

## 电极填充比对电渣重熔过程影响的数值模拟

贺 铸<sup>1,2</sup> 刘艳贺<sup>2</sup> 刘 双<sup>2</sup> 刘 政<sup>2</sup> 李宝宽<sup>1</sup>

(1 东北大学材料与冶金学院, 沈阳 110004; 2 武汉科技大学钢铁冶金及资源利用省部共建教育部重点实验室, 武汉 430081)

**摘 要** 利用有限元分析软件 ANSYS 求得稳定电渣重熔过程电极、渣池和钢锭系统电磁场和焦耳热场分布, 并通过计算流体力学软件 FLUENT 模拟分析了耦合电磁场和焦耳热场的三维电渣重熔过程电极填充比 0.3~0.7 对电渣重熔系统温度场、速度场和电磁场的影响。结果表明, 随着电极填充比的增加, 速度最大值和湍动能最大值逐渐增加, 但变化速率随填充比增加而下降; 填充比 0.3 和 0.5 之间的最大湍动能差值约为填充比 0.5 和 0.7 之间湍动能的 2 倍; 温度最大值随填充比不是单调变化的。

**关键词** 电渣重熔 三维数值模拟 电极填充比 金属熔池形状 电磁流体

### Numerical Simulation of Effect of Electrode Filling Ratio on Electroslag Remelting Process

He Zhu<sup>1,2</sup>, Liu Yanhe<sup>2</sup>, Liu Shuang<sup>2</sup>, Liu Zheng<sup>2</sup> and Li Baokuan<sup>1</sup>

(1 School of Materials and Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110004; 2 Key Laboratory for Ferrous Metallurgy and Resources Utilization of Ministry of Education, Wuhan University of Science and Technology, Wuhan 430081)

**Abstract** The distribution of magnetic field and Joule heat field of electrode, slag and remelting ingot system during electroslag remelting (ESR) process is obtained by using finite element software ANSYS, and the effect of electrode filling ratio 0.3~0.7 in three dimension ESR process coupling magnetic field and Joule heat field on temperature field, velocity field and magnetic field of ESR system is simulated and analyzed by using calculated fluid dynamics software FLUENT. Results show that with increasing electrode filling ratio, the max values of velocity and turbulent kinetic energy increase, but the variation ratio of velocity decreases; the difference of max turbulent kinetic energy between electrode filling radius ratio 0.3 and 0.5 is as twice as that between electrode filling ratio 0.5 and 0.7; with increasing electrode filling ratio the max temperature value is not monotonous variation.

**Material Index** Electroslag Remelting, Three Dimensional Numerical Simulation, Electrode Filling Ratio, Shape of Metal Pool, Electro-Magnetic Fluid

早期对于电渣重熔 (Electroslag Remelting, ESR)<sup>[1-2]</sup> 过程的研究主要是通过实验测量<sup>[3]</sup>, 近年来很多学者通过数值模拟的方法来分析 ESR 过程<sup>[4-15]</sup>。本文利用有限元软件 ANSYS 建立了电渣重熔系统电磁场和焦耳热场的数学模型, 将得到的电磁力和焦耳热结果以源项的形式加载到 ESR 动量和能量守恒方程中, 在计算流体力学软件 FLUENT 中进行电磁场和焦耳热场耦合模拟。整个模拟过程中均采用三维建模, 利用 ANSYS 软件求解电磁场时以三维谐波电磁场理论为基础<sup>[16]</sup>, 考虑了集肤效应对电渣重熔体系的影响。

#### 1 ESR 几何模型、物性参数和控制方程

以电渣重熔体系电极、渣池、钢锭和结晶器为研究对象, 图 1 为电渣重熔体系有限元网格划分, 表 1 为涉及到的操作参数和物理性质。

$$\text{质量守恒方程: } \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = 0 \quad (1)$$

动量守恒方程:

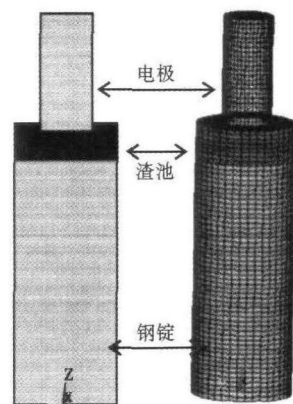


图 1 电渣重熔体系有限元网格划分  
Fig. 1 Meshing for ESR system

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{v}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (2)$$

其中应力张量  $\bar{\bar{\tau}}$ :

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu \left[ (\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \right]$$

表1 ESR的物性及参数

Table 1 Physical property, geometrical and operating condition of electrode, slag and ingot

项目	参数
渣的熔化潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	590
渣-空气界面外部发射率	0.6
液态渣和液态金属间的表面张力/(N·m <sup>-1</sup> )	0.9
渣的密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	2 800
液态金属、熔融区和钢锭密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 500
渣的比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	1 255
液态金属、熔融区和钢锭比热容/[J·(kg·K) <sup>-1</sup> ]	720
金属固相线温度/K	1 473
金属液相线温度/K	1 623
渣液相线温度/K	1 693
金属的熔化潜热/(kJ·kg <sup>-1</sup> )	210
电极和金属的电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	7.14 × 10 <sup>5</sup>
渣的电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	250
渣的粘度/[kg·(m·s) <sup>-1</sup> ]	0.01
液态金属的粘度/[kg·(m·s) <sup>-1</sup> ]	0.006
电极半径/m	0.067 5, 0.112 5, 0.157 5
结晶器内壁直径/m	0.225
渣池高度/m	0.15
钢锭区高度/m	1
电极浸入渣池深度/m	0.015
电极高度/m	0.45
渣的磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	1.26 × 10 <sup>-6</sup>
交流频率/(Hz·s <sup>-1</sup> )	35, 45, 50
交流电流/kA	10
电极熔化速率/(kg·s <sup>-1</sup> )	0.1

能量守恒方程:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho E) + \nabla \cdot [\nu(\rho E + p)] = \nabla \cdot [k_{\text{eff}} \nabla T - \sum_j h_j J_j + (\bar{\tau}_{\text{eff}} \cdot \nu)] + S_h \quad (3)$$

在 ANSYS 中电磁场求解依据 Maxwell 方程组:

$$\begin{aligned} \nabla \times E &= -\frac{\partial B}{\partial t}; \nabla \times H = J; \\ \nabla \times B &= 0; \nabla \times J = 0 \end{aligned} \quad (4)$$

式中:  $E$ - 电场强度;  $H$ - 磁场强度;  $B$ - 磁流密度;  $J$ - 电流密度。

$$\text{Lorentz 定律: } F = J \times B \quad (5)$$

自耗电极熔化的熔滴穿过金属熔池, 是典型的湍流现象。湍流模型选用标准  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型:

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial t}(\rho \kappa) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \kappa u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_i} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\kappa} \right) \frac{\partial \kappa}{\partial x_j} \right] + G_\kappa - \rho \varepsilon - Y_M + S_\kappa \\ \frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) &= \frac{\partial}{\partial x_j} \left[ \left( \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{\kappa} G_\kappa - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{\kappa} + S_\varepsilon \end{aligned} \quad (6)$$

