

150 t LF 精炼喂钙线处理钢中夹杂物的演变

姜玉龙^{1,2} 郑万^{1,2} 齐盼盼^{1,2} 李天佑^{1,2} 王春锋³ 刘炳宇³ 李光强^{1,2}

(武汉科技大学 1 省部共建耐火材料与冶金国家重点实验室, 2 钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081; 3 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430083)

摘要 通过热力学计算和扫描电镜研究了铁水预处理-150 t BOF-钢包吹氩-LF-CSP 流程 LF 精炼后喂硅钙线和钙铝线处理的 Q235, SPA-H 和 DC01 钢中夹杂物演变及精炼渣对其影响。结果表明, Ca 处理前的精炼过程中, 钢中 Al_2O_3 大部分已经被精炼渣 ($\%: 52.97 \sim 55.63CaO, 4.11 \sim 12.78SiO_2, 5.11 \sim 9.87MgO, 22.93 \sim 31.72Al_2O_3, 0.58 \sim 1.27FeO, 0.01 \sim 0.07MnO$) 改性为 $MgO \cdot Al_2O_3$, 根据 Mg-Al-O 生成优势区图, 钢中有微量 Mg 就能使 Al_2O_3 变性为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石, 钙处理主要是对 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石的变性, 因此需要保证充足的钙线喂入量, 才能将高熔点铝镁和铝镁钙复合夹杂物变性到低熔点区域; 为了避免生成高熔点 CaS 夹杂物, 钙处理前 $[Al] = 0.02\% \sim 0.04\%$ 时, $[S]$ 要小于 0.0014% 。

关键词 钙处理 Q235, DC01, SPA-H 钢 夹杂物 CSP 水口堵塞 精炼渣

Evolution of Inclusions in Steel with 150 t LF Refining Feeding Calcium Wire Treatment

Jiang Yulong^{1,2}, Zheng Wan^{1,2}, Qi Panpan^{1,2}, Li Tianyou^{1,2}, Wang Chunfeng³, Liu Bingyu³ and Li Guangqiang^{1,2}
(1 State Key Lab of Refractories & Metallurgy, 2 Key Lab for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081; 3 Wuhan Iron and Steel Co Ltd, Wuhan 430083)

Abstract The evolution of inclusions in steel Q235, SPA-H and DC01 treated by feeding silicon-calcium wire and calcium-aluminium wire after LF refining in metal pretreatment-150 t BOF-ladle argon blowing-LF-CSP flowsheet and the effect of refining slag on inclusions are studied by thermodynamic calculation and scanning electron microscope. The results show that during refining process before Ca treatment the greater part of Al_2O_3 in steel is modified to $MgO \cdot Al_2O_3$ by refining slag ($\%: 52.97 \sim 55.63CaO, 4.11 \sim 12.78SiO_2, 5.11 \sim 9.87MgO, 22.93 \sim 31.72Al_2O_3, 0.58 \sim 1.27FeO, 0.01 \sim 0.07MnO$); based on the Mg-Al-O predominant forming diagram, with micro-amount Mg in steel the Al_2O_3 may modify to $MgO \cdot Al_2O_3$ spinel, the calcium treatment is mainly to modify the $MgO \cdot Al_2O_3$ spinel, therefore it is need to feeding sufficient amount of calcium for high melting point aluminium-magnesium and aluminium-magnesium-calcium inclusion modifying to low melting point region; in order to avoid forming high melting point CaS inclusions, before calcium treatment with $[Al] = 0.02\% \sim 0.04\%$ the $[S]$ should be less than 0.0014% .

