DOI: 10.3901/JME.2020.20.082

等离子弧焊匙孔对电弧物理特性影响规律的研究*

忻建文^{1,2} 吴东升^{1,2} 李芳^{1,2} 张跃龙^{1,2} 华学明^{1,2}

(1. 上海交通大学焊接与激光制造研究所 上海 200240;

2. 上海交通大学上海市激光制造与材料改性重点实验室 上海 200240)

摘要: 匙孔是等离子弧焊的重要特征。建立等离子弧焊电弧数值模型, 对比分析含匙孔和不考虑匙孔的两种情况下, 电弧温度场、流场、电磁场等物理特性的差异性, 揭示匙孔对等离子弧物理特性的影响规律。采用光谱诊断方法计算电弧温度分布, 从而验证模拟结果。数值模拟研究结果表明, 匙孔的出现, 导致电弧体积增大, 弧柱区平均电流密度下降, 从而导致电弧最高温度降低约 2 400 K, 等离子体最大流速从 437 m/s 降低到 349 m/s。匙孔直径沿匙孔深度方向减小, 对电弧产生附加的机械压缩作用, 使匙孔底部电弧的温度和速度上升。数值模拟与光谱诊断获取的轴线上温度大小及变化规律相接近, 证明电弧数值模型的可靠性, 也说明建立等离子弧数值模型时, 应当考虑匙孔的影响。

关键词: 等离子弧焊; 数值模拟; 匙孔效应; 光谱诊断

中图分类号: TG456

Influence Mechanisms of Keyhole on the Arc Characteristics in Plasma Arc Welding

XIN Jianwen^{1,2} WU Dongsheng^{1,2} LI Fang^{1,2} ZHANG Yuelong^{1,2} HUA Xueming^{1,2}

(1. Welding and Laser Processing Institute, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240;

2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240)

Abstract: The generation of keyhole is an important feature of plasma arc welding. To elucidate the influence of a preset keyhole on the arc, numerical models of plasma arcs are established, and physical properties such as temperature field, fluid flow field, electromagnetic field are analyzed. A spectrum analysis system is developed to obtain the plasma arc temperature distribution. The numerical results show that the existence of a keyhole causes an expansion of the plasma arc and the decrease of average current density; therefore, the maximum temperature of the plasma arc is decreased by about 2 400 K, which is consistent with experimental result. The maximum plasma velocity is decreased from 437 m/s to 349 m/s. The keyhole diameter shrinks along its depth, producing additional mechanical compression on the arc, which increases the temperature and speed of the arc at the bottom of the keyhole. All of these effects prove that an effective numerical model of an arc ought to consider keyhole effects.

Key words: plasma arc welding; numerical simulation; keyhole effect; spectral diagnosis

0 前言

在水冷喷嘴、等离子气和电磁力三重压缩作用下, 等离子弧焊接过程中会产生高温高速等离子体射流, 熔池表面严重变形, 并产生穿透匙孔。

同为匙孔深熔焊, 激光焊和等离子弧焊的匙孔对等离子体的影响规律存在较大差异。由于匙孔对

激光的多重反射和 Fresnel 吸收, 匙孔表面温度超过沸点, 产生大量金属蒸汽^[1]。金属蒸汽喷射速度较高^[2], 热导率和辐射系数较大^[3], 从而导致激光等离子体速度增加, 温度降低^[4]。

在等离子弧焊中, 匙孔表面温度较低^[5], 金属蒸汽浓度较低, 对等离子弧物理特性的影响很小^[6]。JIAN 等^[7]建立了电弧-匙孔-熔池的耦合模型, 采用多相流模型(Volume of fluid, VOF)追踪匙孔自由表面, 匙孔形成过程中等离子弧的最大温度与速度基本不变。WU 等^[8-9]的模拟结果表明匙孔的出现对等离子弧存在机械压缩作用。LI 等^[10]建立了等离子弧

* 工业和信息化部高技术船舶科研计划(薄膜型围护系统(MARK III型)材料应用研究)资助项目。20191119 收到初稿, 20200423 收到修改稿

定点焊数值模型，发现匙孔改变了电弧的前端流动和压力状态。实际等离子弧点焊过程中，电弧形态和匙孔形状时刻发生变化，在数值模拟中，不能假设电弧处于准稳态。

本文采用水冷铜作为工件，获取准稳态等离子弧。利用 ANSYS Fluent 建立了含固定尺寸匙孔的等离子弧焊数值模型，对比分析了含匙孔和不考虑匙孔的两种情况下，等离子弧温度场、流场、电磁场等物理特性的差异性，揭示匙孔对准稳态等离子弧物理特性的影响规律，并建立光谱诊断系统，计算获取等离子弧焊温度场分布，验证了模拟结果的可靠性。

