

· 试验研究 ·

## 辊芯表层电渣加热渣池热电场及影响因素的数学模拟

罗丽萍<sup>1</sup> 刘欣<sup>2</sup> 徐万里<sup>1</sup> 唐建军<sup>1</sup> 耿茂鹏<sup>1</sup>

(1 南昌大学机电工程学院,南昌 330031; 2 江西制造职业技术学院,南昌 330012)

**摘要** 在建立辊芯表层电渣加热物理模型和数学模型的基础上,利用大型有限元软件 ANSYS 对辊芯表层加热系统中渣池热电场及影响因素进行了模拟研究。研究表明,在辊芯表层和电极之间存在一个强电流区,使辊芯表层被快速加热;随着电压的升高、渣池深度的增加和电极与辊芯间距的减小,渣池中的电场强度和整体温度升高,高温区集中在辊芯与电极之间;电极数量越多,系统的电场分布越均匀。

**关键词** 电渣加热 复合轧辊 热电场 渣池 数值模拟

## Mathematical Simulation on Thermoelectricity Field of Slag Pool Heated by Electroslag on Surface of Roll Core and Influencing Factors

Luo Liping<sup>1</sup>, Liu Xin<sup>2</sup>, Xu Wanli<sup>1</sup>, Tang Jianjun<sup>1</sup> and Geng Maopeng<sup>1</sup>

(1 Mechanical and Electronic Engineering School, Nanchang University, Nanchang 330031;

2 Jiangxi Manufacturing Vocational and Technical College, Nanchang 330012)

**Abstract** Based on the physical and mathematical models for electroslag heating on surface of roll core, the thermoelectricity field of slag pool in roll core surface heating system and its influencing factors have been simulated by using large-scale finite element software ANSYS. Study results show that there is a strong current area between the roll core surface and the electrode to rapidly heat the surface of roll core; with increasing the voltage and the slag pool's depth, and decreasing the distance between electrode and roller, the electric field intensity of slag pool and the temperature of whole slag pool increase and the high temperature zone is centralized between roll and electrode; with increasing the number of electrode, the distribution of electric field in system is more balancing.

**Material Index** Electroslag Heat, Compound Roll, Thermoelectricity Field, Slag Pool, Numerical Simulation

本文采用大型有限元软件 ANSYS,模拟电渣熔铸复合辊<sup>[1]</sup>重熔过程的辊芯表层加热系统中渣池热电场及影响因素。

### 1 渣池热电场的数值模拟

#### 1.1 辊芯表层电渣加热装置物理模型

双电渣复合轧辊试验装置(图 1a)的均衡加热装置是由石墨电极-渣池-轧辊辊芯组成,熔化装置是一套单独的电渣重熔系统,其作用为重熔、提纯复合层金属,将复合层金属加工成自耗电极,并在电渣的高温作用下得以熔化,随时可通过联通器对被电渣加热的辊芯进行复合的浇注,经结晶器冷却,由抽出装置将复合轧辊抽出。辊芯表层电渣加热装置物理模型如图 1(b)所示。在辊芯表层电渣加热体系中,发生热传导的主要有辊芯、石墨电极、水冷结晶器、空气与渣液界面、渣金界面、渣壳、渣池、冷却水。图中箭头为 Q<sub>1</sub>~Q<sub>5</sub> 热量传导方向:Q<sub>1</sub>-空气对电极带走的热量;Q<sub>2</sub>-冷却水带走的热量;Q<sub>3</sub>-空气对渣面带走的热量;Q<sub>4</sub>-轧辊熔化时需要的热量;Q<sub>5</sub>-空气对轧辊带走的热量。网格划分<sup>[2]</sup>见图 1(c)。

#### 1.2 计算区域的数学模型

为了简化计算,假设电极和电渣液的物性各向同性;石墨电极不熔化,系统内各接触表面完全接触;石墨电极、轧辊和结晶器均为等势体,各处导电率相同,电流在其内不产生热。在计算时把温度场和电场看作两个独立的子系统分别求解。

##### 1.2.1 电极区域和渣池的导热

模型采用的是 3-D 结构。电极区域的导热微分方程的表达式<sup>[3]</sup>如下:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( r \lambda \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial \theta} \left( \lambda \frac{\partial T}{\partial \theta} \right) + S = \rho (C_{ps} - C_{pl}) \frac{\partial (f_s \cdot T)}{\partial t} + \rho C_{pl} \frac{\partial T}{\partial t} - \rho L \frac{\partial f_s}{\partial t}$$

