

doi: 10.3969/j.issn.2095-1744.2022.09.009

冶炼电弧炉腔内三相交流电弧热导过程研究

刘 鹏^{1,2}, 于骞翔¹, 张 弛³, 张元生^{1,2}

(1. 北京矿冶研究总院, 北京 100160;

2. 北京北矿智能科技有限公司, 北京 102628;

3. 北京科技大学 土木与资源工程学院, 北京 100083)

摘 要:针对超高温电弧炉腔内温度场分布及热量传导规律难以准确表征的问题,借助傅立叶热传导定律和牛顿冷却定律,结合COMSOL 仿真试验,对冶炼炉腔内电弧各部分热量的产生过程、热量分布、热量传导及流动规律进行深入分析。以铍铜合金冶炼过程为例,计算了沿石墨电极轴向热传导量和沿横向热传导量。结果表明:电弧炉口火焰温度可反映炉腔内电弧近极段温度,通过炉口火焰参数检测可计算得到炉腔内近极段温度;冶炼炉腔内热量的流动方式服从轴向热导和横向热导两个关键过程,通过降低轴向热导的热量耗散和提高横向热量占比,能够提高电弧炉能源有效利用率。

关键词:电弧炉;电弧热效应;热导过程

中图分类号:TF816

文献标志码:A

文章编号:2095-1744(2022)09-0059-06

Study of Three-phase AC Arc Heat Conductivity Process in the Smelting Arc Furnace Cavity

LIU Peng^{1,2}, YU Qianxiang¹, ZHANG Chi³, ZHANG Yuansheng^{1,2}

(1. Beijing General Research Institute of Mining and Metallurgy, Beijing 100160, China

2. BGRIMM Intelligent Technology Co., Ltd., Beijing 102628, China;

3. School of Civil and Resources Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China)

Abstract: To address the problem that it is difficult to accurately characterize the temperature field distribution and heat conduction law in the ultra-high temperature arc furnace cavity, the heat generation process, heat distribution, heat conduction and flow law of each part of the arc in the smelting furnace cavity are analyzed in depth with the help of Fourier's Law of Heat Conduction and Newton's Law of Cooling combined with COMSOL simulation experiments. Taking the beryllium-copper alloy smelting process as an example, the axial heat conduction along the graphite electrode and the lateral heat conduction were calculated. The results show that the flame temperature at the mouth of the electric arc furnace can reflect the temperature of the near-pole section of the arc in the furnace chamber, and the temperature of the near-pole section in the furnace chamber can be calculated by the flame parameter detection at the mouth of the furnace.

Key words: electric arc furnace; arc thermal effect; thermal conductivity process

收稿日期: 2022-06-02

基金项目: 国家科技计划项目(2020IM020300)

Fund: Supported by National Science and Technology Plan Project(2020IM020300)

作者简介: 刘 鹏(1994—), 男, 硕士, 研究方向为设备智能化。

引用格式: 刘鹏, 于骞翔, 张弛, 等. 冶炼电弧炉腔内三相交流电弧热导过程研究[J]. 有色金属工程, 2022, 12(9): 59-64.

LIU Peng, YU Qianxiang, ZHANG Chi, et al. Study of Three-phase AC Arc Heat Conductivity Process in the Smelting Arc Furnace Cavity[J]. Nonferrous Metals Engineering, 2022, 12(9): 59-64.

