

## 邢钢 400 系低碳易切削不锈钢控碳工艺实践

白李国<sup>1,2</sup> 王欣<sup>1,2</sup> 李广斌<sup>1,2</sup> 冯兴磊<sup>1</sup> 吴广海<sup>1</sup> 杨强强<sup>1</sup>

(1 邢台钢铁有限责任公司,邢台 054027;2 河北省线材工程技术研究中心,邢台 054027)

**摘要** 430F、430FR 等低碳易切削不锈钢成品碳含量 $\leq 0.035\%$ ,由于邢钢采用 60 t AOD-LF-CC 的低成本生产工艺,其中经常采用造价昂贵的低碳合金和增加末期脱碳时间来保证产品碳合格率,相比同系列的低碳 430 铁素体不锈钢,吨钢成本升高达 100 元。通过提高 AOD 脱碳温度和调整过程碱度,实现出钢 $[C] \leq 0.015\%$ 。在出钢和精炼工序采用镁钙材质渣线代替镁碳材质渣线的钢包,并调整精炼炉渣氧化性,实现精炼过程平均增碳量 $\leq 0.007\%$ 。低碳易切削不锈钢整体成品碳含量合格率由 76% 提高到了 $\geq 92\%$ ,实现 AOD-LF-CC 工艺连续生产低碳 430 系列易切削不锈钢。

**关键词** 低碳易切削不锈钢 脱碳温度 过程碱度 钢包材质 炉渣氧化性

## Process Practice on Carbon Control of Low Carbon 400 Series Free Cutting Stainless Steel at Xingtai Steel

Bai Ligu<sup>1,2</sup>, Wang Xin<sup>1,2</sup>, Li Guangbin<sup>1,2</sup>, Feng Xinglei<sup>1</sup>, Wu Guanghai<sup>1</sup> and Yang Qiangqiang<sup>1</sup>

(1 Xingtai Iron and Steel Co Ltd, Xingtai 054027;

2 Hebei Wire and Cable Engineering Technology Research Center, Xingtai 054027)

**Abstract** The carbon content of low carbon free-cutting stainless steels such as 430F and 430FR is  $\leq 0.035\%$ . Because Xingtai Steel adopts the 60 t AOD-LF-CC low-cost production process, it is by using expensive low-carbon alloys and increasing terminal decarburization time to ensure product carbon qualified rate. Compared with the same series of low-carbon 430 ferritic stainless steel, the cost per ton of steel rises by 100 yuan. By increasing AOD liquid decarburization temperature and adjusting process basicity to realize tapping  $[C] \leq 0.015\%$ . In the tapping and refining process, the magnesium-calcium slag line ladle is used to replace the magnesium-carbon slag line ladle, and the oxidizability of the refined slag is adjusted to achieve an average carbon increase of  $\leq 0.007\%$  in the refining process, and the qualified rate of the carbon content of the low-carbon free-cutting stainless steel is increased from 76% to over 92%, to realize the continuously produces low carbon 430 series free cutting stainless steel by AOD-LF-CC process.

**Material Index** Low Carbon Free Cutting Stainless Steel, Decarburization Temperature, Process Basicity, Ladle Material, Slag Oxidation

430F、430FR 等低碳易切削不锈钢碳含量要求 $\leq 0.035\%$ <sup>[1]</sup>,由于邢钢采用 AOD 低成本生产工艺,经常采用昂贵的低碳合金和增加末期脱碳时间来保证产品碳合格率,相比同系列的低碳 430 铁素体不锈钢,吨钢成本升高 100 元,而合格率仅为 76%,远低于其他低碳 430 系列 $\geq 92\%$ 的合格率。并且还存 在碳高改判的炉次,造成石灰、硅铁等的浪费和炉龄的下降。使连浇炉数很难突破 3 炉。

### 1 邢钢 400 系低碳易切削不锈钢生产流程及工艺参数

邢钢 400 系低碳易切削不锈钢 430F 和 430FR 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,连铸机的主要工艺参数见表 1, 430FR 和 430F 不锈钢的化学成分见表 2。

### 2 400 系低碳易切削不锈钢控碳原理分析

根据碳含量在钢水中的脱碳、增碳过程可以分为两个阶段,第 1 阶段为 AOD 脱碳阶段,第 2 个阶段为 AOD 出钢至 LF 精炼过程增碳阶段,增碳阶段

表 1 150 mm × 150 mm 方坯连铸机的主要工艺参数  
Table 1 Main technical parameters of 150 mm × 150 mm billet caster

