

不同电流密度下的 TIG 焊电弧行为分析

张晓鸿， 陈静青， 张 康， 马朋召*
(西南交通大学 材料科学与工程学院,成都 610031)

摘 要:文中以 TIG 焊电弧为研究对象,通过流体力学和电磁学耦合理论建立了不同电流密度下的二维轴对称数学模型. 通过 Fluent 用户自定义函数(UDF)二次开发,对自由状态下的 TIG 焊电弧行为进行了数值模拟,获得了不同电流密度下的 TIG 焊电弧热场和流场的分布规律. 结果表明,TIG 焊电弧阴极温度较高,在较大的电流密度下,阴极区域存在较大的电势差,等离子体受到向下向内的电磁力增大,造成其最大运动速度增大,对阳极造成了强有力的冲击,形成较大的电弧压力. 同时验证了 TIG 焊电弧的热场呈现典型钟罩形态,在焊接过程中氩气比热容在钟罩电弧内部存在带状低谷区域.

关键词:钨极氩弧焊电弧; 电弧压力; 电势场; 流体计算

中图分类号: TG 444 **文献标识码:** A **doi:**10.12073/j.hjxb.20170730002

0 序 言

钨极惰性气体保护焊(TIG)因其焊缝成形好变形小、焊接质量高、电弧长度稳定等优点被广泛应用于各类焊接行业^[1]. 与 MIG,MAG 等焊接方法相比,TIG 焊电弧稳定,热输入小,其电弧的燃烧是一个非平衡、瞬态的不均匀物理化学过程,其电弧的物理特性决定了电弧与熔池之间的热传递和熔池能量流动,对焊缝质量具有决定性作用^[2].

国内外研究学者关于 TIG 焊电弧行为的数值仿真已进行了大量工作. 芦凤桂等人^[3-5]对 TIG 焊电弧进行数值分析时发现电流密度呈高斯分布,同时还研究了熔池表面变形对电弧行为的影响;Ushio^[6]和樊丁等人^[7]针对 TIG 焊电弧传热传质过程建立了较完善的数学模型,得到了与实际情况较接近的温度场和流场,但对于不同电流密度下的 TIG 焊电弧行为还需要进一步分析. 郭朝博等人^[8]借助 Fluent 软件模拟了稳态的 TIG 焊电弧,得到了 TIG 焊电弧温度场压力的分布. 但对于不同电流密度下的 TIG 焊电弧行为的对比研究相对较少.

文中在现有 TIG 焊电弧模拟的基础上,使用流体计算 Fluent 软件,针对不同电流密度下的电弧进行 UDF 二次开发,对比分析了不同电流密度下 TIG 焊电弧的流动和传热过程,进一步分析了不同电流密度对 TIG 焊电弧的温度场、电弧压力以及等离子体的行影响为规律.

1 数学模型

1.1 基本假设

TIG 焊电弧内部的热物理现象十分复杂,为简化计算,计算时对电弧采用以下假设^[4,8]:电弧区域为导电的纯氩气环境,电弧关于中心轴对称且不可压缩;电弧处于层流状态,电弧等离子体处于局部热平衡(LTE)状态;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.

1.2 物理模型

基于前文假设,建立了二维稳态轴对称 TIG 焊电弧数学模型,如图 1 所示,其中 AFE 为钨极,直径 3.2

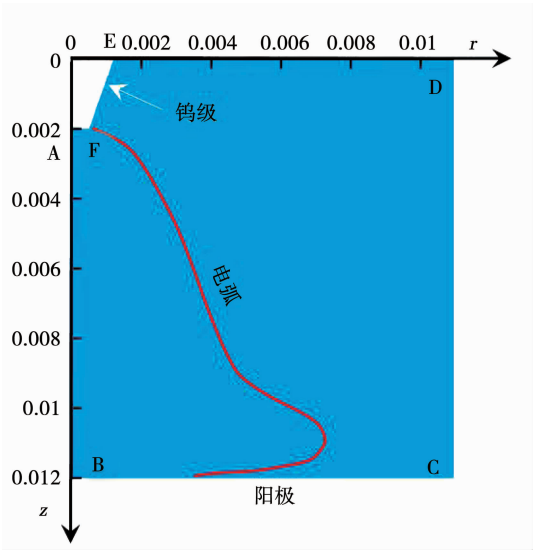


图 1 脉冲 TIG 焊电弧数学模型示意图
Fig. 1 Schematic diagram of mathematical model of pulsed TIG arc

mm,钨极凸台 0.5 mm,钨极锥角 60°,弧长 10 mm,使用 ICEM-CFD 软件建模并划分网格,如图 2 所示.

