

电弧炉超音速集束氧枪吹炼的钢水留碳操作实践

秦 军

(宝钢集团新疆八一钢铁股份公司第二炼钢厂, 乌鲁木齐 830022)

摘 要 建立了 70 t 电弧炉冶炼中高碳钢的留碳操作的数学模型。按照出钢时钢水碳含量的要求, 基于入炉废钢和铁水成分, 控制超音速集束氧枪的吹炼参数, 合理使用炉门自耗式碳氧枪和采用相应的炉渣碱度, 以实现目标留碳操作。0.55% C 钢的冶炼实践表明, 当热装铁水 30% 时, 电弧炉终点 [C] 为 0.40% ~ 0.65% 的炉次 ≥ 85%, 显著降低了冶炼成本。

关键词 电弧炉 热装铁水 超音速集束氧枪 留碳操作

Catch Carbon Practice of Arc Furnace Ultrasonic Coherent Jet Oxygen Lance Blowing Liquid Steel

Qin Jun

(No.2 Steelmaking Plant, Xinjiang Bayi Co Ltd, Baosteel Group, Wulumuqi 830022)

Abstract Mathematic model for catch carbon practice of steelmaking medium and high carbon steel in a 70 t arc furnace has been established. According to the requirement of carbon content in liquid steel at tapping, based on the chemical compositions of charged scrap and hot metal, the blowing parameters of ultrasonic coherent jet oxygen lance are controlled suitably to use consumable oxygen-carbon lance at door and the available slag basicity is used to carry out aim catch carbon practice. The steelmaking practice of 0.55% C steel showed that with charged 30% hot metal, the proportion of heats with arc furnace end point [C] 0.40% ~ 0.65% was ≥ 85% to obviously decrease steel melting cost.

Material Index Arc Furnace, Charging Hot Metal, Ultrasonic Coherent Jet Oxygen Lance, Catch Carbon Practice

留碳操作的核心是利用了碳在临界范围以内, 脱碳反应的速度取决于碳向反应界面的扩散速度这一原理实现的^[1,2]。通过两年的实践, 探索出了电弧炉超音速集束氧枪吹炼条件下的留碳实用操作技术。通过对于超音速集束氧枪主氧的控制, 合理的搭配使用炉门自耗式碳氧枪, 通过电能-熔池温度的对应关系, 能够成功预测出熔池碳含量的范围, 误差控制在目标成分 ± 0.05% 左右, 实现留碳的范围在 0.20% ~ 0.65%, 实现留碳操作的炉次比例 ≥ 85%。

1 工艺技术参数

电弧炉型式: 70 t-DC-EBT-EAF; 出钢量 70 ~ 90 t; 留钢量 6 ~ 15 t; 加料方式: 炉盖旋开式由料篮分 1 ~ 3 次加入铁水、废钢及渣料; 供氧方式: 自耗式 C-O 枪 (2 支氧枪 1 支碳枪)、ACI 超音速集束氧枪系统 (4 支氧枪, 多点喷碳); 变压器容量: 60 MVA; 自耗式氧枪氧气流量: 3 000 ~ 6 000 m³/h, 可分 3 档调节; 超音速集束氧枪的布置见文献 [3]; 留碳冶炼的钢种: 中高碳钢 65[#]、55[#]、77MnA 等。

2 留碳操作的关键技术

2.1 留碳操作数学模型的建立

入炉原料的主要成分见表 1; 炉门自耗式氧枪, 超音速集束氧枪的环氧流量和焦炉煤气, 主氧流量参数见表 2。

表 1 废钢和热装铁水的主要成分 / %

Table 1 Chemical composition of charged scrap and hot metal / %

炉料	Si	Mn	C	P
废钢	0.40	0.45 ~ 0.60	0.40	0.050 ~ 0.060
铁水	0.8 ~ 3.0	0.35	3.8 ~ 4.2	0.050

