

水钢 100 t 转炉单渣法脱磷工艺冶炼优质钢的生产实践

李正嵩¹ 张毅² 谢祥² 王琳松³ 郑家良¹ 高长益¹

(水城钢铁集团公司 1 技术中心; 2 炼钢厂, 六盘水 553028; 3 水城钢铁集团公司, 六盘水 553028)

摘要 由于水钢铁水[P]高达0.104%~0.157%, 100 t 顶底复吹转炉在冶炼 30[#]~80[#]、SWRH82B、ER70S-6、SWRCH22A、40Cr 等优质钢时, 采用双渣操作降低钢中磷含量, 钢铁料消耗为1 054 kg/t, 石灰消耗为 32.4 kg/t。通过单渣法热平衡, 提高初期渣脱磷能力, 中、后期造渣制度、供氧制度和炉容比优化的分析, 建立了优质钢单渣法深脱磷工艺。应用结果表明, 优质钢的钢铁料消耗降低到1 047 kg/t, 石灰消耗降低到 29.4 kg/t, 出钢[C] = 0.14%~0.28%, 出钢[P] = 0.014%~0.020%。

关键词 100 t 转炉 单渣法 双渣法 脱磷 优质钢 钢铁料消耗

Production Practice of Steelmaking High Quality Steel by 100 t BOF Single-Slag Dephosphorization Process at Shuisteel

Li Zhengsong¹, Zhang Yi², Xie Xiang², Wang Linsong³, Zheng Jialiang¹ and Gao Changyi¹
(1 Technology Center, 2 Steelmaking Plant, Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028;
3 Shuicheng Iron and Steel Group Corp, Liupanshui 553028)

Abstract Since the phosphorus content in hot metal at Shuisteel is up to 0.104%~0.157%, the 30[#]~80[#], SWRH82B, ER70S-6, SWRCH22A and 40Cr etc high quality steels are melted by 100 t top and bottom combined blown converter using double-slag operation to reduce the phosphorous content in liquid, in this case the metal consumption is 1 054 kg/t and the lime consumption is 32.4 kg/t. Based on the analysis of thermal equilibrium of single-slag process, increasing early slag dephosphorizing ability, optimization of slagging schedule in middle and latter period and oxygen supply schedule, and optimization of furnace capacity ratio, the single-slag deep dephosphorization process for high quality steels is established. The application results show that metal consumption for melting high quality steels decreases to 1 047 kg/t, the lime consumption decreases to 29.4 kg/t, the tapping [C] = 0.14%~0.28% and the tapping [P] = 0.014%~0.020%.

Material Index 100 t Converter, Single-Slag Process, Double-Slag Process, Dephosphorization, High Quality Steels, Metal Consumption

水钢炼钢厂 100 t 顶底复吹转炉是 2005 年建成投产的, 到 2015 年, 水钢 100 t 顶底复吹转炉的钢铁料消耗已降到 1 045 kg/t。然而, 在进一步降低钢铁料消耗的攻关过程中, 发现普通钢(如 HRB400 等)的钢铁消耗是 1 044 kg/t, 石灰消耗是 28.2 kg/t, 优质钢(如 3[#]~80[#] 钢、SWRH82B、ER70S-6、SWRCH22A、40Cr、65Mn、PSB830、30MnSi、30Si 等)的钢铁料消耗是 1 054 kg/t, 石灰消耗是 32.4 kg/t, 优质钢的钢铁料消耗比普通钢的钢铁料消耗高出 10 kg/t, 石灰消耗也高出 4.2 kg/t。

调查和分析得出: (1) 水钢铁水[P] > 0.120% 的频率较高, 且铁水[C]、[Si]、[P]、[Ti] 及温度的波动比较大, 在冶炼优质钢时, 为了降低钢中磷含量, 都采用双渣法操作, 前期倒初期渣时, 渣中金属铁珠含量平均为 42.48%, 而终点炉渣中的金属铁珠含量平均为 19.05%; (2) 100 t 转炉前期渣量按 6 t 计算, 起渣后, 倒渣一半(约 3 t) 根据初期渣和终

点渣中的金属铁珠含量进行计算, 则每炉钢由于倒初期渣带走的金属量为 $3\ 000 \times (42.48\% - 19.05\%) = 702.9$ kg, 冶炼优质钢时, 平均每炉出钢量为 86.5 t, 则造成钢铁料消耗增加量为 $702.9 \div 86.5 = 8.13$ kg/t; (3) 先后对双渣法冶炼优质钢的前期造渣工艺进行多次调整和改进, 由于存在前期温低的先天性不足, 双渣调整工作收效甚微, 双渣中金属铁珠含量仍然居高不下, 因此, 转炉冶炼优质钢的单渣法深脱磷工艺的研究和应用就势在必行。

1 原双渣冶炼优质钢工艺

1.1 双渣操作方案

1.1.1 装入制度及热平衡

总装入量 95 ± 0.5 t/炉, 铁水基础装入量为 88 t、废钢 8 t, 热量不足则增加铁水, 热量富余则在冶炼过程中用矿石降温。

1.1.2 供氧及造渣操作

操作工艺图见图 1。

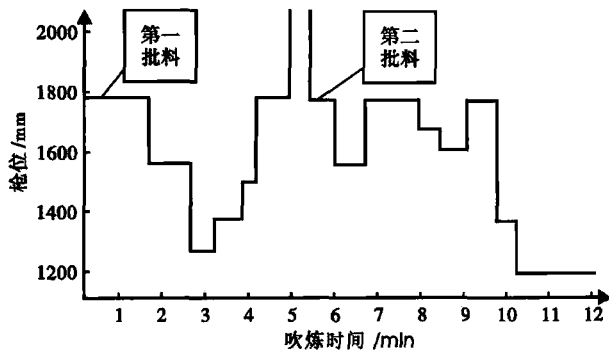


图 1 原双渣冶炼优质钢的操作曲线图

Fig. 1 Diagram of operation curves for melting high quality steels by original double-slag process