Material Index Calcium Treatment, Steel Q235, DC01, SPA-H, Inclusions, CSP, Nozzle Clogging, Refining Slag

为解决 Al 脱氧钢水浇注困难问题, 各钢厂普遍采用精炼后钙处理工艺将脱氧产物 Al_2O_3 变性为低熔点钙铝酸盐夹杂上浮去除, 减少或防止水口结瘤现象发生^[1-3]。研究发现: (1) 钙处理前通过渣-钢反应将 Al_2O_3 变成 $CaO-MgO-Al_2O_3$ 复合夹杂物和少量的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石, 可以减少钙线的喂入量^[4]; (2) 通过控制精炼渣成分, 不采用钙处理即可将夹杂物变性为低熔点 $CaO-MgO-Al_2O_3$ 复合夹杂物^[5]; (3) 只要极低的溶解钙含量就能促使镁铝尖晶石转变成液态铝酸钙^[6]。可见, Al_2O_3 夹杂在钙处理前可能已被精炼渣变性为镁铝尖晶石或者钙镁铝复合夹杂, 钙处理实际上是对此类夹杂物的变性,

而这些夹杂的变性可能比 Al_2O_3 的变性容易。

实际生产中, 由于不同钢种的成分差异较大, 钙处理前后钢中夹杂物形貌、成分变化特征, 以及在精炼渣对夹杂物改性的基础上是否需要进行钙处理, 有待进一步研究。

1 试验方法

试验钢种的工艺路线为: 铁水预处理→150 t 转炉冶炼→钢包(氩站)吹氩→LF→钙处理→CSP 连铸。转炉吹炼后挡渣出钢, 出钢过程中, 加入锰铁、硅锰(用于 SPA-H 钢种)、铝铁等进行脱氧, 并加精炼渣提前造渣; LF 精炼过程进行升温、化渣、脱 S、成分调节等处理, 精炼时间约 30 min。LF 精炼结束

后,软吹氩 10 min,然后进行钙处理。根据钢种成分要求,Q235 钢采用硅钙线(Ca 含量 28%,棒芯重 230 g/m),喂线 250 m,SPA-H 钢和 DC01 钢采用钙铝线(Ca 含量 61.9%,棒芯重 91 g/m),分别喂入 250 m 及 750 m。其中软吹 8 min(钙处理前 2 min)时取样,对钢中 T[O]和 T[N]作了分析:Q235 钢中 T[O]为 21.5×10^{-6} ,T[N]为 37.5×10^{-6} ;SPA-H 钢中 T[O]为 15.7×10^{-6} ,T[N]为 40.0×10^{-6} ;DC01 钢中 T[O]和 T[N]分别为 31.7×10^{-6} , 30.5×10^{-6} 。试验钢种化学成分和精炼渣成分见表 1、表 2。

分别对 LF 到站、钙处理前软吹 8 min、钙处理后软吹 3 min 和中间包的钢水,以及铸坯进行全流程

系统取样。

2 试验结果

2.1 Q235 钢水口结瘤物的检测

按照从水口内侧到水口外侧方向依次进行扫描,发现了明显的分层现象。水口内侧主要为金属铁及其氧化物,中间还混杂着少量硅酸盐夹杂,如图 1(a,b)所示,这一层即为凝钢层,这是浇铸结束时低温钢水凝固形成的;紧靠凝钢层的称为结瘤层,由枝晶状的 Al_2O_3 以及块状铝酸钙复合夹杂物组成,如图 1(c,d),这是钢中夹杂物在水口壁上富集形成的结果;最外层为水口本体 Al_2O_3 -C 质耐火层。

在结瘤层发现少量铁氧化物,而铝酸钙复合夹杂物中, $(Al_2O_3)/(CaO)$ 在 4~6,主要为 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 和 $CaO \cdot 6Al_2O_3$ 的混合物,均为高熔点夹杂物,某些夹杂物中还能发现少量的 MgO ,故认为造成水口堵塞的主要原因是 Al_2O_3 和未变性彻底的铝酸钙。

2.2 Ca 处理前后钢中典型夹杂物的转变过程

图 2 为 LF 到站时,DC01 钢中观察到的典型夹杂物,夹杂物主要为 Al_2O_3 ,呈球状、块条状。从图 2 中发现,图 2(a)中的夹杂物明显由两个独立夹杂物碰撞形成,图 2(b)中数个夹杂物正碰撞聚集到一起,夹杂物的聚集长大有利于其上浮去除。SPA-H、Q235 钢中观察到的典型夹杂物与 DC01 钢一致,下面采用相似的处理,以某一个钢种为例列出各阶段