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

表2 430FR和430F不锈钢成品的化学成分/%

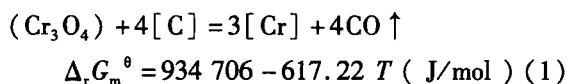
Table 2 Chemical composition of 430FR and 430F stainless steel products/%

钢种	C	Si	Mn	P	S	Cr	N
430FR	≤ 0.035	1.00 ~ 1.50	≤ 1.00	≤ 0.040	≥ 0.20	16.50 ~ 18.50	≤ 0.025
430F	≤ 0.035	≤ 0.75	≤ 1.00	≤ 0.035	≥ 0.25	17.00 ~ 18.00	≤ 0.025

主要为钢包耐材消耗增碳和加热电极消耗增碳。连铸机增碳量均小于0.003%。

### 2.1 脱碳阶段 AOD 炉脱碳保铬分析

当 $[Cr] > 9\%$ 时,不锈钢冶炼过程脱碳保铬反应方程式为:



$$\lg a_{[C]} = 0.75 \lg a_{[Cr]} - 0.25 \lg K^\ominus + \lg p_{CO}$$

$$\lg K^\ominus = -\frac{48\,817}{T} + 32.24$$

脱碳保铬的最低温度是钢液中 $[Cr]$ 与 $[C]$ 氧化

的转化温度,如式(1),提高熔池温度,脱碳保铬反应标准平衡常数 $K^\ominus$ 值增大,从而使钢液 $[C]$ 降低<sup>[2]</sup>。但温度过高会加剧AOD炉衬的侵蚀。同时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。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 $SiO_2$ 很高渣黏度很低时,不利于CO气体顺利排出。但是在碱度太高要增加石灰用量,这样既不利于脱碳,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。这就要求在操作时选择合适的脱碳温度和炉渣碱度<sup>[3]</sup>。

### 2.2 增碳阶段炉衬侵蚀增碳分析

为提高钢包使用效率和降低维护成本,邢钢不锈钢生产时所用钢包材质由镁钙砖钢包改为可以和碳钢通用的低碳镁碳砖钢包,具体钢包材质性能对比如表3,冶炼低碳不锈钢时使用低碳镁碳砖最大的问题是后续钢包精炼过程中的增碳问题<sup>[4]</sup>。

表3 镁钙砖和低碳镁碳砖理化指标

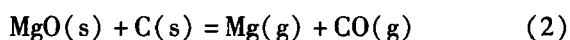
Table 3 Physical and chemical indexes of magnesia-calcium brick and low-carbon magnesia-carbon brick

炉衬材质	化学组成/%					体积密度/ ( $g \cdot cm^{-3}$ )	显气孔率/ %	耐压强度/ MPa	侵蚀指数	热导率/ [ $W \cdot (m \cdot K)^{-1}$ ]
	MgO	CaO	$SiO_2$	$Al_2O_3$	C					
镁钙砖	60~80	15~30	<1	<1	-	3	10	70~80	130	2.5
低碳镁碳砖	>80	-	<1	<1	5~10	2.95~3.05	5.6~6.1	60~65	100~105	4.5~6.5

#### 2.2.1 化学侵蚀

镁碳砖主要由大颗粒MgO骨料和以C为主的基质混合而成,且大颗粒的MgO骨料结构不致密,存在一定的孔隙及杂质成分。

(1)炉渣与钢液交界处。该区域为近钢液面高温区域,在1410~1460℃时,且温度越高反应越容易,镁碳炉衬砖中MgO与C发生如式(2)反应:



反应生成的Mg蒸汽扩散至耐火材料表面,在耐火材料表面被氧化成MgO层。该MgO层与渣中 $SiO_2$ 反应生成 $Mg_2SiO_4$ 层,该物质结构较疏松,易溶解到炉渣中造成钢包耐火材料侵蚀。

(2)炉渣与炉衬交界处。该区域温度较渣-钢界面温度低,且炉渣与炉衬充分接触,炉渣中 $SiO_2$ 与炉衬中MgO进行如式(3)反应:



反应生成的 $Mg_2SiO_4$ 结构疏松,炉渣在炉衬中

浸入深度逐渐增加,同时随着深度的逐渐增加,渣中 $SiO_2$ 浓度逐渐降低,部分未能反应的MgO晶粒被 $Mg_2SiO_4$ 包裹,又因MgO和 $Mg_2SiO_4$ 之间结合强度低,在炉渣的冲刷作用下,易造成侵蚀剥离,进而造成钢包增碳。所以钢包渣线为增碳主要区域<sup>[5]</sup>。

