

## 气体保护电渣重熔过程氧传递的动力学研究

史成斌<sup>1</sup> 郭汉杰<sup>1</sup> 陈希春<sup>2</sup> 孙晓林<sup>1</sup> 傅杰<sup>1</sup>

(1 北京科技大学冶金与生态工程学院,北京 100083; 2 钢铁研究总院高温材料研究所,北京 100081)

**摘要** 基于渗透理论建立了气体保护电渣重熔过程渣-钢间氧传递的动力学模型,并在 50 kg 电渣炉进行模具钢 S136( /% :0.39C、0.26Si、0.43Mn、0.020P、0.018S、13.37Cr、0.21Mo、0.34V) 的重熔实验,得出渣中 FeO 含量-0~2.0% (FeO),电极端部钢液中原始氧含量-0~0.010 0% [O],自耗电极半径-40~300 mm 和重熔速率- $(0.5 \sim 5.0) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 对熔渣和钢液间传氧速率的影响。结果表明,熔渣中 FeO 含量-(FeO)存在一个临界值,(FeO)小于此临界值时,氧的传递过程为电极端部钢液向渣中传递;反之,氧的传递过程为渣中 FeO 向电极端部钢液内传递。随自耗电极半径的增加,钢-渣间传氧速率减小;随着重熔速率和钢液中原始氧含量增加,钢-渣间传氧速率增加。

**关键词** 气体保护电渣重熔 S136 模具钢 氧 传递速率 动力学

## Kinetic Study of Oxygen Transfer during Protective Gas Electroslag Remelting Process

Shi Chengbin<sup>1</sup>, Guo Hanjie<sup>1</sup>, Chen Xichun<sup>2</sup>, Sun Xiaolin<sup>1</sup> and Fu Jie<sup>1</sup>

(1 School of Metallurgical and Ecological Engineering, University of Science and Technology, Beijing 100083; 2 Research Institute for High Temperature Materials, Central Iron and Steel Research Institute, Beijing 100081)

**Abstract** Based on the penetration theory, a kinetic model for oxygen transfer between molten slag and liquid steel during protective gas electroslag remelting process is established, and remelting test of die steel S136 ( /% : 0.39C, 0.26Si, 0.43Mn, 0.020P, 0.018S, 13.37Cr, 0.21Mo, 0.34V) by a 50 kg electroslag remelting unit is carried out to get the effect of FeO content in slag-0~2.0% (FeO), original oxygen content in liquid steel at the electrode tip-0~0.010 0% [O], radius of electrode-40~300 mm and remelting rate- $(0.5 \sim 5.0) \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$  on transfer rate of oxygen between molten slag and liquid steel. The results show that there is a critical value of (FeO), as FeO content in slag is lower than the value, the oxygen transfer process is from liquid steel at electrode tip to molten slag, whereas as FeO content is higher than that value, the oxygen transfer process is from molten slag to liquid steel at electrode tip; with increasing the radius of electrode, the liquid steel-molten slag oxygen transfer rate decreases, and with increasing the melting rate and the initial oxygen content in liquid steel, the liquid steel-molten slag oxygen transfer rate increases.

**Material Index** Protective Gas Electroslag Remelting, S136 Die Steel, Oxygen, Transfer rate, Kinetics

电渣重熔过程中熔滴在电极端部周期性地长大至临界尺寸,然后由电极端部脱落,电极端部熔滴以薄膜形式形成的过程中会发生物理化学反应。为描述电渣重熔过程中组元含量的变化,研究者们建立了不同类型的模型以预报电渣重熔过程炉渣或钢液的成分变化。这些模型包括热力学平衡模型<sup>[1]</sup>、单级反应器模型<sup>[2]</sup>和传质模型<sup>[3-5]</sup>。

Fraser 和 Mitchell<sup>[3,4]</sup>建立了电渣重熔过程渣中 FeO 氧化钢液中 [Mn] 的动力学模型。该模型预报的组元浓度随时间变化的计算结果与实验结果符合较好,但该模型并不能定量解释  $\text{Fe} \rightarrow \text{Fe}^{2+} + 2\text{e}^-$  的过程。Fraser 和 Mitchell<sup>[3]</sup>指出,之前研究者们建立的预报合金元素烧损的动力学模型均没有考虑传质的影响,平衡模型认为电渣重熔过程为一个等温的