表 1 试验钢种的化学成分 / %

Table 1 Chemical composition of test steels / %

钢种	C	Si	Mn	P	S	Als	Ti	Mg
SPA-H	0.05	0.30	0.54	0.075	0.000 5	0.017	0.03	0.002 0
Q235	0.19	0.06	0.16	0.013	0.003 4	0.027	-	0.006 0
DC01	0.03	0.01	0.16	0.015	0.000 9	0.031	-	0.003 9

表 2 精炼渣的组分 / %

Table 2 Ingredient of refining slag / %

钢种	CaO	SiO ₂	MgO	Al ₂ O ₃	FeO	MnO
DC01	52.97	4.11	9.87	30.79	0.58	0.04
SPA-H	54.28	12.78	5.66	22.93	1.27	0.07
Q235	55.63	5.14	5.11	31.72	0.92	0.01

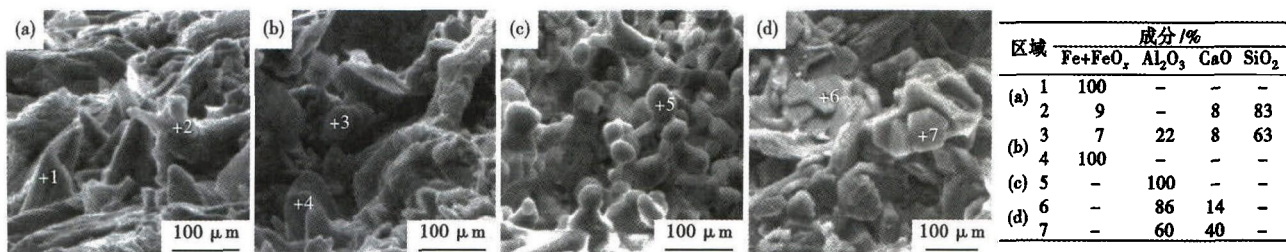


图 1 水口侧壁与钢水接触面沉积物的形貌和各点成分,SEM

Fig. 1 Morphology of deposit at inner layer of nozzle contacting with liquid and analysis of each point in figure, SEM

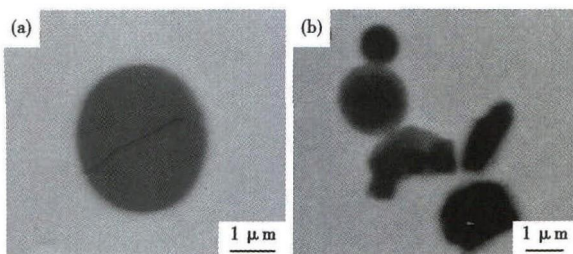


图 2 LF 到站时 DC01 钢中典型夹杂物形貌,(a) 两单个夹杂碰撞形成;(b) 夹杂簇

Fig. 2 Morphology of typical inclusions in steel DC01 before LF refining, (a) formed by two single inclusion colliding; (b) inclusions cluster

钢中共有的典型夹杂物,并对其他钢中特有的典型夹杂物进行补充说明。

钙处理前,钢中典型夹杂物如图 3(a₁~d₁)所示。钙处理前,钢中夹杂物主要为块状 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石和单独的 Al_2O_3 以及球状钙镁铝复合夹杂物(图 3a₁~c₁),对于 SPA-H 钢,由于含 Ti(0.03%),钢中还发现了大量的以镁铝尖晶石为核心的 TiN 夹杂物(图 3d₁)。

钙处理后钢液中夹杂物发生了明显的球化,主要为 $CaO-MgO-Al_2O_3$ 球状复合夹杂物(图 3a₂~b₂)。

DC01 钢中由于钙线喂入量大,观察到了 CaO 夹杂(图 3c₂),而 Q235 钢中,由于 S 含量高(0.0034%),出现了大量的 CaS 夹杂物(图 3d₂),CaO 和 CaS 夹杂物尺寸均较小,在 1 μm 左右。

