

空心钨极 TIG 焊电弧特性数值模拟

雷正, 朱宗涛, 李远星, 陈辉

(西南交通大学, 材料先进技术教育部重点实验室, 成都, 610031)

摘要: 建立了内径 2 mm 的空心钨极 TIG 焊电弧数值模型, 用 Fluent 软件用户自定义函数 (UDF) 功能加载了氩气电导率、动量方程和能量方程的源项, 计算了稳态下焊接电流为 60 A 时电弧的温度场、流场以及电弧压力, 并与相同条件下实心钨极 TIG 焊电弧作了对比。结果表明, 空心钨极 TIG 焊电弧呈钟罩形, 空心钨极圆环放电和钨极中心气流的冷却作用使得电弧温度分布云图顶部下凹; 电弧等离子体在钨极下方运动速度较快, 阳极表面电弧压力呈柱状分布, 弧柱区空间压力分布比较均匀; 与相同电流条件下 TIG 焊相比, 空心钨极 TIG 焊电弧峰值温度降低 17.3%, 钨极下方 2 mm 位置处峰值温度降低 27%, 等离子体最大运动速度降低 40%, 电弧压力峰值降低 57%, 堆焊焊缝熔宽增加 30%, 熔深减小 27.9%。

创新点: 阐述了空心钨极 TIG 焊电弧的温度场、流场、电场及压力分布规律, 揭示了空心钨极 TIG 焊与实心钨极 TIG 焊电弧之间存在的差异。

关键词: 空心钨极; TIG 焊; 电弧特性; 数值模拟; 流体计算

中图分类号: TG 444

文献标识码: A

doi: 10.12073/j.hjxb.20210131003

0 序言

钨极惰性气体保护焊 (tungsten inert gas arc welding, TIG 焊) 具有焊接过程稳定、焊缝成形美观、接头质量好的优点, 在航空航天、石油化工、汽车等行业得到广泛应用。随着全球制造业技术的不断发展和升级, 对焊接技术的要求也越来越高, 氩弧焊效率低、熔深小的缺点越来越明显, 已经无法满足工业需求。激光电弧复合焊因为焊缝熔深大、焊接速度快、接头强度高一直是国内外的研究热点^[1-2]。目前激光与电弧的组合以旁轴形式为主, 然而相比之下激光电弧同轴复合焊具有热源对称性好, 对焊接方向不敏感等优点^[3-4], 只是由于复合焊枪的结构复杂, 焊枪集成难度大, 相关研究较少。陈树君等人^[5]研究了中心负压可以提高空心钨极 TIG 焊电弧的能量密度从而提高熔透能力。空心钨极 TIG 焊在空间站等低压或者真空环境有很大的应用前景^[6-7], 但是常压下空心钨极 TIG 焊电弧特

性数值模拟未见报道。

文中利用 gambit 软件建立了空心钨极 TIG 焊电弧的数值模型, 利用 Fluent 软件的 UDF 功能加载了氩气电导率和动量方程、能量方程源项, 计算了稳态直流条件下电弧的温度场、流场、电场以及电弧压力分布, 并与相同条件下的实心钨极 TIG 焊电弧进行对比指出了各物理场存在的差异, 分析了差异产生的原因, 最后用堆焊试验验证了对比结果, 为后续激光辅助空心钨极 TIG 焊电弧增强理论分析提供依据。

1 电弧模型及边界条件

1.1 物理模型和假设条件

空心钨极 TIG 焊电弧的数值模型如图 1 所示。空心钨极内径 2 mm, 钨极尖端呈圆台状, 尖端凸台厚度 0.2 mm, 锥角 60°, 电弧长度 4 mm, 网格类型为四边形网格, 钨极尖端区域网格边长 0.05 mm, 电弧其它区域 0.1 mm。空心钨极内外保护气为高纯氩气, 模拟焊接电流为 60 A。为了简化计算进行了如下假设: ①电弧为稳态, 且是二维轴对称; ②不考虑阳极表面状态对电弧的影响; ③电弧空间等离子体局部处于热平衡状态; ④电弧等离

子体流动状态为层流;⑤外部环境为标准大气压,氩气各项物理性能只是温度的函数;⑥钨极尖端电流密度均匀分布.同时对实心钨极 TIG 焊电弧进行了模拟计算,网格划分与边界条件设置与空心钨极电弧计算相同.

