

三电极矿热电炉电磁场、流场和温度场的数值模拟

张思弘^{1,2}, 姚心¹, 郭天宇¹, 李东波¹

(1. 中国恩菲工程技术有限公司, 北京 100038; 2. 北京理工大学 机电学院, 北京 100081)

[摘要] 为掌握三电极矿热电炉熔池在电磁搅拌作用下的流动和传热机制, 采用多物理场耦合仿真模型, 对熔池内电磁场、流场和温度场进行模拟分析, 并结合试验结果对模拟方法进行了验证。结果表明: 熔池内磁感应强度、电磁力和焦耳热密度的最大值均出现在电极区域, 这是熔池内电极附近区域温度最高的主要原因; 施加电磁力后, 炉体壁面附近熔体出现局部速度增大的现象, 增加了高温熔体对壁面的侵蚀。通过模拟所得温度场计算结果与试验结果吻合良好, 最大误差不超过 13.66%, 证明了该模拟方法的可靠性。

[关键词] 矿热电炉; 数值模拟; 多物理场耦合

[中图分类号] TF806

[文献标志码] B

[文章编号] 1003-8884(2022)06-0048-07

DOI: 10.19611/j.cnki.cn11-2919/tg.2022.06.007

0 引言

与传统冶炼方式的长流程、高污染相比, 电炉熔炼具有工艺流程短、能源消耗低、资源循环利用以及环境友好等特点, 目前已成功应用于钢、铁、铜、镍、铅、锌、锡等的冶炼, 是金属冶炼工业实现可持续发展的重要驱动力。矿热电炉属于冶金电炉的一种, 其工作过程中电极下端被埋在炉料中, 利用电流通过高电阻炉料产生的焦耳热, 以及电极和炉料间电弧产生的辐射热进行熔炼。

矿热电炉内的生产过程是个气、固、液和电弧等离子体多相并存, 动量、质量和热量传递耦合发生的高温物理化学过程, 直接对内部冶炼过程的温度分布和流动规律进行测量存在较大难度。随着计算技术的迅猛发展, 研究者逐渐把模拟仿真技术引入到对矿热电炉内部复杂流动传热问题的研究上。王振等^[1-2]以电熔镁工业生产为背景, 研究了矿热电炉内电弧等离子体的流动和传热特性, 并以电弧分析中得到的熔池表面电流密度、压力和热通量等分布为初始条件, 分别研究了电熔镁熔池内的流动、熔池

形状以及电流对熔池形状的影响。王子坤等^[3]建立了矿热电炉熔炼镍铁过程的三维多物理场仿真模型, 对炉内料层、渣层和产品层的一体化系统进行了电磁行为和传热过程的数值模拟计算, 研究过程中电弧是按等效电阻处理的。孙亚娟^[4]对矿热电炉内直流等离子电弧的二维轴对称模型进行数值模拟研究, 分析了电弧的物理形态、传热机理, 以及不同电流值和电弧弧长对电弧形态的影响。董艳奇等^[5]借助有限元模拟, 对 12.5 MW 矿热电炉内的电流密度、焦耳热场、温度场进行分析, 并探究了不同电弧高度和炉料比电阻对炉内温度场的影响。姜文婷等^[6]利用 COMSOL 多物理场仿真软件对工业硅矿热电炉的电弧放电、气体流动和炉内温度进行模拟研究, 并分析了电流大小对起弧过程的影响。

上述相关研究表明, 对矿热电炉的生产过程进行模拟仿真, 不仅能够再现炉体内部的高温熔炼过程, 还能方便得到不同工艺操作参数对流动传热的影响规律。本文以某新型三电极矿热电炉生产过程为背景, 建立其全尺寸三维模型, 进行基于多物理场耦合的电磁场-流场-温度场仿真分析, 得到熔池内磁感应强度、电磁力和加热功率密度的分布规律, 以及电磁力搅拌作用下流场和温度场的分布, 以期为相应结构和操作参数的设计优化提供参考和依据, 并为后续的相关研究奠定基础。

