

引用格式:程宗强,杨祎晗,伦晓军,等.双电极直流镍铁矿热炉熔炼特性及多物理场耦合的数值模拟[J].有色设备,2025,39(2):62-69,82.

CHENG Zongqiang, YANG Yihan, LUN Xiaojun, et al. Numerical simulation of melting characteristics and multiphysical field coupling in a dual-electrode DC nickel-iron electric furnace[J]. Nonferrous Metallurgical Equipment, 2025, 39(2): 62-69, 82.

# 双电极直流镍铁矿热炉熔炼特性及多物理场耦合的数值模拟

程宗强, 杨祎晗, 伦晓军, 侯雨欣

(沈阳化工大学 机械与动力工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

**[摘要]** 本文针对双电极直流镍铁矿热炉的熔炼过程进行数值模拟研究,旨在探究炉内多物理场的耦合规律,为优化镍铁矿热炉的生产提供理论依据。研究采用三维瞬态多物理场模型,基于有限体积法对矿热炉熔炼过程中的电场、热场以及焦耳热的分布进行了模拟。利用用户自定义函数(UDF)将电磁力和焦耳热等源项加入动量守恒方程和能量守恒方程。此外,还考虑了电弧区和熔池区的复杂物理现象,例如电热转换、电磁感应和磁场扰动。模拟结果显示,电流从电极流入,在电极与炉膛底部之间、电极与电极之间以及电极与炉膛侧壁之间形成了明显的电流路径;随着熔炼时间的增加,焦耳热在电弧附近不断积累,炉膛温度持续升高,出现明显的临近效应;熔炼 40 min 时,焦耳热的最大值为  $3.07 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ ,最高温度为 5 182 K;到 50 min 时,焦耳热最大值增至  $3.45 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ ,最高温度增至 5 379 K;此外,外加电压增加,电极下方逐渐形成温度较高的坍塌区,电弧区最高温度从 4 853 K 增至 5 833 K,熔池温度峰值从 1 891 K 增至 2 026 K,这表明增加外加电压有助于提升矿料区整体温度,从而提高熔炼效率。

**[关键词]** 多物理场;矿热炉;温度场;焦耳热;镍铁;熔池;熔炼

**[中图分类号]** TF815

**[文献标志码]** A

**[文章编号]** 1003-8884(2025)02-0062-08

**DOI:** 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2025.02.008

## 0 引言

镍铁合金在不锈钢、合金钢等行业中有广泛应用<sup>[1]</sup>。将红土镍矿冶炼为镍铁合金的工艺主要分为火法工艺和湿法工艺 2 种,其中,火法工艺主要包括回转窑-矿热炉工艺(Rotary Kiln-Electric Furnace, RKEF)、还原硫化熔炼镍钨、烧结-高炉还原熔炼等<sup>[2]</sup>。回转窑-矿热炉工艺首次在新喀里多尼亚安博厂投产,因其具有镍铁品位易控、矿料适应性强、金属回收率高、有害元素少、工艺技术成熟等优点,经过不断优化和改进,已在全球范围内推广使用,遍布美洲、欧洲和东南亚等地区。镍铁矿热炉是用于生产镍铁合金的重要设备,能够在高温下将镍铁矿还原为镍铁合金,通常还伴随着其他合金元素

的加入,以调节最终合金的成分。双电极直流镍铁矿热炉是矿热炉中的一种,其结构特点为两个电极作为正极和负极,与普通矿热炉相比,双电极直流矿热炉具有电极消耗低、电弧稳定性高、熔池搅拌能力强、电网闪烁和谐波干扰少、功率因数高、噪声低以及耐火材料消耗少等显著优势<sup>[3]</sup>。

由于矿热炉内部相关参数难以测量,很多学者采用数值模拟的方法对矿热炉做了大量研究。Szekely 等<sup>[4]</sup>首次对电弧炉熔池部分进行了数值模拟,考虑了熔池内部浮力和电弧射流对钢液表面流动特性的影响,但忽略了电磁力对流体流动的影响。Ramirez 等<sup>[5]</sup>在构建直流电弧炉内熔池部分传热和流体流动数学模型的同时,还考虑了泡沫渣对流体运动的倾倒作用和熔池底部通入氩气鼓泡而主导流

**[收稿日期]** 2024-11-28

**[第一作者]** 程宗强(1999—),男,江苏淮安人,硕士研究生,主要研究镍铁矿热炉冶炼方向。

体流动,并通过涡流扩散促进温度分布的研究。Bowman<sup>[6]</sup>对等离子体速度分布进行研究试验,其结果可以作为仿真模拟的数据参考。Yao等<sup>[7]</sup>建立了直流电弧炉中等离子电弧与熔槽耦合模型,采用局部热力学平衡扩散近似的方法,分析了流体流动和传热过程。徐龙等<sup>[8]</sup>建立了电弧炉的流动-传热-电磁耦合模型,研究了电弧起弧过程炉内温度场、流场和电磁场的分布以及电弧长度和电弧输入电流参数对炉内传热的影响。李宝宽等<sup>[9]</sup>建立一个三维多物理场模型,分析了焦耳热和电流密度在电极附近的分布,印证了多物理场的强耦合性和不均匀性。Nedopekin等<sup>[10]</sup>描述了直流埋弧炉内多物理场的分布规律,采用磁流体动力学模型,模拟了熔池内电流密度、温度、洛伦兹力、焦耳热的分布,研究了洛伦兹力和对流对熔融液流动特性的影响。刘顺娣等<sup>[11]</sup>建立了单电极直流保温型矿热炉模型,分析了外加电压对熔池内温度、电流密度和磁场强度分布的影响。秦勤等<sup>[12]</sup>提出一种新型的双电极扁圆型电弧炉,对其操作特性进行了试验研究,并与交流电炉的能量消耗和产品质量作了比较。

