

冶炼电孤炉多物理场耦合仿真分析及结构优化

郭天宇 姚心 王成成 曹珂菲

(中国恩菲工程技术有限公司,北京 100038)

[摘要] 针对某项目贵金属冶炼电炉耐火材料损耗过快,极大影响生产效率的问题,通过构建三维多物理场耦合仿真模型,对电弧炉内电磁场和温度场进行模拟分析,明晰冶炼电孤炉内的传热机制并优化其水冷设计。通过 Maxwell 与 Comsol 两种电磁场仿真软件计算结果的对比,保证了计算的准确性。仿真结果表明,熔池电极以上部分,电极两侧磁感应强度最大,由内向外逐渐减小;熔池电极以下部分,磁感应强度由内向外逐渐增大。加热功率密度主要集中在电极区域,熔池内加热功率约占总加热功率的 98%,炉壁温度随炉壁与熔池距离的增加而逐渐减小。针对铜水套上部外壁面温度过高的问题,提出了优化铜水套设计的解决方案。通过增加相邻铜水套之间的距离,炉壁局部过热点温度由 452 °C 降低为 277 °C,水套冷却水进出口温差增大了 9.45%,降低了耐火材料消耗,提高了生产效率。

[关键词] 电孤炉; 磁场; 温度场; 流场; 数值模拟; 多物理场耦合

[中图分类号] TF806.6 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 2097-2423(2024)06-0058-09

DOI: 10.19610/j.cnki.cn10-1873/lf.2024.06.009

0 前言

有色金属冶炼是能源消耗和碳排放大户,减少冶炼过程碳排放是实现“碳达峰”与“碳中和”目标的重要抓手。与传统高炉-转炉长流程冶炼方式相比,电孤炉熔炼具有工艺流程短、能源消耗低和碳排放量小等优势。推动电孤炉低碳高效冶炼技术进步,有利于实现中国有色工业可持续发展目标。

然而,电孤炉内的生产是气、液、固和电弧等离子体多相并存,电磁场、流场及温度场高度耦合的复杂过程,直接测量冶炼过程炉体内部的温度分布难度大。随着计算技术及计算机硬件水平的不断提升,数值模拟技术被引入电孤炉内部多物理场耦合仿真的研究中。Moghadam 等^[1] 建立了一个二维数

学模型,用于描述硅铁交流电孤炉内的传热和流体流动,并研究了电流和电弧长度对熔池内流场和温度分布的影响。王振等^[2] 以电熔镁工业生产为背景,利用 ANSYS 有限元分析软件,研究了电孤炉温度场、流场、压力场和电势的分布,以及电流对熔池表面等效热通量的影响。王子坤等^[3] 建立了电孤炉熔炼镍铁过程的三维多物理场仿真模型,通过将电弧按等效电阻处理,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仿真计算。张思弘等^[4] 采用多物理场耦合模型,对熔池内电磁场、流场及温度场进行仿真分析,获得了电磁力作用下熔体流动对壁面的侵蚀规律。刘鹏等^[5] 建立了瞬态三维电孤炉数学模型,用于分析镍铁冶炼过程中的电磁-温度-组分多物理场的分布规律,获得了不同电极插入深度对温度分布和金属氧化物转化率的影响。

上述相关研究表明,对电孤炉的生产过程进行数值模拟仿真,不仅能够清晰地展现炉内高温熔炼过程,还能够获得不同操作及结构参数对熔炼过程流动及传热的影响规律。本文以某贵金属冶炼电孤炉生产过程为背景,建立基于多物理场耦合的全三维模型,获得电孤炉内磁感应强度、电流密度、加热功率密度和温度的分布规律,并根据温度分布特性优化电孤炉结构。

[收稿日期] 2024-10-24

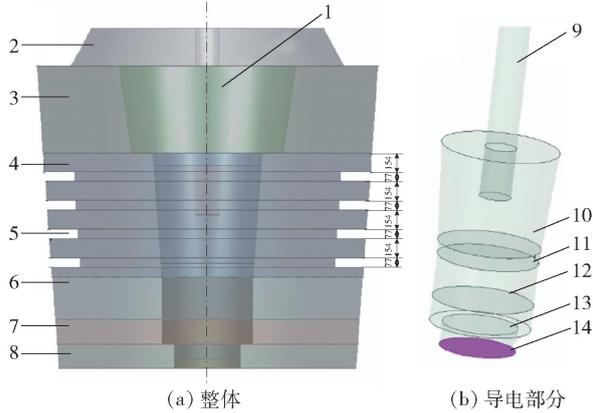
[作者简介] 郭天宇(1988—),黑龙江省人,博士,高级工程师,主要从事有色矿冶数字化、智能化应用研究工作。

[引用格式] 郭天宇,姚心,王成成,等. 冶炼电孤炉多物理场耦合仿真分析及结构优化[J]. 绿色矿冶,2024,40(6): 58-66.

GUO Tianyu, YAO Xin, WANG Chengcheng, et al. Multi-physical field coupling simulation and structural optimization of smelting electric arc furnace[J]. Sustainable Mining and Metallurgy, 2024, 40(6): 58-66.