1 物理模型

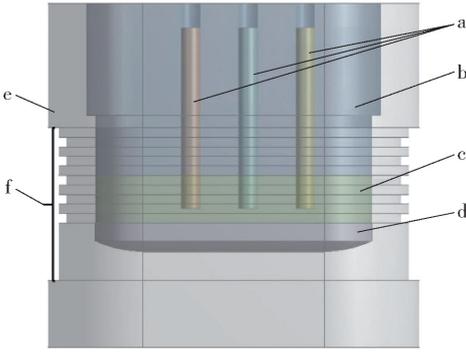
本文以某新型三电极矿热电炉为背景进行三维

[收稿日期] 2022-06-29

[作者简介] 张思弘(1989—), 女, 陕西宝鸡人, 工程师, 博士, 主要从事 CFD 数值模拟研究工作。

[引用格式] 张思弘, 姚心, 郭天宇, 等. 三电极矿热电炉电磁场、流场和温度场的数值模拟[J]. 有色设备, 2022, 36(6): 48-54.

仿真建模。如图 1 所示,该三维矿热电炉模型主要包括三根石墨电极、气相、渣相、金属相、镁铬砖以及铜水套。



a. 电极 b. 气相 c. 渣层 d. 金属层 e. 镁铬砖 f. 水冷套

图 1 矿热电炉仿真模型构成

2 数学模型

2.1 控制方程

2.1.1 电磁场

本文矿热电炉电磁场的仿真计算是在麦克斯韦方程组的基础上进行的,其控制方程如下:

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (2)$$

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

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

式中 \mathbf{H} —磁场强度;

\mathbf{J} —传导电流密度矢量;

$\frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t}$ —位移电流密度;

\mathbf{E} —电场强度;

\mathbf{B} —磁感应强度;

ρ —电荷体密度。

在矿热电炉中,产生涡流的熔体和电极内, \mathbf{H} 直接由源电流和外加磁场进行计算:

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\sigma + j\omega\epsilon} \nabla \times \mathbf{H} \right) = -j\omega\mu\mathbf{H} \quad (5)$$

相应的涡流损耗由下式计算得到:

$$P = \int_{vol} \frac{\mathbf{J}\mathbf{J}^*}{2\sigma} dv \quad (6)$$

式中 \mathbf{J}^* —电流密度的共轭复数;

vol —求解域。

电磁力密度由下式计算得到:

$$f = \frac{\sum_{i=0}^{i=N} S_i \hat{n}_i A_i}{Volume} \quad (7)$$

式中 N —网格节点个数;

A_i —网格边 i 所在的面积;

\hat{n}_i —一面的外法线方向;

S_i 为麦克斯韦应力张量,其表达式为:

$$S_i = \frac{1}{\mu_0} \begin{bmatrix} B_x^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_x B_y & B_x B_z \\ B_x B_y & B_y^2 - \frac{1}{2}B^2 & B_y B_z \\ B_x B_z & B_y B_z & B_z^2 - \frac{1}{2}B^2 \end{bmatrix} \quad (8)$$

2.1.2 流场与温度场

本文研究的矿热电炉,其熔炼过程中所涉及的流体主要包括烟气、熔炼渣以及熔融金属三相。以上三相的流动传热通过描述质量、动量、能量守恒的控制方程进行综合求解。

质量控制方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) = S_m \quad (9)$$

式中 ρ —熔体密度;

t —时间;

\mathbf{v} —速度矢量;

S_m —自定义源项。

动量控制方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\bar{\bar{\tau}}) + \rho \mathbf{g} + \mathbf{F} \quad (10)$$

式中 p —微元体内流体静压;

\mathbf{g} —该微元体所受重力加速度;

\mathbf{F} —该微元体所受外部体积力(包括外加电场力、磁力等);

$\bar{\bar{\tau}}$ —微元体表面上的粘性张量,其表达式为:

$$\bar{\bar{\tau}} = \mu [(\nabla \mathbf{v} + \nabla \mathbf{v}^T)] - \frac{2}{3} \nabla \cdot \mathbf{v} \mathbf{I} \quad (11)$$

