



## 120 t复吹转炉高拉碳低磷出钢的冶炼工艺改进

张福东<sup>1</sup>, 武波<sup>2</sup>, 王月聪<sup>1</sup>, 赵欣<sup>3</sup>, 梁超<sup>4</sup>

(1 河钢集团邯郸钢铁集团设计院有限公司, 邯郸 056000; 2 河钢集团邯钢公司一炼钢厂, 邯郸 056000;

3 邯郸科技职业学院, 邯郸 056399; 4 河北冶金建设集团有限公司, 邯郸 056000)

**摘要:**转炉冶炼重轨钢、轴承钢等高碳钢, 氧枪控制采用传统低-高-低三段式冶炼模式, 因前期石灰难以熔化、中期喷溅加剧、后期失去高碱度脱磷机会, 造成冶炼过程喷溅率高、终点拉碳合格率低等问题。为解决此问题, 通过冶炼工艺分析, 采用改进后的氧枪控制为高-低-低-高-低五段式新冶炼模式。其综合结果为冶炼过程喷溅率明显降低, 喷溅率由20%~30%降低到15%以下; 终点拉碳合格率大幅提升, 终点拉碳合格率由69.06%提高到93.55%。

**关键词:**转炉; 重轨钢; 脱磷; 高氧势冶炼法; 饱和式冶炼法; 下枪即化渣; 洗渣冶炼法; 全液态冶炼法

DOI:10.20057/j.1003-8620.2023-00049 中图分类号:TF713

## The Smelting Process Improvement of 120 t Top-Bottom Combined Blown Converter with High-Carbon Turndown and Low Phosphorus Tapping

Zhang Fudong<sup>1</sup>, Wu Bo<sup>2</sup>, Wang Yuecong<sup>1</sup>, Zhao Xin<sup>3</sup>, Liang Chao<sup>4</sup>

(1 Handan Iron & Steel Group Design Institute Co., Ltd., HBIS GROUP, Handan 056000, China;

2 No.1 Steelmaking Plant, HBIS GROUP HANSTEEL COMPANY, Handan 056000, China;

3 Handan Vocational College of Science and Technology, Handan 056399, China;

4 Hebei Metallurgical Construction Group Co., Ltd., Handan 056000, China)

**Abstract:** High carbon steel such as heavy rail steel and bearing steel are smelted by converter, the traditional low-high-low three-stage smelting mode is adopted for oxygen lance control. Because lime is difficult to melt in the early stage, splash intensifies in the middle stage and loses the opportunity of dephosphorization with high alkalinity in the later stage, the splash rate is high in the smelting and the qualified rate of carbon turndown at end-point is low. In order to solve this problem, a new high-low-low-high-low five-stage new smelting model is adopted by analyzing the smelting process. The results show that the splash rate is obviously reduced from 20%~30% to less than 15%, and the qualified rate of carbon turndown at end-point is greatly increased from 69.06% to 93.55%.

**Key Words:** Converter; Heavy Rail Steel; Dephosphorization; High Oxygen Potential Smelting Method; Saturated Smelting Method; Melting Slag when Dropping Lance; Washing Slag Smelting Method; All-Liquid Smelting Method

河钢集团邯钢公司一炼钢厂(以下简称一炼钢)冶炼中高碳钢, 为降低钢液T.O含量, 提高洁净度, 要求转炉高C低P出钢。以重轨钢U75V-T为例, 终点要求:  $C \geq 0.10\%$ 、 $P \leq 0.025\%$ 、 $1580\text{ }^\circ\text{C} \leq T \leq 1620\text{ }^\circ\text{C}$ 条件下出钢。采用传统低-高-低三段式原氧枪控制冶炼模式, 出现冶炼过程不稳定、喷溅率高、终点拉碳合格率低、脱氧剂与渣料消耗高等问题。为此, 在前人对转炉前期低温、后期高碱度脱磷定性研究的基础上<sup>[1-6]</sup>, 通过对转炉冶炼过程定量分析及各个时期脱磷问题研究, 优化改进转炉前、中、后期氧枪枪位、氧化铁皮加入量等冶炼操作, 取得较好的吹炼效果。

### 1 转炉设备参数及主要物料成分

邯钢一炼钢厂拥有转炉2座, 公称容量均为120 t, 炉容比为 $0.96\text{ m}^3 \cdot \text{t}^{-1}$ , 形状呈筒球型。氧枪采用五孔拉瓦尔管型、标准流量为 $400\text{ m}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ 、氧压0.60 MPa。冶炼重轨钢底吹为全氩模式, 标准流量为 $80\text{ m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , 并配有副枪系统一套, 用于过程取C样和终点取O样。

转炉装入制度: 铁水125 t、废钢25 t, 总装入量150 t, 转炉出钢量132 t。冶炼过程综合热量富裕, 可加入氧化铁皮球3~5 t。铁水成分见表1, 入炉铁水温度为 $1320\text{ }^\circ\text{C} \sim 1400\text{ }^\circ\text{C}$ 。转炉用原料见表2。重

