

脱磷铁水-110 t AOD-LF-CC-热轧流程 304 不锈钢中夹杂物的演变

陈超¹ 侯海滨¹ 成国光¹ 潘吉祥² 李岩² 潘伟²

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083; 2 酒泉钢铁集团公司,嘉峪关 735100)

摘要 通过扫描电镜、能谱仪和电解分析研究了在 110 t AOD-LF-中间包-160 mm 板坯-连铸-热轧板卷生产过程 304 不锈钢($\% : 0.03 \sim 0.04\text{C}, 0.39 \sim 0.41\text{Si}, 1.20 \sim 1.23\text{Mn}, 0.014 \sim 0.016\text{P}, 0.001 \sim 0.002\text{S}, 7.95 \sim 8.00\text{Ni}, 18.06 \sim 18.20\text{Cr}, 0.003 \sim 0.004\text{Al}, 0 \sim 0.002\text{Ti}$)中夹杂物类型、形貌和成分。结果表明,在每一生产阶段都出现 5 ~ 10 μm 球形 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型夹杂,同时在 AOD 出钢过程产生 20 μm $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 型夹杂,LF 过程去除一部分 $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 夹杂,中间包和正常浇铸的铸坯中很少出现;但两炉连浇的铸坯易出现 $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 夹杂,热轧板中 $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 夹杂尺寸 $\leq 5 \mu\text{m}$ 。电解分析结果表明,两炉连浇铸坯中夹杂物数量(4.65 mg/10 kg)比正常浇铸的铸坯(3.08 mg/10 kg)增加了 51%。

关键词 304 不锈钢 脱磷铁水-AOD-LF-CC-热轧 夹杂物演变

Evolution of Inclusions in Stainless Steel 304 during Dephosphorized Hot Metal-110 t AOD-LF-CC-Hot Rolling Process

Chen Chao¹, Hou Haibin¹, Cheng Guoguang¹, Pan Jixiang², Li Yan² and Pan Wei²

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Jiuquan Iron and Steel Group Co, Jiayuguan 735100)

Abstract Type, morphology and ingredient of inclusions in stainless steel 304 ($\% : 0.03 \sim 0.04\text{C}, 0.39 \sim 0.41\text{Si}, 1.20 \sim 1.23\text{Mn}, 0.014 \sim 0.016\text{P}, 0.001 \sim 0.002\text{S}, 7.95 \sim 8.00\text{Ni}, 18.06 \sim 18.20\text{Cr}, 0.003 \sim 0.004\text{Al}, 0 \sim 0.002\text{Ti}$) during 110 t AOD-LF-tundish-160 mm slab casting-hot rolling strip coil process have been studied by SEM, energy dispersive X-ray spectrometer and analysis by electrolysis. Results show that the 5 ~ 10 μm spheroidal $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ type inclusions occur in each steelmaking process, while the 20 μm $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ inclusions form in tapping process of AOD, part of which is removed in LF refining process, and they less occur in liquid in tundish and in normal casting slab, but the $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ inclusions easily occur in two heats sequence-casting slab, the size of $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ inclusion in hot-rolled strip coil is $\leq 5 \mu\text{m}$. Electrolytic analysis results show that the inclusion amount in two heats sequence-casting slab (4.65 mg/10 kg) increases by 51% as compared with that in normal casting slab (3.08 mg/10 kg).

Material Index Stainless Steel 304, Dephosphorized Hot Metal-AOD-LF-CC-Hot Rolling, Inclusion Evolution

不锈钢中非金属夹杂物的存在破坏了不锈钢基体组织的连续性,不仅对不锈钢的耐腐蚀性能和力学性能有较大影响,还会影响冷轧产品表面的光洁度和美观^[1]。304 是奥氏体不锈钢的代表性品种,尽管对其夹杂物的研究已有较多报道^[2-6],对 AOD 冶炼、精炼过程以及连铸过程中夹杂物的变化研究和机理解释较为深入,但是系统地研究其生产过程中夹杂物的变化规律尚未见报道。

