

中空、实心电极电炉熔炼钛渣过程中 电弧特性的对比研究

李孟臻¹, 李宝宽^{1*}, 于洋¹, 肖军²

(1. 东北大学冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 攀钢集团研究院有限公司, 钒钛资源综合利用国家重点实验室, 四川 攀枝花 617000)

摘要: 为了深入探究中空电极技术在钛渣电炉冶炼工艺中的优势所在, 以 25.5 MW 钛渣电炉实际电极尺寸为基础, 分别建立了中空和实心电极电弧的数学模型, 模拟得到中空、实心电极电弧的电磁场、温度场和流场分布特性, 研究了电流大小和电弧长度对熔池表面温度分布的影响规律。结果表明, 电弧内电流密度、焦耳热值、速度和温度的较大值位于阴极斑点附近, 中空电极是内外径中心线下方区域, 实心电极是中心轴线附近区域。采用中空电极时, 周围的电弧会向中轴线汇聚, 该现象有利于提高电弧加热物料的效率。当电流值由 34 kA 增大到 54 kA, 两种情形下的熔池表面平均温度分别提升了 708 K 和 109 K。当电弧长度由 0.3 m 缩短到 0.1 m, 两种情形下的熔池表面平均温度分别提升了 2 500 K 和 46 K。相比于实心电极, 中空电极更适合采用大电流和短弧长的运行方式, 且合理控制弧长对提高中空电极电弧加热效率的效果更显著。

关键词: 钛渣; 电炉冶炼; 中空电极; 电弧特性; 数值模拟; 电流大小; 电弧长度

中图分类号: TF823, TF806.6

文献标志码: A

文章编号: 1004-7638(2024)01-0019-09

DOI: 10.7513/j.issn.1004-7638.2024.01.004

开放科学(资源服务)标识码(OSID):



听语音
与作者互动
聊科研

Comparative study on arc characteristics of hollow and solid electrode electric furnace melting titanium slag

Li Mengzhen¹, Li Baokuan^{1*}, Yu Yang¹, Xiao Jun²

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, Liaoning, China; 2. State Key Laboratory of Vanadium and Titanium Resources Comprehensive Utilization, Pangang Group Research Institute Co., Ltd., Panzhihua 617000, Sichuan, China)

Abstract: In order to further explore the advantages of hollow electrode technology in titanium slag electric furnace smelting process, based on the actual electrode size of 25.5 MW titanium slag electric furnace, the mathematical models of hollow and solid electrode arc were established, and the distribution characteristics of electromagnetic field, temperature field and flow field of hollow and solid electrode arc were simulated. The effects of current magnitude and arc length on the surface temperature distribution of molten pool were studied. The results show that the larger values of current density, joule heating value, velocity, and temperature in the arc are located near the cathode spot. In the situation of hollow electrode, the area is below the centerline of the inner and outer diameters. And in the situation

收稿日期: 2023-09-05

基金项目: 钒钛资源综合利用产业技术创新战略联盟 2019 年协同研发项目(电炉钛渣冶炼过程数值模拟研究, 编号: FTLM2019-2019021800093); 国家自然科学基金重点项目(51934002)。

作者简介: 李孟臻, 1995 年出生, 男, 辽宁辽阳人, 博士研究生, 主要研究方向为钛渣电炉冶炼数值模拟, E-mail: limengzhenneu@163.com; * 通讯作者: 李宝宽, 1963 年出生, 男, 辽宁辽阳人, 博士, 教授, 主要研究方向为工业电炉热工与燃烧技术, 多相流与多相反应过程模拟, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn。

of solid electrode, the area is near the central axis. When using hollow electrode, the surrounding arc will converge towards the central axis, which is beneficial for improving the efficiency of arc heating materials. When the current value increases from 34 kA to 54 kA, the average surface temperature of the molten pool in both cases increases by 708 K and 109 K, respectively. When the arc length was reduced from 0.3 m to 0.1 m, the average surface temperature of the molten pool in both cases increased by 2 500 K and 46 K, respectively. Compared to solid electrode, the hollow electrode is more suitable for using the operation mode of high current and short arc length, and the reasonable control of arc length has a more significant effect on improving the heating efficiency of hollow electrode arc.

Key words: titanium slag, electric furnace smelting, hollow electrode, arc characteristics, numerical simulation, current magnitude, arc length

0 引言

电炉法因其流程短、处理能力大和不产生废副产物等优势,而被广泛应用于钛渣的生产。钛渣电弧炉是一种利用电极末端高温电弧加热物料的复杂冶炼设备,在熔炼过程中,由于熔融态钛渣具有高导电性,电极不能深插到熔体中,从而决定钛渣电炉具有不同于常规矿热炉的开弧熔炼特点^[1]。钛渣熔炼技术正向大规模、机械化、自动控制方向发展,然而我国现有钛渣电炉与国外相比,存在电炉容量小、经济指标差、综合利用低等问题^[2]。近年来,为了达到强化钛渣电炉冶炼能力的目的,部分钛渣厂商应用或试验了中空电极技术。中空电极就是在电极中心设置一个空腔,通过该空腔向钛渣电炉内加入物料,使其直达电弧反应区^[1]。中空电极技术具有可以同时加入块料和粉料、电弧稳定性强以及减少电极消耗等优点^[3],故对采用中空电极后钛渣电炉的电弧特性进行研究具有很大的实际意义。然而直接改造现有设备进行试验成本过高,且其内部环境恶劣,对各种参数的测量造成很大的困难,故采用数值模拟的方法成为解决这一问题的有效手段。

在对等离子体电弧的数值模拟上,国内外学者开展了许多研究。Mckelliget^[4]建立了高强度碳弧阴极区流体流动和传热的数学模型,并利用敏感性分析研究了电流、气体的密度和比热以及电弧半径变化的影响。Hsu^[5]通过试验测量钨阴极尖端氩气电弧的电流密度,确定模拟所需的边界条件,计算所得 100 A 和 200 A 电弧的温度分布与光谱试验测量结果非常一致。Qian^[6]建立了一个描述直流电弧炉中等离子体电弧运输的数学模型,计算了电弧到刚性阳极表面的传热过程,用 Bowman^[7]的试验结果验证了模型的准确性,并研究了电流大小和电弧长度对等离子体传热的影响。Lowke^[8]发展了一个电极