(1) 冶炼前期。①按要求加入第一批渣料；②在 1.8 m 开吹枪位加料，加完料后，炉渣基本熔化，压枪到 1.6 m，炉渣化透，再压一次枪到 1.3 m，目的是升温，加强搅拌，最大限度的去磷；③起渣后，阶梯式让枪，减缓反应速度，尽量使炉渣泡沫化，至 4.5 ~ 5.5 min 倒渣，倒掉炉内总渣量的一半以上，若喷溅控制不住，则可以调低氧压，保证第一次倒渣时间。

(2) 冶炼中期。①倒炉后，倒掉一半初期渣，测温，控制熔池温度 1 320 ~ 1 400 °C。②倒初期渣时，将氧气压力设定值打到“手动”，并将开度调到 10%。倒初期渣后，下枪至 2.2 m 点火，来氧后，将氧气压力打到“半自动”，氧气压力设定值逐步调至 1.5 MPa，氧气流量恢复到 18 000 m³/h，缓慢将氧枪降至 2.0 m 后，第二批石灰与 400 kg 污泥球一起加入，化渣后，第二批白云石与 150 kg 萤石一起加入，加完后再立即补 200 ~ 400 kg 污泥球，防止发生返干造成粘枪，炉渣化后，再将枪位降到 1.8 m，然后按正常化渣操作。③中期若发现温度高，则只能用污泥球降温。④中后期原则不调氧压，正常氧压下的氧气流量为 18 500 m³/h，氧压低于 1.2 MPa 时，流量可调至 19 500 m³/h 进行吹炼。⑤化渣后，适当压枪，找好平衡枪位，让生成的 FeO 和 CO 反应，以消耗 FeO，达到平衡。⑥终点压枪枪位 1.25 ~ 1.30 m。

(3) 冶炼后期。①吹炼 9 min 时，必须提烟罩，看火焰，判断温度。若温度高，可提高枪位，加矿石降温。②压枪前，必须把枪位吊到最高，让炉渣最大限度熔化，以炉口飘浮大块片状炉渣为佳。③结合上一炉的冶炼时间，分 2 ~ 3 次把枪位压到 1.2 m 的基本枪位，压枪时间必须大于 40 s。④补吹时，枪不能一下就压到基本枪位，应从 1.8 m → 1.6 m → 1.3 m 逐步降枪，可以不压到基本枪位，

防止粘枪和避免炉渣过稠。

1.2 双渣工艺使用情况

双渣操作前期开吹时的炉温一般在 1 300 °C 左右，在吹炼的最初 3 min 内，大量的废钢、石灰、白云石等正处于熔化期，熔池升温缓慢，一部分前期渣料堆积在熔池边缘，此阶段会有大量的金属铁珠溅入堆积的炉渣中并受到炉渣的冷却作用，在炉渣中凝固下来，在吹炼到 4 ~ 5 min 时，熔池温度达到 1 400 ~ 1 500 °C，炉渣开始进一步熔化，但此时的炉温仍然较低，炉渣还处于半熔化状态，渣中的大量金属铁珠还没有沉降分离，但是此时却进入了倒初期渣时期（如推迟倒初期渣时机，则后面第二次造渣的时间不足），大量的金属铁珠及氧化铁混夹在半熔化状态的炉渣中被倒掉的初期渣带走。从表 1 看出，初期渣中的金属铁珠平均含量是 42.48%，比终点渣中金属铁珠的平均含量 19.05% 高出 23.43%，是造成双渣操作钢铁料消耗高的主要原因。

2 优质钢单渣法深脱磷工艺的建立

2.1 优化装入制度建立单渣法热平衡模式

试验过程发现热量不稳、冷却剂用量有时多有时少、终点钢水成分和温度波动较大，其原因是铁水成分和温度波动较大、废钢搭配比较混乱，随意性强，采取了以下措施。

2.1.1 规范金属炉料的准备工作

对铁水、废钢的准备、来源及用量作了如下规定：(1) 从炼铁厂来的大罐铁水必须先倒入混铁炉进行成分、温度的混匀，再将混铁炉中的铁水倒入转炉兑铁罐，然后将铁水兑入转炉；(2) 每当大罐铁水倒入混铁炉后，混铁炉工人必须及时测温并取样分析，之后将铁水温度和铁水成分分析结果报告炉前工人；(3) 铁水必须称量准确方可进入转炉；(4) 废钢必须按要求进行搭配，实际重量在目标重量 ±0.5 t 以内，称量要准确。

