

LF 喂纯 Ca 与 CaAl 包芯线对 DC01 钢的冶金效果的影响

阮墨¹ 李天佑¹ 曾成¹ 王春锋³ 郑万^{1,2} 李光强^{1,2}

(1 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081;

2 武汉科技大学钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室, 武汉 430081; 3 武汉钢铁有限公司, 武汉 430083)

摘要 为了优化 CSP 工艺生产 DC01 钢的钙处理冶金效果, 利用 SEM + EDS 分析了浸入式水口结瘤物的组成, 研究比较了纯 Ca 与 CaAl 包芯线处理钢中夹杂物特征的演变规律与改性效果, 探讨了铝对钙的收得率的影响。结果表明, CaAl 线处理钢形成的水口结瘤堵塞物为改性不完全的钙铝酸盐、 Al_2O_3 以及 $MgO \cdot Al_2O_3$ 。钢中 Al 含量的变化对钙蒸气压与收得率的影响不大。在相同喂线速度、喂线量的情况下, 与 CaAl 线相比, 纯 Ca 线处理钢中残钙量、钙的收得率更高, 夹杂物的改性效果更好。

关键词 钙处理 CaAl 线 纯 Ca 线 夹杂物改性 喂线工艺

Effect of LF Feeding Pure Calcium Wire and CaAl Cored Wire on Metallurgical Affect of DC01 Steel

Ruan Mo¹, Li Tianyou¹, Zeng Cheng¹, Wang Chunfeng³, Zheng Wan^{1,2} and Li Guangqiang^{1,2}

(1 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

2 Hubei Provincial Key Laboratory for New Processes of Ironmaking and Steel making, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081;

3 Wuhan Iron and Steel Group Corporation Limited, Wuhan 430083)

Abstract In order to optimize the metallurgical effect of calcium treatment for DC01 produced by CSP process, the composition of the nozzle nodulation, the evolution and the characteristics of inclusions in steels treated by Ca and CaAl cored wire was analyzed by SEM + EDS, influence of Al on the yield of calcium was discussed. The results show that the nozzle nodulation are mainly composed of incompletely modified calcium aluminate, Al_2O_3 and $MgO-Al_2O_3$. Variety of Al amount in steel has little influence on vapour pressure and yield of calcium. In the same conditions of feeding speed and adding amount of Ca cored wine, the amount of residual calcium and calcium yield were higher in the steel treated by Ca cored wire compared with CaAl cored wire, inclusions modification effect is better.

Material Index Ca Treatment, CaAl Cored Wire, Ca Cored Wire, Modified Inclusions, Wire-Feeding Process

CSP(Compact Strip Production)工艺采用漏斗形结晶器及扁嘴形浸入式水口, Al 脱氧的 DC01 钢容易产生水口堵塞, 采用钙处理工艺, 能将钢中高熔点的 Al_2O_3 改性为低熔点的钙铝酸盐, 防止水口堵塞^[1-5]。

目前有硅钙线、钙铁线、CaAl 线、纯 Ca 线等钙处理工艺^[6-9]。

本文利用扫描电镜和能谱仪(SEM + EDS)分析了钢厂 CaAl 包芯线处理的 DC01 钢的水口的堵塞物, 比较研究了纯 Ca 线与 CaAl 线处理 DC01 钢过程夹杂物演变规律及钢中残钙量与钙的收得率, 分析了钙合金成分对夹杂物变性的热力学、动力学的影响机制, 提出了钙线的优化选择方案。

1 试验方案

DC01 钢(表 1)的工艺生产路线为: 铁水预处理 → 150 t 转炉 → LF(LF 到站 → 氩站吹氩 10 min → 钙处理 5 min → 出 LF) → 中间包 → CSP 连铸。CaAl 线、纯 Ca 线的理化参数如表 2 所示。钙处理的喂线量分别为 CaAl 线 400 m, 纯 Ca 线 400 m。

此外, 还采用 4 m/s 的喂线速度下, 研究了不同

表 1 试验钢种的化学成分/%

Table 1 Chemical composition of tested steels / %

C	Si	Mn	P	S	Als	Mg	N
0.02 ~ 0.06	≤ 0.04	0.10 ~ 0.30	≤ 0.020	≤ 0.015	0.02 ~ 0.06	0.003 9	≤ 0.008 0

