

DOI:10.13228/j.boyuan.issn0449-749x.20140091

RH精炼工艺对无取向硅钢 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物演变影响及控制

曾亚南, 孙彦辉, 蔡开科, 徐蕊

(北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083)

摘要: 基于BOF→RH→CSP生产工艺,研究了RH精炼过程钢中夹杂物类型演变及 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物形成规律,同时对 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物的形成条件进行了热力学计算,借助CFD数值模拟软件研究了RH精炼过程卷渣行为。研究发现,RH精炼过程20和30 min时, $w([MgO])/w([Al_2O_3])$ 为0.005~0.020,未发现 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物;RH出站后夹杂物 $w([MgO])/w([Al_2O_3])$ 为0.3~0.5,且RH精炼结束后 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物占夹杂物总量的58.4%;另外,RH精炼过程钢液表面速度CFD模拟结果为0.57 m/s,大于临界卷渣速度0.45 m/s,且顶渣成分与夹杂物成分相近,存在卷渣现象。热力学计算表明,钢液与炉渣平衡时钢中 $w([Al])$ 为0.31%~0.37%, $w([Mg])$ 为0.000 24%~0.000 28%,在 $MgO \cdot Al_2O_3$ 生成区域之内。减少RH处理过程卷渣,浇铸过程下渣及控制顶渣和包衬相中 MgO 质量分数可抑制 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物形成。

关键词: 镁铝尖晶石; 无取向硅钢; 热力学; Al脱氧; RH过程卷渣

文献标志码: A **文章编号:** 0449-749X(2014)09-0038-06

Effect of RH Refining on Evolution and Control of $MgO \cdot Al_2O_3$ Inclusion in Non-Oriented Silicon Steel

ZENG Ya-nan, SUN Yan-hui, CAI Kai-ke, XU Rui

(School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Based on the practical production of non-oriented silicon steel, the evolution of inclusion type and the formation of $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion were analyzed in the process of BOF→RH→CSP. The thermodynamic conditions for forming $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion were discussed and the behavior of slag entrapment of molten steel was also simulated by CFD software during RH refining. The results showed that the value of $w([MgO])/w([Al_2O_3])$ was in the range of 0.005–0.020 and no $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion was observed at 20 and 30 min in RH refining; on the contrary, the value of $w([MgO])/w([Al_2O_3])$ was in the range of 0.3–0.5 and the $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion accounts for 58.5% of total amount of inclusions after RH refining. The compositions of slag were similar to the composition of inclusions; furthermore, the simulation results of CFD software show that the surface velocity was 0.57 m/s, which was greater than the critical velocity of 0.45 m/s. When the test steel was in equilibrium with slag, the $w([Mg])$ was 0.000 24%–0.000 28% and $w([Al])$ was 0.31%–0.37%, which was in theoretically calculated $MgO \cdot Al_2O_3$ formation zone, thereby leading to formation of $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion in steel. Thus, the $MgO \cdot Al_2O_3$ inclusion was inhibited by reducing the quantity of slag entrapment and roughing slag in casting and controlling composition of slag and the MgO content in the ladle refractory.

Key words: spinel inclusion; non-oriented silicon steel; thermodynamics; aluminium deoxidation; slag entrapment during RH refining

众所周知,连铸无取向硅钢板坯要经过热轧、冷轧生产硅钢片(如0.35 mm厚)供用户使用,无取向硅钢成分具有超低碳高硅铝含量的特点。在RH精炼过程中,钢液与耐火材料或炉渣反应,使钢液中的镁含量增加,如果采用铝脱氧则很容易生成 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂物,夹杂物中 MgO 与 Al_2O_3 比值达到0.392时,夹杂物可称为镁铝尖晶石夹杂。 $MgAl_2O_4$ 夹杂物具有稳定的面心立方结构,熔点较高、硬度大、轧制时不易变形,属D类点状不变形夹杂物,此类夹杂不仅容易在冷轧板表面形成线条状缺陷,同

