

镁对低碳铝镇静钢 SPHC 中夹杂物变性的影响

冯捷^{1,2} 包燕平¹ 崔衡¹

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083; 2 河北科技大学材料科学与工程学院, 石家庄 050018)

摘要 运用热力学计算分析了镁对 SPHC 钢(0.065% C, 0.025% Al)中夹杂物的作用,并结合 80 t 顶底复吹转炉流程工业试验,研究镁对 SPHC 钢中夹杂物的影响机理。热力学计算结果证明,当 $[Al]^2/a_{Mg}^3 \leq 7.69 \times 10^{10}$, 钢中就会生成单独的 $MgO \cdot Al_2O_3$;对 SPHC 钢进行喂 0.875 kg/t 镁线的工业试验结果表明,镁处理可细化夹杂,使团簇状 Al_2O_3 变为细小的 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂, MnS 夹杂也得到了变性,夹杂物数量减少,提高了钢液的纯净度。

关键词 镁处理 SPHC 钢 热力学计算 Al_2O_3 $MgO \cdot Al_2O_3$

Effect of Magnesium on Modification of Inclusions in Low Carbon Aluminium-Killed Steel SPHC

Feng Jie^{1,2}, Bao Yanping¹ and Cui Heng¹

(1 Metallurgical and Ecological Engineering School, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 School of Materials Science and Engineering, Hebei University of Science and Technology, Shijiazhuang 050018)

Abstract The effect of magnesium on modification of non-metallic inclusions in steel SPHC (0.065% C, 0.025% Al) is analyzed by thermodynamic calculation, and combined with commercial test by using an 80 t top and bottom combined blown converter flow sheet, the mechanism for influence of magnesium on inclusions in steel SPHC is studied. Thermodynamic calculation results prove that as $[Al]^2/a_{Mg}^3 \leq 7.69 \times 10^{10}$, the inclusion $MgO \cdot Al_2O_3$ alone forms in steel; Commercial test with feeding 0.875 kg/t magnesium wire in steel SPHC shows that the inclusions are fine by magnesium treatment i. e. the round cluster Al_2O_3 is modified to fine inclusion $MgO \cdot Al_2O_3$ while the inclusion MnS is also modified, the amount of inclusions in steel decreases and the cleanliness of steel is advanced.

Material Index Magnesium Treatment, Steel SPHC, Thermodynamic Calculation, Al_2O_3 , $MgO \cdot Al_2O_3$

低碳铝镇静钢 SPHC 由于具有强度高、韧性好、易于加工成型及良好的可焊接性等优良性能,因而被广泛用于船舶、汽车、桥梁、建筑、机械、压力容器、航空、家电等制造行业,而作为生产冲压和深冲压冷轧板的基板(SPHD 和 SPHE),要求钢的纯净度高(尤其是非金属夹杂物),且表面质量良好^[1]。

低碳铝镇静钢 SPHC 采用铝进行终脱氧,对其影响最大的是脆性不变形 Al_2O_3 夹杂,在热加工过程中,严重影响钢材的加工性能和表面质量。对 Al_2O_3 夹杂的去除,主要是采用钙处理^[2],而镁在钢水温度下,蒸汽压高,熔池搅拌效果好,可使钢中夹杂物数量和尺寸减小、分布均匀、形态改善。采用 Mg 合金脱氧可以避免形成大型夹杂物,形状不定的 Al_2O_3 夹杂物转变为球形 $MgO \cdot Al_2O_3$ 尖晶石夹杂物、长条状 MnS 塑性夹杂变为细小的 MgO 和 MgS 的复合夹杂物,该结构细小弥散地分布在钢中,改善了钢的性能。目前应用镁处理对钢液中的 Al_2O_3 夹杂进行无害化处理主要是应用在冷镦钢和轴承钢^[3],而在低碳铝镇静钢中的应用未见报道。