式中 μ —分子粘度;

\mathbf{I} —单位张量。

能量控制方程:

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \nabla \cdot [\mathbf{v} (\rho E + p)] =$$

$$\nabla \cdot \left[k_{eff} \nabla T - \sum_j h_j \mathbf{J}_j + (\bar{\bar{\tau}}_{eff} \mathbf{v}) \right] + S_h \quad (12)$$

式中 k_{eff} —有效导热系数;

J_j —组分 j 的扩散通量;

S_h —体积热源。

通过电磁场计算所得电磁力和焦耳热作为源项,分配到相应的内存单元进行计算,其表达式为:

$$\mathbf{F} = \mathbf{J} \times \mathbf{B} = \begin{vmatrix} \mathbf{i} & \mathbf{j} & \mathbf{k} \\ J_x & J_y & J_z \\ B_x & B_y & B_z \end{vmatrix} = (J_y B_z - J_z B_y)\mathbf{i} - (J_z B_x - J_x B_z)\mathbf{j} + (J_x B_y - J_y B_x)\mathbf{z} \quad (13)$$

$$S_h = \frac{J^2}{\sigma} \quad (14)$$

2.2 边界条件

(1)电磁场:以矿热电炉仿真模型在三维空间的边界为基础,设置比模型边界大 1.5 倍的区域为求解域。在电极上端面加载三相电流,电流频率为 50 Hz。

(2)流场:将电磁场计算中得到的空间各节点磁场矢量提取出来,作为熔体流动的驱动源,以源项方式加载于流场中进行计算。炉膛壁面设置为无滑移的速度边界。

(3)温度场:矿热电炉熔炼过程中,熔池内气相、渣相、金属相和炉壁都是接触传热,按第一类边界条件计算,即 $T(x, y, z)|_r = t(x, y, z)$ 。在炉体表面,传热有两种途径:一是与铜水套以及周围空气的对流换热,二是以热辐射的形式向周围环境散热。因此,炉壳外表面按第三类边界条件设置,此外还需添加辐射项,即 $-k_2 \frac{\partial T}{\partial n} \Big|_r = h(T - T_f)|_r + \sigma \varepsilon(T^4 - T_f^4)$ 。

3 结果与讨论

3.1 电磁场分布

图 2 为矿热电炉内磁感应强度分布矢量图。由图可见,靠近电极的熔池表面处磁感应强度最大,随着距电极距离的增加,磁感应强度迅速减小,壁面处的磁感应强度远小于电极处。取熔池纵截面中心处路径 A-B,如图 3 所示,观察磁感应强度在熔池内部的具体分布。磁感应强度在熔池表面 A 处达到最大值 1.8×10^{-1} T,然后随距熔池表面距离的增加而减小,达到 0 值后又逐渐增大,最终到达熔池底部 B 处的磁感应强度为 2.2×10^{-3} T。由此可见,磁场在熔体内部呈现剧烈衰减的趋势。

