

提高 410S 不锈钢连浇炉数的工艺实践

李广斌¹ 王子超³ 霍立国² 王森³ 张荣兴¹ 郭松¹
(邢台钢铁有限责任公司 1 不锈钢公司; 2 战略部; 3 质量控制部, 邢台 054027)

摘要 邢钢一步法(脱磷站 + 60 t AOD + LF)生产 410S 不锈钢过程中, 由于 AOD 的冶炼周期远大于连铸机浇钢和脱磷站的处理时间和连铸中间包水口下部侵蚀严重无法实现多炉连浇, 严重影响连铸机作业率和整体钢铁料消耗。提高单中间包连浇炉数有利于减少中间包的使用数量、提高连铸机的作业率、降低钢铁料消耗、降低连铸机辅材及能源介质消耗。通过合理提高入炉冷态返回废钢比例(3.5 t/炉), 选择合适合金硅含量(3.5%)来缩短 410S 不锈钢 AOD 的冶炼周期至 71 min, 连铸机采用中间包分体水口快换, 使连浇炉数由 6 炉提高到 12 炉。

关键词 410S 不锈钢 冶炼周期 连浇炉数 分体水口

Process Practice of Increasing the Number of 410S Stainless Steel Continuous Casting Furnace

Li Guangbin¹, Wang Zichao³, Huo Ligu², Wang Sen³, Zhang Rongxing¹ and Guo Song¹
(1 Stainless steel Co; 2 Strategy Department; 3 Quality Control Department, Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027)

Abstract In the process of producing 410S stainless steel by Xinggang one-step method (dephosphorization station + 60 t AOD + LF), the tap-to-tap cycle of AOD is much larger than that of continuous casting machine pouring and dephosphorization station and the lower part of continuous casting nozzle etches seriously. It is impossible to realize continuous-continuous casting, which seriously affects the operation rate of continuous casting machine and the consumption of overall steel materials. Increasing the number of single-in-one continuous casting furnaces is beneficial to reduce the number of tundish used, increase the operating rate of the continuous casting machine, reduce the consumption of steel materials, reduce the consumption of auxiliary materials for continuous casting machines and energy media. By reasonably increasing the proportion of cold-returned scrap into the furnace (3.5 t/heat), selecting the appropriate silicon content 3.5% to shorten the tap-to-tap cycle of the 410S stainless steel AOD to 71 minutes, the continuous casting machine adopts the split-pack water inlet quick change, so that the continuous casting 6 heats were raised to 12 heats.

Material Index 410S Stainless Steel, Tap-to-Tap Cycle, Continuous-Continuous Casting Heats, Split Nozzle

410S 是铁素体不锈钢中铬质量分数最多的一种, 其具有不锈性, 而且耐蚀性优于碳质量分数高的马氏体不锈钢; 它具有良好的塑韧性和冷成型性, 且优于铬质量分数更高的其他铁素体不锈钢。邢台钢铁有限责任公司前期在一步法(脱磷站 + AOD + LF)生产 410S 钢过程中, 由于 AOD 的冶炼周期(≥ 80 min)远大于连铸机浇钢(73 min)和脱磷站(60 min)的处理时间, 导致整个不锈钢生产线的生产效率受到限制, 24 h 生产不锈钢的炉数只有 15 炉, 单浇次最大生产炉数为 6 炉。虽然推行了浇次最后一炉钢水 AOD 出钢直上连铸机的操作, 增加到 7 炉/浇次。但是该模式是通过浇次前 3 炉在 LF 进行长时间压钢来实现的, 对冶炼超低碳钢的后续处理过程钢液增碳、LF 电耗、钢包铁包周转情况极为不利。并且连铸机存在中间包寿命明显高于中间包整体水口, 因整体水口寿命到期停浇更换中间包和水口的整套耐火材料, 造成连浇炉数下降, 物料吨钢成本上升的情况。本文就邢钢的工艺、装备特点来分析

410S 钢在提高连浇炉数上遇到的由于 AOD 冶炼周期大于连铸机生产造成的周期不匹配和中间包水口侵蚀严重等现象, 以达到提高连浇炉数, 降低生产成本、减少物料以及公共能源消耗的目的。

1 410S 不锈钢生产流程及工艺参数

邢钢 410S 不锈钢的生产工艺流程为: 高炉铁水 → 铁水预处理(脱硅、脱磷) → 60 t AOD 精炼 → 60 t LF 精炼 → 9 m 弧 CCM 连铸 → 轧制。

