



电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟

姚聪林 朱红春 姜周华 潘涛

Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace

YAO Cong-lin, ZHU Hong-chun, JIANG Zhou-hua, PAN Tao

引用本文:

姚聪林, 朱红春, 姜周华, 潘涛. 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(S): 60–67. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.08.s04

YAO Cong-lin, ZHU Hong-chun, JIANG Zhou-hua, PAN Tao. Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2020, 42(S): 60–67. doi: 10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.08.s04

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2020.04.08.s04>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

电弧焊接数值模拟中热源模型的研究与发展

Research and development of a heat-source model in numerical simulations for the arc welding process

工程科学学报. 2018, 40(4): 389 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.04.001>

热冷循环下外墙外保温系统耐候性能数值模拟

Numerical simulation of the weathering performance of an exterior wall external insulation system under heating-cooling cycles

工程科学学报. 2018, 40(6): 754 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.06.014>

铝电解槽废阴极炭块电热耦合处理过程数值模拟

Numerical simulation of electrothermal coupling process for spent cathode carbon block from aluminum electrolysis cell

工程科学学报. 2020, 42(6): 731 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.06.10.002>

铌硅基高温合金定向凝固铸造温度场模拟计算

Simulation of temperature field in directional solidification casting of NbSi based alloys

工程科学学报. 2020, 42(9): 1165 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.10.02.001>

卧式喷淋塔烟气脱硫的数值模拟

Numerical simulation of flue gas desulfurization by horizontal spray tower

工程科学学报. 2018, 40(1): 17 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2018.01.003>

结晶器旋转数值模拟及对高速钢电渣锭碳化物的影响

Numerical simulation of mold rotation and its effect on carbides in HSS ESR ingot

工程科学学报. 2020, 42(4): 516 <https://doi.org/10.13374/j.issn2095-9389.2019.07.07.001>

电弧炉内长电弧等离子体的数值模拟

姚聪林¹⁾, 朱红春¹⁾, 姜周华^{1,2)}✉, 潘 涛¹⁾

1) 东北大学冶金学院, 沈阳 110819 2) 东北大学轧制技术及连轧自动化国家重点实验室, 沈阳 110819

✉通信作者, E-mail: Jiangzh@smm.neu.edu.cn

摘 要 全废钢连续加料电弧炉内长电弧作为炉内主要的能量来源, 对废钢熔化及钢液升温至关重要. 采用磁矢量势的磁流体动力学方法建立了电弧炉内电弧的数值模型, 并基于该数值模型对电弧炉内电磁场、温度场和流场进行耦合求解, 研究了电流大小、弧长对电弧炉内电弧的温度、速度、压力及气体剪切力特性的影响. 结果表明, 全废钢连续加料电弧炉内电弧等离子体呈“长钟型”分布, 电弧柱较细长; 随着电流增大, 电弧有效作用范围增大, 阳极表面电弧压力和气体剪切力增大; 随着弧长增加, 电弧有效作用范围减小, 阳极表面的电弧压力和气体剪切力减小. 短弧操作对熔池冲击剧烈, 长弧操作熔池较为平稳, 合理控制电流和弧长能有效提高电弧热效率.

关键词 电弧炉; 电弧; 等离子体; 温度场; 数值模拟

分类号 TF741.5

Numerical simulation of a long arc plasma in an electric arc furnace

YAO Cong-lin¹⁾, ZHU Hong-chun¹⁾, JIANG Zhou-hua^{1,2)}✉, PAN Tao¹⁾

1) School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China

2) State Key Laboratory of Rolling and Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China

✉ Corresponding author, E-mail: Jiangzh@smm.neu.edu.cn

ABSTRACT The continuous scrap electric arc furnace adopts a long arc operation for a longer arc length and a larger discharge power. Although the long arc differs from the traditional welding short arc, few reports on long arc simulation research in the field of the electric arc furnace are available. As the main energy source in the electric arc furnace, the long arc is very important for the melting of scrap and heating of molten steel. Due to the complicated physical phenomena in the electric arc furnace, it is difficult to accurately obtain the distribution of various physical fields in the furnace. Therefore, numerical simulation is a frequently used method for studying the arc plasma in the electric arc furnace. In this paper, the magnetohydrodynamic method of the magnetic vector potential was used to establish the numerical model of an arc. Based on this numerical model, the electromagnetic field, temperature field, and flow field were coupled and solved. The effects of current and arc length on the temperature distribution, velocity distribution, arc force, and shear stress of the arc in the electric arc furnace were studied. The results show that the arc plasma in the electric arc furnace is distributed in a long bell shape, and the arc column is slender. As the current increases, the effective arc action range increases, and the arc pressure and shear stress on the anode surface increase. As the arc length increases, the effective arc action range decreases, and the arc pressure and shear stress on the anode surface decrease. The short arc operation has a strong effect on the molten pool, and the long arc operation is relatively stable. A reasonable control of the current and arc length effectively improves the thermal efficiency of the arc.