基于电弧热效应的电弧炉是一种应用于火法冶金的特种设备。在冶金过程中,电弧炉三相电极通常由三相交流电供电,超高电压使石墨电极与物料间气体电离,产生电弧,加热炉内金属。电弧的产生伴随电热能转换,其热效应是炉内物理化学反应的直接热源。持续的正负离子互相撞击,使能量从温度较高部分传至温度较低部分,产生了能量流动,即热导。准确的推导电弧与周围介质的热导规律,特别是电弧产生过程中能量的转换和热量的流动机制,是分析特定冶炼状态的重要前提。此外,由热量传导所表征的温度参数是电弧炉冶炼的关键指标。

电弧炉电弧热效应和热传导过程极为复杂,在钛铜合金等特种金属的冶炼过程中,炉腔内温度可达1500℃以上,产生的热量按照来源可分为焦耳热和辐射热。同时热量在炉腔的传导受多种影响因素制约,因此从试验上直接进行参数检测和温度场构建极其困难。计算机仿真技术的不断成熟为研究超高温冶炼过程的热量传递提供了新的方向,构建热导模型的研究受到行业学者的广泛关注。宋冬冬等^[1]和武振廷^[2]假定电弧为纯电阻元件,研究了电弧的焦耳热计算方法。王丰华^[3]研究了电弧的离子复合产生的辐射热效应。DINULESCU等^[4]通过考虑扩散作用给出了电弧导热的边界层模型,阐明了电弧边界的温度场分布规律;荣陞^[5]基于辐射逆问题对炉膛断面、三维温度场进行重构,并计算介质的弥散辐射系数,描述了燃煤炉腔轴向热量传导过程。上述针对热效应及热传导规律的研究主要聚焦超高温以下的电弧炉,对于超高温电弧炉,由于其炉腔是密闭空间,炉腔内温度场是沿弧柱中心向外扩散分布,并非燃煤炉或焊接电弧的垂直均匀分布,局部的温度场分布和热量传导分析难以完整表征冶炼过程的电弧热效应。

本文从电弧的平面横向和电极的轴向两个方向进行热导分析,综合考虑参与电弧热效应的能量组成。

1 电弧伏安特性

研究电弧伏安特性对计算弧流的焦耳热具有重要意义。电弧电压沿弧长分布不均匀,分为三个区域:近阴极区C、弧柱区Z和近阳极区A^[6],如图1所示。

电弧弧压 U_h 包含近极电压和弧柱电压两部分,其中近极压降 U_0 。在电弧燃烧的任意时刻可认为不变;弧柱区类似于电阻,单位长度弧柱的压降大

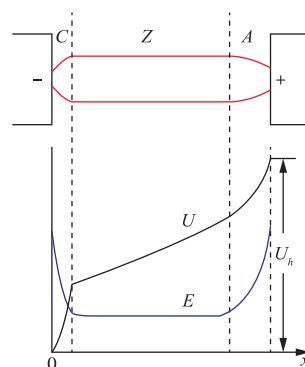


图1 电弧产生及弧压、电场分布

Fig. 1 Arc generation, distribution of arc voltage and electric field

小等于电场强度与弧长的乘积。电弧弧压 U_h 可由式(1)表示。

$$U_h = U_0 + El \quad (1)$$

式(1)中, U_h 表示电弧弧压,V; E 表示电场强度,V/m; l 表示电弧长,m。

在电弧炉冶炼过程中,由于石墨电极和炉底间隙很大,因此一般认为电弧炉电弧属于长弧,即弧柱弧压远大于近极压降。弧柱类似于电阻,其电流热效应产生的温度变化是炉焰温度的来源,弧柱温度较高,一般大于6000K。

电弧炉在稳定状态燃烧时,电弧静态电压电流特性表现为电流强度和电弧长度恒定不变。电弧静、动态伏安特性是电器电弧理论的基础,是理解电弧发生、发展至熄灭的重要手段。冶炼使用的电弧炉基本原理可按照在电弧静态条件下,电弧弧流 I_h^n 、弧压 U_h 和弧长 l 的关系表示,见式(2)。