式中: $\rho$ -密度/(kg·m<sup>-3</sup>); $t$ -时间/s; $\lambda$ -导热系数/[W·(m·°C)<sup>-1</sup>]; $L$ -结晶潜热; $T$ -温度/°C; $C_{ps}$ 、 $C_{pl}$ -分别为固相,液相比热容/[J·(kg·°C)<sup>-1</sup>]; $f_s$ -固相率; $\theta$ -金属材料周向角度/°; $Z$ -模型高度/m; $r$ -模型半径/m; $S$ -热源项/(W·m<sup>-3</sup>)。

渣池是发热元件,渣池中的渣液处于不断运动状态,传热方式除了热传导外还有对流传热。将渣

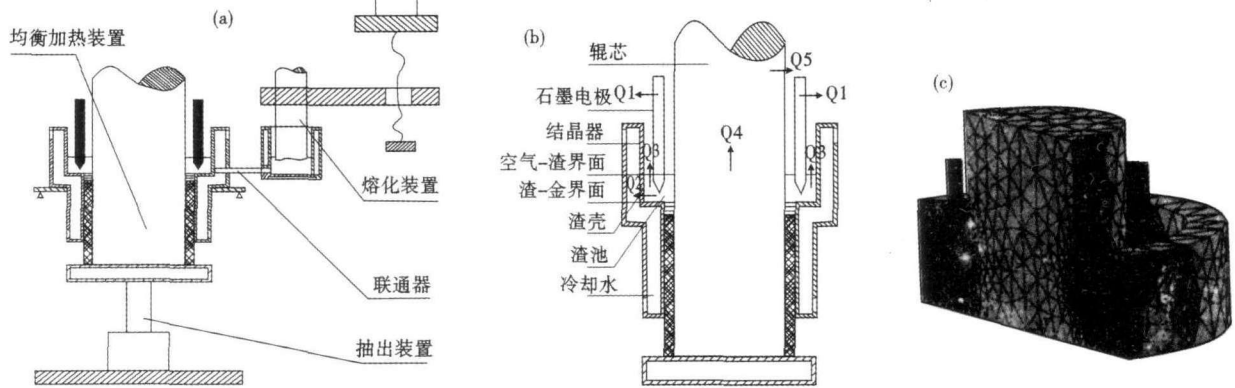


图 1 (a) 双电渣复合轧辊试验装置; (b) 辊芯电渣均衡加热装置; (c) 计算区域的网格划分

Fig. 1 (a) Test device for double electroslag compound roller; (b) Electroslag balanced-heating device for roll core; (c) Grid division of modeling region

池流动时的对流换热系数折算成紊流导热系数, 使得处理过程简化, 得到综合导热系数为<sup>[4]</sup>:

$$\lambda = \lambda_m + \lambda_1 = \lambda_m + \frac{\rho}{P_r} C_p C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$$

式中:  $\lambda_m$ - 渣池静态下的导热系数;  $\frac{\rho}{P_r} C_p C_\mu \frac{K^2}{\varepsilon}$ - 紊流时的导热系数;  $\rho$ - 渣液密度;  $C_p$ - 渣液比热容;  $P_r$ - 普朗特数;  $\varepsilon$ - 湍流, 脉动动能耗散率;  $K$ - 湍流脉动动能。

### 1.2.2 渣池的发热

根据假设条件, 在三维圆柱坐标系下渣池发热密度方程可表示为:

$$S = \sigma \left[ \left( \frac{\partial \varphi}{\partial y} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right)^2 + \left( \frac{\partial \varphi}{\partial x} \right)^2 \right]$$

式中:  $\varphi$ - 电位;  $\sigma$ - 渣池导电率。

表 1 实测初始条件

Table 1 The initial conditions of actual measurement

进水温 度/°C	出水温 度/°C	水流量/ (m <sup>3</sup> · s <sup>-1</sup> )	电极、结晶器、渣壳 (温度)/°C	渣池初 温/°C	环境温 度/°C
12.5	28	19 × 10 <sup>-3</sup>	12.5	1 450	12.5

注: 炉口电压 38V。

表 2 经处理的边界条件

Table 2 Treated boundary conditions

界面	电极表面- 大气	渣池- 大气	结晶器内 层-大气	轧辊顶 部-大气	结晶器- 轧辊表面 冷水	轧辊表面- 大气
热交换 系数	7.804	165.4	264.4	11.38	411.33	6.719