2.1.2 炉料配比的优化

建立了炉料配比的线性规划模型，提出转炉炼钢各种金属炉料的最佳配比，对铁水、生铁块、废钢、

表 1 双渣法冶炼优质钢的初渣和终渣成分以及碱度, 100 炉
Table 1 Ingredient and basicity of early slag and end slag for melting high quality steels by double-slag process, 100 heats

| 项目 | 渣成分 / % | | | | | | | 碱度 (R) |
|----|---------|--------|--------|---------|------------------|--------|-------------------------------|--------|
| | 铁珠 | FeO | TFe | CaO | SiO ₂ | MgO | P ₂ O ₅ | |
| 初渣 | 21.66 ~ | 7.81 ~ | 8.81 ~ | 37.25 ~ | 16.40 ~ | 6.58 ~ | 2.51 ~ | 1.88 ~ |
| | 56.85 | 9.80 | 10.80 | 42.26 | 21.52 | 10.03 | 2.99 | 2.57 |
| 终渣 | 14.80 ~ | 5.60 ~ | 7.53 ~ | 47.10 ~ | 7.61 ~ | 7.30 ~ | 2.33 ~ | 4.69 ~ |
| | 22.47 | 11.60 | 12.65 | 50.20 | 10.05 | 9.10 | 2.97 | 6.19 |

渣钢的搭配进行优化,在保证转炉热平衡的同时,最大限度地降低钢铁料消耗。

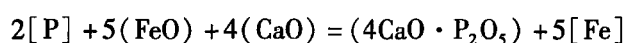
2.1.3 建立热平衡参考模式

通过热平衡计算和现场跟踪验证,制定了热平衡加料参考表(表2)和100 t转炉温度控制及调整参考数据表(表3)。将表2和表3制成软件安装在计算机中,计算机对每炉钢的原料数据进行采集和计算,并输出计算结果,供操作工参考。

2.2 提高初期渣的脱磷能力

2.2.1 熔池去磷反应

脱磷反应是在钢-渣界面进行的,转炉熔池内的去磷反应^[1]如下:



根据萨马林的数据^[2],

$$\lg K = \lg \frac{a_{4CaO \cdot P_2O_5}}{[P]^2 \cdot a_{FeO}^5 \cdot a_{CaO}^4} = \frac{40\,067}{T} - 15.06 \quad (1)$$

式中: $a_{4CaO \cdot P_2O_5}$ -渣中复合氧化物 $4CaO \cdot P_2O_5$ 的活度; a_{FeO} -渣中FeO的活度; a_{CaO} -渣中CaO的活度; $[P]$ -钢水中的磷含量; K -平衡常数; T -熔池温度。

$$\text{磷在炉渣-金属的分配比 } L_p = \frac{(P_2O_5)}{[P]} \quad (2)$$

式中: (P_2O_5) -渣中的 P_2O_5 浓度; $[P]$ -钢水中的磷含量。

从式(1)和(2)可见,在碱性炼钢炉中,炉渣的脱磷能力与渣中的氧化钙浓度(CaO)、氧化铁浓度(FeO)、温度等因素有关,改变这些因素,就能改变磷的分配比。

2.2.2 影响脱磷的因素分析

(1)(CaO)。增加(CaO)达到饱和含量,能增大其活度 a_{CaO} ,亦即增加自由CaO(不与酸性氧化物结合)的浓度,会使渣中 (P_2O_5) 提高和钢中 $[P]$ 降低。但渣中(CaO)过高,将使炉渣变稠,同样不利于脱磷^[3]。当炉渣碱度达到一定程度后,炉渣的脱磷能力随(FeO)增加而增大,随碱度的增加变化不大。

(CaO)的来源是活性石灰,活性石灰在转炉渣中的溶解速度受到炉渣的碱度、(FeO)、(MgO)以及炉渣温度的影响。在1400℃,碱度为2.5的炉渣中,(MgO)对石灰溶解速度影响不大;炉渣碱度增加,石灰溶解速度变慢;(FeO)和温度是影响石灰熔化速度的主要因素,保持熔池温度在1400℃以上且最大限度地提高渣中(FeO),是加速活性石灰溶解的关键。吹炼的前3 min熔池温度低,此阶段升温化渣是主要任务,适当降低转炉底吹氩气流量,有助于熔池表面升温和(FeO)的聚集,从而加速活性石灰的熔化。

(2)(FeO)。(FeO)对石灰的熔化速度具有决定性的影响,它是石灰熔化的基本熔剂^[4]。前期熔池

表2 100 t转炉热平衡操作参考表

Table 2 Referential data of thermal equilibrium operation for 100 t converter

| 装入→终点目标 | | | | | | | | | | 热平衡计算结果 | | | | | |
|---------|---------|-------|--------|--------|----|----|----|-----------|-----------|---------|------|--------|---------|-------|------|
| 铁水 | | | 冷金属/t | | | 终渣 | | 第一次倒炉温度/℃ | 全程渣料用量/kg | | | 总装入量/t | 理论出钢量/t | | |
| 铁水量/t | 铁水温 度/℃ | [C]/% | [Si]/% | [Ti]/% | 生铁 | 废钢 | 渣钢 | | (MgO)/% | 碱度 | 石灰 | | | 轻烧白云石 | 污泥球 |
| 88 | 1320 | 5 | 0.35 | 0.2 | 3 | 2 | 2 | 9 | 4.0 | 1590 | 2500 | 2000 | 2500 | 95 | 86.5 |