反应器,单阶段反应器模型引入集成的传质系数来代替不同反应和过程的传质系数,显然这些处理方法过于简化。魏季和等<sup>[5]</sup>建立了电渣重熔过程化学反应的传质模型,该模型可以用来预报渣和金属相内的成分变化。当今在发展第二代电渣重熔工艺的过程中通过动力学分析和预报过程参数是非常必要的,这也将一定程度上降低实验和生产的成本。然而,关于电渣重熔过程动力学的研究很少,关于氧传递的动力学模型至今尚未见研究报道。

在之前实验研究和热力学分析讨论了电渣重熔过程氧的行为与控制的基础上<sup>[6-9]</sup>,本文基于溶质渗透理论建立了气体保护电渣重熔过程渣-钢间氧传递的动力学模型,利用该模型预报了渣-钢间氧传递的临界值。同时预报了气体保护电渣重熔过程部分

工艺因素对渣-钢间氧传递扩散通量的影响。本研究的目的是试图为第二代电渣重熔工艺中氧含量的控制提供理论指导。

### 1 动力学模型的建立

电渣重熔过程电极端部液膜形成过程中渣-钢间组元的传质速率和液膜的流动状态有关。本研究将基于溶质渗透理论分析电极端部相间的传质。溶质渗透理论的要点在文献[10]中已详细给出。

电渣重熔过程是熔渣-钢液-气相三相间的反应。化学精炼过程的反应位置包括:(1)电极端部的渣-钢界面;(2)熔滴降落过程中熔滴-渣界面;(3)熔池-渣界面。其中,电极端部的渣-钢界面是电渣重熔过程化学反应最主要的位置<sup>[6,11-12]</sup>。这与电极端部液膜、熔渣间大的表面积和体积比密切相关<sup>[12]</sup>。由于熔滴穿过渣池的时间很短(一般在0.01~0.1 s)<sup>[12]</sup>,因此熔滴穿过渣池的过程通常可以被忽略作为钢液精炼的过程。电渣重熔过程采用气体保护之后,气氛中的氧直接向钢液中传递的途径将被抑制<sup>[6]</sup>。因此,气体保护电渣重熔过程中氧的传递仅是在渣-钢间进行的。电渣重熔过程中电极端部钢液与熔渣相之间的传氧过程可以看作为一个独立的反应体系。

基于上述讨论,在建立动力学模型时做如下假设条件:

(1)渣-钢间氧的传递是在电极端部液膜形成过程中渣-钢界面处完成的。熔滴穿过渣池的渣-熔滴界面和熔池-渣界面可以忽略作为氧传递的位置;

(2)电极端部液膜形成过程中物质的传递满足渗透理论;

(3)在渣-钢界面发生化学反应,在每一相内部为组元的扩散过程。不单独考虑流体流动对传质过程的影响,该影响将被考虑在传质系数中;

(4)界面化学反应在瞬间达到了热力学平衡。

半无限体扩散的初始条件和边界条件为:

$$t=0, x \geq 0, c=c_b$$

$$0 < t \leq t_e, x=0, c=c_s; x=\infty, c=c_b$$

对半无限体扩散,菲克第二定律的解为:

$$\frac{c-c_b}{c_s-c_b} = 1 - \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (1)$$

$$c = c_s - (c_s - c_b) \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \quad (2)$$

式中: $D$ -组元的扩散系数;在 $x=0$ 处(即界面上),

组元的扩散流密度:

$$J = -D \left( \frac{\partial c}{\partial x} \right)_{x=0} = D(c_s - c_b) \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \operatorname{erf} \frac{x}{2\sqrt{Dt}} \right) \right]_{x=0} = D(c_s - c_b) \cdot \frac{1}{\sqrt{\pi Dt}} = \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (c_s - c_b) \quad (3)$$

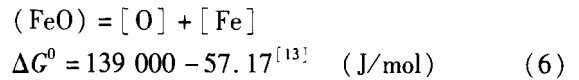
在寿命 $t_e$ 时间内的平均扩散流密度:

$$\bar{J} = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (c_s - c_b) dt = 2\sqrt{\frac{D}{\pi t_e}} (c_s - c_b) \quad (4)$$

根据传质系数的定义 $J = k_d(c_s - c_b)$ ,可以得出溶质渗透理论的传质系数为:

$$k_d = 2\sqrt{\frac{D}{\pi t_e}} \quad (5)$$

熔渣与钢液间传氧过程的化学反应为:



根据等温方程式 $\Delta G^0 = -RT \ln K$ 可以得到下式:

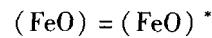
$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{a_{[\text{Fe}]} \cdot a_{[\text{O}]}}{a_{\text{FeO}}} \quad (7)$$

钢液中组元以1%溶液为标准态,在钢液中 $a_{\text{Fe}}$ 为1。因此上式可以改写为:

$$\Delta G^0 = -RT \ln \frac{a_{[\text{Fe}]} \cdot a_{[\text{O}]}}{a_{\text{FeO}}} = -RT \ln \frac{a_{[\text{O}]}}{a_{\text{FeO}}} \quad (8)$$

熔渣内FeO向钢液传氧过程的反应机理为:

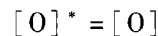
(1)渣中FeO向渣-钢界面扩散



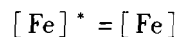
(2)在界面上进行的化学反应



(3)在界面上生成的 $[\text{O}]^*$ 向钢液内扩散



(4)在界面上生成的 $[\text{Fe}]^*$ 向钢液内扩散



当熔渣的氧势高于电极端部钢液的氧势,那么熔渣将按照式(6)向钢液内传氧。反之,当电极端部钢液的氧势高于熔渣的氧势,钢液内的氧将向熔渣内传递。基于溶质渗透理论,电极端部液膜内的流体微元在向下迁移过程中内部的氧势不断变化,直到该微元在电极端部汇聚而离开电极端部(图1)。流

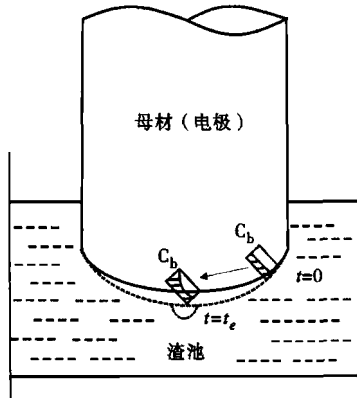


图1 电极端部流体微元流动的示意图

Fig. 1 Schematics of microelement flowing of fluid at electrode tip

体微元由开始形成到在电极端部形成熔滴并坠落之前的时间即为微元的寿命  $t_e$  (亦即为停留时间)。

高温下界面化学反应通常不会成为整个反应过程的限制性环节。电渣重熔过程中熔渣内 FeO 在电极端部向钢液传氧的扩散通量为:

$$J = \frac{1}{t_e} \int_0^{t_e} \sqrt{\frac{D}{\pi t}} (c_s - c_b) dt = 2 \sqrt{\frac{D_{\text{FeO}}}{\pi t_e}} (c_{s,\text{FeO}} - c_{b,\text{FeO}}) \quad (9)$$

式中:  $J$ - 扩散通量/ $[\text{mol} \cdot (\text{m}^2 \cdot \text{s})^{-1}]$ ;  $c_{s,\text{FeO}}$ - 渣-钢界面处 FeO 的浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $c_{b,\text{FeO}}$ - 渣相内部 FeO 的浓度/ $(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $D_{\text{FeO}}$ - (FeO) 的扩散系数。

电渣重熔过程中金属以薄膜状在电极端部熔化并汇聚成熔滴。电极端部液膜的停留时间可以按下式计算出<sup>[3]</sup>:

$$t_e = 3.35 \left( \frac{2\pi \cos\theta}{3W_m} \right)^{2/3} \left( \frac{\mu_m}{g\rho_m \sin\theta} \right)^{1/3} \left( \frac{R_e}{\cos\theta} \right)^{5/3} \quad (10)$$

式中:  $W_m$ - 体积熔化速率/ $(\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$ ;  $\theta$ - 电极端部的锥角/ $^\circ$ ;  $\rho_m$ - 钢液的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $\rho_s$ - 熔渣的密度/ $(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$ ;  $g$ - 重力加速度/ $(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$ ;  $R_e$ - 自耗电电极的半径/ $\text{m}$ ;  $\mu_m$ - 钢液的粘度/ $(\text{Pa} \cdot \text{s})$ 。