以上文献证明了数值模拟方法在矿热炉研究中的重要性,特别是在理解矿热炉内部复杂的物理场分布和优化炉内操作条件方面。然而,目前针对双电极直流矿热炉的研究相对较少。双电极直流矿热炉在实际应用中展现出诸多独特优势,这些优势使得双电极直流矿热炉在提高冶炼效率、降低能耗和提升产品质量方面具有显著潜力。因此,深入研究双电极直流矿热炉的性能和特性,对于推动镍铁冶炼技术的发展具有重要意义。本文以RKEF工艺中矿热炉的冶炼过程为研究对象,基于麦克斯韦方程和电流连续性方程,构建了矿热炉三维瞬态多物理场耦合模型,基于计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics, CFD)模拟了不同时刻炉内的焦耳热和温度的分布规律,并且模拟了稳定熔炼阶段下电极底部不同外加电压下温度的分布,为镍铁矿热炉的生产提供了理论依据。

## 1 物理模型建立

### 1.1 几何模型与网格划分

本文建立了三维瞬态多物理场模型。矿热炉炉膛由电弧区、矿料区、炉渣层和合金层组成,利用SolidWorks软件进行建模,再利用ICEM软件进行结

构化网格划分,并对电弧区、合金层和炉渣层进行局部加密,模型总网格数量为65万,表1为矿热炉具体尺寸参数,图1为模型网格示意图。

表1 矿热炉具体尺寸参数

Table 1 Specific size parameters of ore furnace m

参数	炉膛最大直径	炉膛最小直径	炉膛高度	电极直径
尺寸	13.54	12.30	4.07	1.60
参数	极心圆半径	电弧高度	合金层高度	炉渣高度
尺寸	2.25	0.10	0.10	0.10

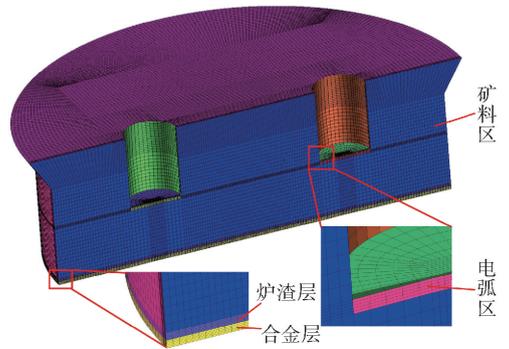


图1 模型网格示意

Fig. 1 Schematic of the model mesh

在ANSYS Fluent的设置中,采用瞬态模拟方法;采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型和标准壁面函数;采用DO辐射模型处理电弧与熔池之间的传热过程,其中电弧的散射系数和吸收系数均为0.6;采用广泛使用的SIMPLE算法处理耦合问题,电弧区初始温度为7000 K,矿料区初始温度为673 K,炉渣层和合金层初始温度为1800 K,时间步长设置为0.1 s,总模拟时长为50 min,具体边界条件如表2所示。

### 1.2 物性参数

电弧的工质为高温空气,通过查阅文献得到炉料和炉气的物性参数,见表3和表4。

### 1.3 网格无关性和模型验证

通过网格无关性验证(图2(a))发现,在相同条件下,当网格数量为65万个时,电弧区最大焦耳热与熔池最高温度将不会随着网格数量的增加而发生显著变化,故选定模型总网格数量65万个。为了验证数学模型在矿热炉仿真方面的准确性,使用Zhen Wang等<sup>[14]</sup>提出的距离熔池上顶面的温度分

表 2 边界条件

Table 2 Boundary condition

边界条件	电极侧壁	阴极斑点	电极底部	熔池侧壁	熔池顶部	熔池底部
电势/V	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	250	250	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	0
磁矢量/(V·s·m <sup>-1</sup> )	$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$	0	$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}}{\partial n} = 0$
温度/K	1 200	4 000	2 000	$-\lambda \cdot \frac{\partial T}{\partial n} = 2 \times (T - 673)^*$		

注：\* 表示为第三类边界条件,用于描述物体表面与周围流体之间由于对流而产生的热交换情况。其中,λ 是热导率,T 是物体表面温度,673 为周围环境温度,2 为对流换热系数。

