基于 FLUENT 的 TIG 焊瞬态熔池三维形态的数值模拟

袁尤智， 刘南生， 汪岩峰
（南昌大学 理学院，南昌 330031）

袁尤智

摘 要：根据流体力学和传热学原理，建立了 TIG 焊瞬态熔池三维数值分析模型．电弧热源模型采用典型的高斯热源分布模型，模型考虑熔池液态金属对流传热、熔池外工件的固态导热、焊接过程中的相变潜热、熔池流体的紊流特性、材料的热物理性能参数随温度变化等因素．用 enthalpy-porosity 方法处理工件熔化/凝固过程中的问题，FLUENT RNG k-ε 湍流模型对 TIG 焊熔池模型进行求解．给出了熔池形状的可视化图形结果，熔池形状特征参数随时间的动态变化．结果表明，计算值与实测值吻合良好．

关键词：熔池温度场；熔池形态；湍流；数值模拟
中图分类号：TG402 **文献标识码**：A **文章编号**：0253－360X(2009)12－0053－04

0 序 言

TIG 焊(tungsten inert gas welding)是工业生产中应用最为广泛的焊接方法之一，具有焊接质量好、焊件焊后变形小、成形美观、易实现全位置自动化焊接等优点．国内外很多科研人员都对 TIG 焊熔池的数值模拟进行过研究，但多是基于熔池内液态金属流体流动的层流假设[1-3]．有研究表明，焊接熔池金属流体流动具有湍流特性[4]．故作者尝试应用 FLUENT RNG k-ε 湍流模型对三维瞬态 TIG 焊熔池进行数值模拟．RNG k-ε 模型是从标准 k-ε 模型发展而来，处理低雷诺数和近壁流等有很好的效果．

FLUENT 是目前国际上比较流行的商用 CFD (computational fluid dynamics)软件，可以广泛地应用于流体、热传递及化学反应等有关数值模拟，在焊接过程的数值模拟方面也有较好的应用[5]．采用 CFD 数值模拟技术对焊接熔池进行模拟研究，对控制焊接质量、改进焊接工艺具有重要的意义．

1 数学模型的建立

图 1 为三维瞬态 TIG 焊过程示意图，焊接系统关于 xOz 平面对称．起弧后，电弧以恒定速度沿 x 轴移动，电弧热传至工件，使工件温度升高形成熔池．当电弧传至工件的热量与工件向周围介质散失的热量相等时，熔池达到准稳态，相对稳定不再长大，随电弧同步移动．

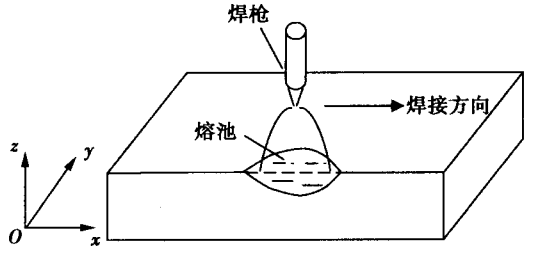

图 1 三维 TIG 焊示意图
Fig. 1 Schematic of 3-D TIG welding

根据三维瞬态 TIG 焊过程的实际情况，为简化计算，做如下假设：(1) 焊接过程中，熔池和电弧关于焊接中心平面对称．(2) 电弧的热流分布呈高斯分布．(3) 熔池中液态金属为不可压缩、湍流流体，流动主要受表面张力、电磁力和浮力驱动．(4) 熔池的自由表面为平面，当 TIG 焊接电流小于 220 A 时，这一假设是合理的[6]．

1.1 控制方程

直角坐标系下三维瞬态 TIG 焊熔池流体流动与传热控制方程描述如下．

连续性方程为

收稿日期：2008－07－24
基金项目：国家自然科学基金资助项目(50565003)；江西省科技厅重大科技攻关资助项目(Z03388)

$$\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}=0 \tag{1}$$

动量守恒方程为

$$\left.\begin{aligned}
&\rho\left(\frac{\partial u}{\partial t}+u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}\right)\\
&=F_x-\frac{\partial p}{\partial x}+\mu\left(\frac{\partial^2 u}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 u}{\partial z^2}\right)\\
&\rho\left(\frac{\partial v}{\partial t}+u\frac{\partial v}{\partial x}+v\frac{\partial v}{\partial y}+w\frac{\partial v}{\partial z}\right)\\
&=F_y-\frac{\partial p}{\partial y}+\mu\left(\frac{\partial^2 v}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 v}{\partial z^2}\right)\\
&\rho\left(\frac{\partial w}{\partial t}+u\frac{\partial w}{\partial x}+v\frac{\partial w}{\partial y}+w\frac{\partial w}{\partial z}\right)\\
&=F_z-\frac{\partial p}{\partial z}+\mu\left(\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 w}{\partial z^2}\right)
\end{aligned}\right\} \tag{2}$$

