

## 2.3 t 电渣锭重熔过程电极插入深度的数学模型和应用

曲明磊<sup>1</sup> 成国光<sup>1</sup> 李世健<sup>1</sup> 陈 列<sup>2</sup> 严清忠<sup>2</sup> 梁 明<sup>2</sup>

(1 北京科技大学钢铁冶金新技术国家重点实验室,北京 100083;2 西宁特殊钢股份有限公司,西宁 810005)

**摘 要** 利用 Fluent 软件中的 MHD 模块模拟得到电渣重熔稳态冶炼条件下不同电极插入深度的渣池电阻值,通过将渣池电阻值与电力制度相联系,建立了电极插入深度的数学模型。在特钢厂 2.3 t 电渣锭重熔稳态冶炼条件下,电极插入深度模型计算值为 14.4 mm,现场测量值为 14 mm,相对误差很小,在轴承钢 G20CrNi2Mo 现有的电力制度(58 V,9 000 A)情况下,维持正常冶炼的最小渣量为 24.3 kg/t,2.3 t 电渣锭重熔的合理工艺为电压 58 V,电流 9 000 A,渣量 30 kg/t,电极插入深度 14.4 mm。

**关键词** 电渣重熔 数学模型 电极插入深度 电渣阻值 Fluent 软件 应用

## Mathematical Model of Electrode Immersing Depth in 2.3 t Electro-Slag Ingot Remelting Process and Application

Qu Minglei<sup>1</sup>, Cheng Guoguang<sup>1</sup>, Li Shijian<sup>1</sup>, Chen Lie<sup>2</sup>, Yan Qingzhong<sup>2</sup> and Liang Ming<sup>2</sup>

(1 State Key Laboratory of Advanced Metallurgy Technology, University of Science and Technology, Beijing 100083;  
2 Xi'ning Special Steel Group, Co Ltd, Xi'ning 810005)

**Abstract** The value of slag resistance in ESR stable melting condition with different electrode immersing depth is obtained by simulation using MHD (magneto-hydrodynamics) module of Software Fluent, and the mathematical model of electrode immersing depth is established by relating slag resistance with electric power scheme. In condition of ESR stable smelting of 2.3 t ingot at special steelwork, the model calculated value of electrode immersing depth is 14.4 mm, as compared with situ measured value 14 mm, the relative error is small. With the present electric power scheme- 58 V and 9 000 A for bearing steel G20CrNi2Mo, the minimum slag amount for maintaining normal remelting is 24.3 kg/t; the reasonable process for 2.3 t ESR ingot is voltage 58 V, current 9 000 A, slag amount 30 kg/t and electrode immersing depth 14.4 mm.

**Material Index** ESR, Math Model, Electrode Immersing Depth, Slag Resistance Value, Software Fluent, Application

在电渣重熔冶炼过程中,自耗电极插入渣池,使得电极,渣池,金属熔池,钢锭,底水箱,短网导线和变压器构成回路,在渣池部分电能转化为焦耳热作为熔炼的能量来源。电极插入深度作为电渣重熔过程中一个重要的工艺参数,它对元素的烧损,渣池的温度分布,钢锭的质量,电耗等都有十分重要的影响<sup>[1-3]</sup>。

目前大部分电渣重熔的模型多侧重于对金属熔池、温度场的研究<sup>[4-7]</sup>,对电极插入深度的相关研究相对较少<sup>[1,8-9]</sup>。

本文提出的电极插入深度的数学模型,对具体的工艺参数进行了详细量化,并且充分考虑了冶炼过程中电力制度变化对电极插入深度的影响。模型的建立以特钢厂的实际工艺参数为依据,通过将模型结果与现场的测量结果进行对比,验证了模型的可靠性。

### 1 数学模型

本模型建立流程如图 1 所示。首先用 Solidworks 软件进行几何建模,接着将几何模型导入 Workbench 中进行网格划分,然后通过 MHD (Magneto-hydrodynamics) 模块求解不同模型的渣池电阻值,得到渣池电阻值与渣量、电极插入深度的关系。同时将渣池电阻值与电力制度相联系,推导出电极插入深度的计算模型。最后对模型进行验证。