## 2 模型参数的确定

将建立的动力学模型应用于之前研究的模具钢 S136 电渣重熔过程<sup>[6]</sup>。实验用自耗电电极的长度为

600 mm, 直径为 80 mm。自耗电电极的化学成分如表 1 所示。

采用固定式、液渣启动操作工艺在 50 kg 电渣炉中共进行了 4 炉实验, 电渣炉结晶器内径为 170 mm。本实验所有炉次均采用预熔渣 CAF60 (60%  $\text{CaF}_2$ -20%  $\text{CaO}$ -20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$ )。预熔渣实验前在烘箱内 500  $^\circ\text{C}$  下烘烤 5 h, 每一炉次实验用渣量为 6 kg。操作电流、电压和结晶器出水温度均分别稳定在 1 500 A、49 V 和 25  $^\circ\text{C}$ 。重熔速率为 40 kg/h。每一炉次生产的重熔锭的质量均为 27 kg 左右。

FeO 在 60%  $\text{CaF}_2$ -20%  $\text{CaO}$ -20%  $\text{Al}_2\text{O}_3$  渣中的扩散系数采用文献报道的数据, 扩散系数  $D_{\text{FeO}}$  为  $1.5 \times 10^{-8} \text{m}^2/\text{s}$ <sup>[5]</sup>。本实验研究的电渣重熔过程中动力学模型需要的工艺参数为: 实验过程中各炉次的体积熔化速率均为  $1.59 \times 10^{-6} \text{m}^3/\text{s}$ 。实测的电极端部的锥角  $\theta$  为  $40^\circ$ ; 钢液的粘度  $\mu_m$  为 0.005 Pa  $\cdot$  s; 钢液的密度为  $7.0 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ; 熔渣的密度  $\rho_s$  为  $2.81 \times 10^3 \text{kg}/\text{m}^3$ ; 自耗电电极的半径  $R_e$  为 0.04 m。根据(10)式计算得到的电极端部液膜的停留时间  $t_e$  为 1.2 s。

熔渣中 FeO 按照式(6)向钢液内传氧, 式(8)可以进一步改写为:

$$a_{\text{FeO}} = \frac{a_{[\text{O}]}}{\exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right)} = \frac{f_0 [\% \text{O}]}{\exp\left(-\frac{\Delta G^0}{RT}\right)} \quad (11)$$

由于电极端部液膜的温度近似等于钢的液相线温度<sup>[6]</sup>, 因此, 根据经验公式计算得到的所研究钢种的液相线温度 1 747 K 即为电极端部液膜的温度。结合式(6)和电极端部液膜的温度以及氧含量, 利用(11)式可以计算出渣中 FeO 的活度。式中的  $f_0$  为钢液中氧的活度系数, 可以利用 Wagner 模型计算出, 需要的活度相互作用系数值已在文献[7]中给出。利用文献报道的计算公式可以计算出渣中 FeO 的活度系数<sup>[5]</sup>。

$$\lg \gamma_{\text{FeO}} = \frac{11\,800}{T} (x_{\text{CaO}} + x_{\text{MgO}}) \cdot (x_{\text{SiO}_2} + 0.25x_{\text{AlO}_{1.5}}) + \frac{4\,916}{T} x_{\text{MnO}} x_{\text{SiO}_2} + \frac{3\,562}{T} x_{\text{SiO}_2} x_{\text{AlO}_{1.5}} + \frac{123}{T} x_{\text{MnO}} x_{\text{AlO}_{1.5}} \quad (12)$$

不同的研究者在其研究条件下分别实测或探讨了电渣重熔过程渣池的温度, 渣池的温度在 1 973 ~

表1 电渣重熔实验用模具钢 S136 自耗电电极的化学成分/%

Table 1 Analysis of electrode of die steel S136 for electroslag remelting test / %

C	Si	Mn	P	S	Cr	Ni	Cu	Mo	V	[Al] <sub>s</sub>	T[O]
0.39	0.26	0.43	0.020	0.018	13.37	0.10	0.04	0.21	0.34	0.079	0.008 9