方坯连铸机引进奥钢联机型, 断面为 150 mm × 150 mm, 采用保护浇铸加结晶器电磁搅拌, 连铸机的主要参数见表 1, 410S 不锈钢的化学成分见表 2。

表 1 方坯连铸机的主要工艺参数

Table 1 Main technical parameters of billet caster

机型	半径/m	铸机流数	结晶器	结晶器振动	二次冷却	冶金长度/m
弧型	9	4机 4流	VAI Diamond	DYNAFLEX 液压振动	4段 汽雾冷却	约 20.3

表2 410S不锈钢的化学成分/%

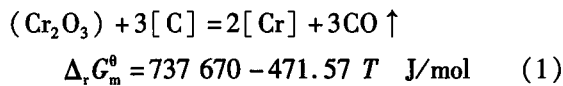
Table 2 Chemical composition of 410S stainless steel/%

C	Si	Mn	P	S	Cr
≤0.032	≤1.00	≤1.00	≤0.030	≤0.030	12.00~13.50

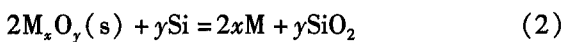
2 410S 不锈钢 AOD 生产过程分析

AOD 冶炼不锈钢通常分两个阶段:脱碳和还原。其中脱碳期的主要任务是尽可能地实现“脱碳保铬”,还原期的主要任务是在侧吹强搅拌下依靠硅、铝等强脱氧剂,尽可能地把脱碳期所氧化的铬、铁、锰等还原到钢水中,同时兼顾脱气、去除夹杂等任务^[1]。

不锈钢冶炼过程中,“脱碳保铬”反应为式(1)。



还原期硅脱氧的反应为式(2)。



当脱碳达到目标值时进行还原,还原期停止吹氧,并吹入惰性气体加入还原合金进行还原和合金化,还原周期一般为 8 min 较为固定,因此,AOD 冶炼周期的长短主要取决于脱碳期的长短。影响 AOD 脱碳期的主要因素是脱碳速度,而脱碳速度主要取决于“脱碳保铬”温度的选择和控制在合适的温度下,后期非顶枪阶段脱碳相对固定,且脱碳速度较慢,所以提顶枪后在合适的温度下尽可能低的碳含量有利于发挥顶枪快速脱碳缩短冶炼周期的目的。

2.1 脱碳期 AOD“脱碳保铬”温度的选择和控制在

由式(1)可知,促进反应向右进行、实现“脱碳保铬”的关键因素是降低气相中的 CO 分压、提高冶炼温度。一步法冶炼 400 系不锈钢时,由于向 AOD 内加入大量的合金和渣料,冶炼过程中出现热量不足、炉冷现象,其热量缺口为 6%~10%。通常情况下,只能依靠氧化溶液中的铬元素或者额外加入硅铁进行提温,所以在铬质量分数一定时,靠增加入炉硅的总量来提温,但入炉硅总量增加使炉渣碱度降低,反而增加了石灰用量,石灰用量增大,加剧入炉温度下降的恶性循环,且温度太高使炉衬侵蚀增加,这就要求在综合成本最低情况下,根据入炉合金中的硅质量分数合理配比入炉合金和返回废钢。随着脱碳反应的进行,通过调节氧气/氩气的比例,可使形成的大量氩气泡构成 CO 的假真空室来降低 CO

的气体分压^[2]。合理的炉渣黏度能让多余的 CO 气体顺利排出,降低 CO 的气体分压,尤其在渣中 SiO₂ 很高渣黏度很低时,不利于 CO 气体顺利排出。但是在碱度达到 1.8~2.2 时,增加石灰用量既不利于脱碳,也会造成在高碱度大渣量情况下对炉衬的侵蚀加剧,并且增加成本。这就要求在操作时入炉硅不能太高,在保证温度控制为 1 660~1 700 °C 时,留一部分氧去氧化少量铬,造块状渣。所以保持综合成本最低情况下,应根据入炉合金中的硅质量分数合理配比入炉合金。而在 400 系生产中,影响入炉硅的主要因素就是高碳铬铁中的硅质量分数。在结合低 CO 分压的操作后,对于 410S 钢种来说,因其成品碳含量很低,其整个脱碳吹炼期的温度控制为 1 670~1 700 °C。但是受到快速脱碳、提高高碳铬铁中硅质量分数、降低低碳区 CRE 值、设备以及惰性气体供应量等多方面的影响,其在吹炼过程中不可避免地发生温度很高不脱碳的现象,冶炼周期增加。本文探讨,通过合适的人炉合金硅含量和加入适量冷固态返回料的方式,在保证提枪温度下,达到降低提枪碳含量缩短 AOD 410S 不锈钢整体冶炼周期的目的^[3]。