表 3 矿料物性参数<sup>[13]</sup>

Table 3 Physical properties of furnace charge<sup>[13]</sup>

温度/K	673	1 073	1 473	1 773	2 073
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )			4 000		
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	971.3	989.0	1 077.5	1 107.6	1 344.3
热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	$k = 1 \times 10^{-6} T^2 + 0.002 T + 0.41^*$				
电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	0.075	0.15	15	150	150

注：\* 表示热导率通过此公式计算得出。

表 4 炉气物性参数<sup>[13]</sup>

Table 4 Physical properties of furnace gas<sup>[13]</sup>

温度/K	300	500	800	1 000	1 200	1 400	1 600	1 800
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	1.126 2	0.675 1	0.421 9	0.337 6	0.281 3	0.241 1	0.211	0.187 6
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	1 123.3	1 187.6	1 283.1	1 338.4	1 376.4	1 399.2	1 426.8	1 501.0
热导率/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	0.027 9	0.042 6	0.062 5	0.075 1	0.086 6	0.095 4	0.088 3	0.094 4
粘度/(10 <sup>-5</sup> kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	1.862	2.626	3.594	4.156	4.675	5.162	5.625	6.067

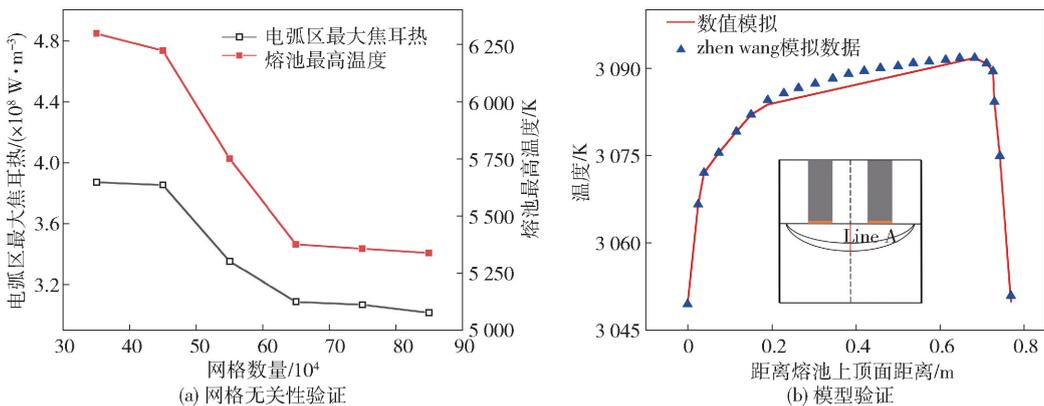


图 2 (a) 网格无关性验证; (b) 模型验证

Fig. 2 (a) Grid independence verification; (b) Model validation

布进行了数值模拟,取距离熔池上顶面 0.8 m 的 Line A 上的温度与 Zhen Wang 的模拟数据进行了比较(图 2(b))。由图 2 可知,两者的模拟数据基本吻合,验证了本文模型的准确性。

## 2 数学模型

回转窑-矿热炉冶炼工艺中所使用的是埋弧炉,即电弧埋入矿料中,减轻电弧对炉衬的高温辐射。矿热炉熔炼过程包括电热转换、电磁感应和磁场扰动等过程,是一个复杂的物理体系<sup>[15]</sup>。矿热炉数值分析是一项多学科综合的研究,其中:需要对计算流体力学基本控制方程进行二次开发,从而构建符合研究内容的数学模型;电弧与熔池之间的传热过程包括热辐射、热传导和热对流等传热学理论公式需要推导。麦克斯韦方程组是电磁场有限元的基础性内容,其表述形式<sup>[16]</sup>见式(1)~(4)。

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho_e \quad (3)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4)$$

式中: $\mathbf{D}$  为电位移,  $\text{C}/\text{m}^2$ ;  $\mathbf{H}$  为磁感应强度,  $\text{A}/\text{m}$ ;  $\mathbf{B}$  为磁场强度,  $\text{T}$ ;  $\mathbf{J}$  为电流密度,  $\text{A}/\text{m}^2$ ;  $\rho_e$  为电荷密度,  $\text{C}/\text{m}^3$ ;  $\varepsilon$  为介电常数;  $\mu_0$  为真空磁导率,  $\text{H}/\text{m}$ ;  $\sigma$  为电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $t$  为时间,  $\text{s}$ 。

为了准确模拟矿热炉冶炼过程多物理场的耦合过程,本文通过 UDF 求解矿热炉内的电热转换,电热转换是通过欧姆定律将电能转换为热能,再将电弧热以热辐射、热对流和热传递的形式向炉膛中的矿料冶炼提供热量。其次,将电磁力、焦耳热、辐射源项以及其他形式的源项通过 UDF 加入到动量守恒方程和能量守恒方程中。动量守恒方程和能量守恒方程的表达式如下<sup>[16]</sup>。