1 生产条件和研究方法

钢厂 304 不锈钢脱磷铁水($\% : 3.0 \sim 3.8\text{C}, 0.2 \sim 0.5\text{Mn}, \leq 0.015\text{P}, \leq 0.040\text{S}$, 温度 1 280 ~ 1 350 $^{\circ}\text{C}$) 在 110 t 的 AOD 中进行脱碳和脱硫,然后经 110 t 的 LF 精炼后上连铸机浇铸。连铸机为单流立弯式,拉速 1.0 ~ 1.1 m/min,浇铸温度 1 503 $^{\circ}\text{C}$,铸坯尺寸为 160 mm 厚 \times 1 200 mm 宽。生产过程取样有:

(1) 分别在 AOD 结束、LF 结束及中间包浇铸中期取钢样和渣样进行夹杂物形貌、成分和钢的化学成分分析。

(2) 沿拉坯方向在某浇次对应于两炉连浇处、正常浇铸处的连铸坯分别截取长度约 200 mm 的一块断面试样,对于铸坯试样,沿着宽度方向从铸坯中心切成两段,进行夹杂物形貌和成分以及钢的化学成分分析。

(3) 在热轧板上按照对应炉号截取 100 mm \times 宽度 \times 厚度的试样带,进一步加工成为 12 mm \times 12 mm \times 板卷厚度的试样,进行夹杂物分析。

2 结果及分析

2.1 生产过程洁净度变化

由表 1 可见,在 LF 处理过程中 T[O] 的降低率高达 91.4% (AOD 350×10^{-6} , LF 30×10^{-6})。相比为同样工艺生产的 409L 钢^[7] 的 54.9% (AOD $51 \times$

10^{-6} , LF 23×10^{-6}) 和同样工艺生产的 430 钢^[8]的 53.6% (AOD 110×10^{-6} , LF 51×10^{-6}), 表明 LF 精炼过程对夹杂物的去除效果明显。在中间包处理过程中总氧含量略有降低 (28×10^{-6}), 而在铸坯中心内弧表面和厚度中心的总氧含量分别为 23×10^{-6} 和 20×10^{-6} 。

2.2 AOD-LF-中间包-连铸-热轧过程夹杂物变化规律

304 不锈钢在 AOD-LF-中间包-连铸-热轧过程中的夹杂物可以分为两类, 即 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型和 $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 型。各个阶段的典型夹杂物的形貌及成分如图 1 所示, 夹杂物的成分对比见图 2。图 2 中左下角为 $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$, 右侧区域为 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型夹杂物成分分布。

在 AOD 冶炼末期, 钢液中夹杂物的主要类型为

表 1 AOD-LF-中间包 304 不锈钢钢液的化学成分 / %
Table 1 Analysis of liquid of stainless steel 304 in AOD, LF and tundish process / %

取样位	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Al	Ti	N	T[O]
AOD	0.03	0.41	1.21	0.014	0.001 3	7.95	18.06	0.004	-	0.032 5	0.035 0
LF	0.04	0.39	1.23	0.016	0.001 5	7.99	18.20	0.003	0.002	0.038 1	0.003 0
中间包	0.04	0.41	1.20	0.016	0.001 3	8.00	18.14	0.003	0.002	0.038 2	0.002 8

