

● 焊接技术 ●

基于 Fluent 模拟 TIG 电弧燃烧

彭小飞¹, 马国红¹, 张玉刚¹, 平奇文¹, 叶佳²

(1. 南昌大学机电工程学院, 江西南昌 330031; 2. 肯塔基大学电子透镜中心, 美国列克星敦 40506)

摘要: 基于纳维-斯托克斯方程组、能量守恒方程、麦克斯韦方程组建立二维轴对称 TIG 焊电弧模型, 借助 Fluent 软件模拟电弧燃烧的整个过程。通过 UDF 命令将氩气的物理特性随温度的变化、动量方程的源项、钨极边界的电流密度分布等动态地连接到计算模型中, 并通过 UDS 命令添加电流连续性方程。模拟的结果显示, 电弧温度场呈钟罩形, 电弧压力在轴向上最大, 氩气的物理特性随电弧温度场变化, 轴向电流密度沿轴向不断减小, 径向电流密度呈高斯分布。

关键词: TIG; Fluent; UDF; UDS; 电弧模拟**DOI:** 10.14158/j.cnki.1001-3814.2016.01.049**中图分类号:** TG444**文献标识码:** A**文章编号:** 1001-3814(2016)01-0176-04

Simulation on TIG Arc Burning Based on Fluent

PENG Xiaofei¹, MA Guohong¹, ZHANG Yugang¹, PING Qiwen¹, YE Jia²

(1. School of Mechanical Engineering, Nanchang University, Nanchang 330031, China; 2. Electronic Lens Center, University of Kentucky, Lexington 40506, America)

Abstract: Based on Navier-Stokes equations, energy conservation equations, Maxwell equations, the two-dimensional axisymmetric TIG arc model was established. By Fluent software, the process of arc burning was simulated. The physical properties of argon with the change of the temperature, the source term of the momentum equations, and the current density distribution of the tungsten were added dynamically to the calculated model through the UDF command, and through the UDS command, the current continuity equation was added. The simulated results show that the shape of arc temperature field is a bell, the maximum arc pressure is located in the axial direction, and the physical properties of argon differ from the temperature field. The current density of z direction decreases along the axial, and the current density of r direction shows Gauss distribution. The simulation results are in good agreement with the experiment results of the related literature.

Key words: TIG; Fluent; UDF; UDS; simulation of arc

钨极惰性气体保护焊(TIG)是使用钨极或活化钨作为非熔化极,采用惰性气体(如氩气、氦气等)作为保护气体的电弧焊方法。当采用氩气作为保护气体时,TIG称为钨极氩弧焊。由于氩气在各种保护气体中的稳定性最好,所以掌握氩弧的形成,以及氩弧氛围中各种物理参数的分布对于提高焊接质量以及电弧的稳定性具有重要的意义^[1]。Masao Ushio等人^[2]早在1982年就对焊接电弧的传热过程进行了分析计算;芦凤桂等人^[3]对钨极氩弧焊焊接电弧数值分析,发现电弧电压符合双面指数曲线分布,电流密

度呈现高斯分布;樊丁和陈剑虹等人^[4-6]建立了较完善的焊接电弧传热传质过程的数学模型,并考虑了紊流,得出的温度场流场与实际情况比较接近;Choo TC等人^[7]将自由燃烧的电弧中的热辐射、流场、温度场进行了耦合分析计算;朱加雷等人^[8]通过ANSYS建立了实用的焊接电弧瞬态温度分布数学模型,探索了电弧模拟分析中热、电磁、流场和温度场的耦合理论;郭朝博等人^[9]借助Fluent软件通过二次开发UDF(User Define Function)命令,模拟了二维稳态TIG电弧,动态地获取了电弧温度场压力场的分布;张瑞华等人^[10]模拟了三维状态下K-TIG焊大电流焊时的电弧特性,并对不同焊接电流下的温度、电势、压力分布以及等离子体的速度场分布进行分析,发现小孔形成的关键是大电流形成的较大电弧压力。

本文在对TIG电弧模型的控制方程和边界条件确定的基础上,借助Fluent软件通过用户自定义

收稿日期: 2015-03-10**基金项目:** 国家自然科学基金资助项目(61165008);教育部回国基金资助项目(13006199)**作者简介:** 彭小飞(1990-),男,江西吉安人,硕士研究生,主要从事焊接智能机器人研究;E-mail: pengxiaofei2013@163.com**通讯作者:** 马国红,男,教授,博士生导师;E-mail: ghma2006@gmail.com