2.2 AOD 还原操作

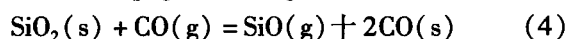
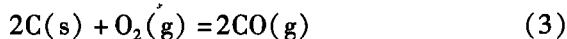
AOD 还原期常用的脱氧剂为硅铁和铝块,其中铝的脱氧效果强于硅,同时不锈钢中加入铝还具有细化晶粒、提高连铸坯中等轴晶比例、减少固溶体中的氮、改善冷成型性能等诸多优点^[4]。但是脱氧产物 Al₂O₃ 易在浇铸过程中聚集形成结瘤,影响浇铸性能,同时 Al₂O₃ 与 MgO 反应生成脆性夹杂物镁铝尖晶石,容易对最终产品造成无法弥补的缺陷^[5]。所以,在冶炼 410S 不锈钢时,选择使用硅铁进行还原和脱氧。

多家不锈钢厂的生产数据显示,AOD 还原渣的二元碱度一般控制为 1.8~2.2。在对钢种使用条件日趋苛刻的环境下,钢中一些杂质元素的质量分数要求极低。此时,部分不锈钢厂采用双渣法进行还原和脱硫,该种操作模式具有超强的脱硫效果,但是其存在 3 方面问题:(1)脱硫后的碱度常常为 2.3~2.7,增加了渣黏度和固态化趋势;(2)延长了整体的冶炼周期,使本来炉机不匹配的不锈钢生产效率更加降低;(3)在二次脱硫时需要补加部分石灰进行二次造渣,不可避免地发生石灰增碳现象^[6],对于冶炼 410S 等低碳不锈钢十分不利。为保证质量,炼钢厂要求 AOD 出钢前硫质量分数小于 0.003%。综上所述,在不增加石灰量和影响精炼炉

搅拌强度的情况下,如果出现硫高,则出钢后 LF 加入从外部采购的优质石灰,以缩短冶炼周期、减少还原后石灰增碳,如还原期终点硫含量合适就可以直接出钢。

2.3 中间包水口侵蚀

410S 钢连铸生产过程中,为防止结晶器内的钢水氧化,保持结晶器与铸坯间的润滑,防止铸坯表面产生缺陷及吸收非金属夹杂物,向结晶器内投入了保护渣。保护渣含有剧烈侵蚀耐火材料的低碱性渣成份,熔点和粘性很低。保护渣的成份和物理特性决定了其对水口的侵蚀能力。在保护渣及钢水界面水口侵蚀严重,特别是铝碳材质不能耐蚀损。铝碳质浸入式水口内壁侵蚀的程度因钢种不同而有很大的不同。浇铸铝镇静钢时侵蚀小,而在浇铸高锰钢、高氧钢以及不锈钢时侵蚀大。而且,由于 Al-C 质水口在主体 Al_2O_3 材料中为提高其抗热震性,一般添加 10% 左右的熔融石英 (SiO_2),并添加 SiC 等。而石英由于与钢水润湿,与钢水中的 FeO、MnO、TiO 等之间生成低熔点化合物,而且如式(3)和式(4)所示,水口中的碳向钢水中溶解,与游离氧发生反应,引起骨料部分的熔出,显著加大了水口的熔损。同时,由于水口的部分材料发生下列反应而挥发,从而在水口中产生空洞,致使组织脆化,引起表面粗糙。因此造成不锈钢生产过程中整体水口下端侵蚀严重而停浇进行水口更换^[7]。



3 生产实践改进

3.1 AOD 生产实践

因高碳铬铁等原料采购和保持生产稳定,根据高碳铬铁不同硅含量,邢钢 400 系不锈钢入炉合金硅含量一般分为 2.50% (低硅)、3.50% (中硅) 和 4.50% (高硅) 左右且必须加入 2.5 t 以上返回废钢,以消耗不锈钢生产过程中产生的冷态废钢。综合第 2 部分关于 AOD 410S 钢冶炼周期的机理分析,对入炉合金硅质量分数、入炉返回废钢加入量等进行对比试验研究,从而找出降低 AOD 410S 钢冶炼周期的工艺制度,具体试验如下。

为保证生产稳定和废钢返回料的消耗,选取冷态返回废钢 2.5 t,不同入炉合金硅含量为实验对象各进行 50 炉生产,探索入炉合金硅质量分数对 AOD 吹炼过程的影响,从表 3 可见,在冷态废钢加入量为 2.5 t、铁水量为 47 t 时,发现当入炉合金硅