通讯作者: 郑 万, 教授, 武汉科技大学钢铁冶金新工艺湖北省重点实验室, 武汉 430081

E-mail: zhengwan@wust.edu.cn

表2 包芯线的化学成分及物理指标

Table 2 Chemical composition and physical index of cored wire

种类	Ca/ %	Si/ %	Al/ %	线径/ mm	棒芯重/ (g·m ⁻¹)
纯Ca线	98.83	-	-	10.7	61.35
CaAl线	61.9	0.1	33.3	9.8	90.73

表3 CaAl线与纯Ca线处理钢中钙的收得率及钙含量

Table 3 Calcium content and calcium yield in steel with CaAl wire and Ca wire treatment

钢种	CaAl线				纯Ca线			
	喂线量/ m	速度/ (m·s ⁻¹)	成品Ca/ 10 ⁻⁶	成品收得 率/%	喂线量/ m	速度/ (m·s ⁻¹)	成品Ca/ 10 ⁻⁶	成品收得 率/%
DC01	400	4	11	7.85	400	4	17	15.12
DC01	400	4	11	7.85	400	4	18	17.48
DC01	400	4	12	8.56	400	4	18	18.04
DC01	450	4	21	13.32	450	4	16	14.18
DC01	450	4	19	12.05	450	4	18	11.81
DC01	450	4	21	13.32	450	4	21	27.22
DC01	500	4	19	10.85	500	4	22	11.91
DC01	500	4	20	11.42	500	4	18	13.63
DC01	500	4	21	11.99	500	4	22	12.29
DC01	550	4	23	11.94	550	4	23	10.08
DC01	550	4	22	10.86	550	4	23	11.23
DC01	550	4	19	11.23	550	4	24	9.07
DC01	600	4	19	7.14	600	4	22	8.82
DC01	600	4	18	8.21	600	4	28	8.19
DC01	600	4	24	8.93	600	4	26	7.56

的喂线量(400,450,500,550,600 m)对DC01钢的钙的收得率以及成品钙含量的影响,现场试验参数及结果如表3所示。

为了考察钙处理前后夹杂物的演变规律,分别在LF到站、钙处理前5 min、钙处理后软吹5 min以及铸态等工序点取样分析。钢样经场发射扫描电子显微镜(SEM)和能谱分析仪(EDS)下对夹杂物进行观察。对CaAl线处理的DC01钢连浇3炉后浸入式水口出口取残留样,不进行磨抛,喷金后在SEM+EDS下对堵塞物的原始形貌及成分进行观察,并对照CaO-Al₂O₃二元相图、CaO-MgO-Al₂O₃三元相图^[10],分析夹杂物改性的有效性。

2 试验结果

2.1 DC01钢水口结瘤物的检测

水口结瘤物一般呈现较为明显的分层现象,最外层主要为取样后粘附在结瘤物表面的低温钢水凝结而成,中间层为水口结瘤物,最内层为水口基体^[10]。图1为CaAl线处理的DC01钢连浇3炉以后

浸入式水口结瘤物的SEM图,图1(a~d)分别为从水口内侧到水口外侧扫描的部分微观形貌图,同样呈现较为明显的分层现象。

图1(a,b)中,点1~点4为铁的氧化物,这主要是由于在浇铸过程中,低温钢水凝固形成;能谱分析表明,图1(c,d)为枝晶状的Al₂O₃与块状钙铝酸盐复合夹杂物,其中,图1(c)中点5为Al₂O₃;点6为没有被改性的MgO·Al₂O₃,显示出钙加入量的不足,其中MgO·Al₂O₃的形成一般是由炉渣或者炉衬与水口之间的氧化还原反应引起的^[11];点7为钙铝酸盐;同时在结瘤物中发现了一定量的CaO-MgO-Al₂O₃(点9)。可见,DC01钢中夹杂物改性不彻底,反映了钢中残钙量不足。

2.2 CaAl线与纯Ca线处理前后钢中夹杂物组成、形貌的演变结果

2.2.1 LF到站样的夹杂物特征

图2为LF到站时钢中主要夹杂物SEM图,以Al₂O₃夹杂为主,形貌不规则,呈块条状,尺寸较大,大量夹杂物聚集在一起。同时,含有少量块状MgO·Al₂O₃夹杂,这是由于DC01钢中铝还原了炉渣或者炉衬的氧化镁,钢中只要存在少量Mg,Al₂O₃就容易转变成MgO·Al₂O₃夹杂物^[12]。

