

# TIG 焊流动、传热及界面跟踪动网格数值模拟

李林敏<sup>1,2</sup>, 李宝宽<sup>1</sup>, 刘立超<sup>1</sup>, 曹霞<sup>3</sup>

(1. 东北大学 冶金学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 河海大学 能源与电气学院, 江苏 南京 211100;

3. 国家电网 椒江供电公司, 浙江 台州 318000)

**摘 要:** 基于磁流体力学 (magnetohydrodynamics, MHD) 模型, 采用动网格技术 (dynamic mesh method, DMM) 跟踪电弧-熔池界面, 建立了钨极惰性气体 (tungsten insert gas, TIG) 保护焊过程耦合流动、传热、凝固熔化及动网格界面跟踪的数学模型。首先计算自由燃弧, 得到了准确的弧区速度、温度及压力等参数。然后分别验证了熔池内电磁力、热浮力、等离子流曳力和 Marangoni 力 4 个驱动力。考虑上述电弧-熔池相互作用, 基于压力的动态平衡跟踪界面, 计算了 304 不锈钢 TIG 焊过程, 得到了等离子体冲击造成的熔池中央下凹及边缘上凸现象。结果表明, 本模型可以得到更准确的界面及熔池形状。

**关 键 词:** 数值模拟; 电弧等离子体; 磁流体力学; 界面跟踪; 动网格

中图分类号: TB 126

文献标志码: A

文章编号: 1005-3026(2017)10-1411-06

## Dynamic Mesh Simulation of Fluid Flow, Heat Transfer and Interface Tracking in TIG Welding Process

LI Lin-min<sup>1,2</sup>, LI Bao-kuan<sup>1</sup>, LIU Li-chao<sup>1</sup>, CAO Xia<sup>3</sup>

(1. School of Metallurgy, Northeastern University, Shenyang 110819, China; 2. College of Energy and Electrical Engineering, Hohai University, Nanjing 211100, China; 3. Jiaojiang Electric Power Company, State Grid Corporation of China, Taizhou 318000, China. Corresponding author: LI Bao-kuan, E-mail: libk@smm.neu.edu.cn)

**Abstract:** Based on the magnetohydrodynamic (MHD) model, the dynamic mesh method (DMM) was used to track arc-molten pool interface, and a mathematical model for coupled fluid flow, heat transfer, solidification/melting and dynamic interface tracking during TIG welding process was established. Firstly, a free-burning arc was simulated to obtain the accurate arc parameters, such as the speed, temperature and pressure. Then, the four driving forces of electromagnetic, thermal buoyancy, drag and Marangoni were validated respectively. Considering the arc-molten pool interaction and tracking the interface from pressure balance, the TIG welding process for the 304 stainless steel was simulated and the depression in the pool center and the lifting on the pool periphery caused by plasma shock were obtained. It is shown that the proposed model can simulate the arc-pool interface and molten pool shape more accurately in comparison with the experimental data.

**Key words:** numerical simulation; arc plasma; magnetohydrodynamics; interface tracking; dynamic mesh

钨极 TIG 保护焊由于其焊接品质高而被广泛应用, 研究 TIG 过程的流动和传热现象有助于理解 TIG 工艺的物理基础。此外, 等离子电弧与阳极表面的相互作用及界面波动对熔池流动及其最终形状至关重要, 并影响焊接质量<sup>[1]</sup>。TIG 过程

数学模型的建立涉及流场、温度场及电磁场的耦合, 其中电弧等离子体的热物理性质又呈强非线性, 使得针对 TIG 过程的数值研究更加复杂。国内外学者<sup>[2-5]</sup>对电弧及熔池进行了广泛研究并取得了显著成果。Hsu 等<sup>[2]</sup>通过实验和数值模拟的

方法给出了自由燃弧的温度、压力及速度分布,验证了不同电流情况下的电弧数学模型,并研究了边界条件设置对计算结果的影响. Evans 等<sup>[3]</sup>测量了电弧等离子体的热辐射与温度的关系. Liu<sup>[4]</sup>给出了氩气等离子体的物理属性随温度变化的曲线. 这些数据已被广泛应用于 TIG 过程的数值模拟研究并取得了可靠的结果<sup>[5-6]</sup>.