1 镁对 SPHC 钢中夹杂物作用的热力学理论分析

1.1 各元素活度系数计算

首先计算各元素的活度系数,因各元素在钢液中的浓度很小,可以认为这些元素遵守亨利定律。各元素的活度系数可以按式(1)计算:

$$\lg f_i = \sum e_j^i [j] \quad (1)$$

式中: f_i -元素 i 的活度系数; e_j^i -元素 j 对 i 的作用系数; $[j]$ -元素 j 的质量分数/%。

为了方便计算,将钢液温度定为 1 873 K,对夹杂物生成进行定性分析。表 1 列出钢中主要元素在 1 873 K 时钢液中的相互作用系数^[4]。表 2 为热力学计算用 SPHC 钢的化学成分。

表 1 1 873 K 主要元素之间相互作用系数

Table 1 Interaction coefficient of major elements in steel at 1 873 K

元素	S	Al	O
O	-0.133	-3.9	-0.2
S	-0.028	0.035	-0.27
Al	0.030	0.045	-6.60
Mg	-125	0	-430

表2 热力学计算用 SPHC 钢化学成分/%

Table 2 Chemical composition of steel SPHC by thermodynamic calculation /%

C	Si	Mn	P	S	Als	T[O]	N
0.065	0.04	0.32	0.016	0.010	0.025	0.004 0	0.005 0

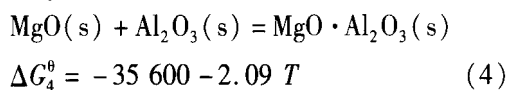
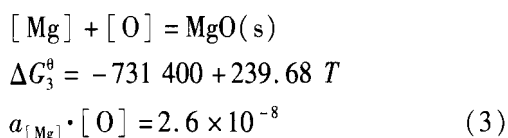
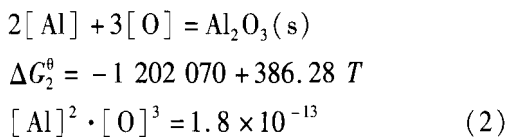
按式(1)可以计算出1 873 K 时钢中主要元素的活度系数值, $f_{\text{O}} = 0.50$, $f_{\text{S}} = 1.00$, $f_{\text{Al}} = 0.99$, 由于 Mg 的活度系数计算不准确, 故在以下计算中取

$a_{[\text{Mg}]}$ 。

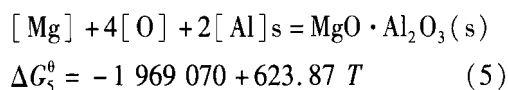
1.2 镁对 SPHC 钢中夹杂物的作用过程

1.2.1 镁铝合金对夹杂物生成过程分析

向钢中加入镁铝合金进行脱氧, 在钢液中会发生以下几个反应^[5]:



根据式(2)、(3)和(4), 可得:



当反应达到平衡后, 取 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的活度为 1, 即 $a_{\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3} = 1$, 在 1 873 K 时, 可计算出:

$$[\text{O}]^4 \cdot [\text{Al}]^2 \cdot a_{[\text{Mg}]} = 7.36 \times 10^{-22} \quad (6)$$

联立式(2)和(6), 可得:

$$a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 = 3.8 \times 10^{-11} \quad (7)$$

由式(7)得出 $[\text{Mg}]$ 与 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 之间的关系是钢液中夹杂物成分为 Al_2O_3 与 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的临界条件, 如图 1(a) 中曲线 Al_2O_3 - $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 所示, 当钢液中 $a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 > 3.8 \times 10^{-11}$ 时, 夹杂物成分为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; 当钢液中 $a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 < 3.8 \times 10^{-11}$ 时, 夹杂物成分为 Al_2O_3 。

联立式(3)和(6), 可得:

$$a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 = 6.2 \times 10^{-10} \quad (8)$$

由式(8)得出 $a_{[\text{Mg}]}$ 与 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 之间的关系是钢液中夹杂物成分为 MgO 与 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 的临界条件, 如图 1(a) 中曲线 MgO - $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 所示。当钢液中 $a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 > 6.2 \times 10^{-10}$ 时, 钢液中夹杂物成分为 MgO ; 当钢液中 $a_{[\text{Mg}]}^3 / [\text{Al}]^2 < 6.2 \times 10^{-10}$ 时, 钢液中夹杂物成分为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 。

根据式(7)和(8)可得 1 873 K 时 $[\text{Mg}]$ - $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 元素浓度与可能生成的夹杂物组成关系(图 1a)。