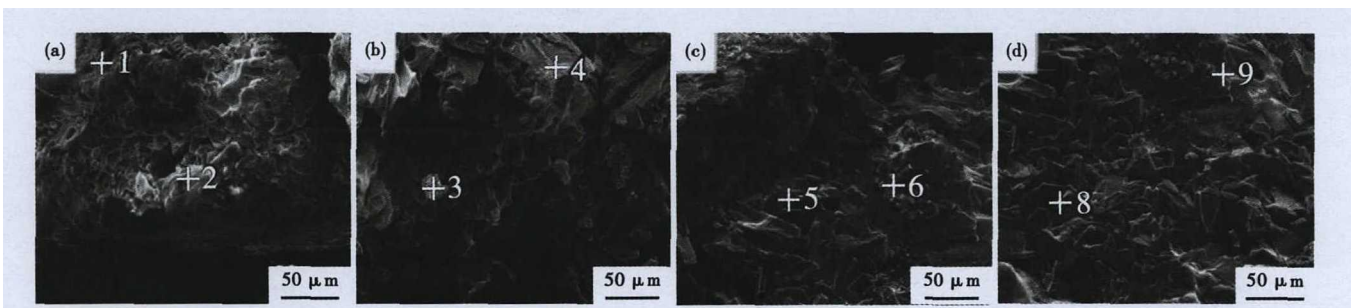


图1 水口结瘤物形貌

Fig. 1 Morphology of nodules of submerged nozzle

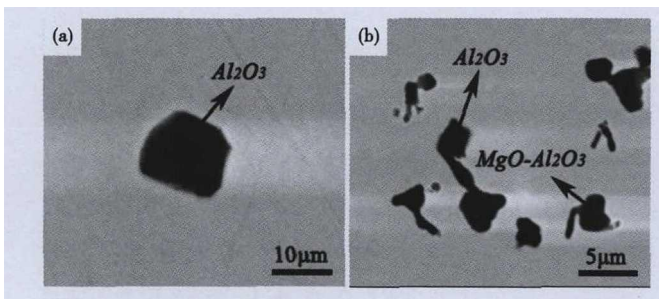


图 2 LF 到站钢中夹杂物 Al_2O_3 (a) 和 $MgO \cdot Al_2O_3$ (b) 形貌
Fig. 2 Morphologies of inclusions Al_2O_3 (a) and $MgO \cdot Al_2O_3$ (b) in tested steel in LF station before refining

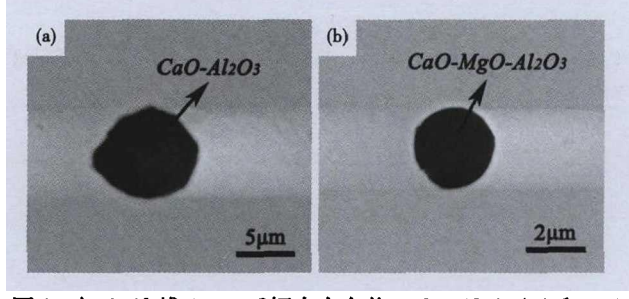


图 4 加 CaAl 线 5 min 后钢中夹杂物 $CaO \cdot Al_2O_3$ (a) 和 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ (b) 形貌

Fig. 4 Morphology of inclusions $CaO \cdot Al_2O_3$ (a) and $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ (b) in tested steel at 5 min after adding CaAl cored wire

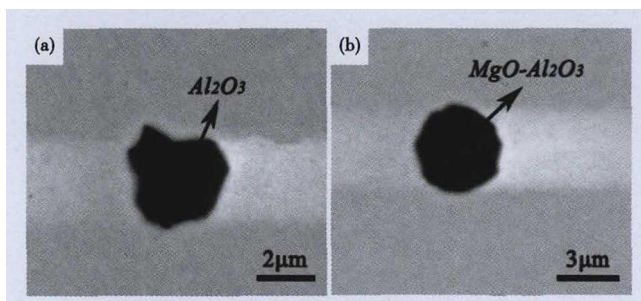


图 3 钙处理前吹氩 5 min 钢中夹杂物 Al_2O_3 (a) 和 $MgO \cdot Al_2O_3$ (b) 特征

Fig. 3 Characteristics of inclusions Al_2O_3 (a) and $MgO \cdot Al_2O_3$ (b) in tested steel by argon blowing for 5 min before calcium treatment

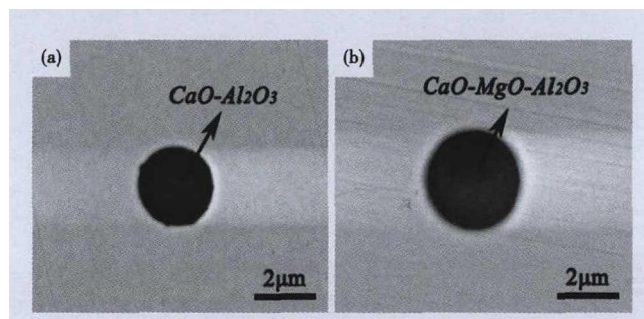


图 5 加纯 Ca 线 5 min 后钢中夹杂物 $CaO \cdot Al_2O_3$ (a) 和 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ (b) 形貌