时会影响钢水可浇性^[1-4]。Itoh^[5]、Park^[6-7]、Kang^[8]、Seo^[9]等人研究了镁铝尖晶石的形成及演变,研究认为夹杂物演变一般为顶渣与耐火材料提供溶解镁,镁铝尖晶石夹杂依靠氧化铝夹杂与溶解镁的反应生成。然而大量的试验研究基于实验室分析,忽略了现场实际生产条件的复杂性。对于低碳铝镇静钢而言,蔡开科^[10]等人研究认为,RH处理后夹杂物主要为块状和群状 Al_2O_3 ,夹杂物去除取决于钢水循环流量及处理时间。对于Si-Mn复合脱氧钢,王德永^[11]等人研究认为RH精炼过程中形成的硅酸盐夹杂物具

作者简介:曾亚南(1983—),男,博士生;

E-mail: zengyanann@126.com;

收稿日期:2014-02-21

有一定的硫容量,形成边缘为富硫相,内核为硅酸盐的双层夹杂物,但研究学者对RH去除夹杂物的能力和方式仍有一定争议^[10,12-15]。本文通过跟踪RH实际生产过程,对普通夹杂物向MgO·Al₂O₃和CaO·Al₂O₃·MgO复合夹杂物转变的过程以及生产工艺条件对MgO·Al₂O₃夹杂物转化的影响进行了研究,为无取向硅钢的MgO·Al₂O₃形成及控制措施提供理论支撑及技术指导。

1 试验方法

1.1 试验方法

BOF→RH→CSP流程生产无取向硅钢。RH脱碳结束后利用铝脱氧,然后加硅铁锰铁合金达到钢种所需成分要求。再至浇注平台CSP工艺生产70 mm×1 300 mm薄板坯。

1.2 取样及分析方法

试验选取一个浇次连浇5炉钢水进行研究,其次试验编号依次为1~5号。钢种成分(质量分数,%)控制为:C 0.001~0.003, Si 1.5~1.7, Mn 0.1~0.2, P 0.03~0.05, S 0.002~0.003。RH取样时间节点为:RH精炼过程20 min(加铝)、30 min(加Si-Mn)、RH出站。采用金相显微镜和扫描电镜(SEM-EDS)分析夹杂物成分。

2 试验结果

2.1 RH精炼渣成分变化规律

由图1可以看出,钢包进入RH精炼工位时,顶渣成分中MgO质量分数为5.3%,Al₂O₃质量分数为

15%。精炼20 min时,开始加铝脱氧,渣中Al₂O₃质量分数明显增加。脱氧结束后,精炼30 min时,加Si-Mn调整钢种成分至规定要求,此时渣中MgO质量分数为6.25%,Al₂O₃质量分数增加为20%。加Si-Mn至精炼结束时,渣中MgO及Al₂O₃质量分数分别增加8.0%及38%。渣中MgO及Al₂O₃质量分数增加的原因可能是钢包耐火材料被侵蚀及钢中铝与氧反应生成Al₂O₃上浮到顶渣中。