图 4 以 DC01 钢为例,呈现了中间包和铸坯中典型夹杂物的形貌及主要成分。中间包和铸坯中典型夹杂物差别不大,均为 CaO-MgO-Al₂O₃ 复合夹杂物,呈球状或者椭圆状,由图 4(b, d)可知,部分夹杂物中 Al₂O₃ 和 MgO 含量仍较高,而 CaO 含量较低。

2.3 Ca 处理前后钢中氧化物夹杂组成的变化

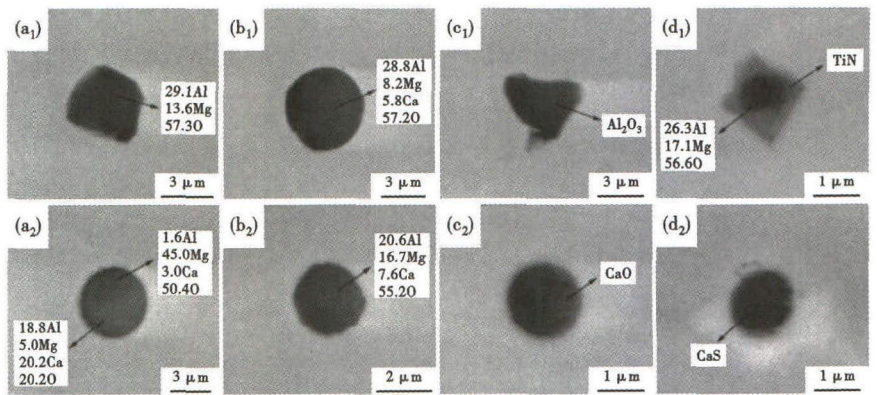


图 3 钙处理前(a₁, b₁, c₁, d₁)和钙处理后(a₂, b₂, c₂, d₂)钢液中典型夹杂物的形貌及主要成分(原子百分比): (a₁ ~ c₁) DC01, (d₁) SPA-H; (a₂ ~ c₂) DC01, 喂 Ca-Al 线 750 m, (d₂) Q235, 喂 Si-Ca 线 250 m

Fig. 3 Morphology and main elements (atom percentage) of typical inclusions in liquid before (a₁, b₁, c₁, d₁) and after (a₂, b₂, c₂, d₂) calcium treatment and main chemical composition: (a₁) (b₁) and (c₁) steel DC01; (d₁) steel SPA-H; (a₂) (b₂) and (c₂) steel DC01, feeding Ca-Al wire 750 m; (d₂) steel Q235, feeding Si-Ca wire 250 m

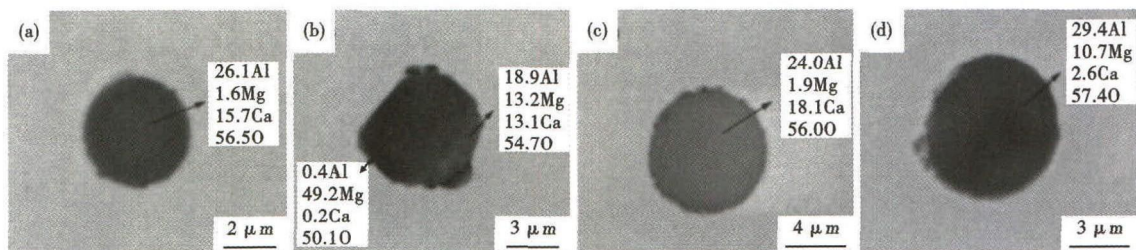


图 4 DC01 钢(喂 Ca-Al 线 750 m)中间包(a)(b)和铸坯(c)(d)中典型夹杂物的形貌及主要成分

Fig. 4 Morphology of typical inclusions in tundish liquid (a) (b) and casting slab (c) (d) and main chemical composition, steel DC01, feeding Ca-Al wire 750 m