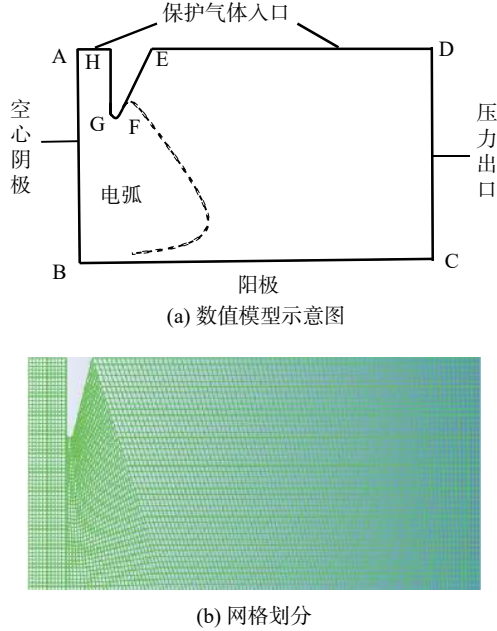


图 1 空心钨极 TIG 焊电弧数值模型及网格划分

Fig. 1 Numerical model and meshing of hollow tungsten TIG welding arc. (a) schematic diagram of numerical model; (b) meshing

1.2 控制方程

二维轴对称电弧模型的求解控制方程组包括质量、动量、能量守恒方程,质量守恒方程如式(1)所示.

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

式中: r 和 z 分别为径向和轴向坐标; u 和 v 分别为轴向和径向速度; ρ 为氩气密度. 径向动量守恒方程式, 即

$$\frac{\partial (\rho v)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho v^2)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho uv)}{\partial z} = F_r - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(2\mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) - 2\mu \frac{v}{r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left(\mu \frac{\partial v}{\partial z} + \mu \frac{\partial u}{\partial r} \right) \quad (2)$$

式中: P 为气体压力; μ 为氩气粘度. 轴向动量守恒方程式, 即

$$\frac{\partial (\rho u)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho uv)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u^2)}{\partial z} = F_z - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\mu r \frac{\partial v}{\partial z} + \mu r \frac{\partial u}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(2\mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) \quad (3)$$

能量守恒方程式, 即

$$\frac{\partial (\rho c_p T)}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial (r\rho v c_p T)}{\partial r} + \frac{\partial (\rho u c_p T)}{\partial z} = \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(k r \frac{\partial T}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + Q \quad (4)$$

式中: c_p 为氩气定压比热容; k 为氩气导热系数; F_r 和 F_z 为体积力在 r 方向和 z 方向分量, $F_r = (J \times B)_r$, $F_z = (J \times B)_z + \rho g$, J 为电流密度, B 为磁感应强度, g 为重力加速度; Q 为能量方程的源项.

为求解电磁场物理量, 需要引入电流连续方程, 即

$$\frac{\partial}{\partial z} \left(\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(\sigma r \frac{\partial \varphi}{\partial r} \right) = 0 \quad (5)$$

欧姆定律

$$J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r}, J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (6)$$

安培环流定理

$$B = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (7)$$

式中: σ 为氩气电导率; φ 为电势; r 和 z 分别为径向和轴向坐标; J_r 和 J_z 分别为电流密度的径向与轴向分量; B 为磁感应强度; μ_0 为真空磁导率.

