

# 精炼渣成分对高强度低合金钢中非金属夹杂物影响

张 静<sup>✉</sup> 于会香 王新华 王万军 王 茂

北京科技大学冶金与生态工程学院, 北京 100083

✉ 通信作者, E-mail: zhangjingzi666@163.com

**摘 要** 采用渣钢平衡的实验方法研究了1600℃下不同碱度和不同Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的强还原性精炼渣对高强度低合金钢中非金属夹杂物的影响。结果表明:渣钢反应平衡后,炉渣中CaO和SiO<sub>2</sub>的质量比为1.9~4.5、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数为21%~33%,钢中夹杂物主要为球状的CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>系,尺寸在5μm以下,炉渣成分对夹杂物的成分影响很大。夹杂物主要分布在SiO<sub>2</sub>含量一定的CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>伪三元相图中1400~1500℃的低熔点区。随着炉渣碱度的提高和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>含量的降低,部分夹杂物逐渐偏离低熔点区域,夹杂物的总数量逐渐减小。当渣中Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>质量分数为21.22%、碱度为3.27时,有大量夹杂物分布在高熔点区域,夹杂物的总数量最小。

**关键词** 高强度钢; 低合金钢; 精炼渣; 夹杂物; 氧化铝

**分类号** TF769.2

## Effect of refining slag composition on non-metallic inclusions in high-strength low-alloy steel

ZHANG Jing<sup>✉</sup>, YU Hui-xiang, WANG Xin-hua, WANG Wan-jun, WANG Mao

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

✉ Corresponding author, E-mail: zhangjingzi666@163.com

**ABSTRACT** The effect of strongly reduced refining slag with different basicities and Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> contents on non-metallic inclusions in molten steel was investigated through the slag-metal equilibrium at 1600℃. When the slag-metal equilibrium is reached, the mass ratio of CaO to SiO<sub>2</sub> in refining slag is from 1.9 to 4.5, and the mass fraction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is from 21% to 33%. Non-metallic inclusions in steel are mainly the spherical CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> system with size smaller than 5μm. The composition of refining slag has a great effect on inclusions. Inclusions mainly distribute in the low melting point region of the CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> quasi-ternary phase diagram with stable content of SiO<sub>2</sub> between 1400℃ and 1500℃. With the basicity of refining slag increasing and the Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> content decreasing, part of inclusions gradually deviate from the low melting point region and the total number of inclusions decreases. When the mass fraction of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> is 21.22% and the basicity of refining slag is 3.27, lots of inclusions distribute in the high melting point region and the total number of inclusions is the smallest.

**KEY WORDS** high strength steel; low alloy steel; refining slag; inclusions; alumina

高强度低合金钢热轧中厚板广泛用于造船、桥梁、油气管线、高层建筑和海洋设施等,对强度、延性、低温韧性、焊接、抗氢致开裂和抗层状撕裂等性能等有很高要求<sup>[1-2]</sup>。非金属夹杂物尤其是条状MnS、串状Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或mCaO·nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类夹杂物对此类钢性能的影响很大。这主要是因为:(1)沿轧制方向延伸的条状或串状夹杂物造成钢板非轧制方向力学

性能显著降低;(2)钢板由于氢致开裂(HIC)和硫化物应力腐蚀(SSC)产生的裂纹大多在条状或串状夹杂物中形成<sup>[3-5]</sup>。近年来,随着超低硫精炼、钢液钙处理和洁净钢生产技术的进步,由条状MnS和串状Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>夹杂物造成的钢板缺陷显著减少,而沿轧制方向延伸的较低熔点mCaO·nAl<sub>2</sub>O<sub>3</sub>类夹杂物(12CaO·7Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、5CaO·3Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和CaO·Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>)造成

的缺陷比率却有较大增长。

由于夹杂物组成与钢水炉外精炼渣密切相关<sup>[6-9]</sup> 本研究采用渣-钢反应平衡的方法,研究了不同碱度和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的精炼渣对高强度低合金钢中非金属夹杂物的影响,探索采用较低碱度炉渣抑制钢中生成低熔点  $m\text{CaO}\cdot n\text{Al}_2\text{O}_3$  类夹杂物的可能。

