

# 电渣重熔易切削钢中硫含量及夹杂物的控制

侯 栋<sup>1)</sup>, 王德永<sup>1)</sup>✉, 屈天鹏<sup>1)</sup>, 田 俊<sup>1)</sup>, 姜周华<sup>2)</sup>

1) 苏州大学沙钢钢铁学院, 苏州 215000 2) 东北大学冶金学院, 沈阳 110819

✉通信作者, E-mail: dywang@suda.edu.cn

**摘 要** 基于热力学分析了电渣重熔中渣系及冶炼工艺对易切削钢 AS136 的夹杂物及硫均匀性的控制研究. 实验采用 4 t 的非保护气氛电渣炉, 分析了电渣锭中硫含量及夹杂物级别. 实验结果发现: 采用渣系 S1 (质量分数为 50%  $\text{CaF}_2$  + 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 20%  $\text{SiO}_2$ ) 冶炼的电渣锭中硫质量分数为 0.066% ~ 0.075%, 能够满足产品要求(产品中要求硫质量分数在 0.05% ~ 0.10%), 但是 B 类和 C 类的夹杂物级别均达不到标准; 在渣系 S3 (质量分数为 70%  $\text{CaF}_2$  + 28%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 2%  $\text{MgO}$ ) 以及整个重熔中持续地加入质量分数 4.5% 镁砂的冶炼工艺下, 不仅可以使电渣锭中硫含量呈均匀分布, 同时还能够改善夹杂物的分布和大小. 分析结果表明: 随着电渣重熔初期渣温的升高以及渣中  $\text{SiO}_2$  质量分数的增加, 持续均匀地补加镁砂可以使得电渣锭中的硫沿轴向呈均匀分布.

**关键词** 电渣重熔; 脱硫; 夹杂物; 热力学; 分子离子共存理论

**分类号** TF142

## Sulfur content and inclusion control during electroslag remelting of die steel

HOU Dong<sup>1)</sup>, WANG De-yong<sup>1)</sup>✉, QU Tian-peng<sup>1)</sup>, TIAN Jun<sup>1)</sup>, JIANG Zhou-hua<sup>2)</sup>

1) School of Iron and Steel, Soochow University, Suzhou 215000, China

2) School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

✉ Corresponding author, E-mail: dywang@suda.edu.cn

**ABSTRACT** Experimental and theoretical studies were carried out to investigate the effects of the slag and remelting process on sulfur content and steel cleanliness control during electroslag remelting (ESR) process. AS136 die steel was used as the electrode and remelted under three different remelting conditions by using a 4 t ESR furnace. The contents of sulfur and inclusion along the axial direction of ingot products were analyzed. It was found that the sulfur content in ingot remelting with slag S1 (50%  $\text{CaF}_2$  + 30%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 20%  $\text{SiO}_2$  in mass fraction) ranges from 0.066% to 0.075% in mass fraction, which can satisfy the requirement of AS136 steel (the sulfur content ranges from 0.05% to 0.1% in mass fraction), but the levels of B-alumina type and C-silicate type inclusions are higher than the standards. Under the condition of slag S3 (70%  $\text{CaF}_2$  + 28%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  + 2%  $\text{MgO}$  in mass fraction) combined with extra 4.5%  $\text{MgO}$  in mass fraction continuously added into molten slag during the whole ESR process, the macrosegregation of sulfur along the height of ingot can be improved, the oxygen and inclusion contents reduce. Constant addition of extra amounts of  $\text{MgO}$  to the molten slag with the increase of slag temperature and  $\text{SiO}_2$  content in slag during the remelting process can improve the macrosegregation of sulfur distributed along the axial direction of ESR ingots.

**KEY WORDS** electroslag remelting; desulfurization; inclusion; thermodynamic; ion and molecule coexistence theory

AS136 塑料模具钢是一种具有良好的耐腐蚀、耐磨性、易切削性的钢种. 随着对模具钢性能要求

收稿日期: 2018-01-10

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51674172, 51804205, 51874203); 中国博士后基金资助项目(7131704818); 江苏省高校自然科学基金资助项目(18KJB450002)

的不断提高,通常采用电渣重熔生产优质的塑料模具钢,以改善夹杂物和提高产品性能<sup>[1-2]</sup>。然而,由于电渣重熔具有良好的脱硫能力,对于硫质量分数为0.05%~0.10%的AS136高硫易切削钢而言,其硫含量的控制较为困难,是工业生产中的难题。因此,研究电渣重熔中渣系及冶炼工艺对AS136模具钢的硫含量及夹杂物级别的控制具有重要意义。