1.3 边界条件

模型加载边界条件如表 1 所示, 表中 S_c 为钨极尖端放电区域面积. 动量方程和能量方程的源项加

表 1 空心钨极 TIG 焊电弧模型边界条件

Table 1 Boundary condition of hollow tungsten TIG welding arc model

区域	边界类型	氩气流速 $v_1/(m \cdot s^{-1})$	温度 T/K	电势 φ/V	磁矢量 A/Wb
AB	轴	—	—	—	—
BC	壁面	0	5 000	0	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$
CD	压力出口	—	1 000	$\partial \varphi/\partial z = \partial \varphi/\partial r = 0$	0
DE	速度进口	1.2	1 000	$\partial \varphi/\partial z = \partial \varphi/\partial r = 0$	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$
EF	壁面	0	1 000	$\partial \varphi/\partial z = \partial \varphi/\partial r = 0$	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$
FG	壁面	0	3 000	$-\sigma \cdot \partial \varphi/\partial z = I/S_c$	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$
GH	壁面	0	1 000	$\partial \varphi/\partial z = \partial \varphi/\partial r = 0$	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$
HA	速度进口	1.2	1 000	$\partial \varphi/\partial z = \partial \varphi/\partial r = 0$	$\partial A/\partial z = \partial A/\partial r = 0$

载使用用户自定义函数进行程序编写并加载。

电弧辐射热损失用 $S_R = C_0 T_R^4$ 表示^[8], 其中, C_0 为辐射系数; T_R 为辐射体温度. 能量方程源项 Q , 即

$$Q = \frac{J_z^2 + J_r^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \left(J_z \frac{\partial T}{\partial z} + J_r \frac{\partial T}{\partial r} \right) - S_R \quad (8)$$

式中: σ 为氩气电导率; r 和 z 分别为径向和轴向坐标; J_r 和 J_z 分别为电流密度的径向与轴向分量; k_B 为 Boltzmann 常数; e 为电子电量; T 为氩气热力学温度。

2 计算结果与讨论

2.1 温度场

图2为相同条件下空心钨极和实心钨极 TIG 焊电弧温度场分布云图. 从图2a可以看出, 空心钨极 TIG 焊电弧呈典型的钟罩形, 电弧近阴极区温度高且梯度大, 近阳极区温度低且梯度小; 电弧径向温度分布中心高边缘低, 弧顶中心温度低于钨极尖端温度. 电弧最高温度出现在空心钨极下方 0.35 mm 位置处, 达到 12 591 K. 图3为电弧下方 2 mm 位置处电弧径向和电弧中心轴向温度分布曲线. 从图3可以看到, 从阴极区到阳极区中心轴线温度先迅速升高后缓慢降低, 钨极下方 1 mm 位置出现最

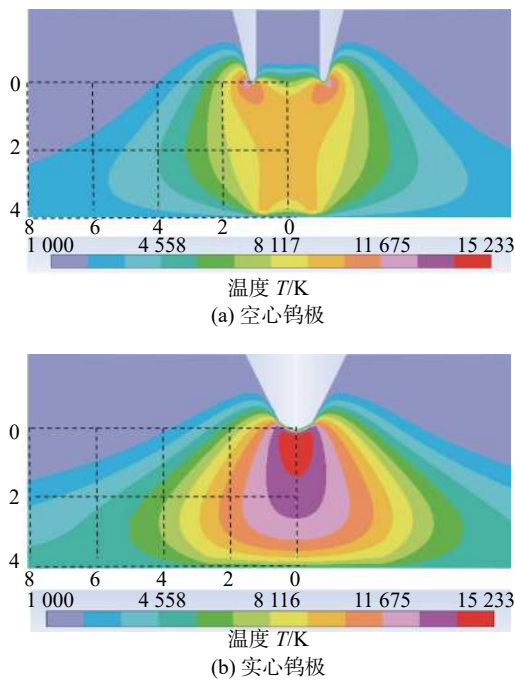


图2 电弧温度分布云图 (mm)

Fig. 2 Distribution cloud image of arc temperature. (a) hollow tungsten electrode; (b) solid tungsten electrode