Tanaka 等<sup>[1]</sup>率先提出了电弧、阳极耦合的数学模型,并研究了熔池中电磁力、热浮力、等离子流曳力及 Marangoni 力对熔池形状的影响,但该研究并没有考虑电弧-熔池界面的变形. Tanaka 等<sup>[7]</sup>也针对熔池形状的研究进行了较全面的综述. 为了研究界面变形的影响, Kim 等<sup>[8]</sup>利用固定的表面边界研究了阳极表面的变形对电弧性质的影响. 雷永平等<sup>[9]</sup>通过熔池表面的受力平衡建立了电弧与熔池双向耦合的数学模型,考虑了熔池表面的形状变化.

界面变形将对电弧-熔池的相互作用及熔池形状产生重要影响,本文建立了考虑界面变形的电弧-熔池双向耦合数学模型. 首先对自由燃弧过程进行数值模拟,并用 Hsu 等<sup>[2]</sup>的实验数据对等离子电弧模型进行了验证. 然后分别研究了电磁力、热浮力、等离子流曳力以及 Marangoni 力对熔池的作用效果,并通过与文献[1]结果的对比较验证了本模型中熔池内驱动力模型的可靠性. 最后在考虑上述四种驱动力的作用下,利用动网格方法,基于交界面压力动态平衡来计算熔池表面的变形. 通过非稳态求解得到熔池最终形状并与实验结果进行对比,考察了界面变形对熔池的影响.

# 1 数学模型

## 1.1 基本假设

典型的 TIG 焊过程如图 1 所示. 阴极尖端和阳极表面之间产生电弧,金属母材(SUS304)受热熔化形成熔池.

对于所研究的磁分散电弧等离子体来说,非平衡度较小,最近的双温数值模拟结果表明,在弧柱区非平衡度小于 0.2<sup>[10]</sup>,因此本文假设等离子体为连续介质且处于局部热平衡状态,即电子温度和重粒子温度相同. 此外,本文还做出如下假设:

- 1) 电弧等离子体处于  $1.013 \times 10^5$  Pa 的氩弧下,其辐射量及物理性质只随温度变化<sup>[3]</sup>;
- 2) 不考虑湍流的影响;

- 3) 忽略阳极由于高温产生的金属蒸汽的影响.

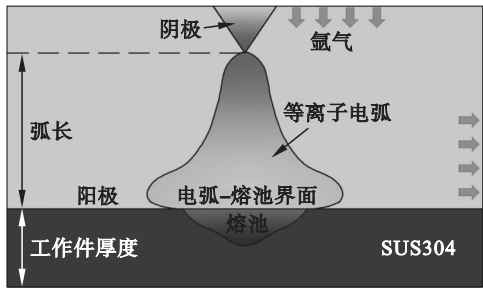


图 1 TIG 焊示意图

Fig. 1 Sketch of TIG welding process

## 1.2 控制方程

本文方程均在柱坐标下求解,因此流体的连续性方程为

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

式中: $\rho$  为密度; $v_r$  和  $v_z$  分别为径向和轴向的速度; $r$  和  $z$  分别代表径向和轴向距离. 径向及轴向动量方程分别为

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_r}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r^2) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_r v_z) = \\ - \frac{\partial P}{\partial r} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( 2\nu_r r \frac{\partial v_r}{\partial r} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) - \\ 2\mu \frac{v_r}{r^2} - j_z B_\theta; \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} (\rho r v_r v_z) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v_z^2) = \\ - \frac{\partial P}{\partial z} + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left( \mu \left( \frac{\partial v_z}{\partial r} + \frac{\partial v_r}{\partial z} \right) \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( 2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) + j_r B_\theta + \rho g. \end{aligned} \quad (3)$$

式中: $P$  为压力; $j$  和  $B$  分别为电流密度和磁场强度. 阳极表面的等离子流曳力  $\tau_d$  和 Marangoni 力  $\tau_M$  计算式为

$$\tau = \tau_d + \tau_M = \mu_p \frac{\partial v_r}{\partial z} + \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial r}. \quad (4)$$

式中: $\mu_p$  是等离子体的黏度; $\gamma$  是表面张力. 对于 SUS304 不锈钢,表面张力温度梯度系数  $\partial \gamma / \partial T$  为  $-4.58 \times 10^{-4} \text{ N}/(\text{m} \cdot \text{K})$ <sup>[11]</sup>.

