

· 工艺技术 ·

## 喂钙量与软吹氩对 316L 不锈钢中夹杂物的影响

邢佳<sup>1,2</sup> 杜晓建<sup>1,2</sup> 张欣杰<sup>3</sup> 陈保梁<sup>3</sup> 张利<sup>1,2</sup> 刘承志<sup>2</sup>

(1 中北大学机械工程学院,太原 030051; 2 中北大学特种金属材料与装备研究院,太原 030051;

3 中航上大高温合金股份有限公司,邢台 054800)

**摘要** 采用 20 t 电弧炉-AOD-LF-铸锭的生产工艺制备 316L 不锈钢,并通过 LF 钙处理与底吹氩的方法降低钢中夹杂物含量。其中喂钙量通过经验参数与热力学计算相结合的方法确定。运用金相显微镜及扫描电子显微镜分析了 LF 钙处理比例系数(实际喂 Ca 量/理论喂 Ca 量)1.65 和 2.95 及喂 Ca 后软吹时间对钢锭中非金属夹杂物组成、分布及尺寸的影响。结果表明,316L 不锈钢钙处理比例系数约为 2.95,钙处理后钢液中夹杂物主要为铝酸钙类化合物和硅酸盐类化合物;延长软吹时间对于大尺寸夹杂物的去除效果显著;在 0~25 min,随着软吹时间的延长,钢锭中夹杂物的数量减少,平均尺寸减小,最优的软吹时间为 20 min。

**关键词:** 316L 不锈钢 钙处理 夹杂物 实际喂 Ca 量/理论喂 Ca 量 软吹时间

## Effect of Calcium Addition Amount and Soft Argon Blowing on Inclusions in 316L Stainless Steel

Xing Jia<sup>1,2</sup>, Du Xiaojian<sup>1,2</sup>, Zhang Xinjie<sup>3</sup>, Chen Baoliang<sup>3</sup>, Zhang Li<sup>1,2</sup> and Liu Chengzhi<sup>2</sup>

(1 School of Mechanical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051; 2 Institute of Special Metal Materials and Equipment Research, North University of China, Taiyuan 030051; 3. AVIC Shangda Superalloys Co Ltd, Xingtai 054800)

**Abstract** 316L stainless steel is prepared by the production process of 20 t EAF-AOD-LF-casting ingots, and the inclusion content in steel is reduced by LF calcium treatment and bottom argon blowing. The calcium addition amount is determined by a combination of empirical parameters and thermodynamic calculations. The metallographic microscope and scanning electron microscope are used to analyze the effect of ratio coefficient (actual feeding Ca amount/theory feeding Ca amount) 1.65 and 2.95 and soft blowing time after LF feeding Ca on ingredient, distribution and size of non-metallic inclusions in steel ingots. The results show that the reasonable ratio coefficient of 316L stainless steel after calcium treatment is about 2.95. The inclusions in the molten steel after calcium treatment are mainly calcium aluminate compounds and silicate compounds. Extending the soft blowing time had a significant effect on the removal of large-size inclusions; within 0~25 min, the quantity and average size of inclusions in the steel ingot reduced with extending soft blowing time and the optimal soft blowing time is 20 min.

**Material Index** 316L Stainless Steel, Calcium Treatment, Inclusion, Actual Feeding Ca Amount/Theory Feeding Ca Amount, Soft Blowing Duration

冶炼 316L 不锈钢钙处理后钢中可能存在的夹杂物有  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO}$ 、 $\text{CaS}$  等<sup>[1]</sup>,若 Ca 加入量不足,形成的高熔点钙铝酸盐( $\text{CaO} \cdot 6\text{Al}_2\text{O}_3$ 、 $\text{CaO} \cdot 2\text{Al}_2\text{O}_3$  或  $\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ )难以上浮,会引起水口堵塞;当加入的 Ca 过量时,则形成高熔点的  $\text{CaS}$  或  $(\text{Ca}, \text{Mn})\text{S}$  夹杂,同样会导致水口堵塞,造成塞棒、水口侵蚀。所以钙处理的最佳效果是将钢中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物变性为低熔点的  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$ (熔点 1455 ℃)。

高胜亚等认为高碳铝镇静钢经钙处理后夹杂物主要为  $x(\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3) (1-x)\text{CaS}$  复杂化合物,钢液中 S、O 溶解量较高,导致添加的 Ca 优先与 S 结合生成  $\text{CaS}$ ,而与  $\text{Al}_2\text{O}_3$  反应的 Ca 不足<sup>[2]</sup>。郭靖等建立了  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物变形动力学模型,认为随着

