

金属铁熔融过程中镁脱氧产物的特性

文彬¹, 宋波¹, 毛璟红², 王福明¹, 潘宁¹

(1. 北京科技大学 冶金与生态工程学院, 北京 100083;

2. 北京科技大学 材料科学与工程学院, 北京 100083)

摘要: 在高温钼丝炉内向铁液中分别加入NiMg和SiMg合金进行脱氧, 分析过程中溶解氧、全氧、残镁量及夹杂物随时间的变化, 并与铝脱氧进行对比。结果表明: 加入0.05%的SiMg合金处理后, 铁液中溶解氧含量(质量分数)为 1.5×10^{-6} , 全氧含量为 1.9×10^{-5} ; 经SiMg与NiMg合金处理的试样中夹杂物变化基本相同; 加入镁合金并保温15 min后凝固试样中夹杂物尺寸明显减小, 约为2 μm , 其成分由Mn-Si-Al复合氧化物转变为Mg-Al尖晶石类夹杂物; 加入Al并保温15 min后, 凝固试样中夹杂物尺寸较大, 约为5 μm , 成分为纯 Al_2O_3 夹杂物; SiMg合金处理的试样中单位面积上夹杂物数量最少, 钢中夹杂物最为细小、分散。

关键词: 铁液; NiMg; SiMg; 脱氧; 夹杂物

中图分类号: TF769

文献标识码: A

Characteristics of deoxidation products in molten iron treated with magnesium during melting

WEN Bin¹, SONG Bo¹, MAO Jing-hong², WANG Fu-ming¹, PAN Ning¹

(1. School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China;

2. School of Materials Science and Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: Deoxidation experiments of molten iron were carried out by adding Al, NiMg and SiMg alloys. The contents of dissolved and total oxygen and residual magnesium were measured, and the changes of inclusions in molten iron with time were investigated. The results show that the contents of dissolved oxygen and total oxygen in the molten iron treated by adding 0.05% SiMg alloy are 1.5×10^{-6} and 1.9×10^{-5} (mass fraction), respectively. The changes of inclusions with time are most consistent in the molten iron treated by SiMg and NiMg alloys. The sizes of inclusions in the final samples decrease obviously to about 2 μm and the kind of inclusions changes from Mn-Si-Al multiple oxides to Mg-Al spinel after adding Mg alloys and then holding for 15 min. While the size of inclusions is around 5 μm and the kind of inclusions is pure Al_2O_3 in the final sample after adding Al and then holding for 15 min. The amount of inclusions per unit area is the least, and the size of them is the most dispersive in the sample treated by SiMg alloy.

Key words: molten iron; NiMg; SiMg; deoxidation; inclusions

铝作为炼钢生产过程中最主要的脱氧元素之一, 其脱氧效果得到了大家的公认。与铝相比, 碱土金属

不仅具有极强的脱氧能力, 而且还有较强的脱硫能力。其中钡和钙在钢水精炼过程中具有脱氧以及对夹杂物

变性的能力^[1-2]。而镁在冶金行业主要用作铁水脱硫剂、铸铁球化剂。由于镁的沸点低、蒸汽压高,1 873 K时在铁液中的溶解度为0.1%,蒸汽压为2.038 MPa,单独存在于铁液中很难发挥有效作用,很大程度上限制了其在炼钢过程中的应用^[3-4]。

早在1981年,SAXENA等^[5]研究了用镁作炼钢精炼剂的可能性,研究发现,钢中形成极小的、弥散分布的尖晶石型氧化物,这种尖晶石对钢的疲劳性能和其他性能无损害。近年来,随着喷射冶金技术和喂线工艺的广泛应用,为钢进行镁处理的工业生产提供了可能。赵凤林等^[6]以氩气作为载体对铁液进行喷镁处理,王静松等^[7]采用特殊结构的镁芯包芯线对钢水进行喂线处理,YANG等^[8-10]通过向铁液中加入铝和氧化镁粉,用热还原方法来产生镁,从而净化铁液,这些措施都取得了很好的效果。