KEY WORDS electric arc furnace; arc; plasma; temperature field; numerical simulation

全废钢连续加料电弧炉以其连续预热、连续加料、快速熔炼、节能环保的独特优势,在钢铁行业得到广泛的应用^[1-5]。石墨电极产生的电弧作为电弧炉内主要的能量来源,对电弧炉内废钢熔化、钢液升温及冶炼效率至关重要。而电弧炉内是电场、磁场、流场、温度场等多场耦合的复杂体系,涉及的物理现象极其复杂,难以利用实验方法准确获得电弧等离子体的温度场、速度场等分布,因此开发准确有效的数值模型是研究电弧炉内电弧等离子体的有效方法之一^[6-8]。

早期的电弧模型较为简单,重点在于解析方法的求解,如通道模型^[9]是把一维壁稳弧分为弧柱通道和非弧柱通道,但该模型的应用范围具有严重的局限性。近年来,电弧等离子体模拟研究得到飞速发展,在喷涂^[10]、焊接^[11-12]、切割^[13]等领域有很好的应用,国内外学者^[14-18]分别建立了自由等离子体电弧的数学模型,且大部分研究的电弧等离子体的弧长不超过 20 mm,主要应用在焊接及热切割等领域。而钢铁冶金领域对电弧炉内电弧弧长、放电功率具有更高的要求,尤其是全废钢连续加料电弧炉,其全程泡沫渣埋弧冶炼要求弧长达到 400 ~ 500 mm,目前对这方面的研究鲜有报道。

本文以全废钢连续加料电弧炉为研究对象,简化物理模型,重点研究电弧炉内电弧等离子体特性,建立了二维轴对称稳态电弧的数学模型。采用磁矢量势^[19-20]通过 Fluent 中的自定义标量方程来求解磁场,并耦合求解磁流体动力学方程和电磁场控制方程,对电弧炉内长电弧的物理场分布规律进行研究。同时通过数值模拟的方法探究了不同电流及弧长对电弧特性的影响规律,为提高电弧热效率和改进冶炼工艺提供了理论和实践指导。

1 数学模型

1.1 模型假设

电弧等离子体物理现象极其复杂,在建模过程中做如下假设:

(1) 电弧等离子体处于局部热力学平衡状态 (Local thermodynamic equilibrium)^[21];

(2) 电弧等离子体是光学薄膜,即忽略等离子体辐射损失中的自吸收部分;

(3) 电弧等离子体稳定、且呈轴对称分布,并考虑湍流的影响;

(4) 电弧为大气压下的空气,其密度、黏度、比热容、热导率、电导率以及辐射热损失仅为温度

的函数^[22-24]。

1.2 控制方程

电弧是一种带电的磁流体,满足磁流体力学方程组。在柱坐标下,其控制方程如下。

质量连续方程:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho v)}{\partial r} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

轴向动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho uu)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(r\rho vu)}{\partial r} = -\frac{\partial p}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left[r\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] + j_r B_\theta + \rho g \end{aligned} \quad (2)$$

径向动量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho vv) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho uv) = -\frac{\partial p}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2r\mu \frac{\partial v}{\partial r} \right) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial z} \left[r\mu \left(\frac{\partial u}{\partial r} + \frac{\partial v}{\partial z} \right) \right] - 2\mu \frac{v}{r^2} - j_z B_\theta \end{aligned} \quad (3)$$

能量守恒方程:

$$\begin{aligned} \frac{\partial(\rho c_p u T)}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial(\rho c_p r v T)}{\partial r} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(rk \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + \\ \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} + \frac{5}{2} \frac{k_b}{e} \left(j_z \frac{\partial T}{\partial z} + j_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - S_R \end{aligned} \quad (4)$$

使用标准 $K-\varepsilon$ 湍流模型来表示电弧等离子体射流的湍流特性,具体输运方程如下。

湍流动能输运方程 (K 方程):

$$\frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z K) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r K) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_k \frac{\partial K}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma_k \frac{\partial K}{\partial r} \right) + S_K - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍流动能耗散率输运方程 (ε 方程):

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z \varepsilon) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (r\rho v_r \varepsilon) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial z} \right) + \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\Gamma_\varepsilon \frac{\partial \varepsilon}{\partial r} \right) + C_1 \varepsilon \frac{S_K}{K} - C_2 \rho \frac{\varepsilon^2}{K} \end{aligned} \quad (6)$$

其中

$$\Gamma_k = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k}, \Gamma_\varepsilon = \mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \quad (7)$$

$$S_K = \frac{\rho C_D K^2}{\varepsilon} \left\{ 2 \left[\left(\frac{\partial v_z}{\partial z} \right)^2 + \left(\frac{\partial v_r}{\partial r} \right)^2 + \left(\frac{v_r}{r} \right)^2 \right] \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right)^2 \right\} \quad (8)$$

为计算电弧等离子体的电磁场,采用麦克斯韦方程组进行求解。

电流连续性方程:

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (9)$$

欧姆定律:

$$j_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}, j_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r} \quad (10)$$

电弧自感应磁场方程:

本文引入磁矢量势 A 来求解磁场强度, 柱坐标下 B_θ 的表达式为:

$$B_\theta = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r} \quad (11)$$

磁矢量势的求解公式为:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_z}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_z}{\partial z} \right) = -\mu_0 j_z \quad (12)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial A_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{\partial A_r}{\partial z} \right) = -\mu_0 j_r + \frac{A_r}{r^2} \quad (13)$$