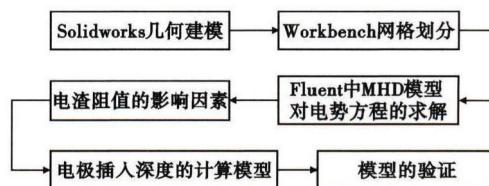


图 1 数学模型的建立流程

Fig. 1 Establishing process of math model

通讯作者:成国光,教授,北京科技大学冶金新技术国家重点实验室,北京 100083

E-mail:chengguoguang@matall.ustb.edu.cn

1.1 模型基本假设和建立

为简化计算过程,做如下假设:

- (1) 电渣的电导率温度采用 1700 °C 下的电导率进行等效替代;
- (2) 钢锭和液渣的性质是均匀的;
- (3) 不考虑渣流动对渣池电阻的影响。

几何模型的建立以特钢厂中实际电渣炉为参考,图 2 是实际工艺中的电渣炉图,图 3 是通过 SolidWorks 所建的几何模型以及通过 Workbench 所画的网格图。电渣炉的自耗电电极取自方形连铸坯,电极横截面为方形,因此无法使用二维轴对称模型,此处选用三维几何模型。所建立的几何模型从上到下依次包括电极,渣池,钢锭 3 个区域。模型的具体几何尺寸见表 1。实际工艺为双电极交替熔炼,以现场换电极时第 1 支电极端头的形状为依据,此模型电极下端形状取为平面,整个模型中一共包括 191 123 个网格。

1.2 MHD 模型求解电渣重熔电磁场

将划分好的网格导入 Fluent 软件中的 MHD 模

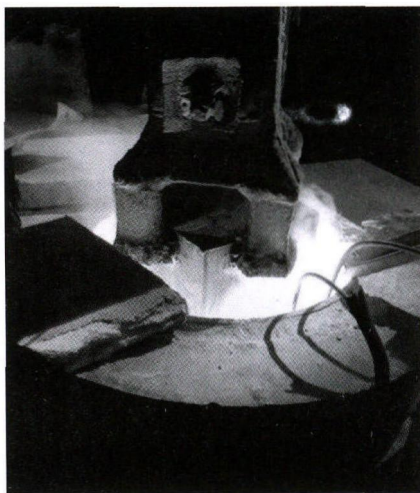


图 2 实际工艺的 2.3 t 电渣炉  
Fig.2 2.3 t ESR unit in actual process

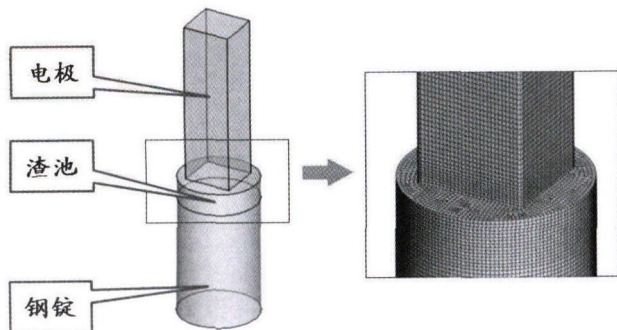


图 3 SolidWorks 模型图和 Workbench 网格图  
Fig.3 Sketches Solidworks model and graph of Workbench grid

表 1 电渣重熔 MHD 模型的相关参数  
Table 1 Relative parameters of ESR MHD model

| 项目                              | 参数        |
|---------------------------------|-----------|
| 电极截面尺寸/mm                       | 250 × 280 |
| 结晶器直径/mm                        | 470       |
| 电极、钢锭密度/(kg · m <sup>-3</sup> ) | 7 200     |
| 电渣密度/(kg · m <sup>-3</sup> )    | 2 850     |
| 电极高度/mm                         | 1 100     |
| 钢锭高度/mm                         | 800       |
| 电极、钢锭电导率/(Ω · m <sup>-1</sup> ) | 715 000   |
| 电渣电导率/(Ω · m <sup>-1</sup> )    | 175       |
| 钢锭质量/t                          | 2.3       |

块,对其电磁场进行求解。物性参数的选取以实际的钢种和渣系为依据。实际工艺中所冶炼的钢种为 G20CrNi2Mo 铁路轴承钢,所使用的渣系为四元渣系 (45% CaF<sub>2</sub>, 10% CaO, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% MgO)。作为模型的一个重要输入参数,电渣的电导率依据文献 [14] 中提出的模型进行计算选取。电极、钢锭和电渣的其他物性参数见表 1。

MHD 的基本求解方程为麦克斯韦方程:

$$\vec{E} = -\nabla\varphi - \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \tag{1}$$

矢量电动势可以表示为:

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \vec{U} \times \vec{B} \tag{2}$$

式中:  $\vec{B} = \vec{B}_0 + \vec{b}$ 。

对于静电场问题,  $\vec{b}$  很小,可以忽略。

根据欧姆定律:

$$\vec{j} = \sigma [ -\nabla\varphi + (\vec{U} \times \vec{B}_0) ] \tag{3}$$

对于导体而言,根据电荷守恒定律:

$$\nabla \cdot \vec{j} = 0 \tag{4}$$

$$\nabla^2 \varphi = \nabla \cdot (\vec{U} \times \vec{B}_0) \tag{5}$$

取任一方向单位向量,便可得到:

$$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = (\vec{U} \times \vec{B}_0)_{\text{边}} \cdot \vec{n} \tag{6}$$

对于绝缘的边界,矢量  $\vec{n}$  垂直于边界,便可解出在边界处的电动势:  $\varphi = \varphi_0$  (7)

而在非绝缘处的  $\varphi_0$  则直接通过输入参数决定。在计算得到了电势之后,便可以根据公式(3)解出电流密度。

式中:  $\vec{E}$ - 电场强度;  $\varphi$ - 电动势;  $\vec{A}$ - 矢量电势;  $t$ - 时间;  $\vec{U}$ - 速度场;  $\vec{B}$ - 磁感应强度;  $(\vec{U} \times \vec{B}_0)_{\text{边}}$ - 边界处

速度向量与磁场向量的外积; $\sigma$ -电导率; $\vec{j}$ - 电流密度; $\vec{n}$ - 方向向量。

MHD 模块的具体求解方法采用 Electric Potential Method 方法,对模型中的  $U_{ds}=0$  (电势) 进行求解。在求解过程中,电极上端电压为炉口电压,钢锭下端电压固定为 0 V,其他表面区域设置为绝缘边界条件。读取经过渣池-熔池界面的电流密度的平均值,作为输出结果。

1.3 渣池电阻值与电极插入深度、渣量的关系

建立电极插入深度为 10 mm,吨钢渣量为 20, 25,30,35,40,45,50 kg 的几何模型,导入 Fluent 软件中的 MHD 模块分别进行求解,得到电渣的电阻值与渣量的关系(图 4a)。从图 4(a)中可以看出,在电极插入深度相同(10 mm)的情况下,电渣的阻值随着吨钢渣量的增加呈现一次线性增加关系。

建立吨钢渣量为 20 kg,电极插入深度分别为 10,15,20,25,30,35,40 mm 的模型分别进行求解,得到渣池电阻值与电极插入深度的关系,如图 4(b)。从图 4(b)中可以看出,在吨钢渣量相同(20 kg)的情况下,随着电极插入深度的增加,电渣的阻值呈抛物线减小,减小的趋势逐渐变缓。

1.4 推导电极插入深度的模型

在电极插入深度不变的情况下,渣池电阻值与吨钢渣量呈一次线性增加的关系,据此可以得到:

$$R = f(m_s) = am_s + b \quad (8)$$

在吨钢渣量相同的情况下,渣池电阻值随着电极插入深度的增加呈抛物线减小的关系,对曲线进行拟合,可以得到:

$$R = g(h_i) = ch_i^2 + dh_i + e \quad (9)$$

总结上述两层关系,可以得到电阻与电极插入深度,渣量的关系式:

$$R = j(m_s, h_i) = ch_i^2 + dh_i + am_s + i \quad (10)$$

根据欧姆定律: $R = U/I$  (11)

将(11)式代入(10)式便可以解出  $h_i$  与  $U, I, m_s$  的关系: $h_i = k(U, I, m_s)$  (12)

即电极插入深度的计算模型。

式中: $h_i$ - 插入深度/m; $U$ - 电压/V; $I$ - 电流/A; $m_s$ - 吨

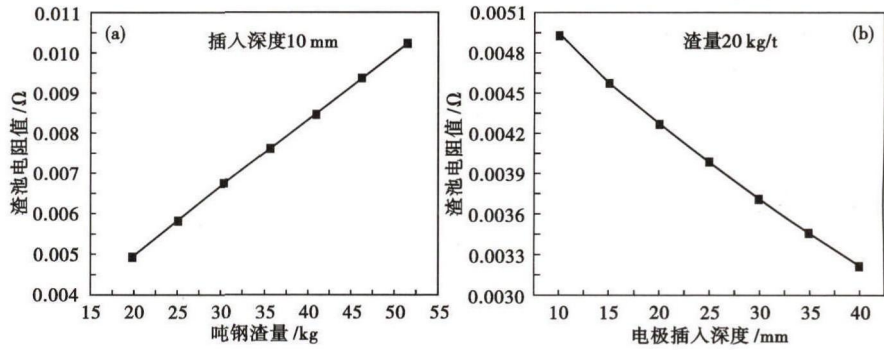


图 4 吨钢渣量(a)和电极插入深度(b)对渣池电阻值的影响  
Fig. 4 Effect of slag amount of per ton steel (a) and electrode immersing depth (b) on resistance value of ESR slag