轨钢化学成分判定及内控见表 3。

表 1 铁水成分(质量分数)  
Table 1 Chemical composition of hot metal %

| C           | Si          | Mn          | S             | P             |
|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|
| 4.20 ~ 4.80 | 0.25 ~ 0.35 | 0.15 ~ 0.25 | 0.030 ~ 0.050 | 0.120 ~ 0.150 |

表 2 转炉用原料(质量分数)  
Table 2 Raw materials for converter %

| 原料    | CaO | SiO <sub>2</sub> | MgO | T.Fe |
|-------|-----|------------------|-----|------|
| 氧化铁皮  | -   | -                | -   | ≥60  |
| 石灰    | ≥90 | ≤3               | ≤3  | -    |
| 轻烧白云石 | ≥40 | ≤5               | ≥30 | -    |

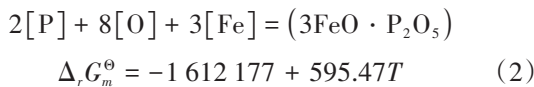
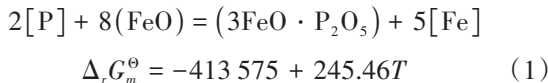
## 2 各阶段冶炼模式优化研究

### 2.1 冶炼前期优化改进

#### 2.1.1 冶炼前期特点及脱磷机理

转炉冶炼前期为转炉下枪时刻至吹氧 300 s, 该过程主要特点为: 铁水中的 Si 和 Mn 优先被氧化, 生成 SiO<sub>2</sub>、MnO 进入炉渣, 降低炉渣碱度, 不利于脱磷; 碳氧反应弱, 烟气量少, 不易喷溅, 低温有利于脱磷。如何充分利用冶炼前期低温的条件下, 能够快速化渣、提供适当的 FeO 含量成为前期脱磷冶炼的关键。

P 在渣钢之间分配比  $L_p = w(P)/w[P]$  (其中,  $w(P)$ 、 $w[P]$  分别表示 P 在渣及钢中的质量分数,  $L_p$  值越大脱磷能力越强) 与转炉炉渣 FeO(Fe<sup>2+</sup>、O<sup>2-</sup>) 含量呈正比关系<sup>[7]</sup>。将钢液中的 P 氧化进入炉渣, 以亚稳状态的 3FeO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> 对磷进行固定, 为前期脱磷的先决条件, 化学反应参见式(1)和式(2)。



式中:  $\Delta_r G_m^\ominus$  为标准吉布斯自由能, J·mol<sup>-1</sup>;  $T$  为热力学温度, K。

由以上理论分析可知, 冶炼前期提高渣中的 FeO 含量, 为前期高效脱磷提供良好的热力学条件。

#### 2.1.2 冶炼前期吹炼操作改进

传统低-高-低三段式冶炼模式, 其特点为前期枪位低, 造渣料加入量占总造渣料 90%, 氧化铁皮球加入量少或不加, 其思路仍然是走“钙系渣”路线。然而, 前期低枪位导致炉渣难以熔化, 失去利用前期低温条件进行大幅脱磷的机会。为解决此问题, 对冶炼前期枪位、渣料加入方式进行优化改进。优化前后枪位控制模式对比如图 1<sup>[8]</sup> 和图 2 所示。

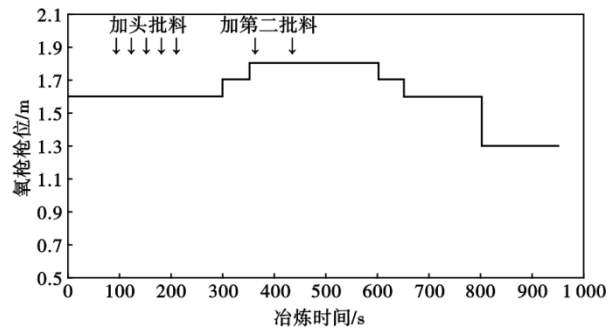


图 1 传统模式: 加料时机及三段式枪位控制

Fig. 1 Traditional mode: feeding timing and three-stage oxygen lance level control

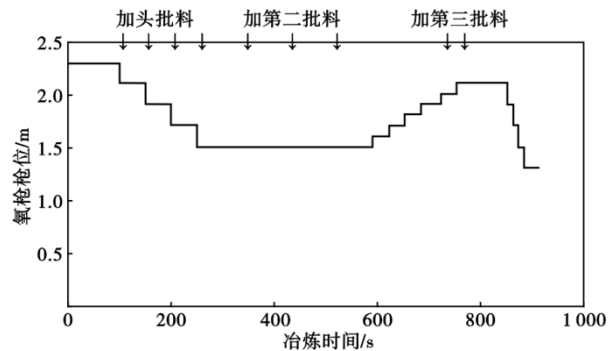


图 2 改进后模式: 加料时机及五段式枪位控制

Fig. 2 Improved mode: feeding timing and five-stage oxygen lance level control

优化改进操作方式如图 2 所示, 开吹枪位 2.3 m, 进行 100 s, 氧气流量达到正常值 400 m<sup>3</sup>·min<sup>-1</sup> (标准态), 火焰稳定, 加头批料的第一小批次料。每隔 50 s 加一次料, 每加一次料降枪约 0.2 m, 分 4 次或 5 次加完头批料。其中, 70% 的头批造渣料(石灰、轻烧白