Fig. 5 Morphology of inclusions $CaO \cdot Al_2O_3$ (a) and $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ (b) in tested steel at 5 min after adding Ca cored wire

2.2.2 钙处理前 5 min 的夹杂物特征

LF 到站吹氩 5 min 后, 夹杂物特征如图 3 所示, 仍以 Al_2O_3 以及 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物为主, 经过吹氩搅拌, 促进了夹杂物的碰撞长大, 部分较大的夹杂物上浮去除, 与 LF 到站时夹杂物相比(图 2), 残留的夹杂物尺寸较小。

2.2.3 钙处理 5 min 后夹杂物特征

2.2.3.1 CaAl 线处理 5 min 后夹杂物特征

加 CaAl 线 5 min 后钢中夹杂物的形貌特征如图 4 所示, 钢中夹杂物形貌进一步球形化, 以 $CaO \cdot Al_2O_3$ 与 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 复合夹杂物为主, 表明 Ca 的加入改性了 Al_2O_3 与 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂。

能谱分析显示图 4 (a) 夹杂物的 $(Al_2O_3)/(CaO)$ 在 1.5 左右, 根据 $CaO \cdot Al_2O_3$ 的二元相图, 可以推测夹杂物为 $CaO \cdot Al_2O_3$ 与 $CaO \cdot 2Al_2O_3$ 的复合夹杂物, 熔点在 $1550 \sim 1700 \text{ } ^\circ C$, 容易造成水口堵塞; 能谱显示图 4 (b) 中夹杂物钙含量极少, 高熔点的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂改性不完全。因此, CaAl 线处理钢中夹杂物改性效果不好, 钙没有完全将高熔点夹杂物进行改性, 钢中残钙量不足。

2.2.3.2 纯 Ca 线处理 5 min 后夹杂物特征

加纯 Ca 线 5 min 后钢中夹杂物的形貌特征如图 5

所示, 与 CaAl 线处理钢中夹杂物相比(图 4), 纯 Ca 线处理钢中夹杂物同样以 $CaO \cdot Al_2O_3$ 与 $CaO \cdot MgO \cdot Al_2O_3$ 复合夹杂物为主, 但其夹杂物球形化效果更好。

能谱分析结果表明, 图 5 (a) 夹杂物的 $(Al_2O_3)/(CaO)$ 约为 1, 推测夹杂物为 $CaO \cdot Al_2O_3$, 与 CaAl 线处理钢相比, 夹杂物熔点降低了, 图 5 (b) 夹杂物中 $x(Al_2O_3)/x(CaO)$ 在 0.5 左右, 推测其夹杂物为 C12A7 的低熔点夹杂物, 有助于降低夹杂物堵塞水口的风险。因此, 与 CaAl 线处理钢中夹杂物组成相比, 纯 Ca 线处理钢中夹杂物的钙含量提高, 夹杂物改性效果更好。

2.2.4 铸态样中夹杂物的特征

2.2.4.1 CaAl 线处理 DC01 铸态钢样的夹杂物特征

图 6 (a) 为 CaAl 线处理铸态钢样中典型钙镁铝酸盐夹杂物的面扫图, 夹杂物呈现近球形, O、Al、Mg 均匀分布在夹杂物内部基体上, Ca 元素在夹杂物表层, 由外向夹杂物内部扩散, 置换 $MgO \cdot Al_2O_3$ 的 Mg 元素, 但钙对内部 $MgO \cdot Al_2O_3$ 的夹杂物改性效果并不理想。

图 7 (a) 为 CaAl 线处理铸态钢样中典型钙铝酸

盐夹杂物的面扫图,夹杂物呈现球形, O、Al、Ca 均匀分布在夹杂物内部基体上, Ca 元素含量较少, Al 与 O 含量较高, Ca 的改性不充分。

2.2.4.2 纯 Ca 线处理 DC01 铸态钢样的夹杂物特征

图 6(b)为纯 Ca 线处理铸态钢样中典型钙镁铝酸盐的夹杂物的面扫图,夹杂物呈球形, O 均匀分布在夹杂物内部基体上, Ca 元素分布在夹杂物表层,由外向夹杂物内部逐步置换 Mg 元素,与 CaAl 线处理钢中夹杂物相比(图 6a), Ca 元素分布的表层较厚,说明钙置换 $MgO \cdot Al_2O_3$ 中的 Mg 更多,改性更充分,夹杂物改性效果更好。

