

400系易切削不锈钢硫铁加入方式优化

姜方¹ 李广斌¹ 白李国¹ 张孟昀¹ 邱永田¹ 冯文甫²
(邢台钢铁有限责任公司 1 不锈钢公司; 2 炼钢厂, 邢台 054027)

摘要 邢钢一步法(脱磷站+60 t AOD+60 t LF)生产400系易切削不锈钢过程中,前期采用硫铁全部在AOD出钢时加入配[S],AOD出钢至上机浇铸过程中钢渣碱度始终处于低碱度范围($R=1.40\sim 1.95$),硫铁消耗较大,钢液氧含量偏高,随着冶炼炉数的增加,炉衬侵蚀严重,影响AOD炉龄和钢坯质量,且钢渣较长时间处于低碱度状态,极易造成钢中[C]含量的上升(尤其是430F、430FR低碳类钢种),很难实现多炉连浇。后期通过优化硫铁加入方式,在LF后期加硫铁,AOD炉渣碱度 $2.0\sim 2.3$,LF炉渣碱度 $1.6\sim 2.0$,缩短低碱度渣处理时间,降低[S]损耗和钢液氧含量及对炉衬侵蚀。使易切削不锈钢[S]的收得率由62%提高到75%,吨钢硫铁消耗下降 2.12 kg ,铸坯皮下气泡等缺陷得到控制。

关键词 易切削不锈钢 硫 碱度 变渣操作

Optimization of Sulphure Iron Addition Mode of 400 Series Free-Cutting Stainless Steel

Jiang Fang¹, Li Guangbin¹, Bai Ligu¹, Zhang Mengyun¹, Di Yongtian¹ and Feng Wenfu²
(1 Stainless Steel Co; 2 Steelmaking Works, Xingtai Iron and Steel Co. Ltd, Xingtai 054027)

Abstract Xinggang one-step method (dephosphorization station + 60 t AOD furnace + 60 t LF furnace) is used in the production of 400 series free cutting stainless steel, in the early stage, in all the sulphur iron was added to the steel in the AOD to fit [S]. The alkalinity of steel slag during the AOD tapping to the upper casting process is always in the low alkalinity range ($R=1.40\sim 1.95$). The consumption of sulphur iron is large, oxygen content in molten steel is high, with the increase of the number of smelting furnaces, the lining erosion is serious, affecting AOD furnace life and billet quality and the steel slag is in a low alkalinity state for a long time, which is easy to cause the increase of [C] content in the steel (especially 430F, 430FR low carbon steel), which is difficult to achieve multi-furnace continuous pouring. In the later stage, by optimizing the method of adding iron sulphide and the alkalinity of slag at different stages, including iron sulphide in LF late period, AOD slag basicity $2.0\sim 2.3$ and LF slag basicity $1.6\sim 2.0$, the treatment time of low alkalinity slag is shortened, the [S] element loss and the oxygen content of molten steel and the erosion of the furnace lining are reduced. The sulfur element absorption rate was increased from 62% to 75%, the sulphur iron consumption per ton of steel decreased by 2.12 kg , and defects such as subcutaneous bubbles in the slab were controlled.

Material Index Free Cutting Stainless Steel, Sulfur, Alkalinity, Change Slag Operation

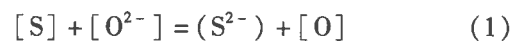
邢台钢铁有限责任公司炼钢厂采用一步法(脱磷站+60 t AOD+60 t LF)生产420F、430F和430FR等易切削不锈钢150 mm×150 mm不锈钢方坯,为了保证切削性能以及硫含量需求,氧含量的控制较其他不锈钢要高,这就造成铸坯的皮下缺陷尤其皮下气孔^[1]、夹杂存在较大的质量风险,在后续轧制过程易出现表面结疤、裂纹等缺陷^[2]。为了降低轧制缺陷,需对活度氧、不同时期的炉渣碱度和浇铸过程的气体含量进行合理控制^[3],减少皮下气泡、夹杂缺陷,提高硫的收得率,减少修磨深度和降低合金消耗,降低生产成本。

本课题主要通过优化AOD、LF冶炼工艺,达到降低活度氧,减少皮下气泡缺陷,并通过浇铸过程的气体控制进一步减少皮下气泡形成因素,提高铸坯质量,减少修磨金属和合金消耗,降低生产成本,改

善产品质量。

1 生产机理分析

在冶炼过程中,硫在熔渣与金属液之间的平衡由下列反应所决定^[4]:



反应(1)在平衡时,平衡常数式为:

$$K_S = \frac{\alpha_{S^{2-}} \cdot \alpha_O}{\alpha_S \cdot \alpha_{O^{2-}}} = \frac{\gamma_{S^{2-}} \cdot \chi_{S^{2-}} \cdot f_O [\%O]}{f_S \cdot [\%S] \cdot \gamma_{O^{2-}} \cdot \chi_{O^{2-}}} \quad (2)$$

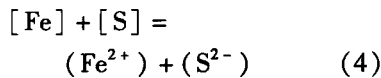
式中: α_i - i 组分的活度; γ_i 、 f_i -均为 i 组分的活度系数; χ_i - i 组分的摩尔分数。

在平衡条件下,硫的分配比为:

$$L_S = \frac{[\%S]}{[\%O]} = K_S' \cdot \frac{\gamma_{O^{2-}} \cdot \chi_{O^{2-}} \cdot f_S}{f_O \cdot [\%O] \cdot \gamma_{S^{2-}}} \quad (3)$$

式中： K_S' - 包含熔渣中硫浓度转换系数在内的平衡常数。

FeS 在金属熔渣间的转移反应：



反应(4)的平衡常数式：

$$K_S = \frac{\alpha_{\text{Fe}^{2+}} \cdot a_{\text{S}^{2-}}}{\alpha_{\text{S}}} = \frac{\gamma_{\text{S}^{2-}} \cdot \chi_{\text{S}^{2-}} \cdot \chi_{\text{Fe}^{2+}} \cdot \gamma_{\text{Fe}^{2+}}}{f_{\text{S}} \cdot [\% \text{S}]} \quad (5)$$

FeS 转移过程中硫的分配比：

$$L_S = \frac{\chi_{\text{S}^{2-}}}{[\% \text{S}]} = \frac{K_S \cdot f_{\text{S}}}{\gamma_{\text{S}^{2-}} \cdot \chi_{\text{S}^{2-}} \cdot \chi_{\text{Fe}^{2+}} \cdot \gamma_{\text{Fe}^{2+}}} \quad (6)$$

由硫的分配比可以看出,在钢液成分确定的条件下,冶炼过程中硫收得率主要受熔渣性质的影响。熔渣性质对平衡常数 K_S 与硫的分配比 L_S 的影响规律^[4-5]可知,随着碱度的升高,可使 $\alpha_{\text{O}^{2-}}$ 增大以及 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低,从而提高 L_S 。又因 S^{2-} 半径比 O^{2-} 半径大,熔渣中带入的 Ca^{2+} 大部分聚集在 S^{2-} 周围,造成 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低。所以,随着碱度的提高,熔渣中所能提供的 $\alpha_{\text{O}^{2-}}$ 和 Ca^{2+} 增多,使得 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低,最终提高 L_S 。随着碱度的提高,熔渣中所能提供的 $\alpha_{\text{O}^{2-}}$ 和 Ca^{2+} 增多,使得 $\gamma_{\text{S}^{2-}}$ 降低,最终提高 L_S ^[6]。

根据上述分析,那么影响硫的收得率的主要因素是温度、碱度和 FeO。其中易切削 430F 不锈钢的化学成分见表 1。

2 试验内容与结果对比

前期单渣工艺为保证硫的吸收率,采用 AOD 低碱度操作,AOD 脱碳阶段加入所有石灰,硫铁在 AOD 出钢时加入配[S],并且 LF 为保证低碱度不配加石灰进行造渣,只进行成分调整和加热,此方法易造成钢渣碱度在 AOD 出钢时加入硫铁后碱度下降,形成低碱度炉渣(具体炉渣成分变化见表 2),由图 1 可知,前期易切削钢生产时,AOD 出钢至上机浇铸过程中,钢渣碱度始终处于低碱度范围($R = 1.40 \sim 1.95$),如图 2 可知,前期易切削[S]的收得率为 60% ~ 65%,平均值为 62%,硫铁消耗在 14.00 ~ 15.45 kg/t 钢,平均值为 14.84 kg/t,但随着冶炼炉数的增加,炉衬侵蚀严重,影响炉龄,并且在前期低碱度控制期间,铸坯的皮下气泡较多(见图 3

表 1 430F 不锈钢的化学成分 / %

C	Si	Mn	P	S	Cr
≤0.04	≤1.00	≤1.25	≤0.040	≥0.25	16.00 ~ 18.00

表 2 优化前 430F 易切削不锈钢 AOD-LF 工序典型炉渣成分

Table 2 Typical slag ingredient of 430F free-cutting stainless steel in AOD-LF process before optimization