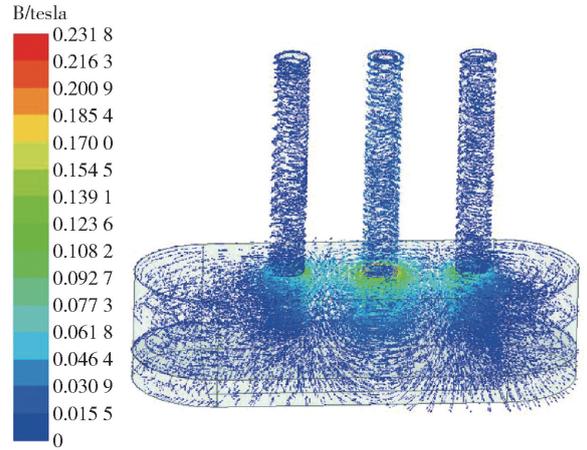


图 2 磁感应强度分布矢量图

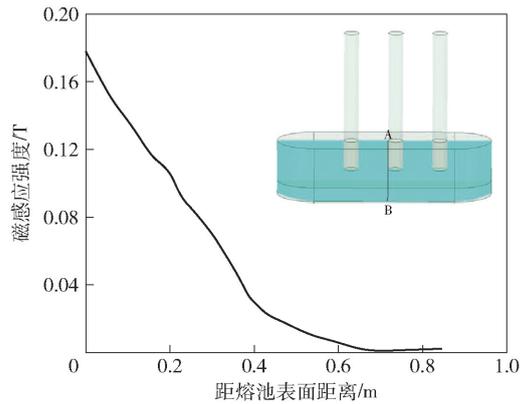


图 3 磁感应强度在纵截面中心轴线的分布

图 4 为矿热电炉熔池内体积电磁力分布矢量图。对比图 2 可见,由于靠近电极的熔池表面处磁感应强度较大,因此熔体所受体积电磁力也较大。图 5 为矿热电炉熔池内长轴纵截面体积电磁力分布矢量图。由图可见,熔池表面体积电磁力方向垂直向上,熔池内部体积电磁力由壁面指向电极区域。熔池内电极附近区域的体积电磁力较大,而壁面处的体积电磁力很小。

图 6 所示为矿热电炉焦耳热密度分布图。由图 6(a)可见,焦耳热密度主要集中在电极附近,而壁面处的焦耳热密度很小。由图 6(b)可见,熔池内电极区域附近的焦耳热梯度很大,而电极区域外部焦耳热梯度基本不变。

3.2 流场分布

自熔池表面至熔池内渣相与金属相交界面,共设置 4 个横截面,其具体位置列于表 1。图 7 为电磁力驱动下各横截面速度矢量分布图,由图可见,熔

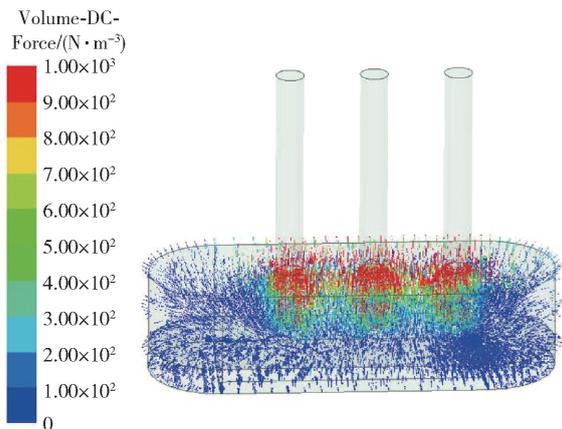


图4 体积电磁力分布矢量图

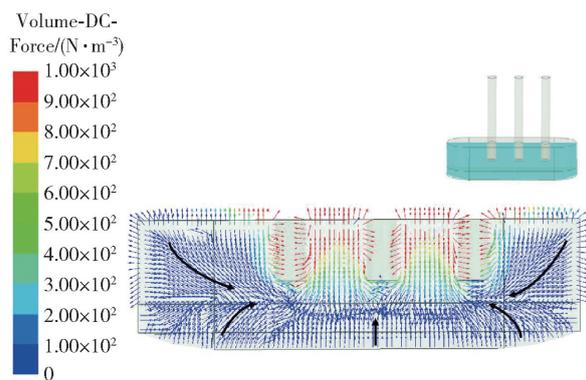


图5 矿热电炉纵截面体积电磁力分布矢量图

体绕两侧电极形成两个漩涡,速度最大的区域在壁面附近。图8为未施加电磁力驱动下各横截面速度矢量分布图。对比图7、图8可见,在不同作用力的影响下,熔体的流动形态和流动速度均会发生变化,