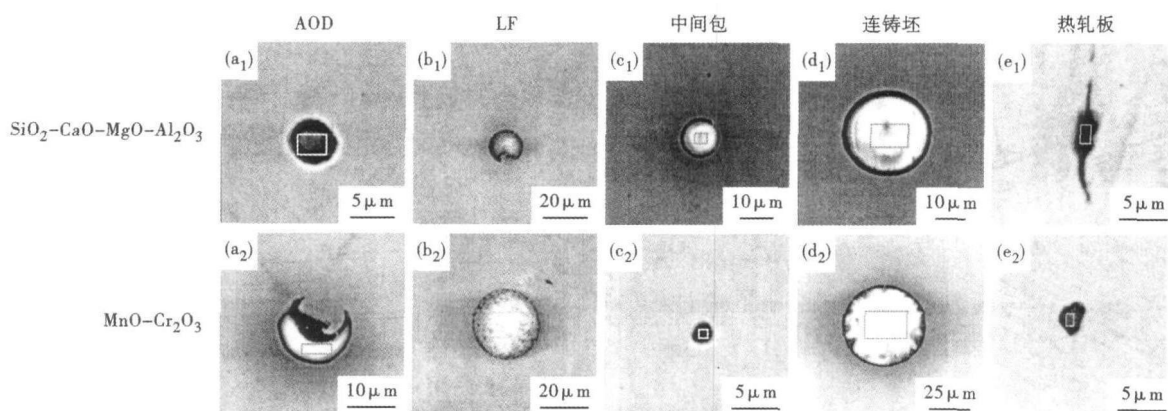


图 1 各阶段典型夹杂物形貌和化学组成: (a₁, b₁, c₁, d₁, e₁) $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型; (a₂, b₂, c₂, d₂, e₂) $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 型; 组成 / %: AOD- (a₁) $54\text{CaO-}31\text{SiO}_2\text{-}4\text{MgO-}5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{Cr}_2\text{O}_3$, (a₂) $45\text{SiO}_2\text{-}39\text{MnO-}6\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}7\text{CaO-}3\text{Al}_2\text{O}_3$; LF- (b₁) $57\text{CaO-}28\text{SiO}_2\text{-}11\text{MgO-}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{Cr}_2\text{O}_3$, (b₂) $20\text{SiO}_2\text{-}36\text{MnO-}44\text{Cr}_2\text{O}_3$; 中间包- (c₁) $50\text{CaO-}30\text{SiO}_2\text{-}11\text{MgO-}9\text{Al}_2\text{O}_3$, (c₂) $56\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}17\text{SiO}_2\text{-}16\text{CaO-}6\text{MgO-}5\text{Al}_2\text{O}_3$; 连铸坯- (d₁) $34\text{CaO-}35\text{SiO}_2\text{-}9\text{MgO-}14\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\text{MgO}$, (d₂) $47\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}43\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO}$; 热轧板- (e₁) $24\text{CaO-}38\text{SiO}_2\text{-}9\text{MgO-}16\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}13\text{Cr}_2\text{O}_3$, (e₂) $49\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}38\text{MnO-}12\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}1\text{MgO}$

Fig. 1 Morphology and ingredient of typical inclusions in steel during each stage: (a₁, b₁, c₁, d₁, e₁) $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ type; (a₂, b₂, c₂, d₂, e₂) $\text{MnO-Cr}_2\text{O}_3$ type; stage, ingredient / %: AOD, (a₁) $54\text{CaO-}31\text{SiO}_2\text{-}4\text{MgO-}5\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}5\text{Cr}_2\text{O}_3$, (a₂) $45\text{SiO}_2\text{-}39\text{MnO-}6\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}7\text{CaO-}3\text{Al}_2\text{O}_3$; LF, (b₁) $57\text{CaO-}28\text{SiO}_2\text{-}11\text{MgO-}2\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}2\text{Cr}_2\text{O}_3$, (b₂) $20\text{SiO}_2\text{-}36\text{MnO-}44\text{Cr}_2\text{O}_3$; tundish, (c₁) $50\text{CaO-}30\text{SiO}_2\text{-}11\text{MgO-}9\text{Al}_2\text{O}_3$, (c₂) $56\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}17\text{SiO}_2\text{-}16\text{CaO-}6\text{MgO-}5\text{Al}_2\text{O}_3$; casting slab, (d₁) $34\text{CaO-}35\text{SiO}_2\text{-}9\text{MgO-}14\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}8\text{MgO}$, (d₂) $47\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}43\text{SiO}_2\text{-}10\text{CaO}$; hot-rolled plate, (e₁) $24\text{CaO-}38\text{SiO}_2\text{-}9\text{MgO-}16\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}13\text{Cr}_2\text{O}_3$, (e₂) $49\text{Cr}_2\text{O}_3\text{-}38\text{MnO-}12\text{Al}_2\text{O}_3\text{-}1\text{MgO}$