## 1 研究方法

渣-钢平衡实验在高温管式 Si-Mo 炉中进行,炉内刚玉质反应管的恒温带( $\pm 5^\circ\text{C}$ )长度为 20 cm。温度采用 PID 自动控制,控制精度为  $\pm 1^\circ\text{C}$ ,反应的实际温度由坩锅底部的测温热电偶获得。实验时由炉管底部通入高纯的氩气进行气氛保护,上部用高温橡胶密封。

实验采用内径 30 mm 的 MgO 坩锅,钢样和炉渣样质量分别为 200 g 和 40 g,其中渣料由分析纯  $\text{Al}_2\text{O}_3$ 、CaO、 $\text{SiO}_2$  和 MgO 化学试剂配制,对 CaO 进行了预脱水处理。实验时先将钢样放入坩锅底部,再将搅拌均匀的渣料装入坩锅,随后将坩锅放入炉内后将炉管密闭,底部通入高纯氩气 20 min 后按设定升温速度升温至  $1\ 600^\circ\text{C}$ ,在此温度下保温

90 min 然后将坩锅快速取出并淬水冷却。对实验后的钢样和渣样进行化学成分分析,并采用电子显微镜、能谱和金相显微镜对钢中非金属夹杂物进行分析检验。

## 2 结果分析讨论

为了研究炉渣对钢中非金属夹杂物的影响,实验前配置不同碱度( $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ )和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的炉渣(其化学成分见表 1),渣钢反应 90 min 后钢水和炉渣化学成分分别见表 2 和表 3,炉渣碱度为 1.9~4.5,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数为 21%~33%。

表 1 实验前渣样的化学成分

Table 1 Chemical composition of slags before experiment

渣系	质量分数/%				$w(\text{CaO})/$ $w(\text{SiO}_2)$
	CaO	$\text{SiO}_2$	$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	
1	43.00	21.50	25	饱和	2.0
2	54.25	15.50	25	饱和	3.5
3	55.00	11.00	25	饱和	5.0
4	56.78	16.22	20	饱和	3.5
5	48.23	13.77	30	饱和	3.5

表 2 实验结束后钢水成分(质量分数)

Table 2 Composition of molten steel after experiment

渣系	C	Si	Mn	P	S	Ca	Mg	Als	T. O
1	0.048	0.19	1.72	0.0070	0.0010	0.00088	0.00074	0.0041	0.0019
2	0.041	0.18	1.78	0.0080	0.0003	0.00092	0.00074	0.0066	0.0014
3	0.044	0.17	1.78	0.0070	0.0003	0.00099	0.00048	0.0078	0.0007
4	0.044	0.17	1.77	0.0065	0.0004	0.00098	0.00054	0.0060	0.0010
5	0.048	0.17	1.76	0.0082	0.0006	0.00100	0.00100	0.0064	0.0016

表 3 实验结束后炉渣的化学成分

Table 3 Chemical composition of slags after experiment

渣系	$w(\text{CaO})/$ $w(\text{SiO}_2)$	质量分数/%			
		$\text{Al}_2\text{O}_3$	MgO	S	TFe + MnO
1	1.93	24.48	13.65	0.011	0.44
2	3.26	25.00	8.66	0.016	0.28
3	4.54	26.12	9.56	0.017	0.26
4	3.27	21.22	9.76	0.017	0.30
5	3.31	30.04	10.19	0.014	0.27

### 2.1 钢中硫含量对比

炉渣和钢液反应 90 min 后钢中 S 的质量分数为  $(3\sim 10)\times 10^{-6}$ ,渣中 S 的质量分数为 0.011%~0.017% 根据下式<sup>[10]</sup> 计算得到五个渣系的硫分配系数  $L_s$  分别是 11、53、57、43 和 23。

$$L_s = \frac{w((S))}{w([S])} \quad (1)$$

式中  $L_s$  为硫分配系数  $w((S))$  为炉渣中硫的质量分数  $w([S])$  为钢液中硫的质量分数。

由于反应前钢样中 S 含量很低( $1.2\times 10^{-5}$ ),因此五个渣系的脱硫率分别是 17%、75%、75%、67% 和 50%,可得渣系 2、3、4 的脱硫能力比较好。