方程 UDF 命令将氩气在高温状态时的物理参数动态的连接到数学模型上;由于在整个电弧区域中温度的变化范围很大,氩气在不同温度下的各种物理性能参数呈高度非线性变化,氩气的密度、电导率、比热容、热导率、粘度都是温度的函数,这些参数对电弧的形成、稳定性、电流密度分布、电势分布、电弧温度场分布具有重要的影响;另外再通过自定义标量方程 UDS(User Define Scalar)添加电流连续性方程,获得电流的密度分布,最后显示的模拟结果与有关文献试验结果吻合良好。

1 数学模型

1.1 基本假设

为了防止钨极过热烧损,钨极的端部为圆锥状而非尖状,焊枪的冷却方式为气冷式,根据磁流体动力学理论构建电弧物理模型。为简化 TIG 焊接电弧内部复杂的热力学现象,在建立电弧数学模型时提出以下假设:①电弧区为纯氩气环境,电弧关于中心轴(AF)对称,处于不可压缩状态;②电弧等离子体处于局部平衡状态,即电子和重粒子(原子、离子)的温度相等;③电弧是光学薄的,即电弧对热量辐射的重新吸收相对于电弧的热量损失可以忽略不计;④根据电弧流场的雷诺数判断流体处于层流状态,不考虑焊接工件对整个电弧燃烧的影响。

1.2 物理模型与网格划分

在圆柱坐标系下建立电弧物理模型如图 1 所示,其中 AF 为轴向,CD 为径向,网格区域为氩气,非网格区域为钨极。根据试验其中钨极的半径为 0.53 mm,钨极尖端锥角为 60°。本文对物理模型进行结构化网格划分,考虑到焊丝底部圆柱区域的电弧温度场和流场变化梯度较大,为了保证计算精度,对该区域网格进行加密处理。

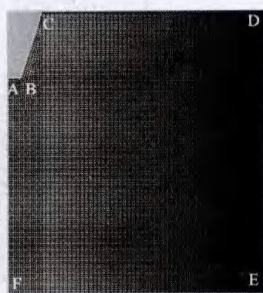


图 1 电弧的物理模型
Fig.1 Physical model of arc

1.3 控制方程

在圆柱坐标系下,根据磁流体动力学理论,计算 TIG 焊接电弧等离子体的控制方程由微分形式的纳维-斯托克斯方程组、能量守恒方程、麦克斯韦方程组组成。

(1) 纳维-斯托克斯方程组

质量连续性方程:

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

轴向动量方程:

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

径向动量方程:

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

(2) 能量守恒方程

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

(3) 麦克斯韦方程组

电流连续性方程:

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

欧姆定律:

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

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z} \quad (7)$$

安培环流定律:

$$B_\theta = \frac{\mu_0}{r} \int_0^r J_z r dr \quad (8)$$

在上述控制方程中: u 表示轴向 z 的速度; v 表示径向 r 的速度; P 为静压力; ρ 为氩气密度; μ 为氩气动力粘度系数; c_p 为氩气比热容; k 为氩气导热系数; σ 为氩气电导率; φ 为电势; T 为温度; J_r 为径向电流密度; J_z 为轴向电流密度; B_θ 为自感应磁场; μ_0 ($\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7}$) 为真空磁导率; F_z 为轴向动量源项; F_r 为径向动量源项; Q 为能量方程源项。其中氩气的物理参数随温度变化的曲线^[7]如图 2 所示。

在编写 UDF 文件时,通过 DEFINE_PROPERTY 宏编写氩气的密度、粘度、导热系数随温度变化的程序;通过 DEFINE_SPECIFIC_HEAT 宏编写氩气比热容随温度变化的程序;通过 DEFINE_SOURCE 宏编写动量方程的体积力源项,其中 F_z 包括轴向电磁力与重力, F_r 为径向电磁力;通过 UDS 添加电流连续性方程,根据 UDS 方程的