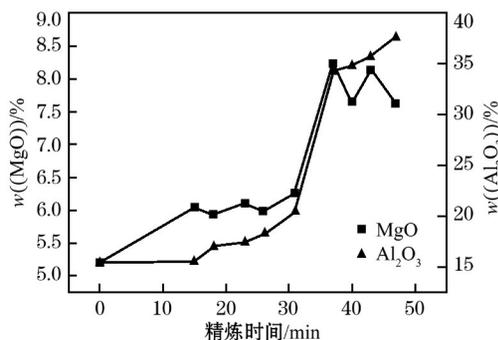
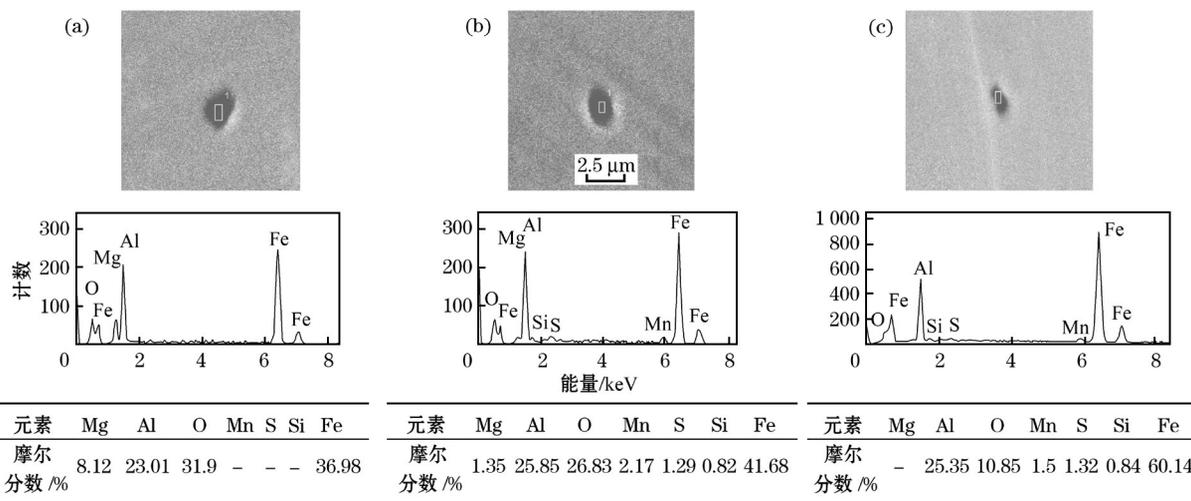


图1 RH精炼过程顶渣成分变化

Fig. 1 Composition change of slag during RH refining

2.2 RH精炼过程类型转变

利用SEM-EDS对RH精炼20和30 min以及精炼结束时的试样进行观察,分析得出各工序夹杂物可分为3类:1)单一MgO·Al₂O₃尖晶石夹杂;2)含MgO铝硅酸盐夹杂(Al₂O₃·SiO₂·MnO·MgO);3)不含MgO铝硅酸盐夹杂(Al₂O₃·SiO₂)。夹杂物形貌如图2所示。



(a) MgO·Al₂O₃夹杂形貌; (b) 含MgO铝硅酸盐夹杂(Al₂O₃·SiO₂·MgO·MnO·MnS); (c) 不含MgO铝硅酸盐夹杂(Al₂O₃·SiO₂·MnO·MnS)。