图 7(b)为纯 Ca 线处理铸态钢样中典型钙铝酸盐的夹杂物的面扫图,夹杂物呈现球形,尺寸约为 3 μm , O、Al、Ca 元素均匀分布在夹杂物内部基体上,与 CaAl 线处理钢中夹杂物相比(图 7a),纯 Ca 线处理钢中夹杂物中的钙含量明显上升。

2.3 CaAl 线与纯 Ca 线处理钢中钙含量及收得率的对比

相同喂线量下的 3 炉钢的数据取平均值,得到 CaAl 线与纯 Ca 线在相同喂线速度(4 m/s)、不同喂线量成品钙与钙的收得率的关系,如图 8(a,b)所示。

由图 8 可见,随着喂线量增加,钢中成品钙含量上升,喂线量有助于提升钢中钙含量,与 CaAl 线相比,纯 Ca 线处理过程中钢中的成品钙更高,这是由于单位时间内纯 Ca 线加入的钙量更多的缘故(单位长度的纯钙线钙含量更高)。随着喂线量的增加, CaAl 线与纯 Ca 线的收得率先上升后下降,这是由于钙在钢中溶解度不高,随着喂线量的上升,钙能够被钢液吸收的量已趋于饱和,不会再增加,继续喂钙只会增加钙的烧损,降低钙的收得率。相较于 CaAl 线,纯 Ca 线单位时间加入的钙量更多,钙的收得率在不同的喂线量下更高,钢中成品钙也更高。

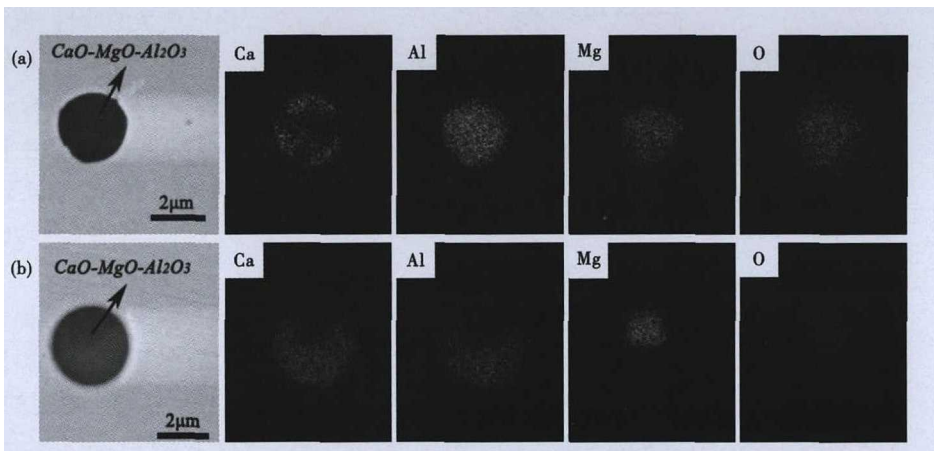


图 6 CaAl 线处理(a)和纯 Ca 线处理(b)铸态样中钙镁铝酸盐的夹杂物的面扫描图
Fig.6 Surface scanning of calcium magnesium aluminate inclusions in cast samples treated by CaAl cored wire (a) and pure Ca core wire (b)

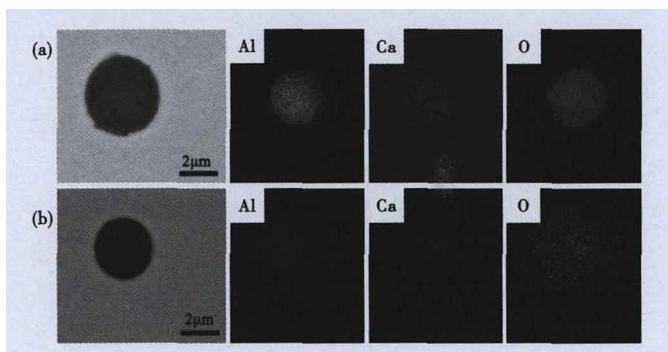


图 7 CaAl 线处理(a)和纯 Ca 线处理(b)铸态样中钙铝酸盐的夹杂物的面扫描图

Fig.7 Surface scanning of calcium aluminate inclusions in cast samples treated by CaAl cored wire (a) and pure Ca core wire (b)

