

60 t AOD 精炼使用炉料级铬铁冶炼 400 系不锈钢的生产实践

冯文甫 叶凡新 马富平 郭 健 曹红波 吴广海

(邢台钢铁有限责任公司炼钢厂, 邢台 054027)

摘 要 成分相同的粒度为 10~400 mm 炉料级铬铁比粒度 10~60 mm 高碳铬铁价格低,但是粒度较大不能通过高仓加料的形式加入 AOD 内完成合金化。通过分析 60 t AOD 精炼不锈钢脱碳模型和工业生产实践,采用将炉料级铬铁装在废钢斗内加料的方式,沿用兑铁后加料的操作模型,控制加料前熔池的温度在 1 550~1 600 ℃,炉料级铬铁替换高碳铬铁加入量在 200 kg/t,供氧强度在 2.0~2.5 m³/(t·min)能够实现炉料级铬铁一次性加入后操作的稳定和降低成本。

关键词 60 t AOD 炉料级铬铁 供氧强度 Cr 不锈钢 生产实践

Production Practice of 60 t AOD Using Charge Material Ferrochrome to Refining 400 Series Stainless Steel

Feng Wenfu, Ye Fanxin, Ma Fuping, Guo Jian, Cao Hongbo and Wu Guanghai
(Steelmaking Works, Xingtai Iron and Steel Corp Ltd, Xingtai 054027)

Abstract The price of size 10~400 mm charge material ferrochrome is lower than that of size 10~60 mm high carbon ferrochrome with same chemical composition, but the charge material with larger size can't be charged in AOD by high level bin to finish alloying. With analysis on 60 t AOD refining stainless steel decarburization model and commercial production practice, the method of charge material ferrochrome adding in scrap charging bucket is used and the operation model to adding material after charging hot metal is adopted with controlling bath liquid temperature 1 550~1 600 ℃ before charging, adding 200 kg/t charge material ferrochromium to replace high carbon ferrochromium and applying oxygen intensity 2.0~2.5 m³/(t·min), the stability of operation with once adding charge material ferrochromium realizes and the cost of production decreases.

Material Index 60 t AOD, Charge Material Ferrochromium, Intensity of Oxygen Supply, Cr Stainless Steel, Production Practice

邢台钢铁有限责任公司(邢钢)根据 AOD、电弧炉等工序生产不锈钢设备、工艺的不同,将高碳铬铁根据粒度的大小划分为普通高碳铬铁、炉料级铬铁两种(表 1)。由于炉料级铬铁的粒度较大一般通过料篮加料的方式应用到电弧炉冶炼不锈钢过程中,而 AOD(Argon Oxygen Decarburization)生产不锈钢过程中受制于脱碳保铬对温度的特殊要求^[1]以及高仓称量、电振设备的能力,一般使用块度较小的高碳铬铁。相比较来说,炉料级铬铁由于减少二次破碎和筛选,价格上有一定的优势。

1 邢钢冶炼不锈钢工艺流程

邢钢不锈钢生产线通过采用铁水包脱磷站 + 60 t AOD“一步法”模式生产 400 系不锈钢,钢种涵盖 0Cr17、0Cr13 铁素体类、1Cr13、2Cr13 马氏体类以及易切削类不锈钢。

邢钢一步法冶炼不锈钢的工艺流程为:铁水脱磷-扒渣-60 t AOD-LF-CCM。高炉铁水经过铁水包脱磷站进行脱硅、脱磷、扒除炉渣

后兑入 AOD,脱磷铁水成分为(/%: ≥3.0C, ≤0.10Mn, ≤0.010P, ≤0.040S)。在 AOD 吹氧脱碳的过程中从高仓加入高碳铬铁,同时通过控制过程温度和降低 CO 分压等手段实现“脱碳保铬”。当碳含量符合目标要求时加入硅铁、萤石将渣中的 Cr₂O₃、MnO 等还原到钢液中,还原出钢运至 LF 进行成分、温度的微调后进行浇铸。各钢种所需的普通高碳铬铁及石灰加入量和成分控制要求如表 2 所示。

2 AOD 使用高碳铬铁的冶炼不锈钢操作模型

2.1 AOD“脱碳保铬”原理

AOD 精炼不锈钢过程中分为脱碳和还原两个阶段。在脱碳期,主要任务是在吹氧脱碳过程中尽

表 1 普通高碳铬铁和炉料级铬铁粒度标准和采购价格
Table 1 Size standard and purchase price of ordinary high carbon ferrochrome and charge material ferrochrome