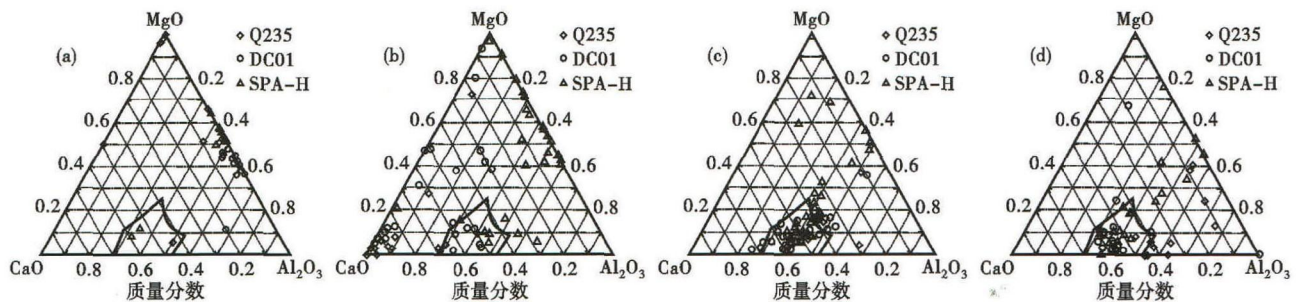


图 5 (a) 钙处理前;(b) 钙处理后;(c) 中间包钢水和(d) 铸坯中氧化物夹杂组成分布变化

Fig. 5 Change of distribution of oxide inclusions ingredient in liquid before calcium treatment (a), after calcium treatment (b) and in tundish (c) and in casting slab (d)

图 5 中,粗实线区域为 1600 °C 时 MgO-Al₂O₃-CaO 三元相图中的液相区域,通过 Factsage6.1 计算得到。由图 5 可知,钙处理前,钢中的夹杂物以 MgO · Al₂O₃ 为主,只有少量的 Al₂O₃ 夹杂, MgO-Al₂O₃-CaO 复合夹杂物中, CaO 含量较少,基本为 MgO-Al₂O₃ 复合氧化物,发现了少量的低熔点夹杂物, Q235 钢中还观察到了单独的 MgO 夹杂。

钙处理后, MgO · Al₂O₃ 夹杂物向 MgO-Al₂O₃-CaO 复合夹杂物转变,部分夹杂物中 CaO 含量很高,几乎为纯 CaO,还有部分夹杂物已经转变成液态的复合夹杂物,但 SPA-H 钢中仍存在大量的未变性 MgO · Al₂O₃ 夹杂物,表明 SPA-H 钢中钙处理量不足。

中间包和铸坯中夹杂物均以低熔点 MgO-Al₂O₃-CaO 复合夹杂物为主,在 Q235 和 SPA-H 钢

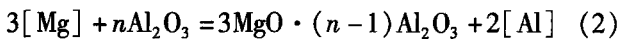
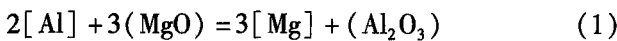
中,仍存在少量的未变性 $MgO \cdot Al_2O_3$ 和含少量 CaO 的高熔点钙镁铝复合氧化物,SPA-H 钢尤为明显,在 Q235 钢中还有少量高熔点铝酸钙夹杂,这与水口中观察到的结瘤物一致。

可见钙处理前钢中大部分夹杂物为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物,只有少量的 Al_2O_3 夹杂物,钙处理实际上是对 $MgO \cdot Al_2O_3$ 进行变性。3 个钢种中 DC01 钙处理效果最佳,最终夹杂物成分均位于液态区域,SPA-H 效果较差,中间包和铸坯中都含有大量未变性彻底的高熔点镁铝复合夹杂物。