#### 2.2.2 机械性冲刷

如图1所示,LF炉渣与炉衬材质中的C(石墨)

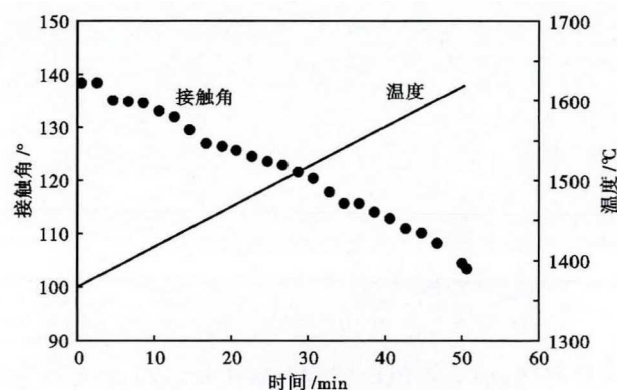


图1 熔渣与石墨间接触角

Fig. 1 Contact angle between slag and graphite

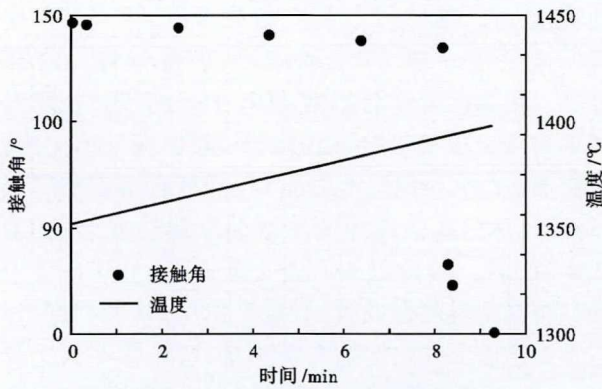


图 2 熔渣与 MgO 间接触角  
Fig. 2 Contact angle between slag and MgO

呈不润湿性,且温度越低越不容易润湿;如图 2 所示,炉渣与炉衬材质中的 MgO 在高于 1 400 °C 时呈完全润湿,由于 Mg-C 砖中微观结构并非均匀一致,由于润湿性的差别,会造成 MgO 富集区熔渣的侵蚀及渗入更严重,在低熔点相比较多的 MgO 骨料颗粒中,低熔点相不仅易溶于渣中,由于炉渣对 MgO 组元较好的润湿性,炉渣也更易渗入晶界之间,造成 MgO 骨料的冲刷、解离。炉衬侵蚀后,镁碳砖中的碳直接与炉渣/钢液接触,造成钢液增碳<sup>[6]</sup>。

### 2.2.3 电极增碳

(1) 侧面高温氧化脱落。精炼通电过程中电极受带有氧化性的渣钢高温及机械侵蚀,侵蚀下来的电极粉(块)进入钢水中,极易导致钢水增碳。

(2) 电极尖端也会发生受高温渣钢的侵蚀和高温脱落。在电极接头附近,易出现电极丝头脱落现象,脱落的电极头进入到钢水中引起增碳。

## 3 生产实践改进

### 3.1 AOD 脱碳温度和碱度工艺调整

为提高脱碳保铬效果,低碳易切削不锈钢脱碳温度由 1 660 ~ 1 680 °C 调整为 1 680 ~ 1 700 °C,  $K^0$  由 1 080.82 提高到 1 399.82, 提高熔池温度,  $K^0$  值增大,从而使钢液 [C] 降低(图 3)。因生产前期为保证钢液 [S] 的吸收率,前期一直采用低碱度操作,二元碱度  $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  1.80 ~ 2.20, 后期为保证脱碳效果二元碱度  $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  调整为 2.20 ~ 2.50, 实现了 AOD 出钢 [C]  $\leq 0.015\%$  (图 4)。

### 3.2 钢包材质改进

生产低碳高铬易切削不锈钢时,从钢渣液面至钢水液面位置,钢包使用镁钙材质耐火砖,其他部位还采用低碳镁碳材质耐火砖,具体位置为距钢包包口位置的第 2 行开始至第 9 行耐火砖材质由低碳镁