物料分类	成分/%					粒度/mm	价格/(元·t ⁻¹)
	C	Si	Cr	P	S		
普通高碳铬铁	≤12.0	≤5	≥48.0	≤0.035	≤0.040	10~60	7 000
炉料级铬铁	≤12.0	≤5	≥48.0	≤0.035	≤0.040	10~400	6 800

表 2 AOD 精炼 400 系不锈钢高碳铬铁及石灰加入量

Table 2 Amount of adding high carbon ferrochrome and lime for AOD refining 400 series stainless steel

钢种	化学成分/%						入炉脱磷铁水量/t	入炉普通高碳铬铁量/t	石灰加入量/t
	C	Si	Mn	P	S	Cr			
Cr11	≤0.05	≤1.0	≤1.0	≤0.035	≤0.01	10.5~12.0	49	12	3.5~4.0
0Cr13	≤0.05	≤1.0	≤1.0	≤0.035	≤0.01	12.0~13.5	48	13	4.5~5.0
1Cr13	0.08~0.15	≤1.0	≤1.0	≤0.025	≤0.01	12.0~13.5	48	13	4.0~4.5
0Cr17	≤0.05	≤1.0	≤1.0	≤0.025	≤0.01	16.5~18.0	43	18.5	5.5~6.0

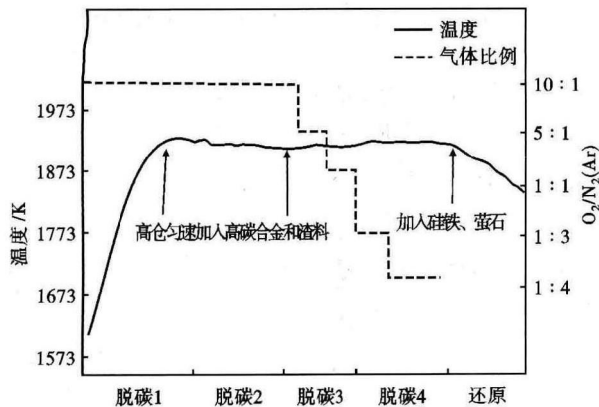


图 1 AOD 精炼过程加料与钢液温度控制

Fig. 1 Charging and liquid temperature control during AOD refining process

可能的减少 Cr 的氧化即实现“脱碳保铬”;在还原期,主要通过加入硅铁、萤石等脱氧剂和化渣剂将脱碳期所氧化的 Cr、Fe、Mn 等还原到钢水中,同时兼顾脱气、去除夹杂等任务^[2]。脱碳期“脱碳保铬”的主要方法是提高冶炼温度和降低 CO 气体分压。

2.2 AOD 使用高碳铬铁冶炼不锈钢操作模型

AOD 精炼过程形成较为统一的操作方式是:将温度提高到一定高度后开始匀速加入合金和渣料,同时在顶枪吹氧结束前加完,在吹炼前期即高仓加料过程中采用调整加料速度的模式,吹炼末期即氧氩小比例阶段采用控制气体比例的方式来保证整个冶炼过程中温度的平稳,防止温度对 Cr 元素的影响,如图 1 所示。

以 1Cr13 钢种为例,在脱磷铁水质量为 48 t,温度 1 310 ℃、碳含量 3.3% 的条件下经过计算后 AOD 精炼过程中各物料的加入如表 3 所示。

3 AOD 炉料级铬铁的操作模型开发和生产实践

3.1 加料方式

从生产顺行角度考虑,采用兑铁前通过废钢斗将炉料级铬铁一次性加入的模式灵

表 3 AOD 精炼物料加入汇总

Table 3 Summary of charging materials in AOD refining

物料名称	脱碳 1	脱碳 2	还原
吹氧量/m ³	1 400	1 820	
石灰/kg	2 000	2 300	
普通高碳铬铁/kg	5 300	6 600	
萤石/kg			850
硅铁/kg			920