式中: 下标 r 和 z 分别表示径向和轴向; u 和 v 分别为轴向速度分量和径向速度分量; T 和 p 分别表示温度和压力; ρ 、 c_p 、 k 、 μ 、 σ 、 S_R 分别为空气的密度、比热容、热导率、黏性系数、电导率和单位体积的辐射热损失; φ 为电势; j_r 和 j_z 分别为径向电流密度和轴向电流密度; A_r 和 A_z 分别为径向磁矢量势和轴向磁矢量势; B_θ 为电弧自感应磁场的周向分量; μ_0 为磁导率, 取值为 $4\pi \times 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$; k_b 为玻尔兹曼常数; e 为电子电荷量; $K-\varepsilon$ 方程中的常数 C_1 、 C_2 、 C_D 、 σ_k 、 σ_ε 的取值分别为 1.44、1.92、0.09、1.0 和 1.3^[25].

1.3 模型及边界条件

图 1 为电弧炉电弧模拟的计算区域. 基于模型假设条件, 将三维电弧问题转换为二维模型, 以 x 轴方向作为对称轴, 导入 Fluent 后以 Axisymmetric 轴对称模型进行计算. 网格模型采用 ICEM 前处理软件进行结构网格划分, 考虑到电弧温度场和流场变化梯度较大, 在电极正下方区域进行网格加密处理.

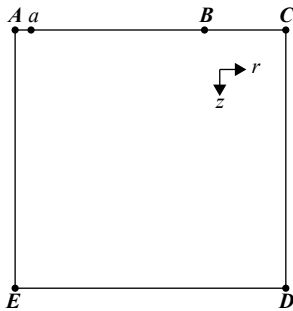


图 1 电弧炉电弧模拟的计算区域

Fig.1 Computational domain of the arc model

全废钢连续加料电弧炉冶炼过程中, 采用泡沫渣埋弧工艺, 弧长较长, 选取一组冶炼工艺对电

弧进行模拟, 参数设置为石墨电极直径 550 mm, 弧长 400 mm, 电弧电流 40 kA. 模型中, AB 为石墨电极端部, 长 275 mm; AE 为对称轴, 取弧长 400 mm; 考虑到只研究电弧区域, 未按电炉直径划分模型, 取 AC 为 400 mm; DE 为电弧与熔池的界面, 不考虑电弧鞘层的影响. 模型的边界条件如表 1 所示.

表 1 电弧模拟边界条件

Table 1 Boundary conditions of the arc simulation			
Boundary	T/K	φ/V	$A/(\text{W} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-1})$
AB	4130 or 1800	$-\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} = J$ or 0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
C	1800	$\frac{\partial \varphi}{\partial z} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
CD	1800	$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$	0
DE	1800	0	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$
AE	$\frac{\partial T}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial \varphi}{\partial r} = 0$	$\frac{\partial A}{\partial n} = 0$

石墨电极属于高熔点电极, 其热电子释放机理为^[24]: 阴极斑点相对移动较小、阴极电流密度分布与电流值无关. 本模型不考虑阴极斑点的移动, 在阴极斑点处(区域 Aa), 认为电弧电流密度(J)满足如下分布规律^[26]:

$$J = 2J_C \left[1 - \left(\frac{r}{R_C} \right)^2 \right] \quad (14)$$

式中, J_C 为热电子释放密度, 取值 $4.4 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ ^[24-26], r 为电弧半径, R_C 为阴极斑点半径.

阴极斑点半径与阴极热电子密度的关系如式(15)所示.

$$R_C = \left(\frac{I}{\pi J_C} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (15)$$

式中, I 为电弧电流.

对于阴极斑点处(区域 Aa)的电极温度, 由理查森-杜什曼(Richardson-Dushman)理论公式可知^[24], 当 $J_C = 4.4 \times 10^7 \text{ A} \cdot \text{m}^{-2}$ 时, 阴极斑点处(区域 Aa)温度约为 4130 K, 低于石墨电极的熔点(约 4700 K); 在阴极斑点以外区域(aB)假定温度为 1800 K, 这是依据电弧炉内炼钢温度选取的.

2 结果与讨论

2.1 电弧模型的验证

为了验证电弧模型的准确性, 与鲍曼的电弧实验实测数据进行比对. 鲍曼采用一种基于“钢球偏移技术”的实验方法对电弧电流不超过 2160 A 的自由电弧速度场进行测量, 测量数据是后来理

论计算中常用的对比基准^[27]. 实验中通过测定钢球的位置偏移量和相应的理论计算以获得电弧射流的场分布^[28].

采用本模型对鲍曼实验所用参数(阴极电极直径 50 mm、电弧弧长 70 mm、电弧电流 520、1150 和 2160 A)进行电弧模拟预测. 选取电弧电流为 1150 A 重点分析, 其电弧温度分布如图 2 所示. 由图 2 可知, 电弧呈典型“钟罩型”, 最高温区域集中在电极正下方, 与其他学者所描述的电弧形态基本吻合.