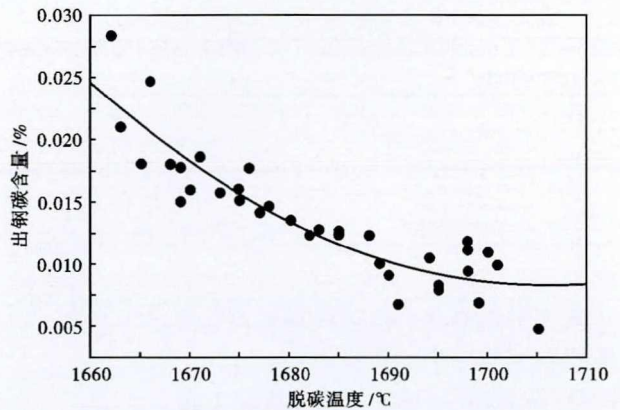


图 3 脱碳温度对出钢碳含量的影响  
Fig. 3 Effect of decarburization temperature on tapping carbon content in liquid

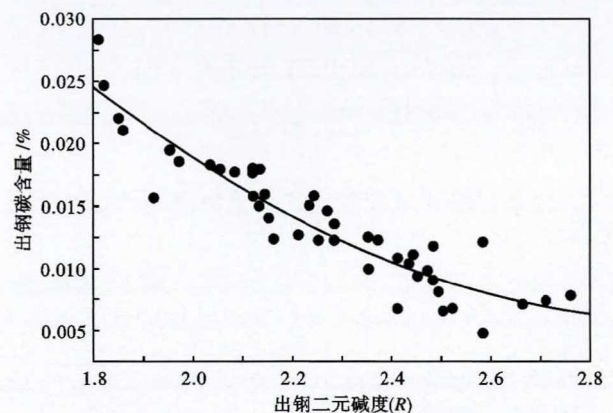


图 4 出钢二元碱度  $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  对出钢碳含量的影响  
Fig. 4 Effect of binary basicity  $R(\text{CaO}/\text{SiO}_2)$  on tapping carbon content in liquid

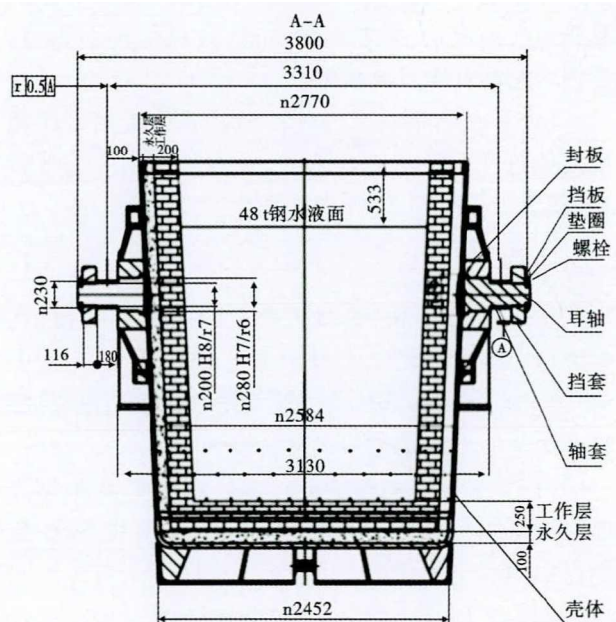


图 5 60 t 钢包砌筑结构示意图  
Fig. 5 Schematic diagram of 60 t ladle brickwork structure

碳材质改为镁钙材质耐火砖,具体如图 5 的 60 t 钢包砌筑结构示意图中阴影部分所示。

### 3.3 钢渣脱氧工艺调整

因 LF 精炼过程在钢液中加入硫铁后,钢渣 [O] 提高,造成钢渣与炉衬反应,将炉衬中 [C] 置换到钢液中,提高钢液成品 [C]。通过在钢渣中加入硅铁粉来控制钢渣氧化性,同时平衡高碱度钢渣对钢液 [S] 吸收率的影响,如表 5 所示。

2019 年 5 月份对 430F 和 430FR 低碳易切削钢进行上述工艺调整,通过调整 AOD 脱碳温度和碱度等生产工艺使 AOD 出钢碳含量控制在 0.015% 以下(图 6),同时通过对钢包渣线部位耐材材质改进和精炼过程工艺调整使精炼过程平均增碳量降低到 0.007% 以下,如图 7 和图 8 所示工艺调整前低碳易切削钢 430F 和 430FR 的成品碳含量命中率均在 65% 以下,工艺调整后命中率均达到 92% 以上,并且实现了 4 炉连浇。2019 年 6 月份首次实现自 2017 年 11 月份后在 430F、430FR 钢种在 AOD 用普通硅铁代替部分低碳硅铁,吨钢降低低碳硅铁消耗 9.18 kg,吨钢降低成本约 46 元。

表 5 430 低碳易切削不锈钢不同阶段典型炉渣变化  
Table 5 Typical slag changes in different stages of 430 low carbon free cutting stainless steel