和电弧的一体化模型,预测了 50~400 A 电流下电极和电弧的温度变化。Ramírez^[9]建立了一个数学模型来描述直流电弧炉中电弧区域的流动、传热和电磁现象,通过计算结果详细地阐述了电弧的行为,及其与主要物理变量的关系。李和平^[10]在同时考虑阴、阳极的情况下,对自由燃烧电弧的传热与流动现象进行了模拟,并讨论了不同形式的能量方程及其离散格式对计算结果的影响。王丰华^[11]提出了一种改进数值计算收敛解的方法,实现了电弧炉内等离子体和熔池表面的耦合数值模拟,分析了电弧炉内电磁、传热和流动现象。刘立超^[12]研究了等离子流拉力、浮力、洛伦兹力、Marangoni 力对熔池的影响,同时利用动网格技术模拟电弧冲击熔池引起交接面处的形变。Reynolds^[13]开发了瞬态电弧等离子体的数学模型,研究了节流电感和晶闸管点火角等参数对直流整流器运行的影响。姚聪林^[14]建立了炼钢电弧炉电弧等离子体的二维轴对称模型,对电弧炉内长电弧的物理场分布规律进行研究,同时探究了不同电流及弧长对电弧特性的影响规律。Makgoale^[15]用模拟稳态湍流气体射流的方法研究了直流钛渣电炉中电弧冲击渣池的过程,比较了包括电磁力和浮升力在内的动量源对电弧冲击作用的影响。Chen^[16]建立了交流电弧散热的数学模型,提出了一种通过模拟确定交流弧状态变量的方法,以近似得到弧的散热,并对不同电流和弧长的性能进行了分析。Huang^[17]利用二维稳态层流模型研究了一个中空阴极内部直流转移电弧等离子体的电磁和热流体流动现象。Tashiro^[18]对大气压下的中空阴极电弧焊的基本热源特性进行了数值分析,并将其与传统的气体钨弧焊过程进行了对比。陈树君^[19]建立了中空钨极中心负压电弧的三维数学模型,计算得到不同局部压力状态下电弧的物理状态。

由上可见,关于传统实心电极电弧的研究已十

分广泛,但针对中空电极电弧特性的研究却较少,针对钛渣电炉等工业级中空电极电弧特性的研究更是缺少。为了进一步探明在大型钛渣电炉上采用中空电极的优势以及可行性,笔者结合 25.5 MW 钛渣电炉生产工艺,同时建立了中空、实心电极电弧的三维磁流体动力学模型,对比二者间多物理场分布特性差异,并研究了不同电流大小和电弧长度下两种情形的电弧特性变化,为提高钛渣电炉冶炼过程中电弧热效率和改进冶炼制度提供了理论参考。

1 钛渣电炉电弧数值模拟

1.1 模型假设

本研究通过求解麦克斯韦方程组、连续性方程、动量方程、能量方程和标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型方程,实现电磁场、流场和温度场间的耦合,从而建立了描述钛渣电炉电弧多物理场分布的基本数学模型,并作出以下假设:

- 1) 电弧处于局部热力学平衡状态 (LTE), 电弧等离子体在光学上足够薄, 电弧的物性参数仅为随温度变化的函数;
- 2) 电极端面平整, 且不考虑电极损耗;
- 3) 中空电极阴极斑点区位于电极内外径之间, 实心电极阴极斑点区位于电极端面圆心。

1.2 基本控制方程

1) 连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = 0 \quad (1)$$

式中, ρ 为流体密度, kg/m^3 ; t 为时间, s ; \vec{v} 为流体速度, m/s 。

2) 动量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T)] + \rho \vec{g} + \vec{J} \times \vec{B} \quad (2)$$

式中, P 为压力, Pa ; μ 为粘度, $\text{Pa}\cdot\text{s}$; \vec{g} 为重力加速度, m/s^2 ; \vec{J} 为电流密度, A/m^2 ; \vec{B} 为磁感应强度, T 。

3) 能量守恒方程

$$\frac{\partial}{\partial t} (\rho c_p T) + \nabla \cdot (\rho c_p \vec{v} T) = \nabla \cdot (k_{\text{eff}} \nabla T) + \frac{\vec{J} \cdot \vec{J}}{\sigma} + \frac{5 k_B}{2 e} \cdot \vec{J} \nabla T - S_R \quad (3)$$

式中, c_p 为比热, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; T 为温度, K ; k_{eff} 为有效热导率, $\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})$; k_B 为 Boltzmann 常数, 取 $1.38 \times 10^{-23} \text{J/K}$; σ 为磁流体的电导率, $\Omega^{-1}\cdot\text{m}^{-1}$; e 为元电荷电量,

取 $-1.6 \times 10^{-19} \text{C}$; S_R 为辐射散热损失, 通过净发射系数法获得, 如式 (4) 所示。

$$S_R = 4\pi \varepsilon_N \quad (4)$$

式中, ε_N 为净发射系数, $\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{sr})$ 。

4) 电磁场模型

将标势 φ 和矢势 \vec{A} 引入麦克斯韦方程组中, 同时运用库伦规范: $\nabla \cdot \vec{A} = 0$, 得到磁流体方程 (MHD):

$$-\nabla^2 \vec{A} = -\sigma \mu \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \sigma \mu \nabla \varphi + \sigma \mu \vec{v} \times \vec{B} \quad (5)$$

$$\nabla \cdot (\sigma \nabla \varphi) - \nabla \cdot (\sigma \vec{v} \times \vec{B}) = 0 \quad (6)$$

式中, μ 为磁导率, 取真空磁导率 $\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{N/A}^2$; 根据式 (5) 和 (6), 求得电弧内 \vec{A} 和 φ 的分布, 并通过式 (7) 得到磁感应强度 \vec{B} , 式 (8) 得到电流密度 \vec{J} 。