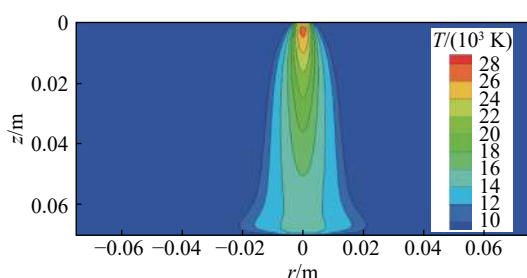


图 2 电弧电流为 1150 A 的温度分布图

Fig.2 Temperature distribution with an arc current of 1150 A

根据鲍曼实验数据, 电弧电流为 1150 A 时距离阴极不同位置(20、38 和 55 mm)时电弧等离子体速度的径向分布的测量结果和本模型模拟计算值二者吻合良好(图 3). 三种不同电弧电流下鲍曼实验数据与模拟数据中等离子体流速对比如表 2 所示, 由表可知, 不同电弧电流在距离阴极不同位置处模拟数据与鲍曼实验测量的等离子体流速几乎相同, 且偏差在误差允许范围之内, 表明本模型准确性较好, 可靠性较高.

2.2 不同电流大小对电弧特性的影响

弧长固定为 400 mm, 研究不同电流大小(30、40 和 50 kA)对电弧特性的影响.

图 4 显示不同电流大小对电弧温度分布的影响. 由图可知, 在湍流影响以及强烈的洛伦兹力作用下, 电弧等离子体收缩, 电弧柱细长, 电弧尾部呈“钟摆型”, 整体呈“长钟型”, 与文献报道相符^[29]. 这可能是由于在石墨阴极附近存在较大的电流密度, 形成高温核心区; 而且随着电流的增大, 电弧的最高温度变化略有上升, 但高温核心区域增大, 电弧尾部钟摆范围扩大, 电弧有效作用范围变大,

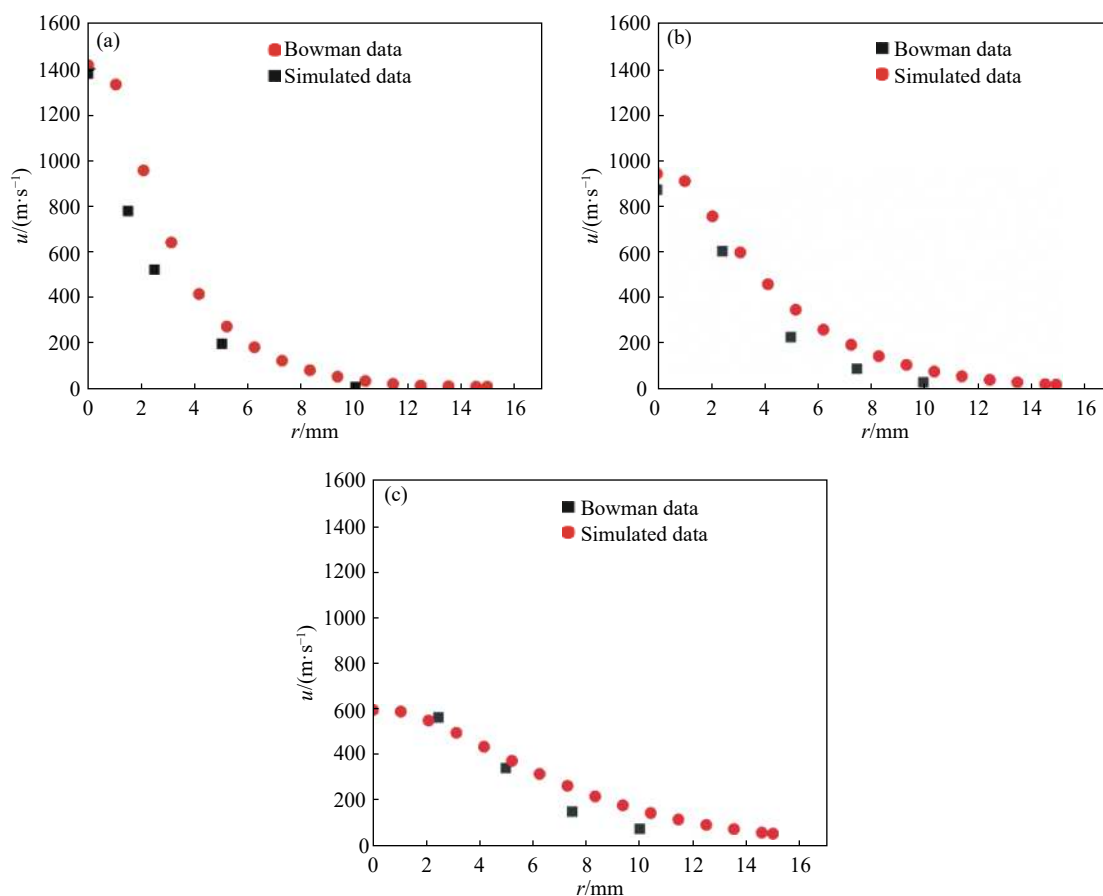


图 3 电弧电流为 1150 A 时距离阴极不同位置处鲍曼实验数据与模拟数据电弧等离子体速度的径向分布对比图. (a) 20 mm; (b) 38 mm; (c) 55 mm