表3 100 t转炉温度控制及调整参考数据表

Table 3 Referential data of control and adjustment of temperature for 100 t converter

| 因素 | 变动量 | 影响终点温度/℃ | 污泥球调整量/kg |
|--------|---------|----------|-----------|
| 铁水温度 | ±10℃ | 6 | 150 |
| 铁水[C] | ±0.10% | 9.7 | 240 |
| 铁水[Si] | ±0.10% | 15 | 400 |
| 铁水[Mn] | ±0.10% | 6 | 150 |
| 生铁块加入量 | ±1 t | -7 | 200 |
| 废钢加入量 | ±1 t | -17 | 400 |
| 铁水加入量 | ±1 t | +7 | 160 |
| 石灰加入量 | ±1 t | 18 | 450 |
| 白云石加入量 | ±1 t | 27 | 700 |
| 矿石 | ±1 t | 60 | - |
| 污泥球 | ±1 t | 40 | - |
| 硅铁加入量 | ±100 kg | +11 | - |
| 焦丁加入量 | ±100 kg | +8 | - |

温度低,铁水中的硅优先氧化,形成含有大量(SiO₂)的酸性炉渣,容易在石灰表面形成高熔点的硅酸二钙壳层,阻止了石灰的进一步熔化,从而降低了前期石灰的有效利用率,(FeO)与(CaF₂)对石灰表面的硅酸二钙壳层有较好的助熔作用。但是(FeO)对脱磷反应的影响比较复杂,当(FeO)很低时,石灰不能很好熔化,显然不能脱磷。当(FeO)过高,将使CaO活度显著降低,稀释(CaO)的脱磷作用甚至产生严重喷溅。吹炼前期要保持渣中适当高的(FeO),使石灰迅速熔化。吹炼中期渣中(FeO)通常不低于8%~9%,以避免炉渣“返干”。炉渣中的(FeO)和(CaO)/(FeO)存在一个最佳值:(FeO) = 14% ~

25% , $(\text{CaO})/(\text{FeO}) = 2.5 \sim 3.0$ 。

(3) (CaF_2) 。在前期不加任何熔剂情况下, 造出碱度 $R \geq 1.8$ 的初期渣几乎是不可能的, 实践表明, 加少量萤石, 使 $(\text{CaF}_2) \leq 4\%$, 不仅不会加剧炉衬的侵蚀作用, 而且会显著提高炉渣的脱磷能力。

(4) 熔池温度。从热力学角度看, 低温对脱磷有利, 提高熔池温度, 会使磷的分配比降低, 对磷从金属向炉渣的转移不利。但是, 从动力学角度看, 温度升高降低了炉渣的粘度, 加速了石灰的熔解, 从而有利于磷从金属向炉渣的转移。

(5) 熔池搅拌速度。钢液中磷的扩散和渣中 (P_2O_5) 的扩散是脱磷的限制环节, 必须在前期加强熔池搅拌, 并确保渣流动性好, 促进钢-渣间的平衡, 同时保证有一定的有效脱磷时间。前期熔池表面温度低, 加入的石灰、白云石不易熔化, 前期适当调低转炉底吹供气流量, 一方面使熔池表面温度能够快速升高, 从而促进渣料及早熔化, 另一方面可以减缓碳的传质, 可生成更多的 (FeO) 来促进石灰、白云石的快速熔化, 但在吹炼到 4 min 左右起渣后, 为了加速磷的传质和脱除, 可恢复转炉底吹氩气到正常流量。

2.2.3 创造最佳脱磷条件

最佳脱磷温度范围是 $1400 \sim 1500\text{ }^\circ\text{C}$ ^[5]。水钢铁水温度在 $1280 \sim 1330\text{ }^\circ\text{C}$, 冶炼优质钢时, 废钢比小, 前期熔池温度上升较快, 在 3 min 以后就进入 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 以上的最佳脱磷温度区域, 此时碳氧反应加剧, 渣中 (FeO) 被快速消耗, 为了创造熔池温度在 $1400 \sim 1500\text{ }^\circ\text{C}$ 以及渣中 (FeO) 在 $14\% \sim 25\%$ 的最佳脱磷条件, 在熔池温度达到 $1400\text{ }^\circ\text{C}$ 以后, 以每隔 20 s 加入 200 kg 的加料速度加入含 (FeO) 的冷却剂, 为了控制喷溅和延长前期炉渣 (FeO) 高、炉温低的最佳脱磷时间, 此时可调低氧气流量和增加转炉底吹氩气量^[6]。在最初的 Si 氧化期, 应提高枪位, 同时降低供氧流量, 延长冶炼在低温区 (即 $1500\text{ }^\circ\text{C}$ 以下) 的持续时间。为避免熔池快速升温, 铁皮、矿石、萤石要分批错开加入, 这样既保证炉渣活跃, 又避免炉渣返干、回磷。

2.2.4 成渣过程的探讨

转炉在开吹的头几分钟内熔池温度比较低 (约 $1400\text{ }^\circ\text{C}$), 加入的第一批渣料中, 石灰仅刚刚开始溶解, 硅、锰等元素优先氧化, 生成 FeO 、 SiO_2 和 MnO , 形成了高氧化性的酸性初渣区^[7-8]。吹炼中期主要是脱碳, 此时炉渣的氧化性有所下降。而吹炼后期为了脱磷、脱硫和保持炉渣的流动性, 通常终渣

碱度为 $3 \sim 5$, 渣中 FeO 含量为 $15\% \sim 25\%$ 。综合分析, 水钢采用了中高氧化铁成渣途径。

2.3 中、后期造渣制度的优化

在 $1600\text{ }^\circ\text{C}$ 时, 炉渣中的 (FeO) 在 15% 左右、碱度在 4.5 左右时, 炉渣的脱磷能力最强^[9]。