$\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物粒径增加,将其改性为液态钙铝酸盐所需时间也逐渐延长<sup>[3]</sup>。钙处理对无取向硅钢中夹杂物的影响规律研究的结果显示,钙处理后形成的  $3\text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO} \cdot \text{SiO}_2$  夹杂物会被精炼渣吸收去除,大尺寸  $\text{Al}_2\text{O}_3$  夹杂物数量显著降低<sup>[4]</sup>。

### 1 实验方法

316L 不锈钢制备工艺路线为:20 t 电弧炉 + AOD + LF + 模铸 + 空冷。钢水以高于 1650 ℃ 的温度自 20 t 电弧炉转入 20 t AOD 进行冶炼,兑钢前 AOD 炉温应高于 800 ℃,C 含量降至 0.02% 以下后采用硅铁进行还原,控制钢水中 Si 的含量高于 0.15%。钢水经由 20 t 钢包转运至 LF 精炼炉,接入氩气进行搅拌破壳,并按照 2 m/t 喂入铝线。LF 精炼渣成分为:52.67%  $\text{CaO}$ , 9.43%  $\text{MgO}$ , 24.38%  $\text{SiO}_2$ ,

8. 12% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% CaF<sub>2</sub>, MnO、FeO < 1% , 通过添加适量的石灰、萤石和石英砂调整炉渣二元碱度至 1.8 ~ 2.2。分两次加入铝粉进行扩散脱氧。第 1 批在开始送电后以 0.8 kg/t 加入, 炉渣充分变白后氩气强搅拌 5 min, 随后以 0.3 kg/t 加入第 2 批铝粉, 白渣保持时间 20 min。

钙处理钙线的规格为 0.056 kg/m, 含 Ca 量 97.6%, 钙线喂入位置为 LF 1/2 半径处, 与底吹氩透气砖垂直位置接近, 喂线机速度设定为 120 m/min。依据 CaO 和 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 发生的化学反应类型、不同平衡态下的活度以及 316L 不锈钢中各化学成分之间的相互作用系数计算喂钙量。

喂钙后氩气强搅拌 2 min 后进行 25 min 氩气弱搅拌, 分别在软吹 10、20、25 min 后取钢水吊桶样, 每点取两个样, 取样桶插入钢水深度不少于 500 mm。软吹后浇铸成 Φ240 mm 的钢锭, 共进行 4 炉实验, 316L 不锈钢化学成分如表 1 所示。

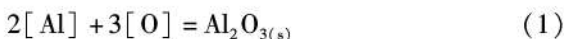
将钢样加工成 30 mm × 20 mm × 13 mm 立方体试样, 经研磨、抛光后在 Leica DM1750M 显微镜下观察金相组织。运用 Zeiss Sigma-300 型场发射扫描电子显微镜对夹杂物的微观形貌及化学成分进行测定。统计尺寸为 < 5、5 ~ 10、10 ~ 15、≥ 15 μm 共 4 个范围的夹杂物数量, 并计算各阶段试样中单位面积夹杂物数量(个/mm<sup>2</sup>)。

## 2 实验结果与分析

### 2.1 喂钙量的计算

钢中大部分 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂在钙处理之前就已经转变成 MgO · Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 尖晶石或 CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 复合氧化物, 单独的 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 夹杂并不常见, 钙处理过程实际上主要是对含镁铝和钙镁铝的夹杂物变性<sup>[5-6]</sup>。

钢液进行钙处理时, 会发生如下化学反应<sup>[7]</sup>:

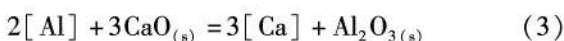


$$\lg K_{(Al_2O_3)} = \lg \frac{a_{(Al_2O_3)}}{a_{[Al]}^2 \cdot a_{[O]}^3} = \frac{61\ 304}{T} - 20.37$$



$$\lg K_{(CaO)} = \lg \frac{a_{(CaO)}}{a_{[Ca]} \cdot a_{[O]}} = \frac{25\ 655}{T} - 7.65$$