Fig.3 Comparison diagram of the radial distribution of the arc plasma velocity at different positions of the Bowman experiment data and simulation data at an arc current of 1150 A: (a) 20 mm; (b) 38 mm; (c) 55 mm

表 2 不同电弧电流下鲍曼实验数据^[28]与模拟数据中等离子体流速对比

Table 2 Comparison of the plasma flow rate between Bowman data and simulated data at different currents

Current/A	Distance from the cathode/mm					
	20		38		55	
	Bowman/(m·s ⁻¹)	Simulated/(m·s ⁻¹)	Bowman/(m·s ⁻¹)	Simulated/(m·s ⁻¹)	Bowman/(m·s ⁻¹)	Simulated/(m·s ⁻¹)
520	520	548	230	254	180	160
1150	1400	1415	1000	942	600	585
2160	1500	1449	950	920	500	733

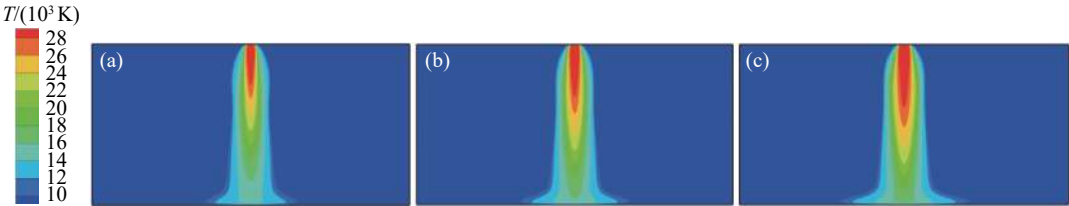


图 4 不同电流大小对电弧温度分布的影响. (a) 30 kA; (b) 40 kA; (c) 50 kA

Fig.4 Effect of different currents on the arc temperature distribution: (a) 30 kA; (b) 40 kA; (c) 50 kA

有利于加大与熔池的热量传递.

电流为 40 kA, 弧长为 400 mm 条件下的电弧速度进行分析, 如图 5 所示. 等离子体在阴极附近被洛伦兹力加速, 距阴极约 70 mm 处达到最大速度 7606 m·s⁻¹, 随后速度开始衰减, 至阳极表面附近由于阻碍作用等离子体速度急剧衰减, 最终降为 0. 同时, 在阳极表面处, 距离中心轴线约 50 mm 处存在速度梯度较大区域, 该区域直接影响阳极表面气体剪切力分布.

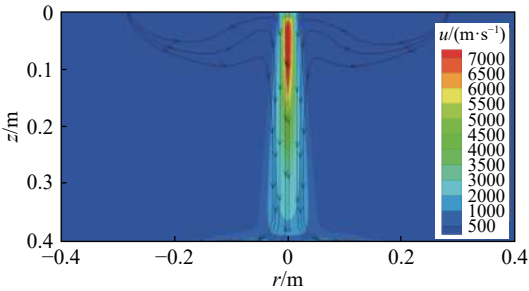


图 5 40 kA-400 mm 工艺条件下电弧速度分布

Fig.5 Arc velocity distribution under 40 kA-400 mm process conditions

图 6 为不同电流大小对电弧中心轴线速度分布的影响. 由图可知, 随着电流的增大, 电弧中心轴线速度整体增大. 这是由于随着电流的增大, 阴极附近电势梯度增大, 导致电流密度增大, 由于磁场和电场的相互作用, 产生的电磁力更大, 从而阴极射流更明显, 中心轴线速度更大.

图 7 分别为阳极表面处电弧压力和气体剪切力的径向分布图. 由图 7(a)可知, 电弧压力呈高斯分布; 在弧长不变的情况下, 电弧压力随电流的增

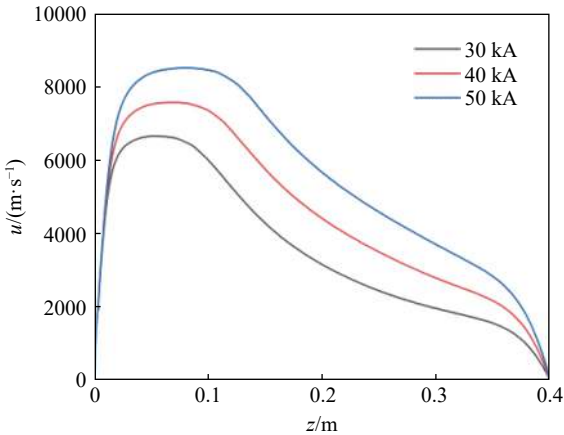


图 6 不同电流大小对电弧中心轴线速度分布的影响

Fig.6 Effect of different currents on the velocity distribution of the arc central axis

大而增大, 而且主要集中在电弧轴线的中心位置, 50 kA 时电弧压力峰值最大, 达到 3.4×10^4 Pa. 由于电弧压力较大, 会对熔池冲击产生一定深度的凹坑. 由图 7(b)可知, 剪切力先增大后减小, 在距对称轴约 50 mm 处达到最大值, 这可能是由于该处速度梯度最大(见图 5), 因此剪切力峰值出现在此处. 剪切力随着电流的增大而增大, 整体变化趋势基本保持一致. 气体剪切力驱动熔池流动的作用仅次于表面张力^[30], 使熔池由内向外流动.