由图 1(a) 可知, SPHC 钢要求的 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 在 0.018% ~ 0.03%。在 1 873 K 时, 当 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 为 0.018% 时, 要形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂, 对应的 $a_{[\text{Mg}]}$ 在 $(2.31 \sim 3.25) \times 10^{-5}$, 溶解镁含量高于此, 就会生成氧化镁夹杂; 当 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 为 0.03% 时, 要形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂, 对应的 $a_{[\text{Mg}]}$ 在 $(5.86 \sim 8.23) \times 10^{-5}$, 溶解镁含量高于此, 就会生成氧化镁夹杂。由此可见, 当 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 在 0.018% ~ 0.03% 时, 只要微量的溶解镁就可生成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂。综合式(2)和图 1(a) 可知, 钢液中 $[\text{O}]$ 越高, 与之平衡的 $[\text{Mg}]$ 和 $[\text{Al}]_{\text{s}}$ 越低。根据图 1(a) 可知, 利用改变钢液中 $[\text{Mg}]$ 能够更快、更有效地改变钢中夹杂物成分,

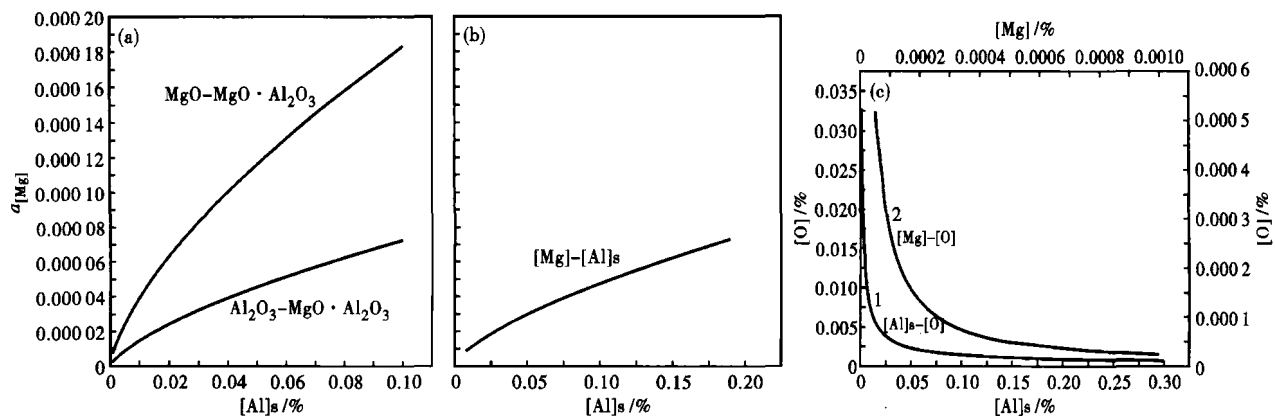
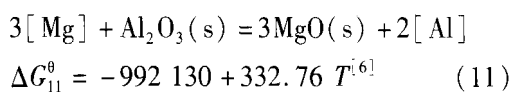
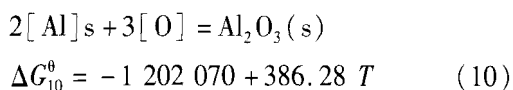
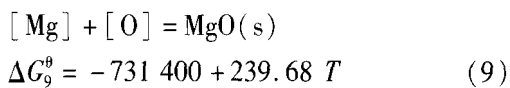


图 1 1 873 K SPHC 钢液中 $[\text{Mg}]$ - $[\text{Al}]_{\text{s}}$ - $[\text{O}]$ (a)、 $[\text{Mg}]$ - $[\text{Al}]_{\text{s}}$ (b) 和 $[\text{Mg}]$ 还原生成的 Al_2O_3 夹杂 (c) 的平衡曲线图
Fig. 1 Diagram of equilibrium curves of $[\text{Mg}]$ - $[\text{Al}]_{\text{s}}$ - $[\text{O}]$ (a), $[\text{Mg}]$ - $[\text{Al}]_{\text{s}}$ (b) and $[\text{Mg}]$ reducing formed Al_2O_3 inclusion (c) in liquid steel SPHC at 1 873 K