渣中 MnO 的含量控制在 $3\% \sim 5\%$ 、 Al_2O_3 控制在 $< 3\%$ 的范围时, 炉渣的脱磷能力最强^[9], 通过调整化渣剂中化学成分 MnO 与 Al_2O_3 的配比, 使终渣成分达到最佳值。

2.4 供氧制度的优化

2.4.1 氧枪喷头的改进

为了改善转炉的造渣脱磷效果, 对氧枪喷头进行了改进。

(1) 原氧枪性能。水钢 100 t 转炉原氧枪喉口偏小, 最大冲击深度偏大, 反应区表面积偏小, 化渣效果不理想。实际生产最大氧流量为 $18500\text{ m}^3/\text{h}$ 、氧气压力 P_0 为 0.83 MPa , 每小时实际供氧量比设计流量低 509 m^3 , 原氧枪喷头参数见表 4。运用数值模拟技术对原氧枪的各项参数和实际喷吹性能进行了仿真模拟得出 (图 2), 原氧枪在氧压为 0.80 MPa 条件下, 各喷管出口处速度很大, 达到 450 m/s , 且持续到 0.21 m 左右, 此后虽然速度迅速发生衰减, 但气流宽度逐渐变大, 在 1.0 m 时速度为 188 m/s , 在 1.5 m 时速度为 131 m/s , 而根据现场提供的冶炼基本枪位为 1.4 m , 最大射流宽度 0.42 m (即射流速度为 50 m/s 时, 气流最外侧距中心轴距离为 0.42 m), 说明原氧枪的熔池反应区面积偏小, 不利于脱碳脱磷反应的进行, 造成氧气利用率较低, 冶炼周期长。

(2) 新氧枪性能。为了改善氧枪的化渣效果, 在对氧枪喷头进行了严格的计算和数值模拟研究的基础上, 对氧枪喷头进行了改进, 新氧枪喷头参数见表 5。从图 3 中可以看出, 新设计的氧枪在氧压为 0.80 MPa 条件下, 各喷管出口处速度达到 450 m/s ,

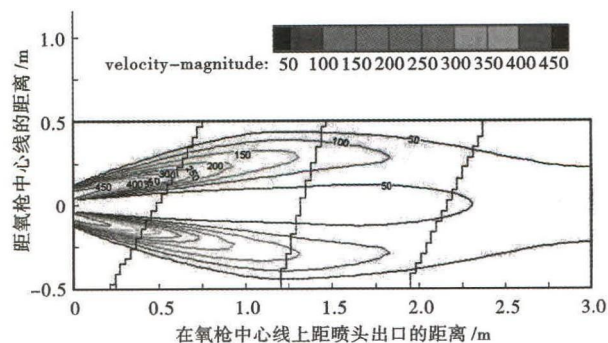


图 2 原氧枪射流的速度模拟图

Fig. 2 Simulated diagram of jet speed of original oxygen lance

表4 原氧枪喷头参数

Table 4 Parameters of original oxygen lance nozzle

| P_0 / MPa | 喉口直径/ mm | 出口直径/ mm | 喷孔 夹角/ $^\circ$ | 设计流量/ ($\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$) |
|----------------|-------------|-------------|--------------------|---|
| 0.80 | 36 | 46.53 | 12.6 | 19 009 |

表5 新氧枪喷头参数

Table 5 Parameters of new oxygen lance nozzle

| 项目 | 参数 |
|---|----------|
| 马赫数 | 2.0 |
| 喷孔夹角/ $^\circ$ | 13 |
| 设计氧压/MPa | 0.8 |
| 孔数 | 4 |
| 理论枪位/m | 1.447 |
| 喉口直径/mm | 36.8 |
| 出口直径/mm | 47.8 |
| 氧枪内管/(mm × mm) | 159 × 6 |
| 氧枪外管/(mm × mm) | 245 × 10 |
| 氧枪中管/(mm × mm) | 203 × 6 |
| 进水速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 4.93 |
| 出水速度/($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$) | 5.86 |

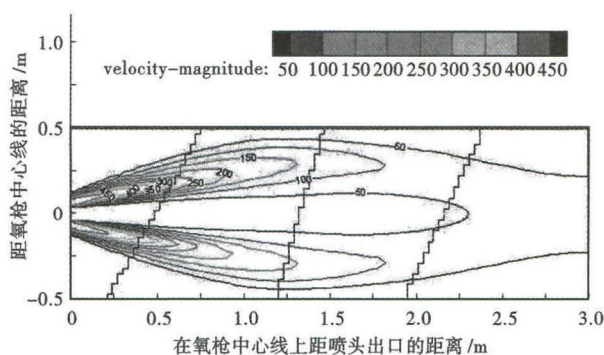


图3 新氧枪射流的速度模拟图

Fig. 3 Simulated diagram of jet speed of new oxygen lance

且持续到0.22 m左右,此后速度发生衰减,衰减速度大于原氧枪喷头,但衰减幅度小于原氧枪喷头。在1.0 m时速度约为186 m/s,在1.5 m时速度约为130 m/s,最大射流宽度0.44 m。新设计喷头提高了供氧能力,增大了反应区面积,可以提高氧气利用率,氧枪从各喷嘴喷出的射流速度都很大,彼此喷管射流并无汇合交织,减小了射流干扰现象,避免死区产生,更有利于炉渣的快速熔化和磷的脱除。改进后的新氧枪适当增大了喷孔夹角,投入使用之后,化渣去磷效果明显好转。