式中:  $G_\kappa$ - 有平均速度梯度产生的湍流动能;  $Y_M$ - 不可压缩湍流中脉动扩张对整体耗散率;  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ - 常数;  $\sigma_\kappa$ 、 $\sigma_\varepsilon$ -  $\kappa$  和  $\varepsilon$  的湍流普朗特数;  $S_\kappa$ 、 $S_\varepsilon$ - 用户自定义源项。

$$\text{湍流粘度系数: } \mu_t = \rho C_\mu \frac{\kappa^2}{\varepsilon}$$

在标准的  $\kappa$ - $\varepsilon$  模型中, 模型常数  $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_\mu$ 、 $\sigma_\kappa$ 、 $\sigma_\varepsilon$  的取值分别为:  $C_{1\varepsilon} = 1.44$ ,  $C_{2\varepsilon} = 1.92$ ,  $C_\mu = 0.09$ ,  $\sigma_\kappa = 1.00$ ,  $\sigma_\varepsilon = 1.30$ 。

$$\text{体积分率方程: } \frac{\partial \alpha_q}{\partial t} + u_i \frac{\partial \alpha_q}{\partial x_i} = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{q=1}^n \alpha_q = 1 \quad (8)$$

式中:  $\alpha_q$ - 第  $q$  相的体积分率,  $q = 1, 2$  分别代表钢液和电渣。

## 2 结果与分析

图2为计算得到的距轴心  $r = 2.5$  cm 处轴向温度分布与文献[17]中实验值的对比, 模拟值与实验值最大误差不超过 10%。在渣-金界面以上, 实验值稍高于模拟值, 这主要是由于实验值测量得到的是瞬时值, 受熔滴滴落的影响较大, 而本文得到的温度为时间平均值; 此外, 壁面冷却系数对轴向温度梯度的影响很大, 但模型所需要的冷却系数值很难精确确定。表2为实验对比用电渣重熔基本参数。

由图3可知, 填充比不同下的电流密度分布趋势与电极插入深度不同下的趋势基本一致, 在渣池  $Z$  方向 1.1 m 截面处轴心附近均因集肤效应而出现

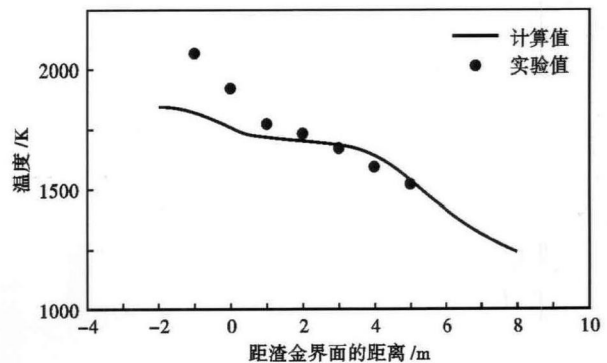


图2 距轴心  $r = 2.5$  cm 处轴向温度分布

Fig. 2 Distribution of axial temperature for ingot at distance from axis center  $r = 2.5$  cm

表2 实验对比用 ESR 基本参数

Table 2 Basic parameters of the ESR for comparison		渣成分/%		
锭重/kg	渣重/kg	CaF <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO
20.3	1.6	50	17	33

电流密度的回落;距轴心距离在各自电极半径范围内时,电流密度变化梯度最大,电流密度值最高;随着填充比增加,电流密度值在逐渐减小,在距轴心 0.1 m 范围内时,填充比 0.5 和 0.3 之间的电流密度差约是填充比 0.5 和 0.7 之间电流密度差的 2 倍。

由图 4 可知,随着填充比的增加,电渣重熔体系内速度场平均值在下降。渣池内的速度场主要由位于轴心附近,靠近电极端部的顺时针方向旋转涡流和位于结晶器一侧的逆时针方向旋转涡流共同组成。电磁力最大值位于电极端部外围附近,随着填充比的增加,电磁力的最大值会逐渐向结晶器边界移动,并使电磁力引起的逆时针方向旋转涡流的影响区逐渐缩小。

由图 5(a,b,c)可见,当填充比为 0.3 时,渣池内电流密度分布要远高于填充比 0.5 和 0.7 的电流密度,此时渣池内高温区分布在电极与渣池接触部分周围,渣池内的大部分区域都能保持在液相线温度以上;当填充比为 0.5 时,渣池内的电流密度分布处于填充比为 0.3 和 0.7 之间,此时渣池内高温区同样位于电极与渣池接触部分周围,但整体的温度值要低于填充比为 0.3 时的温度;当填充比为 0.7 时,渣池内的电流密度分布值是最低的,但电流密度和焦耳热功率在渣池内的分布较为均匀。