表 3 重轨钢 U75V-T 化学成分(质量分数)

Table 3 Chemical composition of heavy rail steel U75V-T

| 项目 | C           | Si          | Mn          | S      | P      | V           | Al      |
|----|-------------|-------------|-------------|--------|--------|-------------|---------|
| 判定 | 0.73 ~ 0.79 | 0.50 ~ 0.70 | 0.80 ~ 1.00 | ≤0.015 | ≤0.025 | 0.04 ~ 0.07 | ≤0.0040 |
| 内控 | 0.75 ~ 0.77 | 0.55 ~ 0.65 | 0.87 ~ 0.94 | ≤0.012 | ≤0.020 | 0.04 ~ 0.06 | ≤0.0035 |

云石)在第1、2小批次加完,并在这两小批次料分别加入1 200、500 kg氧化铁皮球。头批造渣料总量占整个冶炼周期总造渣料的75%~80%。这种加料优点为:主料早加早化渣,但是不能一次性加入过多,少加勤加,防止结坩。这种优化操作克服了传统渣料难以熔化的问题。

### 2.1.3 冶炼前期限量分析与控制

优化改进的前期枪位越高、氧化铁皮球加入量越多、脱磷效果越好,但会造成冶炼中期喷溅加剧,使得冶炼进入中期越不稳定。为控制合适的枪位和氧化铁皮球加入量,在冶炼重轨钢U75V-T时进行不同枪位和对应氧化铁皮加入量试验,过程见表4。

表4 不同氧化铁皮球加入量与枪位试验

Table 4 Orthogonal experiment of different addition amounts of iron oxide ball and oxygen lance position

| 前期氧化铁皮球投入量/kg | 1 200 | 1 500 | 1 700 | 2 000 | 2 300 |
|---------------|-------|-------|-------|-------|-------|
| 开吹枪位/m        | 2.0   | 2.1   | 2.2   | 2.3   | 2.4   |

转炉冶炼前期Si和Mn氧化反应基本结束,温度开始爬坡,进入中期( $>1\ 470\ ^\circ\text{C}$ ),碳氧开始激烈反应,由于前期枪位太高,氧化铁皮球加入过多,前期渣中FeO含量太高,以至于进入冶炼中期,渣中FeO仍有相当部分含量,这部分含量维持在20%以上,此时,氧气射流带入的氧和渣中FeO贡献出来的氧同时参与碳氧反应,产生超大量烟气,这种推动力足够将炉渣推出炉口<sup>[9-12]</sup>。试验过程显示:当氧化铁皮球加入量为2 300 kg,开吹枪位2.4 m时,产生的大喷无法控制。为保证冶炼进入中期稳定,确定氧化铁皮球加入量的上限为1 700 kg,开吹枪位为2.3 m。

冶炼前期炉渣FeO最高含量计算:

(1)初始条件:总渣量约7.5 t,采取留渣(留渣1/3~1/4)操作,溅渣时,炉内渣量约2.2 t,炉渣FeO含量约15%,溅渣加入轻烧白云石400 kg。

(2)冶炼前期分析:吹炼100 s,加入头批料的第一小批次料。块状造渣料熔化需要一定时间,不作考虑。氧化铁皮球1 200 kg,快速熔化进入炉渣,换算为FeO。

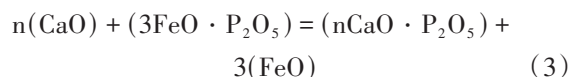
根据表5计算出氧化铁皮球中FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>带入的O<sup>2-</sup>,并换算为FeO,得出渣中FeO含量达43.7%,此值为保证冶炼进入中期而不喷溅,前期渣中FeO理论最高含量。

表5 换算氧化铁皮球为同等供O<sup>2-</sup>量的FeO(质量分数)  
Table 5 The iron oxide ball is converted to FeO with the equal O<sup>2-</sup> supply %

| 名称 | T.Fe | FeO | Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> | Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | 铁的氧化物含量 | 折为FeO  |
|----|------|-----|--------------------------------|--------------------------------|---------|--------|
| 含量 | 72   | 40  | 50                             | 10                             | 98.45   | 119.02 |

注:表中T.Fe、FeO、Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub>、Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、铁的氧化物含量等为氧化铁皮球物性参数。

