

## 低碳铝脱氧 20 钢钢水洁净度控制研究

屠兴矿 徐建飞 周 森 苏振伟 林 俊 万文华

(中天钢铁集团有限公司技术中心,常州 213011)

**摘 要** 为了研究 120 t BOF-LF-RH-160 mm × 160 mm 坯 CC 工艺生产的铝脱氧 20 钢( $\% : 0.13 \sim 0.23\text{C}, 0.17 \sim 0.37\text{Si}, 0.35 \sim 0.65\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 0.020 \sim 0.050\text{Al}$ )中非金属夹杂物的控制技术,对 LF 精炼过程中脱氧剂加入时机进行调整,并对精炼过程中非金属夹杂物类型与夹杂物数量进行分析。结果表明,转炉出钢后采用铝块脱氧,LF 精炼进站非金属夹杂物主要为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,精炼结束前部分夹杂物由  $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ,RH 结束后非金属夹杂物密度  $3 \sim 4$  个/ $\text{mm}^2$ ,铸坯氧含量  $(7.48 \sim 8.18) \times 10^{-6}$ ;而转炉出钢后采用硅锰进行脱氧,精炼结束前采用铝线,精炼过程中夹杂物主要为  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ ,CaO 含量小于 5%,精炼结束非金属夹杂物控制为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,RH 真空处理后,非金属夹杂物密度小于  $1.5$  个/ $\text{mm}^2$ ,铸坯氧含量  $(4.94 \sim 5.53) \times 10^{-6}$ 。因此,针对采用“BOF-LF-RH-CC”工艺流程生产的含铝钢,提出精炼结束前将非金属夹杂物控制为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ,同时运用 RH 真空高效去除夹杂物,以提高钢水的洁净度。

**关键词** 20 钢 铝脱氧 非金属夹杂物  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物去除 洁净度

## Study on Cleanliness Controlling of Liquid of Low Carbon Al-killed 0.20 C Steel

TU Xing-kuang, XU Jian-fei, ZHOU Miao, SU Zhen-wei, LIN Jun, WAN Wen-hua  
(Technology Center, Zenith Steel Group Co Ltd, Changzhou, 213011)

**Abstract** In order to study the control technology of nonmetallic inclusions in aluminum deoxidized 0.20 C steel ( $\% : 0.13 \sim 0.23\text{C}, 0.17 \sim 0.37\text{Si}, 0.35 \sim 0.65\text{Mn}, \leq 0.035\text{P}, \leq 0.035\text{S}, 0.020 \sim 0.050\text{Al}$ ) produced by the process of “120 t BOF-LF-RH-160 mm × 160 mm billet CC”, the adding time of deoxidizer in LF refining process is adjusted, and the type and quantity of nonmetallic inclusions in the refining process are analyzed. The results show that the non-metallic inclusions in steel before LF refining are mainly  $\text{Al}_2\text{O}_3$  with deoxidizing by aluminum block after BOF tapping, and some inclusions change from  $\text{Al}_2\text{O}_3$  to  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$  before LF refining, and the density of non-metallic inclusions is  $3 \sim 4$  / $\text{mm}^2$  after RH, and billet oxygen content is  $(7.48 \sim 8.18) \times 10^{-6}$ . But with liquid deoxidizing by silicon-manganese after BOF tapping, feeding aluminum wire before refining end, the inclusion in refining process is mainly  $\text{MnO} \cdot \text{SiO}_2$ , and the CaO content is less than 5%, billet oxygen content is  $(4.94 \sim 5.53) \times 10^{-6}$ , and the non-metallic inclusion is controlled to  $\text{Al}_2\text{O}_3$  at the end of refining, and after RH vacuum treatment, the density of non-metallic inclusion is less than  $1.5$  / $\text{mm}^2$ . Therefore, for the aluminum-containing steel produced by the “BOF-LF-RH-CC” process, it is proposed to control the non-metallic inclusions to  $\text{Al}_2\text{O}_3$  before the end of refining, and at the same time, RH vacuum is used to remove the inclusions efficiently, so as to improve the cleanliness of molten steel.