2.4.2 氧枪枪位及氧气流量的优化

在顶底复吹转炉炼钢中,枪位的高低对冲击深度、冲击面积、元素的氧化速度、化渣速度、炉渣氧化性等都有直接的影响^[10]。

新氧枪基准枪位 $H_{基}$ 的确定:水钢100 t转炉设计熔池直径 $D_{熔} = 4\ 450$ mm,氧气流股与钢液面的冲

击面直径 $d_{冲} = D_{熔} \div 9 = 4\ 450 \div 9 = 494.4$ mm,新氧枪喷孔出口直径 $d_{出} = 47.8$ mm,拉瓦尔型喷孔扩张角为 9° ,则新氧枪基准枪位 $H_{基}$ 为:

$$H_{基} = \frac{d_{冲} - d_{出}}{2 \tan \alpha} = 1\ 410.6 \text{ mm}$$

水钢新氧枪设计工作氧压 $P_0 = 0.80$ MPa,喉口直径 $d_{喉} = 36.8$ mm,当枪位处于1 410.6 mm的基本枪位时,根据弗林公式^[11-12],新氧枪冲击深度 $H_{冲}$ 为:

$$H_{冲} = \frac{346.7 \times P_0 \times d_{喉}}{\sqrt{H_{基}}} + 38.1 = 902 \text{ mm}$$

水钢100 t转炉设计的熔池深度 $H_{深}$ 为1 165 mm,冲击深度与熔池深度之比为 $H_{冲}/H_{深} = 77.42\%$;当枪位处于1 200 ~ 1 410 mm时,搅拌强烈,为脱碳枪位;当枪位处于1 410 ~ 2 000 mm时,冲击面积较大,为脱磷枪位。

新氧枪喷孔夹角为 13° ,冲击面积比原氧枪大,化渣效果比较好,吹炼过程枪位应比原氧枪低50 ~ 100 mm;吹炼到3.5 min左右起渣后,将氧气流量下调至 $16\ 000 \text{ m}^3/\text{h}$ 左右,延长低温高氧化铁的最佳脱磷时间,同时每隔20 s左右加入100 ~ 200 kg的污泥球或矿石,以补充快速消耗的(FeO)和防止熔池升温过快而提早进入高温脱碳区。

2.5 炉型控制

通过对水钢100 t转炉的最佳炉型的研究和探索,找到适合水钢的转炉炉型参数:

(1)通过水模实验确定各炉型参数下的喷溅情况,得到最佳炉型参数为:液面8 000 ~ 8 300 mm,最佳8 150 mm,炉底中心厚度为700 mm,炉底两端高于中间200 ~ 400 mm,最佳300 mm。

(2)建立炉型控制预警机制:金属液面8 000 ~ 8 050 mm,8 250 ~ 8 300 mm为液面预警线;当金属液面在①8 000 ~ 8 050 mm时,要求垫炉底时,用料为1.5 t。将补炉料倒入炉内,前后摇动2次后(摇动倾角 $+90^\circ \sim -90^\circ$),再将炉子竖立。将氧气控制转为手动,阀门调为10%,使用调试状态将氧枪降至1 000 mm,手动开氧30 s,停氧隔2 min再次手动开氧30 s,将氧枪提出到等待位。烧结5 min之后,再将炉子缓慢向炉前方向摇至 45° (避开烟道漏水位置)。将氧管折弯插入炉内富氧烧结,烧结时间为30 min;② $< 8\ 000$ mm时,必须安排在铸机停浇时垫炉底,用料为2 t,前后摇动2次(摇动倾角 $+90^\circ \sim -90^\circ$),再将炉子竖立,把氧枪放在1.8 m

处,用氮气冲 10 s,适当将补炉料往边上冲,护好炉底接缝,其余步骤按第②执行,烧结时间为 40 min;
 ③8 250 ~ 8 300 mm 时,立即调整溅渣频率和炉渣结构,溅渣频率为 70%,渣中 MgO 按 7% ~ 9% 控制;
 ④ > 8 300 mm 时,立即调整溅渣频率和炉渣结构,溅渣频率为 50%,渣中 MgO 按 6% ~ 8% 控制,如冶炼操作 1 个班(8 h)后,液面呈下降趋势,则继续执行,直至液面合格,若液面未下降甚至上涨,必须与生产管理室协调,安排时间用氧气吹扫炉底,吹扫炉底时氧气流量调整为 12 000 m³/h,枪位为最低枪位,氧枪下至最低枪位时再手动开氧,每次吹扫时间 ≤ 30 s。

(3) 确定转炉最佳炉型后,转炉的炉容比达到最优,炉内搅拌条件由桶状搅拌转化为球状搅拌,较好改善了冶金反应的动力学条件,使炉内反应向炼钢有利方向有序地进行,为转炉降低喷溅,提高终点命中率,降低金属消耗等创造了良好条件。

3 优质钢单渣法深脱磷工艺的应用

3.1 单渣操作方案

(1) 适用范围: 100 t 转炉冶炼 30[#] ~ 80[#]、SWRH82B、ER70S-6、SWRCH22A、40Cr、65Mn、PSB830、30MnSi、30Si。