1 等离子弧焊电弧数值模型

1.1 控制方程

考虑到等离子弧焊接过程中，等离子体处在高温高速状态，在数学模型中，采取了以下假设：电弧处于局部热力学平衡状态；电弧为光学薄，对辐射无再吸收^[8]；选择 ANSYS Fluent 内嵌的 Standard $k-\varepsilon$ 模型^[11]模拟流场内等离子体湍流状态。

在满足上述假设条件的情况下，在轴对称坐标系(r - z)下可以用如下的质量、能量和动量守恒方程，描述电弧等离子体的准稳态流动状态。

质量连续方程为

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

能量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho c_p v_r T) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho c_p v_z T) = \\ \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r K \frac{\partial T}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(K \frac{\partial T}{\partial z}\right) + S_E \end{aligned} \quad (2)$$

$$S_E = \frac{j_r^2 + j_z^2}{\sigma} + \frac{5K_B}{2e} \left(j_r \frac{\partial T}{\partial r} + j_z \frac{\partial T}{\partial z} \right) - U \quad (3)$$

式中， S_E 的第一项为焦耳热，第二项为电子迁移传热，第三项为辐射损失； j_r 、 j_z 分别为电流密度的径向和轴向分量，通过自定义的电磁场方程计算得出， σ 是电导率， e 是电子电量， K_B 为 Boltzmann 常数， K 为介质的热导率。

动量守恒方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_r v_z) = \frac{2\partial}{\partial r}\left(r \mu \frac{\partial v_r}{\partial r}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial z}\left(\mu \left(\frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial r}\right)\right) - \frac{\partial P}{\partial r} - \frac{2\mu v_r}{r^2} + S_{M_r} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_z v_r) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z^2) = \frac{2\partial}{\partial z}\left(\mu \frac{\partial v_z}{\partial z}\right) + \\ \frac{\partial}{\partial r}\left(\mu r \left(\frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z}\right)\right) - \frac{\partial P}{\partial z} + S_{M_z} \end{aligned} \quad (5)$$

$$S_{M_r} = -j_z B_\theta \quad (6)$$

$$S_{M_z} = j_r B_\theta \quad (7)$$

式中， B_θ 表示方位磁场强度，通过计算磁矢势得出。

为求解焦耳热和驱动等离子体运动的洛伦兹力，还需要建立电磁场方程求解计算区域内电磁场的分布。

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}\right) = 0 \quad (8)$$

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}\left(r \sigma \frac{\partial A_z}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial A_z}{\partial z}\right) = -\mu_0 j_z \quad (9)$$

$$\frac{\partial}{\partial r}\left(r \sigma \frac{\partial A_r}{\partial r}\right) + \frac{\partial}{\partial z}\left(\sigma \frac{\partial A_r}{\partial z}\right) = -\mu_0 j_r + \frac{A_r}{r^2} \quad (10)$$

式中， φ 为电势， A_r 、 A_z 分别为磁矢势的径向和轴向分量。

湍流模型的标准 $k-\varepsilon$ 方程为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho k}{\partial t} + \nabla(\rho v k) = \\ \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla k \right) + \rho G_k - \rho \varepsilon \end{aligned} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \rho \varepsilon}{\partial t} + \nabla(\rho v \varepsilon) = \nabla \cdot \left(\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \nabla \varepsilon \right) +$$

$$\frac{\varepsilon \rho}{k} (c_1 G_k - c_2 \varepsilon) \quad (12)$$

式中， k 为湍流动能， ε 为湍流耗散率， G_k 为湍流能量的梯度算子，其余为模型的常系数。

各守恒方程源项采用 User defined scalar 及 User defined function 形式传递到 Fluent 软件中。

1.2 计算区域与边界条件

为研究匙孔对等离子弧物理特性的影响规律，建立了含匙孔和不含匙孔两种模型。模型几何参数如图 1 所示，含匙孔模型中匙孔形状与水冷铜板内预制匙孔相一致，无匙孔模型经过轴对称翻转。利

图 1 含匙孔与不含匙孔的等离子弧焊计算模型

用 ICEM 对两种模型进行结构化网格划分,为提高计算精度,在靠近钨极区域加密网格。为节约计算时间,在靠近气体出口处,选择较稀疏的网格分布。模型采用的其他温度场与电磁场边界条件如表 1 所示。