能量守恒方程为

$$\rho c\left(\frac{\partial T}{\partial t}+u\frac{\partial T}{\partial x}+v\frac{\partial T}{\partial y}+w\frac{\partial T}{\partial z}\right)$$
$$=\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+H \tag{3}$$

式中：u,v,w 分别为 x,y,z 方向的流体速度分量；ρ 为金属的密度；c 为比热容；λ 为导热系数；μ 为液态金属的动力粘度系数；H 为求解域内热源；T 为温度；t 为时间；p 为流体内压力；F_x,F_y,F_z 分别为体积力在 x,y,z 方向上的分量.

1.2 初始条件和边界条件

1.2.1 初始条件

工件的初始温度等于环境温度 T_0，熔池中液态金属的初始流速为零，即 $u=v=w=0$.

1.2.2 热边界条件

TIG 焊电弧对熔池上表面进行加热，给定上表面高斯热源为

$$q(r)=\frac{\eta IU}{2\pi\sigma_q^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_q^2}\right),\ r<\sqrt{6}\sigma_q \tag{4}$$

式中：η 为电弧功率有效系数；I 为焊接电流；U 为电弧电压；r 为离加热中心的距离 $r^2=(x-v_h t)^2+y^2$；v_h 为焊接速度；t 为焊接时间；σ_q 为热流分布参数.

焊接熔池热场关于中心平面（xOz 平面）对称，即 $\partial T/\partial y=0$. 工件其余表面与周围环境对流换热，给定对流换热边界为 $q=-h_c(T-T_0)$. 其中 h_c 为对流换热系数；T_0 为环境温度.

1.2.3 速度边界条件

在熔池上表面，由于存在温度梯度而产生的表面张力梯度与流体的剪切力相平衡，有速度边界条件为 $\mu(\partial u/\partial z)=-(\partial\gamma/\partial T)(\partial T/\partial x)$，$\mu(\partial v/\partial z)=-(\partial\gamma/\partial T)(\partial T/\partial y)$，其中 $\partial\gamma/\partial T$ 为表面张力温度系数；工件对称表面 $\partial u/\partial y=0$，$\partial w/\partial y=0$，$v=0$；在其它表面 $u=v=w=0$.

1.3 熔池流体流动驱动力分析

TIG 焊熔池流体流动受到的主要驱动力有熔池表面张力、电磁力和浮力. 熔池表面张力梯度与流体的剪切应力相平衡，$\tau=(\partial\gamma/\partial T)(\partial T/\partial r)$，表面张力系数伞 $-0.000\,43$[7].

焊接熔池中的电磁力[8]为

$$\left.\begin{aligned}
F_x&=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2\sigma_j^2 r}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\left(1-\frac{z}{L}\right)^2\frac{x}{r}\\
F_y&=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2\sigma_j^2 r}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\left(1-\frac{z}{L}\right)^2\frac{y}{r}\\
F_z&=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 Lr^2}\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]^2\left(1-\frac{z}{L}\right)
\end{aligned}\right\} \tag{5}$$

式中：μ_0 为真空磁导率；σ_j 为电流分布参数；L 为工件厚度.

熔池中的浮力为

$$S_B=\rho g\beta(T-T_l) \tag{6}$$

式中：ρ 为液态金属密度；g 为重力加速度；β 为熔池液态金属体积膨胀系数；T_l 为熔池金属液相线温度.

2 焊接熔池求解分析

2.1 建立几何模型和划分网格

图 2 为工件模型及划分网格. 由于工件的对称性，计算时只取其实际尺寸的一半，实际工件尺寸为 150 mm × 40 mm × 5 mm，对应计算网格尺寸为 150 mm × 20 mm × 5 mm. 在焊缝附近温度梯度大，采用精细的网格；在远离焊缝的区域可用相对较大的网格，在保证计算精度的同时兼顾了计算效率.