因为在 $[Mg]$ 变化很小区间内, 夹杂物成分便发生转变, 而若要通过改变钢液中 $[Al]_s$ 来改变夹杂物成分, 需要使钢液中 $[Al]_s$ 发生很大的改变, 不容易达到。例如在钢液中 $[Mg]-[O]-[Al]_s$ 处于平衡情况下, 当 $[Al]_s$ 为 0.02% 时, 要形成 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂, 需要的溶解镁为 2.48×10^{-5} ; $[Al]_s$ 为 0.07% 时, 要形成 $MgO \cdot Al_2O_3$ 夹杂, 需要的 $a_{[Mg]}$ 为 5.71×10^{-5} 。很明显 $[Al]_s$ 的变化范围比 $a_{[Mg]}$ 的变化范围大很多。

1.2.2 镁处理 SPHC 钢中夹杂物变性过程分析

在冶炼 SPHC 钢时, 先采用铝进行强脱氧, 然后喂入镁包芯线对夹杂物进行变性。由于 SPHC 钢 $[Al]_s$ 高, 故钢液中的溶解氧由 $[Al]_s$ 来控制。铝加入钢液中后, 钢中生成 Al_2O_3 夹杂, 随后加入镁, 钢中会存在如下两个反应: (1) 镁直接与钢中溶解氧反应; (2) 溶解镁直接与钢中已生成的 Al_2O_3 夹杂反应生成 $MgO \cdot Al_2O_3$ 。反应 (1) 与钢中溶解氧含量有关, 若钢中溶解氧含量较高, 镁与之反应生成 MgO , MgO 可能进一步与 Al_2O_3 反应生成 $MgO \cdot Al_2O_3$, 使夹杂物成分发生变化, 但是由于 MgO 与 Al_2O_3 反应属于固-固相反应, 反应难度很大。因此, 在氧含量较高时, 加入镁处理钢水, 钢中会出现大量单独存在的 MgO 夹杂, 由于钢水 $[Mg]$ 很低, Al_2O_3 向 $MgO \cdot Al_2O_3$ 转变不明显; 反应 (2) 在一定情况下可以满足热力学条件。钢中加入镁合金 (镁包芯线) 后, 会发生以下几个反应:



在计算过程中以纯固态为标准, 取 $a_{Al_2O_3}$ 和 a_{MgO} 分别为 1, 则在 1873 K 时 $[Mg]-[Al]_s$ 处于平衡时可得:

$$[Al]_s^2 / a_{[Mg]}^3 = 7.69 \times 10^{10} \quad (12)$$

根据式 (12) 分析可得, 当钢液中 $[Al]_s^2 / a_{[Mg]}^3 < 7.69 \times 10^{10}$ 时, 原来已经存在于钢中 Al_2O_3 与加入钢液中的 $[Mg]$ 发生反应生成 MgO , Al_2O_3 被还原为 $[Al]_s$, 与钢液中 $[Al]_s$ 平衡的 $[O]$ 降低, 能进一步降低钢中溶解氧含量; 当 $[Al]_s^2 / a_{[Mg]}^3 > 7.69 \times 10^{10}$ 时, 原来已经存在于钢中 Al_2O_3 不可能与加入到钢

液中的 $[Mg]$ 发生反应; 当 $[Al]_s^2 / a_{[Mg]}^3 = 7.69 \times 10^{10}$ 时, 反应达到平衡, 钢中 Al_2O_3 与 MgO 达到平衡。根据式 (11) 可作图 1(b)。

图 1(b) 中曲线为 $MgO-Al_2O_3$ 之间相互转化的临界条件, 当钢液中 $[Mg]$ 和 $[Al]_s$ 在曲线以上, 钢中夹杂物应为 MgO, Al_2O_3 向 MgO 转化, 反之, 钢中 $[Mg]$ 不满足与 Al_2O_3 反应的热力学条件, 反应不可能发生。由于 Al 脱氧钢中已存在大量的 Al_2O_3 夹杂, 因此, 上述反应主要发生在已存在的氧化物夹杂表面, 此时发生夹杂物变性过程, 其过程主要受动力学条件控制。