目前已有大量文献报道了电渣重熔洁净钢的夹杂物控制问题<sup>[3-7]</sup>,Dong等<sup>[3]</sup>研究了电渣重熔中渣系对电渣锭中的氧及夹杂物含量的影响,Shi等<sup>[5]</sup>开展了电渣重熔中脱氧制度对电渣锭中氧含量和夹杂物的相关研究,但是关于硫含量以及夹杂物的综合控制鲜有报道。本文主要针对电渣重熔AS136模具钢生产中存在的问题,采用4t非保护气氛电渣炉,进行了电渣锭中硫均匀性以及夹杂物的控制研究。本文将为电渣重熔易切削钢中的硫含量及夹杂物的控制技术提供理论和实际依据。

## 1 实验

### 1.1 工业实验

采用4t非保护气氛电渣炉进行了三组电渣重熔实验(实验Exp. E1、Exp. E2和Exp. E3),如图1所示。结晶器直径为610mm,自耗电极采用三根180mm×180mm×6000mm的方坯并联组成,其成分见表1。电渣实验中,平均电流、电压、熔速分别为61V、8000A和330kg·h<sup>-1</sup>。渣量为130kg,在600℃下焙烧4h以去除水分。实验Exp. E1、Exp. E2和Exp. E3分别采用渣系S1、S2和S3,其成分如表2所示。在Exp. E1、Exp. E2和Exp. E3电渣重熔中化渣结束时刻分别加入600、2000和2500g的FeS。脱氧剂均采用FeSi(质量分数28%Fe+72%Si):在

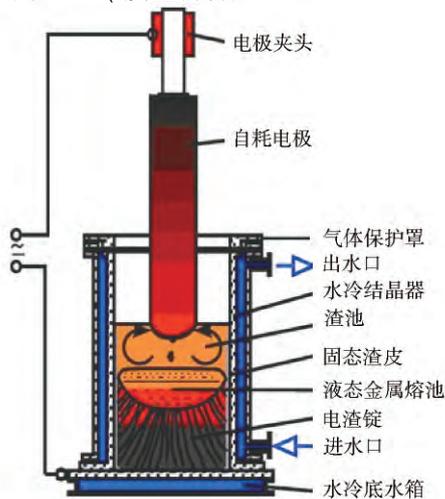


图1 电渣重熔示意图

Fig. 1 Schematic diagram of electroslag furnace

实验Exp. E1和Exp. E2中FeSi的加入速率为1.3kg·t<sup>-1</sup>,在实验Exp. E3中FeSi的加入速率为1.6kg·t<sup>-1</sup>。实验Exp. E3中,在熔炼初期的前3.25h内持续均匀地加入2.6kg的镁沙,剩余的冶炼阶段持续均匀地加入3.2kg的镁沙。在实验Exp. E3重熔过程中,向渣中添加FeS颗粒,加入速率为1.42kg·t<sup>-1</sup>。

表1 自耗电极的化学成分

Table 1 Chemical composition of the electrode used in experiments

							%
C	Si	Mn	Cr	O	P	S	
0.36	0.53	0.45	12.88	0.0027	0.023	0.09	

表2 实验渣系的成分

Table 2 Chemical composition of ESR slag

						%
渣系	CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	SiO <sub>2</sub>	MgO	
S1	50	0	30	20	0	
S2	66	0	28	2	4	
S3	70	0	28	0	2	

### 1.2 化学成分及微观分析

电渣重熔实验后,得到了直径610mm、高170cm的电渣锭,轧制成537mm×150mm×6168mm的板坯后,检测分析了沿板坯高度方向的硫含量分布,如表3所示。同时,在板坯的20、220、400和600cm处,取20mm×15mm×15mm的钢样进行夹杂物评级,同时测量每个钢样的全氧含量,其结果如表3所示。

## 2 结果和讨论

### 2.1 夹杂物的控制

采用金相显微镜对板坯中的夹杂物类型、分布进行了统计分析,如表4所示。从表4中可以看出:(1)实验Exp. E1中,220cm处的B类细系氧化铝夹杂、600cm处的C类细系硅酸盐夹杂、220和400cm处的C类粗系硅酸盐夹杂均高于标准级别;(2)在实验Exp. E2中,600cm处的C类细系硅酸盐夹杂高于标准级别,这主要是因为FeSi脱氧引起渣中SiO<sub>2</sub>含量的不断增加;(3)在实验Exp. E3中,夹杂物级别控制良好。