1 物理模型

以某贵金属冶炼电弧炉生产过程为研究对象进行三维仿真建模。如图1所示,该三维电弧炉模型主要包括:气相、水冷炉盖、铬刚玉20#砖、铬刚玉30#砖、铜水套、铬刚玉30#砖、刚玉捣打料、高铝砖、石墨电极(阳极)、渣层、金属层、导电砖、导电糊和水冷底电极(阴极)。



1 - 气相; 2 - 水冷炉盖; 3 - 铬刚玉20#砖; 4 - 铬刚玉30#砖; 5 - 铜水套; 6 - 铬刚玉30#砖; 7 - 刚玉捣打料; 8 - 高铝砖; 9 - 石墨电极(阳极); 10 - 渣层; 11 - 金属层; 12 - 导电砖; 13 - 导电糊; 14 - 水冷底电极(阴极)

图1 电弧炉几何模型

2 数学模型

2.1 基本假设

建立电弧炉的数学模型时,由于熔池内部的物理现象极其复杂,需要根据直流电弧炉冶炼实际过程和计算需求对其进行假设。

1) 电场属于稳定场,忽略熔池流动对电场的影响。

2) 不考虑导电母线、水冷系统和其他短网设备中电流对电磁场的干扰。

3) 炉内温度远高于居里点,模型中各实体的相对磁导率均为1或接近1。

4) 电弧炉内主要发生贵金属的转移和富集,在仿真模拟过程中未考虑化学反应热。

2.2 控制方程

2.2.1 电磁场

电弧炉内的电磁场可以由一组麦克斯韦方程组来描述,其控制方程见式(1)~(4)。

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

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

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

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

式中, \mathbf{H} 为磁场强度,A/m; \mathbf{J} 为传导电流密度矢量,A/m²; \mathbf{D} 为电位移矢量,C/m²; \mathbf{E} 为电场强度,V/m; \mathbf{B} 为磁感应强度,T; ρ 为电荷体密度,C/m³。

电磁场本构关系见式(5)~(6)。

$$\mathbf{H} = \frac{1}{\mu} \mathbf{B} \quad (5)$$

$$\mathbf{D} = \varepsilon \mathbf{E} \quad (6)$$

式中, μ 为磁导率,H/m; ε 为电容率,F/m。

电流连续性方程见式(7)。

$$\nabla \mathbf{J} = 0 \quad (7)$$

在分析和计算电场和磁场问题时,为了求出电场和磁场的值,会经常引用位函数作为辅助量,减少未知数的个数,使问题得到简化,通常是定义两个量来将电场和磁场变量分开,这两个量分别是矢量磁势 \mathbf{A} 和标量电势 φ ,数学定义见式(8)~(9)。

$$\nabla \mathbf{A} = \mathbf{B} \quad (8)$$

$$\mathbf{E} = -\nabla \varphi \quad (9)$$

式中, \mathbf{A} 为矢量磁势,Wb/m; φ 为标量电势,V。

将矢量磁势和标量电势代入麦克斯韦方程中,推导出两个独立的电场和磁场的偏微分方程,便于求解。

$$\nabla^2 \mathbf{A} - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \mathbf{A}}{\partial t^2} = -\mu \mathbf{J} \quad (10)$$

$$\nabla^2 \varphi - \mu \varepsilon \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = -\frac{\rho}{\varepsilon} \quad (11)$$

通过电场和磁场偏微分方程求解电场强度和电位移矢量,根据欧姆定律求得电流密度,根据电流密度可求得单位体积焦耳热。欧姆定律见式(12)。

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \quad (12)$$

式中, σ 为电导率,S/m。

单位体积焦耳热见式(13)。

$$Q_J = \mathbf{J} \mathbf{E} = \frac{\mathbf{J} \mathbf{J}}{\sigma} \quad (13)$$

2.2.2 流场与温度场

电弧炉的传热过程采用质量、动量和能量控制方程来描述。

2.2.2.1 质量控制方程

质量控制方程是质量守恒定律在流体力学中的具体表述形式,其数学表达为描述守恒量传输行为的偏微分方程。数值仿真的计算结果必须满足连续

性方程,其具体形式见式(14)。

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (14)$$

式中, ρ 为熔体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \vec{v} 为速度适量, m/s 。

2.2.2.2 动量控制方程

动量控制方程是动量定理在流体力学中的具体应用,其原理为作用在物体上的合外力的大小等于物体在力作用方向上的动量的变化率。其具体的表达式见式(15)。

$$\frac{\partial(\rho \vec{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu(\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + F_V \quad (15)$$

式中, p 为微元体内流体静压, Pa ; \vec{g} 为微元体所受重力加速度, m/s^2 ; F_V 为微元体所受外部体积力, N/m^3 。

2.2.2.3 能量控制方程

能量控制方程是分析计算热量传递的基本方程,其通常表述为流体微元的内能增量等于通过热传导进入微元体的热量、微元体中产生的热量及周围流体对微元体所作功之和。能量方程的数学形式见式(16)。

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v} T) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla T \right) + S_T \quad (16)$$

式中, k 为有效导热系数, $\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$; S_T 为体积热源, W/m^3 。