由式(1)-(2)式 × 3 可得式(3):



$$\lg K_{Al-Ca} = \lg \frac{K_{Al_2O_3}}{K_{CaO}^3} = \lg \frac{a_{(Al_2O_3)} \cdot a_{[Ca]}^3}{a_{(CaO)}^3 \cdot a_{[Al]}^2} =$$

表 1 试验 316L 不锈钢的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test 316L stainless steel / %

C	Si	Mn	P	S	Al	Cr	Ni	Co	Mo	O
0.011	0.43	0.96	0.033	0.001	0.014	16.34	10.15	0.24	2.09	0.003 2

$$-\frac{15\ 661}{T} + 2.58$$

经测定, 实际生产中钙处理后钢液的温度为 1 550 °C 左右, 因此由式(3)可得:

$$T = 1\ 550\ ^\circ\text{C 时}, \frac{a_{[Ca]}^3}{a_{[Al]}^2} = 5.99 \times 10^{-7} \quad (4)$$

根据式(4)可作出 1 550 °C 下 316L 不锈钢达到 12CaO · 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 平衡态时的 Ca-Al 平衡曲线, 如图 1 所示。可以看出, 随着钢中 Al 含量的增加, 将夹杂物变性为 12CaO · 7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 所需 Ca 量增加。

根据亨利定律可知:

$$a_{Al} = f_{Al}[Al], a_{Ca} = f_{Ca}[Ca] \quad (5)$$

其中,

$$\lg f_{Al} = e_{Al}^O[O] + e_{Al}^S[S] + e_{Al}^P[P] + e_{Al}^C[C] + e_{Al}^{Si}[Si] + e_{Al}^{Mn}[Mn] + e_{Al}^{Al}[Al] + e_{Al}^{Ca}[Ca] \quad (6)$$

$$\lg f_{Ca} = e_{Ca}^O[O] + e_{Ca}^S[S] + e_{Ca}^P[P] + e_{Ca}^C[C] + e_{Ca}^{Si}[Si] + e_{Ca}^{Mn}[Mn] + e_{Ca}^{Al}[Al] + e_{Ca}^{Ca}[Ca] \quad (7)$$

钢液氧活度设定为 0.000 5%。结合表 1、表 2 可算出 316L 钢 Ca、Al 活度系数, 即  $f_{Al} = 1.09$ ,  $f_{Ca} = 0.43$ 。将 Ca、Al 活度系数及式(1)代入式(4)可得:

$$T = 1\ 550\ ^\circ\text{C 时}, \frac{w_{[Ca]}^3}{w_{[Al]}^2} = 9.6 \times 10^{-6} \quad (8)$$

经计算, 可得在 1 550 °C、不同酸溶铝条件下的

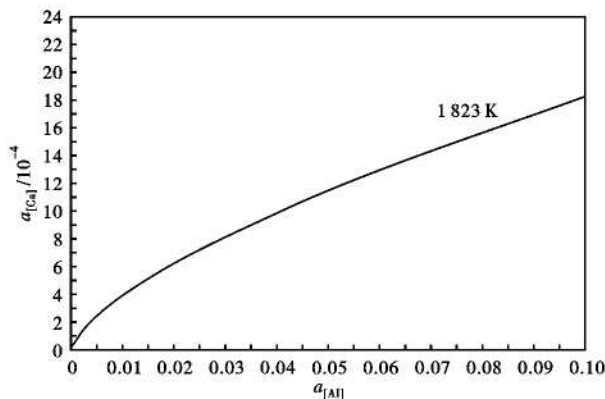


图 1 1 550 °C 下 316L 不锈钢达到平衡态时的 Ca-Al 平衡曲线

Fig. 1 Ca-Al equilibrium curve as 316L stainless steel to reach equilibrium state at 1 550 °C

表 2 钢中各元素与 Al、Ca 的相互作用系数

Table 2 Interaction coefficients of various elements in steel with Al and Ca

项目	C	Si	Mn	P	S	Als	Ca	O
$e_{Al}^j$	0.091	0.056	0.012	0.033	0.035	0.043	-0.047	-1.98
$e_{Ca}^j$	-0.34	-0.097	-0.1	-	-1.33	-0.072	-0.002	-445

最小熔钙量,结果列于表 3。计算过程中,纯钙线收得率设定为 13%。

由于 Ca 加入钢液中容易气化损耗,按理论熔钙量计算容易造成喂钙量不足,需要引入实际 Ca 喂入量比例系数进行校正,喂钙量按照式(9)进行计算:

$$\text{喂钙量}(m) = \text{理论熔钙量} \times \text{钢水质量}(g) \times \text{比例系数} \div [\text{钙线规格}(g/m) \times \text{含钙量} \times \text{钙收得率}] \quad (9)$$