### 2.2 非金属夹杂物的形貌和成分

将实验所得钢样(高约 3 cm)的上表面(与炉渣接触的表面)和中间面(试样高度 1/2 处的表面)制成金相表面,用扫描电镜对该表面上的非金属夹杂物进行观察,并用能谱仪分析其成分,每个表面随机观察 20 个夹杂物,每个试样共观察统计 40 个夹杂物。通过研究发现各渣系绝大多数夹杂物都呈球状或类球状,尺寸在  $5\ \mu\text{m}$  以下;夹杂物

成分大部分为  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系夹杂(简称钙镁铝硅酸盐夹杂),部分含有少量的  $\text{MnO}$ ,没有发现硫化物夹杂.图1和表4分别为各渣系典型的钙镁铝硅酸盐类夹杂物的形貌照片和上中表面夹杂物的平均成分.可以看到,渣系1中夹杂物

的  $\text{MnO}$  含量较高,因为该渣系的碱度较低,渣中  $\text{SiO}_2$  与钢液中的  $[\text{Mn}]$  反应生成  $\text{MnO}$  夹杂.渣系4中钢样上表面和中间面的夹杂物中  $\text{MgO}$ 、 $\text{CaO}$  含量相差较大,其他渣系上中表面夹杂物的成分没有明显差别.

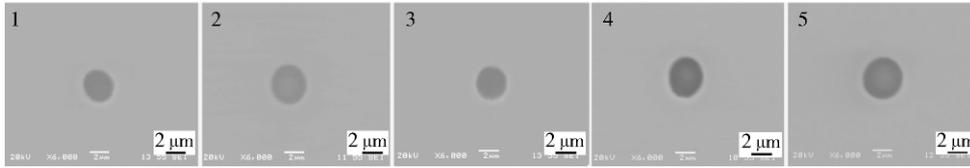


图1 典型钙镁铝硅酸盐类夹杂物的形貌

Fig.1 Morphology of typical calcium-magnesium-aluminium silicate inclusions

表4 典型钙镁铝硅酸盐类夹杂物的化学成分(质量分数)

Table 4 Chemical composition of typical calcium-magnesium-aluminium silicate inclusions

渣系	位置	MgO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	CaO	MnO
1	上	8.38	33.68	21.50	28.75	7.45
	中	7.48	31.91	22.39	32.56	5.43
2	上	8.72	39.05	9.22	40.80	2.20
	中	7.34	37.88	12.02	42.14	0.62
3	上	10.90	34.06	7.86	46.16	1.01
	中	7.20	33.40	8.81	50.02	0.58
4	上	23.33	31.30	10.06	33.32	1.93
	中	12.04	33.12	12.93	40.26	1.66
5	上	5.45	40.02	11.69	41.43	1.19
	中	6.54	39.32	11.68	41.46	0.94

碱度的变化不明显.

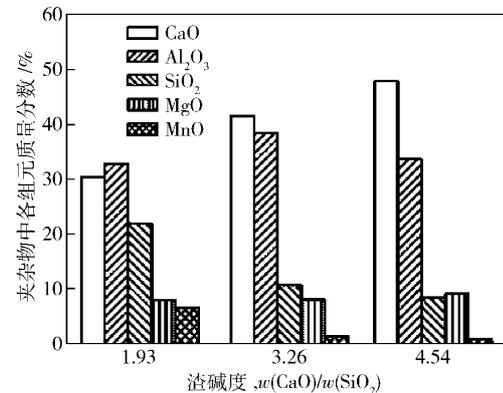


图2 夹杂物中各组元成分与渣中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  的关系

Fig.2 Relation between inclusion composition and  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$

### 2.3 炉渣碱度对非金属夹杂物的影响

#### 2.3.1 对夹杂物成分和分布的影响

本研究渣-钢反应平衡后,渣系1、2和3中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数在25%左右,碱度( $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$ )分别为1.93、3.26和4.54.图2是夹杂物中各组元的平均成分与渣中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  的关系.可以看到,当渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量一定时,随着渣中  $\text{CaO}/\text{SiO}_2$  的增加,夹杂物中  $\text{CaO}$  含量显著增加,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  含量显著降低.当渣中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  由1.93增加到3.26时,夹杂物中的  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  和  $\text{MnO}$  含量变化较大,  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  由1.39增加到3.89,  $\text{MnO}$  质量分数由6.52%降低到1.39%;当渣中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  由3.26增加到4.54时,夹杂物中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  和  $\text{MnO}$  含量变化较小,  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  由3.89增加到5.77,  $\text{MnO}$  质量分数由1.39%降低到0.81%.随着渣中  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  的增加,夹杂物中  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  逐渐增大,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO}$  含量随