3 分析与讨论

3.1 钙处理夹杂物的改性路径

在没有对夹杂物进行钙处理时,钢中夹杂物主要为块状或长条状的 Al_2O_3 与 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物,在镁质精炼顶渣及钢包内衬条件下,钢中难以避免存在

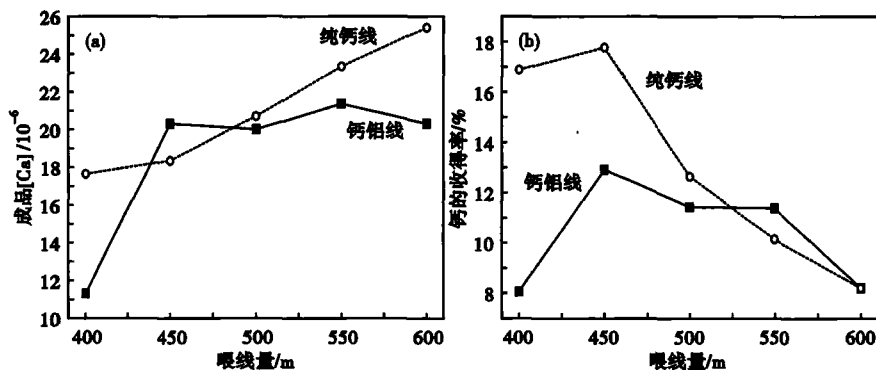


图 8 喂线量对成品钙含量(a)和钙的收得率(b)的影响

Fig.8 Effect of feed wire amount on calcium content in finished steel (a) and yield of calcium (b)

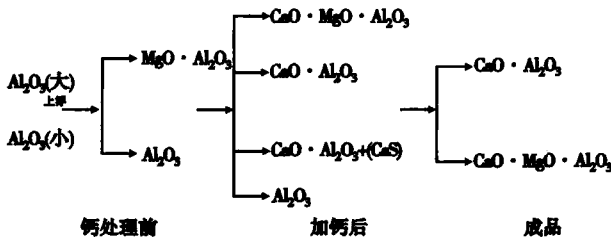


图 9 钢中 Al₂O₃ 夹杂物的改性路径

Fig. 9 Modified route of Al₂O₃ inclusions in steel

少量的镁,只要存在少量的[Mg],Al₂O₃就极易改性为MgO·Al₂O₃,加钙后,钢中的Al₂O₃与MgO·Al₂O₃夹杂物逐渐变性,生成CaO·Al₂O₃与CaO·MgO·Al₂O₃夹杂物,随着钙含量的增加,CaO·MgO·Al₂O₃中的Mg逐渐被Ca置换,最后生成CaO·Al₂O₃夹杂物。钢中Al₂O₃夹杂物的改性路线可以用如图9进行描述。

3.2 纯Ca与CaAl合金处理钢中夹杂物改性的热力学与动力学对比分析

研究^[11,13-14]发现,MgO·Al₂O₃的改性可能比Al₂O₃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。尽管从热力学角度上来看,钙能更轻易改性MgO·Al₂O₃夹杂物,但Mg在夹杂物中的扩散为限制性环节,Ca将MgO·Al₂O₃变性彻底需要较长时间^[11]。

从夹杂物组成、面扫描分析可以看出,Ca处理后钢中夹杂物钙镁铝酸盐大多为外层钙元素,内层镁铝尖晶石/氧化铝的形式,钙对钢中Al₂O₃与MgO·Al₂O₃夹杂物的改性,从夹杂物基体外向内逐步扩散。Ca改性夹杂物可以采用未反应核心型示意图进行描述,如图10所示。

对比图6(a,b)MgO·Al₂O₃夹杂面扫描图,可以发现,纯Ca线处理后改性夹杂物钙层(表层)厚度更加厚,说明纯钙处理时,改性反应的动力学条件更加好,这是因为,对比图4和图5钙处理5min后改性夹杂物组成,可以推测,纯Ca线处理夹杂物改性接近12CaO·7Al₂O₃,改性更加彻底,形成了熔点更低的液态钙铝酸盐,有助于钙及反应置换的镁在夹杂物中的扩散,改善了动力学条件,同样分析氧

化铝夹杂的改性,也得到同样的结果。

进一步分析认为,采用CaAl线处理,局部的钙铝合金液体共同参与了夹杂物的改性反应,Al液体阻止了钙置换氧化铝生成氧化钙+铝的反应,因此,纯钙线的改性效果较于CaAl线更好。