根据热力学计算得出与之平衡的 $[Mg]$ 及 $[Al]_s$, 由图 1(b) 可知, 两者的热力学平衡条件是一致的, 即与相同溶解氧含量平衡的镁铝含量的交点在曲线上。若当钢中加铝脱氧后, $[Al]_s$ 和 $[O]$ 已经达到平衡, 当钢中 $[Mg]$ 、 $[Al]_s$ 低于曲线 1 时, $[Mg]$ 不仅不能与 $[O]$ 反应, 进一步降低钢中 $[O]$, 并且也不能与 Al_2O_3 反应, 两者的热力学平衡条件一致。

但当镁加入量使钢中 $[Mg]$ 、 $[Al]_s$ 分布在图 1(b) 中曲线以上, $[Mg]$ 与 $[O]$ 及 $[Mg]$ 与 Al_2O_3 两个反应均有可能发生, 两个反应的反应顺序与钢液中 $[Al]_s$ 和 $[O]$ 的含量有关。

综合考虑以上提到的两个反应, 联立式 (3) 和 (12), 可得:

$$[O]^3 \cdot [Al]_s^2 = 3.60 \times 10^{-13} \quad (13)$$

根据式 (13) 可以绘制 $[Al]_s-[O]$ 曲线, 主要用来反映加 Al 脱氧后再加入 Mg, $[Mg]$ 与 $[O]$ 和 $[Mg]$ 与 Al_2O_3 反应的先后顺序与钢中 $[O]$ 、 $[Al]_s$ 的关系, 如图 1(c) 所示。

根据图 1(c) 可知, 图中曲线 1 上述两个反应临界平衡线, 同时也为 1873 K 下, 钢液中 $[Al]_s-[O]$ 平衡线, 是利用式 (13) 得出的; 曲线 2 为 1873 K 下, 钢液中 $[Mg]-[O]$ 平衡线。图中曲线 2 是利用式 (9) 得出的。

由图 1(c) 可见, 当钢中溶解氧以及 $[Al]_s$ 在曲线 2 上方时, 优先发生的反应为 $[Mg]$ 和 $[O]$ 生成 MgO ; 当在曲线 2 下方时, 优先发生的反应为 $[Mg]$ 还原 Al_2O_3 生成 MgO ; 还可以看出, 当钢中 $[Al]_s$ 、 $[O]$ 在曲线 1 和曲线 2 之间时, 虽然 $[Mg]$ 与 $[O]$ 的含量满足直接生成 MgO 的条件, 但是此反应不优先发生, 优先发生的是 $[Mg]$ 与钢液中原有的 Al_2O_3 生成 MgO 的反应; 在曲线 1 下方区域, 不满足 $[Mg]$ 与 $[O]$ 反应的热力学条件, 但若钢中存在铝脱氧后残

余的 Al_2O_3 夹杂,仍然会有 MgO 夹杂生成,是 $[\text{Mg}]$ 与 Al_2O_3 夹杂反应生成,因此也能改变夹杂物成分,但不能进一步降低钢中 $[\text{O}]$ 。上述讨论的情况,钢中 $[\text{Mg}]$ 含量均达到一定值,此时钢中 $[\text{Mg}]$ 、 $[\text{Al}]_s$ 满足反应的热力学条件。

因此,采用在脱氧过程中加镁铝合金进行脱氧和先加铝脱氧,脱氧完成后喂含镁包芯线再对钢中夹杂物变性两个过程都可改变钢液中夹杂物的性质,从而达到控制钢中 Al_2O_3 夹杂的效果,但反应机理不一样。采用镁铝合金进行脱氧,由于镁与氧的亲合力比铝与氧的亲合力强,不仅会发生镁铝单独与溶解氧发生反应,也会发生 MgO 与 Al_2O_3 夹杂反应生成,由于镁具有极强的脱氧能力,减少铝的加入量,少量的 Al_2O_3 夹杂与 MgO 反应生成镁铝尖晶石,从而从根本上杜绝 Al_2O_3 夹杂的来源;当钢中先加入 Al 脱氧后,再加入 Mg,对钢中夹杂物变性过程及变性效果与初始 $[\text{Al}]_s$ 及 $[\text{O}]$ 有关。当向钢中加镁时, $[\text{Al}]_s$ 与 $[\text{O}]$ 没有达到反应的平衡,此时优先发生 $[\text{Mg}]$ 与钢中残余 Al_2O_3 夹杂反应;当钢液中 $[\text{O}]$ 与 $[\text{Al}]_s$ 过剩,则镁加入后,主要与钢中 $[\text{O}]$ 直接反应。虽然两种情况都是改变钢中夹杂物的性质,但是反应过程不一样,一种是生成新的夹杂物,另一种是对钢液中残余的夹杂物进行改质。