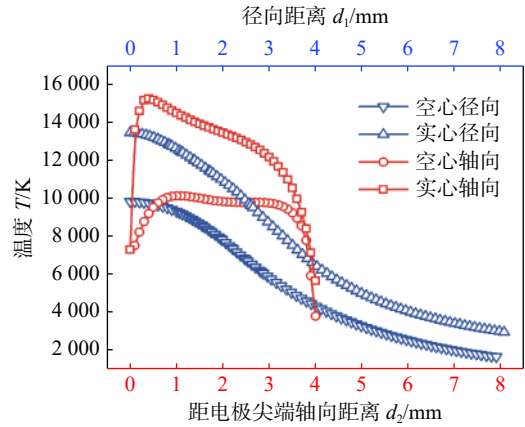


图3 电极下方 2 mm 位置处径向和电弧中心轴向温度分布曲线

Fig. 3 Distribution curves of temperature at radial direction 2 mm below the electrode and axial direction in the arc center

大值 10 120 K, 然后从 1 mm 到 3.4 mm 范围温度缓慢降低到 9 420 K; 超过 3.4 mm 后温度快速降低到阳极设定温度. 钨极下方 2 mm 位置处电弧温度从中心向外逐渐降低, 降温速度先慢后快; 从中心 9 818 K 向外缓慢降低到 1 mm 位置的 9 300 K, 随后降温至 8 mm 位置的 1 640 K. 空心钨极 TIG 焊电弧温度云图顶部中间下凹原因是, 一方面, 靠近钨极尖端周围电流密度更大, 产生的焦耳热更多, 因此电弧温度更高; 另一方面, 空心钨极内保护气流的冷却和吹散作用也使电弧温度降低. 图2b为相同电流下实心钨极 TIG 焊电弧温度分布云图, 电弧中心温度高边缘温度低, 近阴极区温度高而近阳极区温度低, 温度场分布与张晓鸿等人^[8]的模拟结果相吻合. 从图3可以看到, 实心钨极 TIG 焊电弧中轴线温度分布是从阴极区到阳极区先迅速升高后快速降低, 然后缓慢降低, 在钨极下方 0.25 mm 位置出现峰值温度 15 233 K. 空心钨极 TIG 焊电弧中心轴线温度均为先升高后降低, 但是实心钨极较空心钨极 TIG 焊电弧升温 and 降温速度更快; 实心钨极下方 2 mm 位置电弧中心温度为 13 450 K, 径向分布从中心向外以 1 250 K/mm 的速度降低. 空心钨极 TIG 焊电弧峰值温度与实心钨极 TIG 焊相比, 降低了 17.3%, 钨极下方 2 mm 位置处电弧峰值温度降低了 27.0%. 计算空心钨极尖端面积为 $1.18 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 实心钨极尖端面积为 $0.88 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 当电流相同时, 空心钨极尖端电流密度更小, 单位面积内产生的焦耳热量减少, 电弧温度更低。

2.2 速度场

图4为相同条件下空心钨极和实心钨极 TIG

焊电弧等离子体运动速度分布云图. 从图 4a 可以看到, 电弧阴极区空心钨极出口等离子体运动速度大, 近阳极区运动速度小, 中心运动速度快, 边缘运动速度慢; 等离子体运动速度最快 22.8 m/s.

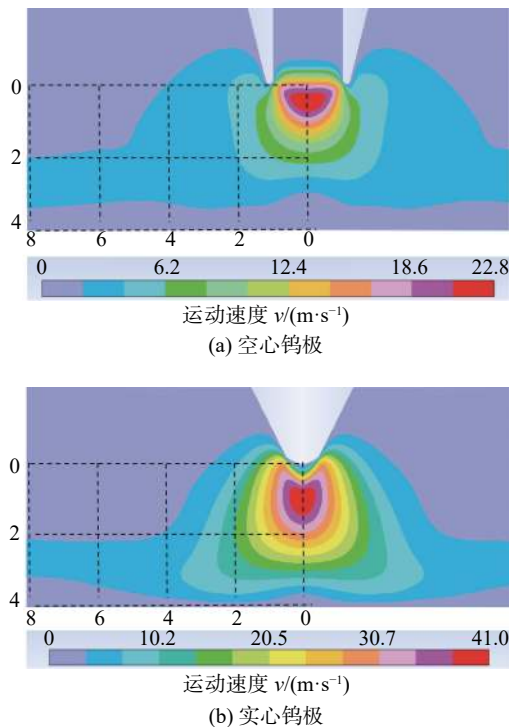


图 4 电弧等离子体运动速度分布云图 (mm)