观察表3中的全氧含量可以得到:(1)在实验Exp. E1中,采用质量分数为20%的SiO<sub>2</sub>渣冶炼时,其电渣锭中氧含量最高;(2)在实验Exp. E2和Exp. E3中,降低SiO<sub>2</sub>的含量可以有效降低电渣锭的全氧含量。

因此,为了能够降低电渣锭中的氧含量以及夹

表 3 板坯中硫和氧的质量分数  
Table 3 Sulfur and oxygen contents in each experiment

板坯高度/ cm	电渣锭高度/ cm	Exp. E1		Exp. E2		Exp. E3	
		$w_S / \%$	$w_O / 10^{-6}$	$w_S / \%$	$w_O / 10^{-6}$	$w_S / \%$	$w_O / 10^{-6}$
20	5.5	0.075	73	0.028	41	0.056	37
70	19.3	—	—	0.031	—	0.052	—
120	33.1	—	—	0.036	—	0.061	—
170	46.9	—	—	0.041	—	0.050	—
220	60.6	—	75	0.043	43	0.053	40
270	74.4	—	—	0.045	—	0.058	—
320	88.2	0.066	—	0.047	—	0.061	—
400	110.3	—	76	—	46	0.058	42
600	165.4	0.067	77	0.049	48	0.057	44

表 4 板坯中 A、B、C、D 类夹杂物的级别  
Table 4 Grade of A, B, C and D type inclusions in each product sample

Exp.	板坯高度/ cm	A 类硫化物		B 类氧化铝		C 类硅酸盐		D 类球状氧化物	
		细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系	细系	粗系
E1	20	3.5	1.5	1	1.5	0.5	1	1.5	1
	220	3	1	2	1	1	1.5	1.5	1
	400	2.5	1	1.5	1.5	1	1.5	2	1
	600	3.5	0.5	1	0.5	1.5	0.5	1	1
E2	20	3	1	1.5	0.5	0.5	0	1.5	1
	220	2.5	1	1	1.5	0.5	1	1.5	1
	400	2.5	2	0.5	1.5	1	1	1.5	1
	600	3	1	1	1	1.5	0	1	1
E3	20	2.5	1	1	1	0.5	0.5	1	1
	220	2.5	1.5	0.5	0.5	0.5	1	1.5	1
	400	2.5	1	1	1	1	0	1.5	1
	600	3	0.5	1	0.5	1	0.5	1	1
标准	≤3.5	≤2.0	≤1.5	≤1.5	≤1.0	≤1.0	≤2.0	≤1.5	

杂物级别,应降低渣中  $\text{SiO}_2$  的含量. 渣系成分由  $\text{CaF}_2$ 、 $\text{Al}_2\text{O}_3$  和  $\text{MgO}$  组成. 根据文献 [3],氧化铝相对于镁铝尖晶石夹杂更容易形成簇状的大尺寸夹杂物,因此,渣中加入少量的  $\text{MgO}$  以改善 B 类夹杂物的尺寸分布.

图 2 是自耗电板、板坯中的夹杂物形貌及能谱图 (SEM-EDS). 在自耗电板中发现了  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  夹杂、(Cr, Mn) S 夹杂、外层由硫化物包裹  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  的复合夹杂,如图 2(a) 和 2(b). 在实验 Exp. E1 中,典型的夹杂物为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  夹杂、外层由硫化物包裹  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  的复合夹杂,如图 2(c) 和 2(d). 在实验 Exp. E2 中,在初期的 20 cm 内为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$  类夹杂物,220 ~ 400 cm 内为

$\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  类夹杂物,600 cm 处为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  夹杂物,如图 2(e) ~ 2(f). 在实验 Exp. E3 中,在初期的 20 cm 内为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{MgO}$  类夹杂物,220 ~ 600 cm 内为  $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$ - $\text{MgO}$  类夹杂物,如图 2(g) ~ 2(h).