动量守恒方程见公式(5)~(6)。

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{u} \mathbf{u}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F}_e \quad (5)$$

$$\mathbf{F}_e = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (6)$$

式中: $\rho$  为密度,  $\text{kg}/\text{m}^3$ ;  $\mathbf{u}$  为速度,  $\text{m}/\text{s}$ ;  $p$  为流体静压,  $\text{Pa}$ ;  $\mu$  为动力黏度,  $\text{Pa} \cdot \text{s}$ ;  $\mathbf{g}$  为重力加速度,  $\text{m}/\text{s}^2$ ;  $\mathbf{F}_e$  为电磁力,  $\text{N} \cdot \text{m}^{-3}$ ;  $\mathbf{B}$  为磁感应强度,  $\text{T}$ 。

由于矿热炉被小粒径矿料球团填充,可将矿热炉内部设定为流体域,因此将球状矿料视为填充床内的拟流体连续介质处理,球团颗粒的平均粒径为 20 mm,颗粒的孔隙率为 0.37。

能量守恒方程见式(7)。

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho u c_p T) = \nabla \cdot [\lambda \nabla T] + Q_e \quad (7)$$

式中: $c_p$  为比热容,  $\text{J}/(\text{kg} \cdot \text{K})$ ;  $T$  为温度,  $\text{K}$ ;  $\lambda$  为热导率,  $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$ ;  $Q_e$  表示能量源项,  $\text{W}/\text{m}^3$ 。

本文通过电极引入电流,在电弧区进行电热转换形成电弧热,在矿料区形成电阻热,在两者共同作用下为炉膛升温和熔炼提供热量。由于电弧与电极接触区域存在复杂的物理现象,因此将矿热炉模型分为电弧区和熔池区,熔池区又分为矿料区、合金层和炉渣层。

电弧区的能量源项表达式见式(8)~(9)。等式(8)右边第一项为焦耳热,第二项为电子运输焓,第三项为辐射源项。

$$Q_{e1} = \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma_{\text{Arc}}} + \frac{5}{2} \frac{K_B}{e} \mathbf{J} \nabla T - Q_{\text{AR}} \quad (8)$$

$$Q_{\text{AR}} = aG - 4an^2 \xi T^4 \quad (9)$$

式中: $\sigma_{\text{Arc}}$  为电弧区电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $K_B$  为玻尔兹曼常数,取值  $1.38 \times 10^{-23}$ ;  $e$  为电子电荷,取值  $-1.6 \times 10^{-19}$ ;  $Q_{\text{AR}}$  为电弧辐射热,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $a$  为吸收系数;  $G$  为入射辐射,  $\text{W}/\text{m}^3$ ;  $\xi$  为斯忒藩玻尔兹曼常量;  $n$  为折射系数。

矿料区的能量源项表达式见式(10)。

$$Q_{e2} = \frac{\mathbf{J} \cdot \mathbf{J}}{\sigma_{\text{Fur}}} + Q_{\text{R}} + Q_{\text{M}} \quad (10)$$

式中: $\sigma_{\text{Fur}}$  为矿料区电导率,  $\text{S}/\text{m}$ ;  $Q_{\text{R}}$  为还原反应热,  $\text{kJ}/\text{mol}$ ;  $Q_{\text{M}}$  为相变吸热,  $\text{kJ}/\text{mol}$ 。

## 3 结果与讨论

### 3.1 炉膛电势分布

炉膛内电势的分布规律直接影响到电流密度的分布,电流密度分布关系到焦耳热的生成,从而影响炉膛温度的分布。取垂直切面的  $Y = 0 \text{ m}$  对炉膛电势分布进行展示,如图 3 所示。不同电极底部出现不同的高电位或低电位,电极底部电位与熔池底部零电位形成明显的梯度分布,而各电极因为极性不同,在电极间也形成了明显的梯度分布。电压降主要集中在电弧区附近位置,由电弧底部向炉膛壁和炉膛底部扩散,纵向的电势梯度大于横向的电势梯

度。2 个电极电压极性相反,使得中心线位置处的电势和为 0,电势呈对称分布。

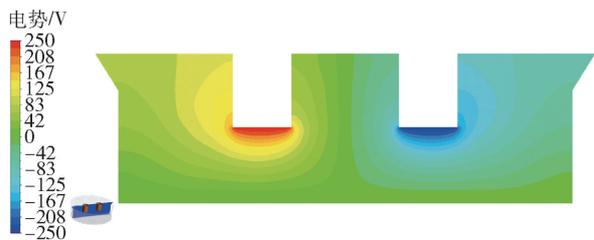


图 3 50 min 稳定熔炼阶段电势分布

Fig. 3 Potential distribution during the 50 minute stable melting stage

### 3.2 炉膛电流密度分布

图 4 为熔池内矿料电流密度分布图,图 4(a)为 50 min 时  $Y=0$  m 处垂直切面的矢量图,图 4(b)为 50 min 时  $Z=2.07$  m 处水平切面的矢量图。从图 4 中可以看出熔池中电流由左侧的电极流入,右侧电极流出;电流矢量表示熔池内的电流路径,电流密度的分布并非均匀,靠近电极下端的电流密度较大。同时可以总结出 4 条电流路径:电极壁面之间的电流流动;电弧侧面之间的电流传递;从电极底流经炉料,最终流向其他电极底部;电流从电极底流出,途径矿料-渣层-合金层,最后流向另一个电极底部。