Fig. 4 Distribution cloud image of arc plasma flow velocity. (a) hollow tungsten electrode; (b) solid tungsten electrode

图 5 为电极下方 2 mm 位置处径向和电弧中心轴向等离子体运动速度分布. 从图 5 可以看出, 从电极出口沿轴线向下等离子体运动速度先增加后减小, 钨极下方 0.5 mm 位置运动速度增加到 22.8

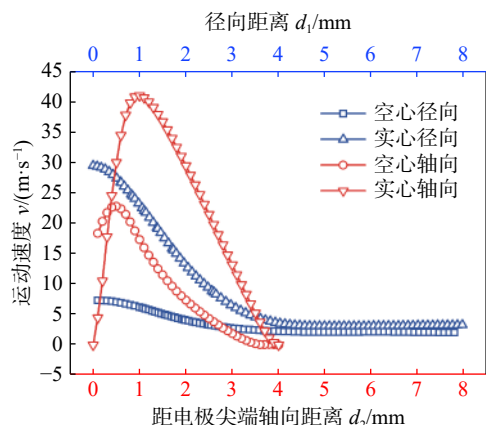


图 5 电极下方 2 mm 位置处径向和电弧中心轴向等离子体运动速度分布曲线

Fig. 5 Distribution curves of plasma flow velocity at radial direction 2 mm below the electrode and axial direction in the arc center

m/s, 随后开始连续降低. 钨极下方 2 mm 处等离子体运动速度从中心的 7.4 m/s 先降低到 4.5 mm 位置处的 2.1 m/s, 再向外基本保持不变. 图 4b 为实心钨极 TIG 焊电弧等离子体运动速度云图, 电弧弧柱区中心等离子体运动速度快, 边缘运动速度慢, 等离子体运动速度最快 41 m/s. 从图 5 可以看出, 等离子体运动速度先快速增加, 到 1 mm 位置达到 41 m/s, 随后快速减小. 钨极下方 2 mm 位置电弧从中心到边缘运动速度分布是从中心的 29.5 m/s 先逐渐降低到 4.3 mm 位置的 3.1 m/s, 然后再向外保持不变. 与实心钨极 TIG 焊相比, 空心钨极 TIG 焊电弧等离子体运动速度明显降低, 最大运动速度降低 40%; 钨极下方 2 mm 位置处最大运动速度降低 75%. 在放电过程中, 电弧中等离子体在电磁力的作用下加速运动, 电流密度越大, 阴极区电势差越大, 等离子体受到的电磁力也越大, 运动速度越快^[8]; 空心钨极和实心钨极尽管电流同为 60 A, 但是空心钨极尖端电流密度为 $5 \times 10^7 A/m^2$, 实心钨极端的电流密度为 $6.8 \times 10^7 A/m^2$, 空心钨极电流密度更小, 电弧空间等离子体运动速度更慢.

2.3 电弧压力

图 6 为相同条件下空心钨极和实心钨极 TIG

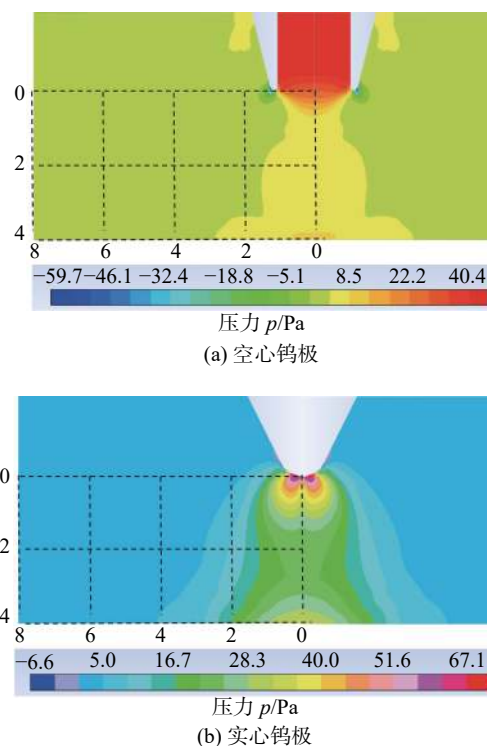


图 6 电弧压力分布云图 (mm)