2.2.2.4 辐射模型控制方程

在高温高压电弧中,热辐射是电弧等离子体中非常重要的热交换方式。在电弧炉的温度场仿真模拟中采用 P1 模型来计算热辐射的传递过程。对于

具有吸收、发射、散射性质的介质,在位置 \vec{s} 的辐射散射传播方程(RTE)见式(17)。

$$\frac{dI(\vec{r}, \vec{s})}{d_s} + (a + \sigma_s) I(\vec{r}, \vec{s}) = an^2 \frac{\sigma^4}{\pi} + \frac{\sigma_s}{4\pi} \int_0^{4\pi} I(\vec{r}, \vec{s}') \Phi(\vec{s}, \vec{s}') d\Omega' \quad (17)$$

式中, \vec{r} 为位置向量; \vec{s} 为方向向量; \vec{s}' 为散射方向; a 为吸收系数; n 为折射系数; σ_s 为散射系数; σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数($5.672 \times 10^{-8} \text{ W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}$); I 为辐射强度, W/sr ; Φ 为相位函数; Ω' 为空间立体角, sr 。

2.3 物性参数与边界条件

2.3.1 物性参数

熔体分为金属相和渣相,将金属相简化为 Cu, 将渣相简化为 31.8% SiO_2 - 39% Al_2O_3 - 29.2% CaO 。仿真模拟过程中,金属相物性参数参考文献^[6]得到。渣相黏度和比热容由 FactSage 软件计算,密度和热导率参考文献^[7]得到。

炉壁材料共 5 种,分别为:铬刚玉 20[#]砖、铬刚玉 30[#]砖、刚玉捣打料、高铝砖和导电砖。炉壁材料密度和比热容参考文献^[8-10]得到(表 1);导电砖采用镁碳砖,其热导率参考文献^[11]得到;铬刚玉、刚玉捣打料及高铝砖热导率由厂家提供,具体表达式见表 2。

2.3.2 边界条件

1) 电弧炉阳极的电压为给定值,电极阴极电压值为 0 V。

2) 炉体表面除了与周围空气对流换热,还会以热辐射的形式向周围环境散热。因此,设置炉体外壁面为对流和辐射边界。

表 1 炉壁密度和比热容

炉壁材料	铬刚玉 20 [#] 砖	铬刚玉 30 [#] 砖	刚玉捣打料	高铝砖	导电砖
密度/ $(\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$	3.4	3.5	3.1	2.725	3.06
比热容/ $(\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1})$	858	858	800	837	1283

表 2 炉壁热导率

材料名称	铬刚玉	刚玉捣打料	高铝砖
热导率/ $(\text{W} \cdot (\text{m} \cdot \text{K})^{-1})$	4.7 + 0.000 17T	1.7 + 0.000 29T	0.662 + 0.000 087T

注: T 为环境温度, K 。

3 结果分析与讨论

3.1 Maxwell 与 Comsol 仿真结果对比

为保证计算的准确性,分别运用 Maxwell 和

Comsol 多物理场仿真软件进行电弧炉电磁场仿真,并对仿真结果进行对比分析。两种通用电磁仿真软件的仿真结果趋势及对比如图 2 所示。由图 2 可知,除了电压为 77 V 时两者的误差为 10.4% 以外,

其余电压下的误差均在 5.5% 以内。由于工作电压基本在 100 V 以上,可以认为不同电压工况下两种软件计算的加热功率结果和趋势一致。

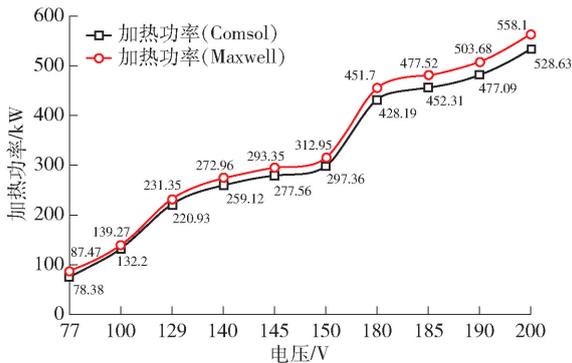


图2 加热功率与电压的关系

Maxwell 软件是业内认可的电磁场仿真软件,并得到广泛应用,因此本次电磁场仿真采用 Maxwell 软件进行计算。温度场仿真软件采用 Flunet。

3.2 电磁场分布

研究过程中对不同边界条件下的电弧炉电磁场进行了仿真,其仿真结果分布状况类似,因此仅对输入电压 140 V 的工况进行具体分析说明。

电流密度分布如图 3 所示。由图 3 可知,电极的最大电流密度为 4.17×10^4 A/m²,即电流为 2 045.46 A;熔池内最大电流密度为 1.39×10^4 A/m²,主要分布在电极的下方。