2 工业试验

钢厂生产 SPHC 钢的工艺流程为:铁水预脱硫-80 t 顶底复吹转炉(脱氧合金化过程渣洗)-吹氩-板坯连铸-热卷。其中转炉冶炼完成后不进行后吹,在脱氧合金化过程中进行渣洗。出完钢后在进行 8~10 min 的吹氩,吹氩过程中根据定氧的结果喂入铝线,在吹氩完成后喂入含镁包芯线,然后静置 10

min。共生产 6 炉,其中 3 炉没有喂含镁包芯线,3 炉喂含镁包芯线,用喂线机喂入 $\Phi 2$ mm 镁线,加入量为 0.875 kg/t。未加镁时 SPHC 钢的成分如表 3。

表 3 生产试验加镁前 SPHC 钢主要成分/ 10^{-6}
Table 3 Main chemical composition of steel SPHC in commercial test before adding magnesium / 10^{-6}

T[O]	S	Mg	$[\text{Al}]_s$
71	190	10	310

在喂完镁线后 3 min 抽取饼样。采用线切割切取 10 mm × 10 mm × 10 mm 金相样,粗磨、细磨和抛光后,采用光学显微镜,扫描电镜(SEM)和能谱仪(EDS)对金相样中的非金属显微夹杂物进行形貌和组成分析,采用光学显微镜对金相样进行夹杂物的数量和尺寸分布进行统计,采用原子吸收法测量其中的镁含量,未喂镁线和喂镁线钢样中的 Mg 含量分别为 10×10^{-6} 和 25×10^{-6} 。未喂镁线的钢中 Mg 含量为 10×10^{-6} ,可能是由于钢渣与耐火材料相互作用而引起的。

图 2 为未喂镁线的试样,可看出,夹杂物主要为簇状和链状 Al_2O_3 夹杂,含有少量的 MnS,尺寸较大,在 5 μm 左右,此类夹杂对热轧板的性能和表面质量影响很大。图 3 为喂 0.875 kg/t 镁线钢中的夹杂物,夹杂物主要为 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 尖晶石,含有少量的 MnS,尺寸较小,在 2 μm 左右。

根据表 4 可知,未喂镁线钢中 0~2.5 μm 的夹杂物占 25%,2.5~5.0 μm 的夹杂物占 50%,而喂 0.875 kg/t 镁线钢中 0~2.5 μm 的夹杂物占 70%,2.5~5.0 μm 的夹杂物仅占 10%,且根据统计,未喂镁线钢和喂 0.875 kg/t 镁线钢中当量直径夹杂物