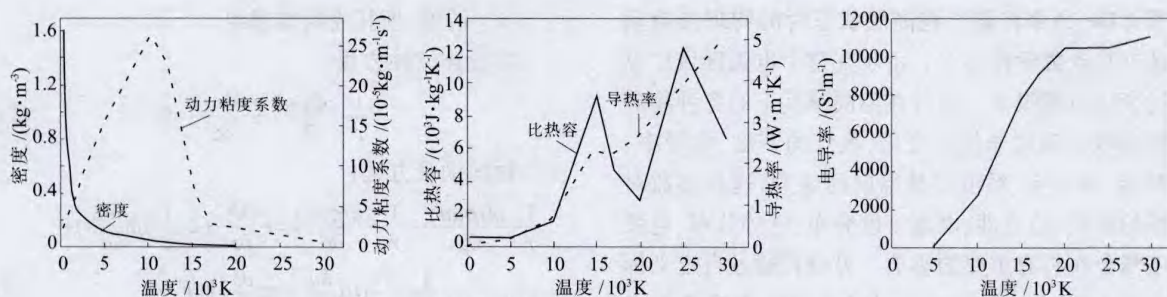


图2 氩气物理性能与温度的关系

Fig.2 Relationship between Ar physical properties and temperature

标准形式,可知电流连续性方程只有扩散项,扩散项系数通过氩气的材料扩散项添加;通过 DEFINE_PROFILE 宏给钨极添加不同的电流条件下电流密度。

1.4 边界条件

为了获得上述微分方程的唯一解,必须对计算区域进行边界条件的设定,各边界条件的类型与物理参数信息如表1所示。

表1 计算区域的边界条件

Tab.1 Boundary conditions of calculated region

边界名称	长度/mm	边界类型	$u/(m \cdot s^{-1})$	$v/(m \cdot s^{-1})$	T/K	φ
AB	0.53	wall	0	0	3000	$-\sigma(\partial\varphi/\partial z)=J_{gv}$
BC	2.80	wall	0	0	1000	$\partial\varphi/\partial r=0$
CD	10.50	velocity_inlet	u_{gv}	0	1000	$\partial\varphi/\partial r=0$
DE	13.00	pressure_outlet	$\partial u/\partial r=0$	$\partial v/\partial r=0$	1000	$\partial\varphi/\partial r=0$
EF	12.00	wall	0	0	6000	0
AF	10.00	axis	0	0	0	$\partial\varphi/\partial r=0$

表中: u_{gv} 为氩气的流速; J_{gv} 为轴向电流密度

2 模拟结果与分析

本文分别在焊接电流为200、180、160A的基础上,通过迭代求解获得不同焊接电流条件下的模拟结果,并以焊接电流180A为例,对模拟的结果作出分析。图3为焊接电流为180A时焊接电弧呈典型钟罩形温度场分布。由于采用直流正接,且未考虑焊接工件表面的温度分布,所以电弧温度沿着轴向降低,在阳极区与阴极区的温度梯度小于弧柱区;径向温度在中心轴温度最高并沿着径向降低,该模拟结果与文献[9]是一致的。

图4为电弧压力分布。由于靠近电极处的电磁收缩力大,靠近焊件处的电磁收缩力小,电弧呈钟罩形,随着新气体进入电弧区,沿着轴向运动的等离子体不

断被加热和电离,形成高速电子流冲向焊件表面,在轴向产生较大的电弧压力,这与文献[10]的试验结果吻合。当焊接电流为160与200A时,具有相似分布规律,焊接电流越大,产生的电弧压力越大。

图5与图6为电弧稳定时,氩气的密度、粘度、比热容、导热率分布云图。从图5左半部可知,在钟

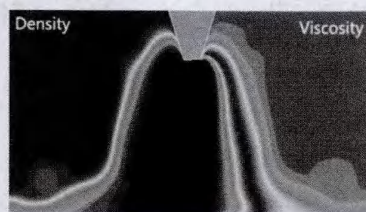
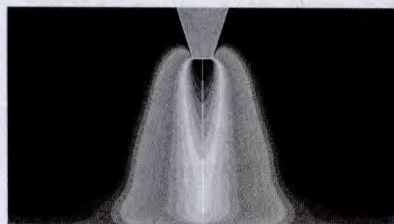
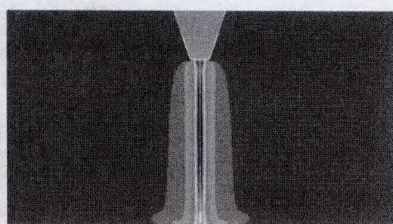


图5 氩气密度与粘度

Fig.5 The density and viscosity of Ar

图3 电弧温度场
Fig.3 Arc temperature field图4 电弧压力
Fig.4 The arc pressure

罩形的电弧内部电弧的温度高于外部,导致氩气的密度较低,而电弧外部的密度基本保持不变,这与氩气密度随着温度的增加而降低是吻合的;图5右半部为氩气的动力粘度系数分布,氩气的粘度随着温度的增加先增加然后减小,在距离中心轴一定距离时达到最大值。图6右

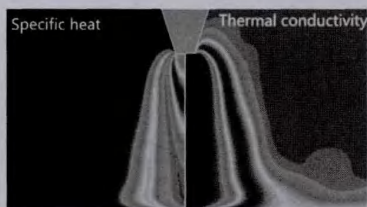


图6 氩气的比热容与热导率
Fig.6 The specific heat and thermal conductivity of Ar

半部为氩气的热导率系数的分布,其变化与动力粘度系数的变化相似;图6左半部为氩气比热容的大小,在距离钨极0.5mm处,比热容有最大值,模拟的结果与文献[7]一致。当焊接电流为160与200A时,同样具有相似分布规律。