对实验 Exp. E1、Exp. E2 和 Exp. E3 板坯中的  $\text{MgO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  类夹杂物成分进行了统计分析:随机在每个板坯 20、220、400 和 600 cm 处的样品中选取 15 个点进行能谱 (SEM-EDS) 分析,并求得这 15 个夹杂物的平均成分,其结果如图 3 所示. 图 3(a)、3(b) 和 3(c) 为分别为 Exp. E1、Exp. E2 和 Exp. E3 中的  $\text{MgO}$ - $\text{Al}_2\text{O}_3$ - $\text{SiO}_2$  类夹杂物变化规律图. 其中 ‘●’ 为自耗电板中的夹杂物, ‘①’、‘②’、

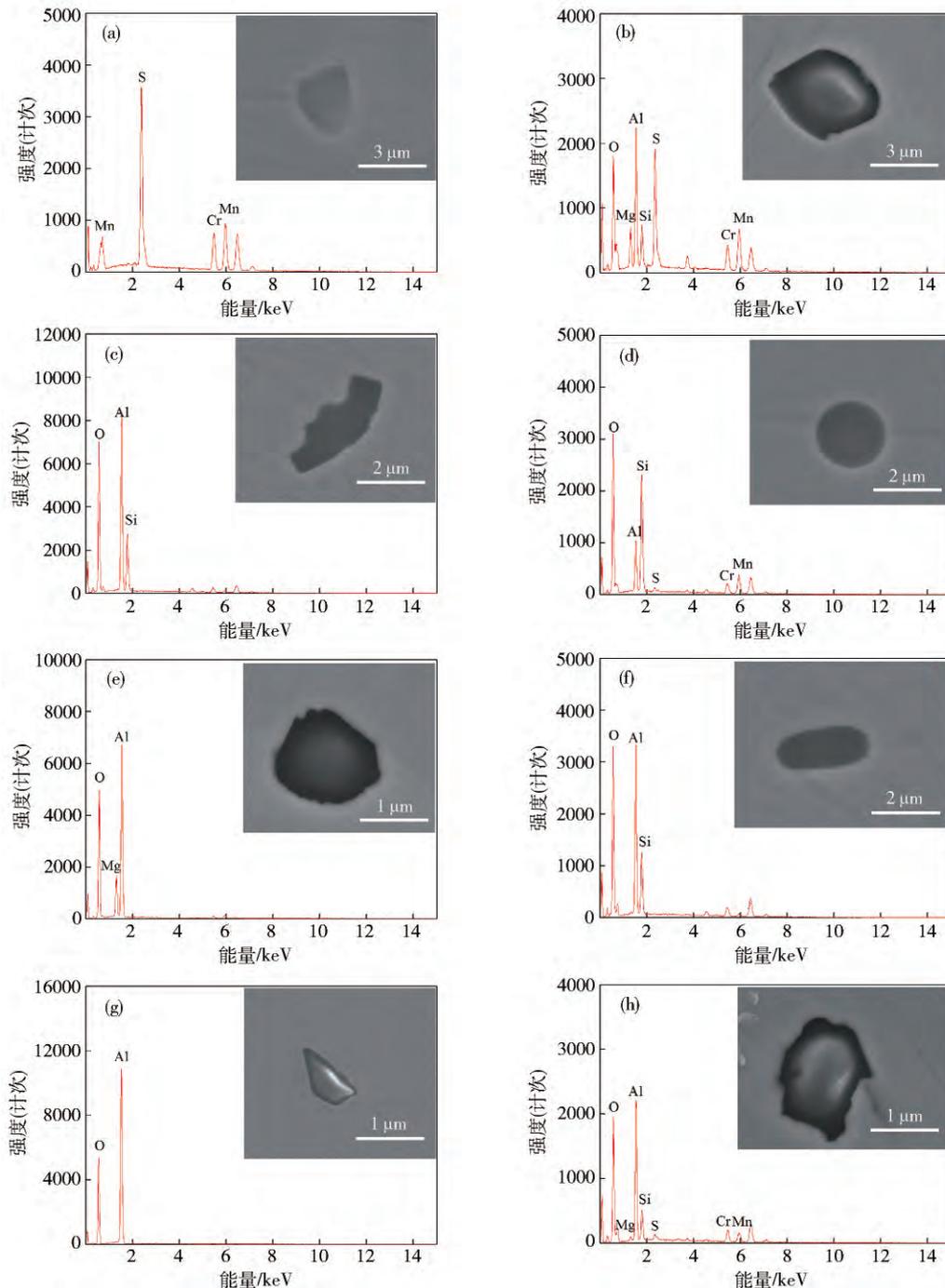


图2 电极和电渣锭的典型夹杂物。(a)~(b)电极;(c)~(d)实验 Exp. E1;(e)~(f)实验 Exp. E2;(g)~(h)实验 Exp. E3

Fig.2 Typical inclusions in electrode and each ingot: (a)~(b) electrode; (c)~(d) Exp. E1; (e)~(f) Exp. E2; (g)~(h) Exp. E3