2 123 K<sup>[14-17]</sup>。Medina 等指出电渣重熔过程渣池的温度取决于重熔速率<sup>[14]</sup>。通过比较本实验条件与 Medina 的实验条件可以认为本实验条件下渣池的温度约为 2 073 K。因此,结合式(11)和(12)可以计算出渣-钢界面处 FeO 的界面浓度。

$$x_{\text{FeO}} = \frac{a_{\text{FeO}}}{\gamma_{\text{FeO}}} \quad (13)$$

渣中 FeO 的体积分数浓度可以由摩尔分数浓度与体积分数浓度的关系式计算出:

$$c_{\text{FeO}} = \frac{x_{\text{FeO}}}{\sum x_i M_i / \rho} \quad (14)$$

由此可以结合上述确定的模型参数,利用式(9)计算出熔渣内 FeO 与电极端部钢液间传氧的扩散通量。

### 3 动力学模型的应用

结合电渣重熔实验结果,作者们已详细讨论了模具钢 S136 电渣重熔过程氧含量控制的热力学<sup>[6]</sup>。电渣重熔实验炉次  $T_1$ 、 $T_2$ 、 $T_3$  和  $T_4$  生产的重熔锭 ESR-1、ESR-2、ESR-3 和 ESR-4 中的氧含量分别为  $12 \times 10^{-6}$ 、 $19 \times 10^{-6}$ 、 $18 \times 10^{-6}$  和  $33 \times 10^{-6}$ 。各实验炉次的终渣成分见表 2。

表 2 各实验炉次的终渣组成及渣相内部 FeO 的浓度  $c_{b,\text{FeO}}$   
Table 2 Ingredient of end slag in each test heat and concentration of FeO in molten slag  $c_{b,\text{FeO}}$

实验炉次	炉渣组成/%				$c_{b,\text{FeO}}/(\text{mol} \cdot \text{m}^{-3})$
	CaF <sub>2</sub>	CaO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	FeO	
$T_1$	56.79	19.40	23.05	0.04	16
$T_2$	57.38	18.87	23.11	0.14	55
$T_3$	60.04	15.94	21.62	0.11	44
$T_4$	40.05	22.35	34.66	0.22	88

结合模具钢 S136 电渣重熔的实验结果,按照式(11)计算得到的 4 个炉次中电极端部渣-钢界面处 FeO 的活度值分别为 0.003 2、0.005 5、0.005 2 和 0.010 2。随后,计算出渣-钢界面处 FeO 的摩尔分数浓度分别为 0.002 8、0.004 8、0.004 6 和 0.007 7。进而计算得到界面处 FeO 的体积分数浓度  $c_{s,\text{FeO}}$  分别为 103、176、168、279 mol/m<sup>3</sup>。根据电渣重熔之后炉渣成分分析结果(表 2)可以计算出渣相内部 FeO 浓度  $c_{b,\text{FeO}}$ ,计算结果如表 2 所示。结合以上确定的模型参数,计算得到不同炉次电渣重熔过程中电极端部钢液向熔渣内传氧的扩散通量分别为 0.007 5、0.010 4、0.010 6、0.016 4 mol/(m<sup>2</sup>·s)。

当渣中 FeO 含量不断增加时,渣中 FeO 的含量与熔渣与钢液间传氧扩散通量的关系如图 2(a)所示。可以看出,随着渣中 FeO 含量的增加,钢液向熔渣传氧会在渣中 FeO 含量超过临界值后转变为熔渣向钢液内传氧。根据动力学模型计算出的不同炉次 FeO 含量的临界值如图 2(a)所示,分别为 0.26%、0.45%、0.42% 和 0.70%。同时由图 2(a)可以看出,随着渣中 FeO 含量的增加,钢液向熔渣传氧的速率不断减小,而对各实验炉次当渣中 FeO 含量超过临界浓度值以后,熔渣向钢液传氧的速率不断增加。

当渣中 FeO 含量保持不变时,电极端部钢液中原始氧含量对熔渣与钢液间传氧速率的影响如图 2(b)所示。可以看出,随着钢液中氧含量的增加,钢液向熔渣内传氧的速率将不断增加。