2.3 不同弧长对电弧特性的影响

固定电流大小为 40 kA, 研究不同弧长(300、400 和 500 mm)对电弧的影响.

图 8 为不同弧长情况下电弧温度分布云图. 由图可知, 不同弧长情况下电弧温度分布基本保

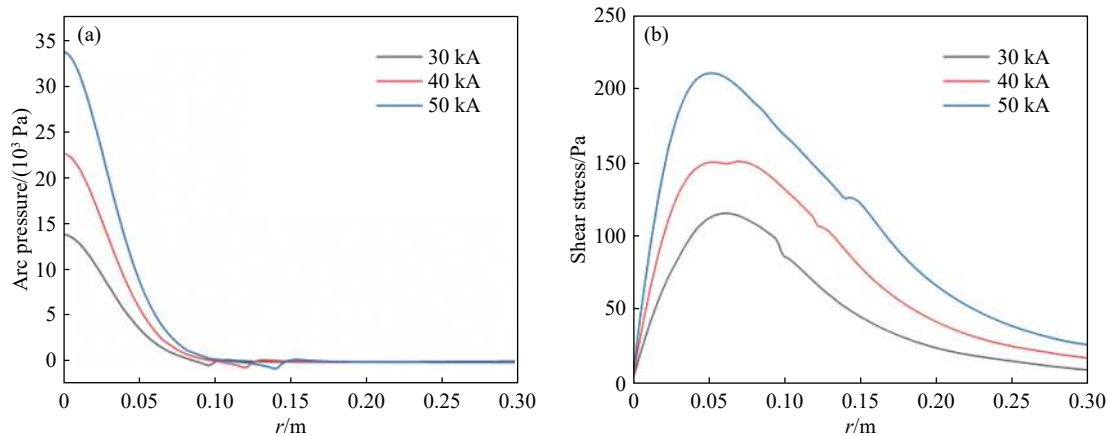


图 7 不同电流大小对电弧作用力的影响. (a)电弧压力; (b)气体剪切力

Fig.7 Effect of different currents on arc force: (a) arc pressure; (b) shear stress

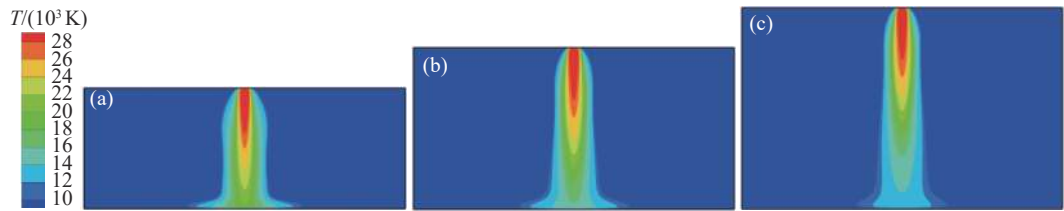


图 8 不同弧长对电弧温度分布的影响. (a)300 mm; (b)400 mm; (c)500 mm

Fig.8 Effect of different arc lengths on the arc temperature distribution: (a) 300 mm; (b) 400 mm; (c) 500 mm

持一致. 当弧长较短时, 电弧柱较粗, 电弧尾部钟摆范围较大, 随着弧长的增加, 电弧柱变得细长, 电弧尾部钟摆范围缩小, 电弧有效作用范围减小.

图 9 为阳极表面处电弧压力和气体剪切力的径向分布图. 由图 9(a)可知, 当电流恒定时, 电弧压力随弧长的增加而减小, 弧长 300 mm 时电弧压

力峰值最大, 达到 3.2×10^4 Pa. 这主要是由于随着弧长增加, 等离子体在接近阳极表面时速度减小, 对阳极撞击作用减小, 从而导致压力减小. 图 9(b)显示在径向分布上剪切力同样保持先增大后减小的变化趋势. 并且剪切力随着弧长的增加而减小, 同时峰值位置会有所移动.