电流密度是焊接电弧特性的主要参数,而通过试验测量电流的密度分布比较困难,本文通过UDF程序记录了在电弧燃烧达到稳定后轴向与径向电流密度的分布状态,其中在钨极端部电流密度大小为:

$$P_{\text{current}} = I / (\pi \cdot r \cdot r) \quad (9)$$

式中: I 为焊接电流; r 是钨极的半径。

图7为焊接电流分别为200、180、160A时,轴向电流密度变化状况,其中电流密度的数值大小依据钨极端部的密度大小为参考。从图7可以看出,在不同的焊接电流条件下,轴向电流密度沿着中心轴不断减小,在弧柱区的减幅最大。图8为在焊接电

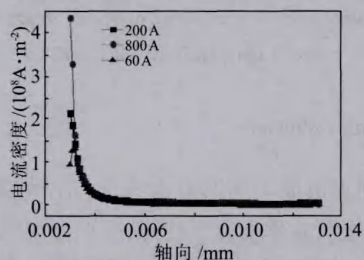


图7 不同焊接电流下的轴向电流密度
Fig.7 The current density of z direction at different welding currents

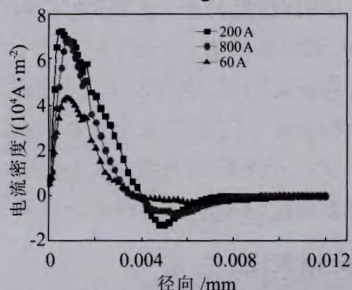


图8 不同焊接电流下的径向电流密度
Fig.8 The current density of r direction at different welding currents

为200、180、160A时,电流密度的径向分布,三者具有相似分布规律,在电弧区域呈现出明显的正态分布,这与文献[12]通过探针法测定的TIG电流密度分布是一致的。

3 结论

本文借助Fluent软件分别模拟了TIG焊自由燃弧的过程,通过UDF命令将氩气的物理特性随温度的变化、动量方程的源项、钨极边界的电流密度分布等动态地连接到计算模型中,通过UDS添加电流的连续性方程,最后迭代求解获得相对准确的结果:

(1) 当电弧趋于稳定时,电弧温度场呈钟罩形分布,电弧压力在轴向上最大。

(2) 氩气的密度在电弧区域最小,粘度和热导率具有相似分布规律,最大值偏离轴向,比热容的最大值距离钨极0.5mm处。

(3) 电弧区域的轴向电流密度沿着轴向不断减小,径向电流密度呈现高斯分布。

参考文献:

- [1] 王宗杰. 熔焊方法与设备[M]. 北京:机械工业出版社,2006.
- [2] Masao Ushio, Fukuhisa Matsuda. Mathematical modeling of heat transfer of welding arc [J]. Transactions of JWRI, 1982, 11(1): 7-15.
- [3] 芦凤桂,姚舜,钱伟方. 钨极氩弧焊焊接电弧数值分析[J]. 上海交通大学学报,2003,37(12):1862-1865.
- [4] Ding Fan, Masao Ushio, Fukuhisa Matsuda. Numerical computation of arc distribution [J]. Transactions of JWRI, 1996, 15(1): 1-5.
- [5] Masao Ushio, Ding Fan, Fukuhisa Matsuda. Contribution of arc plasma radiation energy to electrodes [J]. Transactions of JWRI, 1993, 22(2): 201-207.
- [6] 樊丁,陈剑虹. TIG焊电弧传热传质过程的数值分析[J]. 机械工程学报,1998,34(2):39-45.
- [7] Choo T C, Szekely J, Westhoff R C. On the calculation of the free surface temperature of gas-tungsten-arc weld pools from first principles: Part I. modeling the welding arc[J]. Metallurgical Transactions B, 1992, 23B(6): 357-369.
- [8] 朱加雷,焦向东,俞建荣,等. 基于ANSYS的TIG焊接电弧数值模拟研究[J]. 电焊机,2009,39(6):26-29.
- [9] 郭朝博,石珂,黄健康,等. 基于Fluent的TIG电弧数值模拟[J]. 电焊机,2011,41(3):11-14.
- [10] 张瑞华,栗海霞,李明,等. K-TIG焊接电弧特性的数值分析[J]. 电焊机,2012,42(12):7-11.
- [11] 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.
- [12] 贾昌申,肖克民,刘海侠,等. 直流TIG电弧的电流密度研究[J]. 西安交通大学学报,1994,28(4):33-38. [4]