由于绝大多数夹杂物为  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系,夹杂物中  $\text{SiO}_2$  含量比较稳定,因此固定  $\text{SiO}_2$  含量,用 Factsage V5.5 绘出不同温度下(1400~2000℃)  $\text{CaO-MgO-Al}_2\text{O}_3\text{-SiO}_2$  系的液相区域.图3为三个渣系的夹杂物在伪三元相图中的成分分布.可以看出,随着炉渣碱度的增加,夹杂物成分逐渐向  $\text{CaO}$  含量增加和  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量减少的方向移动.夹杂物主要分布在低熔点区1400~1500℃.随着碱度的增加,部分夹杂物逐渐偏离低熔点区域.其中,当碱度由3.26增加到4.54时,夹杂物中出现了一些  $\text{MgO}$  含量较高的夹杂物,高熔点(大于1600℃)夹杂物所占的比率由6.45%增加到29.4%.

#### 2.3.2 对夹杂物数量和尺寸的影响

将实验所得钢样的上表面和中间面制成金相表面在光学显微镜下观察.避开试样边部,随机选取一个位置对试样中夹杂物的数量和尺寸分布进行统计,每个试样统计200个视场,总面积为

5. 1807 mm<sup>2</sup>. 各渣系与钢液反应后所得钢样上表面和中间面的夹杂物数量及尺寸分布见表 5. 其中, 当量直径下夹杂物数量的计算方法为:

$$I = \frac{\sum (S_i \cdot n_i)}{N \cdot S \cdot \pi \cdot B^2 / 4}$$

式中:  $I$  为单位面积上直径相当于  $B$  的夹杂物的个数 ( $\text{mm}^{-2}$ );  $N$  为视场个数, 本计算中为 200;  $S$  为视场面积;  $B$  为夹杂物当量直径, 本计算中取  $B = 3 \mu\text{m}$ ;  $S_i$  为不同直径夹杂物的平均面积;  $n_i$  为各级夹杂个数.

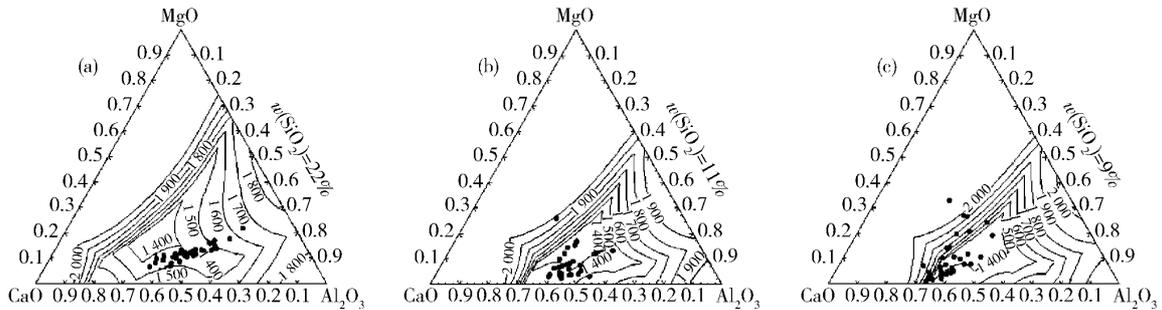


图 3 不同炉渣碱度钢中夹杂物的组成分布. (a)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 1.93$ ; (b)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 3.26$ ; (c)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 4.54$   
**Fig. 3** Distribution of inclusions in steel with different basicities of slags: (a)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 1.93$ ; (b)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 3.26$ ; (c)  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2) = 4.54$