取样节点	成分 / %								碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Cr ₂ O ₃	S	
AOD 炉终渣	1.71	50.41	29.42	7.08	1.89	0.462	0.95	0.761	0.051
LF 进站渣样	1.58	47.92	30.39	7.79	1.93	0.599	0.99	0.882	0.055
LF 炉终渣样	1.57	47.99	30.47	8.11	1.95	0.601	1.02	0.781	0.057

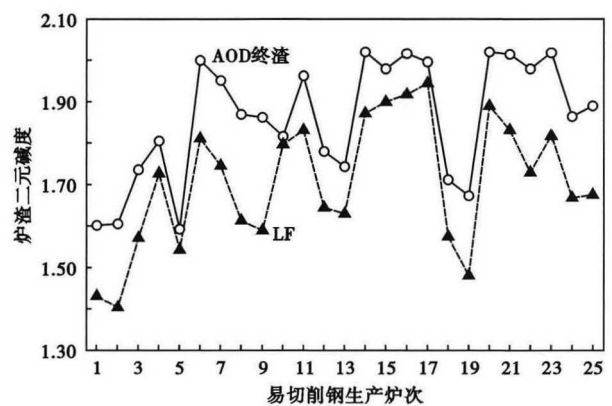


图 1 优化前易切削不锈钢炉次碱度变化统计

Fig.1 Statistics on change of basicity of free-cutting stainless steel heats before optimization

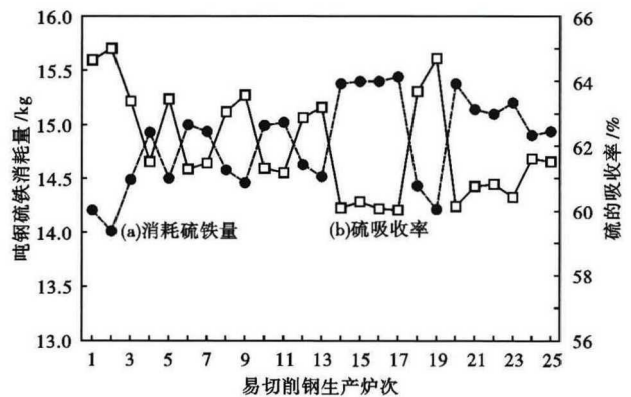


图 2 优化前易切削不锈钢炉次硫铁消耗(a)及硫吸收率(b)
Fig.2 Statistics on iron sulphide consumption (a) and sulphur absorption rate (b) of free-cutting stainless steel heats before optimization

低倍及表皮铸坯图片)。

另一方面,钢渣较长时间处于低碱度状态,极易对镁碳材质钢包耐材造成侵蚀和对 LF 电极进行冲刷而使钢液[C]的上升(尤其是 430F、430FR 低碳类钢种),较难实现多炉连浇,需对硫铁加入方式进行改进。

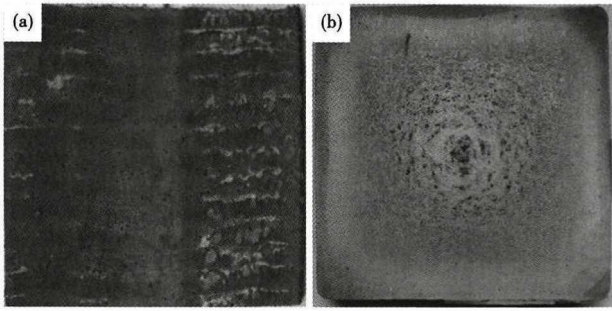


图3 优化前430F不锈钢150 mm × 150 mm铸坯表面(a)和横断面低倍(b)形貌

Fig.3 Morphology of surface (a) and cross section macro-structure (b) of 150 mm × 150 mm casting billet of 430F stainless steel before optimization

通过生产实践,对[S]的吸收率改善主要做了以下两方面工作:(1)改善硫铁加入方式,缩短低碱度渣处理时间,降低[S]元素损耗及对炉衬侵蚀;(2)优化炉渣碱度,降低[S]元素损耗及对炉衬侵蚀。