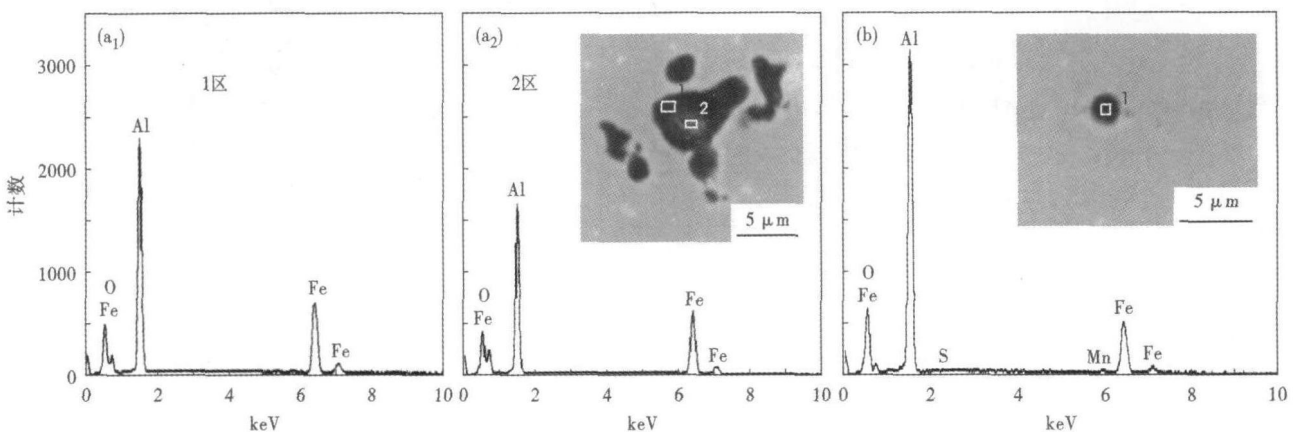


图 2 未喂镁线钢中夹杂物形貌及能谱:(a₁, a₂) Al_2O_3 ; (b) Al_2O_3 -MnS

Fig. 2 Morphology and energy spectrum analysis of Al_2O_3 (a₁, a₂) and Al_2O_3 -MnS (b) inclusion in steel before feeding magnesium wire

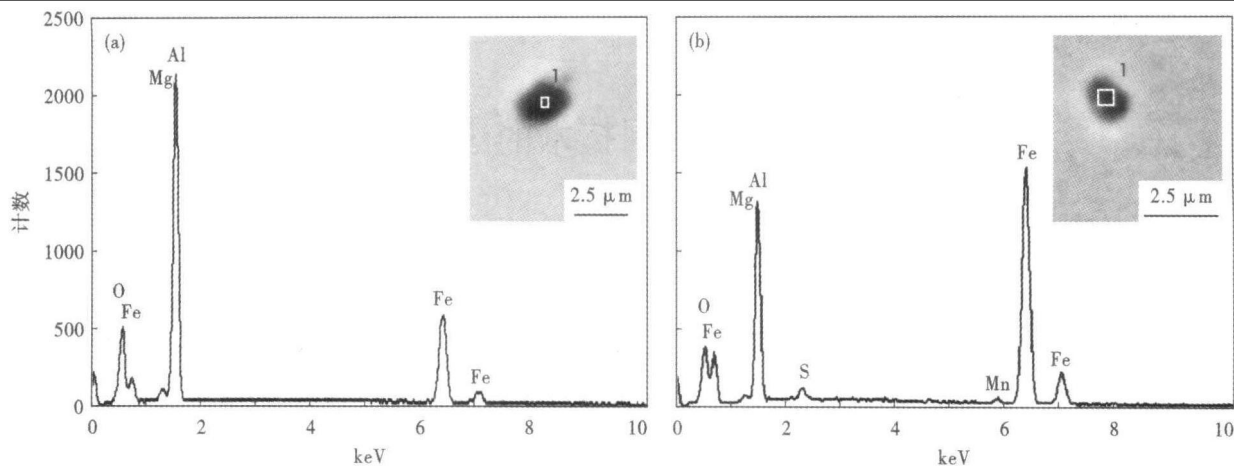


图3 喂0.875 kg/t镁线钢中夹杂物形貌及能谱:(a) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$; (b) 含 MnS 的 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$

Fig. 3 Morphology and energy spectrum analysis of inclusion (a) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ and (b) $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ containing MnS in steel after feeding 0.875 kg/t magnesium wire

个数分别为 $34.4 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 和 $21.2 \text{ 个}/\text{mm}^2$ 。可见,对于 SPHC 钢,采用微镁处理可使 Al_2O_3 夹杂和硫化物夹杂变为细小的含镁夹杂,细化夹杂物,提高钢的纯净度。

表4 加镁前后 SPHC 钢中不同夹杂物尺寸的所占百分比/%

Table 4 Distribution of inclusion size in steel SPHC before and after adding magnesium / %