图2 夹杂物类型

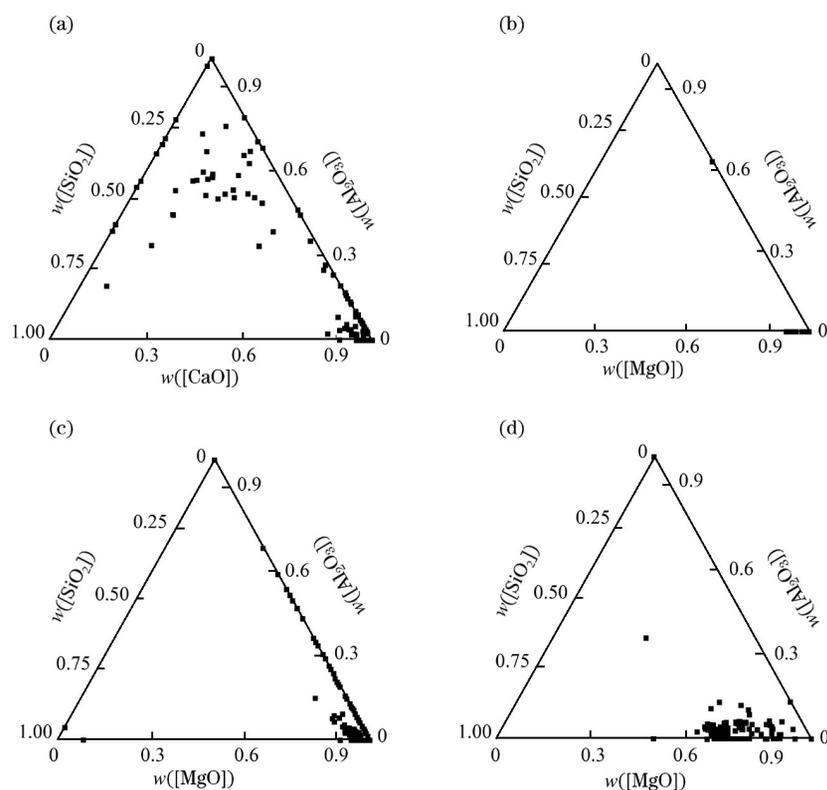
Fig. 2 Morphology of inclusions

利用金相显微镜对5炉次试验钢种的夹杂物进行统计得出,RH精炼20 min(加铝)、RH精炼30 min

(加硅锰)、RH精炼结束试样的夹杂物个数分别为111、203、114个。将统计出的夹杂物在SEM-EDS下

进行成分分析,并将分析结果列入 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$ 三元相图。为了对比精炼过程夹杂物类型转变,研

究对精炼前的 121 个夹杂物进行统计,分析结果列入 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-CaO}$ 相图,如图 3 所示。



(a) RH 处理前; (b) RH 20 min; (c) RH 30 min; (d) RH 出站。

图 3 RH 精炼过程三元相图

Fig. 3 Ternary phase diagram of inclusions during refining process

由图 3 可知, RH 精炼前以硅铝酸盐为主, RH 精炼 20 min 时主要为 Al_2O_3 夹杂,且存在少量的 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$; RH 精炼 30 min 后主要为 $\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{SiO}_2$ 夹杂,并存在少量的 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 。RH 精炼结束时,夹杂物主要是 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 和 $\text{Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2\text{-MgO}$;对 SEN 水口解剖分析发现,水口内壁有 1~9 mm 黏结物,堵塞物是含 Al_2O_3 、 MgO 、 SiO_2 、 CaO 、 Fe_2O_3 的复合夹杂物。堵塞物成分与图 3(d)极为相似。因此可以得出, RH 精炼 30 min 后,夹杂物逐渐转变为 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$,它对铸坯质量及浇铸过程将产生极大影响。

3 讨论与分析

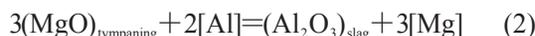
3.1 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂生产热力学分析

虽然炉衬剥落、钢液卷渣等情况下有可能形成镁铝尖晶石夹杂,但是镁铝尖晶石的形成机制应该是炉渣(炉衬)-钢液-夹杂物之间共同作用的结果。而钢液中的镁是炉渣(炉衬)与夹杂物相互影响生成 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂的中介和桥梁^[2,16]。

针对无取向硅钢生产工艺,对 5 炉次生产试验

钢中 RH 加铝、硅锰合金后到出站所取试样统计,夹杂物共计 98 个,其中单一 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石占 58.4%。中间包 114 个夹杂物中 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 或 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3\cdot\text{MnS}$ 占 59%。铸坯中 160 个夹杂物中 $\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3$ 占 46%。

研究认为生成尖晶石必须具备条件是:1)钢水中必须有 $[\text{Al}]_s$;2)钢包顶渣包衬中含有 MgO 。故有下列反应发生^[17-19]:



钢液中镁铝尖晶石的形成有 2 种情况。一种情况是镁与 Al_2O_3 夹杂发生如式(3)所示的反应,生成镁铝尖晶石夹杂物;另外一种情况是钢液中的镁先进行如式(4)所示的脱氧反应,生成 MgO 夹杂,然后钢液中的铝与 MgO 夹杂发生如式(5)所示的反应,生成镁铝尖晶石夹杂物。



1) MgO/MgO·Al₂O₃边界:

$$4(\text{MgO})+2[\text{Al}]=\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+3[\text{Mg}] \quad (6)$$

$$\lg K_8=-33.09+50\,880/T \quad (7)$$

$$K_8=\frac{a_{[\text{Mg}]}^3 a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{[\text{Al}]}^2 a_{\text{MgO}}}=\frac{a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3} f_{\text{Mg}}^3 w([\text{Mg}])^3}{a_{\text{MgO}}^4 f_{\text{Al}}^2 w([\text{Al}])^2} \quad (8)$$