‘③’和‘④’分别为板坯中20、220、400和600cm处的15个夹杂物成分的平均值。

### 2.2 重熔过程中硫含量的控制

如表3所示,在实验 Exp. E1 和 Exp. E3 中硫质量分数为0.050%~0.075%,在实验 Exp. E2 中硫质量分数为0.028%~0.049%。基于热力学对电渣重熔过程中硫质量分数的变化进行了分析,自耗电极中硫主要以 $(Cr_{0.4}, Mn_{0.6})S$ 、 $(Cr_{0.5}, Mn_{0.5})S$ 和 $(Cr_{0.6}, Mn_{0.4})S$ 夹杂物形式存在,根据 $2/5[Mn] +$

$3/5[Cr] + [S] = (Mn_{0.4}, Cr_{0.6})S$ 、 $1/2[Mn] + 1/2[Cr] + [S] = (Mn_{0.5}, Cr_{0.5})S$ 和 $3/5[Mn] + 2/5[Cr] + [S] = (Mn_{0.6}, Cr_{0.4})S$ 反应及相关热力学参数<sup>[5]</sup>,当Cr质量分数为12.88%时,计算了液相线温度( $T_{liq}$ )和固相线温度( $T_{sol}$ )下的含硫夹杂物的稳定区域图,如图4所示。

图4中 $(Cr, Mn)S$ 夹杂物的稳定区域图表明: $(Cr, Mn)S$ 夹杂物在钢液中呈非稳定状态,在电渣重熔中钢液熔化时会被分解为自由态的 $[Cr]$ 、

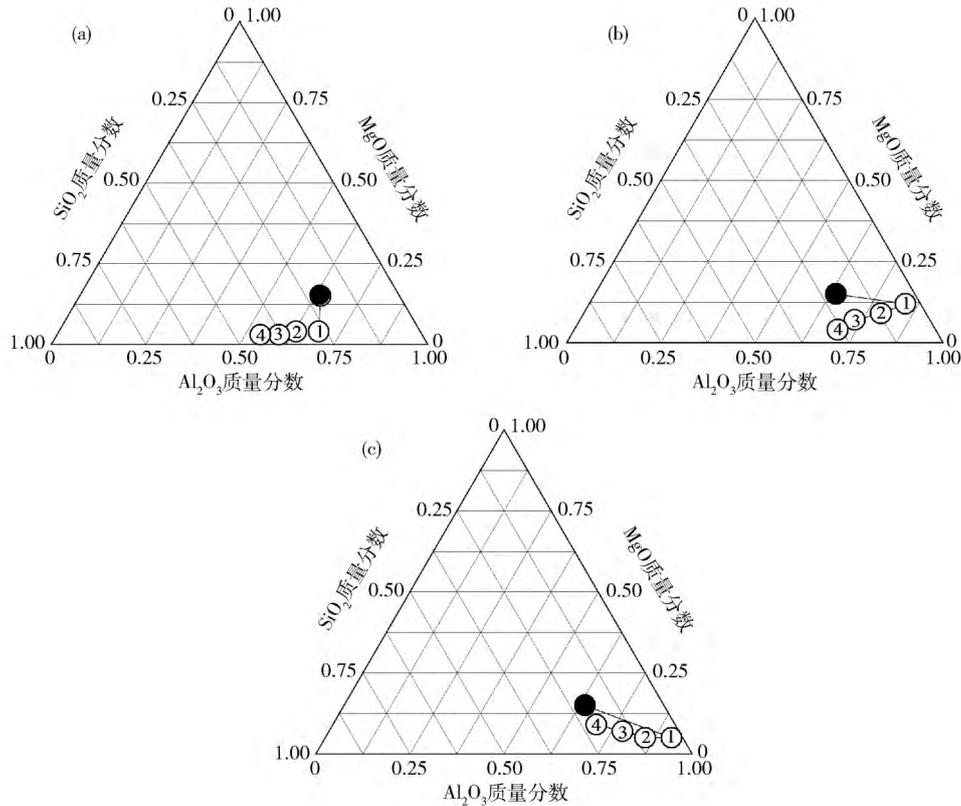


图3 MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub>类夹杂物成分的统计分析图

Fig. 3 Statistical analysis chart of MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-SiO<sub>2</sub> inclusion compositions