在式(9)中,比例系数表示实际 Ca 喂入量与理论 Ca 喂入量的比值。根据实际生产经验,选取比例系数 1.65 与 2.95,分别对 4 炉 316 不锈钢进行钙处理实验,具体喂钙量情况如表 4 所示。

表 3 316L 不锈钢钙处理最小熔钙量

Table 3 Minimum molten calcium in 316L stainless steel by calcium treatment

Als/%	钢液量/t	最小熔钙量/%	喂钙线总长度/m	单位喂钙线量/(m·t <sup>-1</sup> )
0.01	20	0.000 99	45.8	2.3
0.02	20	0.001 57	72.9	3.6
0.03	20	0.002 05	95.2	4.8
0.04	20	0.002 49	115.7	5.8

## 2.2 喂钙量对夹杂物的影响

在钙处理后 316L 不锈钢吊筒铸样进行夹杂物评级,结果如表 5 所示。1#、2#试样中不仅存在 B 细夹杂物超过 2.0 级、B 粗夹杂物超过 2.5 级的情况,而且还出现了 A 类夹杂物。3#、4#试样中仅一个位置处的 B 粗夹杂物评级结果为 1.5 级,其余位置全部

表 4 316L 不锈钢实际喂钙量

Table 4 Actual calcium addition amount in 316L stainless steel

炉号	Als/%	比例系数 (实际喂 Ca/理论喂 Ca)	喂钙线长度/ m	加 Ca 量/ (kg·t <sup>-1</sup> )
1#	0.02	1.65	80	0.219
2#	0.03	1.65	105	0.287
3#	0.01	2.95	80	0.219
4#	0.01	2.95	80	0.219

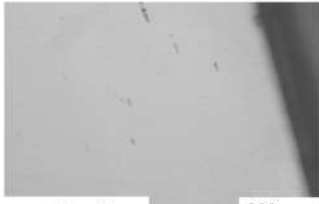

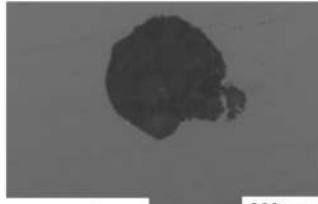


表 5 316L 不锈钢钙处理后夹杂物评级结果/级

Table 5 Evaluation results of inclusions in 316L stainless steel after calcium treatment/rating

炉号	位置	A		B		C		D		Ds
		细	粗	细	粗	细	粗	细	粗	
1#	边部	0	1	1.5	1.5	0	0	3.0	1.0	2.5
	1/2R	0	0	0.5	0	0	0	1.5	0.5	0.5
	中心	0	0	2.0	2.0	0	0	1.5	1.0	1.5
2#	边部	0	0	1.0	0	0	0	1.5	0.5	0
	1/2R	0	0	1.0	0	0	0	2.0	0.5	0.5
	中心	0.5	0.5	1.5	2.5	0	0	2.0	0.5	1.5
3#	边部	0	0	1.0	1.0	0	0	2.0	0.5	0
	1/2R	0	0	1.0	0.5	0	0	2.0	0.5	0
	中心	0	0	1.0	1.0	0	0	2.0	0.5	0
4#	边部	0	0	1.0	1.0	0	0	2.0	0	0.5
	1/2R	0	0	1.0	1.0	0	0	1.5	0	0.5
	中心	0	0	1.0	1.5	0	0	2.0	0.5	0.5

表 6 316L 不锈钢 1#~4# 试样钙处理后的夹杂物金相特征

Table 6 Metallographic characteristics of inclusions in 1# to 4# specimens of 316L stainless steel after calcium treatment

炉号	B 类夹杂物金相特征	D 类夹杂物金相特征	Ds 类夹杂物金相特征
1#、2#	 B粗2.0级 200 μm	 D细2.0级 200 μm	 Ds 2.5级 200 μm
3#、4#	 B粗1.0级 200 μm	 D细1.5级 200 μm	