前期创造的高氧势气氛,虽然将P从钢液中脱离出来,然而,生成物却是不稳定的3FeO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。原因在于Fe<sup>2+</sup>的极化力强,PO<sub>4</sub><sup>3-</sup>在纯FeO内极易被破坏<sup>[7]</sup>。利用前期高FeO炉渣,促使石灰不断溶解,炉渣碱度开始升高,前期碱度达1.7~2.0。同时,随着氧枪降低,炉渣FeO含量降低,迫使3FeO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>与渣中CaO反应,见式(3),式中n为3或4,生成更加稳定的3CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>、4CaO·P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>。至此,冶炼前期的脱磷任务正式结束,脱磷率70%。



将这种利用冶炼前期硅锰优先被氧化、产生烟量少、不易喷溅特点,采用高枪位开吹、高氧化铁皮球加入量模式,达到冶炼前期炉渣呈高氧化性、熔池呈低温状态,以脱磷为目的的冶炼技术定义为“高氧势”冶炼法<sup>[13]</sup>。

而为防止冶炼进入中期渣中FeO $>20\%$ ,造成冶炼不稳定,导致喷溅,应控制前期氧化铁皮球加入量不能过多及枪位高度不能过高,其上限定义为“饱和式”冶炼法<sup>[13]</sup>。

## 2.2 冶炼中期优化改进

### 2.2.1 冶炼中期特点及防喷溅机理

转炉吹炼300~600 s为冶炼中期,其特点为:温度从前、中期交界点的1 470 °C开始爬坡<sup>[14]</sup>,硅锰氧化结束,碳氧剧烈反应,烟气量达到一个冶炼周期的最大值,搅拌钢渣力度达到最大强度。冶炼中期渣中FeO含量降低,但冶炼前期仍有相当部分石灰未熔化进入炉渣,这部分石灰是靠中期持续性搅拌溶解的,是为冶炼后期进行“极限”性脱磷做准备。中期炉气量大、搅拌力度强,为防止喷溅,应控制炉渣FeO $\leq 20\%$ 。

### 2.2.2 冶炼中期吹炼操作改进

传统低-高-低三段式冶炼中期模式如图1所示,其特点为随着冶炼温度的提升,提高中期枪位,并加入大量氧化铁皮球,以便熔化造渣料进行中期脱磷。为保证中期进行有效脱磷,一次性加入氧化

铁皮球 700 ~ 800 kg, 而且是连续性只加氧化铁皮球, 原因是造渣料在前期已基本加完, 中期主要依靠氧化铁皮球及枪位调整。甚至发现越是喷溅, 越是加氧化铁皮球。原因是温度高导致的喷溅, 利用氧化铁皮球进行降温。这就导致中期渣中 FeO 含量超过喷溅红线 20%, 造成冶炼过程不稳定, 产生喷溅概率明显增加。

优化改进操作如图 2 所示, 整个冶炼中期枪位偏低, 使炉渣呈“微返干”状态, 枪位为 1.5 m 左右。约 350 s, 炉渣出现返干迹象, 开始加第二批料。小批次料加料顺序为: 先加 400 ~ 500 kg 氧化铁皮球, 起到熔化渣料及降温作用, 为防止喷溅, 跟随加入 200 ~ 250 kg 造渣料。特点为: 氧化铁皮球加入量不宜过多, 否则产生喷溅, 保持炉渣活跃即可。加入的造渣料可打开气体通道, 使炉气顺利排除, 是保证过程不喷溅的又一措施。加入氧化铁皮球, FeO 含量升高, 炉渣活跃、变稀, 加入造渣料可快速溶解, 又可降低渣中 FeO 含量, 两者为互补。据现场实践经验, 50 ~ 100 s 炉渣再次偏干, 重复上述再次加料。共计 3 到 4 小批次料, 为第二批料, 占总造渣料的 15% ~ 20%。

改进后的冶炼模式为中期低枪位冶炼, 使炉渣呈“微返干”状态, 氧化铁皮球与造渣料相互配合冶炼, 以调整炉渣状态达到溶解更多石灰为目的, 很好地“绕过”中期喷溅。

冶炼进入中期, 炉渣碱度不断提升, FeO 含量不断降低, 液态渣中开始析出高熔点的  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$ , 进入二相区。虽然固态的  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  对脱磷作用微乎其微, 但相对于固态块状石灰, 这种固态的  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  是熔融于炉渣内的, 当炉渣 FeO 含量升高, 是可以瞬间熔化为液态的, 而固态块状石灰却做不到, 是为后期的“全液态”冶炼做准备。

将这种利用冶炼中期碳氧剧烈反应并产生大量烟气特点, 采用低枪位硬吹并调整以氧化铁皮球防止返干模式, 达到增加转炉熔池搅拌力度, 迫使钢液与熔渣更加充分发展为乳浊液状态, 以熔化造渣料为目的的冶炼技术定义为“洗渣”冶炼法<sup>[13]</sup>。目的是把更多未熔的石灰熔入炉渣内。