**Material Index** 0.20 C Steel, Al killed, Non-Metallic Inclusions,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , Inclusion Removal, Cleanliness

钢中非金属夹杂物对钢材的加工、力学性能及疲劳寿命有着重要的影响,随着现代冶金技术的不断提高,用户对钢材的性能要求越来越严格。许多研究表明,夹杂物是钢材疲劳破坏的主要诱因,而夹杂物的有害程度与其数量、尺寸、变形性能、在钢中的位置等因素密切相关<sup>[1-3]</sup>。

在含铝钢中,Al 元素不仅作为钢水的脱氧剂,同时对钢材的性能有着重要的作用。然而脱氧过程形成的夹杂物的去除问题一直以来成为学者们的研究课题。Reis 等<sup>[4]</sup>的研究结果表明,夹杂物的去除效率与夹杂物固相比例密切相关;杨光维等<sup>[5-7]</sup>同样

发现,固体夹杂物在 RH 处理过程中相比液态夹杂物更易去除。但针对精炼过程中将夹杂物控制为固态的研究较少,传统含铝钢生产工艺中,Al 元素往往在出钢后加入,精炼过程中采用少加铝或不加铝,便于精炼过程中夹杂物碰撞、长大、上浮去除,但是,根据检测结果,在含铝钢精炼过程结束前,往往发现夹杂物由精炼前的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  转变为液态  $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{CaO}$ ,经过真空处理后,去除效率低。本文通过对成分中 Al 元素的含量进行调整,并对精炼过程及 RH 真空处理后夹杂物进行研究,提出提高钢水洁净度的控制思路。

表1 20钢化学成分/%

Table 1 Chemical compositions of 0.20 C steel/%

C	Si	Mn	P	S	Al
0.17~0.23	0.17~0.37	0.35~0.65	≤0.035	≤0.035	0.020~0.050

表2 LF精炼结束炉渣成分

Table 2 Ingredient of slag at end LF refining

方案	炉次	渣的成分/%						碱度(R)
		CaO	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	MgO	FeO	MnO	
1	第1炉	54.81	4.54	30.94	4.54	0.21	0.11	12.07
	第2炉	60.15	6.86	22.30	4.37	0.30	0.17	8.77
2	第1炉	56.83	22.34	10.65	6.15	0.40	0.70	2.54
	第2炉	58.10	20.42	8.51	5.21	0.88	0.46	2.85

## 1 试验方案

为摸索铝脱氧钢水洁净度的控制思路,在20钢生产时开展两种工艺试验方案,20钢化学成分见表1,采用的炼钢工艺为:120 t转炉-LF精炼-RH真空-160 mm×160 mm连铸机;两种方案分别为:(1)方案1,转炉出钢加入铝块脱氧,加入硅锰、硅铁合金合金化,加入500 kg石灰和100 kg萤石造渣,LF精炼过程中采用铝粒和电石进行渣面脱氧,LF结束Al含量控制在0.040%~0.050%;(2)方案2,转炉出钢加入硅锰、硅铁合金化和脱氧,加入500 kg石灰和100 kg萤石造渣,LF精炼过程中采用电石进行渣面脱氧,LF精炼结束前通过喂铝线将Al含量调整到0.040%~0.050%。两种方案LF精炼结束后过RH进行真空处理,真空处理时间均为20 min。

为分析钢中夹杂物类型和对夹杂物数量进行统计,两种方案各取两炉过程样,分别在LF精炼进

站、LF精炼结束、RH破空后取钢水样,并取铸坯样,LF精炼结束时取渣样,其中方案2喂铝线前加取钢水样。采用光谱分析钢水样中化学成分,采用全自动扫描电镜(ASPEX)分析钢水样中夹杂物成分及数量,采用荧光分析法分析炉渣成分。

## 2 试验结果

### 2.1 炉渣成分

表2为两种方案LF精炼结束时两炉炉渣的成分,方案1转炉炉后采用铝块进行脱氧,同时LF精炼过程中采用铝粒电石进行渣面脱氧,脱氧效果较好,LF精炼结束时炉渣碱度在8.77~12.07,炉渣(FeO+MnO)<0.50%;方案2转炉炉后采用硅锰脱氧,LF精炼过程中仅采用电石脱氧,LF精炼结束时炉渣碱度在2.54~2.85,炉渣(FeO+MnO)达1.34%。