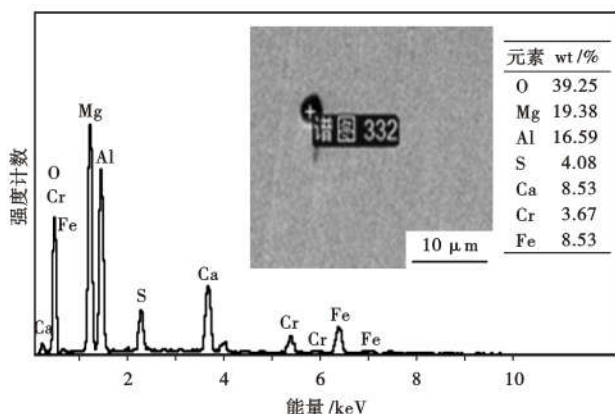


图 2 316L 不锈钢钙处理后试样 SEM + EDS 分析结果  
Fig. 2 SEM + EDS analysis results of 316L stainless steel specimen after calcium treatment

小于等于 1 级,说明 B 类夹杂物数量得到有效降低。于此同时,D 细夹杂物的评级均达到 2.0 级,说明钙处理在降低 B 类夹杂物数量的同时使得 D 类夹杂物的数量增多。1#~4#试样的夹杂物金相特征分析结果列于表 6 所示。可以看到,1#、2#试样中存在 B 系夹杂物超过 1.5 级的情况,个别位置出现大尺寸 Ds 夹杂物。3#、4#试样中 B 类夹杂物含量均低于 1.5 级,D 类夹杂物大多在 2.0 级水平,且没有发现 Ds 类夹杂物。

对 316L 不锈钢钙处理后,其中具有代表性分析结果列于图 2 所示。将 1#~4#试样夹杂物成分分析结果列于表 7。钙处理目标产物  $12\text{CaO} \cdot 7\text{Al}_2\text{O}_3$  低熔点钙铝酸盐中,Al、Ca 的原子计量比为 1.17 : 1,而从表 7 中的统计结果来看,1#、2#试样中夹杂物平均 Al : Ca 原子比高于 1.17 : 1,而 3#、4#试样中夹杂物平均 Al : Ca 原子比在 1.17 : 1 附近。这说明比例系数为 1.65 时,喂钙量偏低,导致钙处理过程中钙的溶解量偏少,钙处理效果受到影响;而当比例系数提高至 2.95 时,钙处理导致  $\text{Al}_2\text{O}_3$  改性成为低熔点化合物,便于上浮去除,因此喂钙量适宜。

### 2.3 软吹氩对夹杂物的影响

#### 2.3.1 软吹时间对钢中夹杂物尺寸分布的影响

在 LF 精炼过程中,通过自由上浮作用并不能实现对夹杂物的有效去除<sup>[8-9]</sup>,因此软吹氩操作对于非金属夹杂物的去除有着至关重要的影响。

表 7 316L 不锈钢钙处理试样夹杂物成分分析结果  
Table 7 Analysis result of chemical composition of inclusions in calcium treated 316L stainless steel specimen

炉号	夹杂物中元素分数 /%								
	O		Ca		Al		Mg		Al/Ca 原子比
	质量 分数	原子 分数	质量 分数	原子 分数	质量 分数	原子 分数	质量 分数	原子 分数	
1#	39.3	55.4	8.5	4.8	16.6	13.9	19.4	18.0	2.90
	31.3	52.7	13.6	9.1	18.5	18.4	1.0	1.2	2.02
	42.3	57.7	7.2	3.9	7.8	6.2	28.1	24.9	1.59
	52.5	65.9	4.6	2.3	34.1	25.3	4.9	4.1	1.11
2#	32.8	52.5	16.9	10.8	20.1	19.9	3.5	3.7	1.84
	51.1	63.9	1.7	0.8	38.2	28.3	6.9	5.7	35.38
	37.6	56.7	6.8	4.1	19.3	17.3	9.2	9.2	4.22
	40.4	59.3	24.7	14.5	19.3	16.8	1.7	1.6	1.16
3#	41.7	57.9	18.2	10.1	14.2	11.7	15.8	14.4	1.16
	36.8	57.0	21.3	13.2	16.2	14.9	1.6	1.6	1.13
	46.5	63.9	28.6	15.7	22.3	18.2	1.8	1.6	1.16
	40.8	59.5	23.7	13.8	20.1	17.4	2.0	1.9	1.26
4#	20.5	40.8	12.8	10.2	10.6	12.5	2.0	2.6	1.23
	43.5	61.3	31.0	17.5	25.1	20.9	-	-	1.19
	43.9	60.6	12.9	7.1	9.3	7.7	16.5	15.0	1.08
	45.5	61.9	22.3	12.1	24.3	19.6	4.9	4.4	1.62