3.3 CaAl合金中元素铝对钙在钢液中气化行为的影响分析

孙庆亮^[15]等提出,当钙的蒸气压大于钢液静压力与大气压之和时,钙才能气化。在钢液面下深度为h处形成一个稳定的钙气泡,则气泡内压力必须满足以下条件:

$$P_{Ca} \geq P_{外} + P_{静} = P_{外} + \rho gh \quad (1)$$

式中:P_{Ca}-钙的蒸气压;P_外-钢液外部的压力;ρ-钢液密度;g-重力加速度;ρgh-液面下深度h处的静压力P_静,因此,当钙液体上升至液面下方h时,钙液才开始气化,h可由式(2)计算出来:

$$h \leq \frac{P_{Ca} - P_{静}}{\rho g} \quad (2)$$

从式(2)可知,降低钙的蒸气压、或者增加钢液外部压力,可以降低液态钙气化区域的高度,减少气化量。

此外,由于钢中大多数合金元素与钙的作用系数为负数,可有效地降低了钢中钙的活度,增加了钙在钢中的溶解度,降低钙的蒸气压,因而能提升钙处理效果。因此,合金形式的包芯线获得了广泛的应用。

本文结合合金元素对钙的作用系数,分析了合金元素对钙蒸气压减小的贡献度。由亨利定律,钙的蒸气压与其在钢中的活度存在以下关系^[16]:

$$a_{Ca(\%)} = \frac{P_{Ca}}{K_{H(\%)}} \quad (3)$$

式中:P_{Ca}-钙的蒸气压;a_{Ca(%)}-钙的活度;K_{H(%)}-质量

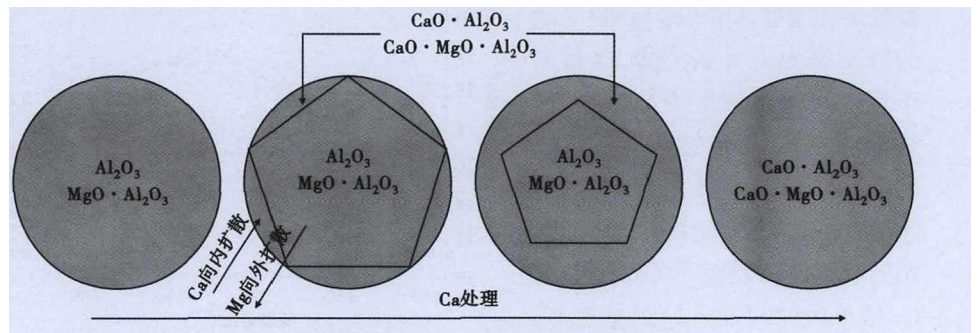


图 10 钙改性钢中夹杂物未反应核心模型示意图

Fig. 10 Unreacted core model schematic diagram of reaction between Ca and inclusions in tested steel

1%纯物质饱和蒸气压。

可见,钙的蒸气压与其在钢中的活度成正比,钢中部分合金元素能降低钙的活度,因此,降低钙的蒸气压。现对Al元素对钙的蒸气压的影响大小进行分析:

钢中钙的溶解度不高,钙采用质量1%为标态,因此,钙的活度可以表示为:

$$a_{Ca} = f_{Ca} [Ca] \quad (4)$$

$$\lg f_{Ca} = e_{Ca}^O [O] + e_{Ca}^S [S] + e_{Ca}^P [P] + e_{Ca}^C [C] + e_{Ca}^{Si} [Si] + e_{Ca}^{Mn} [Mn] + e_{Ca}^{Al} [Al] + e_{Ca}^{Ca} [Ca] \quad (5)$$

当钢中合金元素对钙的作用系数为负数时, $\lg f_{Ca}$ 会减小,从而减小了钢液中钙的活度,进一步地,钙的蒸气压会下降,从而达到提高钙的收得率的目的。

以Al含量对钙蒸气压的影响作为单独因素分析,则有:

$$P_{Ca} = a_{Ca(\%)} \times K_{H(\%)} = K_{H(\%)} f_{Ca} [Ca] = K_{H(\%)} [Ca] \times 10^{e_{Ca}^{[i]}} \times 10^{e_{Ca}^{[Al]}} \quad (6)$$

式中: i - 钢中除Al以外的其它元素,假设钢中Al含量增加0.01%,Al在钢中对钙的作用系数为-0.072^[17],则 $\Delta P_{Ca}/P_{Ca} = 7 \times 10^{-5}$,对钙的蒸气压影