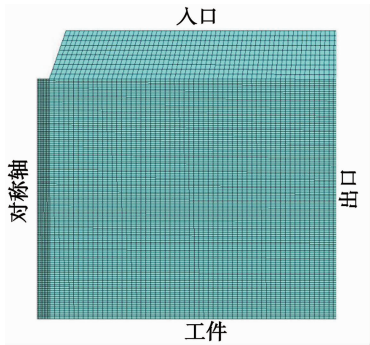


图 2 网格模型
Fig. 2 Mesh model

1.3 控制方程

二维轴对称坐标系下通用控制方程为

$$\frac{\partial}{\partial z}(\rho v_z \Phi) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r}(r \rho v_r \Phi) = \frac{\partial}{\partial z} \left(\Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial z} \right) + \frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \Gamma_\Phi \frac{\partial \Phi}{\partial r} \right) + S_\Phi$$
(1)

式中: $\Phi, \Gamma_\Phi, S_\Phi$ 分别代表通用变量、广义扩散系数和广义源项. 其中,当 Φ 分别取 $1, A_r, A_z, v_r, v_z, h, V$ 时,通用方程分别表示质量守恒方程、径向磁矢量方程、轴向磁矢量方程、径向动量守恒方程、轴向动量守恒方程、能量守恒方程、电流连续方程. Γ_Φ 和 S_Φ 的表达式参见文献[8]. 此外,电磁耦合还需添加欧姆定律(式(2))和切向磁感应强度公式(式(3)),即

$$J_z = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial z}, J_r = -\sigma \frac{\partial \varphi}{\partial r}$$
(2)

$$B_\theta = \frac{\partial A_r}{\partial z} - \frac{\partial A_z}{\partial r}$$
(3)

式中: z, r 表示为轴向和径向坐标; ρ 为氩气密度; σ 为氩气电导率; φ 为电势; T 为温度; J_r, J_z 为径向和轴向电流密度; B_θ 为自感应磁场; h 为热焓; A_r, A_z 分别为磁矢势 $\mathbf{A}$ 的径向和轴向分量;其中氩气的热物性参数均参考文献[3]选取.

1.4 边界条件和源项

上述控制方程只有给定边界条件才能得到唯一解. TIG 焊电弧数学模型边界条件如表 1 所示.

表 1 TIG 焊电弧边界条件
Table 1 Boundary conditions of TIG arc

边界名称	轴向速度 $u/(m \cdot s^{-1})$	径向速度 $v/(m \cdot s^{-1})$	温度 T/K	电势 φ
AB	0	$\partial v/\partial r = 0$	$\partial T/\partial r = 0$	$\partial \varphi/\partial r = 0$
BC	$\partial u/\partial r = 0$	$\partial v/\partial r = 0$	6 000	0
CD	$\partial u/\partial r = 0$	$\partial v/\partial r = 0$	1 000	$\partial \varphi/\partial r = 0$
DE	u_{A_r}	0	1 000	$\partial \varphi/\partial r = 0$
EF	0	0	1 000	$\partial \varphi/\partial r = 0$
FA	0	0	3 000	$-\sigma(\partial \varphi/\partial z) = I/\pi r^2$

2 模拟结果与分析

计算中的焊接工艺参数来自高温镍基合金焊接试验,具体参数为:直流正接,焊接电流分别为 100 和 150 A,钨极直径 3.2 mm,保护气体为 99.99% 的纯氩气,流量为 10 L/min. 使用流体计算软件 Fluent,通过 UDF(user define function)添加了符合实际焊接情况的边界条件和源项,再通过 UDS(user define scalar)添加电流连续性方程,对自由燃烧的 TIG 焊电弧行为进行了数值模拟. 计算得出了二维坐标系下的电弧的电磁力和焦耳热,进而求得了电弧的温度场和流场的分布规律.