表 8 可以看出,夹杂物尺寸控制范围存在一定的波动,随着软吹时间的延长,钢中夹杂物的平均直径先逐渐减小,达到 25 min 后有所增加;尺寸大于 15 μm 的夹杂物比例随软吹时间延长显著降低。当软吹时间为 10 min 时,尺寸小于 5 μm 的夹杂物比例在 59.4%~79.0%,尺寸在 5~10 μm 的夹杂物比例为 10.9%~31.6%,大于 10 μm 的夹杂物比例为 9.0%~20.7%;当软吹时间达到 20 min 以后,尺寸小于 5 μm 的夹杂物数量占总体的 77.2%~87.8%,尺寸为 5~10 μm 以及大于 10 μm 的夹杂物仅占总体的 7.6%~13.9%和 4.6%~12.0%。

软吹过程能够促进小尺寸夹杂物的聚集,并能

表 8 软吹时间对 316L 不锈钢夹杂物尺寸分布的影响

Table 8 Effect of soft blowing time on distribution of inclusion size in 316L stainless steel

炉号	软吹时间/ min	夹杂物尺寸分布百分比 /%				平均直径/ μm	单位面积夹杂物 / (个 · mm <sup>-2</sup> )
		<5 μm	5~10 μm	10~15 μm	≥15 μm		
1#	0	43.6	20.5	28.4	7.5	4.95	56
	10	57.9	21.4	16.7	4.0	2.98	49
	20	77.2	10.8	11.3	0.7	2.31	33
	25	75.8	12.3	10.8	1.1	2.33	32
2#	0	56.5	25.3	15.9	2.3	3.34	57
	10	70.0	20.1	9.3	0.6	2.69	50
	20	78.8	13.9	6.9	0.4	2.24	31
	25	77.1	13.1	8.8	1.0	2.31	30
3#	0	49.3	24.1	23.1	3.5	4.91	63
	10	59.4	31.6	7.3	1.7	2.75	55
	20	85.9	9.5	4.1	0.5	2.52	30
	25	84.9	11.3	2.9	0.9	2.58	27
4#	0	49.4	25.4	19.2	6.0	3.63	52
	10	68.6	20.2	10.2	1.0	2.37	44
	20	85.8	8.2	5.5	0.5	1.83	30
	25	80.1	9.9	9.3	0.7	1.89	29

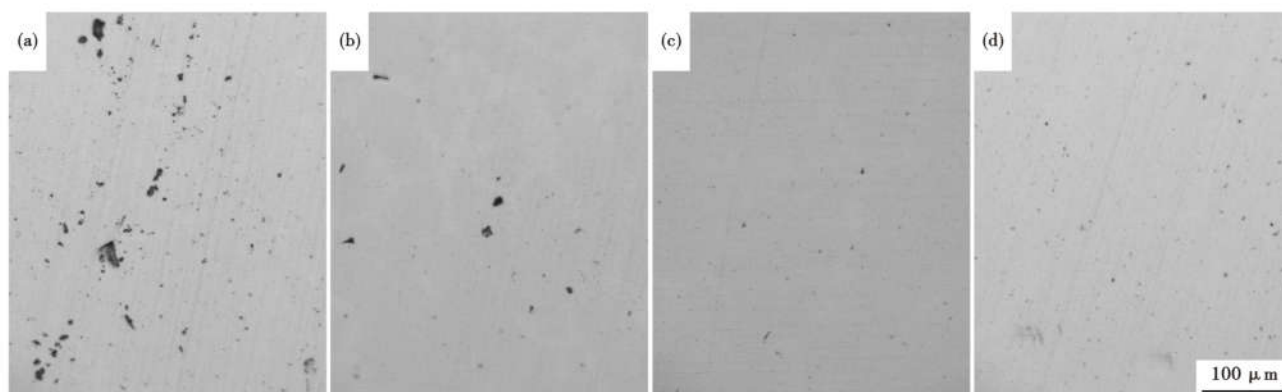


图3 3<sup>#</sup>炉次软吹前(a)、软吹10 min(b)、20 min(c)和25 min(d)后316L不锈钢中夹杂物形貌和分布

Fig.3 Morphology and distribution of inclusions in No.3 heat 316L stainless steel before soft blowing (a), and after soft blowing 10 min (b), 20 min (c) and 25 min (d)