2) MgO·Al₂O₃/Al₂O₃边界:

$$4(\text{Al}_2\text{O}_3)+3[\text{Mg}]=3\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3+2[\text{Al}] \quad (9)$$

$$\lg K_{11}=34.37-46\,950/T \quad (10)$$

$$K_{11}=\frac{a_{[\text{Al}]}^2 a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}^3}{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^4 a_{[\text{Mg}]}^3}=\frac{a_{\text{Al}_2\text{O}_3}^4 f_{\text{Mg}}^3 w([\text{Mg}])^3}{a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}^3 f_{\text{Al}}^2 w([\text{Al}])^2} \quad (11)$$

MgO·Al₂O₃夹杂物形成过程热力学计算相关参数见表1^[1]。

表1 1873 K时Mg和Al的相互作用系数

Table 1 Interaction parameters of magnesium and aluminum at 1873 K

元素	C	Si	Mn	P	S	Al _s	Ca	N
Mg	-0.15	-0.09	—	—	-1.38	-0.12	—	—
Al	0.091	0.005 6	—	0.033	0.030	0.045	0.043	-0.058

根据Hino等人的最新研究数据^[20], 1873 K条件下, 计算MgO/MgO·Al₂O₃边界时, 取 $a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}=0.8$, $a_{\text{MgO}}=0.99$; 计算MgO·Al₂O₃/Al₂O₃边界时, 取 $a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}=0.47$, $a_{\text{Al}_2\text{O}_3}=1$ 。1873 K时MgO、MgO·Al₂O₃、Al₂O₃的平衡相图如图4所示。

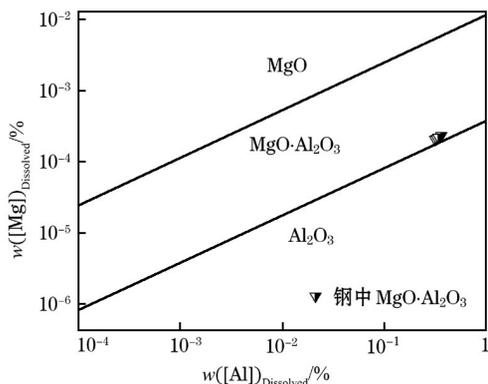


图4 MgO、MgO·Al₂O₃、Al₂O₃的平衡相图

Fig. 4 Phase equilibrium diagram of MgO, MgO·Al₂O₃ and Al₂O₃

由图4可知, 炉渣与钢液平衡时, 当钢中 $w([\text{Al}]_s)$ 为0.000 1%时, $w([\text{Mg}]) \geq 8.06 \times 10^{-9}$ 时, 则钢中Al₂O₃夹杂物将开始转变为MgO·Al₂O₃, 所以只要钢中存在极少量的镁和铝, 生成MgO·Al₂O₃的可能性非常大。随着钢液中铝质量分数增加, 生成MgO·Al₂O₃所需的镁质量分数相应提高。当钢中的 $w([\text{Al}]_s)$ 为0.1%时, $w([\text{Mg}]) \geq 8.06 \times 10^{-5}$, MgO·Al₂O₃将开始转化为MgO。由图4可知, 试验过程中, 炉渣与钢液平衡时, 钢中实际 $w([\text{Al}]_s)$ 为0.32%时, $w([\text{Mg}])$ 为0.000 25%, 镁和铝质量分数处于

MgO·Al₂O₃生成区, 大量镁铝尖晶石生成。

3.2 RH精炼过程夹杂物成分变化

试验对5炉次含MgO夹杂物进行统计分析。夹杂物中含MgO夹杂物所占比例如图5所示。由图可知, 精炼20和30 min, 工序不含MgO夹杂物所占夹杂物总量分别为82.1%和81.9%, 而含MgO夹杂物仅17.9%和18.1%。随着冶炼工序进行, 夹杂物类型逐渐发生转变。RH精炼结束时, 试样中夹杂物被检测到含有MgO成分的比例为96.0%, 含MgO类夹杂物数增加比例为81.25%, 增加极为明显。