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (7)$$

$$\vec{J} = \sigma (-\nabla \varphi + \vec{u} \times \vec{B}) \quad (8)$$

5) 湍流模型

本研究为模拟钛渣电炉冶炼过程中电弧内部的湍流现象, 采用标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型, 湍动能 k 、湍流耗散率 ε 和湍流粘度 μ_t 分别如下所示:

$$\frac{\partial (\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \vec{v}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + G_k + G_b - \rho \varepsilon - Y_M + S_k \quad (9)$$

$$\frac{\partial (\rho \varepsilon)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \varepsilon \vec{v}) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \nabla \varepsilon \right) + C_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + C_{3\varepsilon} G_b) - C_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} + S_\varepsilon \quad (10)$$

$$\mu_t = \rho C_\mu \frac{k^2}{\varepsilon} \quad (11)$$

式中, G_k 为由于平均速度梯度而产生的湍流动能, J ; G_b 为浮升力产生的湍流动能, J ; Y_M 表示可压缩湍流中的脉动膨胀对总耗散率的影响, %; S_k 和 S_ε 分别是 k 和 ε 的源项; $C_{1\varepsilon}$ 、 $C_{2\varepsilon}$ 、 $C_{3\varepsilon}$ 、 σ_k 和 σ_ε 为常数, C_μ 为常数。

1.3 计算域及边界条件

为了保证模拟结果的适用性, 根据工厂实际电极尺寸建立了中空电极电弧区的计算模型, 模型的详细尺寸参数及网格划分结果如图 1 所示。电弧电流 34 kA, 在中空和实心电极电弧特性对比研究中取弧长为 0.3 m, 中空电极外径与实心电极直径相同, 中空电极内径为 0.5 m, 略大于进料口直径, 中空电极阴极斑点区位于内外径之间, 宽度与实心电极阴极斑点半径相同。计算域被划分为全结构化六面体

网格,分别对阴极斑点和除斑点外电极下方区域进行不同程度的加密,当电弧长度为0.3 m时,中空电

极电弧计算域的总网格量为275万个,实心电极电弧计算域的总网格量为211万个。

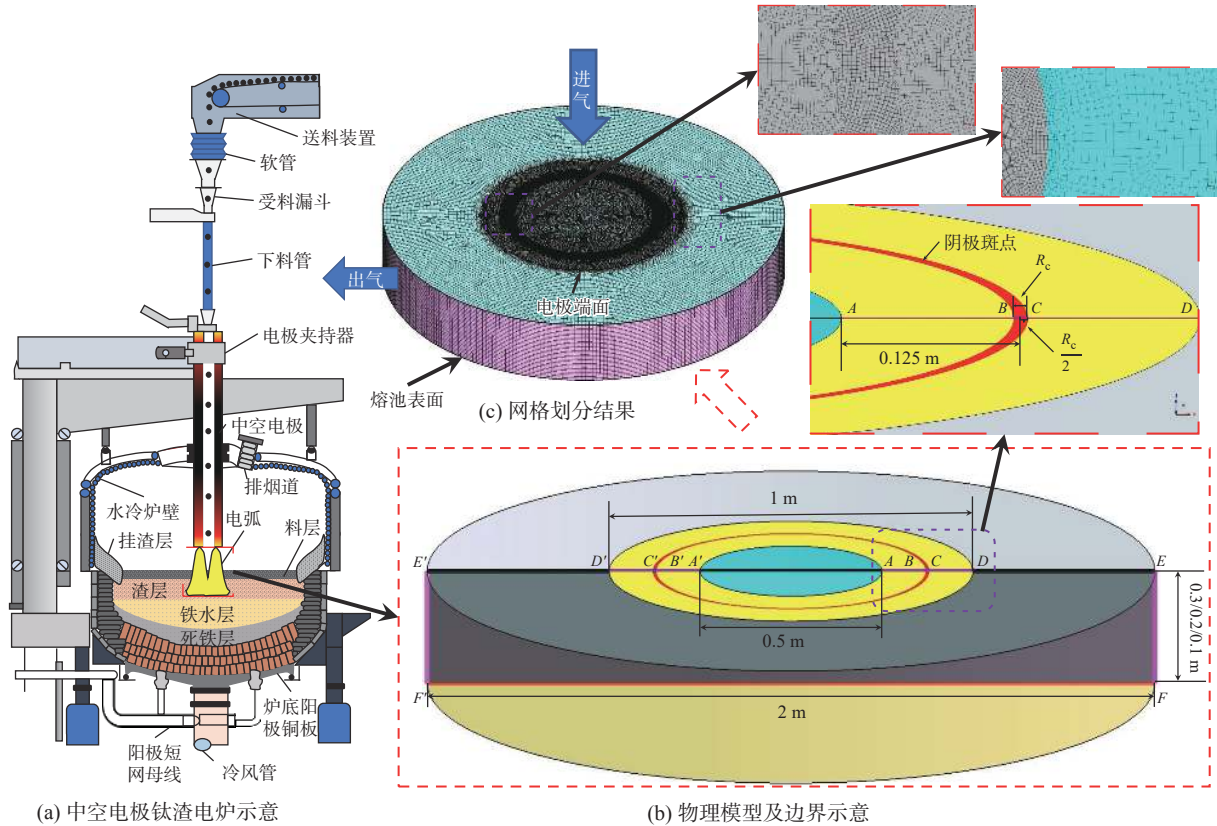


图1 物理模型及网格划分
Fig. 1 Physical model and grid division

实心电极的阴极斑点半径通过下式计算得到^[11]:

$$R_c = \sqrt{\frac{I}{\pi J_c}} \quad (12)$$

式中, R_c 为阴极斑点半径, m; J_c 为热电子流密度, 取 $4.4 \times 10^7 \text{ A/m}^2$; I 为电弧电流, A。当电流分别为 34 000、44 000 A 和 54 000 A 时, 实心电极电弧的阴极斑点半径分别为 0.015 68、0.017 84 m 和 0.019 76 m。

数值模拟所用的边界条件如表1所示, 电极下表面 ($BC/B'C'$) 处温度设置为 4 130 K, 低于石墨电极的熔点, 根据钛渣的熔融温度将熔池表面 (FF') 处温度设置为 1 800 K。