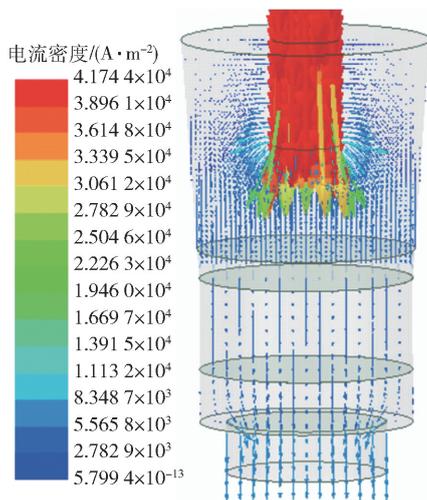


图3 电流密度分布

磁感应强度分布云图如图 4 所示。由图 4 可以看出,最大磁感应强度分布在电极两侧,为 3.17×10^{-3} T。熔池电极以上部分,电极两侧磁感应强度最大,然后由内向外逐渐减小;熔池电极以下部分,磁感应强度由内向外逐渐增大。

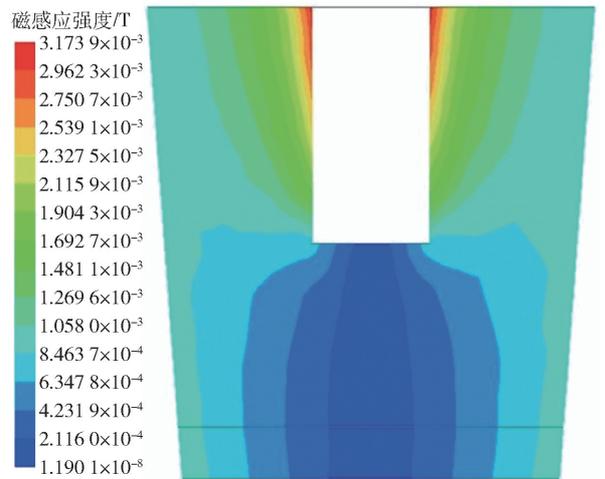


图4 磁感应强度分布云图

熔池纵截面电磁力分布图如图 5 所示。从图 5 可以看出,熔池内部电磁力方向指向轴心,熔池液面电磁力方向垂直向下。电磁力大小的分布与磁感应强度分布类似,熔池电极以上部分电极两侧电磁力最大,然后由内向外逐渐减小;熔池电极以下部分电磁力由内向外逐渐增大。

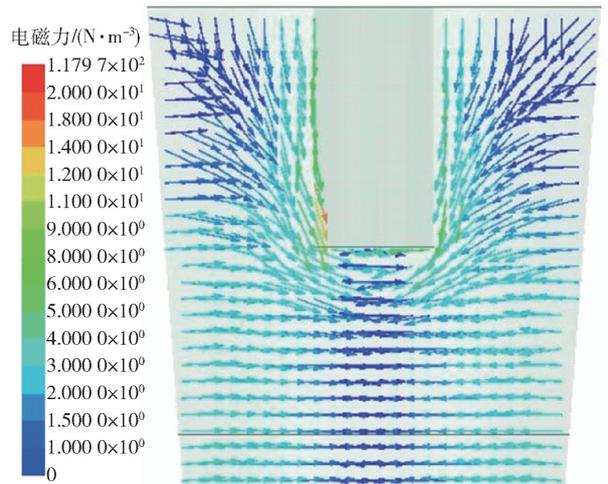


图5 熔池纵截面电磁力分布图

电炉加热功率密度云图如图 6 所示。从图 6 可以看出,加热功率密度主要集中在电极区域,最大为 1.16×10^7 W/m³,壁面的加热功率密度较小;熔池越往上,加热功率密度越小;电极底端熔体区加热功率密度分布梯度较大,而电极区域外加热功率密度分布基本不变。通过计算,总加热功率为 272.96 kW 时,熔池内加热功率为 268.82 kW,约占总加热功率的 98%。

3.3 温度场分布

研究过程中对不同加热功率下的电弧炉温度场

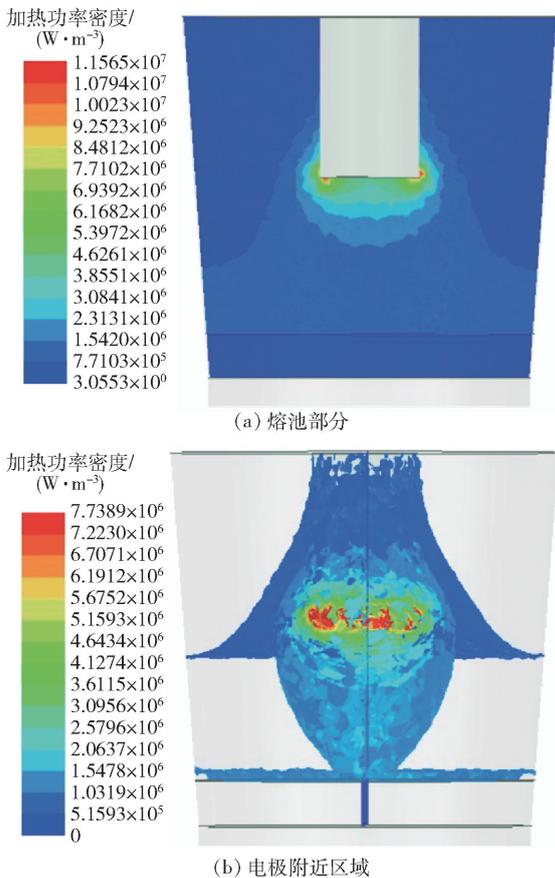


图6 加热功率密度云图

进行了仿真,其分布状况类似,因此仅对加热功率 272.96 kW 时的情况进行具体分析说明。图 7 为电弧炉加热功率 272.96 kW 时电弧炉整体及炉体内部温度云图。由图 7 可见,熔池内渣层和金属层整体呈高温状态,温度高达 1 745 ℃。