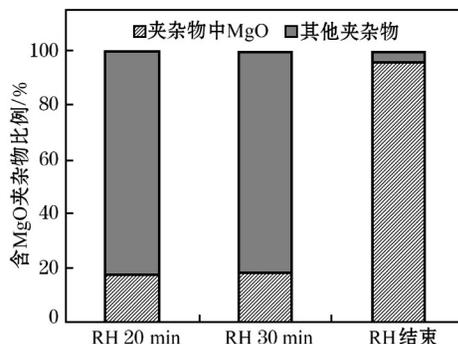


图5 RH精炼过程含MgO夹杂物所占比例

Fig. 5 Percent of MgO-containing inclusions in RH refining

为了进一步了解镁铝尖晶石变化规律, 将RH精炼20和30 min以及精炼结束工序所有分析夹杂物中MgO和Al₂O₃质量分数进行统计分析。本研究将 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])=0.3\sim 0.5$ 的夹杂物视为MgO·Al₂O₃尖晶石。各工序夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 比值如图6所示。由图可知, RH精炼20和30 min工序中夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$

很低,分别仅为0.005和0.017。而RH精炼结束时,夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 达到0.378,在 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 为0.3~0.5内处于镁铝尖晶石类型夹杂物定义范畴内。另外,对现场钢包顶渣成分分析发现,顶渣中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 比值为0.17~0.20。随着真空处理的进行,钢水与包衬、浸渍管耐火材料、钢包顶渣相互作用增加了夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 比值,使夹杂物向 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石转变。

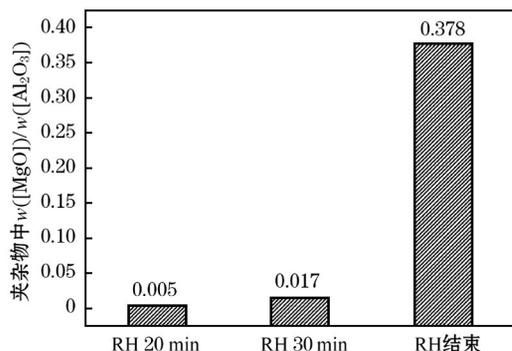


图6 RH精炼过程夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$

Fig. 6 Average value of $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ in RH refining

3.3 RH顶渣成分对含MgO的铝硅酸盐夹杂物的影响

针对RH精炼过程夹杂物进行分析统计发现,夹杂物中除单一 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 外,还存在含MgO的铝硅酸盐夹杂,此类夹杂含有 $\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SiO}_2 \cdot \text{MgO} \cdot \text{CaO} \cdot \text{MnS}$ 。另外,RH处理过程中钢包顶渣 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 为0.8~1.5, $w([\text{MgO}])$ 为5.0%~7.5%。图7所示为渣中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 与钢中夹杂物 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 的关系。由图可知。随

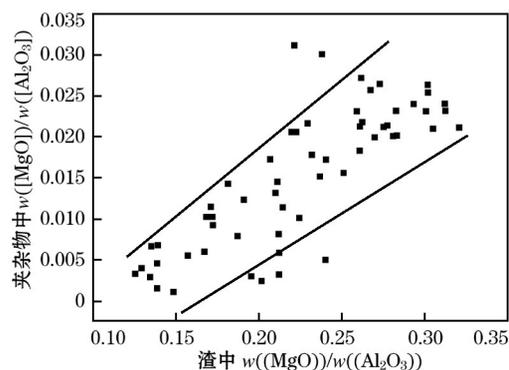


图7 渣中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 对夹杂物中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 的影响

Fig. 7 Effect of $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ in slag on $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ in inclusion

钢包顶渣中 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 增加,钢中夹杂物 $w([\text{MgO}])/w([\text{Al}_2\text{O}_3])$ 也呈增加趋势。这说明在搅拌过程中,钢包顶渣卷入钢水也是夹杂物中MgO来源之一。