Fig. 6 Distribution cloud image of arc pressure. (a) hollow tungsten electrode; (b) solid tungsten electrode

焊电弧压力分布云图。从图 6a 可以看出,空心钨极 TIG 焊电弧弧柱区压力分布均匀,阳极表面电弧压力呈柱状均匀分布。图 7 为电弧中心轴向和阳极表面径向压力分布曲线。从图 7 可以看出,空心钨极口轴向压力 26.8 Pa 先急速降低到钨极下方 1 mm 位置的 6 Pa,随后缓慢上升到阳极工件表面的 8.6 Pa,弧柱区轴向压力变化极小。阳极表面电弧压力从中心向外 0.6 mm 位置基本保持 8.5 Pa 不变,随后突然降低到 0.9 mm 位置的 4.5 Pa,再向外至 2.6 mm 位置又维持 4.5 Pa 不变。从图 6b 可以看出,实心钨极 TIG 焊电弧压力峰值 67 Pa 出现在钨极下方。实心钨极 TIG 焊电弧轴向压力从阴极区到阳极区先减小后增大,先从 56 Pa 急速降低到 0.4 mm 位置的 35 Pa 后速度放缓降低到 2.8 mm 位置的 21.5 Pa,随后又逐渐增加到阳极表面电弧压力 33 Pa。阳极表面电弧压力中心高边缘低,中心位置压力 33 Pa,向外 2.7 mm 范围连续降低到 9 Pa,随后再缓慢减小。通过对比发现,空心钨极在阳极表面电弧压力分布与传统 TIG 焊不同,不仅压力明显减小,而且分布均匀。与传统钨极 TIG 焊相比,空心钨极 TIG 焊最大电弧压力减小 57%,阳极表面电弧压力峰值减小 74%。电弧压力与电弧等离子体运动速度有关,与实心钨极 TIG 焊相比,空心钨极 TIG 焊电弧等离子体最大运动速度减小,电弧压力更小。

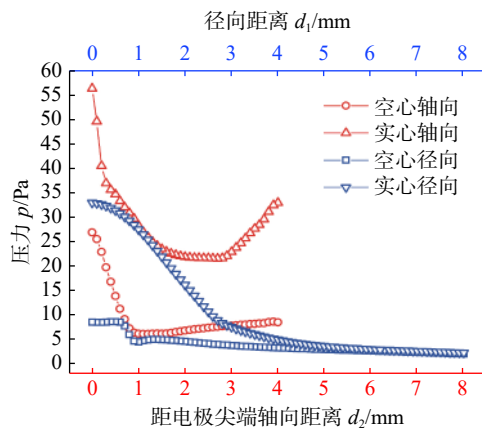


图 7 电弧中心轴向和阳极表面径向压力分布曲线

Fig. 7 Distribution curves of arc pressure at axial direction in the arc center and radial direction of anode surface

2.4 电场

图 8 为相同条件下空心钨极和实心钨极 TIG 焊电弧空间电势分布云图。从图 8a 可以看出,空心阴极 TIG 焊电弧弧柱区电势分布均匀,阳极区电势大于阴极区。从图 8b 看出,实心钨极 TIG 电弧空

间电势从阴极到阳极逐渐升高。图 9 为电极下方 2 mm 位置处径向和电弧中心轴向电势分布曲线。从图 9 可以看出,空心阴极 TIG 焊电弧中心轴线上电势从阴极的 -6.2 V 向阳极缓慢升高到 -4.5 V,而实心钨极 TIG 焊电弧从阴极的 -7.2 V 快速向阳极方向升高,升高速度是空心钨极 TIG 焊电弧的 4 倍。空心钨极 TIG 焊电弧空间电势差小,等离子体受到的电磁力小,运动速度也更慢。