$$U_h = U_0 + \frac{cl}{I_h^n} \quad (2)$$

式(2)中, U_0 表示近极压降,V; I_h^n 表示电弧弧流,A。

实验参数 c 、 n 受到电极材料、气体介质和气体压力等影响,参数 n 较大程度上影响了静态伏安特性曲线的斜率。该公式表明电弧具有负阻特性,电弧弧流越大,其内部的带电粒子燃烧得越激烈,于是电弧等效电阻越低,电弧弧压参数也就越低。对于相同的电弧电流,电弧弧长越长,它的电弧弧压就越大。这说明在电流不变的情况下,弧长越长,电弧的温度就越低。这也是熄灭电弧的一种方法,即通过电极上升,拉长电弧降温熄弧。对于相同的电弧电压,弧长越长,电弧的电流越大,弧温就越高。电弧温度受电弧电流、电极材料和燃弧介质的影响,并且电弧存在热惯性,温度的升高和降低,必须供给或散

发一定的热量且需要一定的时间。温度和能量变化是在一定时间间隔下进行的过程,需从能量平衡角度确定弧柱温度变化与电弧弧压等变化。近极区的温度受电极材料沸点的限制,低于弧柱温度^[7]。

2 电弧发热功率计算

由电弧伏安特性分析可知,电弧相当于纯电阻性发热元件,电弧发热总功率 P_h 由式(3)表示。

$$P_h = I_h U_h = I_h (U_0 + U_z) \quad (3)$$

式(3)中, P_h 表示电弧发热总功率, W。该公式验证了电弧热量来源,即电极功率 $I_h U_0$ 和由弧柱散发功率 $I_h U_z$ 两部分,其中,电极功率在电弧稳定燃烧时保持不变,弧柱散发功率又可以分为三部分:传导功率 P_{cd} 、对流功率 P_{dl} 、辐射功率 P_{fs} 。电场提供的功率以焦耳热的形式消耗在导电媒质的电阻上。时间内电弧产生的总焦耳热由式(4)表示。

$$Q_h = I_h^2 R_z t \quad (4)$$

式(4)中, R_z 表示弧柱电阻, Ω ; Q_h 表示总焦耳热, J。假定弧柱温度处于某平均值,则弧柱各点电导率相同,弧柱电阻 R_z 见式(3)。

$$R_z = \frac{4\rho_h l}{\pi d^2} \quad (5)$$

式(5)中, ρ_h 为弧柱电阻率, $\Omega \cdot m$; l 为电弧长度, d 为弧柱直径, m 。计算得到电弧总放热量 Q_h 由式(6)表示。

$$Q_h = I_h^2 R_z t = I_h^2 \frac{4\rho_h l}{\pi d^2} t \quad (6)$$

由热平衡原理和能量守恒原理得到电弧产热与耗热收支平衡,如式(7)表示。

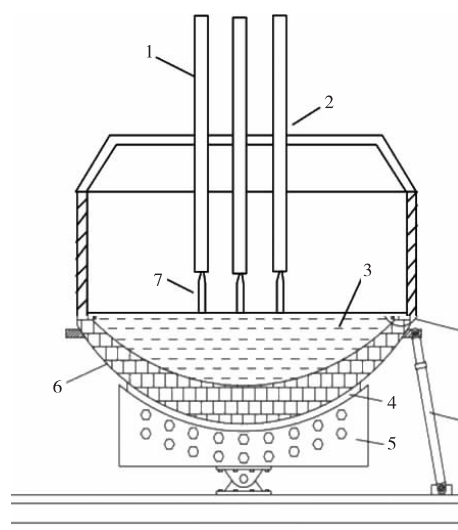
$$Q_h = \sum_{i=1}^4 Q_i \quad (7)$$

式(7)中, Q_h 表示电弧电热效应产生的焦耳热,单位为 J; Q_i 表示总耗热,单位为 J。炉腔内热导过程包含轴向热导和横向热导两部分,横向热导过程是电弧弧柱在炉腔内与周围的流体环境发生的热传递,由传导功率 P_{cd} 、对流功率 P_{dl} 、辐射功率 P_{fs} 三部分组成,对应传导热 Q_{cd} 、对流热 Q_{dl} 和辐射热 Q_{fs} ;轴向导热主要包含石墨电极热导产生的热耗散。