在中空和实心电极阴极斑点上施加沿径向呈抛物线分布的电流密度^[11], 分别如式 (13) 和 (14) 所示。

$$J_{\text{hollow}} = 2J_c \left(1 - \left(\frac{r_{\text{hollow}}}{R_c/2} \right)^2 \right) \quad (13)$$

$$J_{\text{solid}} = 2J_c \left(1 - \left(\frac{r_{\text{solid}}}{R_c} \right)^2 \right) \quad (14)$$

式中, r_{hollow} 为中空电极情形下, 距阴极斑点环形区

中心线的距离, m; r_{solid} 为实心电极情形下, 距阴极斑点圆心的距离, m。

表1 中空电极电弧模拟边界条件

Table 1 Boundary conditions of the hollow electrode arc simulation

边界	温度/K	压力/Pa	φ	\vec{A}'
AA'	1 000	101 325	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$
AB/A'B'	2 000	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$
BC/B'C'	4 130	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = -\frac{J_{\text{hollow}}}{\sigma}$	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$
CD/C'D'	2 000	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$
DE/D'E'	1 000	101 325	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$
EF/E'F'	1 000	101 325	$\frac{\partial \varphi}{\partial x} = \frac{\partial \varphi}{\partial y} = 0$	0
FF'	1 800	$\frac{\partial P}{\partial z} = 0$	0	$\frac{\partial \vec{A}'}{\partial n} = 0$

1.4 物性参数及求解过程

对钛渣电炉电弧进行模拟时, 起始设定电极下

方气体温度为 10 000 K, 使炉气电离导电, 保证通路。试验模拟钛渣电炉中大气电弧和模型验证所用氩气电弧的物性参数和辐射损失均是随温度变化的, 通过文献 [20-22] 获得。本仿真使用了基于有限体积法的商业软件 Ansys-Fluent, 通过编写用户自定义标量方程获得电磁场相关信息, 利用对动量和能量方程添加源项的方式, 实现电磁-热流间的耦合, 采用二阶迎风格式对各控制方程进行离散, 基于压力基求解器, 并利用 SIMPLE 算法实现了对各控制方程的求解, 以 1×10^{-6} s 为时间步长进行运算。

2 模拟结果及讨论

2.1 模型准确性验证

1) 实心电极大气电弧验证

为了验证电弧模型的准确性, 首先按照文献 [7]

中测量大气自由燃烧电弧速度和温度分布的试验条件进行实心电极电弧模拟, 图 2(a)、(b) 分别为 520 A 下电弧垂直截面上温度场和速度场分布情况, 图 2(a) 和 (b) 分别是 520、1 150 A 和 2 160 A 下电弧中心轴线上各点温度和速度的数值模拟值与试验测量值的比较情况, 结果表明本模型可以得到准确的弧区温度场和速度场。

2) 中空电极氩气电弧验证

验证中空电极电弧模型的准确性, 按照文献 [19] 中空电极氩气负压弧试验条件进行中空电极电弧模拟, 图 3(a) 为不同中心压力下中空电极电弧的温度分布云图, 取温度高于 8 000 K^[19] 的区域作为电弧的有效区, 电弧有效区的水平最大宽度作为电弧直径, 可以看出常压下本文模拟值与文献模拟值吻合良好。

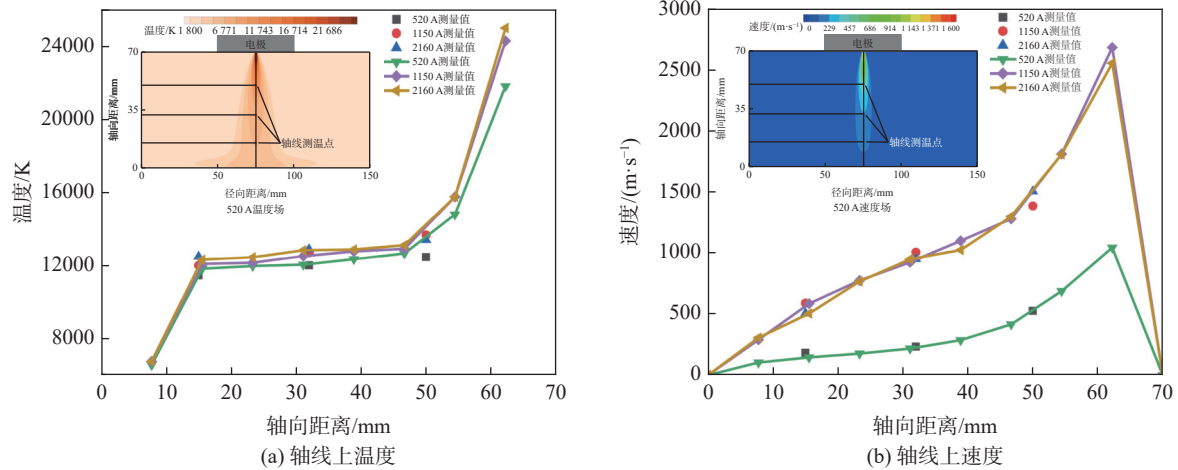


图 2 不同电流下中心轴线上各点模拟值与测量值对比

Fig. 2 Comparison of simulated and measured values at various points on the central axis under different currents