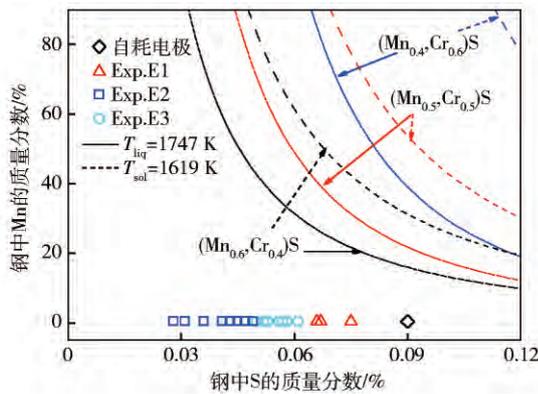


图4 AS136 模具钢中(Mn, Cr)S 夹杂物的稳定区域图

Fig. 4 Stability diagram of (Mn, Cr)S inclusion in the AS136 die steel

[Mn]和[S],其中[S]在渣-金接触过程中被渣液去除,因此需要研究电渣重熔过程中的脱硫动力学来解释电渣锭中硫的变化规律.根据文献[8]得到电渣重熔过程中脱硫动力学的传质方程式(1),通过式(1)得到硫的瞬时传质量 $\Delta w_{[S]}$ 随着渣间硫分配比 $L_S$ 的降低而降低,即液态金属凝固成电渣锭的含硫量随着 $L_S$ 的降低而增加.

$$\Delta w_{[S]}/dt = \frac{A}{V_m} \frac{1}{\frac{1}{k_S^m} + \frac{\rho_m}{\rho_S k_S^w L_S}} \left( w_S^{m\rho} - \frac{w_S^{w\rho}}{L_S} \right) \quad (1)$$

式中: $\Delta w_{[S]}$ 为钢液侧硫的瞬时传质量; $A$ 为渣-金接触面积,cm<sup>2</sup>; $V_m$ 为液态金属体积,cm<sup>3</sup>; $t$ 为传质时间;s; $w_S^{m\rho}$ 和 $w_S^{w\rho}$ 分别为初始时刻下的钢液侧和熔渣侧的硫质量分数; $k_S^m$ 和 $k_S^w$ 分别为硫在钢液侧和熔渣侧的传质系数,cm·s<sup>-1</sup>; $\rho_m$ 和 $\rho_S$ 分别为钢液和熔渣的密度,g·cm<sup>-3</sup>;硫分配比 $L_S$ 根据式(2)~(5)进行确定<sup>[9-10]</sup>

$$(Mg^{2+} + O^{2-}) + [S] = (Mg^{2+} + S^{2-}) + [O] \quad (2)$$

$$\Delta G_{m,MgS}^\ominus = 203604.6 - 35.023T \quad (3)$$

$$K_{MgS}^\ominus = \exp(-\Delta G_{m,MgS}^\ominus/RT) \quad (4)$$

$$L_{S,MgO} = \frac{(\%S)_{MgS}}{[\%S]} = 16f_S K_{MgS}^\ominus N_{MgO} \sum n_i/a_o \quad (5)$$

式中: $N_{MgO}$ 为MgO的作用浓度,可以根据分子离子共存理论进行求解<sup>[10-12]</sup>; $T$ 为渣金反应的温度,K; $R$ 为热力学常数,8.314J·mol<sup>-1</sup>·K<sup>-1</sup>; $\Delta G_{m,MgS}^\ominus$ 和 $K_{MgS}^\ominus$ 分别为反应(2)的吉布斯自由能和热力学平衡常数; $\sum n_i$ 为熔渣中各物质的总摩尔数; $f_S$ 为硫的活度系数; $a_o$ 为界面处氧的活度,由式(6)~(8)确定<sup>[13-14]</sup>.

$$[Si] + 2[O] = (SiO_2) \quad (6)$$

$$\Delta G_{m,SiO_2}^\ominus = -581900 + 221.8T \quad (7)$$

$$a_0^2 = \frac{N_{(SiO_2)}}{w_{Si} f_{Si} \exp(-\Delta G_{m, SiO_2}^\ominus / RT)} \quad (8)$$

式中:  $w_{Si}$  为钢液中 Si 的质量分数;  $N_{SiO_2}$  为  $SiO_2$  的作用浓度, 可以根据分子离子共存理论进行求

解<sup>[10-12]</sup>;  $f_{Si}$  为钢液中 Si 的活度系数, 可根据式(9)计算, 本文中用到的相互作用系数列于表 5<sup>[15]</sup>.