## 2.3 冶炼后期优化改进

### 2.3.1 冶炼后期特点及极限脱磷机理

转炉吹炼 600 s 至起枪为冶炼后期, 特点是随冶炼的进行, 钢液中的 [C] 不断降低, 碳氧反应减弱, 生成的炉气量变少, 产生的推动力降低, 不易发生

喷溅, 实践表明, 接近拉碳期, 炉渣可容纳 FeO 达 30% 以上; 后期温度升高, 对脱磷不利; 整体氧化性气氛增强, 对脱磷有利。由三相图<sup>[15]</sup>可知, 进入冶炼后期, 当渣中 FeO 含量达到 30% 以上时, 固态的  $2\text{CaO}\cdot\text{SiO}_2$  不断熔化, 炉渣由二相区进入液相区。至此, 炉渣达到最高碱度、最大液态渣量及高氧化性状态, 同时, 钢液 C 含量也降低至 0.30% ~ 0.40%, 进入拉碳期。为增加熔池搅拌强度, 进行“极限”性脱磷, 进行快速降枪操作, 脱磷反应见式(1)、式(2)和式(3)。

### 2.3.2 冶炼后期吹炼操作改进

传统低-高-低三段式冶炼后期模式如图 1 所示, 其特点为后期低枪位冶炼, 不再加入氧化铁皮球, 目的在于降低后期渣中 FeO 含量, 减少铁损, 提高终点温度。然而, 低枪位导致炉渣极易返干, 失去后期大渣量高碱度脱磷机会, 以及所谓的后期低枪位升温其实是快速脱碳进行升温, 其本质的热平衡并未改变。

改进后的操作如图 2 所示, 刚进入冶炼后期, 碳氧反应仍有一定力度, 提枪幅度不宜过大, 约 30 s 上提 0.1 m。750 s 时枪位达到最高枪位 2.1 m 左右, 加入氧化铁皮球 300 kg, 更进一步提高渣中 FeO 含量。氧化铁皮球一次性不可加入过多, 否则, 产生喷溅, 此时又属高枪位状态, 极难控制。观察炉口火焰, 30 ~ 40 s 后, 显现无力状态, 炉气产生的推动力进入低谷, 再次补加氧化铁皮球 400 kg, 使炉渣 FeO 含量达到 30% 以上。并随之加入造渣料 200 ~ 300 kg, 打开气体通道, 使炉渣不反扑炉口。后期加入的总料为第三批料, 其中造渣料占总造渣料的 5% 以内。进入拉碳期, 如图 2 所示, 进行快速降枪, 将氧枪降低至超低枪位 1.3 m, 以增加熔池搅拌力度, 进行最大限度脱磷。

改进后的冶炼模式为后期高枪位配合氧化铁皮球以实现高碱度高氧化性的“极限”性脱磷。

研究表明<sup>[1]</sup>, 转炉终渣中铁酸钙几乎不固溶磷, 间接证明  $3\text{FeO}\cdot\text{P}_2\text{O}_5$  属亚稳状态。渣中 FeO 在脱磷过程中只是起到“中转”作用。终渣 FeO 含量过高已失去意义, 并且会造成侵蚀炉衬、铁损大等问题。因此, 拉碳期的超低枪位既是为了脱磷, 又是起到降低渣中 FeO 含量的作用, 维持 FeO 含量到 15% ~ 20%<sup>[16]</sup>, 防止回磷即可。

将这种利用冶炼后期钢液碳含量降低、产生烟气体量少、不易喷溅的特点, 采取高枪位冶炼、辅助以

氧化铁皮球进行调整模式,达到随炉渣全铁含量升高,迫使炉渣由二相区转入液相区,并呈高碱度、高氧化性状态,随即降枪,增大转炉熔池搅拌力度,以进行最大限度脱磷为目的的冶炼技术定义为“全液态”冶炼法<sup>[12]</sup>。

### 3 冶炼优化效果分析

改进后的炉渣大致轨迹如图3所示,虚线为三元系1700℃等温线,因炉渣含其它杂质,降低了炉渣熔点,实际应为1600℃左右。粗实线为改进后炉渣大致走势,下枪后,[Si]首先被氧化,生成SiO<sub>2</sub>进入炉渣,炉渣由高碱度向中性甚至偏酸性转变。冶炼至100s,火焰稳定,加头批料的第一小批次料,其中的固体块状造渣料熔化慢,而加入的氧化铁皮球快速熔化,出现炉渣FeO含量迅速升高,碱度增加缓慢。随着冶炼的进行,在高FeO环境下,石灰溶解速度加快,碱度开始升高。同时,因枪位的降低及造渣料溶解进入炉渣,渣中FeO含量开始降低。相比于传统模式,渣料熔化速度更快,大约300s就已经进入液相+2CaO·SiO<sub>2</sub>二相区。进入中期,因碳氧反应剧烈,产生大量炉气,为防止渣中FeO含量过高导致喷溅,采用偏低枪位模式,使炉渣FeO含量进一步降低。大约600s进入后期,碳氧反应减弱,为使炉渣由二相区进入液相区,采取高枪位并追加氧化铁皮球措施,迫使炉渣FeO含量升高到30%以上。进入拉碳期,快速降枪,降低炉渣FeO含量15%~20%。