钢渣量/kg; $f, g, j, k$ - 函数关系; $a, b, c, d, e, i$ - 常数。

2 模型结果

在特钢厂特定的炉台、锭型、电渣重熔工艺下,对其电渣炉进行建模、电磁场求解和公式推导以后,得到的电极插入深度与电压,电流,渣量的关系为:

$$h_i = \frac{0.0767 - \sqrt{0.00588 + 1.63 \times \left( \frac{U}{I} - 0.000177 \times m_s - 0.00215 \right)}}{0.814} \quad (13)$$

3 模型验证与应用

3.1 模型验证

结合特钢厂电渣炉正常冶炼阶段,炉口电压 58 V,电流 9 000 A,吨钢渣量 30 kg 时,此模型计算得到的插入深度为 14.4 mm。实际工艺为双电极交替熔炼,取该炉次下第一支电极冶炼结束时电极余尾头,在余尾头上测量实际的电极插入深度,如图 5。由于换电极时,冶炼工艺参数维持不变,因此此时的电极插入深度可反映正常冶炼条件下的电极插入深度数值。从图 5 中可以读出,实际工艺的电极插入深度为 14 mm,与模型计算的结果相比,误差距离较

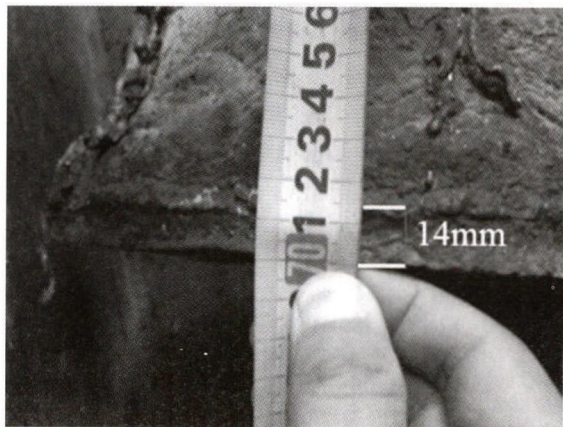


图 5 现场测得的电极插入深度数值  
Fig. 5 Measured electrode immersing depth value in situ

表 2 特钢厂实际工艺参数

Table 2 Actual process parameters at a special steelworks

| 项目         | 工艺参数      |
|------------|-----------|
| 电极截面尺寸/mm  | 250 × 280 |
| 结晶器直径/mm   | 470       |
| 正常冶炼炉口电压/V | 58        |
| 正常冶炼电流/A   | 9 000     |
| 吨钢渣量/kg    | 30        |
| 钢锭质量/t     | 2.3       |
| 电极插入深度/mm  | 14.4      |

小,模型较为可靠。

### 3.2 模型应用

特钢厂在实际工艺中采用双电极交替熔炼,钢种为 G20CrNi2Mo 铁路轴承钢,所使用的渣系为四元渣系(45% CaF<sub>2</sub>, 10% CaO, 40% Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, 5% MgO),其他工艺参数如表 2 所示。通过模型计算得到正常冶炼条件下的电极插入深度的数值为 14.4 mm。

借助上述模型,分析在 58 V、9 000 A 不变的条件下,改变渣量对电极插入深度的影响(图 6)。从图 6 中可以看出,当吨钢渣量少于 24.3 kg 的情况下,电极插入深度为 0 mm,表明该渣量已经不足以完成此电力参数下的正常冶炼。随着渣量的增加,电极插入深度增加。由于增加电极插入深度可以减少烧损<sup>[5]</sup>,因此针对特钢厂实际工艺中存在的元素烧损问题,尝试通过增加渣量来增加电极插入深度以解决该问题。在现有的工艺制度条件下进行增加渣量的工艺操作,通过实验发现,增加渣量会导致在换电极过程中,渣池温降过大,渣壳变厚,钢锭表面出现渣沟。