$$\lg f_i = \sum e_i^j w_j [\%j] \quad (9)$$

表 5 钢液中各元素的相互作用系数

Table 5 Interaction coefficient of the element in liquid steel

$e_i^j$	C	Si	Mn	P	S	Al	Cr
S	0.111	0.075	-0.026	0.035	0.018 - 120/T	0.041	0.04 - 94.2/T
Si	0.18	0.103	-0.0146	0.09	0.066	0.058	-0.004

假定电渣重熔初期升温阶段(电渣锭底部 0 ~ 48 cm 内)熔渣的温度从 1497 °C 升温到 1677 °C<sup>[8]</sup>, 且脱氧剂全部用于脱氧, 没有合金元素被氧化. 实验 Exp. E2 和 Exp. E3 中的  $SiO_2$  质量分数随时间的变化关系如图 5 所示.

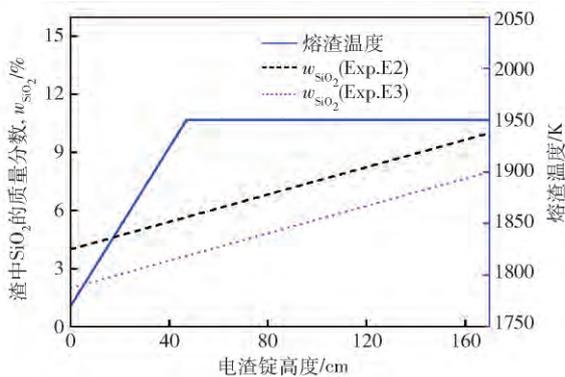


图 5 熔渣温度以及渣中  $SiO_2$  质量分数随电渣锭高度的变化关系

Fig. 5 Change of temperature and  $SiO_2$  content in slag with height of ingot during ESR process

在实验 Exp. E2 中, 电渣重熔初期钢液中大量的硫被熔渣吸收. 如图 6 所示, 在前 48 h 内,  $L_s$  随着渣温的不断升高和渣中  $SiO_2$  含量的增加呈快速降低的趋势, 使得电渣锭中的硫含量呈快速升高的趋势; 在随后的冶炼中, 熔渣温度达到稳定状态,  $L_s$  随着渣中  $SiO_2$  含量的增加呈缓慢降低的趋势, 电渣锭中的硫含量呈缓慢增加的状态.

如表 3 所示, 在实验 Exp. E3 中, 硫含量呈均匀分布, 这是因为初渣中的  $MgO$  含量较低, 且随着电渣重熔初期温度的不断升高, 持续均匀地向渣中补加额外的  $MgO$ , 从而保证了硫的分配比始终保持在恒定值, 因此电渣锭中的硫含量呈均匀分布, 如图 7 所示.

### 3 结论

(1) 基于热力学对电渣重熔易切削钢中硫含量

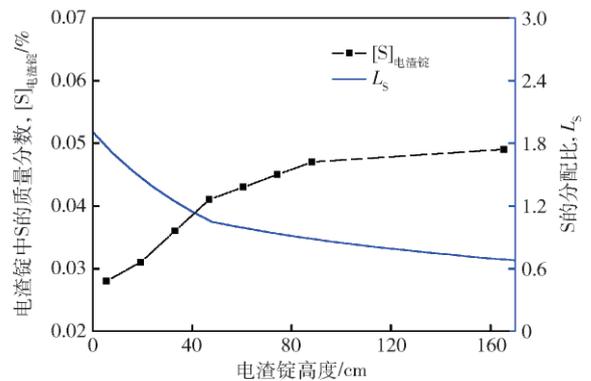


图 6 实验 Exp. E2 中硫含量和硫分配比随电渣锭高度的变化关系

Fig. 6 Change of sulfur content in metal and  $L_s$  with height of ingot during Exp. E2 process

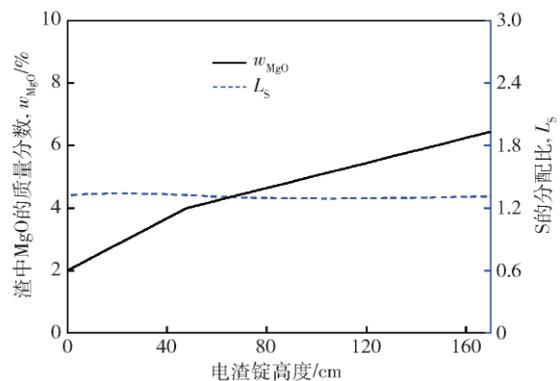


图 7 实验 Exp. E3 渣中  $MgO$  和硫分配比随电渣锭高度变化关系

Fig. 7 Change of  $MgO$  content in slag and  $L_s$  with height of ingot during Exp. E3 process

以及夹杂物进行了分析研究: 采用 S1 渣系虽然能够满足电渣锭中硫含量的要求, 但是氧质量分数达到了 0.01%, 且 B 类和 C 类夹杂物超标.