促进大尺寸夹杂物的上浮。3<sup>#</sup>、4<sup>#</sup>试样夹杂物数量随软吹时间的变化情况(表8)可以看出,尺寸>10 μm的夹杂物数量密度在软吹20 min后即可维持在5%以下。

### 2.3.2 软吹时间对夹杂物形貌及组成的影响

如图3所示,3<sup>#</sup>炉次软吹前,试样中存在大量的5~25 μm点状、链状、尖角状等夹杂物;软吹10 min后,试样中的夹杂物数量明显降低,尺寸范围在3~9 μm;软吹20 min后,试样中超过6 μm的夹杂物几乎消失,且夹杂物数量明显减少。

由于LF精炼阶段进行了多次铝扩散脱氧,因此钙处理前钢液中含有大量的尖角状Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类夹杂物。经钙处理后,钢中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类夹杂物被改性为铝酸钙化合物。铝酸钙化合物熔点较低,容易在精炼过程中上浮去除,因此钙处理显著降低了Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类夹杂物的数量。此外,LF精炼阶段将炉渣碱度控制在1.8~2.2,有利于降低钢液中硅酸盐类夹杂物尺寸。SEM检测结果证实,软吹前后钢液中的夹杂物种类没有明显变化,均以钙铝酸盐和硅酸盐为主,但夹杂物平均尺寸由软吹前的4 μm左右降至软吹后的2 μm左右,夹杂物平均尺寸明显降低。

综合考虑实验结果,认为316L不锈钢在20 t钢包中钙处理后软吹时间控制在20 min为最优。

## 3 结论

(1)当比例系数(即实际Ca喂入量与理论Ca喂入量的比值)为1.65时,316L不锈钢中B类夹杂物评级存在超过1.5级的情况,成分分析结果显示夹杂物中Al、Ca原子比高于12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>低熔点钙铝酸盐,钙喂入量不足;当比例系数提高至

2.95时,B类细、粗夹杂物评级结果全部低于1.5级,钙处理效果良好,钙喂入量合理。

(2)软吹氩时间在0~25 min内增加时,316L不锈钢中夹杂物的总体数量逐渐降低,平均尺寸逐渐减小,尺寸大于15 μm的夹杂物在软吹20 min后几乎消失,此时,尺寸小于5 μm的夹杂物占总体数量的77.2%以上。综合分析软吹氩过程中夹杂物的演变情况可以得出,最优的软吹时间是20 min。

## 参考文献

- [1] Basu B, Choudhary S K and Girase. Nozzle Clogging Behaviour of Ti-Bearing Al-Killed Ultra Low Carbon Steel[J]. ISIJ International, 2004, 44(10):1653-1660.
- [2] 高胜亚,姜敏,侯泽旺,等.钙处理对高碳铝镇静钢中夹杂物的影响[J].钢铁,2017,52(4):25-30.
- [3] 郭靖,程树森,程子建,等.铝镇静钢钙处理后氧化铝夹杂物变性动力学模型[J].北京科技大学学报,2014,36(4):424-431.
- [4] 朱诚意,黄罗翼,罗小燕,等.钙处理对成品无取向硅钢夹杂物特性的影响[J].钢铁研究学报,2020,32(2):32-43.
- [5] 李强,王新华,李海波,等.低合金高强度钢中非金属夹杂物的改性[J].北京科技大学学报,2012,34(11):1262-1267.
- [6] 杨叠,王新华,秦颐鸣,等. BOF-LF-CSP工艺低碳铝镇静钢精炼过程的夹杂物变化[J].北京科技大学学报,2013,35(5):580-585.
- [7] 龚坚,王庆祥.钢液钙处理的热力学分析[J].炼钢,2003,19(3):56-59.
- [8] Chiang H T, Lehner T and Kjellberg B. Fluid Flow in Ladles-Experimental Results[J]. Scandinavian Journal of Metallurgy, 1980, 9(3):105-110.
- [9] 薛正良,李正邦,张家雯.钢的脱氧与氧化物夹杂控制[J].特殊钢,2001,22(6):24-27.

邢佳(1986-),男,博士(2019年太原理工大学),讲师,2004年东北林业大学(本科)毕业,不锈钢夹杂物研究。  
E-mail: xingjia@nuc.edu.cn

收稿日期:2021-07-12