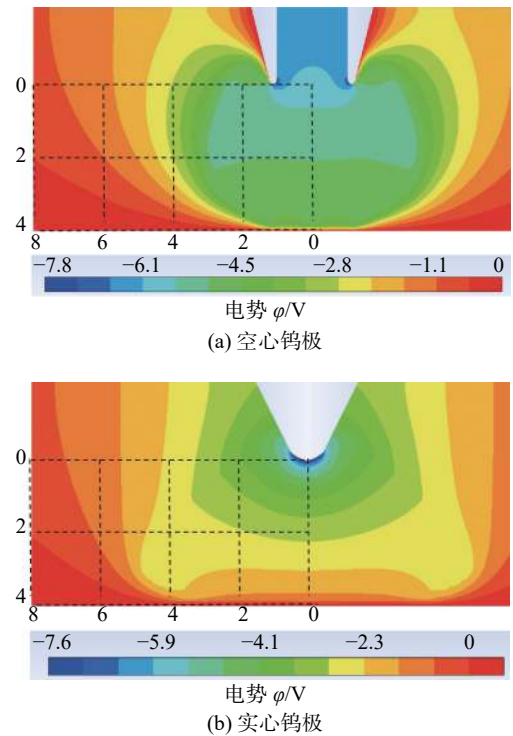


图 8 电弧电势分布云图 (mm)

Fig. 8 Distribution cloud image of arc electric potential. (a) hollow tungsten; (b) solid tungsten electrode

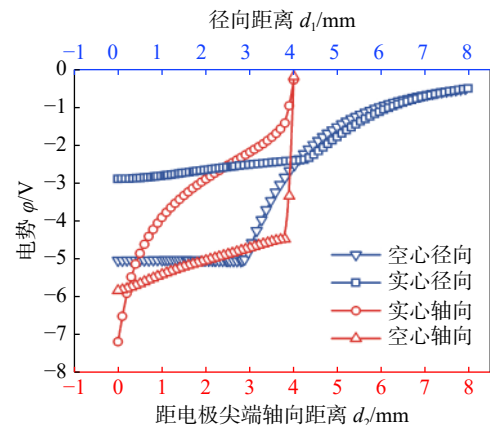


图 9 电极下方 2 mm 位置处径向和电弧中心轴向电势分布曲线

Fig. 9 Distribution curves of arc electric potential at radial direction 2 mm below the electrode and axial direction in the arc center

3 验证试验

采用与电弧模拟相同的焊接电流在 Q345 钢表面进行了堆焊试验, 试验采用纯氩气作保护气体, 试验工艺参数如表 2 所示. 图 10 为空心钨极和传统钨极氩弧焊电弧形态. 图 10a 为空心钨极电弧形态呈典型钟罩形状; 与图 10b 相同电流条件下实心钨极 TIG 焊电弧相比, 空心钨极 TIG 焊电弧上部宽度明显增大, 下部宽度也小幅增加.

图 11 为堆焊焊缝截面形貌. 图 11a 为空心钨

表 2 焊接试验工艺参数
Table 2 Process parameters of welding test

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	焊接速度 $v/(mm \cdot min^{-1})$	气体流量 $Q_o/(L \cdot min^{-1})$	弧长 l/mm
60	15.9	300	10	4

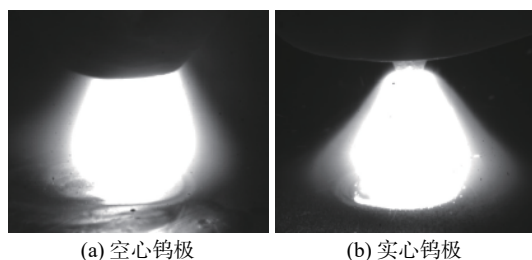


图 10 试验电弧形态

Fig. 10 Arc shape in experiment. (a) hollow tungsten electrode; (b) solid tungsten electrode