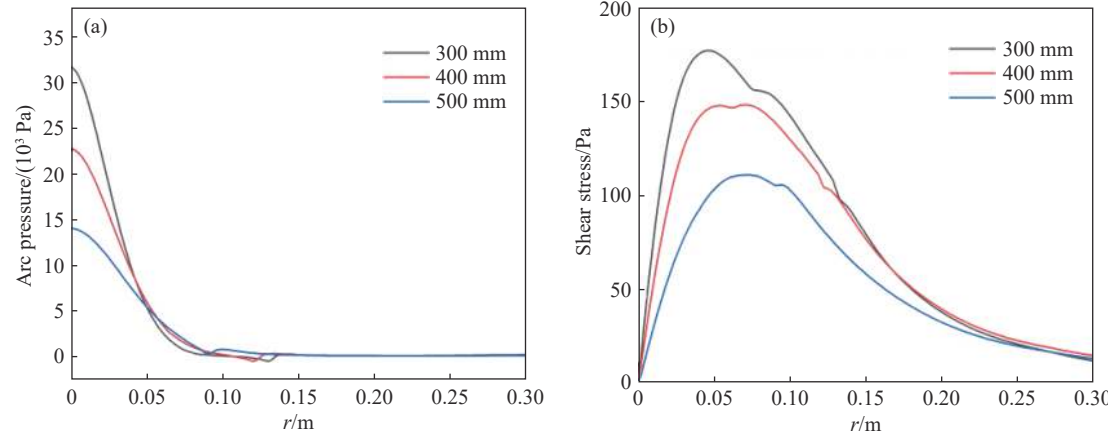


图 9 不同弧长对电弧作用力的影响. (a)电弧压力; (b)气体剪切力

Fig.9 Effect of different arc lengths on arc force: (a) arc pressure; (b) shear stress

目前国内外电弧炉普遍采用长弧操作的高阻抗电弧炉, 其突出特点是: 高电压、长电弧, 小电流和高电效率等^[31]. 但从炉内熔池的升温及废钢熔化速度的角度来说, 根据本模拟研究结果: 大电

流、短弧长更有利于加大电弧对熔池的冲击, 以及与钢液的热交换, 便于电弧炉内熔池的升温以及废钢熔化. 对全废钢连续加料电弧炉来说, 其炉内预留 20%~30% 的钢水主要通过电弧加热钢液、

钢液熔化废钢的间接加热方式, 而非电弧直接熔化废钢, 无需长电弧, 此时只需大电流(短弧)快速提升钢液温度, 同时短弧操作时更大的电弧力对熔池进行搅拌, 有利于钢液流动及热量传递, 从而快速提高熔池温度, 加快废钢的熔化速度, 在炼钢过程中具有显著的优势。

3 结论

本文采用基于磁矢量势的磁流体动力学方法对全废钢连续加料电弧炉内长电弧等离子体进行数值模拟, 研究了电流大小、电弧弧长对电弧特性的影响, 得到以下主要结论:

(1) 全废钢连续加料电弧炉内长电弧等离子体呈“长钟型”分布, 电弧柱较细长, 电弧尾部呈钟摆型。在石墨电极阴极附近温度和速度梯度大, 并存在最大值, 随后沿着轴线方向衰减。