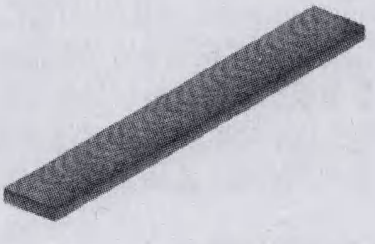

图 2 工件模型及划分网格

Fig. 2 Workpiece model and gird system

2.2 熔化/凝固过程的处理

FLUENT 凝固熔化模型应用 enthalpy-porosity 技术处理焊接工件的熔化凝固过程. 引入液体分数，

液体分数为 1 表示熔化了的液态金属区域,液体分数为 1 ~ 0 之间表示固相和液相之间的糊状区域,液体分数为 0 则表示固相区域. 糊状区域被看作为多孔介质,根据每个单元的多孔性在单元中设置相应的流体阻力.

2.3　湍流的处理

焊接熔池金属流体流动具有湍流特性[9],采用 FLUENT RNG k-ε 湍流模型,可以很好地处理强旋转流、低雷诺数流动等问题. RNG k-ε 湍流模型的 k,ε 方程为[10]

$$\left.\begin{aligned}\frac{\partial(\rho k)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho k u_i)}{\partial x_i}&=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_k D\frac{\partial k}{\partial x_l}\right)+G_k+\rho\varepsilon\\ \frac{\partial(\rho\varepsilon)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho\varepsilon u_i)}{\partial x_i}&=\frac{\partial}{\partial x_j}\left(\alpha_\varepsilon D\frac{\partial\varepsilon}{\partial x_l}\right)+\frac{G_{1\varepsilon}^*}{k}G_k-C_{2\varepsilon}\rho\frac{\varepsilon^2}{k}\end{aligned}\right\}\tag{7}$$

式中:k 为湍动能;ε 为湍动耗散率;D 为扩散系数;G_k 为湍动能产生项;α_k,α_ε,$C_{2\varepsilon}$,$G_{1\varepsilon}^*$ 为经验常数;u_i 为三个方向速度;x_i,x_j,x_l 为三个方向坐标;i,j,l 分别可取 1,2,3.

3　计算结果与讨论

用 RNG k-ε 二方程湍流模型,分离变量法隐式求解;压力和速度耦合采用 SIMPLE 算法;对 0Cr18Ni9Ti 不锈钢熔池进行数值模拟. 焊接电流 I = 150 A,电弧电压 U = 18 V,焊接速度 v_h = 3 mm/s,起焊点在 x = 10 mm 处. 材料的热物理性能参数随温度变化,见文献[9].

3.1　计算结果分析

引弧后,在时间 0.3 s 左右工件开始熔化形成熔池,熔池形成的初期不稳定,随着时间迅速增大,经过一段时间后达到准稳态. 图 3 为熔池形成初期(0.5 s)xOy 平面(熔池上表面)温度场分布,温度场是以热源中心为中心的圆形,温度梯度大;图 4a 为准稳态时 xOy 平面温度场分布,温度场呈拖尾状,热源前方等温线密集,温度梯度大,后方等温线稀疏,温度梯度小. 熔池中心最高温度为2 262 K.

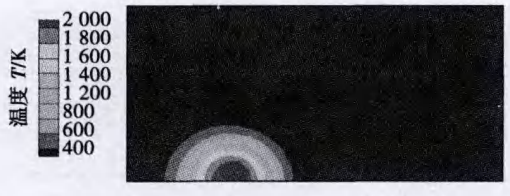

图 3　0.5 s 时 xOy 平面温度场分布

Fig. 3　Temperature field distribution of xOy face at 0.5 s

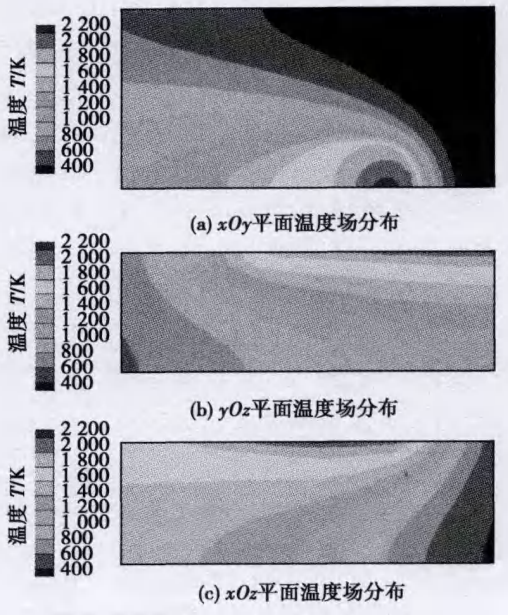

图 4　准稳态各截面温度场分布

Fig. 4　Temperature field distribution of each section on quasi-steady state

图 4b,c 分别为准稳态时 yOz,xOz 平面温度场分布.