1990年,TAKAMURA等^[11]和YAMADA等^[12]提出了“氧化物冶金”的概念,其实质是利用钢中细小、弥散分布的氧化物夹杂作为钢凝固过程中其他非金属夹杂物的异质形核核心。这种复合夹杂物在钢中奥氏体向铁素体组织转变时能够诱发晶内铁素体(IGF)形核,细化钢的组织,提高钢的强度和韧性。刘中柱等^[13]报道了Mg的氧化物、硫化物在钢冷却过程中对IGF的形核作用,包括夹杂物的成分、尺寸及分布随时间的变化规律。但是,目前对这些信息还没有进行系统的研究。因此,本文作者在实验室条件下、1 873 K时,为降低镁的蒸汽压,以合金形式分别将NiMg和SiMg合金加入到铁液中进行脱氧,分析脱氧过程中溶解氧、全氧、残镁量及夹杂物随时间的变化情况,并与铝脱氧进行比较,探讨镁合金处理对铁液中夹杂物的影响规律,为镁在钢的氧化物冶金方面的应用提供依据。

1 实验

本实验采用初始溶解氧含量在0.015%左右的纯铁作为原料,纯铁的成分如表1所列。

冶炼实验在高温钼丝炉内进行,炉内通氩气保护,用PtRh30-PtRh6热电偶配合FP93系列自动程序控温仪控制炉温,控温精度为 $\pm 2^\circ\text{C}$ 。将盛有300 g纯铁的

表1 工业纯铁的化学成分

Table 1 Chemical composition of iron materials(mass fraction, %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Al
0.003	0.01	0.15	0.012	0.008	0.01	0.01	0.01	0.01

氧化铝坩埚($d45\text{ mm}\times 100\text{ mm}$)放入高温炉内,通电加热升温。铁料加热至1 600 $^\circ\text{C}$ 熔化后,保温15 min,用固体电解质定氧测头测定铁液中溶解氧含量,并用石英管取空白样。用插入法分别将NiMg合金(含Mg20%,质量分数)、SiMg合金(含Mg20%,质量分数)和铝加入铁液深处进行脱氧处理,镁和铝脱氧剂的加入量均为0.05%。为防止镁合金加入时铁液发生飞溅,镁合金分5次加入,每次加0.01%。添加完脱氧剂后,立即用定氧测头测定铁液中溶解氧含量。随后对铁液进行保温,分别在保温时间为0、5、10和15 min时取过程样。随后,切断电源,铁液随炉冷却。当温度降至1 200 $^\circ\text{C}$ 时,取出坩埚淬火,得1 200 $^\circ\text{C}$ 凝固结束后淬火试样。保温0、5、10和15 min时取的过程样依次标号为2 $^\#$ 、3 $^\#$ 、4 $^\#$ 和5 $^\#$ 样品,原始样和凝固后淬火样分别标号为1 $^\#$ 和6 $^\#$ 样品。

实验所得试样经加工、清洗处理后制成金相样品,用配有能谱仪的扫描电子显微镜对夹杂物进行成分分析并观察其形貌。用定量金相法在光学显微镜下统计试样中夹杂物的颗粒尺寸及数量。全氧含量用红外吸收法测定,残镁量用ICP-AES法测定。

2 夹杂物的生成热力学

实验原料中含有少量的铝,加入镁合金脱氧后,生成的氧化镁会与铁液中的氧化铝结合生成镁铝尖晶石。图1所示为 Al_2O_3 -MgO的相图^[14]。从图1可以看出,1 873 K时,中间产物中只有镁铝尖晶石,且生成区域相对较大。

本实验中铁液温度为1 600 $^\circ\text{C}$,镁在此温度会迅速汽化,然后镁气泡逐渐溶解到铁水中去。镁脱氧的

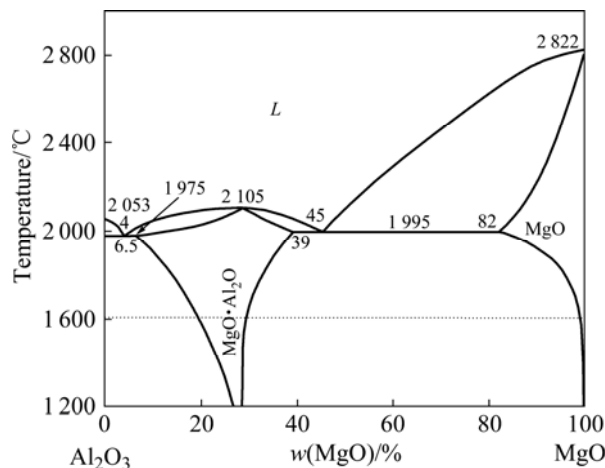


图1 Al_2O_3 -MgO的相图^[14]

Fig.1 Phase diagram of Al_2O_3 -MgO^[14]

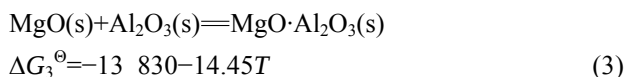
反应式如下^[15]:



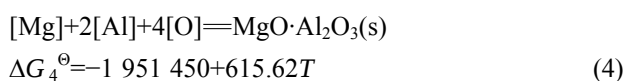
铝脱氧反应如下^[15]:



在此实验条件下,生成的氧化镁和氧化铝会结合生成镁铝尖晶石夹杂物,其反应如下:



由式(1)、(2)和(3),可得如下反应:



以 1%溶液为标准态,生成物视为纯物质,由 $\Delta G=\Delta G^\ominus+RT\ln Q$, $a_{[i]}=f_{[i]}\cdot w_{[i]}$, 式中: ΔG 为体系自由能的变化, J/mol; $\Delta G^\ominus$ 为标准状态下体系自由能的变化, J/mol; R 为气体摩尔常数; T 为绝对温度, K; Q 为指定态下物质的活度化; a 为 $w_{[i]}=1\%$ 时标准态活度; f 为亨利活度因子; i 为某一溶质; $w_{[i]}$ 为稀溶液中溶质 i 的质量分数。根据式(4)得:

$$\Delta G_4=\Delta G_4^\ominus+RT\ln Q=$$

$$-1\ 951\ 450+615.52T+RT\ln Q \quad (5)$$

$$Q=\frac{a_{\text{MgO}\cdot\text{Al}_2\text{O}_3}}{a_{[\text{Mg}]}a_{[\text{Al}]}^2a_{[\text{O}]}^4}=\frac{1}{f_{[\text{Mg}]}\cdot w_{[\text{Mg}]}\cdot f_{[\text{Al}]}^2\cdot w_{[\text{Al}]}^2\cdot f_{[\text{O}]}^4\cdot w_{[\text{O}]}^4} \quad (6)$$

活度因子按照活度计算公式 $\lg f_{[i]}=\sum e_i^j w_{[j]}$ 得到,相应的元素相互作用系数见表2所列^[15]。根据铁液成分及相应的元素相互作用系数,并取铁液中溶解氧含量为 150×10^{-6} ,可求得 $f_{[\text{O}]}=0.9$, $f_{[\text{Al}]}=0.8$ 。因为缺乏镁的相互作用系数数据,且镁在铁液中的溶解度较低,因此,近似认为 $f_{[\text{Mg}]}=1$ 。

当 $T=1\ 873\ \text{K}$ 时,将相应的活度因子值及铁液中溶解铝、氧含量代入式(5)和(6)中,可得式(4)反应发生

表 2 1 873 K 时铁液中主要元素之间的相互作用系数

Fig.2 Interaction coefficients of main elements in molten iron at 1 873 K

Element	Interaction coefficient						
	C	Si	Mn	S	P	Al	O
O	-0.45	-0.131	-0.021	-0.133	0.07	-3.9	-0.2
Al	0.091	0.0056	0.012	0.03	0.05	0.045	-6.6

的热力学条件: $\lg w_{[\text{Mg}]}>-10.58$, 由此可得,铁液中存在微量的溶解镁就可形成镁铝尖晶石夹杂物。文献[16]也指出,当铁液中溶解铝含量为 0.01%时,随着铁液中溶解镁含量的增加,先形成镁铝尖晶石夹杂物,只有铁液中溶解镁含量大于 4×10^{-6} 时,才有可能生成纯氧化镁夹杂物。

3 结果与分析

3.1 溶解氧及全氧含量变化

脱氧剂加入前、后铁液中溶解氧及全氧含量变化如表 3 所列。从表 3 可以看出,各脱氧剂的脱氧能力都比较强,添加脱氧剂后,铁液中的溶解氧和全氧含量均大幅度降低,其中, SiMg 合金处理的铁液中溶解氧含量为 1.5×10^{-6} ,全氧含量为 19×10^{-6} 。

表 3 脱氧剂加入前、后铁液中的溶解氧及全氧含量

Table 3 Contents of dissolved and total oxygen in molten iron before and after addition of deoxidizer

Deoxidizer	Dissolved oxygen content, $w/10^{-6}$		Total oxygen content, $w/10^{-6}$	
	Sample 1	Sample 2	Sample 1	Sample 2
NiMg	166	6.3	250	23
SiMg	169	1.5	270	19
Al	112	7.5	160	24

3.2 镁含量变化

脱氧不同时间后铁液中镁含量变化如表 4 所列。由表 4 可以看出,用 NiMg 和 SiMg 合金处理时镁含量的波动都很大,刚加入镁合金时,铁液中镁含量为 50×10^{-6} 左右,镁的损失较大。用 SiMg 合金处理时镁含量的波动比 NiMg 处理时大,这可能是其物理状态不同所致, NiMg 合金为小颗粒,粒径为 1~2 mm,而 SiMg 合金为粉状,与铁液的接触面积更大,因此反应更剧烈。在本实验条件下,镁合金处理的终样中镁含量为 10×10^{-6} 左右,收得率仅为 2%左右。