表 5 不同炉渣碱度的钢中夹杂物数量及尺寸分布

**Table 5** Inclusion number and size distribution in steel with different basicities of slags

渣系	位置	碱度, $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$	夹杂物个数/ $\text{mm}^{-2}$				当量直径 $B = 3 \mu\text{m}$
			1 ~ 3 $\mu\text{m}$	3 ~ 5 $\mu\text{m}$	5 ~ 10 $\mu\text{m}$	> 10 $\mu\text{m}$	
1	上	1.93	14.28	4.44	1.35	0.19	27.51
	中	1.93	17.37	4.05	0.58	0	18.55
2	上	3.26	10.42	3.09	0.58	0	13.74
	中	3.26	13.70	2.90	0.39	0	13.65
3	上	4.54	12.35	2.32	0.39	0	12.02
	中	4.54	13.51	2.32	0.19	0	11.33

从表 5 可以看出, 各渣系试样中绝大多数的夹杂物尺寸分布在 1 ~ 3  $\mu\text{m}$ , 所占比例 70% 以上, 其中 2 ~ 3  $\mu\text{m}$  左右的夹杂物居多, 并且上表面 1 ~ 3  $\mu\text{m}$  夹杂物的数量比中间表面少, 而大尺寸夹杂物的数量比中间表面多, 这是由钢液中小尺寸的夹杂物聚集上浮造成的. 针对渣系 1、2 和 3, 随着炉渣碱度的增加, 夹杂物的总数量尤其是大尺寸夹杂的数量减少, 当量直径  $B = 3 \mu\text{m}$  的夹杂物数量也明显减少. 从夹杂物的尺寸来看, 随着炉渣碱度的降低, 半径大于 3  $\mu\text{m}$  的夹杂物数量明显增加, 说明随着炉渣碱度的降低, 钢中生成大尺寸夹杂物的可能性增大.

### 2.4 炉渣 $\text{Al}_2\text{O}_3$ 含量对非金属夹杂物的影响

#### 2.4.1 对非金属夹杂物成分和分布的影响

本研究渣-钢反应平衡后, 渣系 4、2 和 5 的碱度在 3.3 左右,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数分别为 21.22%、25% 和 30.04%, 图 4 是三个渣系的夹杂物中各组元成分与渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的关系. 可以看到: 随着渣中

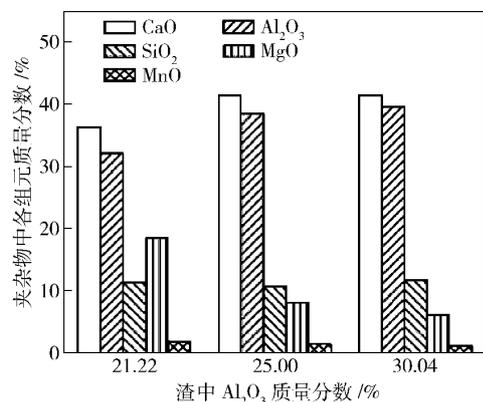


图 4 夹杂物中各组元成分与渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  的关系

**Fig. 4** Relation between the composition of inclusions and  $\text{Al}_2\text{O}_3$

$\text{Al}_2\text{O}_3$  含量的增加, 夹杂物成分中的  $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{CaO}$  含量相应增加,  $w(\text{CaO})/w(\text{Al}_2\text{O}_3)$  变化不大, 在 1 左右,  $\text{MgO}$  含量显著下降,  $\text{SiO}_2$  和  $\text{MnO}$  含量没有明显变化. 渣中  $\text{Al}_2\text{O}_3$  质量分数由 21.22% 增加到

25%时,夹杂物中的  $Al_2O_3$ 、CaO 和 MgO 含量变化较大,当由 25% 增加到 30.04% 时,夹杂物中的  $Al_2O_3$ 、CaO 和 MgO 含量变化较小.

图 5 是炉渣碱度在 3.3 左右,  $Al_2O_3$  含量变化时钢中夹杂物在  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  伪三元相图中的成分分布. 可以看到,随着渣中  $Al_2O_3$  含量的

增加,夹杂物的分布逐渐趋于集中,大部分夹杂物分布在 1400 ~ 1500 °C 的低熔点区. 当渣中  $Al_2O_3$  质量分数为 21.22% 时,夹杂物分布比较分散,出现了许多 MgO 含量较高的夹杂物,约 50% 的夹杂物进入了 1600 °C 以上的高熔点区域. 可见,低  $Al_2O_3$  含量的炉渣有利于生成 MgO 含量较高的高熔点夹杂物.