### 2.2 精炼过程夹杂物成分变化

图1为方案1两炉钢水精炼过程中夹杂物成分,LF精炼进站钢水中夹杂物以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主,随着LF精炼时间的逐渐增加,钢中夹杂物逐渐由Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>向液态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO转变,LF精炼结束夹杂物中CaO平均含量达19.5%,RH真空结束后夹杂物以液态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO为主。由图1可知,转炉炉后采用铝块进行脱氧,LF精炼过程中钢水Al元素与渣中CaO出现钢渣还原反应,导致钢水中部分夹杂物向Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO转变。

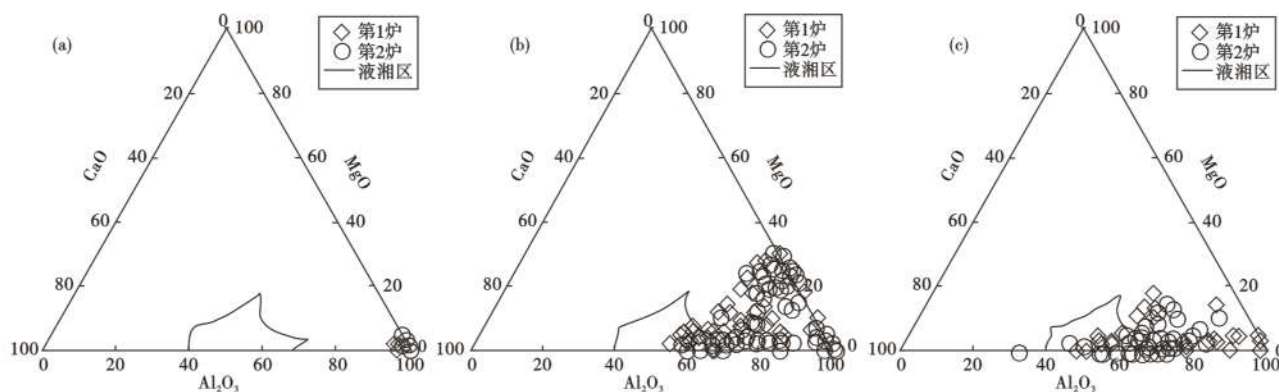


图1 方案1-转炉出钢后用Al块脱氧,LF终点精炼渣22.30%~30.94% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,R 8.77~12.07在LF-RH过程夹杂物成分变化:(a)LF开始;(b)LF终点;(c)RH终点

Fig. 1 Ingredient of inclusions in steel in LF-RH process by scheme No1-after BOF tapping with deoxidizing by Al black, and with LF end refining slag 22.30%~30.94% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,R 8.77~12.07;(a) LF initial;(b) LF end and (c) RH end

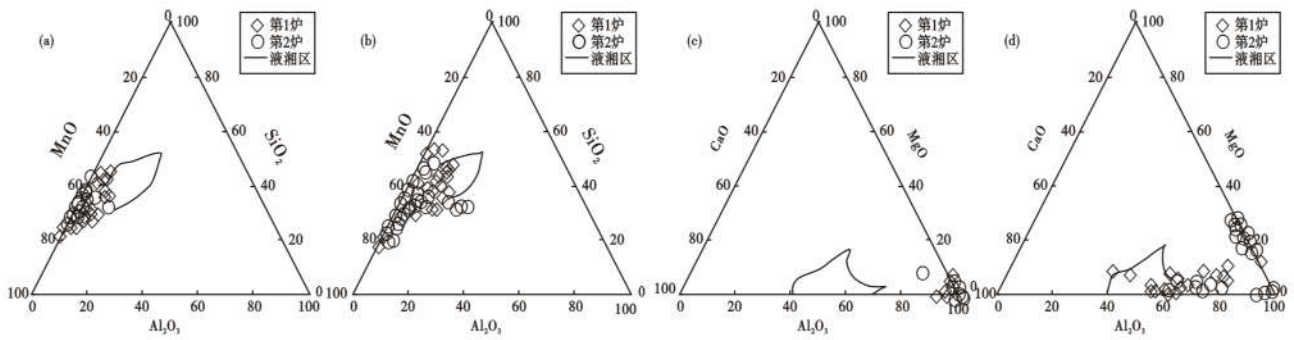


图2 方案2-转炉出钢用SiMn块脱氧,LF精炼结束前喂Al线,LF终点精炼渣8.51%~10.65% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>,R 2.54~2.85在LF-RH过程夹杂物成分变化:(a)LF开始;(b)LF喂Al前;(c)LF终点;(d)RH终点