表 2 超音速集束氧枪的冶炼参数

Table 2 Blowing parameters of ultrasonic coherent jet oxygen lance

模式	焦炉煤气 / (m ³ · h ⁻¹)	环氧 / (m ³ · h ⁻¹)	主氧 / (m ³ · h ⁻¹)
M1	210	240	130
M2	280	135	278
M3	330	150	250
M4	400	200	400
M5	160	145	170
M6	175	110	1 500
M7	255	100	2 500
M8	260	120	2 850
M9	240	120	3 000
M10	170	110	1 200

注: (1) 喷吹碳粉 0 ~ 120 kg/min, 分为高低档可调; (2) 环氧为辅助吹焦炉煤气的氧气, 主氧为超音速集束氧枪的射流氧气。

2.1.1 分离固定项目

由于电弧炉采用留渣留钢操作,留钢留渣中含有的溶解氧和氧化铁,其氧含量折算为氧气含量相当于 541 m³ 氧气(按照留渣 2 t,留钢 5 t 计算),锰的氧化量从表 1 中看出,锰含量处于正常的成分范围以内,氧化铁水中锰的需氧量和废钢中的需氧量之和等量于炉渣中氧含量的 28.6%。总的氧耗可以表示为:

$$\Sigma O = O_{\text{脱硅}} + O_{\text{化渣}} + O_{\text{脱碳}} \quad (1)$$

式中: ΣO - 总的氧耗; $O_{\text{脱硅}}$ - 脱硅需要的氧耗; $O_{\text{化渣}}$ - 化渣的氧耗; $O_{\text{脱碳}}$ - 脱碳反应的氧耗。

2.1.2 按炼钢反应顺序确定氧耗

(1) 由于铁水硅含量较高,脱硅反应的氧耗计算模型为:

$$O_{\text{脱硅}} = \frac{[Q \times \alpha + (82 - Q) \times 0.4\%] \times 1000}{28 \times \omega \times \mu} \times 22.4 \quad (2)$$

式中:0.4%- 废钢的碳含量; Q - 铁水加入量/t; α 、 μ 、 ω - 分别表示铁水的硅含量/%、工业氧气的纯度和氧气的利用率;82- 标准装入量/t。

(2) 化渣(包括脱磷)需要的氧耗。由于石灰的溶解是以氧化铁为溶剂进行的,所以参考渣样分析为依据,即炉渣中间的氧化铁含量来计算出相应的氧耗。计算方法如下:

$$O_{\text{化渣}} = S \times \beta \times \frac{56}{72 \times 32 \times \mu \times \omega} \times 1000 \times 22.4 \quad (3)$$

式中: S - 表示渣量和渣中氧化铁的含量(70 t 电弧炉 β 25%)。

(3) 脱碳反应的氧耗表示为:

$$O_{\text{脱碳}} = \frac{\{[Q \times 4.2\% + (82 - Q) \times 0.4\%] - 82 \times F\} \times 1000}{2 \times 12 \times \mu \times \omega} \times 22.4 \quad (4)$$

式中:4.2%- 铁水的碳含量; F - 冶炼钢种碳含量的成分下限/%。

总的氧耗表示为:

$$\Sigma O = \left(\frac{[Q \times \alpha + (82 - Q) \times 0.4\%]}{28 \times \omega \times \mu} + S \times \beta \times \frac{56}{72 \times 32 \times \mu \times \omega} + \frac{\{[Q \times 4.2\% + (82 - Q) \times 0.4\%] - 82 \times F\}}{2 \times 12 \times \mu \times \omega} \right) \times 22400$$

2.2 炉渣碱度的设计

经过长期摸索,根据不同出钢碳含量的要求,设计了不同的炉渣碱度,在实践中应用以后取得了显著效果(表 3)。

表 3 不同终点[C]的最佳炉渣碱度
Table 3 Optimum slag basicity for different end point [C]

[C]/%	炉渣碱度(CaO/SiO ₂)	要求出钢磷含量/%
0.15~0.20	1.8~2.2	≤0.020
0.20~0.40	2.5	≤0.010
0.40~0.65	2.5~3.0	≤0.010