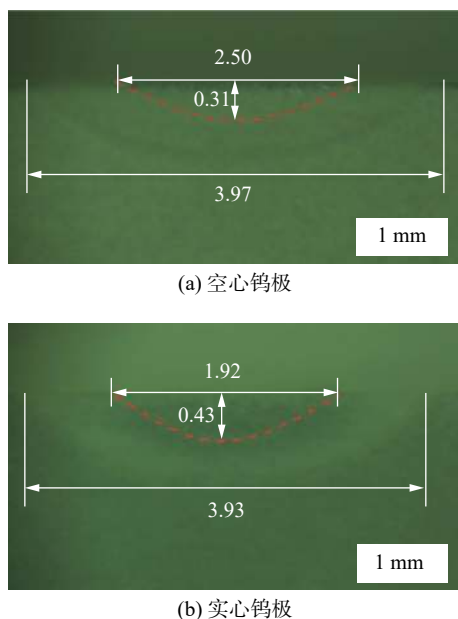


图 11 试验焊缝截面 (mm)

Fig. 11 Cross section of weld in test. (a) hollow tungsten electrode; (b) solid tungsten electrode

极电弧焊缝截面, 熔深 0.31 mm, 熔宽 2.5 mm; 图 11b 为实心钨极电弧焊缝截面, 熔深 0.43 mm, 熔宽 1.92 mm. 空心钨极 TIG 焊缝熔宽相比传统实心钨极 TIG 焊增加 30%, 熔深减小 27.9%, 这与 2.1 节中空心钨极 TIG 焊电弧峰值温度和电极下方 2 mm 位置处峰值温度相比实心钨极 TIG 焊电弧峰值温度分别降低了 17.3% 和 27% 相吻合.

4 结论

(1) 空心钨极 TIG 焊电弧呈钟罩形状, 电弧温度场顶部下凹, 近钨极区域温度高, 峰值温度 12591 K, 从阴极区到阳极区沿轴向温度逐渐降低, 降温速度先慢后快; 从电弧中心向外温度逐渐降低, 降温速度先小后大; 与实心钨极 TIG 焊相比, 空心钨极 TIG 焊电弧峰值温度降低 17.3%, 钨极下方 2 mm 位置处峰值温度降低 27%, 堆焊焊缝熔宽增大 30%, 熔深减小 27.9%.

(2) 空心钨极 TIG 焊电弧等离子体运动速度从阴极区到阳极区先增加后减小, 最大运动速度 22.8 m/s; 钨极下方 2 mm 位置处最大运动速度 7.4 m/s; 与实心钨极 TIG 焊相比, 空心钨极 TIG 焊最大运动速度减小 40%, 钨极下方 2 mm 位置处最大运动速度减小 75%.

(3) 空心钨极 TIG 焊电弧弧柱区空间压力分布均匀, 阳极表面电弧压力呈柱状分布, 电弧压力峰值位于电弧顶部中心 26.8 Pa, 阳极表面电弧压力峰值 8.5 Pa. 与实心钨极 TIG 焊相比, 空心钨极 TIG 焊电弧压力峰值减小 57%, 阳极表面电弧压力减小 74%.

参考文献

- [1] Liu Liming, Shi Jipeng, Hou Zhonglin, *et al.* Effect of distance between the heat sources on the molten pool stability and burn-through during the pulse laser-GTA hybrid welding process[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2018, 34: 697 – 705.
- [2] Sridhar Raja K S, Jebith Prem J P, Sathiyaseelan P, *et al.* Investigation of microstructure and mechanical properties of laser and TIG welded stainless steel alloy[J]. Materials Today:Proceedings, 2021, 44: 3578 – 3582.
- [3] Cho Y T, Cho W I, Na S J. Numerical analysis of hybrid plasma generated by Nd: YAG laser and gas tungsten arc[J]. Optics and Laser Technology, 2011, 43(3): 711 – 720.
- [4] Doi, Makoto. Coaxial hybrid process of hollow cathode TIG and YAG laser welding[J]. Welding International, 2010, 24(3): 188–196.

[下转第 27 页]