(2) 电渣重熔初期升温阶段, 电渣锭中硫质量分数随着渣温的增加而增加, 硫的分配比随着渣温的增加而降低.  $CaF_2 - Al_2O_3 - MgO$  类渣系能够降低电渣锭的氧含量, 改善 B 类和 C 类夹杂物, 但对电渣锭中 S 的均匀性不利.

(3) 为了改善沿电渣锭轴向的硫的均匀性,在电渣重熔初期升温阶段持续均匀地补加额外的MgO能够保证硫的分配比保持恒定值,且电渣锭中的硫含量分布均匀,夹杂物指标控制较为理想。

#### 参 考 文 献

- [1] Weber V, Jardy A, Dussoubs B, et al. A comprehensive model of the electroslag remelting process: description and validation. *Metall Mater Trans B*, 2009, 40(3): 271
- [2] Matity S K, Ballal N B, Goldhahn G, et al. Development of ultra-high strength low alloy steel through electroslag refining process. *ISIJ Int*, 2009, 49(6): 902
- [3] Dong Y W, Jiang Z H, Cao Y L, et al. Effect of slag on inclusions during electroslag remelting process of die steel. *Metall Mater Trans B*, 2014, 45(4): 1315
- [4] Hou D, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Effect of slag composition on the oxidation kinetics of alloying elements during electroslag remelting of stainless steel: part-1 mass-transfer model. *ISIJ Int*, 2017, 57(8): 1400
- [5] Shi C B, Chen X C, Guo H J, et al. Assessment of oxygen control and its effect on inclusion characteristics during electroslag remelting of die steel. *Steel Res Int*, 2012, 83(5): 472
- [6] Hou D, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Thermodynamic design of electroslag remelting slag for high titanium and low aluminum stainless steel based on IMCT. *Ironmaking Steelmaking*, 2016, 43(7): 517
- [7] Jiang Z H, Hou D, Dong Y W, et al. Effect of slag on titanium, silicon and aluminum content in superalloy during electroslag remelting. *Metall Mater Trans B*, 2016, 47(2): 1465
- [8] Hou D, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Mass transfer model of desulfurization in the electroslag remelting process. *Metall Mater Trans B*, 2017, 48(3): 1885
- [9] Yang X M, Jiao J S, Ding R C, et al. A thermodynamic model for calculating sulphur distribution ratio between CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ironmaking slags and carbon saturated hot metal based on the ion and molecule coexistence theory. *ISIJ Int*, 2009, 49(12): 1828
- [10] Yang X M, Shi C B, Zhang M, et al. A thermodynamic model of sulfur distribution ratio between CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> slags and molten steel during LF refining process based on the ion and molecule coexistence theory. *Metall Mater Trans B*, 2011, 42(6): 1150
- [11] Yang X M, Shi C B, Zhang M, et al. A thermodynamic model of phosphate capacity for CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> slags equilibrated with molten steel during a top-bottom combined blown converter steelmaking process based on the ion and molecule coexistence theory. *Metall Mater Trans B*, 2011, 42(5): 951
- [12] Yang X M, Duan J P, Shi C B, et al. A thermodynamic model of phosphorus distribution ratio between CaO-SiO<sub>2</sub>-MgO-FeO-Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-MnO-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>-P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> slags and molten steel during a top-bottom combined blown converter steelmaking process based on the ion and molecule coexistence theory. *Metall Mater Trans B*, 2011, 42(4): 738
- [13] Hou D, Jiang Z H, Dong Y W, et al. Effect of slag composition on the oxidation kinetics of alloying elements during electroslag remelting of stainless steel: Part-2 control of titanium and aluminum content. *ISIJ Int*, 2017, 57(8): 1410
- [14] Jiang Z H, Li S J, Li Y. Thermodynamic calculation of inclusion formation in Mg-Al-Si-O system of 430 stainless steel melts. *J Iron Steel Res Int*, 2011, 18(2): 14
- [15] Hou D, Liu F B, Qu T P, et al. Behavior of alloying elements during drawing-ingot-type electroslag remelting of stainless steel containing titanium. *ISIJ Int*, 2018, 58(5): 876