活性较强且用时短,但是出现还原后碳含量高于目标值要求的现象,同时也违背了脱碳保铬的基本要求,导致还原硅铁消耗较使用高碳铬铁炉次增加 3~6 kg/t。

通过模拟研究^[3-6]和现场观察,先加入的炉料级铬铁聚集在兑铁侧的中下部,如图 2(a)所示,在兑铁过程中该区域炉料级铬铁由于过分集中导致铁水在铬铁表面开始粘附,随着石灰的加入和 Cr₂O₃ 渣的形成,炉渣的熔点和黏度急剧升高致使部分铬铁未来得及完全熔化,而当进入还原期加入萤石、硅铁后,炉渣的熔点急剧下降,同时渣中的 Cr₂O₃ 亦被还原至钢液中,包裹在迎钢面下方含有高碳的炉料级铬铁进入到钢液中形成增碳。而在先兑铁后加铬铁操作时,由于铬铁是通过上方加入,其铬铁加入后按照钢液流动轨迹进行运动,在 300~600 s 完成熔化和脱碳等反应,如图 2(b)所示。为防止出现还原后碳高等质量事故继续采用兑铁后加合金的操作模式。

3.2 加料时刻

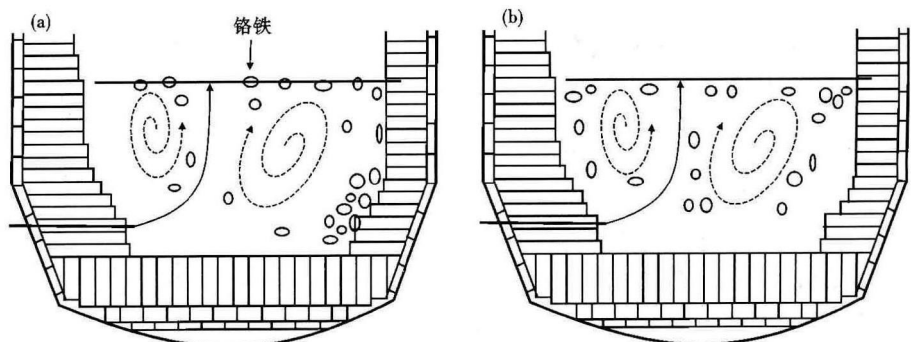


图 2 熔池内部模拟:(a)先加铬铁再兑铁;(b)先兑铁再加铬铁

Fig. 2 Simulation of liquid pool: (a) first adding ferrochrome then charging hot metal; (b) first charging hot metal then adding ferrochrome

AOD 精炼过程中控制加料前的温度能够防止 Cr 元素的氧化,实现脱碳保铬^[7]。但是过高的温度会触发耐火材料的荷重软化,导致迎钢面炉衬抵抗合金加入时的机械冲刷能力下降,诱发耐火材料侵蚀速度加剧、炉龄降低等问题^[8-9]。

在钢液中铬元素相同时,碳含量越高所对应的脱碳保铬的温度相对较低^[10]。根据理论基础,结合邢钢 AOD 所使用的脱磷铁水碳含量较高的特点(表 2),确定加入时刻为熔池温度达到 1 550 ~ 1 600 °C (对应的熔池中碳含量大于 1%) 时停止供氧,通过废钢料斗将炉料级铬铁加入炉内。

3.3 炉料级铬铁替换高碳铬铁的加入量

通过废钢料斗将炉料级铬铁一次性加入,熔池温度在短时间内出现骤降,在熔池中碳、温度较低的情况下导致 Cr 元素的氧化。实践证明(图 3),炉料级铬铁替换高碳铬铁量在 200 kg/t 以下较为合适。

3.4 供氧强度

关于 AOD 脱碳的数学模型,比较典型的有

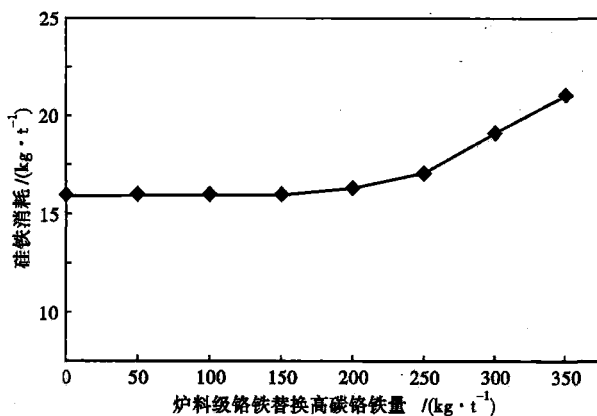


图 3 1Cr13 炉料级铬铁替换高碳铬铁量对硅铁消耗量的影响

Fig. 3 Effect of amount of charge material ferrochrome to replace high carbon ferrochrome on ferrosilicon consumption for refining steel 1Cr13