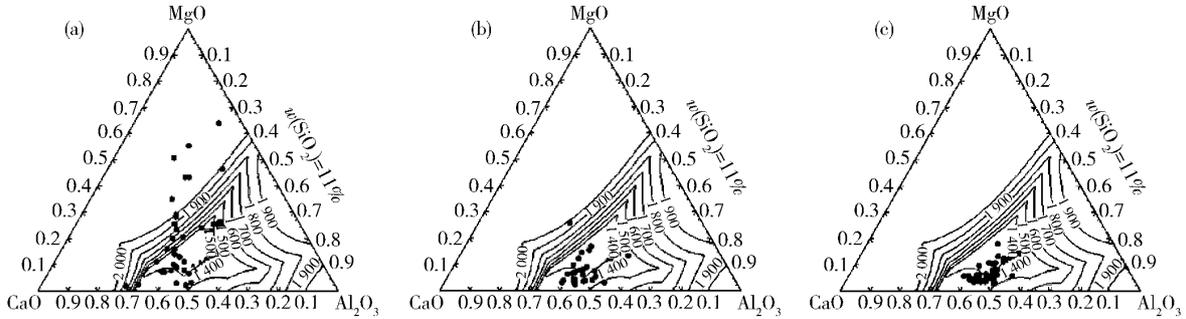


图 5 钢中夹杂物的组成分布. (a)  $w(Al_2O_3) = 21.22\%$ ; (b)  $w(Al_2O_3) = 25.00\%$ ; (c)  $w(Al_2O_3) = 30.04\%$

Fig. 5 Distribution of inclusions in steel: (a)  $w(Al_2O_3) = 21.22\%$ ; (b)  $w(Al_2O_3) = 25.00\%$ ; (c)  $w(Al_2O_3) = 30.04\%$

### 2.4.2 对夹杂物数量和尺寸的影响

表 6 为渣中  $Al_2O_3$  含量对钢中夹杂物数量和尺寸的影响. 可以看出,各渣系试样中夹杂物的尺寸主要分布在 1 ~ 3  $\mu m$ , 并且上表面小尺寸的夹杂物数量比中间表面少,大尺寸夹杂物的数量比中间表

面多. 当炉渣碱度一定时,随着渣中  $Al_2O_3$  含量的增加(对于渣系 4、2 和 5),钢中夹杂物的数量和当量直径  $B = 3 \mu m$  时的夹杂物总数量呈增加的趋势. 当  $Al_2O_3$  质量分数为 21.22% 时,夹杂物的总数量和当量直径  $B = 3 \mu m$  时的夹杂物数量最小.

表 6 夹杂物数量及尺寸分布

Table 6 Inclusion number and size distribution

渣系	位置	$w(Al_2O_3) / \%$	夹杂物个数 / $mm^{-2}$				当量直径 $B = 3 \mu m$
			1 ~ 3 $\mu m$	3 ~ 5 $\mu m$	5 ~ 10 $\mu m$	> 10 $\mu m$	
4	上	21.22	8.11	3.28	0.39	0	11.85
	中	21.22	10.81	2.32	0.19	0	10.13
2	上	25.00	10.42	3.09	0.58	0	13.74
	中	25.00	13.70	2.90	0.39	0	13.65
5	上	30.04	12.93	2.51	0.58	0	13.83
	中	30.04	19.69	3.28	0.58	0	18.20

## 3 结论

(1) 对于本实验,渣-钢反应平衡后,钢中 S 质量分数为  $(3 \sim 10) \times 10^{-6}$ ,渣系 2、3 和 4 的脱硫能力比较好,脱硫率可达到 67% ~ 75%. 炉渣  $w(CaO) / w(SiO_2)$  为 1.9 ~ 4.5,  $Al_2O_3$  质量分数为 21% ~ 33%. 钢中夹杂物基本为  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  系,部分含少量 MnO. 绝大部分夹杂物为黑色球状或类球状,尺寸在 5  $\mu m$  以下,夹杂物的成分受炉渣成分的影响很大.