3.4 RH卷渣行为对 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂物的影响

RH对夹杂物的影响参数主要为钢水循环量、处理时间及吹氩流量。研究仅针对吹氩卷渣对夹杂物的影响进行研究。为了证实过程卷渣对夹杂物的影响,试验利用CFD数值模拟软件对RH精炼不同工况下钢液循环区钢液表面速度进行模拟研究,同时利用钢液卷渣临界速度公式计算了实际工况下的钢液表面临界卷渣速度。

RH钢渣临界流速表达式为^[21]

$$u_{m,crit} = [128g(\rho_m - \rho_s)\sigma_{ms} \cos \alpha (3\rho_m^2)]^{1/4} \quad (12)$$

式中: ρ_m 为钢液密度, kg/m^3 ; ρ_s 为液态渣密度, kg/m^3 ; σ_{ms} 为渣金张力, N/m ; α 为钢液流股冲击角度, $(^\circ)$ 。

CFD模拟边界条件为:1)真空室钢包熔池为自由表面;2)钢包壁面为无滑移边界条件;3)上升管吹Ar管为流量入口边界条件,吹氩流量(标准态)为800~1 900 L/min,钢包上表面为压力入口条件;4)真空室出口为压力出口边界条件,压强为133 Pa。

图8所示为CFD模拟软件对920和1 900 L/min工况下(标准态)RH精炼过程的模拟结果。由图可以看出,920 L/min条件下RH下降管出口处钢液的速度为0.5 m/s,随流量增加,下降管出口处的速度也随着增加,1 900 L/min时RH下降管出口处钢液的速度为0.57 m/s。

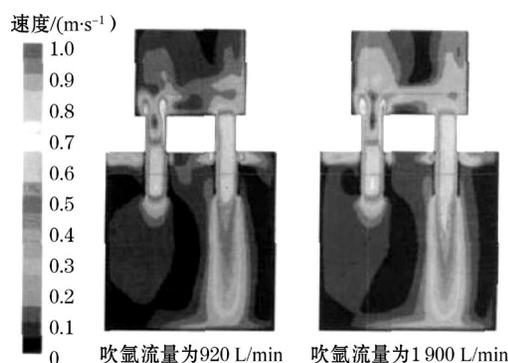


图8 RH内钢液速度云图

Fig. 8 Velocity contours of liquid steel in RH

CFD模拟及理论计算结果如图9所示。由图可以看出,临界卷渣速度为0.45 m/s时氩气流量(标准态)为698 L/min。数值模拟结果除了658 L/min下的钢液表面速度未达到临界卷渣速度外,其他工况

条件下钢液循环区的钢液表面速度为0.49~0.57 m/s, 大于钢液临界卷渣速度0.45 m/s。因此,RH精炼过程中存在不同程度的卷渣现象。

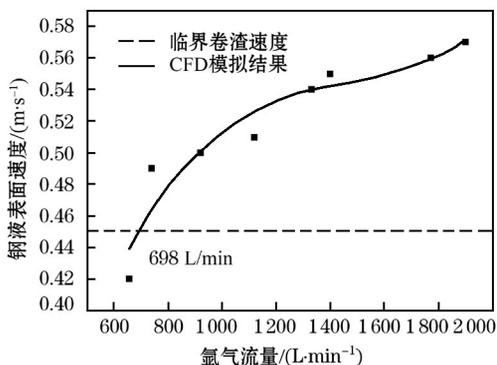
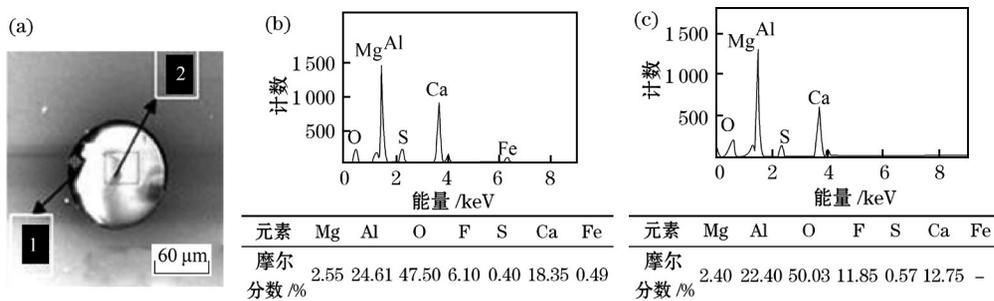