$\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型球状夹杂, 夹杂物尺寸在 5 ~ 10 μm , 其成分与 AOD 终渣成分 (表 2) 非常接近; 此外, 极个别夹杂物呈弯月状, 这是由于 SEM/EDS 方法进行夹杂物截面分析得到的结果^[9], 该类夹杂物 $\text{MnO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量较高, 达到 20% ~ 45%。

LF 处理结束后, 钢液中夹杂物主要类型为 $\text{SiO}_2\text{-MnO-Cr}_2\text{O}_3$ 型球状夹杂, 尺寸为 20 μm 左右; 也有 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型球状夹杂, 尺寸在 10 μm 以内, 这种夹杂物成分与 LF 终渣 (表 2) 较为接近, 但是, 夹杂物中 MgO 含量高于终渣成分。

中间包浇铸中期钢液中的夹杂物主要为 5 ~ 10 μm $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型球状夹杂; 也发现少量

的 3 ~ 5 μm Cr_2O_3 含量较高的球形夹杂物。

正常浇铸的铸坯中, 夹杂物主要类型为 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型球状夹杂, 尺寸为 10 ~ 20 μm ; 从图 2 可以看到, 在铸坯中含 MnO 和 Cr_2O_3 的夹杂物数量很少, 极个别的夹杂物尺寸甚至达到 50 μm 。

热轧板中的夹杂物, 夹杂物中 $\text{MnO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量变化范围较大, 在 10% ~ 90% 变动, 部分夹杂物在轧制之后呈长条形 (图 1), 其余夹杂物呈不规则多边形, 尺寸小于 5 μm 。

2.3 AOD-LF-中间包-连铸-热轧过程夹杂物的成因

图 3 $\text{SiO}_2\text{-CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 型夹杂物中 $\text{MnO} + \text{Cr}_2\text{O}_3$ 含量为 0 ~ 20%, 取其平均值 10%, 统计其余

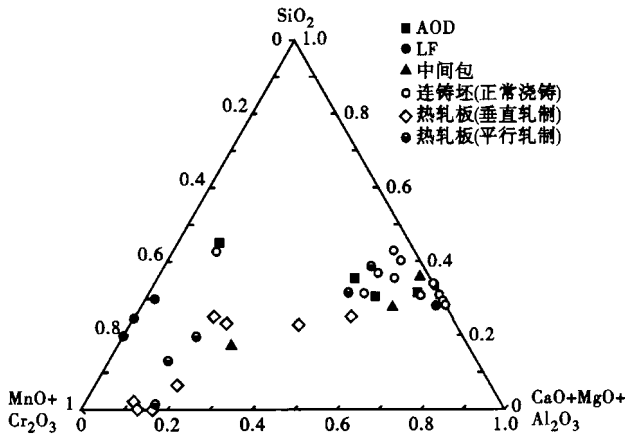


图 2 AOD-LF-中间包-连铸-热轧过程夹杂物成分变化
Fig. 2 Change of ingredient of inclusions during AOD-LF-tundish-casting-hot rolling process

表 2 AOD 和 LF 终点炉渣及中间包顶渣平均化学成分/%
Table 2 Average ingredient of AOD and LF end slag and tundish top slag / %

取样位	CaO	MgO	SiO ₂	Al ₂ O ₃	MnO	FeO	CaF ₂	Cr ₂ O ₃
AOD	53.42	4.85	26.70	1.37	0.10	< 0.10	12.31	< 0.10
LF	50.59	6.32	27.51	1.76	0.08	< 0.10	13.66	< 0.10
中间包	2.72	84.36	4.54	0.67	< 0.10	0.65	1.08	-