### 1.2.3 模拟的初始条件和边界条件

本文中采用的是瞬态热分析过程, 表 1 为实测初始条件, 表 2 为经处理的边界条件<sup>[5]</sup>。其中: 渣池

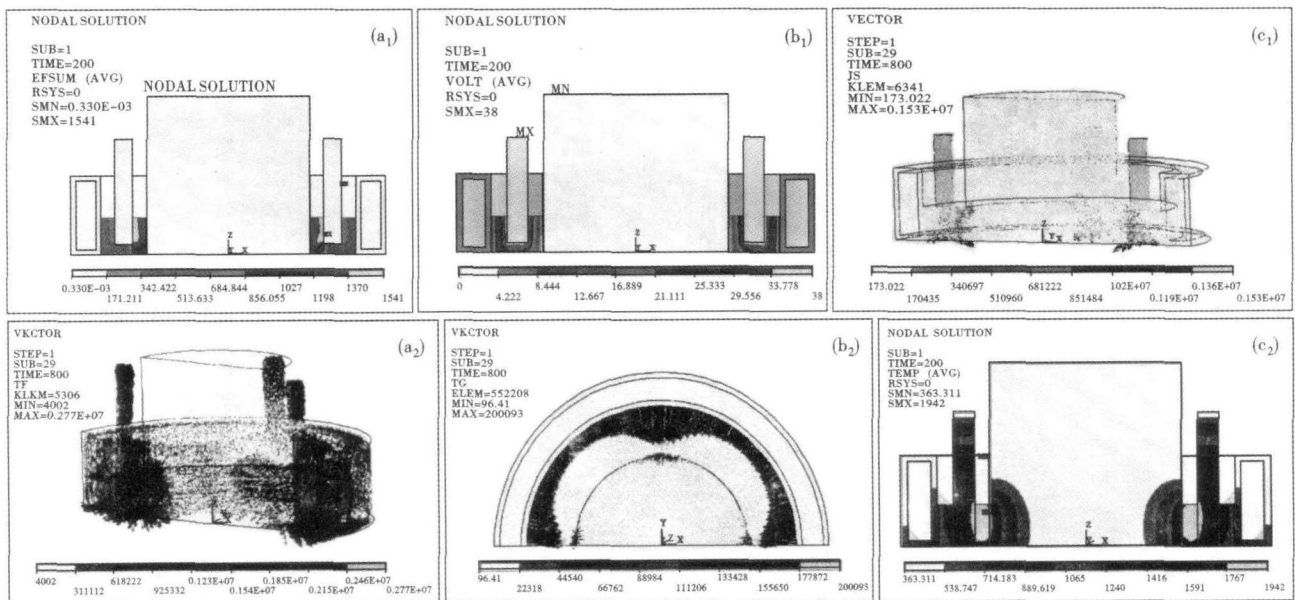


图 2 稳定时的渣池电场(a<sub>1</sub>), 电位(b<sub>1</sub>) 和电流密度(c<sub>1</sub>) 分布; 渣池热流密度(a<sub>2</sub>), 热流梯度(b<sub>2</sub>) 和系统温度场(c<sub>2</sub>) 的分布  
Fig. 2 Distribution of electric field (a<sub>1</sub>), voltage (b<sub>1</sub>) and current density (c<sub>1</sub>) in slag pool at stable condition; Distribution of thermal flux density (a<sub>2</sub>), thermal flux gradient (b<sub>2</sub>) and temperature field of system (c<sub>2</sub>) in slag pool

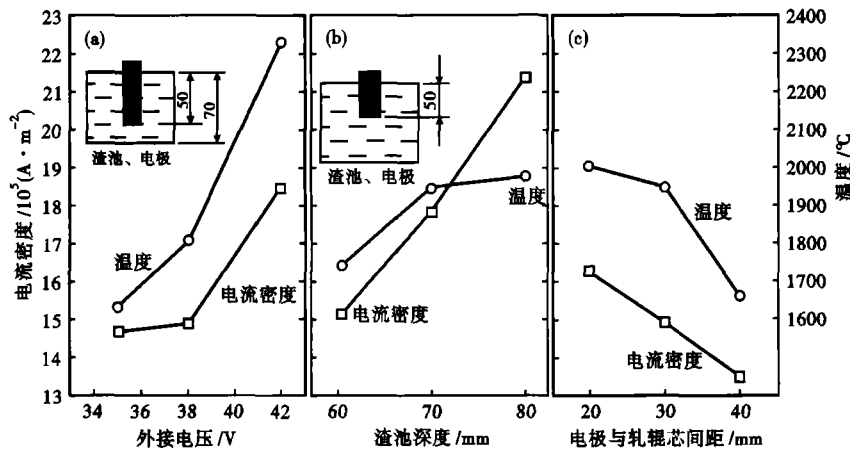


图3 电压(a)、渣池深度(b)和电极与轧辊芯间距(c)对电流密度及温度的影响  
Fig. 3 Effect of voltage (a), slag pool's depth (b) and distance between electrode and roller core on current density and temperature