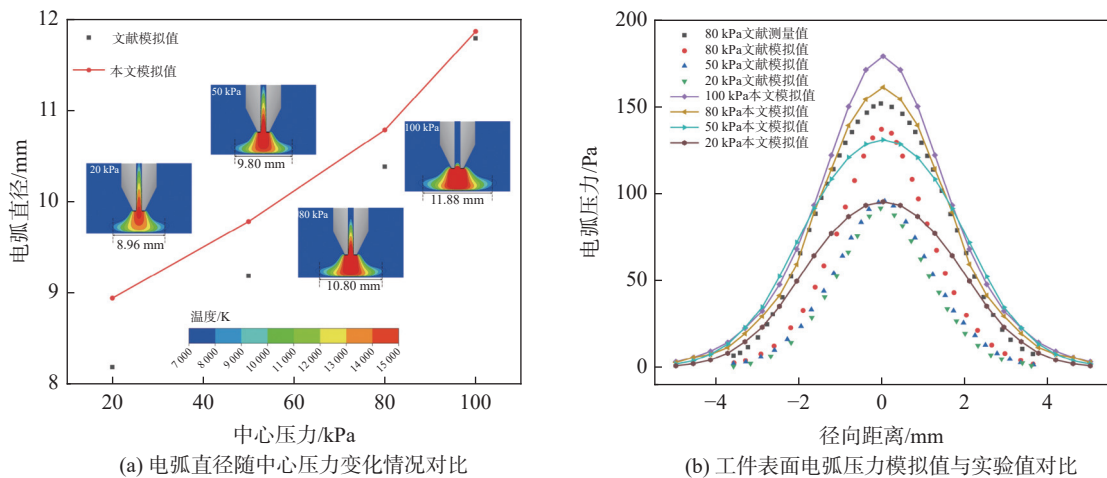


图 3 不同中心压力下模拟值与测量值对比

Fig. 3 Comparison of simulated and measured values under different central pressures

图 3(b) 为不同中心压力下的工件表面电弧压力对比情况, 80 kPa 情形下, 本文模拟值与文献测量值吻合良好, 证明本模型可以得到准确的中空电极电弧区宽度和工件表面的电弧压力。

2.2 中空、实心电极电弧多物理场对比

在电弧长度为 0.3 m, 电流值为 34 kA 的情形下, 将中空、实心电极电弧特性进行对比分析, 图 4(a)、(b) 分别为中空和实心电极情形下, 电弧垂直截面上的电流密度和焦耳热分布情况, 从中可以看出, 阴极斑点附近有较高的电流密度值和焦耳热值, 两种情形下, 电流密度最大值分别为 6.75×10^7 、 $6.77 \times 10^7 \text{ A/m}^2$, 电流从阳极熔池表面流向阴极石墨电极。图 4(c)、(d) 为焦耳热和电磁力矢量分布情况, 两种情形下, 焦耳热最大值分别为 4.79×10^7 、 $1.67 \times 10^7 \text{ W/m}^3$, 电磁力驱动电弧向极心下方移动, 采用中空电极时, 电弧有明显向极心移动的趋势。图 5(a)、(b) 分别为两种情形下距电极 0.01 m 水平截面上的电流密度和焦耳热分布, 对比可见, 中空电极电弧中电流密度和焦耳热较大值区域范围大于实心电极情形。

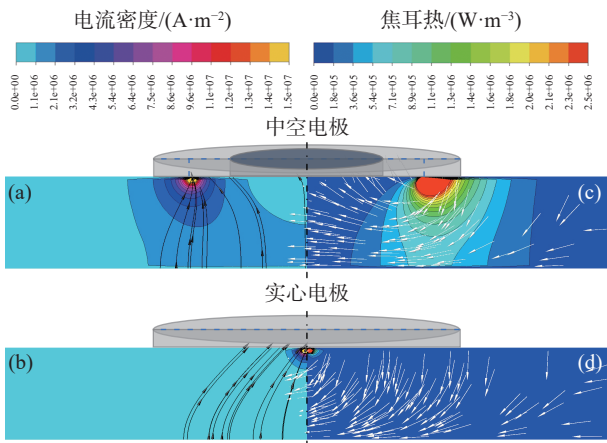


图 4 垂直截面上电磁场分布对比

Fig. 4 Comparison of electromagnetic field distribution on vertical cross sections

图 6(a)、(b) 分别为中空和实心电极情形下, 电弧垂直截面上流场分布情况, 两种情形下, 速度最大值分别为 5 079 m/s 和 5 734 m/s, 中空电极情形下, 电弧内侧形成沿轴线向上的涡旋, 电弧外侧形成沿轴线向下的涡旋, 实心电极情形下, 只在电弧附近形成沿轴线向下的涡旋。图 6(c) 和 (d) 为温度分布情况, 最大值分别为 48 644 K 和 76 380 K, 对比可见, 实心电极电弧高温区位于极心下方, 中

空电极则在内外径之间的环状区域下方。图 7(a)、(b) 分别为两种情形下距电极 0.01 m 水平截面上的流场和温度场分布, 面平均温度分别为 2 989 K 和 2 185 K。图 8(a)、(b) 分别为中心轴线和不同高度水平线上的温度分布, 实心电极轴线上温度显著高于中空电极, 但总体上看, 中空电极高温区范围远远大于实心电极, 由此可见实心电极电弧产生的最高温度较高, 中空电极电弧平均温度较高, 中空电极电弧加热更均匀, 具有更好的加热效果。

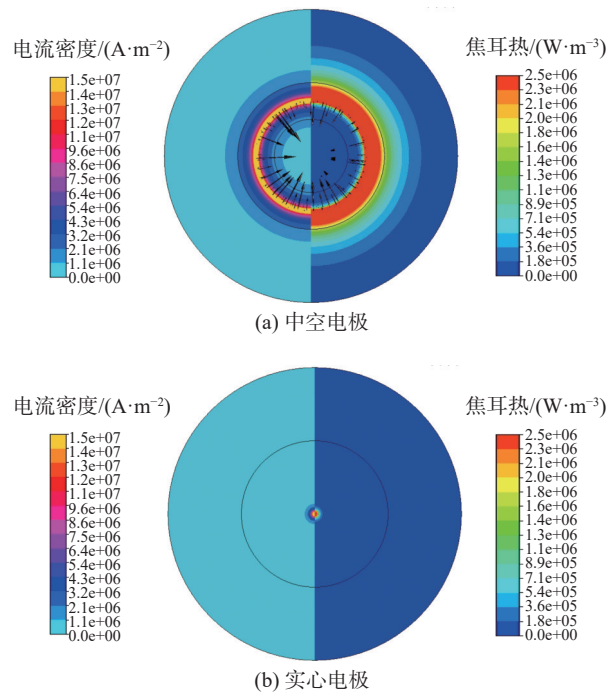


图 5 水平截面上电磁场分布对比

Fig. 5 Comparison of electromagnetic field distribution on horizontal cross section