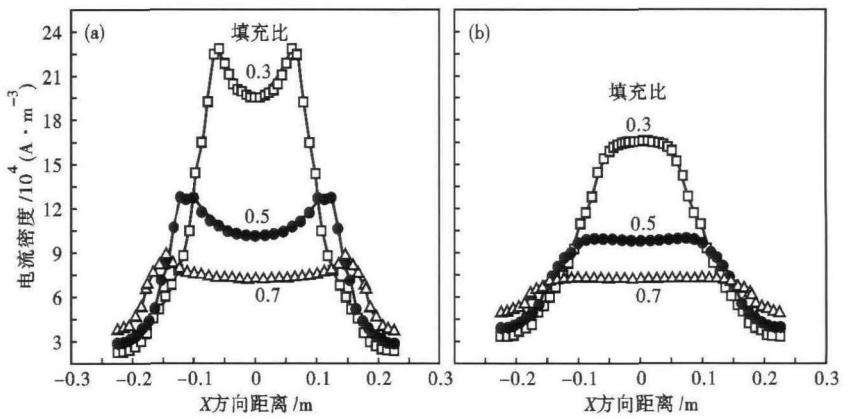


图 3 填充比对 Z 方向 1.10 m(a) 和 1.075 m(b) 处渣池部分纵截面电流密度的影响

Fig. 3 Effect of electrode filling ratio on current density of vertical section of slag pool at Z- direction 1.10 m (a) and 1.075 m (b)

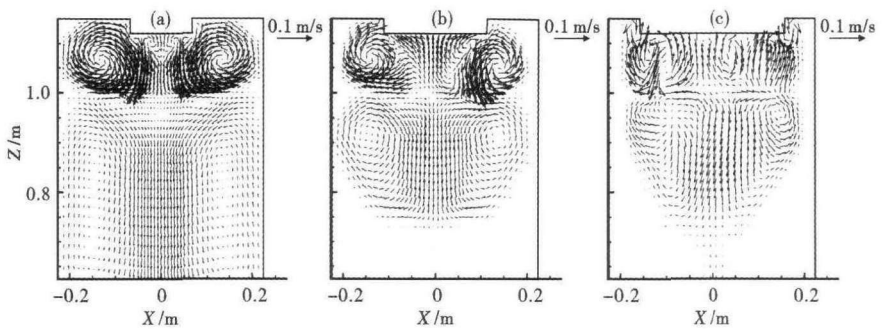


图 4 填充比对电渣重熔体系速度场分布的影响:填充比(a)0.3;(b)0.5;(c)0.7

Fig. 4 Effect of electrode filling radius ratio on distribution of velocity vectors of ESR system, filling radius ratio: (a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7

由图 5(d)可见,金属熔池深度由高到低依次为填充比 0.3、0.7 和 0.5;3 种情况下,金属熔池的外部轮廓基本一致,不会随着填充比而改变。

由图 6(a)可知,渣池截面平均湍流动能和速度场最大值变化趋势是对立的,渣池整体湍流动能在下降,渣池局部速度场却反而增加。3 种填充比下速度场最大值分别为 0.268、0.294、0.486 m/s,随着