焊接工件液相线温度为 1 723 K,通过观察温度场中液相线随时间的变化,可以得到整个熔池形状的动态变化(图 5). 图 5a 为 xOy 平面熔池形状的动态变化,从左到右分别为 0.5,2,4,6 s 时刻的熔池图像,刚开始时熔池形状为圆形,但随着热源的运动熔池形状被拉长. 图5b为 xOz 平面熔池形状

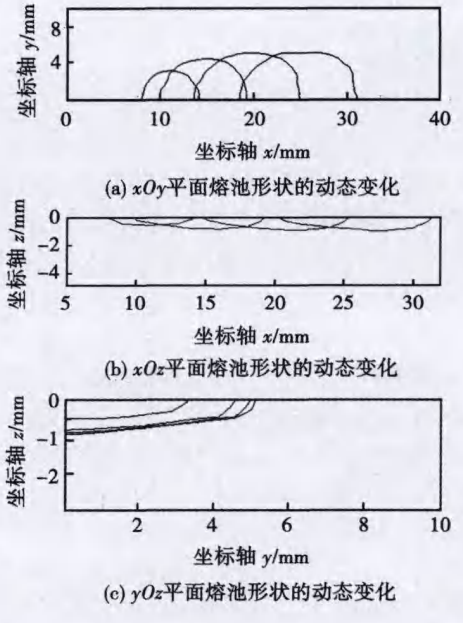

图 5　各截面熔池形状的动态变化曲线

Fig. 5　Transient variation curres of weld pool on each corss-section

的动态变化，从左到右分别为 0.5,2,4,6 s 时刻的熔池图像，熔池随着时间的增长而迅速增大. 图 5c 为 yOz 平面熔池形状的动态变化，由于熔池关于 xOz 平面对称，所以只显示半个熔池的形状，从上到下分别为 0.5,2,4,6 s 时刻的熔池图像，由于熔池宽度较早时刻达到准稳态，所以在 4 s 后 yOz 平面熔池形状基本不变.

图 6 为熔池形状特征参数随时间的动态变化曲线. 图中 6 曲线分别是熔池长度、宽度、深度随时间的动态变化. 熔池形成初期长度、宽度、深度都随时间迅速增长，首先熔池宽度在引弧后 4 s 左右时达到准稳态时的值，为 10.3 mm. 然后熔池长度和深度在引弧后 7.5 s 左右时才达到准稳态时的值，长度、深度分别为 11.9,0.96 mm.

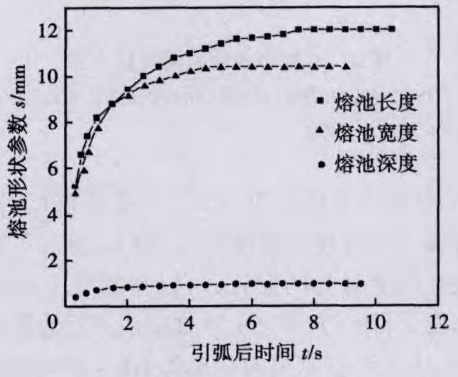

图 6 熔池形状特征参数的动态变化曲线

Fig. 6 Transient variation curues of shape characteristic parameters of weld pool

3.2 试验验证

TIG 焊熔池形状视觉检测系统如图 7 所示. 激光器作为主动光源发出激光，经过扩束、准直投射到熔池上，用加了窄带滤光片和中性滤光片的 CCD 摄像机在另一侧拍摄熔池图像. 选取合适的激光入射角度和拍摄角度，获取熔池图像如图 8 所示，再通过

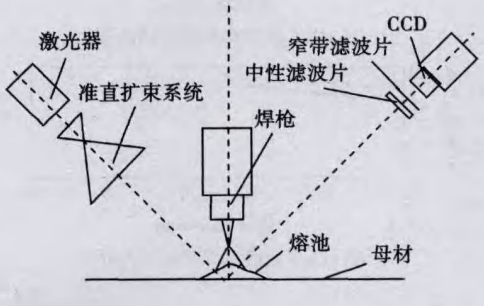

图 7 试验系统

Fig. 7 Experimental system

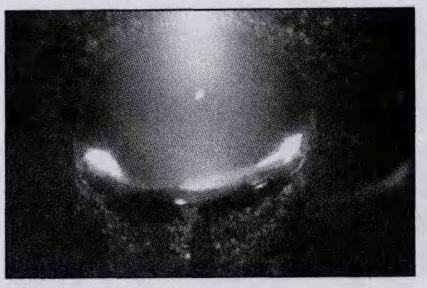

图 8 拍摄的熔池图像

Fig. 8 Weld pool image

图像处理和图像标定获取熔池形状参数值. 试验值取 4 次试验的平均结果，对比显示计算结果与试验结果吻合良好，表 1 为熔池上表面形状渗数的试验值与计算值比较.