(2) 随着电流的增大, 电弧有效作用范围增大, 电弧中心轴线速度增大, 阳极表面电弧压力和气体剪切力增大。增大电流有利于加大与熔池的热量传递。

(3) 随着弧长的增加, 电弧有效作用范围减小, 阳极表面的电弧压力和气体剪切力减小。短弧操作对熔池冲击剧烈, 而长弧操作熔池较为平稳。

参 考 文 献

- [1] Teng L D, Meador M, Ljungqvist P. Application of new generation electromagnetic stirring in electric arc furnace. *Steel Res Int*, 2017, 88(4): 1600202
- [2] Hay T, Echterhof T, Visuri V V. Development of an electric arc furnace simulator based on a comprehensive dynamic process model. *Processes*, 2019, 7(11): 852
- [3] He X W. Current status and development trend of EAF steelmaking process at home and abroad. *Eng Technol*, 2016(67): 268
(何孝文. 炼钢短流程工艺国内外现状及发展趋势. 工程技术, 2016(67): 268)
- [4] Zhu R, Wei G S, Dong K. Development of green and intelligent technologies in electric arc furnace steelmaking processes// *Proceedings of the 11th China Iron and Steel Annual Conference*. Beijing, 2017: 1
(朱荣, 魏光升, 董凯. 电弧炉炼钢绿色及智能化技术进展//第十一届中国钢铁年会论文集. 北京, 2017: 1)
- [5] Zhu R, Wei G S, Tang T P. Technologies of purification production in electric arc furnace steelmaking processes. *Steelmaking*, 2018, 34(1): 10
(朱荣, 魏光升, 唐天平. 电弧炉炼钢流程洁净化冶炼技术. 炼钢, 2018, 34(1): 10)
- [6] Kukharev A, Bilousov V, Bilousov E, et al. The peculiarities of convective heat transfer in melt of a multiple-electrode arc furnace. *Metals*, 2019, 9(11): 1174
- [7] Odenthal H J, Kemminger A, Krause F, et al. Review on modeling and simulation of the electric arc furnace (EAF). *Steel Res Int*, 2018, 89(1): 1700098
- [8] Fathi A, Saboohi Y, Škrjanc I, et al. Low computational-complexity model of EAF arc-heat distribution. *ISIJ Int*, 2015, 55(7): 1353
- [9] Guo Z Y, Zhao W H. *Arc and Thermal Plasma*. Beijing: Science Press, 1986
(过增元, 赵文华. 电弧和热等离子体. 北京: 科学出版社, 1986)
- [10] Song C. *Numerical Simulation and Experimental Verification of DC Arc Plasma Sprayed Alumina*[Dissertation]. Changsha: Central South University, 2014
(宋琛. 直流电弧等离子体喷涂 Al_2O_3 的数值模拟与实验验证[学位论文]. 长沙: 中南大学, 2014)
- [11] Pan J J, Hu S S, Yang L J, et al. Numerical analysis of the heat transfer and material flow during keyhole plasma arc welding using a fully coupled tungsten-plasma-anode model. *Acta Mater*, 2016, 118: 221
- [12] Pan J J, Hu S S, Yang L J, et al. Simulation and analysis of heat transfer and fluid flow characteristics of variable polarity GTAW process based on a tungsten-arc-specimen coupled model. *Int J Heat Mass Transfer*, 2016, 96: 346
- [13] Zhou Q H. *Numerical Simulation of DC Arc Plasma Torch*[Dissertation]. Shanghai: Fudan University, 2009
(周前红. 直流电弧等离子体炬的数值模拟[学位论文]. 上海: 复旦大学, 2009)
- [14] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc. *J Appl Phys*, 1983, 54(3): 1293
- [15] Lowke J J, Kovitya P, Schmidt H P. Theory of free-burning arc columns including the influence of the cathode. *J Phys D Appl Phys*, 2000, 25(11): 1600
- [16] Fan D, Chen J H, Ushio M. Numerical analysis of the heat and mass transfer process in TIG arc. *Chin J Mech Eng*, 1998, 34(2): 39
(樊丁, 陈剑虹, 牛尾诚夫. TIG电弧传热传质过程的数值分析. 机械工程学报, 1998, 34(2): 39)
- [17] Lu F G, Yao S, Qian W F. Numerical analysis on tungsten inert gas welding arc. *J Shanghai Jiaotong Univ*, 2003, 37(12): 1862
(芦凤桂, 姚舜, 钱伟方. 钨极氩弧焊焊接电弧数值分析. 上海交通大学学报, 2003, 37(12): 1862)
- [18] Lu F G. *3D Numerical Simulation on Dynamic Interaction between TIG Welding Arc and Weld Pool*[Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2004
(芦凤桂. TIG焊接电弧与熔池动态交互作用三维数值模拟[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2004)
- [19] Li L M, Li B K, Liu L C, et al. Numerical modeling of fluid flow, heat transfer and arc-melt interaction in tungsten inert gas welding. *High Temp Mater Processes*, 2017, 36(4): 427
- [20] Wang X X, Huang J K, Huang Y, et al. Investigation of heat

- transfer and fluid flow in activating TIG welding by numerical modeling. *Appl Therm Eng*, 2017, 113: 27
- [21] Hsu K C, Pfender E. Two-temperature modeling of the free-burning, high-intensity arc. *J Appl Phys*, 1983, 54(8): 4359
- [22] Capitelli M, Colonna G, Gorse C, et al. Transport properties of high temperature air in local thermodynamic equilibrium. *Eur Phys J D*, 2000, 11(2): 279
- [23] Zhu Y B, Song D L, Zeng Z S, et al. *DC Electric Arc Furnace Steelmaking Technology*. Beijing: Metallurgical Industry Press, 1997
(朱应波, 宋东亮, 曾昭生, 等. 直流电弧炉炼钢技术. 北京: 冶金工业出版社, 1997)
- [24] Wang F, Jin Z, Zhu Z. Numerical study of dc arc plasma and molten bath in dc electric arc furnace. *Ironmaking Steelmaking*, 2006, 33(1): 39
- [25] Morris J C, Bach G R, Krey R U, et al. Continuum radiated power for high-temperature air and its components. *AIAA J*, 1966, 4(7): 1223
- [26] Wang F H, Jin Z J, Zhu Z S. Numerical simulation of plasma in DC electric arc furnace. *High Vol Apparatus*, 2005, 41(4): 241
(王丰华, 金之俭, 朱子述. 直流电弧炉电弧等离子体射流的数值模拟. *高压电器*, 2005, 41(4): 241)
- [27] Wang F H. *Study of Modeling the Electric Arc Furnace and Its Application*[Dissertation]. Shanghai: Shanghai Jiaotong University, 2006
(王丰华. 电弧炉建模研究及其应用[学位论文]. 上海: 上海交通大学, 2006)
- [28] Bowman B. Measurements of plasma velocity distributions in free-burning DC arcs up to 2160 A. *J Phys D Appl Phys*, 1972, 5(8): 1422
- [29] Qi J W, Hu M, Shao Z R, et al. Numerical simulation of three-dimensional long arc magneto-hydrodynamic. *Ind Heat*, 2018, 47(6): 38
(齐景伟, 胡明, 邵哲如, 等. 三维长电弧磁流体动力学数值模拟. *工业加热*, 2018, 47(6): 38)
- [30] Choo R T C, Szekely J, Westhoff R C. Modeling of high-current arcs with emphasis on free surface phenomena in the weld pool. *Weld J*, 1990, 69(9): 346
- [31] Tong Y B, Liu Z, Luo Y Z, et al. High impedance EAF of long arc operation. *Metall Equip*, 2014(6): 20
(仝永博, 刘征, 罗玉镯, 等. 采用长弧操作的高阻抗电弧炉. *冶金设备*, 2014(6): 20)