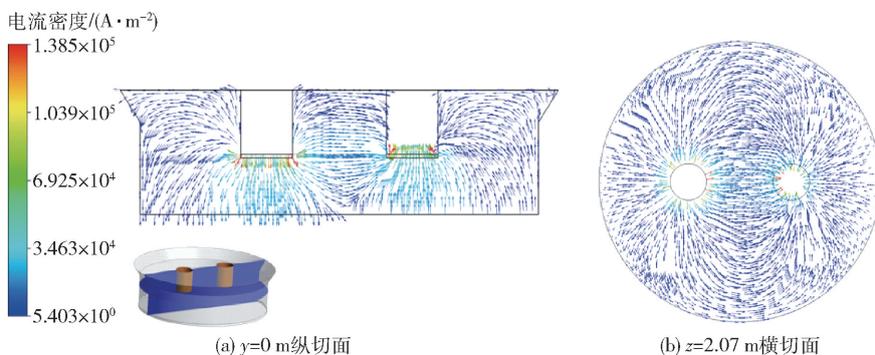


图 4 熔池内矿料电流密度分布

Fig. 4 Current density distribution of furnace charge in molten bath

为了更加清楚地展示炉膛内电流密度的分布规律,分别选取了 20 min、30 min、40 min 和 50 min 时  $y=0$  m 处垂直切面,图 5 为炉膛内电流密度分布云图,从云图可以看出电流密度分布不均匀,最大值主要集中在电弧区附近,且出现明显的邻近效应。随

着熔炼时间的增加,两电弧区之间和电极至熔池底部之间的电流密度逐渐增强,且电弧区内侧边缘的邻近效应愈加明显,这是由于熔池温度升高使得矿料电导率增加,即矿料电阻减小所致。当熔炼时间为 50 min 时,电流密度增加至  $3 \times 10^5 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

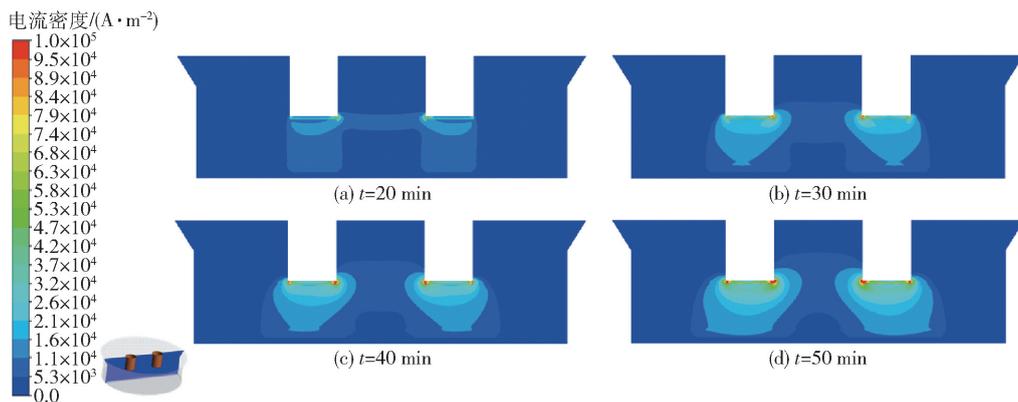


图 5 50 min 稳定熔炼阶段电流密度分布

Fig. 5 Current density distribution during the 50 minute stable melting stage

### 3.3 炉膛焦耳热分布分析

为了更加清晰地对比不同时刻炉膛焦耳热的差

异性,图 6 采用对数的形式展示炉膛焦耳热的分布,随着时间推移,焦耳热不断增加,主要集中在电弧附

近,且向炉膛两侧递减,并遵循电流分布规律。在前40 min 焦耳热快速积累,最大值出现在电弧边缘,其值为  $3.07 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ ,从40 min 到50 min 焦耳热大于  $2 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$  区域稍有增大并趋于稳定,且最

大值增至  $3.45 \times 10^8 \text{ W} \cdot \text{m}^{-3}$ 。此外,在矿料区底部中心位置存在一个焦耳热较小的区域,这是由于该区域距离电极底部较远,电流密度较小,所以焦耳热也相对较小。