(2) 铁水成分: [Si] ≤ 0.6%、[Mn] ≤ 0.6%、[P] ≤ 0.170%、[S] ≤ 0.060%。

(3) 装入制度: 总装入量(95 ± 0.5)t, 铁水装入量参考表 6。铁水装入量可根据热量作适当调整(保证污泥球用量 1 ~ 3 t), 其余用废钢补齐。

(4) 转炉底吹氩气流量: 3 min 以前透气砖(6 块)总流量 150 m³/h, 每块透气砖流量 25 m³/h; 3 ~ 7 min 每块透气砖流量 30 m³/h; 7 min 以后每块透气砖流量 35 m³/h。

(5) 造渣制度。开吹前在计算机中设定: 前期炉渣碱度 2.0 ~ 2.8、7% ~ 8% (MgO), 终渣碱度 4.0 ~ 5.0、8% ~ 9% (MgO)。

(6) 过程加料: 开吹点火后, 先加入 500 ~ 1 000 kg 污泥球, 再加第一批渣料, 3 min 左右起渣后, 加入 200 kg 污泥球、150 kg 萤石或化渣剂, 之后每隔

20 s 加 200 kg 污泥球, 保证均匀升温, 4 min 以后即可开始加石灰和白云石[充分利用此时高(FeO)的有利条件促进石灰、白云石的快速熔化], 加料要少量多批, 7 min 前加完石灰和白云石, 防止出现返干现象, 保证全程化渣。为防止终点压枪过程炉渣返干回磷, 压枪前可加 100 ~ 200 kg 污泥球。

(7) 终点加料: 如果第一次倒炉熔池温度高或碳高, 可补加污泥球, 第一次倒炉钢中碳大于 0.40% 时, 补吹时严禁补加石灰和白云石(防止出钢过程炉渣返干、结块、回磷)。

(8) 供氧制度。开吹氧气流量设为 19 000 m³/h, 吹炼 3 ~ 7 min, 氧气流量 16 000 m³/h, 吹炼 7 min 之后氧气流量调至 18 500 m³/h 直至吹炼终点。枪位控制如图 4 所示。开吹点火后枪位控制在 1.8 m 加入第一批渣料, 加完第一批料后, 待火焰平稳, 吹炼 1 min 将枪位分两次降到 1.2 m; 3 min 左右(起渣前)将氧气流量调至 16 000 m³/h, 起渣后让枪至 1.4 ~ 1.7 m, 并开始少量多批加入污泥球, 如炉渣泡沫化过严重则加入石灰或白云石, 同时将转炉底吹氩气每块砖的流量上调至 30 m³/min; 起渣后就可以提高枪位至 1.6 m 左右, 并开始加第二批石灰和白云石, 7 min 以前加完, 如有返干现象, 可加入 200 ~ 400 kg 化渣剂, 之后根据炉温情况加入污泥球; 9 ~ 10 min, 将氧枪让到 1.9 ~ 2.0 m, 最大限度化

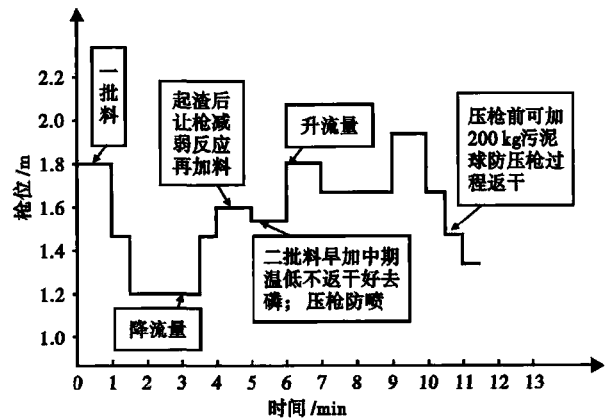


图 4 单渣冶炼优质钢的操作曲线图
 Fig. 4 Diagram of operation curves for melting high quality steels by single-slag process

表 7 100 t 转炉单渣冶炼优质钢的铁水成分和温度
 Table 7 Composition and temperature of hot metal for 100 t converter melting high quality steels with single-slag process

| 铁水成分/% | | | | | 温度/℃ |
|-------------|-------------|-------------|---------------|---------------|---------------|
| C | Si | Mn | P | S | |
| 3.70 ~ 5.80 | 0.23 ~ 0.51 | 0.16 ~ 0.28 | 0.104 ~ 0.157 | 0.022 ~ 0.038 | 1 307 ~ 1 345 |

表 6 不同铁水[Si]对应的铁水装入量

Table 6 Hot metal charging amount with different [Si] in metal

| 铁水[Si]/% | 铁水量/t |
|-----------|---------|
| < 0.3 | 88 ~ 90 |
| 0.3 ~ 0.5 | 84 ~ 88 |
| 0.5 ~ 0.6 | 82 ~ 86 |

表8 100 t转炉单渣冶炼优质钢的过程控制

Table 8 Process control for 100 t converter melting high quality steels with single-slag process

| 过程石灰用量/ (kg·t ⁻¹) | 过程污泥球用量/ (kg·炉 ⁻¹) | 第一次倒炉 | | 出钢/% | | 成品/% | 钢铁料消耗/ kg |
|----------------------------------|-----------------------------------|-------------|-------------|-----------|-------------|-------------|--------------|
| | | 温度/℃ | [P]/% | [C] | [P] | [P] | |
| 24.6~34.7 | 1 905~2 805 | 1 544~1 625 | 0.012~0.026 | 0.14~0.28 | 0.011~0.015 | 0.014~0.020 | 1 044~1 049 |