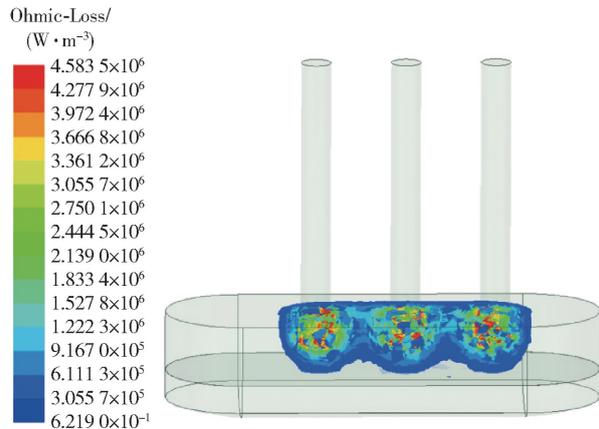
表1 矿热电炉横截面位置分布

编号	截面1	截面2	截面3	截面4
位置	熔池上表面	电极插入熔池1/2深度处	电极底部	渣相与金属相交界面

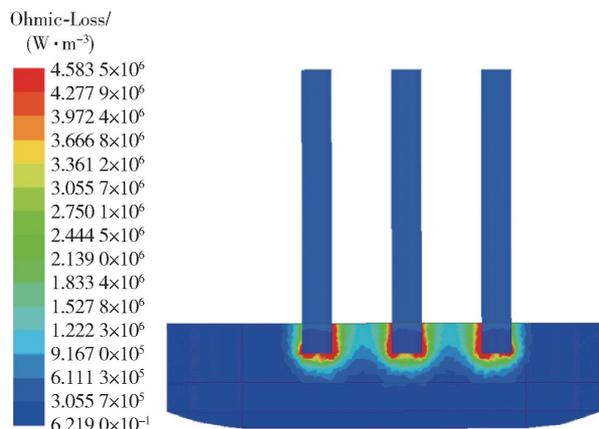
3.3 温度场分布

图9为矿热电炉炉内熔池及炉体壁面整体的正视纵截面及侧视纵截面等温线图。图10更详尽的展示了矿热电炉熔池内部纵截面及距熔池表面不同高度处横截面的温度分布状况。由图可见,熔池内渣层和金属层整体呈现高温状态,其中,三根电极下方温度最高,超过1400℃,随着距电极距离的增加,熔池内温度逐渐降低。

为验证计算结果的准确性,在炉壁表面不同位置处设置测温点,通过对比不同测温点处计算值与



(a) 电极附近区域



(b) 熔池部分

图6 焦耳热密度分布图

电磁力的搅拌会使熔池靠近炉体壁面处出现局部速度增大的现象,从而增加高温熔体对壁面的侵蚀。

试验值,对计算结果的准确性进行验证。如图11所示,测温点1、2分布于炉体外表面,通过红外测温仪可以测得点1、2处温度值;测温点3设置在炉壁耐火材料内部,通过预置热电偶可以测得点3处温度值。不同测温点处计算值与试验值列于表2。由表可见,不同测温点处计算值与试验值间相对误差最大为13.66%,满足工程计算的误差允许范围。