参考文献

- [1] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2005:358.
- [2] 冯聚合. 铁水预处理与钢水炉外精炼[M]. 北京:冶金工业出版社,2006:206-213.
- [3] 朱苗勇. 不锈钢冶炼用 AOD 炉内的射流行为和流体流动[J]. 金属学报,2006,42(6):653-656.
- [4] 魏季和. 不锈钢 AOD 精炼过程数学模拟的研究:过程数学模型. 2001 年中国钢铁年会论文集(上卷)[C]. 北京:冶金工业出版社,2001:604-609.
- [5] 魏季和. 不锈钢 AOD 精炼过程数学模拟的研究:模型的应用[J]. 包头钢铁学院学报,2001,20(3):203-206.
- [6] 史国敏. 侧顶复吹条件下 AOD 转炉熔池内流体流动现象的数学和物理模拟[D]. 上海:上海大学,2007.
- [7] 池和冰. AOD 全铁水冶炼铁素体不锈钢工艺研究[J]. 宝钢技术,2008(2):16-20,30.

Fruehan 模型^[11]和魏季和模型^[12]。在实际生产过程中高炉铁水预先经过脱磷站处理,铁水中的 Si、Mn 等元素基本上为微量,而在 AOD 精炼过程中主要存在的 C、Cr 的氧化,其氧化速率如公式(1)、(2)所示。

$$\frac{d[C]}{dt} = -\frac{100 M_C}{W_m} \frac{2[\eta_1 Q_{SO} + (\eta_2 - \eta_{CO}) Q_{TO}]}{22\ 400} x_C \quad (1)$$

$$\frac{d[Cr]}{dt} = -\frac{100 M_{Cr}}{3W_m} \frac{4[\eta_1 Q_{SO} + (\eta_2 - \eta_{CO}) Q_{TO}]}{22\ 400} x_{Cr} \quad (2)$$

式中: η_1 -侧吹氧气总利用率; η_2 -顶吹氧气中用于氧化精炼部分所占的比例; η_{CO} -顶吹氧气中用于二次燃烧部分所占的比率; X_i -氧对元素*i*的分配率; Q_{TO} -顶吹氧气流量/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); Q_{SO} -侧吹氧气流量/($\text{cm}^3 \cdot \text{s}^{-1}$); W_m -钢液的质量/g; M_i -物质的摩尔质量/($\text{g} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

在综合考虑增加 5% ~ 10% 的 CO 二次燃烧来提供热量后,采用 2.0 ~ 2.5 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 的供氧强度不仅能够完成脱碳任务,同时也能够匹配铬铁的熔化速率,使脱碳升温等于熔化降温,减少温度的波动对溶液中 Cr 元素的影响。

3.5 成本分析

从市场采购价格来看,相同铬点炉料级铬铁较高碳铬铁低约 200 元/t,按照吨钢替换高碳铬铁 200 kg 测算,成本降低约 40 元/t,经济效益显著。

4 结论

(1) 通过工业生产实践,AOD 使用炉料级铬铁替换高碳铬铁一次性入炉的工艺操作可行。

(2) 采用炉料级铬铁一次性入炉操作时熔池温度控制在 1 550 ~ 1 600 °C 时既能满足脱碳保铬的温度需要也能最大限度的降低炉衬的侵蚀。

(3) 供氧强度控制在 2.0 ~ 2.5 $\text{m}^3/(\text{t} \cdot \text{min})$ 能够较好实现脱碳升温与铬铁熔化降温的温度平衡。

- [8] 王贵平. 提高 45 t AOD 炉龄的工艺实践[J]. 特殊钢,2006,27(2):56-57.
- [9] 陆斌. AOD 氧化期渣对镁钙质炉衬侵蚀的影响[J]. 特殊钢,2008,29(1):48-50.
- [10] 徐匡迪. 关于不锈钢精炼的过程模型与质量控制[J]. 炼钢,2011,46(1):1-13.
- [11] Fruehan R J. Reaction Model for the AOD Process[J]. Ironmaking and Steelmaking,1976,3(3):153-158.
- [12] 魏季和. 侧顶复吹条件下 AOD 精炼过程的数学模拟:过程数学模型[J]. 中国稀土学报,2010,28(专辑):96-101.

冯文甫(1984-),男,助理工程师,河北理工大学(本科)毕业,不锈钢冶炼工艺和质量控制。

收稿日期:2015-06-19