对于熔池的凝固熔化,本文采用基于 Carman-Kozeny 关系的焓-多孔介质模型进行描述,并以液相体积分数  $f_l$  为变量将其转换为附加动量源项加载到动量方程中,具体表述如下:

$$S_v = - \frac{180\mu_l(1-f_l)^2}{\lambda^2(f_l+0.001)^3} v. \quad (5)$$

式中: $\lambda$  是二次枝晶间距,本文取 0.1 mm. 在糊状区液相率  $f_l = (T - T_s)/(T_l - T_s)$ ,  $T_s < T < T_l$



性根据文献[4]中的曲线设定. 母材采用 304 不锈钢,忽略相变过程中的组分变化,假设固液相线均为常数. 模型中的主要物理参数及母材属性如表 2 所示.

表 2 物理参数及母材属性

Table 2 Physical parameters and anode properties

参数	数值
波尔兹曼常数/(J·K <sup>-1</sup> )	1.38×10 <sup>-23</sup>
电子电荷/C	1.6×10 <sup>-19</sup>
真空磁导率/(H·m <sup>-1</sup> )	4π×10 <sup>-7</sup>
密度/(kg·m <sup>-3</sup> )	7 200
黏度/(kg·m <sup>-1</sup> ·s <sup>-1</sup> )	0.006
液相线/K	1 727
固相线/K	1 670
比热容/(J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	600
导热系数/(W·m <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	20
凝固潜热/(J·kg <sup>-1</sup> )	245 000
电导率/(S·m <sup>-1</sup> )	770 000

## 2 结果与讨论

### 2.1 电弧模型的验证

为验证电弧模型的准确性,进行了自由燃弧的数值模拟,采用 Hsu 等<sup>[2]</sup>给出的实验数据进行验证. 弧长取 10 mm,分别计算了 100 A 和 200 A 两种工况. 结果表明:本模型可以得到准确的弧区温度场,电弧在电磁力的作用下形成了典型的钟罩形温度场.

计算得到的最大温度、最大速度、总电势及阴、阳极压力等关键数据与 Hsu 等<sup>[2]</sup>的结果对比如表 3 所示. 数据吻合良好,证明本文建立的电弧等离子体模型可以得到准确的电磁场、流场、温度场及压力分布.

表 3 计算得到的主要参数与文献[2]的对比

Table 3 Comparison of essential results with ref. [2]

参数	100 A <sup>[2]</sup>	100 A	200 A <sup>[2]</sup>	200 A
$T_{\max}/\text{K}$	18 400	19 100	21 200	23 200
$v_{z,\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	173	174.5	294	295
$\varphi_{\text{cathode}}/\text{V}$	-11.2	-12.1	-13.3	-14.1
$p_{\text{cathode}}/\text{Pa}$	410	455.1	842	872.5
$p_{\text{anode}}/\text{Pa}$	71.9	58.3	394	294.9