3 炉腔电弧热导过程描述

电弧炉基本结构示意图如图2所示。

炉腔内电弧产生后,存在近极段热量在轴向沿



1—Graphite electrode; 2—Arc furnace mouth; 3—Raw material;
4—Furnace bottom; 5—Support; 6—Insulation brick; 7—Arc

图2 电弧炉基本结构示意图

Fig. 2 Arc furnace basic structure diagram

石墨电极向上传导,以及在弧柱部分热量沿横向传导两个热量传导过程。轴向热导过程是使近极区产生热量的主要传导过程,可近似认为接触热传导过程。如图3所示横向热导是在炉腔内的热扩散过程,其热量沿温度梯度传导,主要用于平衡环境温度和为合金物化反应提供能量。

以铍铜合金冶炼为例,计算电极沿轴向热传导和横向热传热量。

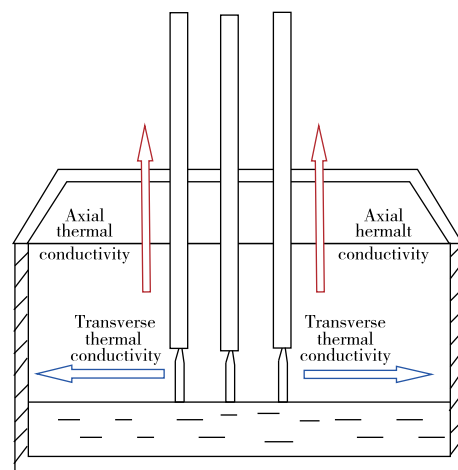


图3 电弧轴向、横向热导示意图

Fig. 3 Schematic diagram of arc axial and transverse thermal conductivity

3.1 轴向热导过程

电弧稳定燃烧时,近极段产热通过电极材料和燃弧介质等传导至炉口,在开放环境下表征为炉口火焰,因此炉口火焰的特征参数可直接反映弧柱温

度参数,从介质热传导过程分析可以确定弧柱温度与炉口火焰关系。

铍铜合金冶炼所用电极材料为石墨,石墨电极具有良好的导热性和导电性,电弧产生后发热温度经由石墨电极向上传导,在炉口的铍铜合金蒸汽受热并与空气接触发生焰色反应产生炉口火焰。相关研究表明,在该过程中石墨电极阻值极低,通电后焦耳热量忽略,热量全部由电弧发热传导而来,炉口火焰温度由电弧温度经石墨电极导热,铍铜合金蒸汽燃烧放热忽略不计。

人工石墨的导热系数 λ_g 在 $700\sim 1\,500\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$,根据傅立叶导热定义,在 1 m 长的石墨电极传导下,炉内外温差为 1 K 时,单位时间内 1 m^3 上传导的热量为 $700\sim 1\,500\text{ J}$ 。根据傅立叶热传导公式,电弧炉内受电弧热效应的石墨电极向上传导至炉口火焰热量传导见式(8)。

$$Q_z = \lambda_g A \cdot \frac{dt}{dx} \quad (8)$$

式(8)中, Q_z 表示近极端沿轴向传导热量, J ; A 表示石墨电极与电弧接触部分传热面积, m^2 ; dx 表示炉内电极长度; $dt = T_h - T_g$ 表示燃弧作用下炉口部分电极温度 T_h 与近极段温度的差值,可由温度传感器测得,近极段的温度受电极材料沸点的限制,低于弧柱的温度。由于传热的作用可看作为电弧加热上部电极使其温度升高,因此还可利用比热容计算描述,见式(9)。

$$Q_c = C_m \cdot dt' \quad (9)$$

$dt' = T_g - T_0$ 表示石墨电极在开放环境中温度改变量, Q_c 表示加热电极热量, J 。根据上两式得到石墨电极传热过程炉口石墨电极部分温度与电弧温度的相关关系见式(10):

$$C_{pr_g}^2 L_1 (T_g - T_0) = \lambda_g r_h^2 \cdot \frac{T_h - T_g}{L - L_1} \quad (10)$$