Fig.2 Ingredient of inclusions in steel in LF-RH process by scheme No2-with deoxidizing by SiMn after BOF tapping, feeding Al wire before LF end, and with LF end refining slag 8.51%~10.65% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, R 2.54~2.85;(a) LF initial;(b) LF before feeding Al;(c) LF end and (d) RH end

图2为方案2两炉钢水精炼过程中夹杂物成分变化,LF精炼进站钢水中夹杂物以MnO·SiO<sub>2</sub>为主,LF精炼除Al元素以外其他化学成分及温度调整到位时,夹杂物仍以MnO·SiO<sub>2</sub>为主,夹杂物中CaO平均含量为3.1%,通过喂线调整Al含量后,钢中夹杂物以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>为主。RH真空循环结束后,少量夹杂物转变为Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO。

2.3 精炼过程夹杂物密度及铸坯氧含量

由图3可知,LF精炼进站、LF精炼结束及RH真空结束钢水中非金属氧化物夹杂的数量密度,其中,夹杂物大于1 μm以上进行统计,方案1和方案2的两炉钢水中夹杂物的密度对比,方案1中LF精炼进站到LF精炼结束夹杂物密度变化不大,经过RH真空处理后,夹杂物密度出现轻微降低趋势,夹杂物密度2.96~3.55个/mm<sup>2</sup>;方案2中LF精炼进站到LF精炼结束夹杂物密度大,但经过RH真空处理后,夹杂物去除效率高,夹杂物密度0.67~0.93个/mm<sup>2</sup>。

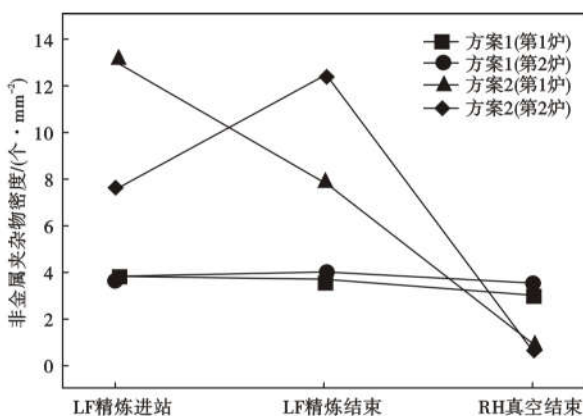


图3 LF精炼过程夹杂物密度

Fig.3 Inclusion density during LF refining process

表3 铸坯氧含量

Table 3 Billet oxygen content

方案	炉次	总氧量/10 <sup>-6</sup>
1	第1炉	8.18
	第2炉	7.48
2	第1炉	5.53
	第2炉	4.94

由于未对精炼过程中钢水中总氧进行分析,为进一步对比方案1与方案2 LF精炼结束得到不同夹杂物类型对RH真空去除效率情况,对图3中两个方案的两炉铸坯进行取样,并对铸坯中总氧量进行分析,结果如表3,方案1中铸坯总氧量(7.48~8.18)×10<sup>-6</sup>,而方案2铸坯总氧量(4.94~5.53)×10<sup>-6</sup>,方案2在RH真空处理过程中夹杂物去除效率更高,该结果与RH真空结束后夹杂物密度相吻合。