表 1 PAW 电弧模拟模型的边界条件设置

边界	温度/K	电流/A	轴向磁矢势	径向磁矢势
钨极顶端	300	120	$\frac{\partial A_z}{\partial n} = 0$	$\frac{\partial A_r}{\partial n} = 0$
钨极表面	3 000	—	—	—
喷嘴表面	—	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	—	—
阳极表面	300	—	—	—
阳极侧面	—	0	0	0
气体出口	300	$\frac{\partial \varphi}{\partial n} = 0$	$\phi_B = 0$	$\phi_B = 0$

1.3 试验方法

对含匙孔和不含匙孔的两块水冷铜工件分别进行等离子弧定点焊接试验。含匙孔的铜板结构如图 2 所示,在铜板中心间隔 15 mm 钻孔,孔径和计算模型保持一致,在匙孔两侧钻水槽,通循环冷却水,达到水冷效果。

图 2 焊接试验所用水冷铜截面示意图(含匙孔)

焊接电流设置为 120 A, 钨极内缩量为 3.4 mm。钨极外水冷喷嘴直径为 2.4 mm, 离子气流量为 2.5 L/min, 保护气流量为 20 L/min。焊接过程中, 采用 Ocean Optic 公司的 HR4000 光谱仪^[12](测量范围为 380~520 nm, 分辨率为 0.05 nm)获取焊枪轴线上, 工件上方 2 mm、3 mm、4 mm 处谱线的相对强度。根据玻尔兹曼作图法要求^[13-14], 选择置信度最高的 Ar II 特征谱进行分析, 计算采集点的电弧温度。

2 结果与讨论

2.1 匙孔对电弧温度场的影响规律

数值模拟得到的等离子弧温度场如图 3 所示。

不含匙孔模型喷嘴附近电弧最高温度为 19 816 K, 含匙孔模型中, 电弧体积增大, 但喷嘴附近电弧最高温度从 19 816.15 K 降低至 17 403.96 K, 此外, 电弧高温区面积有减小。

图 3 含匙孔模型与不含匙孔模型的电弧温度场对比

图 4 为两种模型中距工件上表面 0.5 mm 处(图 3 中虚线 A-A 处)的温度场对比, 可见在外部区域, 电弧温度差异较小, 而在匙孔区域, 电弧温度差异较大, 含匙孔模型模拟得到的温度分布有显著降低。采用后处理软件计算了电弧区域内的总焦耳热, 为 1 993.23 W, 匙孔区域和通过匙孔至工件背部区域的电弧产生的焦耳热为 210.09 W, 约占总焦耳热的 10%, 表明等离子弧能量通过匙孔向工件背部传导。

图 4 两种模型中工件上方 0.5 mm 处径向温度分布对比

匙孔对电弧存在机械拘束作用, 导致电弧无法自由扩展, 截面积减小。由图 5 可见, 沿匙孔深度方向, 电弧温度先减小后增加。这主要是因为沿匙孔深度方向, 匙孔直径减小, 电弧截面积减小, 对电弧的机械压缩作用呈增强趋势, 导致电流密度增大, 焦耳热上升, 电弧温度升高。在 XU 等^[9]的模拟中, 同样出现了电弧温度在匙孔底部上升的现象, 可见匙孔结构的机械压缩作用是形成附加约束的主要原因。

图5 匙孔内部等离子体温度场的变化

2.2 玻尔兹曼图法验证电弧温度场分布

采用第 1.3 节所述条件进行焊接试验, 试验所用水冷铜板结构如图 2 所示。将光谱仪采集到的电弧瞬时光谱数据, 扣除连续谱, 并进行平滑化处理, 得到等离子弧焊电弧在 380~520 nm 波段内的谱线分布。

等离子弧焊中电弧温度较高, Ar 可以发生二次电离, Ar II 谱线强度较高, 标定后的主要谱线如图 6 所示。为降低谱线 A、g 值不确定引起的误差, 选择 NIST 数据库中置信度最高为 A 级的谱线进行玻尔兹曼图法标定。

图6 等离子弧焊电弧光谱标定结果(430~490 nm)

$$\ln\left(\frac{\varepsilon_v}{\nu g_k A_{ki}}\right) = -\frac{1}{kT}E + \ln\left(\frac{h}{4\pi} \frac{n(T)}{Z(T)}\right) \quad (13)$$

如式(13)所示, 发射系数 ε_v 的对数可视为以 $\frac{1}{kT}$

为系数的一次函数, 选取谱线的波长依次为 434.8 nm、442.6 nm、473.6 nm、480.6 nm、488.0 nm, 各条谱线的具体参数见表 2, g_k 为发射