重熔速率是电渣重熔过程的一个重要指标。它不仅关系到生产效率,同时影响熔池形状进而影响铸锭的凝固组织。因此讨论重熔速率与渣-钢间氧

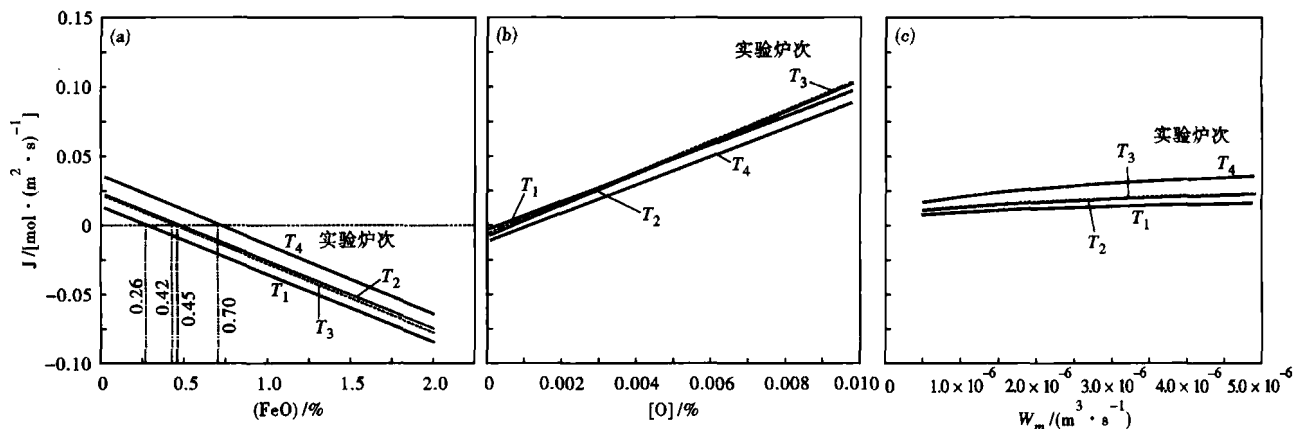


图 2 渣中 FeO 含量- (FeO)(a), 钢液中原始氧含量- [O](b) 和重熔速率-  $W_m$ (c) 对熔渣与钢液间传氧速率的影响  
Fig. 2 Effect of FeO content in slag- (FeO) (a), original oxygen content in liquid steel- [O] (b) and remelting rate-  $W_m$  (c) on transfer rate of oxygen between molten slag and liquid steel

的传递速率是很有必要的。电渣重熔过程的重熔速率与熔渣-钢液间传氧速率的关系如图2(c)所示。其中,实验渣成分保持不变,电渣重熔过程各炉次自耗电电极的半径均为0.04 m。由图2(c)可以看出,随着重熔速率的增加,电极端部钢液向熔渣内传氧的速率将不断增加。这是由于随着重熔速率的增加,电极端部液膜的停留时间不断减小,溶质渗透理论组元的传质系数不断增加。因此,钢液向熔渣中传氧的传质速率不断增加。

根据动力学模型计算的自耗电电极半径对熔渣和

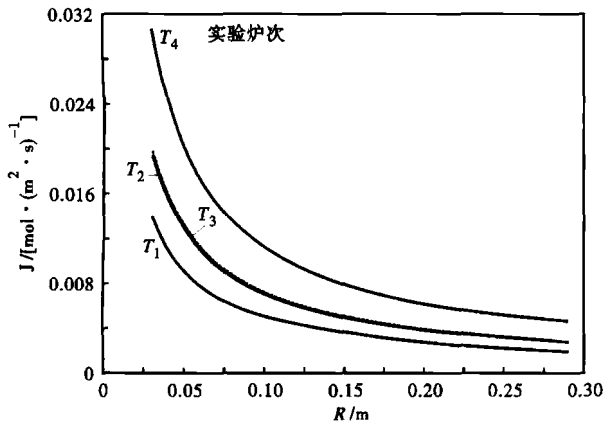


图3 自耗电电极半径-R对熔渣与钢液传氧速率的影响

Fig.3 Effect of electrode radius-R on transfer rate of oxygen between molten slag and liquid steel