2.1 电流密度对电弧温度场分布影响

图 3 为不同电流下的 TIG 焊电弧温度场分布. 可以看出,稳定燃烧的 TIG 焊电弧呈现典型的钟罩

形状分布,在靠近阴极区域,电弧温度达到最大值. 这是因为电流有垂直于钨极尖端和工作表面的流动倾向. 电流产生磁场,磁场和电场耦合产生电磁力,沿着钨极尖端的圆锥面驱动离子气,向下的动量引

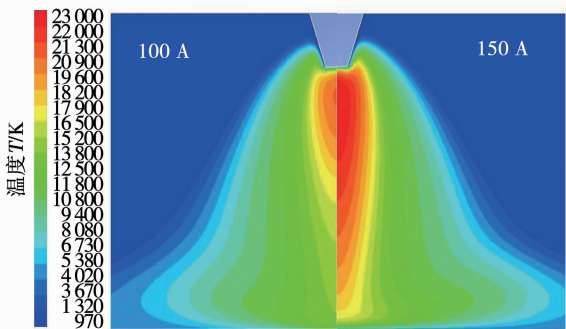


图 3 电弧温度分布云图

Fig. 3 Distribution of arc temperature

起高温离子气冲向工件表面,并沿工件表面向外延伸,如此产生了钟罩形状的电弧. 电弧温度在阴极区域最高,并且由阴极至阳极沿着径向逐渐散发开来,呈现梯度减小. 可以看出电流密度越大,靠近阴极的弧柱区域能量越集中,弧柱区温度越高,有效加热半径越大.

图 4 为不同电流密度下的 TIG 焊电弧沿中心轴线的温度分布. 可以看出,在电弧阴极区域,温度迅速上升,电弧热场峰值温度出现在距离钨极正下方 1~2 mm 的位置,在达到峰值后则缓慢下降,到达阳极之后则迅速降低. 这是因为阴极区域钨极尖端电流密度较大,从而焦耳热加热效果显著,导致温度急剧上升. 而在轴向远离阴极电流密度逐渐降低,焦耳热加热效果逐渐减弱. 在阳极区域由于工件温度较低,电弧温度被迫急剧下降.

2.2 电流密度对氩气热物性参数的影响

图 5 给出了不同电流下的氩气比热容和热导率的对比. 从图 5a 可以看出不同电流下的热导率均呈钟罩形状分布. 由于钨极尖端下面的电弧内部温度较高,导致氩气的比热容沿着径向向外梯度减小. 此外不同电流密度下的氩气热导率具有类似的分布

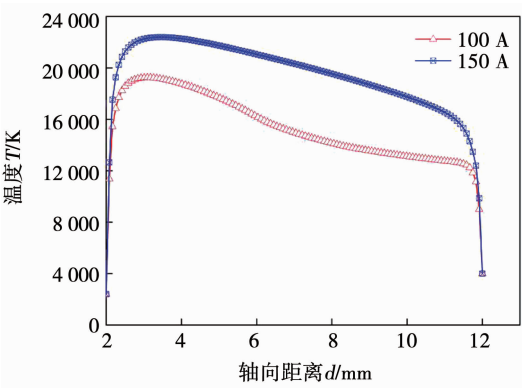


图 4 轴向温度分布 (AB)
Fig. 4 Axial temperature distribution

规律,但电流密度越大热导率在弧柱区域越大. 从图 5b 可以看出不同电流下的氩气的比热容具有相似的分布规律,也呈钟罩形状. 但氩气的比热容在沿着径向的中部区域出现了一个带状的低谷区域. 结合温度场结果和氩气比热容随温度的变化规律判断,在 15 000~20 000 K 之间氩气的比热容存在一个极小值,且电流密度越大,带状低谷被拉长越靠近阳极工件. 比热容的分布在弧柱区较大,且在相同