表 4 用不同脱氧剂脱氧不同时间后铁液中镁含量的变化

Table 4 Change of magnesium content in molten iron after deoxidized with different deoxidizers

Hold time/min	$w(\text{Mg})/10^{-6}$	
	NiMg	SiMg
0	55	42
5	35	14
15	12	8

3.3 夹杂物变化

3.3.1 夹杂物种类及尺寸

脱氧前原始样品中夹杂物的 SEM 像及 EDS 谱分

析如图 2 所示, 分别用 NiMg、SiMg 合金和铝处理的最终样品中夹杂物的 SEM 像及 EDS 谱如图 3~5 所示。从图 2 可以看出, 原始样品中夹杂物是 Si-Mn-Al 复合

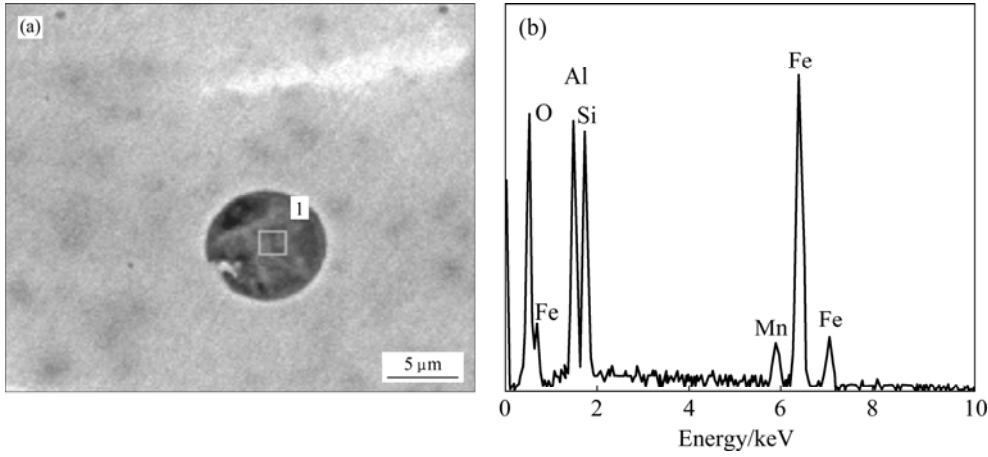


图 2 原始样品中夹杂物的 SEM 像和 EDS 谱

Fig.2 SEM image (a) and EDS pattern (a) of inclusions in original sample

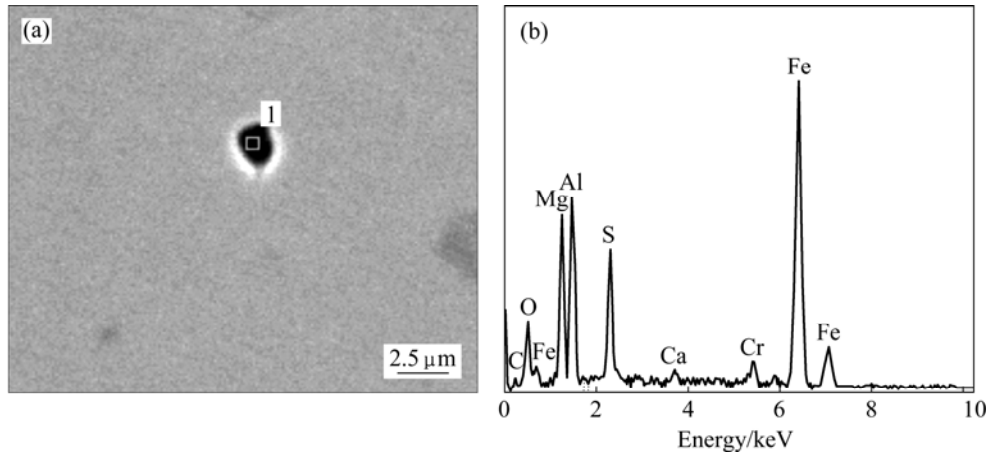


图 3 NiMg 处理的终样品中夹杂物的 SEM 像和 EDS 谱

Fig.3 SEM image and EDS pattern of inclusions in final sample treated with NiMg alloy