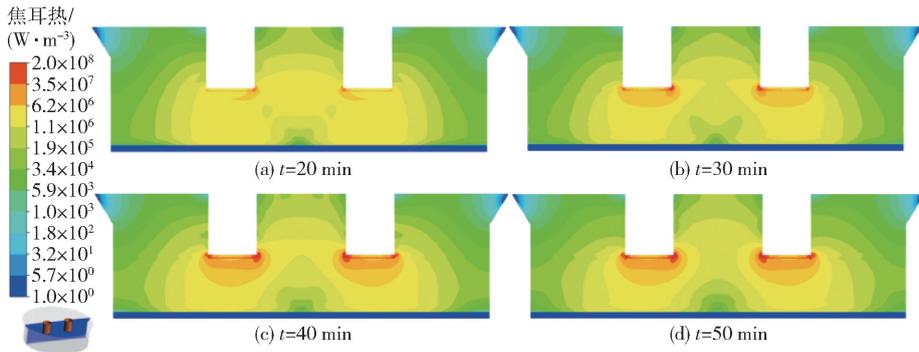


图6 不同时刻焦耳热分布

Fig. 6 Joule heat distribution at different times

### 3.4 炉膛温度分布

炉膛温度分布对炉膛熔炼过程至关重要,图7为不同时刻的熔池温度分布。熔炼阶段中前40 min,电弧区附近温度不断升高,形成高温区,并不断向炉膛底部及侧壁传递热量,与电流密度和焦耳热分布类似,在电弧内侧边缘的温度相对更高,最高温度达5 182 K。此外,矿料区底部中心位置存在一个低温区,随着熔炼时间的不断增加,炉膛内电流密度和焦耳热也随之增加,低温区范围不断缩小,这是由于电弧高温区向下延伸,使得炉膛底部中心区域传热量

增加。在40 min 到50 min 高温区温度稍有增大,最高温度增至5 379 K,并趋于稳定,此时电弧附近和正下方达到金属氧化物还原反应的所需温度。本文定义温度大于2 600 K 的区域为坩埚区,在冶炼至40 min 时坩埚区初步形成,在冶炼至50 min 时坩埚区完全形成。此时坩埚区足以提供镍和铁的氧化物的还原反应所需温度。实际过程中,不同的炉膛高度的温度均不同,会受到熔池内多相转变及距离电极坩埚区远近的影响。

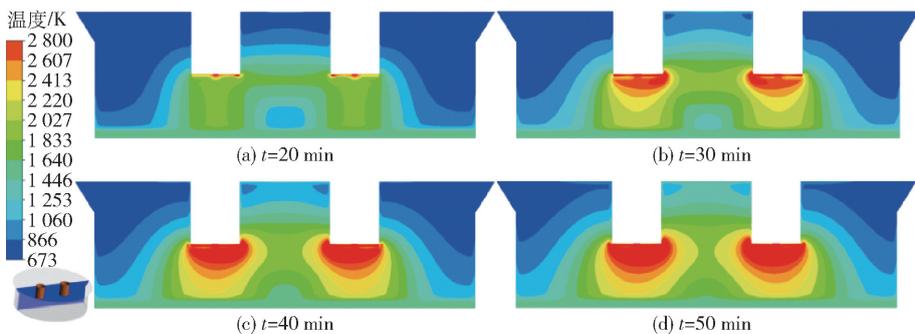


图7 不同时刻温度分布

Fig. 7 Temperature distribution at different times

### 3.5 不同外加电压下温度分布

本节通过改变外加电压(由225 V 增至275 V),分析外加电压对炉内电热特性和温度分布的影响。外加电压作为单一变量,电极插入深度为2.2 m,极心圆半径为2.25 m,渣金层初始温度为1 800 K,熔炼

时间为50 min。图8为不同外加电压条件下熔池温度分布。由图可知,熔池温度主要集中在电弧区及其附近区域,随着外加电压的增加,在电极下方逐渐形成温度较高的坩埚区,其中电弧区最高温度由4 853 K 增至5 833 K。外加电压从225 V 增加至

250 V 时,坩埚区逐渐形成。电弧区温度的升高,会不断向熔池底部、熔池侧壁和矿料上表面传递更多的热量,在矿料区焦耳热的共同作用下,熔池得以迅

速升温。熔池温度升高能有效提升熔炼效率,但是炉内温度升高也会增加控温难度和炉衬的温度载荷。此外,电弧区温度过高也会加快电极的损耗。

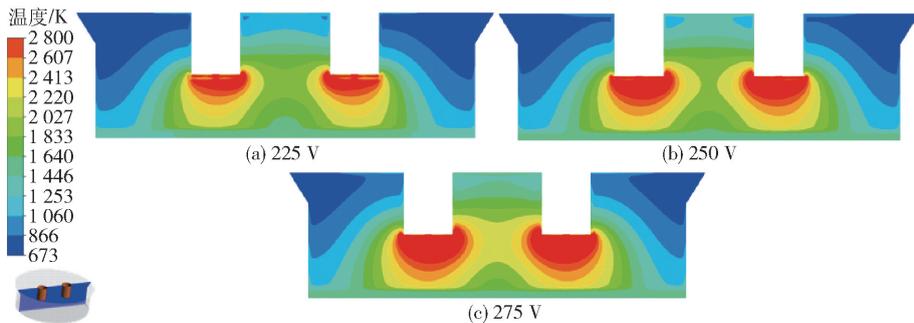


图 8 不同外加电压条件下熔池内温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of molten bath with applied different voltages

为了描述不同外加电压对矿料区温度分布的影响,图 9 分别取熔池中轴线 Line B 和矿料区底部直线 Line C 对熔池温度进行分析。由图可知,不同外加电压条件下的矿料区温度峰值均出现  $Z = 1.7 \text{ m}$  处;当外加电压由 225 V 增至 275 V 时,熔池温度逐渐增加,在  $Z = 1.7 \text{ m}$  处的温度峰值由 1 891 K 增至 2 026 K,矿料区底部中心温度由 1 486 K 增至