取样节点	碱度 R (CaO/SiO <sub>2</sub> )	炉渣成分 /%								
		CaO	SiO <sub>2</sub>	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MnO	FeO	Cr <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	S	
AOD 出钢前	2.44	57.41	23.54	6.03	1.36	0.11	0.60	0.31	0.43	
LF 加 FeS 前	2.38	54.44	22.88	8.25	2.56	0.12	0.49	0.24	0.31	
LF 加 FeS 后	2.25	49.97	22.24	9.11	2.29	0.59	1.59	1.68	2.47	
硅铁粉加入后	2.01	49.17	24.46	9.08	2.34	0.46	0.59	0.69	2.79	

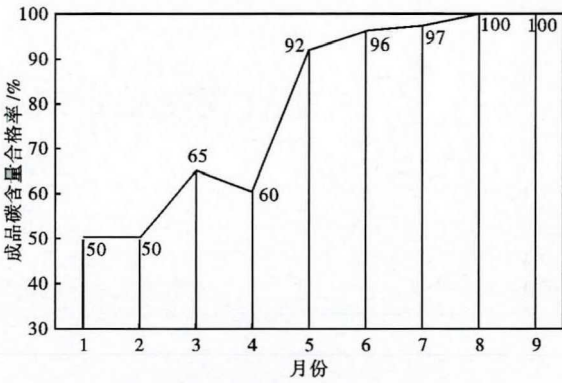


图 7 2019 年 430FR 成品碳含量合格率统计

Fig. 7 Statistic of 430FR finished carbon content pass rate in 2019

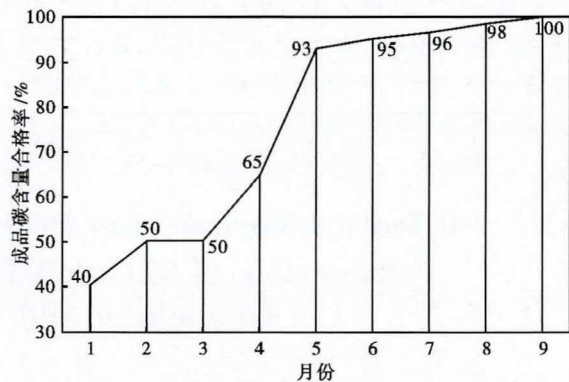


图 8 2019 年 430F 成品碳含量合格率统计

Fig. 8 Statistic of 430F finished carbon content pass rate in 2019

## 4 结论

(1) 控制过程 AOD 脱碳和精炼过程增碳,可实现 AOD 连续生产低碳 430 系列易切削不锈钢。

(2) 通过改进 AOD 脱碳温度和出钢碱度及精炼过程炉渣氧化性和使用镁钙渣线钢包可使低碳易切削不锈钢成品碳含量合格率由 76% 提高到 ≥ 92%, 并实现用普通硅铁代替部分低碳硅铁。

### 参考文献

- [1] 康喜范. 铁素体不锈钢[M]. 北京:冶金工业出版社,2012.
- [2] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2017.
- [3] 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.
- [4] 冯文甫. 镁碳质钢包冶炼 0Cr17 钢种碳含量稳定控制的研究[J]. 河北冶金,2014,225(9):8-11.
- [5] 李树民. 电弧炉炉龄工艺研究与实践[J]. 世界钢铁,2014,10(6):10-14.
- [6] 阮国智. MgO-C 耐火材料对钢水的增碳作用及机理的研究进展[J]. 材料导报,2003,17(7):26-29.

白李国 (1984-),男,博士(北京科技大学),工程师,2008 年河北理工大学(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:2020-01-07

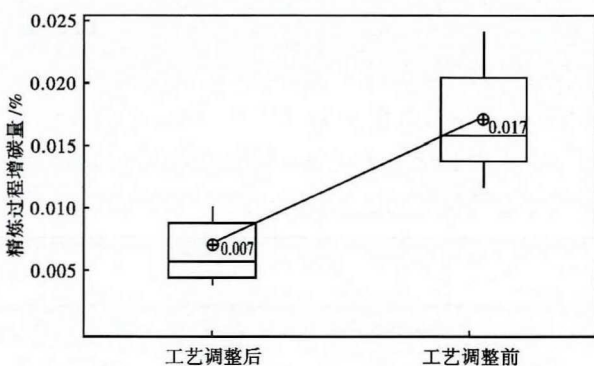


图 6 精炼工艺调整前后精炼过程增碳量对比箱线图

Fig. 6 Comparison of re-carburization amount in refining process before and after refining process adjustment