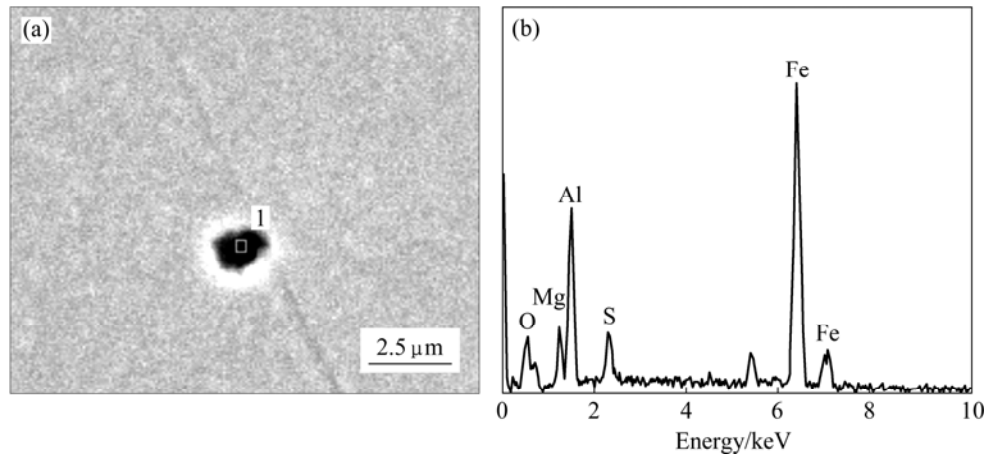


图 4 SiMg 处理的终样中夹杂物的 SEM 像和 EDS 谱

Fig.4 SEM image (a) and EDS pattern (b) of inclusions in final sample treated with SiMg alloy

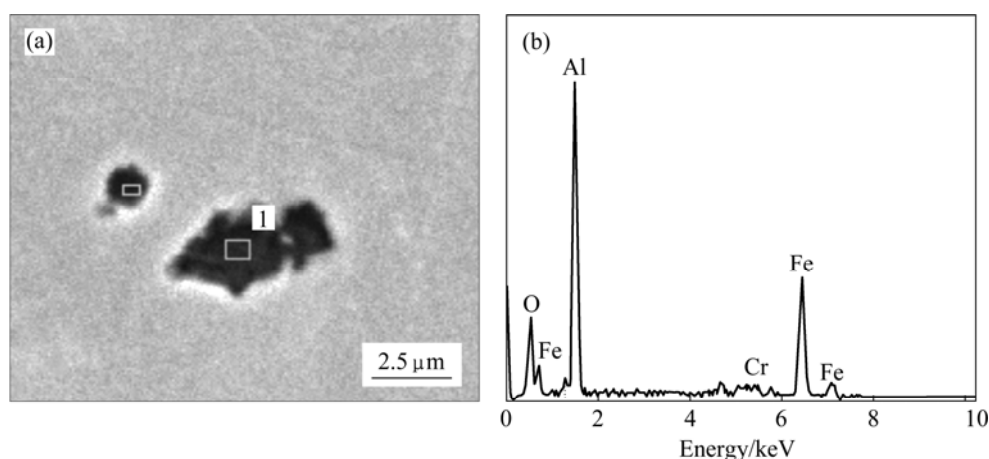


图5 Al处理的终样中夹杂物的SEM像和EDS谱

Fig.5 SEM image (a) and EDS pattern (b) of inclusions in final sample treated with Al

氧化物呈球形尺寸为5 μm左右。从图3和4可以看出,经Mg合金处理后,夹杂物尺寸明显减小,约为2 μm,大部分呈球形,成分均变为Mg-Al尖晶石类夹杂物。根据热力学分析结果可知,由于在本实验条件下铁液中溶解镁含量很低,不足以形成纯氧化镁夹杂,因此,观察到的夹杂物成分均为Mg-Al尖晶石。能谱分析还发现夹杂中含有硫,表明镁同时起到脱硫作用,生成MgS。从图5可以看出,铝处理的终样中夹杂物为纯的Al₂O₃夹杂,大小约为5 μm,呈球形或楔形。

3.3.2 夹杂物数量

为了精确地分析试样中夹杂物的大小及分布情况,本实验用定量金相法在光学显微镜下进行观察,随机统计30个视场,记录每个视场的夹杂物尺寸及数量。

单位面积上夹杂物的总个数可以计算如下^[17]:

$$I = \frac{\sum n_i}{N\pi D^2 / 4}$$

式中: I 为单位面积上显微夹杂物的总个数, mm^{-2} ; n_i 为不同级别夹杂物个数; D 为显微镜的视场直径,本计算中, $D=160 \times 1.25 \times 10^{-3} \text{mm}$; N 为试样观察视场数,本计算中 $N=30$ 。