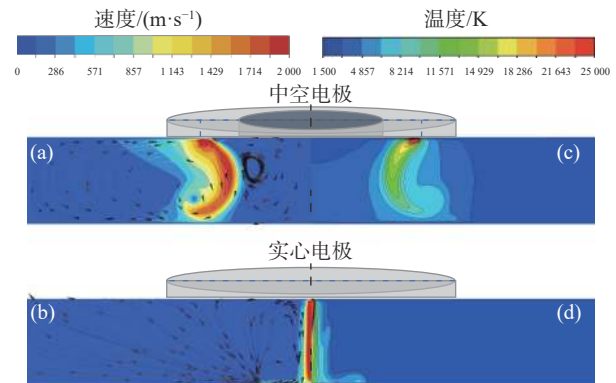


图 6 垂直截面上流场和温度场分布对比

Fig. 6 Comparison of flow field and temperature field distribution on a vertical cross section

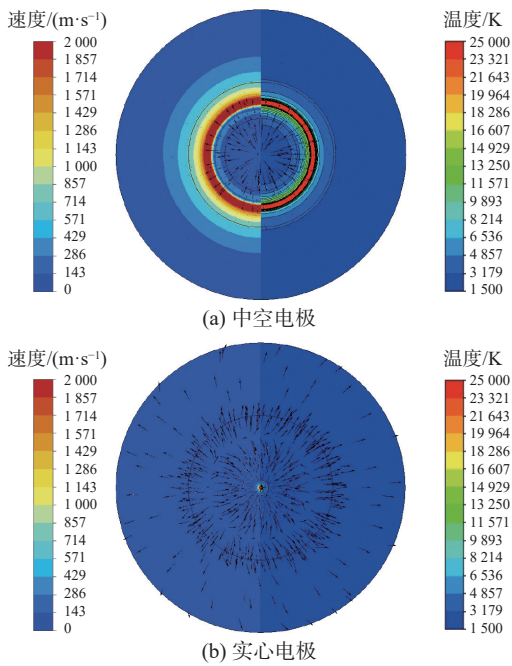


图 7 水平截面上流场和温度场分布对比
 Fig. 7 Comparison of flow field and temperature field distribution on a horizontal cross section

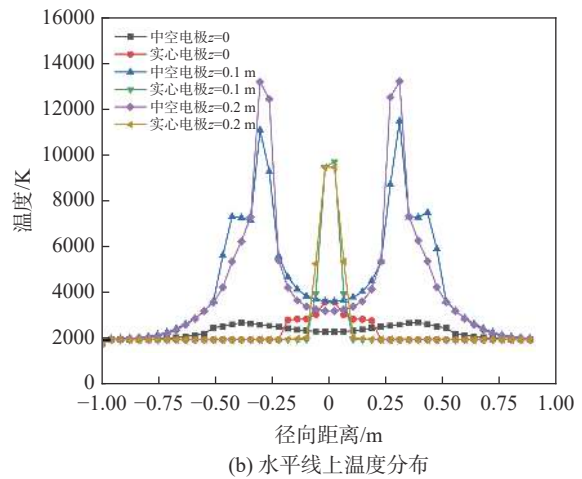
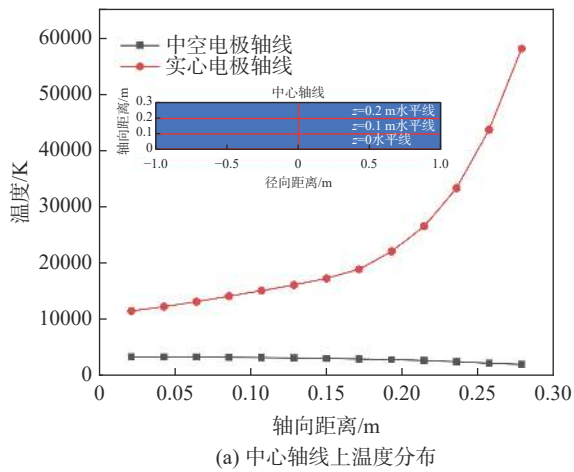


图 8 各特征线上温度分布情况

Fig. 8 Temperature distribution on each characteristic line

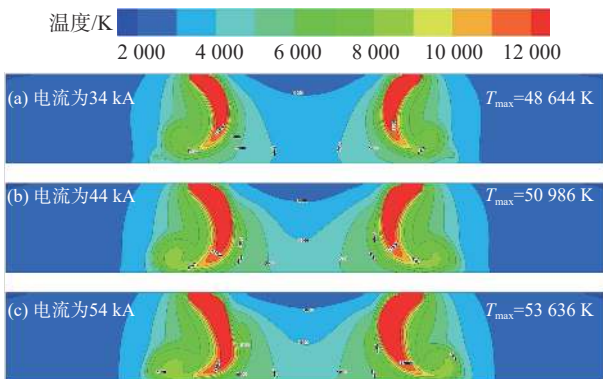


图 9 不同电流下中空电极电弧温度场分布
 Fig. 9 Temperature field distribution of hollow electrode arc under different currents

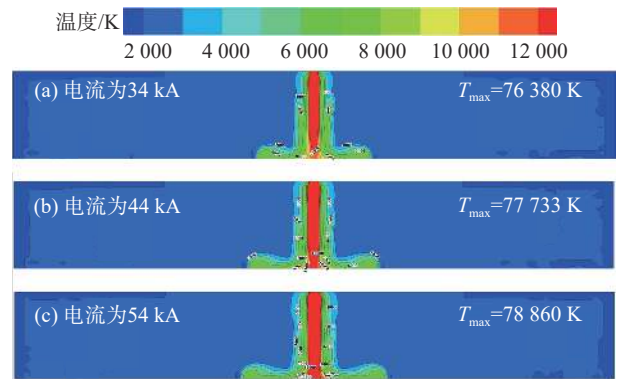


图 10 不同电流下实心电极电弧温度场分布
 Fig. 10 Temperature field distribution of solid electrode arc under different currents