距离熔池中心越远,温度越低。由于铜水套冷却降温作用,其周围外壁面平均温度为 62 ~ 71 ℃;铜水套下部外壁面温度为 98 ~ 151 ℃;铜水套上部

外壁面温度过高,最高为 452 ℃。

为便于观察,在图 7 所示 1~4 位置处设置横截面,各横截面相应温度云图如图 8 所示。由图 8 可见,与纵截面图温度分布状况类似,熔池内依然呈现整体高温的状况,距离熔池中心越远,温度逐渐减小。

当电磁场输出功率为 272.96 kW 时,电弧炉相应的输入功率为 270.00 kW。表 3 分别列出了输入功率为 220.00 kW、248.00 kW、270.00 kW 和 298.70 kW 四种工况下电弧炉温度场的仿真结果。

由表 3 可知,当输入功率为 220.00 kW 时,不足以维持炉内熔体温度,熔体温度降到 1 590 ℃时还未达到热量平衡,呈继续降温的趋势;当输入功率为 248.00 kW 时,炉体达到热量平衡时的炉内熔体最高温度为 1 580 ℃,低于工艺所需温度 1 650 ℃;当输入功率分别为 270.00 kW 和 298.70 kW 时,炉内熔体最高温度分别为 1 745 ℃和 1 939 ℃,且随着炉壁面对流换热系数的增加,熔体温度逐渐降低。

3.4 铜水套结构优化

在 3.3 节中铜水套上部外壁面出现了局部过热点,最高温度可达 452 ℃,超过了耐火材料对热应力的承受能力,加速了耐火材料的损耗速度。因此,需要对铜水套设计进行优化。基于仿真结果分析,对铜水套设计进行优化,增大铜水套之间的距离,优化前后模型对比如图 9 所示。优化前,相邻两个铜水套间距离为 154 mm,即相隔两块隔热砖;优化后,相邻两个铜水套间距离增加到 231 mm,即相隔三块隔热砖。