### 2.2 电弧-熔池耦合数值模拟

根据 Tanaka 等<sup>[1]</sup>的研究,采用与其相同的工况,阴极尖端和阳极表面的距离为 5 mm,电流为

150 A,计算时间为 20 s. 为讨论熔池内不同驱动力的作用效果并对其进行验证,不考虑界面变形,将 4 种作用力分别加载到动量方程中进行计算. 图 3 为 4 种作用力作用下的计算结果. 结果显示:等离子流曳力和 Marangoni 力是熔池由内向外扩展的主要驱动力;热浮力的作用效果是使凝固前沿钢液向下运动,并使熔池内形成顺时针的流动;电磁力则会使熔池内形成逆时针流动,使熔池向下扩展. 4 种驱动力作用下的熔池最大流速分别为 44.3,1.8,4.3 和 20.5 cm/s,和 Tanaka 等<sup>[1]</sup>给出的计算结果(47,1.4,4.9 和 18 cm/s)吻合,电弧区域等离子体的最大速度 205m/s 及温度场计算结果均与前人的研究<sup>[1,11]</sup>吻合,验证了本文所采用的熔池驱动力模型的有效性.

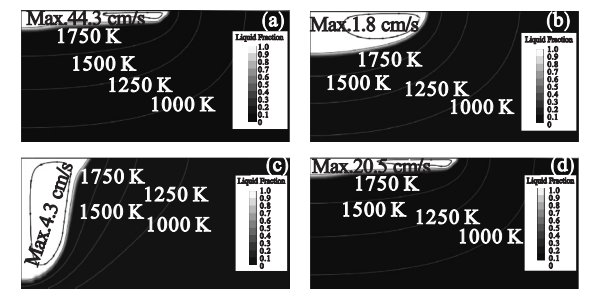


图 3 4 种驱动力作用下的流场、温度场和熔池形状  
Fig. 3 Fluid flow, temperature field and weld pool shape with different driving forces  
(a)—等离子流曳力;(b)—热浮力;  
(c)—电磁力;(d)—Marangoni 力.

考虑 4 种驱动力的作用,建立界面固定的电弧-熔池耦合模型,并将计算结果(150 A,20 s)与实验结果进行比较,结果如图 4 所示,模拟结果和实验结果采用相同标尺. 计算得到熔池中的最大速度为 49.8 m/s,熔池呈浅且宽的形状,宽度约为 8 mm. 计算结果和 Tanaka 等<sup>[1]</sup>的结果接近,但和实验结果相比,熔池较宽一些. 其原因可能是计算过程中未考虑等离子体冲击引起的钢液竖直方向的波动,而只考虑了电弧等离子体产生的横向曳力,导致熔池相对较宽. 因此本文将讨论界面变形对电弧-熔池相互作用及熔池最终形状的影响.

### 2.3 动网格界面跟踪

考虑界面变形对熔池形状的重要作用,采用前文所述动网格界面跟踪方法来耦合电弧和熔池. 除阳极表面采用动网格边界外其余条件和之前的计算一致,并考虑所有驱动力作用. 图 5 为耦合界面变形后的压力、温度分布及熔池形状和相应的网格. 由于 TIG 焊过程界面变形较小,温度分布较之前固定界面模型得到的结果变化很小.



由图 5 可知:作用在阳极表面的压强约为 300 Pa,造成了熔池中心区域的向下凹陷;在熔池的边缘地带,由于横向运动的钢液冲击凝固前沿的作用,造成了熔池边缘钢液的上凸. 模拟得到的钢液液位差与模拟得到的电弧压力吻合.

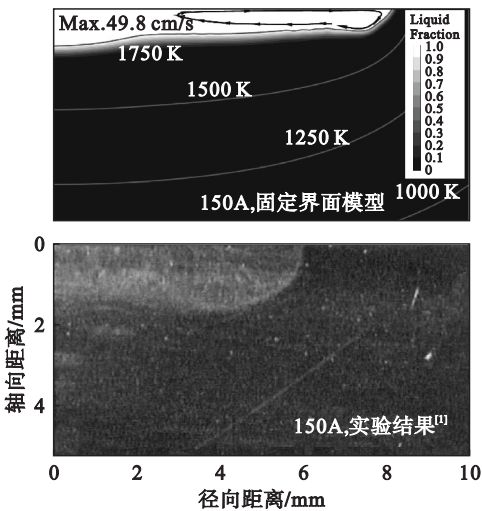


图 4 不考虑界面变形得到的熔池形状和实验结果<sup>[1]</sup>对比

Fig. 4 Calculated weld pool shape without interface deformation compared with experimental<sup>[1]</sup>