光谱激发能级的简并度, A_{ki} 为该能级的跃迁概率。已知谱线波长, 查表求得谱线的跃迁概率、统计权重和激发态能量, 再测量谱线的相对发射强度, 即可计算得到温度。

表2 部分 Ar II 特征谱谱线数据

谱线	波长 λ /nm	激发能级/eV	$g_k A_{ki}$	置信度
1	434.806 4	19.495 43	1.17×10^8	A
2	442.606 1	19.549 01	8.17×10^7	A
3	473.590 6	19.261 08	5.80×10^7	A
4	480.602 0	19.222 90	7.80×10^7	A
5	487.986 3	19.680 05	8.23×10^7	A

计算过程中, 用相对辐射强度 I 代替发射系数 ε_v , 以 $\ln \frac{I\lambda}{g_k A_{ki}}$ 作为纵坐标, E 作为横坐标, 由多

条谱线计算得到坐标系对应各点, 并拟合为直线。

将数值模拟的电弧温度与光谱诊断结果对比, 如图 7 所示, 在含小孔焊接试验中, 轴线上距喷嘴 2 mm、3 mm、4 mm 处电弧温度分别为 16 591.59 K、15 233.48 K、14 698.53 K。在不含小孔的焊接试验中, 轴线上距喷嘴 2 mm、3 mm、4 mm 处温度分别为 17 171.51 K、16 427.04 K、15 706.05 K。

图7 光谱诊断温度场与数值模拟结果的对比

数值模拟与光谱诊断的结果表明, 匙孔的出现降低了等离子弧的温度。匙孔存在时, 电弧的体积与表面积增加(图 3), 这将导致如图 8 所示, 弧柱区电流密度降低, 焦耳产热降低; 受温度梯度减小影响, 电子迁移热减小; 同时, 电弧向匙孔边界传热增加^[15], 共同导致电弧最大温度降低。由于形成匙孔是等离子弧焊的特点, 建立数值模拟模型时, 应当将匙孔对电弧等离子体的影响考虑在内。

2.3 匙孔对电弧速度场的影响规律

图 9 为两种模型模拟得到的等离子体速度场分布。不考虑匙孔的模型中, 离子气最大速度为

图8 含匙孔模型与不含匙孔模型的电流密度分布对比

437 m/s, 最大速度点位于轴线上距喷嘴外 1.22 mm 处。在含匙孔模型中, 等离子体的最大速度低于不考虑匙孔的模型, 最大速度仅为 349 m/s, 最大速度点位于轴线上距喷嘴外 1.02 mm 处。

图9 含匙孔与不含匙孔模型中等离子体速度场对比

电磁力是等离子体运动的驱动力。含匙孔模型中电弧体积较大, 弧柱区电流密度降低(图8), 电弧温度降低, 在此温度区间内, 氩电导率降低, 电磁力降低, 等离子体动能低于无匙孔模型。在匙孔内, 匙孔直径沿深度方向减小, 对电弧的机械压缩作用增强, 匙孔底部电流密度升高, 电磁力增大, 使得等离子体速度增加, 改变了匙孔内等离子体流场分布^[16-17]。

将图9右侧含匙孔模型框选部分的等离子体速度场放大, 作匙孔附近的速度矢量场(图10)。在含匙孔模型中, 离子气从喷嘴进入焊接区域, 经钨极

图10 含匙孔模型中等离子体速度矢量分布规律

附近电磁场加热加速, 快速冲向焊接区域, 对工件进行挖掘, 形成匙孔。在匙孔中心区域等离子体向下流动, 在匙孔壁侧上方等离子体沿匙孔壁面发生回流, 从工件上方向外吹出。

图11和图12显示了含匙孔模型中等离子体受到的电磁力(为便于显示, 标尺经过处理)。电流在电磁场内受洛伦兹力作用, 弧柱区域内径向电磁力恒为负(左侧无匙孔模型经过翻转), 两种模型中计算结果均指向轴线处, 对电弧起压缩作用。

图11 两种模型中轴向电磁力分布对比

图12 两种模型中径向电磁力分布对比

等离子体在喷嘴外受到轴向电磁力为正方向, 使等离子体从离子气喷嘴喷出, 不断加速并进入匙孔区域。在匙孔底部, 电流方向改变, 轴向电磁力方向相反, 促使等离子体减速, 部分等离子体回流, 从工件上方吹出弧柱区。

3 结论

本文利用 ANSYS Fluent 软件, 建立了含固定尺寸匙孔的等离子弧焊数值模型, 对比分析了含匙孔和不考虑匙孔两种情况下, 电弧温度场、流场和电磁场分布, 得出以下结论。