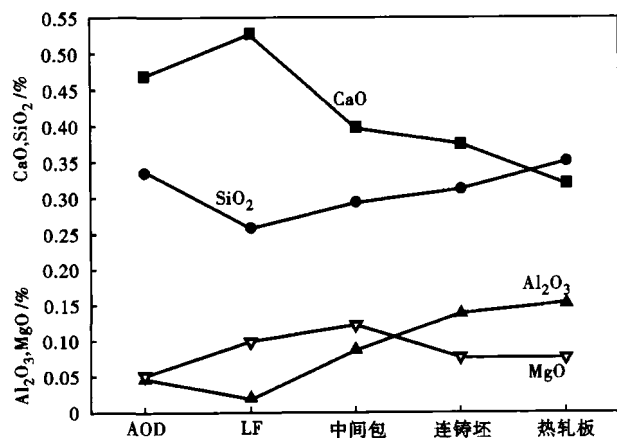


图 3 AOD-LF-中间包-连铸-热轧过程 SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 系夹杂物成分变化
Fig. 3 Change of SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ series inclusions during AOD-LF-tundish-casting slab-hot rolling plate

成分 (SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃) 的变化规律。

在 AOD 还原期,采用 FeSi 还原,并加入石灰等造渣剂,精炼渣成分如表 2,夹杂物成分趋于炉渣成分,与文献[4]中发现类似。另外,FeSi 中带入的少量杂质铝会增加夹杂物中 Al₂O₃ 含量^[3,10];FeSi 可以还原炉渣或炉衬(镁钙质)中的 Al₂O₃ 和 MgO,进

入钢液中的 [Al] 和 [Mg] 进一步形成夹杂物,若钢液中 [Mg]、[Al] 达到一定的成分范围,钢液中可析出 MgO·Al₂O₃ 尖晶石夹杂物^[11]。从图 3 可知,随着 AOD-LF-中间包冶炼过程进展,夹杂物中 MgO 含量逐渐升高。

在 LF 精炼阶段,基本保留了 AOD 还原渣系如表 2,加入少量 CaF₂ 改善渣的流动性,渣中 SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量略有增加是由于吸收 SiO₂ 和 Al₂O₃ 夹杂物引起,渣中 MgO 增加与炉衬的侵蚀有关,CaO 含量由于稀释作用而有所降低。在 LF 中发现大量尺寸 20 μm 左右的 SiO₂-MnO-Cr₂O₃ 系球状夹杂,16% Cr-14% Ni 不锈钢^[12] 和 Fe-20% Cr-13% Ni-3% Si 不锈钢^[13] 中夹杂物时也有类似的发现。在 CF8M(类似我国 ZG316) 钢液中发生二次氧化可引起夹杂物中 MnO 和 Cr₂O₃ 含量的增加^[14]。因此,可推断在 AOD 出钢过程二次氧化及卷渣是形成这类夹杂物的主要原因^[2,5,15]。这类夹杂物在 LF 处理中并未完全去除。相比 AOD,LF 中 SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 夹杂物的 CaO 含量有所增加,SiO₂ 和 Al₂O₃ 含量有所降低。

在中间包浇铸中期,SiO₂-MnO-Cr₂O₃ 类夹杂物去除较明显。此外仍存在 ≤5 μm 的 Cr₂O₃ 含量较高的夹杂物。此外,SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 型夹杂物中 MgO 含量有所升高(图 3),这与中间包采用高 MgO 含量的覆盖剂(表 2)有关。

在连铸过程中,MnO + Cr₂O₃ 含量较高的夹杂物数量较少(图 2)。另外如图 3,SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 型夹杂物中 Al₂O₃ 平均含量大幅度增加(LF 和铸坯中分别为 1.8% 和 14%)。这是由于钢液温度降低,铝氧浓度积下降,Al₂O₃ 夹杂物析出所致^[4,6,16]。

在热轧板中发现的夹杂物,大多数变形性能良好,沿加工方向延伸成条带状,少数夹杂物变形性能较差,呈不变形块状,但其尺寸均小于 5 μm。相比铸坯夹杂物,热轧板中夹杂物 MnO + Cr₂O₃ 含量有所增加,且其变化范围很大。