#### 参考文献

- [1] Hawkins R J, Swinden D J, Pocklington D N. Relevance of Laboratory Experiments to the Control of Composition in Production-scale ESR[C]. Electroslag Refining, the Iron and Steel Institute, London, 1973;21-34.
- [2] Etienne M, Mitchell A. Slag-metal Transfer in Electroslag Melting [C]. 28th Electric Furnace Conference Proceeding, 1970;28-32.
- [3] Fraser M E, Mitchell A. Mass Transfer in the Electroslag Process: Part 1 Mass-transfer Model[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1976 (5):279-287.
- [4] Fraser M E, Mitchell A. Mass Transfer in the Electroslag Process: Part 2 Mass-transfer Coefficients[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1976(5):288-301.
- [5] 魏季和, Mitchell A. 交流电渣重熔过程中的成分变化-I. 理论传质模型[J]. 金属学报, 1984, 20(5):B261-279.
- [6] Shi Cheng-bin, Chen Xi-chun, Guo Han-jie, et al. Assessment of Oxygen Control and its Effect on Inclusion Characteristics during Electroslag Remelting of Die Steel[J]. Steel Research International, 2012, 83(5):472-486.
- [7] Shi Cheng-bin, Chen Xi-chun, Guo Han-jie. Characteristics of Inclusions in High-Al Steel during Electroslag Remelting Process[J]. International Journal of Minerals, Metallurgy and Materials, 2012, 19(4):295-302.
- [8] Shi Cheng-bin, Chen Xi-chun, Guo Han-jie. Oxygen Control and its Effect on Steel Cleanliness during Electroslag Remelting of NAK80 Die Steel[C]. AISTech 2012 Conference Proceeding, vol. I. Association for Iron & Steel Technology, 2012;947-957.
- [9] Shi Cheng-bin, Chen Xi-chun, Wang Fei, et al. Steel Cleanliness Control during Electroslag Remelting of H13 Die Steel[C]. Materials Science & Technology 2012 Conference and Exhibition Proceedings, 2012;1261-1268.
- [10] 华一新. 冶金过程动力学导论[M]. 北京:冶金工业出版社, 2004;131-132.
- [11] Cooper C K, Ghosh D, Kay D A R, et al. ESR Reaction Sites[C]. 28th Electric Furnace Proceedings, 1970, 28;8-11.
- [12] Holzgruber W, Petersen K, Schneider P E. Comparison of Product and Economics from Large VAR, AC-ESR and DC-ESR Ingots [C]. Transactions of the International Vacuum Metallurgy Conference, 1968;499-523.
- [13] The Japan Society for the Promotion of Science. The 19th Committee on Steelmaking. Steelmaking Data Sourcebook [M]. New York: Gordon and Breach, 1988;41, 118, 278.
- [14] Medina S F, Lopez F, Coedo A G. Manufacture by Electroslag Remelting of Microalloyed Steels with Two Precipitating Metal Elements[J]. Ironmaking and Steelmaking, 1997, 24(4):329-336.
- [15] Medina S F, Andres M P. Electrical Field in the Resistivity Medium (Slag) of the ESR Process; Influence on Ingot Production and Quality[J]. Ironmaking Steelmaking, 1987, 14(3):110-121.
- [16] 李正邦. 电渣冶金理论与实践[M]. 北京:冶金工业出版社, 2010;46-47.
- [17] Kawakami M, Nagata K, Yamamura M, et al. Profiles of Temperature, Voltage and Local Heat Generation in Slag Phase and Metal Pool of ESR Unit Under Operation[J]. Tetsu-to-Hagané, 1977, 63(13):2162-2171.

钢液间传氧速率的影响如图3所示。其中,渣中FeO含量保持不变,电渣重熔过程中各炉次的重熔速率均为 $1.59 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$ 。由图3可以看出,对于不同的实验炉次,熔渣与钢液间传氧的扩散通量均随着自耗电电极半径的增加而不断减小。这表明在炉渣成分不变的条件下,相比之下重熔半径大的自耗电电极时,钢液与熔渣间传氧的速率小。这是由于随着自耗电电极半径的增加,电极端部液膜的停留时间会增加,从而使氧的扩散通量减小。

#### 4 结论

基于溶质渗透理论建立了气体保护电渣重熔过程熔渣与钢液间传氧的动力学模型。该模型可以计算出渣-钢间氧传递的扩散通量,亦可以预报熔渣与钢液间传氧方向改变的渣中FeO含量的临界值。研究表明,随着渣中FeO含量的增加,钢液向熔渣内传氧会转变为熔渣向钢液内传氧。随着渣中FeO含量的增加,熔渣向钢液内传氧的速率将不断增加;随着重熔速率的增加,电极端部钢液向炉渣传氧的速率在不断增加;氧的传质通量随着自耗电电极半径的增加而不断减小。

国际科技合作与交流专项项目,项目名称:“高洁净低偏析超大锭型电渣重熔精炼技术设备及工艺引进”(项目编号:2010DFR50590)

史成斌(1982-),男,博士研究生,2009年北京科技大学硕士研究生毕业,电渣重熔过程钢和镍基高温合金的洁净化与凝固组织控制研究。

收稿日期:2012-11-02