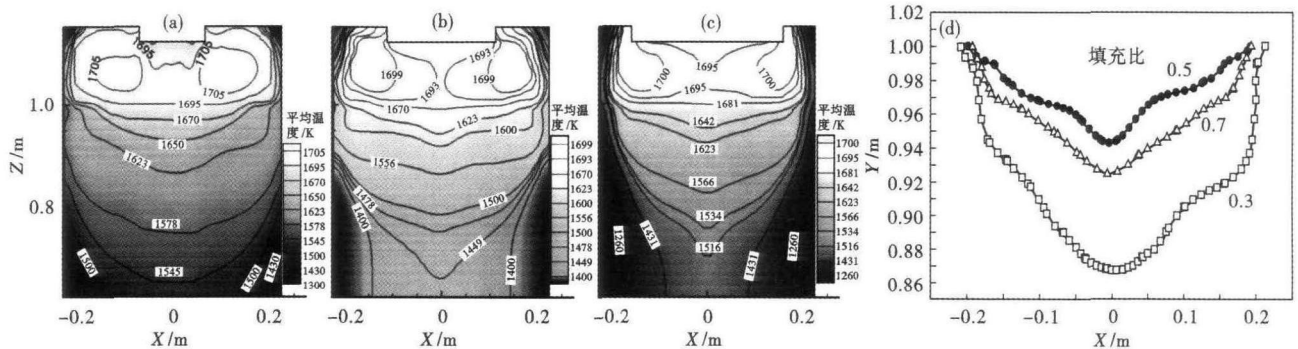


图 5 填充比(a)0.3;(b)0.5;(c)0.7 对渣池、金属熔池温度场分布的影响;(d)金属熔池轮廓图

Fig. 5 Effect of electrode filling radius ratio- (a) 0.3; (b) 0.5; (c) 0.7 on distribution of temperature field of slag pool and metal pool; (d) profile of metal pool

填充比的增加,速度场最大值在逐渐增加,填充比0.3和0.5之间的速度变化梯度要远远小于填充比0.5和0.7之间的梯度。渣池截面平均湍流动能分别为0.005 01、0.001 47、0.000 41  $\text{m}^2/\text{s}^2$ ,随着填充比的增加,其湍流能在逐渐下降,填充比0.3和0.5之间的湍动能差值约为填充比0.5和0.7之间湍动能的2倍;图6(b)可见,温度场最大值分别为1 714、1 699、1 709 K,可见随着填充比的增加,温度最大值不是单调变化的。

#### 4 结论

(1)随填充比增加,电流密度值逐渐减小,距轴心0.1 m范围内时,填充比0.5和0.3之间电流密度差约是填充比0.5和0.7之间电流密度差的2倍。

(2)随着填充比的增加,速度最大值在逐渐增加,填充比0.3和0.5之间的速度变化率要远远小于

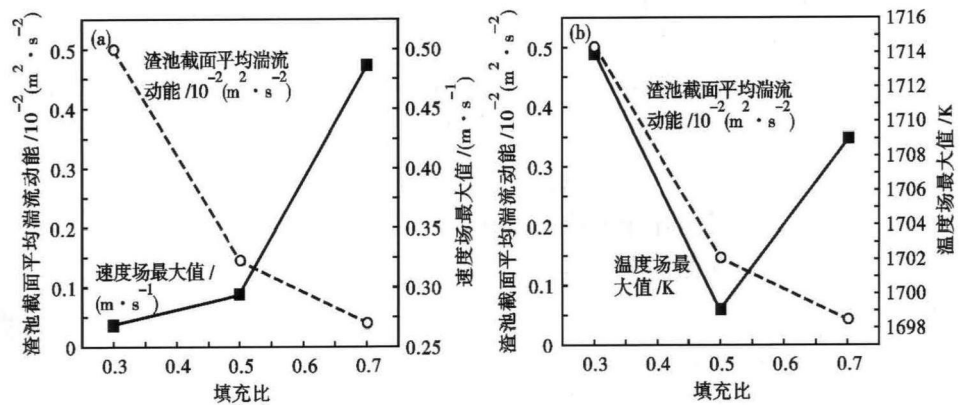


图6 填充比对渣池截面平均湍流动能、速度场最大值(a)和温度场最大值(b)的影响

Fig.6 Effect of electrode filling radius ratio on slag pool section average kinetic energy, max velocity (a) and max temperature (b)