表面-大气界面的换热包括对流与热辐射。

## 2 渣池热电场的分布

### 2.1 电场、电位、电流密度分布

稳定时的电场分布情况如图2(a<sub>1</sub>)所示,电场主要集中在辊芯与电极间的渣池区域内,渣池中的电场由电极方向向辊芯方向呈递减趋势,最高值出现在电极端部靠辊芯一侧,而靠近结晶器一侧也呈递减趋势,但变化幅度较小,而渣池以外的所有区域电场分布范围广而均匀。图2(b<sub>1</sub>)为电位分布图。

同样,在电极端部侧面靠近轧辊一侧附近电位梯度比较大。在电极端部尖点靠近辊芯一侧,集中着密度很大的电流,说明该区为强电流区域(图2c<sub>1</sub>)<sup>[6]</sup>。

### 2.2 渣池温度场、热流密度、热流梯度分布

根据电阻生热原理,电流密度最集中的地方也是热流密度最大的地方,由于结晶器与渣池间发生强热交换,所以在该区域温度梯度最大(图2a<sub>2</sub>)。在稳定时,在电极与轧辊间的渣池区域存在一个高温热源区,最高温度可达1942℃,而渣池中的其它区域,温度分布以这个高温区域为中心呈递减趋势,由于渣池侧部、底部都有结晶器通水换热,上部有强烈的热辐射和空气对流换热,因此高温区域变得更集中,无论辊芯是径向还是侧向温度梯度都比较大(图2b<sub>2</sub>)。图2(c<sub>2</sub>)为系统温度场的分布。

## 3 影响渣池热电场的主要因素

### 3.1 电压和渣池深度

当渣池深为70mm,电极插入渣池为50mm时,位于靠近轧辊的电极尖端区域的电流密度以及温度梯度,随着电压的增大而增大,而且电极端部下方渣池中存在的“高温区”的温度也越高,高温区也

越窄,这将有利于加快熔化速度(图3a)。

当外接电压恒定38V,电极插入渣池50mm时,随渣池深度增加,整体温场上移,电极熔化端部电流密度增大,渣池最高温度越高(图3b)。

### 3.2 电极与辊芯的间距、电极的数量

外接电压38V,随着电极与轧辊芯间距的增大,电流密度降低,系统整体温度场范围和最高温度都有所减小(图3c)。

在达到稳定熔铸后,电极数量越多(如由4→6→8)系统的电场、温度均分布比较均匀,而最高温度却有所增加。当电极数量由4→6→8时,最高温度分别为1942℃→2012℃→2093℃。

## 4 结论

(1) 辊芯表层电渣加热时,电极端部侧面靠近辊芯的区域为强电流区,是辊芯表层加热的高温热源区。

(2) 外接电压愈高,靠近轧辊的电极尖端区域的电流密度以及温度梯度愈大;渣池深度愈大,电极端部电流密度愈增大,渣池中的最高温度也愈高;电极与轧辊芯间距愈大,电流密度愈小,系统整体温度场范围和最高温度都有所减小;电极数量越多,电场、温度分布愈均匀。

国家863计划资助项目(715-009-0110)

### 参考文献

- 李正邦,傅杰. 电渣重熔技术在中国的应用和发展. 特殊钢, 1999, 20(2): 7
- 马新生,耿茂鹏. 电渣熔铸渣池热电场有限元模拟的前置处理. 铸造, 2004(11): 917
- 符寒光,邢建东. 一种离心铸造高速钢轧辊的制造方法. 中国: CN1439472A, 2003-03-28
- 杨国明. 一种复合轧辊的制造方法和装置. 中国: CN1078112C, 2002-01-23
- 耿茂鹏,孙达晰. 电渣熔铸过程控制与模拟仿真. 北京: 冶金工业出版社, 2008
- 耿茂鹏,赵准. ANSYS的金属表面电渣加热的试验与模拟. 南昌大学学报(工科版), 2008(1): 36

罗丽萍(1956-),女,副教授,硕士生导师,1982年南昌大学毕业,材料加工工程研究。

收稿日期:2008-09-16