含量为 2.50% 时,提枪碳质量分数较低为 0.45%,但是提枪温度为 1661 °C,达不到后期脱碳要求的 1670 °C 需进行提温操作,进而影响整体冶炼周期。当入炉硅含量为 4.50% 时,提枪温度达到后期脱碳的 1670 °C 的要求,但提枪碳含量较高为 0.76%,会加重提枪后期脱碳负担,且提枪温度过高,加重 AOD 镁钙材质耐火材料的侵蚀,综合碳含量和温度,使用入炉硅含量为 3.50% 较为合适,既能满足后期脱碳要求,也可使提枪碳含量较低。

其中各不同装入方式典型的炉渣组分对比发现炉渣并未出现大范围波动,具体情况如 4 表所示。

根据生产条件和不同入炉合金硅含量的生产试验,选取入炉合金硅含量为 3.50%,不同冷态返回废钢为实验对象各进行 50 炉生产,探索入炉合金硅质量分数对 AOD 吹炼过程的影响,入炉冷态废钢加入量对 AOD 提枪碳质量分数、提枪温度及平均冶炼周期的影响见表 5。由表 5 可得,入炉合金硅质量分数为 3.50%、铁水量为 47 t 时,入炉冷态废钢加入量为 3.5 t 时既能满足后期脱碳温度要求,也可使提枪碳含量较低,满足冶炼周期小于 73 min 的要求。

其中各不同装入方式典型的炉渣组分对比发现炉渣并未出现大范围波动,具体情况如 6 表所示。

表 3 入炉高碳铬铁合金中硅质量分数对 AOD 吹炼过程参数的影响

Table 3 Influence of silicon percent of high carbon ferrochrome on smelting process parameters of AOD

装入方式	入炉合金硅质量分数/%	铁水量/t	提枪平均碳质量分数/%	平均冶炼周期/min	提枪平均温度/°C	炉均冷态返回废钢/t
1	2.50	47	0.45	84	1 661	2.5
2	3.50	47	0.60	80	1 687	2.5
3	4.50	47	0.76	86	1 711	2.5

表 4 AOD 精炼 410S 不锈钢典型炉渣成分对比

Table 4 Comparison of typical slag composition for AOD refining 410S stainless steel

方式	AOD 终渣成分/%									碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	S	P ₂ O ₅	
1	56.32	22.95	0.56	0.11	2.77	6.54	0.55	0.39	0.06	2.45
2	56.02	23.17	0.58	0.11	2.37	6.95	0.59	0.38	0.05	2.42
3	56.12	23.39	0.59	0.10	2.40	6.94	0.61	0.39	0.05	2.40

表 5 冷态废钢加入量对冶炼过程参数的影响

Table 5 Influence of addition of scrap on smelting process parameters

装入方式	炉均冷态返回废钢/t	铁水量/t	提枪平均碳质量分数/%	平均冶炼周期/min	提枪平均温度/°C	入炉合金硅质量分数/%
4	2.5	47	0.60	80	1 687	3.50
5	3.5	47	0.49	71	1 676	3.50
6	4.5	47	0.40	79	1 663	3.50

表6 410S 不锈钢加入 AOD 不同返回废钢量典型炉渣成分对比

Table 6 Comparison of typical slag composition of different return scraps of AOD furnace 410S stainless steels

方式	AOD 终渣成分/%									碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	Cr ₂ O ₃	MnO	Al ₂ O ₃	MgO	FeO	S	P ₂ O ₅	
4	56.02	23.17	0.58	0.11	2.37	6.95	0.59	0.38	0.05	2.42
5	56.08	23.27	0.59	0.12	2.41	6.98	0.58	0.39	0.05	2.41
6	55.99	23.33	0.60	0.11	2.42	6.97	0.59	0.38	0.06	2.40