图9 RH上升管氩气流量变化与钢液速度关系
Fig. 9 Relationship between Ar flow level rate and velocity of steel

图10所示为RH出站后试样中的典型夹杂物形

貌及能谱分析结果。由图可以看出,1点夹杂物能谱分析结果为夹杂物中w(MgO)为4.27%, w(Al₂O₃)为52.49%, w(CaS)为1.2%, w(CaO)为42.04%; 2点夹杂物中w(MgO)为4.89%, w(Al₂O₃)为58.24%, w(CaS)为2.09%, w(CaO)为34.77%。分析比较RH出站所取钢样中夹杂物成分与钢包顶渣成分十分相近,进一步证实了在RH精炼过程中顶渣卷入钢水内部成为夹杂物来源^[22-24]。

结合上述研究结果,在实际生产过程中为防止RH精炼过程MgO·Al₂O₃夹杂物生成应采取以下措施:1)采用高质量铁合金,防止合金料中带入残Mg,以免生成MgO·Al₂O₃;2)采用合理的吹氩气量,防止RH精炼搅拌过程卷渣;3)RH处理过程充分软吹处理使其w([Al]_s)/w([Al]_l)比值在0.97以上,使Al₂O₃夹杂物充分上浮;4)控制RH精炼过程钢水对钢包耐火材料的侵蚀及精炼渣中MgO质量分数。



(a) 夹杂物形貌; (b) 1点能谱图; (c) 2点能谱图。

图10 RH出站试样中典型夹杂物及能谱
Fig. 10 Typical inclusions and EDS in samples after RH refining

4 结论

1) RH精炼30 min后夹杂物由Al₂O₃和Al₂O₃·SiO₂夹杂向MgO·Al₂O₃转变,RH结束后,夹杂物w(MgO)/w(Al₂O₃)由0.005增加到0.378,水口堵塞物中的成分与RH出站夹杂物成分相似。

2) RH精炼过程钢包循环区钢液表面速度均大于理论临界卷渣速度0.45 m/s,容易造成卷渣。且RH出站过程中夹杂物成分与顶渣成分相似,这证实了卷渣为钢中夹杂物来源之一。

3) 钢液与炉渣平衡时,钢中w([Al]_s)为0.31%~0.37%, w([Mg])为0.000 24%~0.000 28%,处于理论计算时MgO·Al₂O₃生成区域之内。

4) 防止RH精炼搅拌过程卷渣、使用高质量铁合金、促使钢水中Al₂O₃充分上浮、控制渣和包衬相中MgO质量分数等都可抑制MgO·Al₂O₃尖晶石形成。

参考文献:

- [1] 宋延琦, 李京社, 李娇, 等. 气瓶钢精炼过程中的MgO·Al₂O₃夹杂物[J]. 北京科技大学学报, 2009, 31(1): 130.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] Beskow K, Tripathi N N, Nzotta M, et al. Impact of Slag-Refractory Lining Reactions on the Formation of Inclusions in Steel[J]. Ironmaking and Steelmaking, 2004, 31(6): 514.
- [5] Itoh H, Hino M, Banya S. Thermodynamics on the Formation of Spinel Nonmetallic in Liquid Steel[J]. Metall Mater Trans: B, 1997, 28(10): 953.
- [6] Park J H, Kim D S, Lee S B. Effect of CaO-Al₂O₃-MgO Slags on the Formation of MgO·Al₂O₃ Inclusions in Ferritic Stainless Steel[J]. Metall Mater Trans: B, 2005, 36(5): 67.
- [7] Park J H. Formation Mechanism of Spinel Type Inclusions in High-Alloyed Stainless Steel Melts[J]. Metall Mater Trans: B, 2007, 38(7): 657.

(下转第54页)