3 分析讨论

3.1 LF 精炼渣对 Al_2O_3 夹杂物的改性

由于 LF 采用高碱度、高 Al_2O_3 含量的强脱氧精炼渣,炉渣和炉衬中的 MgO 能被钢液中的 $[Al]$ 还原,生成的镁从钢渣界面或者炉衬与钢水的界面扩散至钢液中与脱氧产物 Al_2O_3 反应,生成 $MgO \cdot Al_2O_3$ 。具体反应机理如下^[7]:



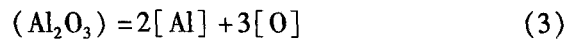
此外,钙处理前钢中还发现了少量 $CaO-MgO-Al_2O_3$ 复合氧化物,这主要由渣中 CaO 还原的 Ca 与钢液中的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 反应产生。当渣中的 Fe_xO 含量较低时,渣中的 CaO 也可以被钢液中的 $[Al]$ 还原,生成的 Ca 从钢渣界面扩散至钢液中与 $MgO \cdot Al_2O_3$ 反应,生成 $CaO-MgO-Al_2O_3$ 复合氧化物^[8-9]。

3.2 $Mg-Al-O$ 夹杂物生成优势区图计算

由于钙处理前钢中主要夹杂物为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石,Q235 钢中还发现了少量的 MgO 夹杂物,有必要对 $Mg-Al-O$ 优势区图进行计算。

Mg 和 Al 的脱氧反应以及 $MgO \cdot Al_2O_3$ 的生成

反应如(3)~(5)所示^[10-11]:



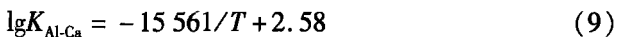
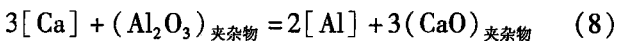
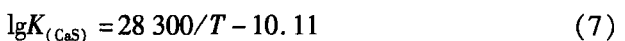
计算中用到的平衡常数、吉布斯自由能和相互作用系数见文献[10]。

由图 6(a)可知,1 873 K 时,在本文研究的钢中酸溶铝含量 0.010% ~ 0.050%,只要有微量 Mg 的存在,就有可能生成单独的 $MgO \cdot Al_2O_3$,这与沈春飞等^[12]的研究结果一致。由表 1 可知,3 个钢种中 Mg 含量在 0.002 0% ~ 0.006 0%,将其画与图 6(a)中,发现均位于 MgO 的稳定区域内,由于测得的是全 Mg 含量,钢中实际的溶解 Mg 含量会低于该数值,但可以肯定的是,只要钢中有微量 Mg 的存在,就能使 Al_2O_3 变性为 $MgO \cdot Al_2O_3$,这与本研究的实验结果一致。

3.3 钢液中 $Al-Ca-S$ 平衡

Q235 钢中,钙处理后发现了大量的 CaS 夹杂物, CaS 属于高熔点夹杂物,也能引起水口堵塞。因此,为了达到理想的钙处理效果,即在生成液态复合氧化物的情况下,避免生成 CaS ,需要综合考虑 Ca 、 Al 和 S 三种元素的影响,本文研究了 $Al-Ca-S$ 活度平衡关系,确定了钢水相应成分条件下 $[S]$ 的控制范围(上限)。

钢液钙处理有以下基本化学反应式^[13-14]:



Ca 处理时, $L \rightleftharpoons CaO \cdot Al_2O_3$ 平衡态可以认为是

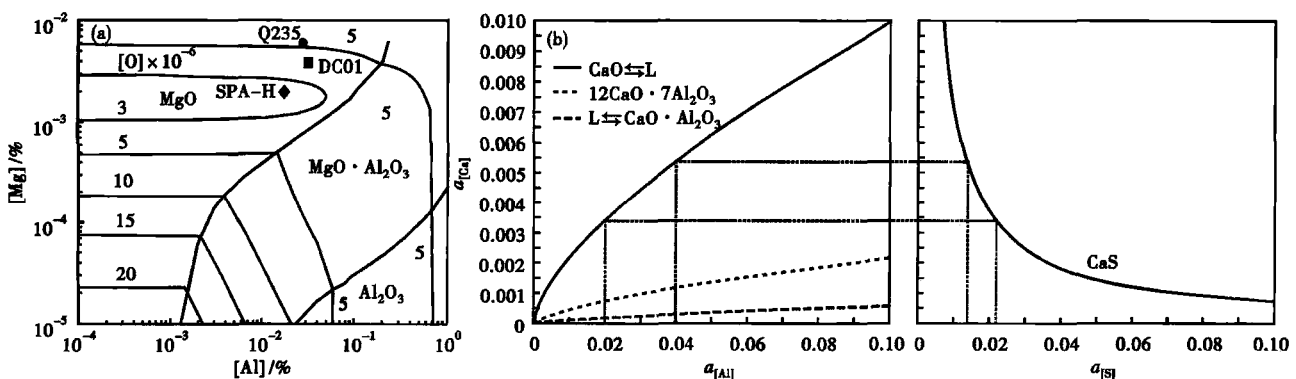


图 6 1 873 K 钢中 $Mg-Al-O$ 系夹杂物生成优势区图(a)和 $Al-Ca-S$ 活度平衡关系(b)

Fig. 6 Diagram of preferential-forming region of $Mg-Al-O$ series inclusions in steel (a) and activities of $Al-Ca-S$ in liquid (b) at 1 873 K

形成液态铝酸钙的开始,而 $\text{CaO} \rightleftharpoons L$ 平衡态可以认为是形成液态铝酸钙的终了, $\text{CaO} \rightleftharpoons L$ 平衡态与 $L \rightleftharpoons \text{CaO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 平衡态之间即为液态铝酸钙。1 873 K 时,不同平衡态下 CaO 、 Al_2O_3 的活度以及 CaS 活度参照文献[13,15]。

由式(6)~(9)可作出在 1 873 K 时的 Al-Ca-S 活度平衡关系图(图 6b)。由图 6(b)可知,理想条件下,钢液中 $[\text{Al}]$ 活度为 0.02%~0.04% 时,开始生成液态铝酸钙的 $[\text{Ca}]$ 应为 0.000 2%~0.000 3%,形成液态铝酸钙的终了 $[\text{Ca}]$ 应为 0.003 4%~0.005 4%,在此区间内不生成 CaS ,钢液中 $[\text{S}]$ 要小于 0.001 4%。研究的 3 炉钢中,DC01 和 SPA-H 钢中 $[\text{S}]$ 均在 0.001 0% 以下,而 Q235 钢中 $[\text{S}]$ 高达 0.003 4%,远超过了 $[\text{S}]$ 的上限,因而钙处理后钢液中会形成大量的高熔点 CaS 夹杂。

3.4 Ca 对 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的变性

$\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的改性比 Al_2O_3 的改性容易,只要极低的溶解钙含量就能促使镁铝尖晶石转变成液态铝酸钙,甚至单靠控制精炼渣就可以将夹杂物变性到低熔点区域^[4-6]。Ca 对 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的变性过程中,Mg 在夹杂物中的扩散为限制性环节,Ca 将 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 变性彻底需要较长时间^[16]。本文中得到的液态夹杂物基本都为 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-MgO}$ 复合氧化物,很少发现单独的铝酸钙夹杂物。