(1)改善硫铁加入方式。易切削钢生产初期,为提高钢液硫的吸收率,AOD采用低碱度炉渣冶炼,碱度控制范围为1.6~2.0,AOD出钢时加入硫铁进行钢液配硫,LF精炼过程中根据生产过程控制其炉渣碱度范围为1.4~2.0易造成AOD炉衬侵蚀,降低炉龄,同时AOD冶炼阶段炉渣碱度控制(包括渣量)不稳,极易造成钢中硫吸收率不稳定,对于低碳易切削钢增碳严重,后续LF精炼过程中还需补加100~400 m硫线调整成品硫含量,个别炉次甚至补加800 m硫线,显著增加了该类钢种生产成本,降低了产品质量稳定性。对LF精炼过程中钢中游离氧进行检测,游离氧范围为 6×10^{-6} ~ 14×10^{-6} ,平均值为 10×10^{-6} ,全氧含量在 108×10^{-6} 左右。

硫铁加入方式调整后,由之前的AOD出钢前加入硫铁调整为LF进站微调其他成分后加入硫铁,AOD工序按照常规钢种生产方式进行冶炼,出钢炉渣碱度控制在2.0以上,钢水吊运至LF后,先进行加热及合金配加(硫铁除外),后加入石英砂进行变渣操作后,再加入硫铁进行配[S]操作。

(2)优化炉渣碱度。攻关期间,首先对不同工序的炉渣碱度进行了控制,建立易切削钢专用的碱度计算控制用表,通过调整石灰加入量,调整AOD还原后炉渣碱度控制在2.0~2.3,减少对AOD炉衬的侵蚀,同时将AOD出钢时炉渣重量控制在1~1.5 t(量大时进行扒渣)。钢水进入LF精炼工序后,先进行加热取样,对硫元素外合金成分进行调整,进入产品控制要求后,根据炉渣碱度和渣量,加入石英砂进行变渣操作,适当降低炉渣碱度,将上机碱度范围稳定在1.6~2.0(具体炉渣成分见表2),

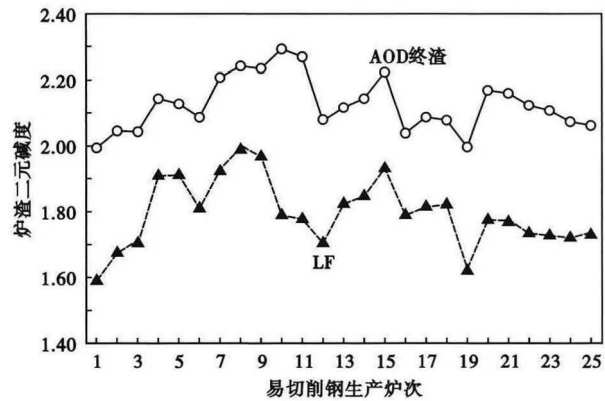


图4 优化后易切削不锈钢炉次碱度变化统计

Fig.4 Statistics on change of basicity of free-cutting stainless steel heats after optimization

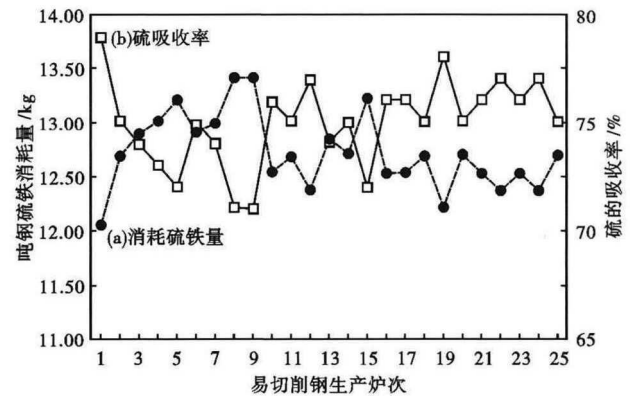


图5 优化后易切削不锈钢炉次硫铁消耗(a)及硫吸收率(b)统计

Fig.5 Iron sulphide consumption (a) and sulphur absorption rate (b) of free-cutting stainless steel heats after optimization

表3 优化后430F易切削不锈钢典型炉渣成分变化

Table 3 Variation of typical slag ingredient of 430F free-cutting stainless steel after optimization

取样节点	成分/%								碱度 (R)
	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	Cr ₂ O ₃	S	
AOD 炉终渣	2.05	52.51	25.56	7.06	2.02	0.332	0.71	0.757	0.045
LF 进站渣样	2.05	52.49	25.59	7.08	1.93	0.355	0.75	0.735	0.042
LF 炉终渣样	1.67	47.84	28.57	8.91	2.53	0.362	0.79	0.792	0.067

然后加入硫铁进行配硫,如硫含量不合控制要求,软吹前补加硫线微调,这样缩短了硫元素在钢液的停留时间,提高了钢液[S]的收得率,硫的吸收率稳定在70%~80%,LF上机游离氧范围为 $5 \times$

