪。中期枪位控制在 1.5~2 m。如前期产生喷溅,中后期采用高枪位操作,前期未产生喷溅,中后期采用低枪位操作。

(2) 中期化渣用烧结返矿为主,每批用量不大

于 300 kg。

(3) 烧结返矿的整体使用效果如下:① 在冶炼低硅铁水时,由于前期起渣慢,过程容易返干,当加入烧结返矿后,利用烧结返矿的低熔点、高氧化铁、含 SiO<sub>2</sub> 等特性,能有效改善低硅铁水冶炼返干难题。② 在冶炼低锰铁水时,由于中后期返干、难化渣,因此,中后期用烧结返矿为主,辅以高枪位、低氧气流量的操作模式,化渣效果将大幅改进。

#### 6 供氧制度

BOF 起渣后,适当降低脱磷期的氧气流量(按表 2 中的加料时的氧气流量减去 1 000 m<sup>3</sup>/h,例如,若加料时的氧气流量为 18 500 m<sup>3</sup>/h,则脱磷期的氧气流量为 17 500 m<sup>3</sup>/h),有利于前期脱磷时间的延长,从而提高转炉脱磷率,并有利于前期石灰等渣料的熔化,中后期的高氧气流量(按表 2 中的加料时的氧气流量增加 1 000 m<sup>3</sup>/h,例如,若加料时的氧气流量为 18 500 m<sup>3</sup>/h,则中后期的氧气流量为 19 500 m<sup>3</sup>/h)可增强转炉内的搅拌能力,均匀成分。

转炉吹炼起渣后,即碳氧反应开始加剧时,熔池温度上升较快,不利于脱磷,大量的 CO 产生也是造成前期喷溅的主要原因。中期的低氧气流量有利于减缓返干现象,保证碳氧反应不过于剧烈,减少对渣中(FeO)含量的消耗速度,保证过程均匀升温。

#### 7 冶炼末期的压渣操作

转炉第一次倒炉钢水温度控制在 1 600 ℃ 左右,钢中[C]保持在 0.50% 以上,[P]在 0.030% 以下,然后进行适度补吹,以达到保碳出钢的目的。

转炉冶炼末期的压渣操作,促使钢-渣界面的铁珠与渣分离:

(1)使用泡沫抑制剂( $C > 2.0\%$ ,  $CaO > 30\%$ ,  $SiO_2 < 20\%$ ,  $MgO < 5\%$ , 挥发分  $> 30\%$ , 粒度  $2.0 \sim 50 \text{ mm}$ )控制炉渣泡沫化。提高终点供氧强度由  $3.1 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$  提高到  $3.3 \text{ m}^3/(\text{min} \cdot \text{t})$ , 压枪至  $30 \text{ s}$ , 倒炉过程中加入  $50 \text{ kg}$  轻烧白云石进行人工压渣。在提枪倒渣过程中, 当氧枪枪位提至  $5 \sim 7 \text{ m}$  高度时, 用氮气吹扫熔池  $5 \sim 8 \text{ s}$  后, 再倒炉。抬炉后, 使用氮气对熔池进行吹扫, 压制钢液面的翻腾。

(2)倒渣摇炉操作工艺: 倒渣开始后, 将炉体倾动至  $75^\circ \sim 80^\circ$  位置, 在该角度保持  $3 \sim 5 \text{ s}$  后, 再缓慢摇炉至  $84^\circ \sim 85^\circ$  位置, 尽快倒掉高( $TiO_2$ )含量的炉渣, 控制终渣的( $TiO_2$ )含量在  $5\%$  以下。

(3)终点倒炉操作: 钢水温度按  $1590 \sim 1640 \text{ }^\circ\text{C}$  控制, 出钢[C]按  $0.20\% \sim 0.40\%$  控制, 终点压枪时间  $\geq 60 \text{ s}$ , 压枪枪位  $\leq 1 \text{ m}$ 。

## 8 终渣成分控制及留渣操作要求

水钢  $100 \text{ t}$  转炉采用含钛铁水冶炼高碳钢的牌号有  $60、65、70、75、80、82B$ , 转炉冶炼终渣成分为:  $35\% \sim 40\% \text{ CaO}$ ,  $10\% \sim 13\% \text{ SiO}_2$ ,  $10\% \sim 13\% \text{ FeO}$ ,  $10\% \sim 13\% \text{ MgO}$ ,  $2.0\% \sim 4.5\% \text{ TiO}_2$ , 碱度  $3.2 \sim 3.6$ 。炉渣碱度( $CaO/SiO_2$ )的控制: 当碱度在  $3.0$  以下时, 粗大的板条状  $3CaO \cdot SiO_2$  显著减少, 点状和针状的  $2CaO \cdot SiO_2$  明显增多, 导致溅渣层抗高温和耐侵蚀的能力都明显降低, 但是, 碱度过高, 冶炼过程容易产生返干, 影响脱磷和脱硫效果, 因此, 将碱度控制在  $3.2 \sim 3.6$  最为合适, 既有利于冶炼过程控制, 达到去除 P、S 效果, 又能确保炉渣耐火度<sup>[1]</sup>。渣中 FeO 含量的控制: 当渣中 FeO 含量从  $9\%$  提高到  $30\%$  时, 炉渣的初始流动温度从  $1642 \text{ }^\circ\text{C}$  降低到  $1350 \text{ }^\circ\text{C}$ ,  $10\% \sim 13\%$  的 FeO 含量可将炉渣的初始流动温度控制在  $1600 \sim 1500 \text{ }^\circ\text{C}$ <sup>[1]</sup>。渣中 MgO 含量的控制: MgO 可以稠化炉渣, 提高炉渣的粘度, 对溅渣护炉有利, 因此, 用含钛铁水炼钢时, 在正常铁水冶炼的基础上, 增加轻烧白云石用量, 将渣中 MgO 从原来的  $8\% \sim 12\%$  提高到  $10\% \sim 13\%$  有利于溅渣护炉<sup>[1]</sup>。渣中  $TiO_2$  含量的控制:  $TiO_2$  会降低终渣的熔点, 使渣变稀, 无法溅渣护炉, 因此, 在连续冶炼炉次中, 通过上一炉终渣的倒出量和留渣量, 将本炉次终渣的  $TiO_2$  含量控制在  $5\%$  以下, 留渣操作要求见表 5。