4 结论

通过建立三相矿热电炉三维仿真模型,对炉内

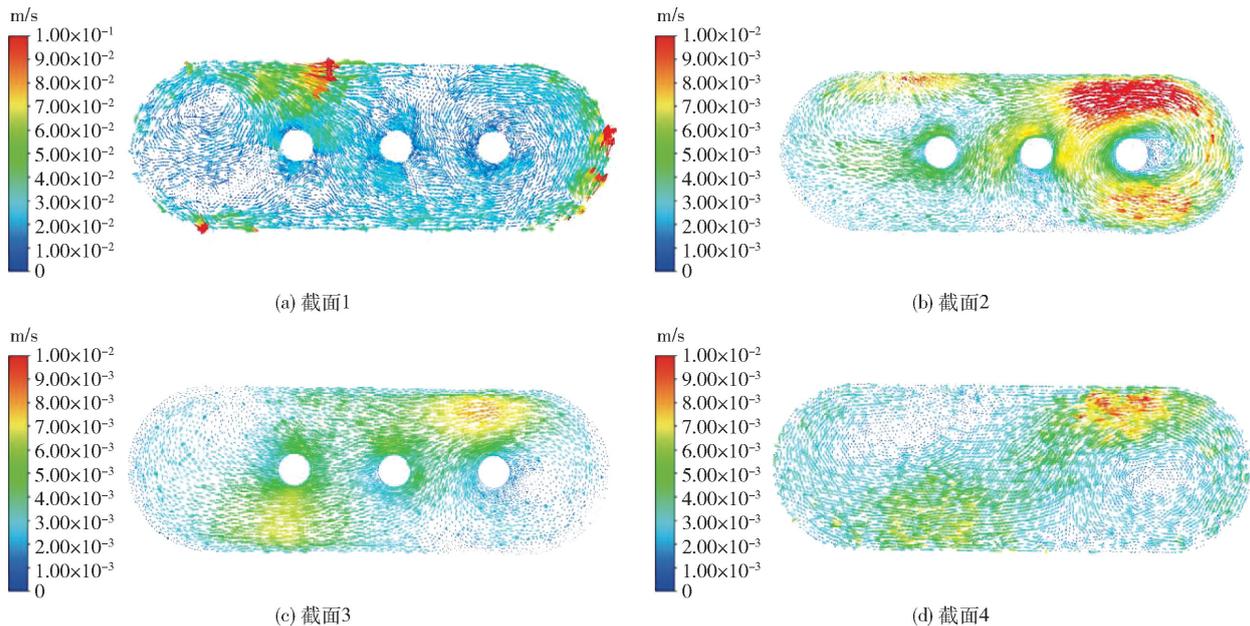


图7 电磁力作用下速度矢量分布图

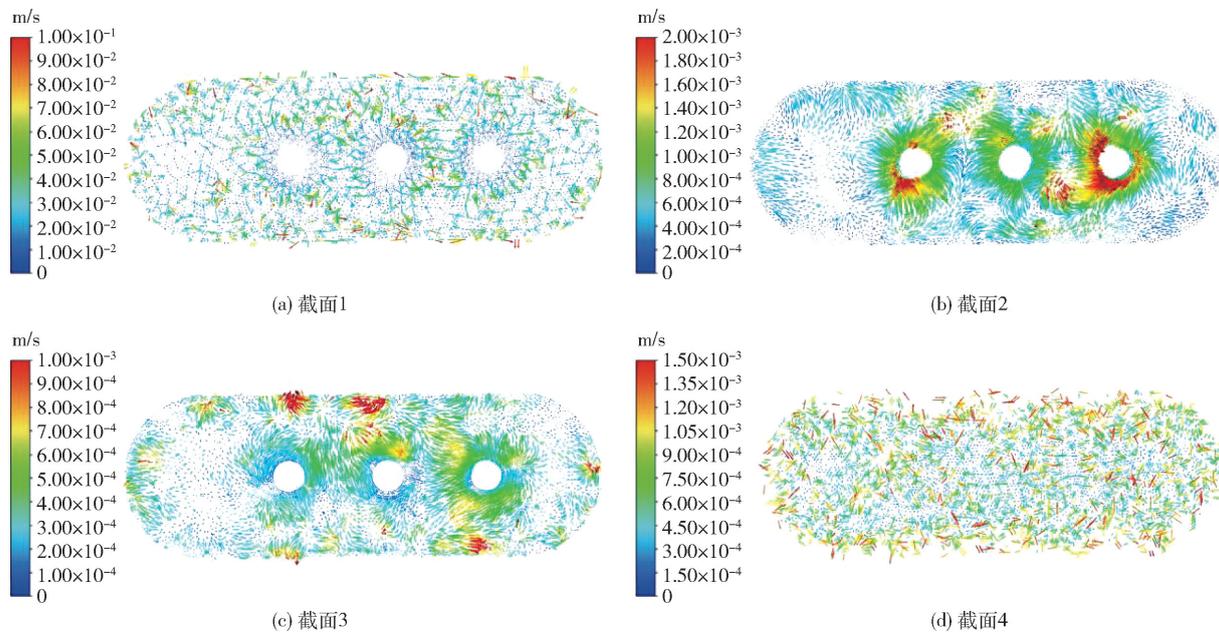


图8 浮力作用下速度矢量分布图

表2 测温点计算值与试验值对比

测温点	测量值/℃	计算值/℃	相对误差/%
P1	192.5	218.8	13.66
P2	69.5	76.1	9.50
P3	181.3	164.7	9.16