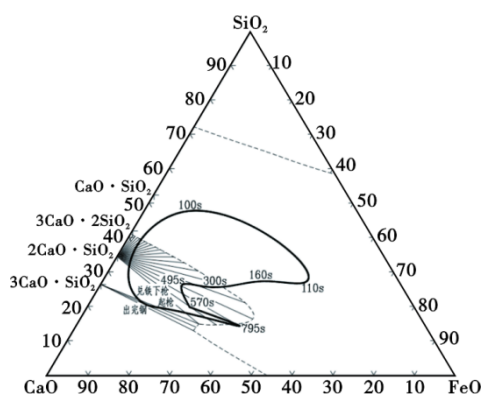


图3 炉渣成分随冶炼时间变化

Fig. 3 Slag ingredient changes with smelting time

改进前的传统模式脱磷主要在冶炼中期或中后期进行。而改进后模式是快速化渣,依靠冶炼前、后期脱磷。重轨钢要求终点C≥0.10%、P≤0.025%出钢。抽取U75V-T重轨钢改进前139炉和

改进后31炉终点碳与磷关系对比如图4所示。终点拉碳合格率由改进前的69.06%提高到93.55%。提高的原因在于:(1)传统冶炼模式因喷溅率高,导致因喷溅带来的温度损失明显,使得终点温度波动大,进入拉碳期,往往碳与温度不能同时命中,出现过吹现象。改进后模式因整个冶炼过程喷溅率明显降低,使得因喷溅带来的温度损失大幅减少,更接近于热平衡计算得出的参数,即:碳到温度到;(2)传统冶炼模式没有很好地利用前期低温、后期高碱度进行高效脱磷,导致终点磷高,而不得不进行后吹。改进后模式采用冶炼前期高氧势脱磷,后期全液态“极限”性深脱磷,将磷脱到理想范围。

一般认为随钢液终点[C]含量的增加,终点[O]降低,氧化性气氛减弱,导致终点[P]升高,即[C]与[P]呈正比关系。而改进前[C]与[P]呈反比关系,如图4(a)拟合曲线所示,这是一个反常现象。改进后如图4(b)拟合曲线[C]与[P]符合正比关系。

图4(a)中左上角[C]低[P]高,原因在于渣料没化透,脱磷不彻底。发现这种现象,一般采取提高中期枪位,增大石灰加入量,于是出现了右下角的[C]高[P]低现象。然而,因中期枪位过高,导致渣中FeO≥20%,过程喷溅严重,喷溅率在20%~30%,又不得不降低枪位。又因石灰消耗过高,不得不降低石灰加入量。如此反复,导致图4(a)中[C]与[P]呈反比关系。

改进后的模式遵循“下枪即化渣”理念,利用冶炼前期不易喷溅特点,采用高氧势脱磷。利用后期烟气量少的特点,采用全液态极限性脱磷。中期FeO控制在20%以下,达到冶炼稳定效果。总体冶炼平稳,喷溅率低于15%,减少了劳动量,降低了石灰消耗,终点[C]与[P]呈正比关系,提升了钢液质量。

重轨钢U75V-T终点炉渣成分见表6,熔炼号1~8为传统模式,9~11为改进后模式。注:后吹炉次因缺乏对比性,未取渣样。

熔炼号1、3、4,FeO含量17%左右(将T.Fe与FeO划为等号),考虑到冶炼终点化学反应未达到平衡,碳氧反应仍然继续,渣中FeO不断被钢液中[C]还原而降低,而所取渣样为出钢过程,推测终点这三个渣样对应炉次起枪那一刻渣中FeO含量≥20%。可见,传统冶炼模式为降低终点[P],冶炼中期、中后期枪位不得不偏高,导致中期、中后期渣中FeO含量过高,给冶炼过程带来不稳定,直到终点,炉渣FeO含量仍然居高不下。其后果是侵蚀炉衬、铁损