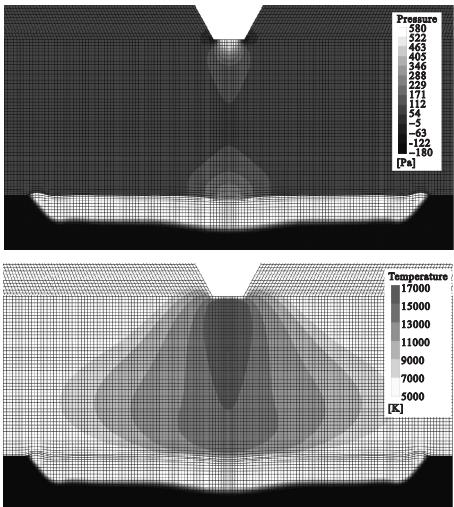


图 5 耦合界面变形后的压力分布、温度分布、熔池形状和网格结果

Fig. 5 Pressure, temperature profile, pool shape and mesh model after coupled interface deformation

图 6 为耦合动网格界面变形后的计算结果和实验结果. 熔池中的最大速度由 49.8 cm/s 减小到 38.5 cm/s,这是由于界面竖直方向的波动削减了熔池向外拓展的动量,熔池形状较固定界面模型的计算结果相对窄一些,且与实验结果更加接近. 这说明加载动网格界面跟踪的电弧 - 熔池全耦合模型的计算结果更加准确.

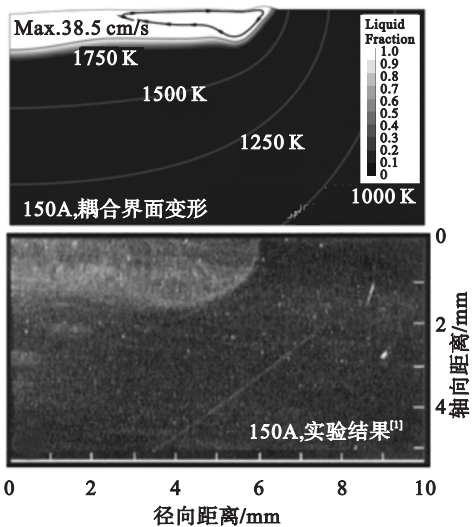


图 6 耦合界面变形时熔池形状的计算结果与实验结果<sup>[1]</sup>对比

Fig. 6 Calculated weld pool shape with interface deformation compared with the experimental observation<sup>[1]</sup>

### 3 结 论

1) 通过自由燃弧过程的计算验证了等离子电弧数学模型,得到了准确的弧区温度、压力、速度及电势等参数.

2) 建立了耦合电弧 - 熔池的固定界面模型,并应用于以 304 不锈钢为母材的 TIG 焊过程,分别讨论了电磁力、热浮力、等离子流曳力及 Marangoni 力对熔池的影响,并对上述驱动力模型进行了验证.

3) 利用动网格界面跟踪方法建立了考虑界面变形的全耦合数学模型,研究了界面变形对熔池形状的影响. 结果表明:熔池中心区域由于电弧压力将向下凹,而熔池边缘则会向上凸;考虑界面变形得到的熔池形状更接近于实验结果.

#### 参考文献:

[ 1 ] Tanaka M, Terasaki H, Ushio M, et al. A unified numerical modeling of stationary tungsten-inert-gas welding process [ J ]. *Metallurgical & Materials Transactions A*, 2002, 33 ( 7 ) : 2043 - 2052.

[ 2 ] Hsu K C, Etemadi K, Pfender E. Study of the free-burning high-intensity argon arc [ J ]. *Journal of Applied Physics*, 1983, 54 ( 3 ) : 1293 - 1301.

[ 3 ] Evans D L, Tankin R S. Measurement of emission and absorption of radiation by an argon plasma [ J ]. *Physics of Fluids*, 1967, 10 ( 6 ) : 1137 - 1144.