表9 100 t转炉单渣冶炼优质钢的终点炉渣成分和碱度

Table 9 Ingredient and basicity of end slag for 100 t converter melting high quality steels with single-slag process

| 金属铁珠/ % | 终渣成分 /% | | | | | | | | 碱度(R) |
|------------|---------|----------|-----------|------------------|---------|---------|-------------------------------|--------------------------------|---------|
| | FeO | TFe | CaO | SiO ₂ | MgO | MnO | P ₂ O ₅ | Al ₂ O ₃ | |
| 13.3~23.3 | 6.4~9.9 | 8.2~12.7 | 45.4~55.1 | 9.2~12.7 | 6.9~9.1 | 2.4~2.8 | 2.5~3.4 | 1.4~2.3 | 3.9~5.5 |

渣,保证去磷效果;10 min时,点动提炉罩,根据火焰判断温度,温度高时可补加污泥球。压枪前必须把枪位吊到1.8~2.0 m,让炉渣最大限度熔化之后再压枪。终点压枪前可加入100~200 kg污泥球以防止压枪过程返干;压枪时,分2~3次把枪位压到1.3 m,10 s后压到1.2 m,压枪时间从压到1.3 m开始计算,压枪时间控制在20 s以上。补吹时保证压枪至1.2 m的时间>10 s。

(9)终点控制:终点采用高拉碳补吹法,第一次倒炉,钢水的目标温度为1 580~1 600℃,目标[C]=0.20%~0.50%,目标[P]≤0.15%;出钢温度为1 600~1 620℃,出钢[P]≤钢中磷内控目标-0.005% (水钢生产的优质钢有30[#]~80[#]、SWRH82B、ER70S-6、SWRCH22A、40Cr、65Mn、PSB830、30MnSi、30Si等,成品钢中磷的内控目标≤0.020%,因此,控制转炉冶炼出钢[P]≤0.015%)。

3.2 单渣方案的使用情况

单渣方案用于水钢100 t转炉冶炼优质钢200炉。从表7可见,铁水[P]=0.104%~0.157%,平均0.13%,用这样的高磷铁水单渣操作成功地冶炼

优质钢。从表8可见,单渣冶炼优质钢的钢铁料消耗为1 044~1 049 kg/t,平均1 047 kg/t,比双渣冶炼降低了7 kg/t,石灰消耗为24.6~34.7 kg/t,平均29.4 kg/t,比双渣冶炼降低了3 kg/t。终点炉渣成分和碱度控制见表9。

4 结论

由于水钢铁水[P]高达0.104%~0.157%,100 t顶底复吹转炉在冶炼30[#]~80[#]、SWRH82B、ER70S-6、SWRCH22A、40Cr、65Mn、PSB830、30MnSi、30Si等优质钢时,采用双渣操作降低钢中磷含量,钢铁料消耗为1 054 kg/t,石灰消耗为42.4 kg/t。为了保证钢质、降低消耗,通过对转炉炼钢的装入、供氧、造渣、温度制度的改进和炉型的有效维护,建立了优质钢单渣法深脱磷工艺,并用于生产实践,使优质钢的钢铁料消耗降低到1 047 kg/t,石灰消耗降低到29.4 kg/t,出钢[C]=0.14%~0.28%,平均0.22%,出钢[P]=0.014%~0.020%,平均0.016%,实现了低成本冶炼优质钢。

参考文献

- [1] 陈坤,黄正全,蒋世川.中磷铁水单渣法生产高品质管坯钢工艺研究[J].炼钢,2010,26(1):36-39.
- [2] 汪大洲.钢铁生产中的脱磷[M].北京:冶金工业出版社,1986:117-119,204-206.
- [3] 尹青,李长荣,谢祥,等.高碳硬线钢快速脱磷热力学分析[J].钢铁钒钛,2009,30(4):72-75.
- [4] 谢祥,伍从应,赵秀芳.复吹转炉冶炼82B脱磷工艺研究与实践[J].冶金标准化与质量,2010,48(4):39-41.
- [5] 万雪峰,曹东,李德刚,等.鞍钢转炉双渣深脱磷工艺研究与实践[J].钢铁,2012,47(6):32-36.
- [6] 朱英雄,钟良才,萧忠敏.复吹转炉深脱磷技术在国外的应用与进展[J].炼钢,2013,29(4):1-6.
- [7] 吴伟,邹宗树,郭振和,等.复吹转炉最佳成渣路线的探讨[J].钢铁研究学报,2004,16(1):21-24.
- [8] 戴云阁,李文秀,龙腾春.现代转炉炼钢[M].沈阳:东北大学出版社,1998.
- [9] 吴伟,邹宗树,马嵩,等.转炉冶炼终点炉渣氧化性和碱度的研究[J].炼钢,2004,20(3):28-32.
- [10] 胡建光,刘正祥,郑毅.转炉冶炼中磷铁水动力学条件的优化[J].炼钢,2012,28(4):51-53.
- [11] 吴耀光.95 t转炉氧枪喷头设计与应用[J].炼钢,2005,21(4):56-58.
- [12] 杨文远,蒋晓放,王明林,等.大型转炉炼钢工艺参数优化的研究[J].钢铁,2010,45(10):27-32.

李正嵩(1972-),男,高级工程师,1996年华东冶金学院(本科)毕业,钢铁冶金研究。E-mail:648028828@qq.com

收稿日期:2015-12-27