当加热功率为 272.96 kW 时,铜水套优化前后温度分布云图如图 10 所示。由图 10 可知,优化后

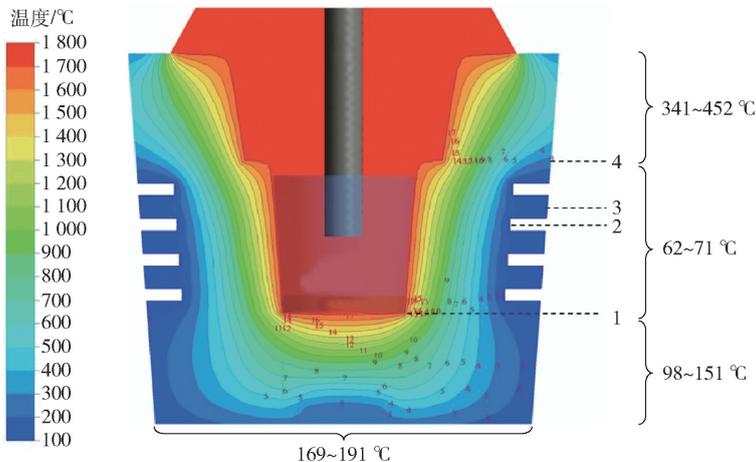


图7 纵截面温度场分布云图

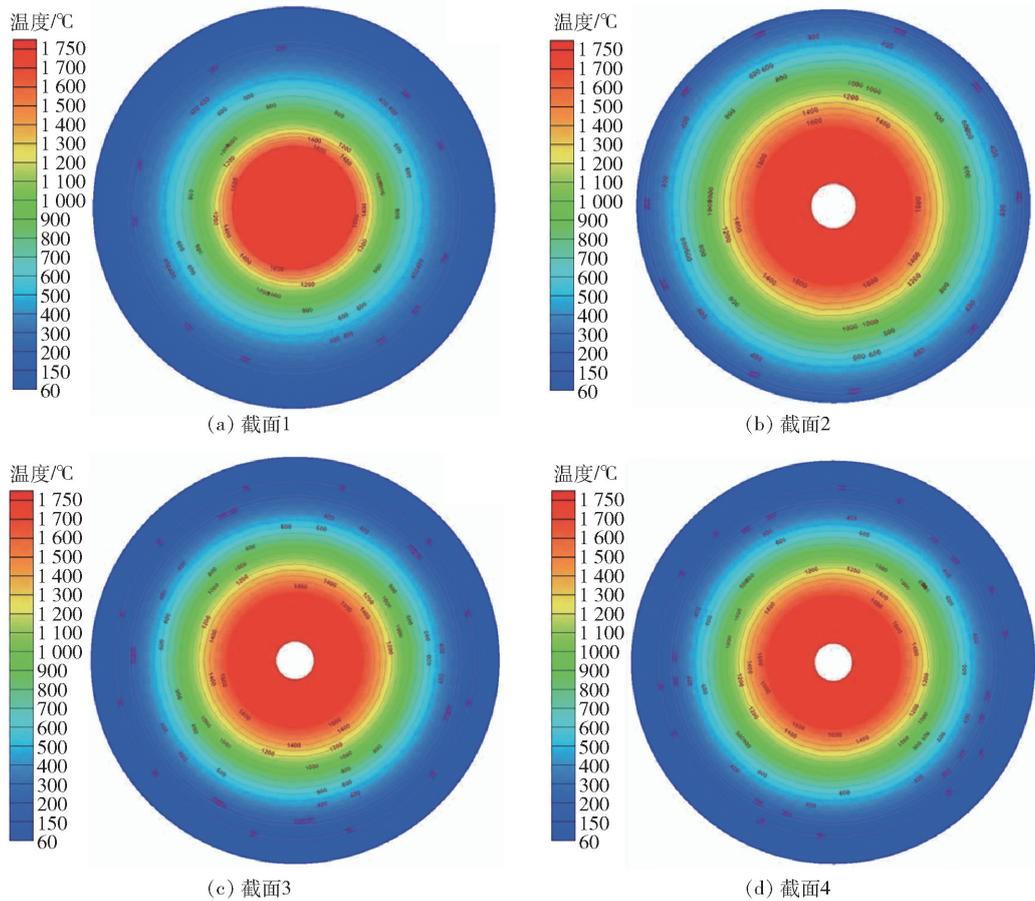


图8 电弧炉横截面温度场分布云图

表3 不同加热功率下温度场仿真结果

输入功率/kW	对流系数/ $W/m^2 \cdot K$	铜水套附近壁面温度/ $^{\circ}C$	位置4的炉壁温度/ $^{\circ}C$	熔体温度/ $^{\circ}C$	热量是否平衡
220.0(129 V)	5	67	406	1 590	否,继续降温
248.0(134 V)	5	66	383	1 559 ~ 1 580	是,温度保持不变
270.0(140 V)	5 ~ 10	62 ~ 71	341 ~ 452	1 674 ~ 1 745	是,温度保持不变
298.7(147 V)	5 ~ 10	66 ~ 76	395 ~ 524	1 863 ~ 1 939	是,温度保持不变
298.7(147 V)	25	52	233	1 787 ~ 1 810	是,温度保持不变

铜水套附近壁面温度梯度增大,说明铜水套降温效果增强。熔池内熔体温度由优化前的 $1\ 674 \sim 1\ 745\ ^{\circ}C$ 降为优化后的 $1\ 597 \sim 1\ 741\ ^{\circ}C$,且优化后气相与金属相温度均显著降低;铜水套上部外壁面温度也由优化前的 $341 \sim 452\ ^{\circ}C$ 降为优化后的 $224 \sim 277\ ^{\circ}C$;铜水套附近壁面温度由优化前的 $62 \sim 71\ ^{\circ}C$ 降为优化后的 $53 \sim 57\ ^{\circ}C$ 。为便于观察,在图 10 铜水套优化后 1~4 位置处设置横截面,各截面相应温度云图如图 11 所示。由图 11 可知,铜水套优化后,沿电弧炉的径向,固体炉壁的温度均有所降低,降低了耐火材料的损耗速度。

当加热功率为 $272.96\ kW$,即相应输入功率 $270.00\ kW$ 时,铜水套优化前后的电弧炉铜水套换热效果见表 4。由表 4 可知,铜水套优化后降温效果增强。铜水套换热量由优化前的 $81.90 \sim 88.70\ kW$ 增加为优化后的 $92.70 \sim 96.60\ kW$,相应的进出口冷却水温差增大了 9.45% 。除第 1 层铜水套外,优化后第 2~第 4 层铜水套换热量均有所增大,特别是第 2、第 3 层,其换热量增加 $17.78\% \sim 26.49\%$ 。