响微乎其微,而且铝脱氧钢液中本身已经存在较高含量的铝,采用CaAl包芯线在铝脱氧钢中意义不大。

4 结论

(1) CaAl线处理DC01钢形成水口结瘤堵塞物为改性不完全的钙铝酸盐、 Al_2O_3 以及 $MgO \cdot Al_2O_3$,表明CaAl处理过程中,钢中的残钙量不足。

(2) 钙处理前的精炼过程中,DC01钢中的脱氧产物 Al_2O_3 部分已经被改性为 $MgO \cdot Al_2O_3$ 。通过钙处理,钢中夹杂物的改性路线为 $Al_2O_3 \rightarrow MgO \cdot Al_2O_3 \rightarrow Al_2O_3 \cdot xCaO (\cdot yMgO) \rightarrow Al_2O_3 \cdot xCaO$ 或者 Al_2O_3 直接改性为 $Al_2O_3 \cdot xCaO$ 。

(3) 与CaAl线处理DC01钢相比,纯Ca线对夹杂物的改性效果更好,生成的 $xCaO \cdot yAl_2O_3$ 以及 $xCaO \cdot yAl_2O_3 \cdot MgO$ 更接近液态夹杂物,有助于改性反应元素的扩散,优化改性反应的动力学条件。

(4) 在相同喂线速度、喂线量的条件下,纯Ca线处理钢中残钙量以及钙的收得率均高于CaAl线,在铝脱氧的DC01钢中,CaAl线中铝降低钙的蒸气压的贡献有限,而且,局部降低了夹杂物改性动力学条件,改性不完整,因此,铝脱氧的DC01钢采用纯钙线处理改性效果更好。

参考文献

- [1] 梁毅. RH精炼过程钢中夹杂物去除规律研究[D]. 沈阳:东北大学,2012.
- [2] 苏平虎. 钙处理技术在钢水精炼中的应用[J]. 山西冶金,2009,32(4):47-48.
- [3] 李菲,任强,李雅琳,等. 钙处理及保护浇铸工艺对钢液洁净度影响[J]. 炼钢,2016,32(3):18-23.
- [4] Verma N, Pistorius P C and Fruehan R J, et al. Transient Inclusion Evolution during Modification of Alumina Inclusions by Calcium in Liquid Steel; Part I. Background, Experimental Techniques and Analysis Methods [J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2011,42(4):711-719.
- [5] Cicutti C E, Madias J and Gonzalez J C. Control of Microinclusions in Calcium Treated Aluminium Killed Steels [J]. Ironmaking & Steelmaking, 1997,24(2):155-159.
- [6] 李战军,刘金刚,周金明,等. 一种采用纯Ca线的钢液钙处理工艺:CN103695597A[P]. 2014.
- [7] 吴辉强,王跃华,张建华. 实芯纯Ca线和硅钙线钙处理效果比较及其工艺优化[J]. 浙江冶金,2012(3):24-28.
- [8] 杨兆林,宋超. 钙铁包芯线的制作及其在钙处理中的应用[J]. 安徽冶金,2009(2):33-37.
- [9] 胡玉军. 复合纯CaAl线在LF精炼炉的应用实践[J]. 福建冶金,2016,45(4): .
- [10] 姜玉龙. 钙处理钢中夹杂物的演化机制及工艺优化研究[D]. 武汉:武汉科技大学,2016.
- [11] Yang J, Wang X H and 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.
- [12] 杨俊,王新华. 超低氧冶炼过程镁铝尖晶石形成的热力学分析与控制[J]. 钢铁,2011,46(7):26-31.
- [13] 李强,王新华,李海波,等. 低合金高强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.
- [14] Kang Y J, Li F and Morita K, et al. Mechanism Study on the Formation of Liquid Calcium Aluminate Inclusion from $MgO \cdot Al_2O_3$ Spinell [J]. Steel Research International, 2006,77(11):785-792.
- [15] 孙庆亮,杜显彬,翟正龙. 转炉钢包喂Ca-Si芯线工艺研究[C]. //全国冶金工艺理论学术会议. 1999:327-330.
- [16] 黄希祐. 钢铁冶金原理[M]. 北京:冶金工业出版社,2013:16-26.
- [17] Sun G D, Sui Y F and Wang C G, et al. Thermodynamic Calculation on Calcium Treatment for 26CrMo4S/2 Steel [J]. Journal of Iron and Steel Research, International, 2014,21(S1):61-64.

阮墨(1993-),男,硕士生,2015年武汉科技大学(本科)毕业,二次精炼和夹杂物控制。

E-mail: ruanmo1993@126.com

收稿日期:2018-04-23