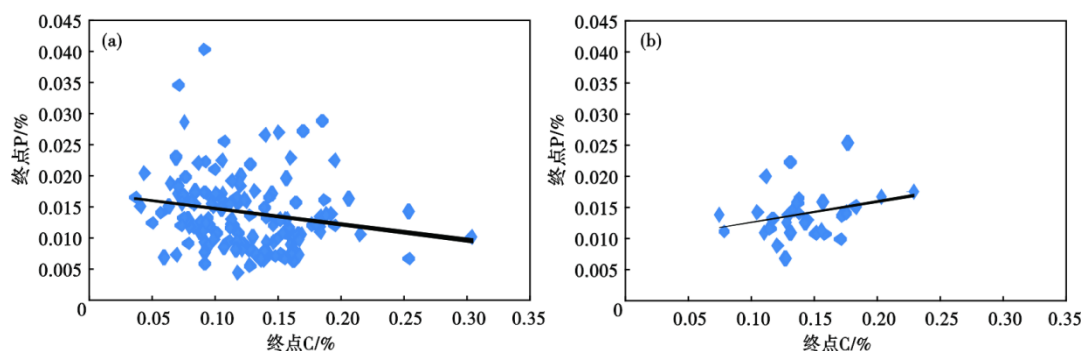


图4 改进前后终点碳与磷关系:(a)改进前,(b)改进后

Fig. 4 Relationship between carbon and phosphorus at the end point before and after improvement : (a) before improvement , (b) after improvement

表6 终点炉渣成分(质量分数)  
Table 6 Slag ingredient at end-point

| 熔炼号 | CaO      | SiO <sub>2</sub> | MgO     | T.Fe     | P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> | MnO     | R       | Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub> | S       |
|-----|----------|------------------|---------|----------|-------------------------------|---------|---------|--------------------------------|---------|
| 1   | 46.460 4 | 12.525 9         | 7.981 6 | 16.919 9 | 3.741 7                       | 2.319 7 | 3.709 1 | 1.402 8                        | 0.026 0 |
| 2   | 43.540 9 | 15.283 7         | 7.358 7 | 14.829 8 | 3.296 6                       | 2.324 8 | 2.848 8 | 1.574 2                        | 0.074 6 |
| 3   | 43.872 1 | 14.554 6         | 5.434 1 | 16.764 4 | 3.572 3                       | 2.734 0 | 3.014 3 | 1.740 5                        | 0.031 7 |
| 4   | 44.036 3 | 12.797 6         | 7.140 9 | 17.636 7 | 3.460 3                       | 2.648 9 | 3.441 0 | 1.477 8                        | 0.014 1 |
| 5   | 37.712 5 | 14.179 9         | 5.792 9 | 11.597 7 | 2.603 1                       | 2.676 9 | 2.659 6 | 1.816 2                        | 0.038 9 |
| 6   | 32.458 6 | 11.900 6         | 7.040 3 | 15.558 0 | 2.038 1                       | 2.649 9 | 2.727 5 | 2.717 9                        | 0.025 4 |
| 7   | 37.697 8 | 14.247 4         | 5.057 1 | 13.316 6 | 2.213 0                       | 2.786 6 | 2.645 9 | 1.374 4                        | 0.009 4 |
| 8   | 36.775 6 | 13.414 0         | 6.714 4 | 13.312 9 | 2.540 4                       | 3.226 1 | 2.741 6 | 1.760 6                        | 0.039 0 |
| 9   | 45.309 9 | 15.949 4         | 6.359 4 | 14.182 9 | 4.729 4                       | 2.709 7 | 2.840 9 | 1.473 5                        | 0.004 5 |
| 10  | 39.769 2 | 13.835 5         | 6.312 5 | 8.973 9  | 2.913 3                       | 2.619 6 | 2.874 4 | 1.372 0                        | 0.003 3 |
| 11  | 38.079 6 | 12.621 7         | 6.224 0 | 13.192 4 | 2.573 9                       | 2.878 6 | 3.017 0 | 1.373 1                        | 0.001 5 |

增大。测厚数据显示,传统模式每10炉钢,炉衬上涨并不明显,甚至降低100 mm,浇次间不得不补炉,在冶炼像重轨这样的高碳钢环境下,出现这种现象是不可取的。

熔炼号1、4,碱度 $R$ 在3.4~3.7。即,传统冶炼模式下,当发现终点[P]高时,而不得不补加石灰,造成渣料消耗过高,成本增加。

熔炼号9、11,FeO含量在13%~14%,推测终点渣中FeO含量应在15%~20%,属理想范围。熔炼号10,FeO含量为8.97%,偏低,其原因在于后期枪位偏低,虽然,对应炉次终点[C]、[P]满足重轨钢U75V-T要求,但为防止回磷,应适当提高后期枪位,增加渣中FeO含量。测厚数据显示,改进后模式每10炉钢,炉衬上涨约200 mm,很好地维护了炉衬,降低补炉料的消耗。

熔炼号9、10、11,碱度 $R$ 在2.8~3.0,属理想范围。因整体冶炼平稳,不需要刻意增加碱度来脱磷,降低了造渣料的消耗。

#### 4 结论

(1)改进后的冶炼技术强调前期高氧势式冶炼,中期洗渣,后期全液态冶炼。终点拉碳合格率由传统的69.06%提高到改进后的93.55%,对重轨钢等中、高碳高品质钢的内在质量有大幅提升。同时,降低了出钢过程脱氧剂的消耗,吨钢节省脱氧剂0.38 kg(折合为铝粒)。