电磁场、流场、温度场进行分析,得到熔池内磁感应强度、电磁力和加热功率密度的分布规律,以及

电磁力搅拌作用下流场和温度场的分布,主要结论如下:

(1)电磁场方面,磁感应强度、电磁力和焦耳热密度的最大值均出现在电极区域,是熔池内电极附近区域温度最高的主要原因;

(2)流场方面,电磁力对熔体的搅拌作用显著,施加电磁力后,熔体流速增加。电磁力的搅拌会使熔池靠近炉体壁面处出现局部速度增大的现象,从

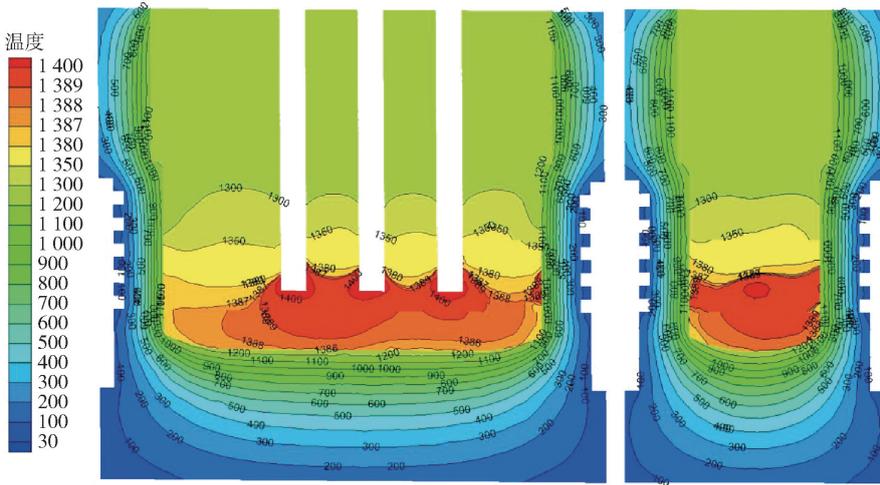


图9 CR炉温度场分布

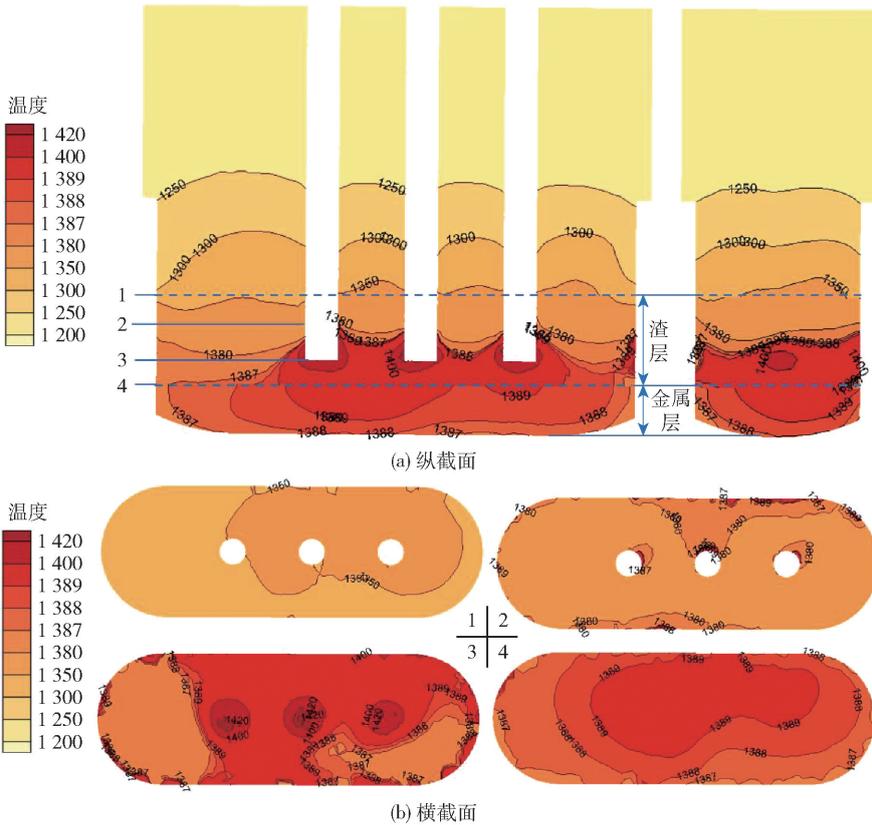


图10 炉内温度场

而增加高温熔体对壁面的侵蚀。

(3)温度场方面,熔池内电极底部区域温度最高,随着距电极距离的增加,熔池内温度逐渐减小。通过数值模拟所得温度场计算结果与试验结果吻合良好,证明了该计算方法的可靠性。

[参考文献]

- [1] 王振,王宁会,李铁. 直流电弧炉内电弧等离子体流动与传热分析[J]. 大连理工大学学报,2012,52(4):582-588.
- [2] Wang Z, Fu Y, Wang N, et al. 3D numerical simulation of electrical arc furnaces for the MgO production[J]. Journal of

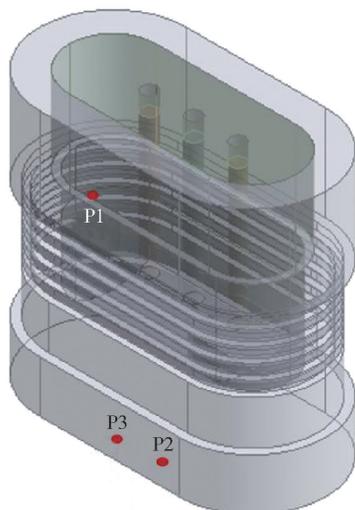


图 11 测温点分布示意图

Materials Processing Technology, 2014, 214 (11) : 2284 - 2291.

- [3] 王子坤,李拓文,李宝宽. 矿热炉内镍铁还原过程电流密度分布与温度场的有限元分析[J]. 材料与冶金学报, 2013, 12(3) : 177 - 184.
- [4] 孙亚娟. 工业硅生产过程的热力学优化分析及炉内传热过程数值模拟研究[D]. 昆明: 昆明理工大学, 2014.
- [5] 董艳奇, 马文会, 魏奎先, 等. 工业硅炉电磁场和温度场的数值模拟[J]. 昆明理工大学学报: 自然科学版, 2016, 41(5) : 8.
- [6] 姜文婷, 魏奎先, 吕国强, 等. 工业硅冶炼矿热炉内起弧过程数值模拟[J]. 有色金属工程, 2021, 11(7) : 9.
- [7] 李东波, 梁帅表, 郭亚光. 高效环保短流程炼铜新技术——“一担挑”炼铜法[J]. 有色金属(冶炼部分), 2018(3) : 1 - 5.

Numerical Simulation of Electromagnetic Field, Flow field and Temperature Field in Arc Furnace with Three Electrodes

ZHANG Si-hong, YAO Xin, GUO Tian-yu, LI Dong-bo

Abstract: In order to master the flow and heat transfer mechanism of the molten pool of the arc furnace with three electrodes under the action of electromagnetic stirring, the electromagnetic field, flow field and temperature field in the molten pool were simulated and analyzed by using the multi-physical field coupling simulation model, and the simulation method was verified by combining the test results. The results show that the maximum values of magnetic induction intensity, electromagnetic force and Joule heat density in the molten pool occur in the electrode area, which is the main reason why the highest temperature in the area is near the electrode in the molten pool; After the electromagnetic force is applied, the local velocity of the melt near the furnace wall increases, which facilitates the corrosion of the high-temperature melt to the wall. The temperature field calculated by simulation is in good agreement with the test results, and the maximum error is not more than 13.66%, which proves the reliability of the simulation method.

Key words: arc furnace; numerical simulation; multi-physical field coupling