各脱氧剂处理的试样中夹杂物尺寸分布情况如图6所示。从图6可以看出,镁合金处理的试样中夹杂物尺寸均小于7 μm,其中小于5 μm的夹杂物占夹杂物总数的99%;而铝处理的试样中夹杂物的尺寸分布较宽,大于5 μm的夹杂占夹杂物总数的8.5%,有些甚至大于7 μm。

非金属夹杂物能否在钢中诱发晶内铁素体形核,不仅与非金属夹杂物的化学成分有关,夹杂物的大小

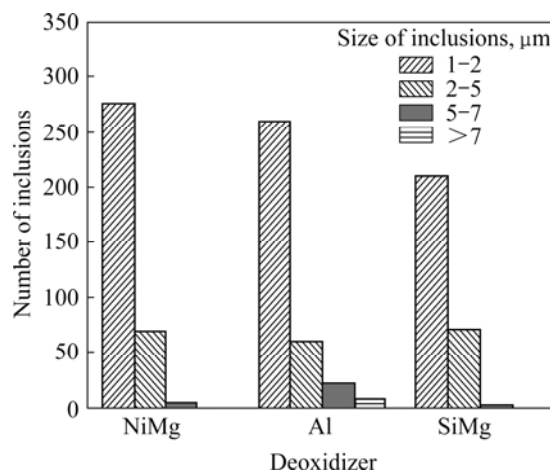


图6 不同脱氧剂处理后最终样品中夹杂物的尺寸分布

Fig.6 Size distributions of inclusions in final samples treated with different deoxidizers

和分布也是重要的影响因素。文献[18]表明,钢中诱发晶内铁素体形核的夹杂物尺寸在1~2 μm左右,因此,在研究铁液中尺寸为1~2 μm的夹杂物数量随时间的变化对镁的氧化物冶金具有重要意义。过程样中1~2 μm的夹杂物数量随时间的变化如图7所示。从图7中可以看到,当保温5 min时,1~2 μm夹杂物的数量减少,镁处理的铁液中夹杂物数量减少幅度均比铝处理的大,这是因为镁处理产生大量的气泡,这些气泡在铁液中吸附小颗粒夹杂而上浮。保温5~10 min时,1~2 μm夹杂物的数量均迅速增加,经镁合金处理后铁液中夹杂物的增加幅度基本一致,而经铝处理后的增加幅度更大,说明经铝处理后铁液中生成了大量细小的氧化铝夹杂。而保温10~15 min时,经铝处理的试样中1~2 μm夹杂物数量开始减少,而经镁处理

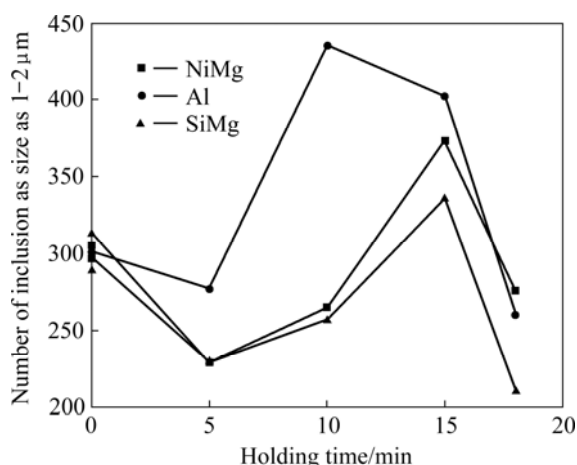


图7 过程样品中尺寸为1~2 μm的夹杂物数量随时间的变化
Fig.7 Change of inclusions (1~2 μm) amount with time in process samples

的试样中1~2 μm夹杂物数量以更大的幅度继续增加。可以认为,在本实验条件下为了获得大量细小的夹杂物,铝脱氧的处理时间以10 min左右为宜,而镁合金处理的保温时间约为15 min。图8所示为过程样品中尺寸为5~7 μm的夹杂物数量随时间的变化情况。从图8可以看出,经镁合金处理的铁液中,尺寸5~7 μm的夹杂物数量变化基本一致,波动较小,经SiMg合金处理的铁液中夹杂物数量更少。而经铝处理的铁液中,尺寸为5~7 μm的夹杂物数量波动较大,尤其是在最后的凝固过程中,夹杂物数量迅速升至最大值,这是铝脱氧与镁处理的显著差别之一。KIMURA等^[19]的研究表明,在铁液中,铁液与夹杂物之间的接触角决定了夹杂物的分布。 MgO 与铁液有较小的润湿性,约为 90° ,从而不易通过碰撞和凝聚长大。而 Al_2O_3