2.4 连铸过程中夹杂物的变化

在两炉连浇的过程中,中间包内流动属于非稳态流动,当新的钢包在向中间包内注流时会引起卷渣及二次氧化^[17],可引起铸坯中夹杂物的变化。在两炉连浇处夹杂物数量(4.65 mg/10 kg)比正常时(3.08 mg/10 kg)增加了 51%(表 3)。可以看到,铸坯中心夹杂物较少,内外弧较多,在正常浇铸过程中内弧夹杂物含量高于外弧,这是由于夹杂物在内弧的聚集^[18]。

表 3 正常浇铸和两炉连浇板坯的夹杂数量对比 / (mg · 10 kg⁻¹)Table 3 Comparison of inclusion amount in slab with normal casting and two heats sequence casting / (mg · 10 kg⁻¹)

工艺	两炉连浇	正常浇铸
内弧	5.52	4.84
中心	2.91	1.11
外弧	5.52	3.28
平均	4.65	3.08

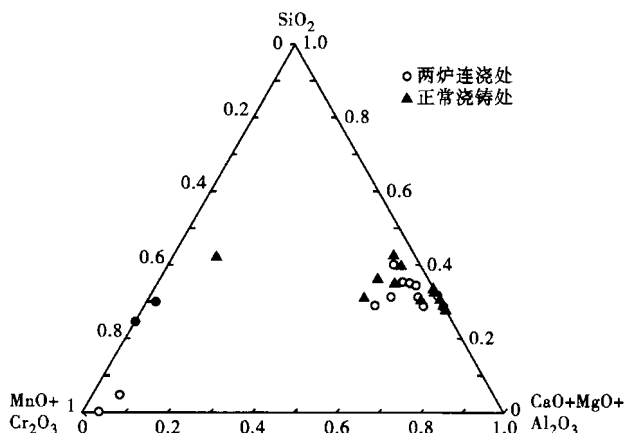


图 4 连铸工艺对钢中夹杂物成分的影响

Fig. 4 Effect of casting process on ingredient of inclusions in steel

两炉连浇处和正常浇铸处的夹杂物成分变化如图 4 所示。在两炉连浇处部分夹杂物的 MnO + Cr₂O₃ 含量极高,即可能来自于钢液的二次氧化。此外,中

间包内钢液氮含量和铸坯中心氮含量分别为 0.038 2%、0.044 0%, 同样表明发生了二次氧化。因此,可以通过严格控制换包操作,提高钢包自开率,以及改善中间包结构^[19]防止换包时的二次氧化。

3 结论

(1) 在脱磷铁水-AOD-LF-CC-热轧工艺生产的 304 不锈钢中夹杂物可以分为两类,即 SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 型和 MnO-Cr₂O₃ 型。

(2) SiO₂-CaO-MgO-Al₂O₃ 型夹杂物在各个阶段都有所发现,夹杂呈球状,尺寸为 5 ~ 10 μm,随着生产过程的进行,这类夹杂物中成分也有所变化,特别是 Al₂O₃ 含量在 LF 至热轧过程中大幅度增加。

(3) MnO-Cr₂O₃ 型夹杂物,在 AOD-LF 转移过程中有所发现,尺寸为 20 μm,在 LF 处理过程并未完全的去,在中间包中基本去除。在两炉连浇处的铸坯中发现这类夹杂物,在热轧过程中,夹杂物的 MnO + Cr₂O₃ 含量大幅度增加,且变化范围较大。

(4) 在两炉连浇处铸坯中夹杂物数量 (4.65 mg/10 kg) 比正常浇铸时 (3.08 mg/10 kg) 增加了 51%,而在正常浇铸过程中内弧夹杂物含量高于外弧。

(5) 严格控制 AOD 出钢过程的二次氧化以及连铸换包过程的二次氧化,确保 SiO₂-MnO-Cr₂O₃ 型夹杂物在 LF 中迅速去除,使夹杂物尺寸、成分得到有效的控制,对于提高最终产品的质量有着重要意义。