2.4 分析与讨论

由图1和图2可知,转炉炉后采用铝脱氧,LF精炼过程中,大部分非金属夹杂物由固态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>逐渐转变为液态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO,主要受钢中Ca来源的影响,而Ca除合金元素带入外,还存在渣钢反应增Ca,即Al还原渣中的CaO,而本文通过转炉脱氧剂调整为硅锰合金,同时控制LF精炼过程中Al的来源,有效的对渣钢反应进行控制,最后通过精炼结束前采用铝线调整钢中Al含量,将钢中非金属夹杂物控制为固态Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>。而RH真空结束后,方案1和方案2中部分夹杂物由Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>向Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO转变,尤其方案1中夹杂物成为以Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>·CaO为主,认为钢水表面在RH浸质管内的炉渣,在RH循环过程中与钢水发生反应,导致部分夹杂物变性处理。

另外,从图3中可以看出,LF精炼结束前将夹

杂物控制为固态  $Al_2O_3$ ，经 RH 真空处理可对固态  $Al_2O_3$  夹杂物进行高效去除，对于固态夹杂物与液态夹杂物在 RH 去除效率问题，邓志银等<sup>[8]</sup>研究表明，RH 精炼前得到液态夹杂物，在钢-渣界面的分离需要很长的时间，在其未彻底分离之前很可能会被钢液流动再次带回钢中，从而难以去除；固态夹杂物在钢-渣界面的分离时间短，更有利于去除。因此，本文中对 LF 精炼结束前对夹杂物类型的控制，以利于通过 RH 真空处理去除夹杂物，从而提高钢水洁净度。

### 3 结论

(1) 针对采用“BOF-LF-RH-CC”工艺流程生产

的低碳铝脱氧 20 钢，转炉炉后采用硅锰脱氧，LF 精炼过程渣面采用电石脱氧，LF 精炼结束前采用铝线将钢中 Al 含量一次性调整形态，精炼结束可将夹杂物控制为固态  $Al_2O_3$ 。

(2) RH 真空处理前夹杂物为固态  $Al_2O_3$ ，真空处理结束后夹杂物密度为  $0.67 \sim 0.93$  个/ $mm^2$ ，铸坯总氧量  $(4.94 \sim 5.53) \times 10^{-6}$ ，而 RH 真空处理前夹杂物为固态  $Al_2O_3$  和液态  $Al_2O_3 \cdot CaO$ ，真空处理结束后夹杂物密度为  $2.96 \sim 3.55$  个/ $mm^2$ ，铸坯总氧量  $(7.48 \sim 8.18) \times 10^{-6}$ 。

#### 参考文献

[1] Akifumi H, Akitoshi M and Seiji N. Composition Change of Inclusions in High Carbon Steel Before and After Addition of Aluminum [J]. ISIJ International, 2021; 61(3): 715-723.

[2] Takanori Y, Takahiro I, Andrey K et al. The Effect of a High Al Content on the Variation of the Total Oxygen Content in the Steel Melt During a Secondary Refining Process[J]. Steel Research International, 2018, 89(2): 1700287.

[3] 姜敏, 王昆鹏, 侯泽旺, 等. 低氧特殊钢中大尺寸 DS 类夹杂物生成机理[J]. 工程科学学报, 2016, 38(6): 780-786.

[4] Bruno H R, Wagner V. B and Antônio C F V. Efficiency of Inclusion Absorption by Slags During Secondary Refining of Steel[J]. ISIJ International, 2014, 54(7): 1584-1591.

[5] Yang G, Wang X, Huang F et al. Transient Inclusion Evolution During RH Degassing[J]. Steel Research International, 2014, 85(1): 26-34.

[6] Xu J, Huang F, Wang X et al. Investigation on the Removal Efficiency of Inclusions in Al-killed Liquid Steel in Different Refining Processes[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2017, 44(6): 455-460.

[7] Li J, Jiang M, He X et al. Investigation on Nonmetallic Inclusions in Ultra-low-oxygen Special Steels [J]. Metallurgical and Materials Transactions: B, 2016, 47(4): 2386-2399.

[8] 邓志银, 周业连, 朱苗勇. 铝镇静钢中夹杂物形态对其去除的影响[J]. 钢铁, 2018, 53(1): 34-40.

屠兴垠(1987-), 男, 2014 年北京科技大学(本科)毕业, 炼钢工艺技术研究。E-mail: 1129966174@qq.com

收稿日期: 2021-08-15

**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**