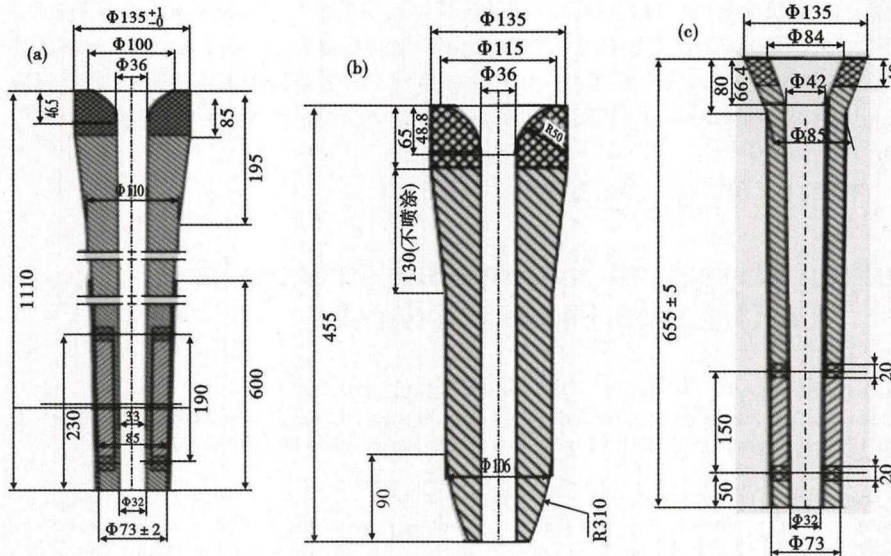


图1 410S 不锈钢连铸时整体水口(a),分体水口上水口(b)和分体水口下水口(c)示意图

Fig.1 Schematic diagram of integral nozzle (a), upper nozzle of split nozzle outlet (b) lower nozzle of split nozzle outlet (c) for casting 410S stainless steel

3.2 连铸机中间包水口改进实践

随着连铸机生产能力的提高,中间包的使用寿命不断提高,但下水口的使用寿命却不能与中间包同步,中间包下水口的使用寿命成为影响生产节奏、连铸机作业率及连铸坯合格率的主要因素之一。参考20世纪90年代末碳钢发展起来的快换中间包水口技术,提供了一种有效的解决方案:如图1(a,b,c)所示,将整体水口改为上下分体水口,利用水口快换机构,多次快速更换下水口,达到下水口与中间包耐火材料使用寿命的最佳匹配,使得中间包钢水收得率、连铸机作业率和质量合格率及其稳定性得到进一步提高,耐火材料消耗进一步降低。

3.3 结果分析

由表3、表4可得,当入炉高碳铬铁硅质量分数在3.50%左右、废钢加入量为3.5 t左右时,炉龄和物料消耗成本等综合效果较好,冶炼周期能控制在71 min左右,将以前AOD第3炉放钢后连铸机开浇改进为AOD

第3炉兑铁40 min后连铸机开浇,减少第一炉410S钢水在LF炉空步等待35 min左右,减少精炼炉加热15 min左右。同时结合水口快换技术实现了410S不锈钢12炉连浇,进一步降低了410S不锈钢生产成本。

4 结论

(1)降低AOD的410S钢精炼周期的思路主要是在保证提枪温度下,降低提枪钢液碳质量分数。

(2)考虑成本在内,当入炉高碳铬铁硅质量分数在3.50%左右、废钢加入量为3.5 t左右时,可以缩短AOD的410S钢精炼周期到71 min左右,提枪温度和提枪碳质量分数分别为1676 ℃和0.49%,并且废钢加入量和提枪温度等综合指标较好。

(3)通过降低AOD的410S钢精炼周期和采用分体水口浇铸,可以将410S不锈钢连浇炉数由6炉提高到12炉,减少第一炉410S钢水在LF空步等待时间35 min,从而降低了410S不锈钢LF炉整体加热时间和LF整体电耗。

参考文献

- [1] 冯文甫. AOD炉冶炼超低碳400系不锈钢的工艺改进[C]//第十七届(2013年)全国炼钢学术会议论文集(A卷). 2013:419-423.
- [2] 李广斌. 缩短AOD炉处理0Cr13C不锈钢的冶炼周期[J]. 中国冶金, 2016,26(7):26-28.
- [3] 胡汉涛. AOD全铁水冶炼不锈钢的配料模拟[J]. 钢铁研究学报, 2008,20(10):6-12.
- [4] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
- [5] 俞海明. 转炉钢水的炉外精炼技术[M]. 北京:冶金工业出版社,2011.
- [6] 潘光忠. 不锈钢生产过程增碳原因分析与对策[J]. 河北冶金,2013,210(6):17-24.
- [7] 陈海燕. 新一代中间包水口快换机构SEM2100的应用实践[J]. 现代冶金,2018,46(1):30-32.

李广斌(1985-),男,工程师,2010年内蒙古工业大学(本科)毕业,不锈钢产品生产研发及管理。

E-mail:858810812@qq.com

收稿日期:2019-02-28