4 结论

1)建立了直流电弧炉的三维电磁场模型,对电

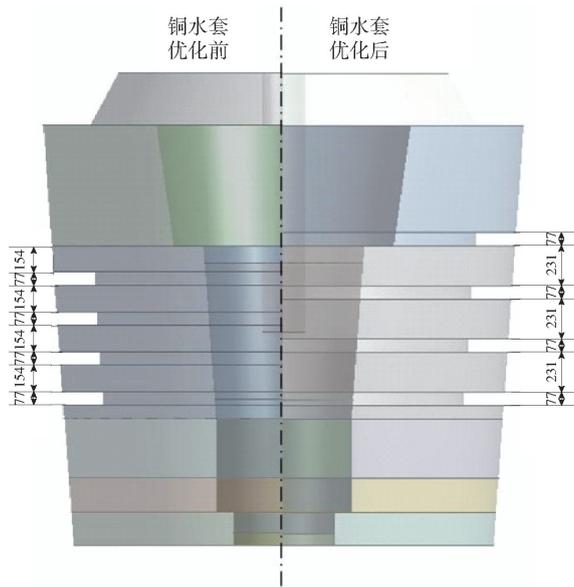


图9 铜水套优化前后模型对比

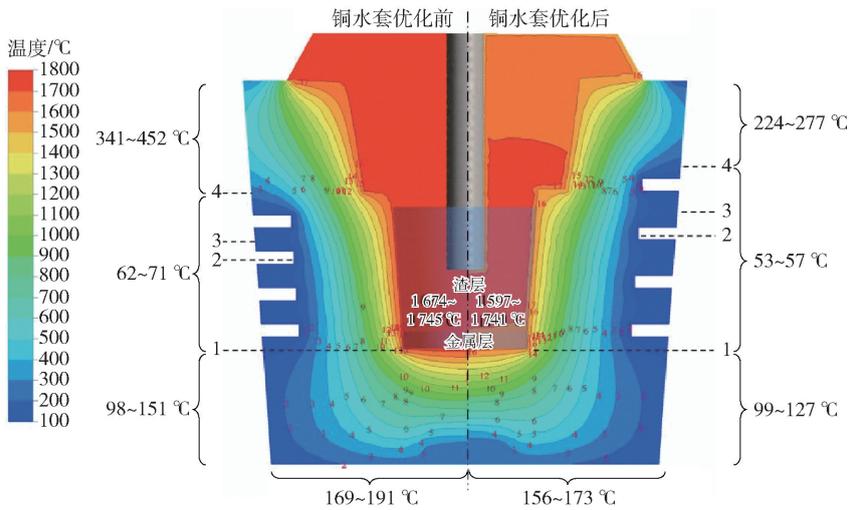


图10 铜水套优化前后电弧炉温度场对比

表4 结构优化前后输入功率为270 kW(140 V)铜水套换热效果(4层铜水套顺序由下至上)

电炉结构	对流系数/ (W/m ² ·K)	铜水套换热/ kW	1层铜水套 换热/kW	2层铜水套 换热/kW	3层铜水套 换热/kW	4层铜水套 换热/kW
优化前	5~10	81.9~88.7(水温升1.27 °C)	17.9~19.4	13.0~13.5	15.1~15.7	36.0~40.1
优化后	5~10	92.7~96.6(水温升1.39 °C)	18.2~19.3	15.6~15.9	19.1~19.5	39.8~41.9

弧炉进行电磁场仿真分析,分析了熔池内磁感应强度、电磁力、加热功率等参数的分布规律。在输入电压140 V工况,下熔池内最大加热功率密度为 1.16×10^7 W/m³,且主要集中在电极区域,总加热功率为272.96 kW。

2)建立了直流电弧炉的三维温度场模型,分析了不同工况下熔池与炉壁的温度场分布状况。结果

表明,随着输入功率的增加,熔池内温度逐渐增大。当输入功率不变时,随着炉壁面对流换热系数的增加,熔体温度逐渐降低。当输入功率增大到270.00 kW时,炉体达到热平衡时的熔体温度为1674~1745 °C,满足工艺所需温度1650 °C。

3)针对铜水套上部外壁面存在局部过热点(温度过高)所导致内衬损耗过快的问题,对铜水套安

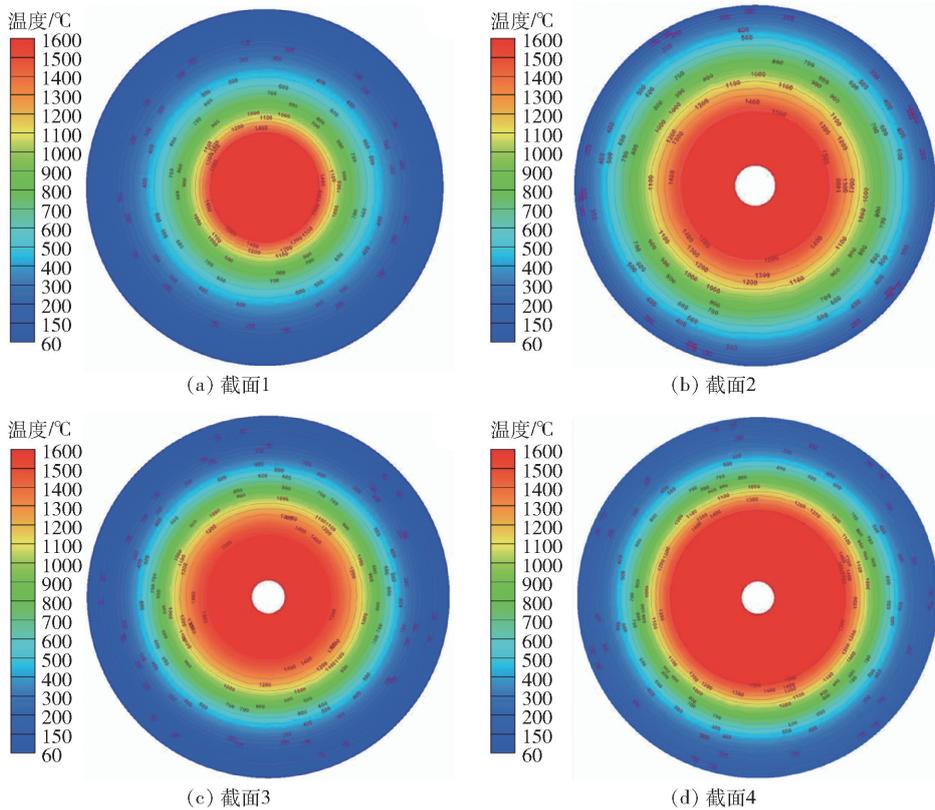


图 11 铜水套优化后电弧炉横截面温度场分布云图

装位置进行优化,将两相邻铜水套间距离由 154 mm 增加到 231 mm。铜水套上部外壁面温度由优化前的 341 ~ 452 °C 降为优化后的 224 ~ 277 °C。