1 592 K,熔池上表面温度由 1 168 K 增至 1 444 K,表明增加外加电压有助于矿料区整体温度提升,从而提高熔炼效率;矿料区底部温度沿直线 Line C 呈现峰谷状,波峰位置处于电弧区正下方;当外加电压由 225 V 增至到 275 V 时,熔池温度沿 Line C 逐渐增加,最大温度值由 1 793 K 增至 1 956 K。

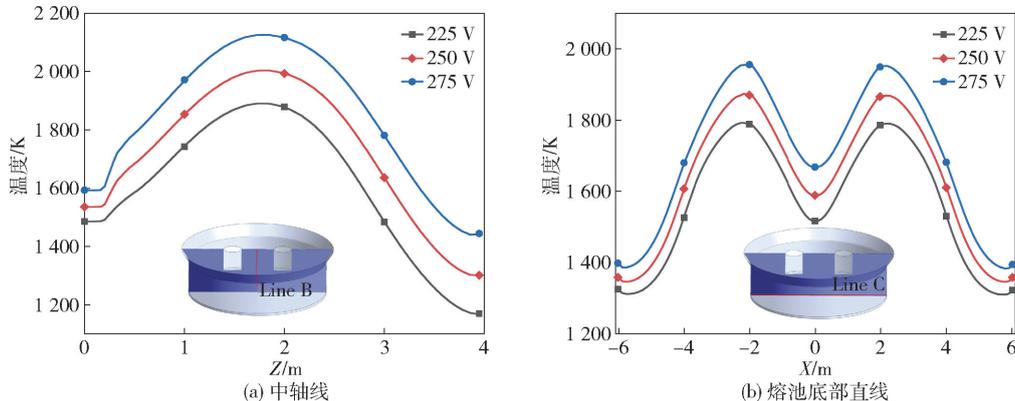


图 9 不同外加电压条件下熔池内温度分布

Fig. 9 Temperature distribution of molten bath with different voltage

## 4 结论

本文主要以炉膛内电势分布为基础,分析不同时刻的电流密度、焦耳热和温度分布的差异性。炉膛内电势的分布规律直接影响到电流密度的分布,电流密度分布关系到焦耳热的生成,从而影响炉膛温度的分布。

1) 电压降主要集中在电弧区附近,从电弧底部向炉膛壁和炉膛底部扩散,纵向电势梯度大于横向

电势梯度。中心线位置处的电势和为 0,电势呈对称分布。

2) 电流密度最大值集中在电弧区附近,熔炼 50 min 后,最大电流密度达到  $3 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ 。大量电流由电极流入熔池内部,并在电极与侧壁之间、电极与电极之间以及电极与熔池底部之间形成了明显的电流路径。

3) 温度与焦耳热分布一致。前 40 min,焦耳热在电弧附近不断积累,炉膛温度持续升高,焦耳热最

大值为  $3.07 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , 最高温度达 5 182 K。40 ~ 50 min 期间, 焦耳热和温度稍有增大, 焦耳热最大值仍为  $3.45 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , 最高温度增至 5 379 K, 并趋于稳定, 此时电弧附近和正下方达到金属氧化物还原反应所需温度。

4) 在不同外加电压条件下, 电极下方逐渐形成温度较高的坩埚区, 电弧区最高温度从 4 853 K 增至 5 833 K。不同外加电压下, 矿料区温度峰值均出现在  $Z=1.7 \text{ m}$  处, 熔池温度峰值从 1 891 K 增至 2 026 K。矿料区底部温度呈峰谷状, 波峰位置处于电弧区正下方。