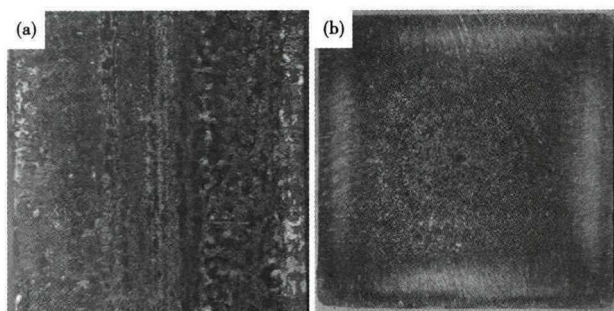


图 6 优化后 430F 不锈钢炉次 150 mm × 150 mm 铸坯表面 (a) 和横断面低倍 (b) 形貌

Fig. 6 Morphology of surface (a) and cross section macro-structure (b) of 150 mm × 150 mm casting billet of 430F stainless steel after optimization

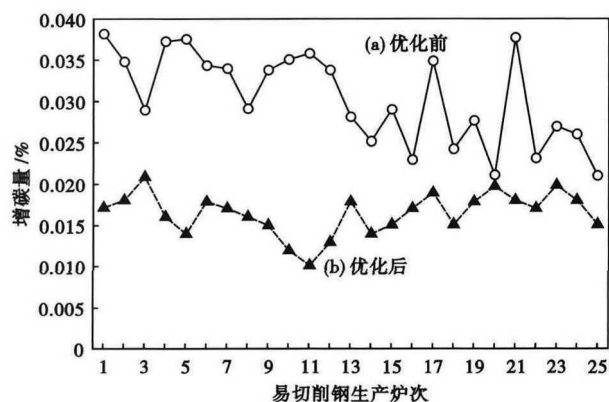


图 7 优化前 (a) 后 (b) 易切削不锈钢处理过程增碳量对比图
Fig. 7 Comparison of recarburization amount in free-cutting stainless steel treating process before (a) and after (b) optimization

$10^{-6} \sim 10 \times 10^{-6}$, 平均值为 7×10^{-6} , 全氧含量在 85×10^{-6} 左右, 优化后具体炉渣碱度变化与硫铁加入量和硫吸收率关系如图 4、图 5 所示, 工艺调整后试验生产阶段, 吨钢硫铁加入量为 12.05 ~ 13.41 kg, 平均硫铁消耗在 12.72 kg/t, [S] 的收得率为 71% ~ 79%, 平均值为 75%。

工艺改进的铸坯表面和横断面低倍形貌见图 6, 后期 400 系易切削不锈钢生产, 明显缩短了低碱度渣冶炼时间, 同时防止 [S] 元素的大量损耗。此方法也改善了硫铁吸收率、降低低碱度炉渣对钢包的长时间侵蚀, 同时降低低碳类易切削钢的增碳程度, 平均增碳量由 0.031% 降低到 0.016%, 具体生产过程增碳对比如图 7。

3 结论

(1) 通过调整硫铁加入方式、优化炉渣碱度等措施, 易切削不锈钢吨钢硫铁消耗平均下降 2.12 kg, 硫的吸收率提高了 13%。

(2) 通过缩短低碱度炉渣冶炼时间, 可以明显降低 400 系低碳类易切削不锈钢的增碳程度和钢液全氧含量, 增碳量平均下降 0.015% , 全氧含量平均下降 23×10^{-6} 。

参考文献

[1] 陈 军, 戴继雄. 改善易切削钢 XY1215 铸坯实物质量[J]. 金属材料与冶金工程, 2016, 25(5): 34-36.
 [2] 谢文荣. 连铸工艺开发 SAE1141 汽车用易切削钢[J]. 钢铁, 2004, 39(12): 29-31.
 [3] 戴永刚. 精炼渣组分对硫易切削钢夹杂物含量和形态的影响[J]. 特殊钢, 2016, 37(1): 61-63.
 [4] 黄希祜. 钢铁冶金原理[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2005: 156-383.
 [5] 刘根来. 炼钢原理与工艺[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004: 9.
 [6] 蒋光辉, 古隆建. 硫易切削钢中硫收得率的影响因素[J]. 钢铁钒钛, 2007, 28(7): 53-54.

姜 方(1984-), 男, 博士(2013年北京科技大学), 工程师, 2007年北京科技大学(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: 2018-11-22

**欢迎全国冶金、机械、耐材及相关
行业在《特殊钢》杂志上刊登工艺设备
和技术、产品研发宣传广告**