2.3 电流大小的影响

分析电流大小对电弧特性影响时,随着电流值的变化 (34、44、54 kA),电弧长度保持 0.3 m 不变。图 9 和图 10 分别为三种不同电流值计算得到的中空电极和实心电极电弧垂直截面上温度场分布情况,随电流的增大,电弧内最高温度值升高,中空电极情形下,靠近极心的较低温区范围缩小。当电流值由 34 kA 提升至 44 kA 和 44 kA 提升至 54 kA,中空电极情形的最大温度分别提升 2 342 K 和 2 685 K,实心电极情形的最大温度分别提升 1 353 K 和 1 127 K。图 11 为中空电极和实心电极情形下熔池上表面的平均温度对比情况,可以看出,采用相同的电流时,中空电极的平均温度均高于实心电极,且增大相同电流值,二者间差值也随之增大,意味着中空电极比实心电极更适合通过提升电流的操作来提高电弧的加热效率。

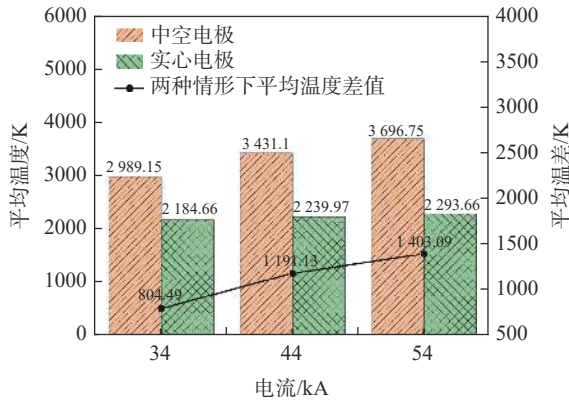


图 11 不同电流下熔池上表面平均温度对比
Fig. 11 Comparison of average surface temperature on the molten pool under different currents

2.4 电弧长度的影响

分析电弧长度对电弧特性影响时,随着电弧长度的变化(0.3、0.2 m和0.1 m),电流值保持34 kA不变。图12、13分别为三种不同电弧长度计算得到的中空电极和实心电极电弧垂直截面上温度场分布情况,图14为中空电极和实心电极情形下熔池上表面的平均温度对比情况,结合两图可以看出,随电弧长度的减小,中空电极电弧内最高温度值保持升高趋势,而实心电极电弧内最高温度先升高后减小。

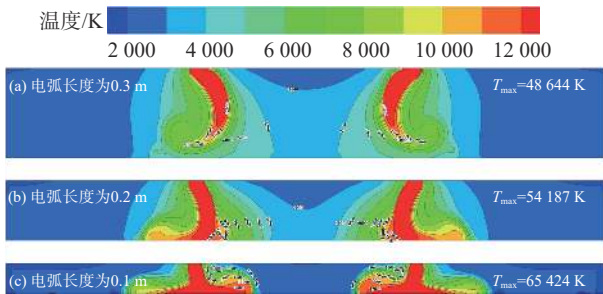


图 12 不同电弧长度下中空电极电弧温度场分布
Fig. 12 Temperature field distribution of hollow electrode arc under different arc lengths

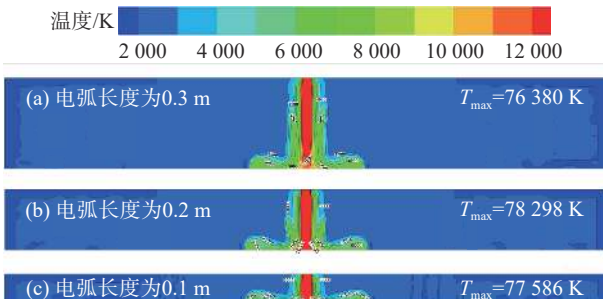


图 13 不同电弧长度下实心电极电弧温度场分布
Fig. 13 Temperature field distribution of solid electrode arc under different arc lengths

当电弧长度由0.3 m减小至0.2 m和0.2 m减小至0.1 m,中空电极情形的最大温度分别提升5 543、11 237 K,实心电极情形的最大温度分别提升1 918 K

和降低712 K。两种情形下,熔池上表面的平均温度都随弧长的减小而升高,采用相同的电弧长度时,中空电极的平均温度均高于实心电极,且缩短相同电弧长度,二者间差值也随之增大。当采用中空电极时,通过缩小电弧长度来提高电弧内最高温度和平均温度的幅度比通过增大电流的方式大,而实心电极情形与之相反,证明弧长对中空电极电弧温度分布的影响比电流更显著,因此,中空电极更适合采用较短弧长的方式来提高电弧的加热效率。

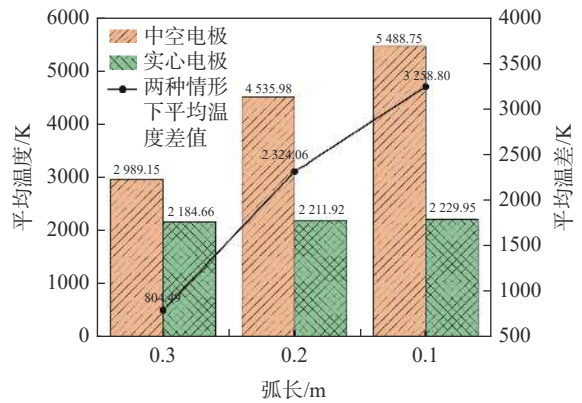


图 14 不同电弧长度下熔池上表面平均温度对比
Fig. 14 Comparison of average surface temperature of the molten pool under different arc lengths

3 结论

建立工业钛渣电弧炉中空和实心电极电弧的三维数学模型,对比了两种情形下的电弧特性,并分析了电流大小和电弧长度对电弧温度场和熔池表面平均温度的影响,得到下述结论:

- 1) 中空电极电弧的电流密度、焦耳热、温度和速度较大值集中分布于内外径之间的区域,实心电极分布于中心轴线上,中空电极的温度极大值低于实心电极情形,而温度面平均值高于实心电极情形。
- 2) 当电流值由34 kA提升至44 kA和44 kA提升至54 kA,中空电极情形的最大温度分别提升2 342 K和2 685 K,实心电极分别提升1 353 K和1 127 K,中空电极情形熔池上表面平均温度分别提升442 K和266 K,实心电极分别提升55 K和54 K,可见采用中空电极比实心电极能更显著地通过增大电流的方式来提高电弧的加热效率。
- 3) 减小电弧长度,中空电极电弧最高温度和水平截面上平均温度会持续升高,实心电极电弧水平截面上的平均温度有所提高,但最高温度呈先升高后减小的趋势。当弧长由0.3 m减小至0.2 m和0.2 m减小至0.1 m,中空电极情形的最大温度分别提升5 543 K和11 237 K,实心电极情形的最大温