参考文献

- [1] 孙彦辉,王小松,许中波,等.高铝钢钙处理工艺热力学研究[J].北京科技大学学报,2011,33(S1):121-125.
- [2] 杨 叠,王新华,秦颂鸣,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,2013,33(5):580-585.
- [3] 夏春祥,王春锋,朱万军,等.钙处理钢中夹杂物行为的研究[J].武钢技术,2012,50(3):8-12.
- [4] 李 强,王新华,李海波,等.低合金高强度钢中非金属夹杂物改性[J].北京科技大学学报,2012,34(11):1262-1267.
- [5] Yang J, Wang X H, Jiang M, et al. Effect of Calcium Treatment on Non-Metallic Inclusions in Ultra-Low Oxygen Steel Refined by High Basicity High Al_2O_3 Slag[J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2011, 18(7): 8-14.
- [6] Kang Y J, Li F, Morita K, et al. Mechanism Study on the Formation of Liquid Calcium Aluminate Inclusion From $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ Spinel[J]. Steel Research International, 2006, 77(11): 785-792.
- [7] Kawakami K, Taniguchi T, Nakashima K. Generation Mechanisms of Non-Metallic Inclusions in High-Cleanliness Steel [J]. Tetsu-to-Hagane, 2007, 93(12): 743-752.
- [8] 王新华,陈 斌,姜 敏,等.渣-钢反应对高强度合金结构钢中生成较低熔点非金属夹杂物的影响[J].钢铁,2008,43(12):28-32.
- [9] 王新华,李秀刚,李 强,等. X80 管线钢板中条串状 $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3$ 系非金属物的控制[J].金属学报,2013,49(5):553-561.
- [10] Itoh H, Hino M, Ban-Ya S. Thermodynamics on the Formation of

值得注意的是,高钙处理的 DC01 钢钙处理效果比较理想,夹杂物基本位于低熔点区域,而低钙处理的 SPA-H 钢还有不少夹杂物以高熔点的镁铝或者镁铝钙复合夹杂物存在。因此在精炼渣对夹杂物部分改性的条件下,保证充足的钙线喂入量依然是必要的。

4 结论

(1) 钙处理前的精炼过程中,钢中的脱氧产物 Al_2O_3 已经基本被变性为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,单独的 Al_2O_3 只占少部分,还出现了少量的液态 $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3$ 复合夹杂物。

(2) 钢中只要有微量 Mg 的存在,就能使 Al_2O_3 变性为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$,钙处理实际上主要是对 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的变性及少量的 Al_2O_3 变性。

(3) 钙处理前,钢液中残余的镁/钙对 Al_2O_3 夹杂物进行部分变性,以高熔点的固态 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物为主,依然需要保证充足的钙线喂入量,才能将高熔点铝镁和铝镁钙复合夹杂物变性到低熔点区域,对 Q235 水口堵塞物的分析也表明 Ca 处理不足是造成水口堵塞的主要原因。

(4) 为了避免生成高熔点 CaS 夹杂物,钙处理前需要控制钢中的 S 含量- $[\text{S}]$ 。当 $[\text{Al}] = 0.02\% \sim 0.04\%$ 时,为不生成 CaS , $[\text{S}]$ 要小于 0.001 4%。

国家自然科学基金资助(No. 51541409)

Spinel Nonmetallic Inclusion in Liquid Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28(5): 953-956.

- [11] Yang S F, Wang Q Q, Zhang L F, et al. Formation and Modification of $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ -Based Inclusions in Alloy Steels[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2012, 43(4): 731-750.
- [12] 沈春飞,蒋兴元,李 阳,等. Mg 处理钢生成细小尖晶石夹杂物的研究[J].炼钢,2009,25(5):52-54.
- [13] 龚 坚,王庆祥. 钢液钙处理的热力学分析[J]. 炼钢,2003,19(3):56-59.
- [14] 魏 军,严国安,田志红,等. CSP 低碳铝镇静钢水可浇性控制[J].北京科技大学学报,2006,27(6):666-670.
- [15] Korosic B. Fundamental Thermodynamic Aspects of the $\text{CaO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$ System[J]. Steel Research, 1991, 62(7): 285-288.
- [16] Yang S F, Li J S, Gao X Z, et al. Modification Kinetics of $\text{MgO-Al}_2\text{O}_3$ Inclusions by Ca Treatment[J]. Metallurgical & Mining Industry, 2014(2): 66-71.

姜玉龙(1990-),男,硕士研究生,2013 年武汉科技大学(本科)毕业,氧化物冶金与钙处理工艺研究。

E-mail: JChen418@163.com

收稿日期:2015-12-30