## 9 结论

水钢  $100 \text{ t}$  转炉冶炼  $60 \sim 80、82B$  高碳钢, 开发

表 5 留渣操作要求

Table 5 Requirements of heel slag operation

方案	摇炉操作方法
全留渣	炉炉溅渣完毕后, 将转炉摇平, 使炉渣平敷在转炉大面位置。
半留渣	炉炉溅渣完毕后的倒渣角度按转炉倒炉时倒渣角度加 $50^\circ$ 控制(例如, 倒炉时倒渣角度为 $84^\circ$ , 则溅渣后留渣倒渣角度为 $134^\circ$ )。

的“留渣+单渣”转炉保碳出钢操作工艺, 针对不同铁水的 Ti 和 P 含量, 细化留渣+单渣的造渣工艺制度, 控制转炉终渣碱度大于  $3.2$ 、( $TiO_2$ )含量小于  $5\%$ , 使渣中铁珠含量明显减少, 提高了金属铁的收得率。循环利用上一炉终点炉渣, 充分发挥终渣中  $10\% \sim 13\% \text{ FeO}$  含量高的特点, 快速把下一炉含钛铁水冶炼前期  $CaO-TiO_2-SiO_2$  渣系转变为  $CaO-TiO_2-SiO_2-FeO$  四元渣系, 脱除钢中大部分 P, 使转炉冶炼的脱磷率达到  $88\% \sim 92\%$ , 石灰消耗下降到  $28 \text{ kg/t}_{\text{钢}}$ 。出钢[C]控制在  $0.20\% \sim 0.40\%$ 、 $[P] \leq 0.014\%$ , 充分发挥转炉高碳出钢时钢水洁净度高、生产成本低的技术优势, 形成  $100 \text{ t}$  转炉用含 Ti 铁水冶炼高碳钢的保碳出钢工艺技术。

## 参考文献

- [1] 谢祥, 杨龙飞, 杨昌涛, 等. 钛铁水的转炉炼钢工艺实践[J]. 四川冶金, 2018, 40(3): 27-29, 43.
- [2] 蔡常青, 姜迪刚. 高钛铁水的冶炼实践[J]. 福建冶金, 2018, 60(5): 11-14.
- [3] 李伟东, 舒耀, 杨辉. 含钛铁水脱硫及转炉冶炼实践[J]. 鞍钢技术, 2013, 49(5): 44-47.
- [4] 韩雨亮, 杨怀春. 转炉留渣脱磷工艺实践[J]. 辽宁科技大学学报, 2017, 40(3): 167-170.
- [5] 朱国森, 李海波, 吕延春, 等. 首钢转炉“留渣-双渣”炼钢工艺技术开发与应用[C]. 中国金属学会. 第九届中国钢铁年会论文集. 北京, 2013: 1-6.
- [6] 联邦德国钢铁工程师协会. 渣图集[M]. 王俭, 彭育强, 毛裕文, 译. 王鉴, 校. 北京: 冶金工业出版社, 1989: 2.
- [7] 霍志斌, 赵彦岭, 王建林, 等.  $80 \text{ t}$  转炉冶炼 SCM435 钢留渣操作技术研究[J]. 特殊钢, 2018, 39(5): 14-17.
- [8] 刘效森, 王念欣, 贾崇雪, 等. 济钢  $120 \text{ t}$  转炉留渣操作工艺的实例[J]. 河北冶金, 2010, 31(4): 25-26, 18.
- [9] 韩宇, 张明博, 何晴, 等.  $100 \text{ t}$  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[J]. 特殊钢, 2017, 38(1): 27-30.
- [10] 吴杰. 转炉留渣单渣法炼钢工艺试验[J]. 天津冶金, 2017, 36(4): 1-4.

翟勇强(1968-), 男, 硕士(2006年武汉科技大学), 1991年贵州工学院(本科)毕业, 高级工程师, 钢铁冶金技术研究。E-mail: 1056471110@qq.com

收稿日期: 2020-04-20