相较于 T_g ,环境温度可忽略,因此化简上式为(11)。

$$T_g = \frac{\lambda_g r_h^2}{\lambda_g r_h^2 + C_{pr_g}^2 L_1 (L - L_1)} T_h \quad (11)$$

式(11)中,人工石墨电极比热容、密度、导热系数均为常数。炉口部分电极温度与近极段温度比见式(12)。

$$\frac{T_g}{T_h} = \frac{\lambda_g r_h^2}{\lambda_g r_h^2 + C_{pr_g}^2 L_1 (L - L_1)} \quad (12)$$

电弧在电极轴向导热并在炉口产生火焰,检测炉口火焰温度可获得炉口部分电极温度,又由于炉口部分电极温度与电弧近极段温度相关,通过炉口

火焰参数检测可计算得到炉腔内近极段温度。

3.2 横向热导过程

弧柱的横向热导过程是电弧弧柱在炉腔内与周围的流体环境发生的热传递,其功率包括传导功率 P_{cd} 、对流功率 P_{dl} 、辐射功率 P_{fs} 三部分。弧柱传导功率是弧柱通过气体介质向周围传导散发的功率,因此受周围气体传导率和弧柱自身的直径等因素影响,根据傅立叶热传导定律和牛顿冷却定律,传热功率除了与温差成正比外,还与介质的导热系数成正比。采用热路法计算传热功率,传热量表示传热动力与传热阻力之比,即传热功率表示为温度的改变量与电阻之比,见式(13)。

$$P_{cd} = \frac{\Delta\tau}{R_T} \quad (13)$$

式(13)中, $\Delta\tau$ 表示对流传过程推动力,在电弧传热过程表示温度梯度变化, $R_T = l/\lambda A$ 表示弧柱热阻,则电弧弧柱的热传导功率 P_{cd} 见式(14)。

$$P_{cd} = \frac{2\pi\lambda l (T_h - T_0)}{\ln \frac{r_0}{r_h}} \quad (14)$$

式(14)中, λ 表示气体介质的热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$ 。铍铜合金蒸汽热导率为 $195\text{ W}/(\text{m}\cdot\text{K})$, r_0 、 r_h 分别表示在弧柱表面温度、环境温度下的弧柱半径。弧柱半径在空气中近似长度见式(15)。

$$r_h = 0.13\sqrt{I_h} \quad (15)$$

对流是弧柱内由于电离产生的炽热气体与周围环境冷却气体发生的流动过程,不同的气体对流方向导致不同的对流系数。对流是产生温度场梯度分布的原因之一。在铍铜合金冶炼过程中电极处于垂直方向,冷空气沿炉口垂直进入炉腔内,因此纵吹起主导作用。不同于电弧炉炼钢需求吹氧工艺,铍铜合金冶炼过程电弧自由燃烧,在纵吹作用下对流传导功率 P_{dl} 与传导散热功率 P_{cd} 相当,如式(16)表示。

$$P_{dl} = P_{cd} \quad (16)$$

辐射功率 P_{fs} 表示单位时间内物体表面单位面积上所发出总辐射能,与弧柱体积成正比,根据经验公式可表示为式(17)。

$$P_{fs} \approx 71.6 r_h^2 l \epsilon_{fs} \left[\left(\frac{T_h}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] \quad (17)$$