(2)与传统冶炼模式相比,改进后的模式更加稳定,喷溅率由20%~30%降低到15%以下。降低铁损,提高终点命中率,保证冶炼顺利进行。

(3)传统冶炼模式,终点[C]与[P]呈反比关系,是冶炼不稳定的印证。改进后的冶炼模式终点[C]与[P]呈正比关系,印证改进后的冶炼模式是稳定的,有效地维护了炉衬。

(4)传统冶炼模式个别炉次碱度偏高,造成石灰消耗高。而改进后碱度在2.8~3.0左右,满足重轨钢冶炼要求,降低了造渣料的消耗,吨钢节省石灰3.96 kg。

参考文献

[1] 李长荣,尹青,谢祥,等. 80 t 复吹转炉冶炼硬线钢快速成渣工艺的实践[J]. 钢铁研究,2012,40(1):42-45.

[2] 郭发军,徐志成,陆巧彤,等. 青钢 80 t 转炉脱磷影响因素分析及实践[J]. 山东冶金,2009,31(4):34-37.

[3] 孙凤梅,崔绍刚,马建超,等. 提高转炉出钢碳含量的生产实践研究[J]. 上海金属,2014,36(2):40-43.

[4] 姚志超,吕成洵. 高拉碳法冶炼 82B 系列钢的生产实践[J]. 炼钢,2010,26(3):34-46.

[5] 高琦,智建国,吴伟,等. 100 t 转炉留渣双渣法冶炼高硅高磷铁水试验[J]. 特殊钢,2020,41(6):41-45.

[6] 翟勇强,王建伟,张毅,等. 100 t 转炉用含钛铁水冶炼高碳钢的留渣+单渣操作实践[J]. 特殊钢,2020,41(5):29-33.

[7] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 3 版. 北京:冶金工业出版社,2002.

[8] 张福东,姜海滨,武波,等. 转炉高锰铁水冶炼优化[J]. 河北冶金,2022,(2):37-40.

[9] 王三忠,李文山,吕亚. 转炉炼钢喷溅的控制及预防措施[J]. 河南冶金,2009,17(4):32-34.

[10] 刘曙光,杨晓江,张大勇,等. 转炉炼钢喷溅原因及预防措施[J]. 河北冶金,2012,(9):56-59.

[11] 黄志勇,颜根发,左都伟,等. 转炉炉渣喷溅的机理及预防措施[J]. 金属材料与冶金工程,2008,36(3):12-15.

[12] 叶健松,郑卫民,金进文,等. 转炉前期炉渣喷溅的原因及对策[J]. 安徽工业大学学报(自然科学版),2009,26(3):208-211+216.

[13] 张福东,武波,姜海滨,等. 一种转炉冶炼高碳低磷钢的炼钢方法:CN114150100B[P]. 2023-02-03.

[14] 陈家祥. 钢铁冶金学[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:143.

[15] 曲英. 炼钢学原理[M]. 2 版. 北京:冶金工业出版社,1994:129.

[16] 陈均,李盛,周明佳,等. 120 t 转炉半钢炼钢去磷保碳工艺的生产试验[J]. 特殊钢,2020,41(6):32-35.

关于认准《特殊钢》网址、防范假冒网站的声明

《特殊钢》期刊由中信泰富特钢集团股份有限公司主管、大冶特殊钢有限公司主办,由《特殊钢》编辑部负责运营,是全国特殊钢行业知名的综合性科技刊物(双月刊);《特殊钢》期刊于 1980 年创刊发行,国际标准刊号为 ISSN1003-8620,国内统一刊号为 CN42-1243/TF。《特殊钢》期刊的宗旨:“构建特钢共享平台,引领行业创新发展。”

编辑部发现网络上存在大量假冒《特殊钢》期刊的网页,为维护我刊良好声誉和广大作者、读者的利益,本编辑部郑重声明如下:

- (一) www.specialsteeljournal.com 为《特殊钢》期刊的唯一网址,备案号为鄂 ICP 备 2022000839 号,请广大作者、读者使用本网址进行投稿、订阅、论文免费下载等操作。
- (二) 除维普、万方、知网、超星为本社授权合作网站,具有数字化复制权、发行权、汇编权、翻译权、信息网络传播权、版式设计专有权,其余网站皆未经本编辑部授权,无权从事相关内容的刊登、收费阅读,承揽稿件,承接广告等行为,请广大作者、读者提高警惕,注意甄别,谨防受骗,由此造成的一切损失和后果,本编辑部不承担任何经济和法律责任;同时也鼓励向本编辑部进行举报相关侵权线索。
- (三) 未经授权网站请于 2024 年 1 月 31 日前自行将与《特殊钢》期刊相关的内容撤除,逾期仍存在涉嫌侵害著作权、名誉权的单位或个人,本编辑部保留进一步发函、举报、诉讼等法律手段进行维权,必要时上报公安机关依法追究刑事责任。

《特殊钢》编辑部