通过实验得知,对于 G20CrNi2Mo 轴承钢而言,在现有的工艺条件下(炉口电压 58 V,电流 9 000 A,吨钢渣量 30 kg,钢锭质量 2.3 t,电极插入深度 14.4

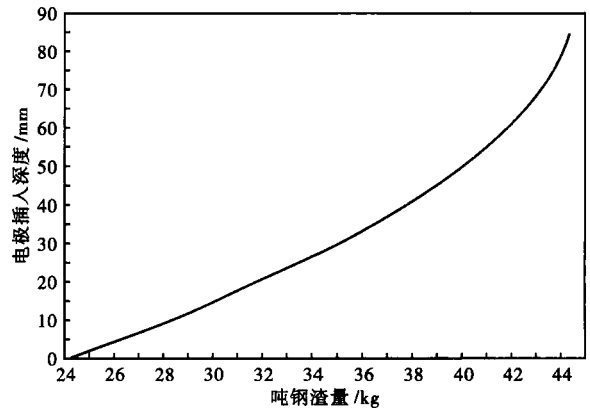


图 6 电极插入深度与吨钢渣量的关系

Fig. 6 Relation between electrode immersing depth and slag amount of per ton steel

mm),尽管存在元素烧损的问题,但钢锭成分合格,钢锭表面并无明显缺陷,因此现有的电极插入深度数值较为合理。减少渣量,电极插入深度减小,将会导致元素烧损增加;增加渣量,电极插入深度增加,将会导致换电极时钢锭表面出现渣沟。

### 4 结论

(1)通过模型计算得出,在特钢厂特定的炉台、锭型、电渣重熔工艺下,电极插入深度为 14.4 mm,与实际现场结果 14 mm 相对比,吻合较好。

(2)电渣的阻值随着吨钢渣量的增加呈线性增加的趋势,随着电极插入深度的增加呈抛物线减小的趋势,减小的速度越来越小。

(3)58 V, 9 000 A 时,维持正常冶炼的最小渣量为吨钢 24.3 kg。现有的工艺制度(炉口电压 58 V,电流 9 000 A,吨钢渣量为 30 kg,钢锭质量 2.3 t,电极插入深度为 14.4 mm)较为合理。

### 参考文献

- [1] 刘树杰,董君伟,王波. 电极插入深度的控制及其对冶炼的影响[J]. Metallurgical Engineering, 2014, 1: 90-95.
- [2] 刘树杰. 电极插入深度对电渣重熔过程的重要性[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(21): 73-76.
- [3] 贺铸,刘艳贺,李宝宽,等. 电极插入深度对电渣重熔过程影响的数模研究[J]. 东北大学学报:自然科学版, 2015, 36(2): 218-222.
- [4] Kharicha A, Ludwig A, Wu M. On Melting of Electrodes during Electro-Slag Remelting[J]. ISIJ International, 2014, 54(7): 1621-1628.
- [5] Li B, Wang B, Tsukihashi F. Modeling of Electromagnetic Field and Liquid Metal Pool Shape in an Electroslag Remelting Process with Two Series-Connected Electrodes[J]. Metallurgical Materials Transactions B, 2014, 45(3): 1122-1132.
- [6] 单美龙,王芳,李宝宽,等. 电渣重熔过程中焦耳热与温度场的有限元分析[J]. 材料与冶金学报, 2011, 10(21): 123-128.
- [7] Wang Q, Li B. Numerical Investigation on the Effect of Slag Thickness on Metal Pool Profile in Electroslag Remelting Process[J]. ISIJ International, 2016, 56(2): 282-287.
- [8] 袁群,耿茂鹏. 电渣熔铸过程中影响自耗电极插入深度和状态因素的试验研究[J]. 铸造工程, 2003, 27(3): 14-15.
- [9] Karimisibaki E, Kharicha A, Bohacek J, et al. A Dynamic Mesh-Based Approach to Model Melting and Shape of an ESR Electrode[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 2015, 46(5): 2049-2061.
- [10] 董艳伍,姜周华,李花兵,等. 电渣冶金用含氟渣系电导率计算方法[J]. 材料与冶金学报, 2012(4): 274-277.

曲明磊(1991-),男,硕士生,2014年北京科技大学(本科)毕业,电渣重熔过程数值模拟研究。

E-mail: mingleiustb@126.com

收稿日期:2016-12-05