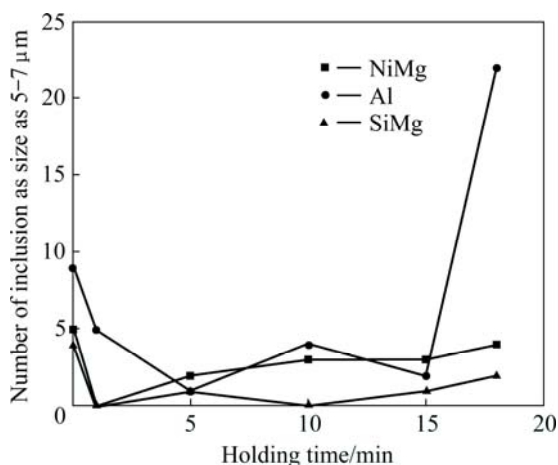


图8 过程样品中尺寸5~7 μm的夹杂物数量随时间的变化
Fig.8 Change of inclusions (5~7 μm) amount with time in process samples

与铁液的接触角为 144° ,表明其不被铁液润湿,所以,在凝固过程中容易碰撞而聚集长大。凝固过程由于冷速快,夹杂物来不及上浮去除,因此,试样中大尺寸氧化铝夹杂数量急剧增多。

图9所示为单位面积上显微夹杂的总个数 I 随时间的变化。由图9可知,3种脱氧剂处理的试样中 I 随时间的变化趋势一致, SiMg合金处理的最终样品中 I 最小,这说明SiMg合金处理的钢中夹杂物最为分散。而NiMg合金处理和Al处理的终样品中 I 的差别不大。

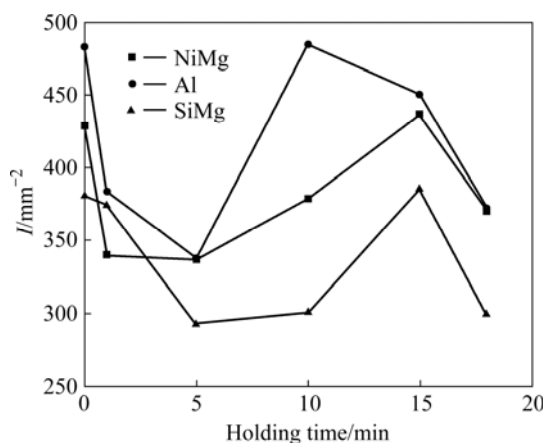


图9 过程样品中 I 随时间的变化
Fig.9 Change of I with time in process samples

4 结论

1) 铁液中NiMg合金、Al和SiMg合金的脱氧能力都较强,加入0.05%的SiMg合金处理后,铁液中溶解氧含量为 1.5×10^{-6} ,全氧含量为 19×10^{-6} ,处理效果最好。镁合金处理的终样中镁含量在 10×10^{-6} 左右。

2) SiMg合金处理的试样中夹杂物变化与NiMg合金处理的基本相同,最终样中夹杂物尺寸较小,为2 μm左右,成分为Mg-Al尖晶石类夹杂物。铝处理的最终样中夹杂物尺寸较大,为5 μm左右,成分为纯 Al_2O_3 夹杂。

3) 镁合金处理的试样中夹杂物尺寸均小于7 μm,其中尺寸小于5 μm的夹杂物占夹杂物总数的99%;而铝处理的试样中夹杂物的尺寸分布较宽,尺寸大于5 μm的夹杂物占夹杂物总数的8.5%,有些夹杂物尺寸甚至大于7 μm。SiMg合金处理的最终样中夹杂物最为细小分散。