[参考文献]

- [1] MOGHADAM M M, SEYEDEIN S H, ABOUTALEBI M R. Fluid Flow and Heat Transfer Modeling of AC Arc in Ferrosilicon Submerged Arc Furnace [J]. Journal of Iron and Steel Research (International), 2010, 17(9): 14 - 18.
- [2] 王振,王宁会,李铁. 直流埋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.
- [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, 217.
- [4] 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.
- [5] 刘鹏,杨祎晗,李茂生,等. 三相埋弧炉多物理场数值

- 模拟分析 [J/OL]. 工程科学与技术, 2024(6), 1 - 11 [2024 - 11 - 20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1773.tb.20240607.1306.006.html>.
- [6] 饭田孝道(日),罗格里克. 格斯里(加). 液态金属的物理性能 [M]. 北京:科学出版社, 2006.
- [7] MILLS K C, YUAN L, JONES R T. Estimating the physical properties of slags [J]. Journal of the South African Institute of Mining and Metallurgy, 2011, 111(10): 649 - 658.
- [8] 中华人民共和国工业和信息化部. 铬钢玉砖: YB/T 4350—2013 [S]. 北京:冶金工业出版社, 2013.
- [9] 国家市场监督管理总局, 国家标准化管理委员会. 高铝砖: GB/T 2988—2023 [S]. 北京:中国标准出版社, 2024.
- [10] 李志辉,朱荣,刘润藻,等. 氧气底吹转炉底吹喷嘴传热数值模拟研究 [J]. 工业加热, 2018, 47(4): 51 - 55.
- [11] 朱伯铨,张文杰. 低碳镁碳砖的研究现状与发展 [J]. 武汉科技大学学报(自然科学版), 2008, 31(3): 233 - 237.

Multi-physical Field Coupling Simulation and Structural Optimization of Smelting Electric Arc Furnace

GUO Tianyu, YAO Xin, WANG Chengcheng, CAO Kefei
(China ENFI Engineering Corporation, Beijing 100038, China)

Abstract: Aiming at the problem that the refractory material loss of a precious metal smelting electric furnace is too fast, which greatly affects the production efficiency, a three-dimensional multi-physical field coupling simulation model was constructed to simulate and analyze the electromagnetic field and temperature field in the electric arc furnace, so as to clarify the heat transfer mechanism in the smelting electric arc furnace and optimize its water cooling design. By comparing the calculation results of Maxwell and Comsol electromagnetic field simulation software, the accuracy of the calculation was ensured. The results show that the magnetic induction intensity on both sides of the electrode is the largest in the upper part of the molten pool electrode, and gradually decreases from the inside to the outside. In the lower part of the molten pool electrode, the magnetic induction intensity gradually increases from the inside to the outside. The heating power density is mainly concentrated in the electrode area, and the heating power in the molten pool accounts for about 98% of the total heating power. The furnace wall temperature gradually decreases with the increase of the distance between the furnace wall and the molten pool. Aiming at the problem of high temperature on the upper outer wall of the copper water jacket, a solution to optimize the design of the copper water jacket was proposed. By increasing the distance between the two copper water jackets, the temperature of the local high point of the furnace wall is reduced from 452 °C to 277 °C, and the temperature difference between the inlet and outlet of the water jacket cooling water is increased by 9.45%, which reduces the consumption of refractory materials and enhances the production efficiency.

Key words: electric arc furnace; electromagnetic field; temperature field; flow field; numerical simulation; multi-physical coupling

(上接第 57 页)

arsenic matte, high arsenic content of black copper produced by smelting, and large amount of intermediate return material treatment. In this paper, the low temperature oxidation process of bottom-blown furnace was proposed. The copper scum was directly added to the bottom-blown furnace for smelting. No longer adding any auxiliary materials to make slag, that is, no longer artificially manufacturing high melting point FeO-SiO₂-CaO slag type, but choosing PbO slag type with relatively low melting point, and the furnace temperature was reduced to 750 °C. Using low temperature oxidation process, the smelting atmosphere in the bottom-blown furnace was changed from the traditional reducing atmosphere to the weak oxidizing atmosphere, and the production of arsenic matte was finally eliminated. At the same time, the recovery rate of tin was increased from 18.13% to 93.23%, the smelting slag type was changed from the original high melting point FeO-SiO₂-CaO slag type to the low melting point PbO slag type, the smelting temperature was reduced from 1 100 °C to about 750 °C, the smelting energy consumption was greatly reduced, the processing cost of copper scum smelting was reduced by more than 60%, the labor intensity was greatly reduced, and the production process was more smooth.

Key words: copper scum; arsenic matte; low temperature oxidation; lead bullion; tin