式中, ϵ_{fs} 表示弧柱的发射率, l 表示弧长。综上所述,电弧在横向热导总功率如式(18)表示。

$$P_c = P_{cd} + P_{dl} + P_{fs} \quad (18)$$

代入传导功率 P_{cd} 、对流功率 P_{dl} 、辐射功率 P_{fs} 的计算,则在时间 t 内,电弧横向传导热量 Q_c 如式(19)表示。

$$Q_c = \frac{4\pi\lambda(T_h - T_0)}{\ln \frac{r_0}{r_h}} t + 71.6r_h^2 l \epsilon_{fs} \left[\left(\frac{T_h}{1000} \right)^4 - \left(\frac{T_0}{1000} \right)^4 \right] t \quad (19)$$

该公式表明,热量的横向热导与弧柱半径及弧柱距离相关,横向热导是原料物化反应的主要热量来源。

4 轴向热导过程验证试验

由公式(12)所阐明的火焰温度与电弧近极段温度的相关关系,设计某铍铜合金冶炼过程电弧炉温度算法的验证试验。通过在电弧炉口位置距检测火

焰1 m处安装超高温非接触式测温传感器和视觉传感器检测温度变化过程,结合相关计算得到炉腔内近极段温度。试验现场传感器测温位置及实际过程温度曲线如图4所示。

使用COMSOL分别建立石墨电极传热模型和电弧热导模型对热导过程进行仿真,在COMSOL搭建三根石墨电极模型,根据牛顿冷却公式计算,设定单根石墨电极半径0.2 m,电极发生传热部分长度为8 m,有沿轴的空气流体进行纵吹,热损耗为2 110.08 W,假设某时刻炉口温度为1 730.15 K,仿真结果如图5所示。

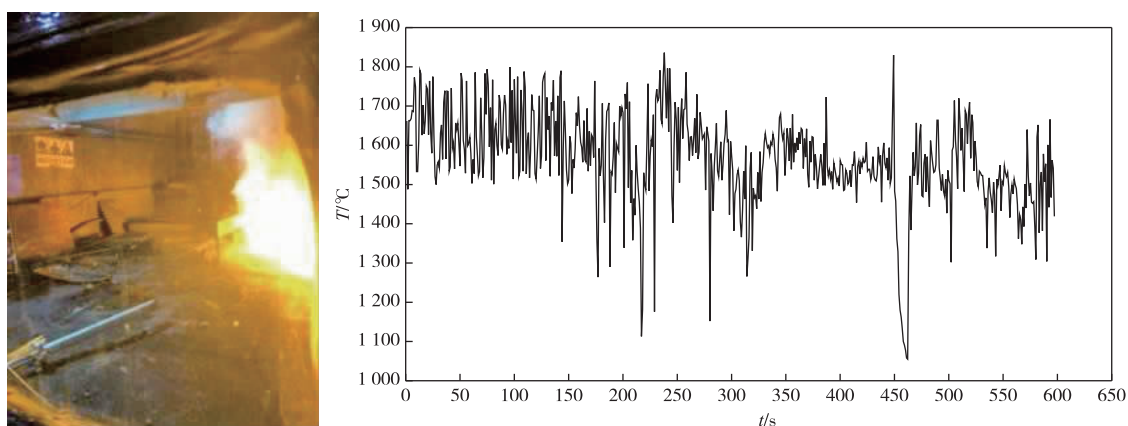


图4 测温传感器位置及炉口温度曲线

Fig. 4 Temperature sensor location and temperature profile of the furnace mouth

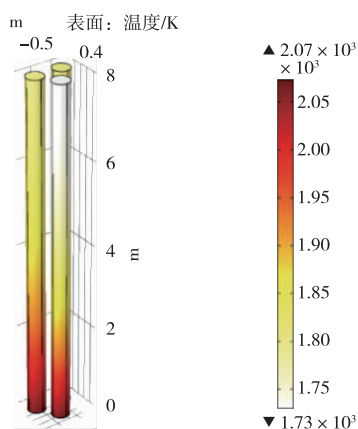


图5 三相石墨电极轴向热导 COMSOL 仿真

Fig. 5 Three phase graphite electrode axial heat conductivity COMSOL simulation

仿真结果表明,1)热量在三相电极上传导服从傅里叶热传导定律;2)由仿真图5展示的温度分布可得,当前时刻炉口温度为1 730.15 K,近极端温度仿真值为2 073.15 K;3)以石墨导热系数为700 W/(m·K)计算,向上传导的热量为3 769.57 J,加热电极热量为3 404.49 J,此计算结果表明了近极