2.3 利用配碳量,电能和熔池温度判断熔池碳含量的数学计算

根据计算和实践表明,以出钢温度 1600 ℃ 为基准,此温度下钢水的物理热为 396 kWh/t,铁水每加入 1%,综合热效应为吨钢电耗降低 5.2 kWh/t(其中铁水每加 1%,铁水的物理热可降低冶炼电耗 2.2 kWh/t,铁水中的碳含量完全氧化至 0.12%,铁水的化学热可以降低冶炼电耗 3.0 kWh/t,反之亦然,碳的氧化量每减少 0.05%,冶炼电耗的降低值呈现非线性变化)。由此计算得出,实现留碳操作,电弧炉热装铁水的冶炼电耗将会随着留碳量的增加而出现缓慢的下降状态。可以表示为:

$$E = 396 - 12 - \varepsilon \times 2.2 - \Delta x \quad (5)$$

式中: E - 冶炼电耗/(kWh·t⁻¹);396 是 1600 ℃ 钢水的物理热; ε - 铁水的热装比例的百分数;12 是 4 支超音速集束氧枪燃烧辅助焦炉煤气的综合化学热; Δx - 铁水中碳氧化释放的化学热。

由此项计算,由于铁水温度不同,以及铁水中硅、锰、磷、硫含量的不同,会出现较大偏差,但是可以作为留碳操作的判断依据,在炉前二级计算机加强的条件下,可以实现电弧炉炼钢的智能一体化。热装铁水 30% 时,三者的关系如表 4。

3 留碳冶炼的实际操作步骤

实际生产中,根据不同的铁水热装比,计算出相应的熔池碳含量和熔池对应的温度对照表。在确定了铁水成分和加入量后,将冶炼钢种的出钢碳含量等各项内容输入公式(4),就会得到冶炼该钢种的留碳操作的基准吹氧量,具体冶炼步骤如下:

(1) 为了减少误差,入炉废钢铁料必须少加含土较多的废钢,防止酸性物质增加降低炉渣碱度。

(2) 电弧炉的装入量要根据炉役情况做好动态的调整,避免熔池过低引起的渣中氧化铁富集导致

表 4 熔池 [C] 和温度对应计算的冶炼电耗/(kWh·t⁻¹)
Table 4 Calculated electric power consumption according to bath [C] and temperature/(kWh·t⁻¹)

熔池 温度/ ℃	[C]/%							
	0.12~ 0.17	0.17~ 0.22	0.22~ 0.27	0.27~ 0.36	0.37~ 0.41	0.42~ 0.48	0.50~ 0.60	
1 530	140.3	147.3	157.3	168.3	188.3	199.3	209.3	
1 540	161.0	168.0	178.0	189.0	209.0	220.0	230.0	
1 550	175.3	182.3	192.3	203.3	223.3	234.3	288.0	
1 560	188.3	195.3	205.3	216.3	236.3	247.3	297.0	
1 570	196.1	203.1	213.1	224.1	244.1	255.1	305.0	
1 580	209.1	216.1	226.1	237.1	257.1	268.1	308.2	
1 590	223.4	230.4	240.4	251.4	271.4	282.4	311.4	
1 600	228.6	235.6	245.6	256.6	276.6	287.6	315.1	

注:计算时装入量 82 t,铁水的硅含量为 0.8%,铁水温度 1 250 ℃,氧耗 39 m³/t,泡沫渣埋弧操作处于理想状态,熔池熔清以后假设为理想溶液。

大沸腾事故,避免熔池过高造成脱碳反应剧烈时炉门翻钢水的现象,实践表明,装入量过高,脱磷操作不好控制。炉役小于 50 炉时,最佳装入量为 77 t,炉役大于 50 炉时,最佳装入量为 77~90 t。

(3)第 1 批钢料和铁水入炉以后,炉门氧枪投入工作,炉壁超音速集束氧枪按照各个阶段的不同模式投入。即熔化期,集束氧枪做烧嘴模式助熔。

(4)加料结束以后,熔清前,炉门自耗式氧枪主要用于做清理炉门废钢,熔清后主要是沿着钢渣界面吹氧化渣,进行脱磷反应,暂时不进行喷碳操作,集束氧枪选择表 2 中 M1~M6 的模式进行操作,炉渣熔化充分,继续进行吹渣脱磷 3~5 min,喷吹碳粉以后,炉渣泡沫化程度较好时,集束氧枪使用表 2 中 M6~M10 的模式进行脱碳,炉门氧枪一般停留在工作位,做间歇性的喷吹碳粉和吹渣操作,在配碳量较高的时候也配合超音速集束氧枪继续脱碳操作。