参考文献

- [1] 徐匡迪,肖丽俊.关于不锈钢精炼的过程模型与质量控制[J].钢铁,2011,46(1):1-13.
- [2] Hojo M, Nakao R, Umezaki T, et al. Oxide Inclusion Control in Ladle and Tundish for Producing Clean Stainless Steel [J]. ISIJ International, 1996, 36(S): S128-S131.
- [3] Mizuno K, Todoroki H, Noda M, et al. Effects of Al and Ca in Ferrosilicon Alloys for Deoxidation on Inclusion Composition in Type 304 Stainless Steel [J]. Iron & Steelmaker, 2001, 28(8): 93-101.
- [4] Rinaldi M, Capotosti I. Influence of AOD Practice on the Inclusion Defect on Cold Rolled Strips [C]. Proceedings of 85th Steelmaking Conference, I&S Society, Nashville, March 10-13, 2002: 487-496.
- [5] 范光伟,王贵平,李志斌. 0Cr18Ni9 不锈钢中非金属夹杂物的来源 [J]. 北京科技大学学报, 2007, 29(8): 776-780.
- [6] 江原靖弘,横山誠二,川上正博. SUS304 ステンレス鋼中スピネル介在物生成のスラグ組成による制御 [J]. 鉄と鋼, 2007, 93(7): 475-482.
- [7] 付邦豪,侯海滨,成国光,等. 409L 不锈钢冶炼过程夹杂物特征及成因 [J]. 钢铁, 2011, 46(6): 40-44.
- [8] 付邦豪,陈超,成国光,等. 430 不锈钢冶炼过程的夹杂物 [J]. 钢铁, 2012, 47(1): 40-43.
- [9] Michelic S K, Wieser G, Bernhard C. On the Representativeness of Automated SEM/EDS Analyses for Inclusion Characterisation with Special Regard to the Measured Sample Area [J]. ISIJ International, 2011, 51(5): 769-775.
- [10] Park J H, Kang Y B. Effect of Ferrosilicon Addition on the Composition of Inclusions in 16Cr-14Ni-Si Stainless Steel Melts [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37B(10): 791-797.
- [11] Park J H, Todoroki H. Control of MgO · Al₂O₃ Spinel Inclusions in Stainless Steels [J]. ISIJ International, 2010, 50(10): 1333-1346.
- [12] Park J H. Thermodynamic Investigation on the Formation of Inclusions Containing MgAl₂O₃ Spinel during 16Cr-14Ni Austenitic Stainless Steel Manufacturing Processes [J]. Materials Science and Engineering A, 2008, 472: 43-51.
- [13] Park J H. Formation Mechanism of Spinel-Type Inclusions in High-Alloyed Stainless Steel Melts [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2007, 38B(8): 657-663.
- [14] Wang L, Beckermann C. Prediction of Reoxidation Inclusion Composition in Casting of Steel [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2006, 37B(8): 571-588.
- [15] Cha W Y, Kim D S, Lee Y D, et al. A Thermodynamic Study on the Inclusion Formation in Ferritic Stainless Steel Melt [J]. ISIJ International, 2004, 44(7): 1134-1139.
- [16] Kim D S, Park J H, Park J H, et al. Improvement of Cleanliness of 16% Cr Ferritic Stainless Steel in AOD Processes [J]. La Revue de Metallurgie-CIT, 2004, 4: 291-299.
- [17] McLean A. The Turbulent Tundish-Contaminator or Refiner? [C]. Proceedings of 71st Steelmaking Conference, I&S Society, Toronto, April 17-20, 1988: 3-23.
- [18] 吴冬梅,刘新华,蔡开科,等. 带直立段弧形连铸机铸坯内弧夹杂物的聚集 [J]. 北京科技大学学报, 1995, 17(5): 407-411.
- [19] Chen C, Cheng G G, Sun H B, et al. Optimization of Flow Control Devices in a Stainless Steel Tundish [J]. Advanced Materials Research, 2012, 476-478: 156-163.

陈超 (1989-), 男, 博士研究生, 不锈钢精炼和连铸工艺研究。

收稿日期: 2012-08-20