段热量大多参与石墨电极的温度升高,近极段温度可由炉口温度计算而来。

向上传导的热量 Q_c 与加热电极热量 Q_e 存在9.6%的误差,这是由于近极段热量并非全部加热电极,在电极的侧面发生了热量的横向热导,如图6所示。但实际炉腔内环境温度与电极温度梯度较小,因此可忽略电极的表面横向热导效果。

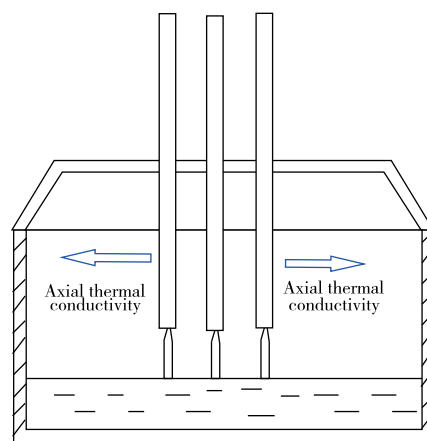


图6 电极表面的横向热导示意图

Fig. 6 Axial thermal conductivity of the electrode surface

5 结论

1)COMSOL 仿真试验结果表明,沿轴向上传导热量和加热电极热量的差值为 9.6%,验证了铍铜合金冶炼炉腔内热量的流动方式服从轴向热导和横向热导两个关键过程,采用多维电弧热导分析方法进行电弧炉热传导规律研究合理可行。通过降低轴向热导的热量耗散和提高横向热量占比,能够提高电弧炉能源有效利用率。

2)通过炉口火焰检测可计算得到炉腔内近极段温度,对超高温冶炼过程炉腔内温度场难以直接检测的问题提供新解决思路。但由于开放环境中的炉口与外部空气存在热导过程,该过程有待于进一步相关研究与分析。

参考文献:

- [1] 宋冬冬,程林,林志法,等. 电弧热等离子体建模、仿真及应用综述[J]. 高电压技术,2018,44(3):932-943.
SONG Dongdong, CHENG Lin, LIN Zhifa, et al. Review of Arc Thermal Plasma Modeling, Simulation and Application[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(3):932-943.
- [2] 武振廷. 炼钢电弧炉的电热特性[J]. 电炉,1981(1): 55-61,48.
WU Zhenting. Electrical and heat characteristics of steelmaking arc furnace [J]. Electric furnace,1981(1): 55-61,48.
- [3] 王丰华. 电弧炉建模研究及其应用[D]. 上海:上海交通大学,2006.
WANG Fenghua. Study of modeling the electric arc furnace and its application [D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University,2006.
- [4] DINULESCU H A , PFENDER E. Analysis of the anode boundary layer of high intensity arcs[J]. Journal of Applied Physics,1980,51(6):3149-3157.
- [5] 荣陞. 轴向热传导对交流电弧性质的影响[J]. 力学学报,1981(6):592-600.
RONG Sheng. Influence of axial heat conduction on the properties of AC arcs [J]. Journal of Mechanics, 1981(6):592-600.
- [6] MIRONOV Y M. Energy-technological relationships in electric arc furnaces[J]. Russian Metallurgy(Metally), 2022,2021(12):1538-1543.
- [7] MOSKAL M, MIGAS P, KARBOWNICZEK M. Multi-parameter characteristics of electric arc furnace melting[J]. Materials,2022,15(4):1601.

(编辑 王爱平)