度分别提升 1918 K 和降低 712 K。中空电极情形熔池上表面平均温度分别提升 1 547 K 和 953 K, 实心电极分别提升 27 K 和 18 K, 可见减小电弧长度能更有效地提高中空电极电弧的加热效率, 而实心电极相对不适合采用短弧长。

4) 在工业钛渣生产中应用中空电极时, 建议在

电极自身承受范围内使用较大电流进行冶炼, 同时可以在保证电弧稳定和中心加料正常的前提下, 使用较短弧长进行冶炼。

下一步工作将关注中空电极电弧对熔池特性的影响, 并进一步对比三相交流中空和实心电极电弧的特性差异。

参考文献

- [1] Yang Shaoli, Sheng Jifu. Titanium slag and pig iron smelting technology of ilmenite[M]. Beijing: Metallurgical Industry Press, 2006.
(杨绍利, 盛继孚. 钛铁矿熔炼钛渣与生铁技术[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2006.)
- [2] Yu Jiahua, Liu Honggui. The current status and development trend of titanium ore and titanium rich materials production at home and abroad[J]. World Nonferrous Metals, 2003, (6): 4-8.
(余家华, 刘洪贵. 国内外钛矿和富钛料生产现状及发展趋势[J]. 世界有色金属, 2003, (6): 4-8.)
- [3] Sheng Jifu. Analysis of some characteristics of titanium slag melted in DC hollow electrode electric furnace[J]. Titanium Industry Progress, 2003, 21(1): 27-32.
(盛继孚. 直流—空心电极电炉熔炼钛渣的某些特性浅析[J]. 钛工业进展, 2003, 21(1): 27-32.)
- [4] Mckelliget J W, Szekeley J. A mathematical model of the cathode region of a high intensity carbon arc[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1983, 16: 1007-1022.
- [5] Hsu K S, Etemadi K, Pfender E. Study of the free - burning high - intensity argon arc[J]. Journal of Applied Physics, 1983, 54(3): 1293-1301.
- [6] Qian F, Farouk B, Mutharasan R. Modeling of fluid flow and heat transfer in the plasma region of the dc electric arc furnace[J]. Metallurgical & Materials Transactions B, 1995, 26(5): 1057-1067.
- [7] 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.
- [8] Lowke J J, Morrow R, Haidar J. A simplified unified theory of arcs and their electrodes[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30: 2033-2042.
- [9] Ramírez M, Alexis J, Trapaga G, et al. Modeling of a DC electric arc furnace—mixing in the bath[J]. ISIJ International, 2001, 41(10): 1146-1155.
- [10] Li Heping, Chen Xi. Numerical simulation of heat transfer and flow in a free burning arc[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 2001, 22(1): 78-81.
(李和平, 陈熙. 自由燃烧电弧中传热与流动的数值模拟[J]. 工程热物理学报, 2001, 22(1): 78-81.)
- [11] Wang Fenghua. Research and application of electric arc furnace modeling[D]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006.
(王丰华. 电弧炉建模研究及其应用[D]. 上海: 上海交通大学, 2006.)
- [12] Liu Lichao. Numerical study on physical characteristics of DC arc in coupled molten pool[D]. Shenyang: Northeast University, 2016.
(刘立超. 耦合熔池的直流电弧物理特性数值研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2016.)
- [13] Reynolds Q G. Influence of the power supply on the behaviour of DC plasma arcs - a modelling study[J]. Journal of the Southern African Institute of Mining and Metallurgy, 2018, 118: 655-660.
- [14] Yao Conglin, Zhu Hongchun, Jiang Zhouhua, et al. Numerical simulation of long arc plasma in electric arc furnace[J]. Journal of Engineering Science, 2020, 42(S1): 60-67.
(姚聪林, 朱红春, 姜周华, 等. 电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟[J]. 工程科学学报, 2020, 42(S1): 60-67.)
- [15] Makgoale T, Bogaers A, Zietsman J, et al. Momentum transfer from arc to slag bath in a DC ilmenite smelting furnace: A computational analysis[J]. JOM, 2021, 73(9): 2682-2697.
- [16] Chen Y C, Ryan S, Silaen A K, et al. Numerical investigation of AC electric arc plasma heat dissipation in EAF[J]. Ironmaking & Steelmaking, 2022, 49(3): 255-267.
- [17] Huang P C, Pfender E. Study of a transferred-arc plasma reactor with a converging wall and flow through a hollow cathode[J]. Plasma Chemistry and Plasma Processing, 1991, 11(1): 129-150.
- [18] Tashiro C S, Tanaka M, Nakatani M, et al. Numerical analysis of energy source properties of hollow cathode arc[J]. Surface & Coatings Technology, 2007, 201: 5431-5434.
- [19] Chen Shujun, Sheng Shan, Jiang Fan, et al. Physical properties of negative pressure arc at the center of hollow tungsten electrode[J]. Journal of Welding, 2017, 38(12): 1-4.
(陈树君, 盛珊, 蒋凡, 等. 空心钨极中心负压电弧的物理性能[J]. 焊接学报, 2017, 38(12): 1-4.)
- [20] Angola A D, Colonna G, Gorse C, et al. Thermodynamic and transport properties in equilibrium air plasmas in a wide pressure and temperature range[J]. The European Physical Journal D, 2008, 46(1): 129-150.
- [21] Rao Z H, Liao S M, Tsai H L. Effects of shielding gas compositions on arc plasma and metal transfer in gas metal arc welding[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(4): 044902.
- [22] Naghizadeh-Kashani Y, Cressault Y, Gleizes A. Net emission coefficient of air thermal plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2002, 35(22): 2925-2934.