填充比0.5和0.7之间的。

(3)随着填充比的增加,其湍流能在逐渐下降,填充比0.3和0.5之间的湍动能差值约为填充比0.5和0.7之间湍动能的2倍。

(4)随着填充比的增加,温度最大值不呈单调变化。

国家自然科学基金资助项目(51210007),国家科技支撑计划资助项目(2011BAK06B02)

#### 参考文献

- [1] 尧军平,耿茂鹏,马新生,等.熔池深度随电渣重熔过程变化规律的数模研究[J].铸造技术,2004,25(6):430-431.
- [2] 潘秀兰,王艳红,梁慧智.国内外电渣重熔技术的发展与展望[J].鞍钢技术,2005(2):5-11.
- [3] Gerhard B, Georg S, Klaus S. Slag Movement in ESR of Steel[J]. Metallurgical Transactions B, 1983, 14(4):761-764.
- [4] Dilawari A H, Szekely J. A Mathematical Model of Slag and Metal Flow in the ESR Process[J]. Metallurgical Transactions B, 1977, 8(1):228-236.
- [5] Dilawari A H, Szekely J, Eagar T W. Electromagnetically and Thermally Driven Flow Phenomena in Electroslag Welding[J]. Metallurgical Transactions B, 1978, 9(3):371-380.
- [6] Dilawari A H, Szekely J. Heat Transfer and Fluid Flow Phenomena in Electroslag Refining[J]. Metallurgical Transactions B, 1978, 9(1):77-86.
- [7] Choudhary M, Szekely J. The Effect of Temperature Dependent Electrical Conductivity on Flow and Temperature Fields in Slags in ESR Systems[J]. Metallurgical Transactions B, 1981, 12(2):418-420.
- [8] Jardy A, Ablitzer D, Wadier J F. Magnetohydrodynamic and Thermal Behavior of Electroslag Remelting Slags[J]. Metallurgical Transactions B, 1991, 22(1):111-119.
- [9] Choudhary M, Szekely J, Medovar B I, et al. The Velocity Field in the Molten Slag Region of ESR Systems: a Comparison of Measurements in a Model System With Theoretical Predictions. [J]. Metallurgical Transactions B, 1982, 13(1):35-43.
- [10] Patel A D, Kelkar K M. New Insights into the Electro-slag Remelting Process Using Mathematical Modeling[C]. San Francisco: The Minerals, Metals & Materials Society, 2009:69-76.
- [11] Brückmann G, Sick G, Schwerdtfeger K. Slag Movement in ESR of Steel[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1983, 14(4):761-764.
- [12] 李宝宽,王博.电渣重熔过程渣/金界面行为的模拟[J].材料与冶金学报,2012,11(4):268-273.
- [13] Weber V, Jardy A, Dussoubs B, et al. A Comprehensive Model of the Electroslag Remelting Process: Description and Validation[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 2009, 40(3):271-280.
- [14] Rückert A, Pfeifer H. Mathematical Modelling of the Flow Field, Temperature Distribution, Melting and Solidification in the Electroslag Remelting Process[J]. Magnetohydrodynamics, 2009, 45:527-533.
- [15] Rückert A, Pfeifer H. Numerical Modelling of the Electroslag Remelting Process[C]. Hradecnad Moravici: 16 the International Metallurgical and Materials Conference, 2007:1-9.
- [16] 王芳,李宝宽.电渣重熔过程中的电磁场和Joule热分析[J].金属学报,2010,46(7):794-799.
- [17] Mellberg P O. Temperature Distribution in Slag and Metal during Electroslag Remelting of Ball-bearing Steel[C]. Tokyo: Proceedings of the Fourth International Symposium on Electroslag Remelting Processes, 1973:13-25.

贺铸(1978-),男,博士(华中科技大学),副教授,2000年华中科技大学(本科)毕业,冶金过程多相流的数学物理模型研究。E-mail:hezhu@wust.edu.cn

收稿日期:2014-03-10