(2) 渣-钢反应平衡后,当渣中  $Al_2O_3$  质量分数在 25% 左右时,随着炉渣碱度的增加,夹杂物成分

中的  $w(CaO) / w(SiO_2)$ 、 $w(CaO) / w(Al_2O_3)$  逐渐增大, MnO 含量显著降低, MgO 含量变化不明显. 夹杂物主要分布在  $SiO_2$  含量一定的伪三元  $CaO-MgO-Al_2O_3-SiO_2$  相图中 1400 ~ 1500 °C 的低熔点区. 随着碱度的增加,部分夹杂物逐渐向高熔点区域移动; 钢中夹杂物的总数量尤其是大尺寸夹杂的数量随着炉渣碱度的增加而减少.

(3) 渣-钢反应平衡后,当渣碱度在 3.3 左右时,随着渣中  $Al_2O_3$  含量的增加,夹杂物成分中的  $Al_2O_3$  和 CaO 含量增加,但  $w(CaO) / w(Al_2O_3)$  变化不大, MgO 含量显著下降,  $SiO_2$  和 MnO 含量没有明显变化. 钢中夹杂物主要分布在  $SiO_2$  含量一定的

CaO-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> 伪三元相图中 1400 ~ 1500 °C 的低熔点区, 随着渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 含量的增加, 夹杂物的分布逐渐趋于集中, 夹杂物的总数量呈增加趋势。当渣中 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 21.22% 时, 大量夹杂物分布在 1600 °C 以上的高熔点区域, 且夹杂物的总数量最少。

(4) 综合脱硫和夹杂物控制两方面考虑, 渣系 4 即炉渣  $w(\text{CaO})/w(\text{SiO}_2)$  为 3.27、Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 质量分数为 21.22% 的效果最好。

#### 参 考 文 献

- [1] Takahashi A, Ogawa H. Influence of microhardness and inclusion on stress oriented hydrogen induced cracking of line pipe steels. *ISIJ Int*, 1996, 36(3):334
- [2] Carneiro R A, Ratnapuli R C, de Freitas Cunha Lins V. The influence of chemical composition and microstructure of API linepipe steels on hydrogen induced cracking and sulfide stress corrosion cracking. *Mater Sci Eng A* 2003, 357(1/2):104
- [3] Zhang C J, Cai K K, Yuan W X. Study on sulfide inclusions and effect of calcium treatment for pipeline steel. *Iron Steel* 2006, 41(8):31  
(张彩军, 蔡开科, 袁伟霞. 管线钢硫化物夹杂及钙处理效果研究. 钢铁 2006, 41(8):31)
- [4] Wang X H. Discussion on proper refining process for plate // *Proceedings of National Steelmaking-Continuous Casting Technology Meeting*. Beijing 2008:14  
(王新华. 适用于中厚板类钢种的合理炉外精炼工艺探讨// 炼钢-连铸生产技术会议文集. 北京 2008:14)
- [5] Wang J. *Research on nonmetallic Inclusions in X80 Pipeline Steel During Furnace Refining Process* [Dissertation]. Beijing: University of Science and Technology Beijing 2010  
(王建. X80 管线钢炉外精炼过程非金属夹杂物的研究[学位论文]. 北京: 北京科技大学 2010)
- [6] Chen B, Jing M, Bao S, et al. Influence of slag composition on steel cleanliness. *Iron Steel* 2008, 43(8):35  
(陈斌, 姜敏, 包萨日娜, 等. 渣组成对钢水洁净度的影响. 钢铁 2008, 43(8):35)
- [7] Yoon B H, Heo K H, Kim J S, et al. Improvement of steel cleanliness by controlling slag composition. *Ironmaking Steelmaking*, 2002, 29(3):215
- [8] Tang S G. Influence of composition of refining slag in LF-VD process on metallurgical effects. *Steelmaking*, 2001, 17(4):29  
(汤曙光. LF-VD 精炼渣组成对冶金效果的影响. 炼钢, 2001, 17(4):29)
- [9] Park J H, Jung I H, Lee H G. Dissolution behavior of Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> and MgO inclusions in the CaO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> slags: formation of ring-like structure of MgAl<sub>2</sub>O<sub>4</sub> and Ca<sub>2</sub>SiO<sub>4</sub> around MgO inclusions. *ISIJ Int* 2006, 46(11):1626
- [10] Jiang G C. *Clean Steel and Secondary Refining*. Shanghai: Shanghai Science and Technology Press, 1994  
(蒋国昌. 纯净钢及二次精炼. 上海: 上海科学技术出版社, 1994)