表 1 熔池上表面形状参数的试验值与计算值

Table 1 Experimental and calculated shape parameters on weld pool surface

	长度 L/mm	宽度 W/mm
试验值	11.53	9.78
计算值	11.90	10.30
相对误差	4.90%	5.30%

4 结 论

(1) 利用 FLUENT RNG k-ε 湍流模型对 TIG 焊熔池进行数值模拟，求解出了熔池温度场及熔池形状参数的动态变化.

(2) 准稳态时熔池中心最高温度为 2 262 K，熔池长、宽、深度分别为 11.9,10.3,0.96 mm. 熔池宽度在引弧后 4 s 左右的时间到达准稳态，长度和深度在引弧后 7.5 s 左右的时间到达准稳态.

(3) 用主动视觉检测系统对焊接熔池进行检测，试验结果与数值模拟结果基本一致.

参考文献：

[1] Zhao P S, Wu C S, Zhang Y M. Numerical simulation of dynamic characteristics of weld pool peometry with step changes of welding parameters [J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(7):765 - 780.

[2] Wu C S, Zhao P S, Zhang Y M. Numerical simulation of transient 3-D surface deformation of full-peretrated GTA weld pool[J]. Welding Journal, 2004, 83(12): 330 - 335.

[下转第 60 页]

[7] Frank Chen. Overview of three-dimensional shape measurement using optical methods[J]. Optical Engineering, 2000, 39(1): 10 - 22.
[8] Zonllne F, Matusevich V, Kowarschik R. 3D measurement by stereo-photogrammetry[J]. Proceedings of SPIE, 2003, 5144: 311 - 314.
[9] 马颂德, 张正友. 计算机视觉—计算机理论与算法基础[M]. 北京: 科学出版社, 1997.
[10] 张广军. 机器视觉[M]. 北京: 科学出版社, 2004.
[11] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision[C]// In: Proceedings-CVPR '86: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, Miami Beach, 1986: 364 - 374.
[12] Zhang Z. A flexible new technique for camera calibration[J]. IEEE Transactions of Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2000, 22(11): 1330 - 1334.
[13] Triggs B. Auto-calibration and absolute quadric[C]// In: Proceedings-CVPR'97: IEEE Computer Society Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, San Juan, 1997: 604 - 614.

作者简介: 殷子强,男,1982 年出生,博士研究生.主要从事机器人及智能焊接和焊接机器人再制造方面的研究. 发表论文 2 篇.

Email: mynameisyzq@yahoo.com.cn

[上接第 56 页]

[3] Lei Y P, Murakawa Hidekazu, Shi Y W, *et al*. Numerical analysis of the competitive influence of marangoni flow and evaporation on heat surface temperature and molten pool shape in laser surface remelting [J]. Computational Material Science, 2001, 21(3): 276 - 290.
[4] Choo R T C, Szedely J. The possible role of turbulence in GTA weld pool behavior[J]. Welding Journal, 1994, 73(2): 25s - 31s.
[5] 朱立奎. 基于 FLUENT 横向窄间隙 TIG 焊数值模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2007.
[6] Kim S D, Na S J. Effect of weld pool deformation on weld penetration in stationary gas tungsten arc welding[J]. Welding Journal, 1992, 71(4): 179 - 193.
[7] 马 立. 等离子弧焊接熔池流场与温度场三维数值模拟[D]. 天津: 天津大学, 2006.
[8] 武传松. 焊接热过程数值分析[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1990.
[9] 赵朋成. 全熔透 TIG 焊接池熔池形态瞬时行为的数值模拟[D]. 山东: 山东大学, 2003.
[10] 王献孚, 熊鳌魁. 高等流体力学[M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2003.

作者简介: 袁尤智,男,1984 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为光电传感与检测技术. 发表论文 3 篇.

Email: yuanyouzhi1313@sina.com