(1) 在电弧模型中考虑匙孔影响, 将使电弧体积增加, 电流密度降低, 能量通过匙孔向工件背面扩散, 电弧最高温度降低约 2 400 K。

(2) 考虑匙孔影响后, 电弧受到的电磁力降低,

弧柱中心区电弧等离子体最大速度从 437 m/s 下降到 349 m/s。

(3) 匙孔沿深度方向直径减小, 电弧在匙孔内截面积减小, 对电弧附加机械约束作用增大, 使得电弧电流密度增加, 焦耳产热和电磁力增加, 在匙孔底部电弧有温度上升, 速度上升的现象, 同时, 匙孔内等离子体有平行于匙孔壁面的回流现象。

参 考 文 献

- [1] SVENUNGSSON J, CHOQUET I, KAPLAN A F H. Laser welding process: A review of keyhole welding modelling[J]. *Physics Procedia*, 2015, 78: 182-191.
- [2] AMARA E H, BENDIB A. Modelling of vapour flow in deep penetration laser welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2002, 35(3): 272-280.
- [3] DASGUPTA A K, MAZUMDER J, LI P. Physics of zinc vaporization and plasma absorption in CO₂ laser welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2007, 102(5): 053108.
- [4] KAWAHITO Y, MATSUMOTO N, MIZUTANI M, et al. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 744-748.
- [5] WU Dongsheng, NGUYEN A, TASHIRO S, et al. Elucidation of the weld pool convection and keyhole formation mechanism in the keyhole plasma arc welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 131: 920-931.
- [6] JIAN Xiaoxia, WU Chuansong. Influence of Fe vapour on weld pool behavior of plasma arc welding[J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2016, 52(11): 1467-1476.
- [7] JIAN Xiaoxia, WU Chuansong. Determination of arc pressure and current density on the molten pool surface in plasma arc welding[J]. *China Welding*, 2014, 23(3): 78-82.
- [8] WU Dongsheng, TASHIRO S, HUA Xueming, et al. Analysis of the energy propagation in the keyhole plasma arc welding using a novel fully coupled plasma arc-keyhole-weld pool model[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2019, 141: 604-614.
- [9] XU Bing, JIANG Fan, CHEN Shujun, et al. Numerical analysis of plasma arc physical characteristics under additional constraint of keyhole[J]. *Chinese Physics B*, 2018, 27(3): 034701.
- [10] LI Yan, FENG Yanhui, LI Yafei, et al. Plasma arc and weld pool coupled modeling of transport phenomena in keyhole welding[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 92: 628-638.
- [11] LAUNDER B E, SPALDING D B. The numerical computation of turbulent flows[M]. *Numerical prediction of flow, heat transfer, turbulence and combustion*. Pergamon, 1983: 96-116.
- [12] 张旺, 华学明, 潘成刚, 等. 基于 Stark 展宽的 TIG 焊接电弧三维电子密度测量研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(10): 2601-2604.
ZHANG Wang, HUA Xueming, PAN Chenggang, et al. The reconstruction of welding arc 3D electron density distribution based on stark broadening[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(10): 2601-2604.
- [13] 斯红, 华学明, 张旺, 等. 基于 Boltzmann 光谱法的焊接电弧温度场测量计算[J]. *光谱学与光谱分析*, 2012, 32(9): 2311-2313.
SI Hong, HUA Xueming, ZHANG Wang, et al. Welding arc temperature field measurements based on Boltzmann spectrometry[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2012, 32(9): 2311-2313.
- [14] HIRAOKA K, SHIWAKU T, OHJI T. Determining temperature distributions of gas tungsten arc (TIG) plasma by spectroscopic methods[J]. *Welding International*, 1997, 11(9): 688-696.
- [15] FAN H G, KOVACEVIC R. Keyhole formation and collapse in plasma arc welding[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1999, 33: 2902-2909.
- [16] WU Dongsheng, TASHIRO S, HUA Xueming, et al. A novel electrode-arc-weld pool model for studying the keyhole formation in the keyhole plasma arc welding process[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2019, 52: 165203.
- [17] NGUYEN A V, WU Dongsheng, TASHIRO S, et al. Undercut formation mechanism in keyhole plasma arc welding[J]. *Welding Journal*, 2019, 98(7): 204-212.

作者简介: 忻建文, 男, 1997 年出生, 博士研究生。主要研究方向为等离子弧焊数值模拟。

E-mail: xinjianwen@sjtu.edu.cn

华学明(通信作者), 男, 1965 年出生, 博士, 教授。主要研究方向为数字化焊接电源、高效焊接和焊接过程智能控制。

E-mail: xmhua@sjtu.edu.cn