REFERENCES

- [1] OHTA H. Activities in CaO-MgO- Al_2O_3 slags and deoxidation

- equilibria of Al, Mg and Ca[J]. ISIJ International, 1996, 36(8): 983–990.
- [2] 许中波. 钙处理钢水中非金属夹杂物的形态[J]. 北京科技大学学报, 1995, 17(2): 126–128.
- XU Zhong-bo. Non-metallic inclusions morphology in the steel treated with calcium[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 1995, 17(2): 126–128.
- [3] 王 博, 姜周华, 姜茂发. 镁铝合金处理GCr15轴承钢夹杂物的变质[J]. 中国有色金属学报, 2006, 16(10): 1736–1742.
- WANG Bo, JIANG Zhou-hua, JIANG Mao-fa. Inclusion modification in GCr15 bearing steel with Al-Mg alloy treatment [J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2006, 16(10): 1736–1742.
- [4] 李尚兵, 王 谦, 何生平. 镁合金对16MnR铁液的脱氧作用[J]. 中国有色金属学报, 2007, 17(4): 657–662.
- LI Shang-bing, WANG Qian, HE Sheng-ping. Influence of magnesium alloy on deoxidation of 16MnR molten steel[J]. The Chinese Journal of Nonferrous Metals, 2007, 17(4): 657–662.
- [5] SAXENA S K. Production of ultra-clean steels with better mechanical properties with magnesium treatment[C]// Proceeding of 1996 Steelmaking Conference, Warrendale, PA: Iron & Steel Soc of AIME, 1996: 89.
- [6] 赵凤林, GAMMAL T E I, DAHL W. 钢水喷镁精炼及其对钢性能的影响[J]. 北京钢铁学院学报, 1983(3): 1–35.
- ZHAO Feng-lin, GAMMAL T E I, DAHL W. Effect of magnesium injection on refining and performance of molten steel[J]. Journal of Beijing Institute of Iron and Steel, 1983(3): 1–35.
- [7] 王静松, 许建国, 孙 伟, 孙志坤, 张恒立, 薛庆国. 镁芯包芯线处理钢水夹杂物变性实验[J]. 北京科技大学学报, 2007, 6(增刊1): 22–25.
- WANG Jing-song, XU Jian-guo, SUN Wei, SUN Zhi-kun, ZHANG Heng-li, XUE Qing-guo. Experimental study on inclusion modification in the steel by Mg cored wire feeding process[J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2007, 6(suppl 1): 22–25.
- [8] YANG Jian, KUWABARA M, OKUMURA K, SANO M. Prevention of resulfurization in desulfurization process with magnesium vapor produced *in situ* by aluminothermic reduction of magnesium oxide[J]. ISIJ International, 2005, 45(12): 1795–1803.
- [9] YANG Jian, KUWABARA M, LIU Zhong-zhu, ASANO T, SANO M. *In situ* observation of aluminothermic reduction of MgO with high temperature optical microscope[J]. ISIJ International, 2006, 46(2): 202–209.
- [10] YANG Jian, YAMASAKI T, KUWABARA M. Behavior of inclusions in deoxidation process of molten steel with *In situ* produced Mg vapor[J]. ISIJ International, 2007, 47(5): 699–708.
- [11] TAKAMURA J C, MIZOGUCHI S. Roles of oxides in steels performance[C]// Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress. ISIJ, 1990: 591–596.
- [12] YAMADA W, MATSUMIYA T. The features of oxides in Ti-deoxidized steels[C]// Proceedings of the Sixth International Iron and Steel Congress. ISIJ, 1990: 612–617.
- [13] 刘中柱, 桑原守. 氧化物冶金技术的最新进展及其实践[J]. 炼钢, 2007, 23(4): 1–6.
- LIU Zhong-zhu, KUWABARA M. Recent progress in oxide metallurgy technology and its application[J]. Steelmaking, 2007, 23(4): 1–6.
- [14] Verein Deutscher Eisenhüttenleute Slag Atlas[M]. 2nd ed, Düsseldorf: Verlag Stahleisen GmbH, 1995: 44.
- [15] 陈家祥. 炼钢常用图标数据手册[M]. 北京: 冶金工业出版社, 1984.
- CHEN Jia-xiang. The common use handbook of diagram for steel-making[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1984.
- [16] SEO W G, HAN W H, KIM J S, PAK J J. Deoxidation equilibria among Mg, Al and O in liquid iron in the presence of MgO-Al₂O₃ spinel[J]. ISIJ International, 2003, 43(2): 201–208.
- [17] GB/T10561. 钢中非金属夹杂物含量的测定标准评级图显微检验法[S]. 2005.
- GB/T10561. The standard rating chart of microscopic test on the content of non-metallic inclusions in steel[S]. 2005.
- [18] LEE T K, KIM H J, KANG B Y, HWANG S K. Effect of inclusion size on the nucleation of acicular ferrite in welds[J]. ISIJ International, 2000, 40(12): 1260–1268.
- [19] KIM H S, CHANG C H, LEE H G. Evolution of inclusions and resultant microstructural change with Mg addition in Mn/Si/Ti deoxidized steels[J]. Scripta Materialia, 2005, 53: 1253–1258.

(编辑 龙怀中)