加镁量/ ($\text{kg} \cdot \text{t}^{-1}$)	夹杂物尺寸/ μm			
	0~2.5	2.5~5.0	5.0~7.5	7.5~10
0	25	50	16	9
0.875	70	10	13	7

3 结论

(1) 采用在脱氧过程中加镁铝合金进行脱氧和先加铝脱氧,脱氧完成后喂含镁包芯线再对钢中夹杂物变性两个过程都可改变钢液中夹杂物的性质,从而达到控制钢中 Al_2O_3 夹杂的效果,但反应机理不一样。

(2) 根据热力学理论计算,对 SPHC 钢采用镁铝合金进行脱氧时,在 1873 K 时,当 $[\text{Al}]_s$ 为 0.018% 时,要形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂,对应的 $a_{[\text{Mg}]}$ 在 $(2.31 \sim 3.25) \times 10^{-5}$,溶解镁含量高于此,就会生成氧化镁夹杂;当 $[\text{Al}]_s$ 为 0.03% 时,要形成 $\text{MgO} \cdot \text{Al}_2\text{O}_3$ 夹杂,对应的 $a_{[\text{Mg}]}$ 在 $(5.86 \sim 8.23) \times 10^{-5}$,溶解镁含量高于此就会生成氧化镁夹杂,另外采用镁对夹杂物变性控制比利用铝来控制夹杂物效果更好。

(3) 对于 SPHC 钢,采用镁处理对夹杂物进行变性,当钢液中 $[\text{Al}]^2/a_{[\text{Mg}]}^3 < 7.69 \times 10^{10}$ 时,原来已经存在于钢中 Al_2O_3 与加入钢液中的 $[\text{Mg}]$ 发生反应

生成 MgO , Al_2O_3 被还原为 $[\text{Al}]_s$,与钢液中 $[\text{Al}]_s$ 平衡的 $[\text{O}]$ 降低,可进一步降低钢中溶解氧含量;当 $[\text{Al}]^2/a_{[\text{Mg}]}^3 > 7.69 \times 10^{10}$ 时,原来已经存在钢中 Al_2O_3 不可能与加入到钢液中的 $[\text{Mg}]$ 发生反应;当 $[\text{Al}]^2/a_{[\text{Mg}]}^3 = 7.69 \times 10^{10}$ 时,反应达到平衡,钢中 Al_2O_3 与 MgO 达到平衡。当加镁时钢中 $[\text{O}]$ 与 $[\text{Al}]$ 的浓度积高于该温度下钢液中 $[\text{Al}]_s$ - $[\text{O}]$ 平衡浓度积时, $[\text{Mg}]$ 优先与钢液中的 $[\text{O}]$ 反应生成 MgO ;反之, $[\text{Mg}]$ 优先与钢液中已存在的 Al_2O_3 相互作用。

(4) SPHC 钢经微镁处理, Al_2O_3 夹杂与 MnS 夹杂变为细小的含镁夹杂,细化夹杂物,提高钢的纯净度。

参考文献

- 1 元伟伟,霍孝新,杨旭,等. 莱钢低碳铝镇静钢 SPHC 的开发. 莱钢科技,2007(1):45
- 2 黄青松. 含镁钙铁合金物性及其应用的基础研究:[硕士学位论文]. 北京:北京科技大学,2002
- 3 周德光,傅杰,李晶,等. 轴承钢中镁的控制及作用研究. 钢铁,2002,37(7):23
- 4 黄冬华. 含镁铁合金物性及其应用的研究:[硕士学位论文]. 北京:北京科技大学,2001
- 5 Hiroki Ohta, Hideaki Suito. Characteristics of Particle Size Distribution of Deoxidation Products with Mg, Zr, Al, Ca, Si/Mn and Mg/Al in Fe-10mass% Ni Alloy. ISIJ International, 2006, 46(1):14
- 6 Chang C-H, Jung I-H, Park S-C. Effect of Mg on the Evolution of Non-metallic Inclusions in Mn-Si-Ti Deoxidized Steel during Solidification: Experiments and Thermodynamic Calculations. Ironmaking and Steelmaking, 2005, 32(3):252

冯捷(1963-),男,博士研究生,副教授,钢纯净化生产技术研究。

收稿日期:2010-07-02