#### [参考文献]

- [1] 郭恩光. 褐铁矿型红土镍矿烧结行为研究及工艺优化 [D]. 重庆: 重庆大学, 2014.
- [2] 宋志伟, 栾彪. 矿热炉冶炼铬基不锈钢母液试验研究 [J]. 有色矿冶, 2019, 35(2): 36-38.
- [3] 齐铭. 双电极直流矿热炉的熔池特性研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2023.
- [4] Szekely J, Mckelliget J, Choudhary M. Heat transfer fluid flow and bath circulation in electric arc furnaces and DC plasma furnaces [J]. *Ironmaking & Steelmaking*, 1983, 10(4): 169.
- [5] Ramirez M A, Alexis J, Trapaga G, et al. Effects of the arc, slag and bottom bubbling of argon on the fluid flow and heat transfer of a DC EAF bath [C]. *Proceedings of the 57th electric furnace conference*, Pittsburgh, U. S. A, 1999: 751-761.
- [6] Bowman B. Measurements of plasma velocity distributions in free-burning DC arcs up to 2160 A [J]. *Journal of Physics. D, Applied Physics*, 1972. 5(8): 1422-1432.
- [7] CongLin Yao, HongChun Zhou, ZhouHua Jiang, et al. Numerical analysis of fluid flow and heat transfer by means of a unified model in a direct current electric arc furnace [J]. *Steel Research International*, 2021, 92(6): 2000664.
- [8] 徐龙. 直流电弧炉工业硅冶炼过程的传热特性研究 [D]. 昆明: 昆明理工大学, 2021.
- [9] 李宝宽, 欧海彬, 于洋, 等. 钛渣电弧炉中的多物理场和还原反应模型 [J]. *东北大学学报(自然科学版)*, 2022, 43(2): 206-213.
- [10] Nedopekin F, Semko O, Kazak O. Rotor Lorentz force as a parameter for the estimation of vortex flows in a DC electric arc furnace with different bottom electrode positions [J]. *Ironmaking Steelmaking*, 2018, 45(9): 813-820.
- [11] 刘顺娣, 李宝宽, 于洋, 等. 直流矿热炉熔炼硅锰合金温度场-电磁场数值模拟 [J]. *中国冶金*, 2022, 32(1): 104-111.
- [12] 秦勤, 岳强, 顾根华, 等. 双电极直流电熔镁埋弧电弧炉 [J]. *东北大学学报*, 2003(7): 685-688.
- [13] 孙昊, 刘鹏, 李茂生, 等. 镍铁矿热炉熔炼过程中的多物理场耦合 [J]. *材料与冶金学报*, 2024, 23(2): 118-126, 153.
- [14] Zhen Wang, Ninghui Wang. Numerical simulation of melt convection in a dual-electrode arc furnace for MgO production [J]. *Heat and Mass Transfer*, 2018, 54(12): 3509-3519.
- [15] 杨树明. 矿热炉设计与应用 [M]. 北京: 冶金工业出版社, 2014.
- [16] Yang Yu, Baokuan Li, Chencheng Yu, et al. Modeling on reduction reaction of metal oxides for submerged arc furnace in ferrochrome pellets smelting process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2021, 52(6): 1-13.

## Numerical simulation of melting characteristics and multiphysical field coupling in a dual-electrode DC nickel-iron electric furnace

CHENG Zongqiang, YANG Yihan, LUN Xiaojun, HOU Yuxin

(School of Mechanical and Power Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China)

**Abstract:** This paper conducts a numerical simulation study on the melting process of a dual-electrode DC nickel-iron electric furnace, aiming to explore the coupling laws of multiphysical fields inside the furnace and provide a theoretical basis for optimizing the production of nickel-iron electric furnaces. The study employs a three-dimensional transient multiphysical field model and uses the finite volume method

(下转第 82 页)

## Intelligent transformation of equipment for sulfate roasting process of copper anode slime

WANG Jifu, LIU Peisong, DU Shaojun, SHI Fengbang

(JCC Guoxing (Yantai) Copper Co., Ltd., Rare and Precious Metals Branch, Yantai 264006, China)

**Abstract:** The anode sludge produced during the copper electrolytic refining process, in which precious and rare metals can be extracted, has important economic value. Based on the problems existing in the copper anode sludge roasting process of a smelting enterprise, such as insufficient pretreatment, uneven feeding, large fluctuation of negative pressure at the end of the kiln, easy deformation of the kiln body, and excessive pressure in the jet pump, combined with the EMERSON - DeltaV DCS control system, optimization measures were proposed, such as adjusting the dense pressure filtration method, increasing DCS interlock control of the anode slime tank's liquid level, establishing liquid level interlock between the anode slime tank and the feed tank, adding negative pressure delay protection, improving fuel usage in the heating system, and adding vacuum pump sensors. After these improvements, the daily processing capacity of the rotary kiln for copper anode slime had been increased, the working environment had been improved, energy consumption had been reduced, the labor intensity of workers had been reduced, production costs had been effectively lowered, and equipment lifespan had been extended.

**Keywords:** copper anode slime; sulfate roasting; rotary kiln; DCS control system; waste; recycling ▲

(上接第 69 页)

to simulate the distribution of electric field, thermal field, and Joule heat during the melting process of the electric furnace. User-defined functions (UDF) are utilized to incorporate source terms such as electromagnetic force and Joule heat into the momentum conservation equation and energy conservation equation. Additionally, complex physical phenomena in the arc zone and molten pool zone, such as electrothermal conversion, electromagnetic induction, and magnetic field disturbance, are taken into account. The simulation results show that the current flows from the electrodes, forming distinct current paths between the electrodes and the furnace bottom, between the electrodes themselves, and between the electrodes and the furnace side walls. As the melting time increases, Joule heat accumulates near the arc, causing the furnace temperature to rise continuously and resulting in a pronounced proximity effect. After 40 minutes of melting, the maximum value of Joule heat is  $3.07 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , and the highest temperature is 5 182 K; by 50 minutes, the maximum value of Joule heat increases to  $3.45 \times 10^8 \text{ W/m}^3$ , and the highest temperature rises to 5 379 K. Furthermore, as the applied voltage increases, a crucible zone with higher temperature gradually forms below the electrodes. The highest temperature in the arc zone increases from 4 853 K to 5 833 K, and the peak temperature of the molten pool rises from 1 891 K to 2 026 K. This indicates that increasing the applied voltage helps to raise the overall temperature of the ore zone, thereby enhancing the melting efficiency.

**Keywords:** multi-physics field; submerged arc furnace; temperature field; Joule heat; ferronickel; molten pool; melting ▲