(5)在整个冶炼期间,送电档位以中等偏上的功率进行送电,温度调整要求留有 25 ℃ 的余地。

(6)待脱碳反应进行一段时间,氧气的消耗达到基准吹氧量时,停电停氧进行测温取样,凭温度的高低就可以基本判断出熔池碳含量的范围,根据表 4 中的温度和冶炼电耗可以对应确定出熔池的碳含量。基准吹氧量包括炉门枪和集束氧枪两部分,氧气的利用率根据吹氧冶炼操作的具体情况而定,一般在 80%~92.5%。

(7)留碳在目标范围以内,温度没有达到出钢要求时,集束氧枪采用 M1~M4 模式,炉门氧枪以较低流量吹渣,并且采用较大的喷碳量进行喷碳造泡沫渣埋弧送电提温,温度合适以后出钢。

(8)如果留碳过高,则采用集束氧枪 M6~M10 的脱碳模式进行脱碳操作和温度调整,调整结束以后取

样分析,成分合适以后出钢。集束氧枪每脱 0.01% C 的氧耗和熔池中不同碳浓度的关系见表 5。

表 5 集束氧枪脱 0.01% 碳的氧耗和熔池 [C] 的关系
Table 5 Relation between consumption of oxygen for decarburizing by 0.01% with coherent jet oxygen lance and bath [C]

熔池 [C]/%	脱 0.01% C 的氧耗/%
>1.0	4.02
0.8~1.0	4.50
0.6~0.8	5.10
0.2~0.6	5.45
0.12~0.2	5.74
<0.10	7.55

表 6 留碳操作的冶炼 0.55% C 钢的技术参数 (出钢温度 1 600 ℃)

Table 6 Technical parameters for steelmaking 0.55% C steel with catch carbon practice (tapping temperature 1 600 ℃)

铁水/ t	装入 量/t	电耗/ (kWh·t ⁻¹)	炉门枪 氧耗/m ³	主氧/ m ³	环氧/ m ³	煤气/ m ³	终点 [C]/%
20.0	85.0	271	2 808	127	93	156	0.080
28.0	85.0	313	2 823	128	95	158	0.550
25.0	83.5	298	3 572	133	95	168	0.490
20.0	79.8	252	2 665	168	99	125	0.190
20.0	78.2	268	2 413	174	72	117	0.250
25.0	83.3	304	2 760	131	94	144	0.540
18.0	79.6	278	2 605	164	68	105	0.250
20.0	81.6	268	2 556	98	70	110	0.380
15.0	81.8	256	2 687	105	74	122	0.550
28.0	88.8	298	2 969	141	99	158	0.310
23.0	83.6	249	3 012	141	99	122	0.400

4 实践结果

生产实践表明,电弧炉留碳操作成功率超过 85%,典型操作结果见表 6,计算结果和实践结果的误差 ≤5%。

据成本分析,电弧炉冶炼 55[#] 钢,留碳操作的成本比不留碳操作的成本,吨钢最少降低 251 元,产生了很大的经济效益,是一项值得推广的先进技术。

参考文献

- 秦 军. 70 t EAF-LF 冶炼低、中碳钢快速脱硫的工艺实践. 特殊钢, 2006, 27(4): 57
- 王新成, 俞海明. 电弧炉脱 [S][P] 和 [Pb][Zn] 的操作实践. 特殊钢, 2005, 26(4): 44
- 陆宏祖. ACI 集束氧枪和 BSE 炉门碳-氧枪复合吹炼技术在 70 t 电弧炉上的应用和改进. 特殊钢, 2008, 29(3): 53

秦 军 (1974-), 男, 炼钢工程师, 1995 年重庆大学毕业, 从事钢铁冶金工艺生产研究。

收稿日期: 2008-05-22