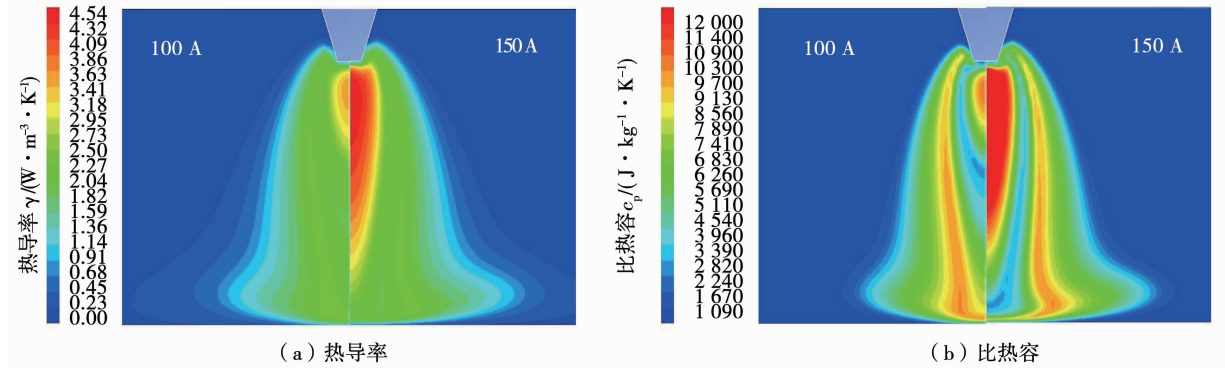


图 5 氩气热物性参数对比
Fig. 5 Comparison of thermophysical parameters of argon

的温度下,电流密度越大,比热容越大.

2.3 电流密度对电弧压力分布的影响

图 6 为不同电流密度下的电弧压力分布. TIG 焊电弧在阴极区和阳极区呈现较大的压力分布,而弧柱区则相对较小. 比较不同电流下的电弧压力,可以看出电流大小对电弧压力影响很大,电流差 50 A,峰值电弧压力差 200 Pa. 这是因为电流密度越大,电磁力对等离子体的作用力越大,造成其运动速度越大,最大速度可以达到 640 m/s 左右,进而对阳极造成更强的冲击力.

图 7 为电弧压力沿着轴向的分布 (AB 方向),

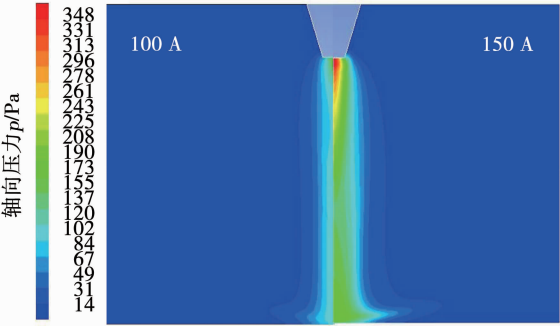


图 6 电弧轴向压力分布云图
Fig. 6 Distribution of arc axial pressure

电弧压力在弧柱区域下降很快,梯度较大. 而大电流下,在距离阴极 5.5 mm 的位置电弧压力出现较大升高,而小电流下,距离阴极 4 mm 的位置出现略微升高. 同时不同电流下的 TIG 焊电弧压力在阳极分布差异明显,150 A 电流下的电弧压力明显高于 100 A,两者相差 100 Pa.

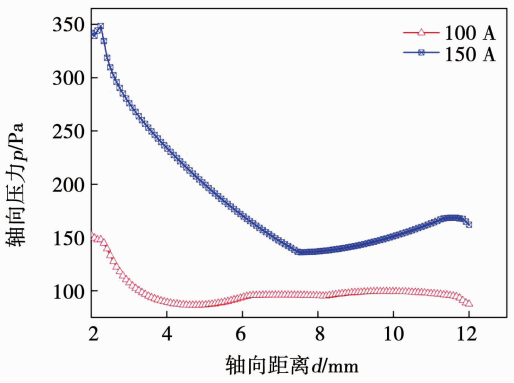


图 7 轴向压力对比 (AB)

Fig. 7 Comparison axial pressure

2.4 电流密度对等离子体速度的影响

电弧中的等离子体在电磁场作用下受到洛伦兹力从阴极向阳极高速运动. 由于电弧阴极区域电势差较大,等离子体在阴极区域被沿着钨极尖端表面向下向内的电磁力驱动,速度迅速增大,并向阳极运动,对阳极工件造成冲击,形成了电弧压力. 运动到阳极的等离子体在工件表面受到阻碍,速度迅速下降,形成了如图 8 所示的分布. 可以看出,电流越大,电磁力对等离子体的加速作用越明显,运动速度越大,最大速度可以达到 640 m/s 左右,对阳极的冲击力也更大,造成的电弧压力也越大.

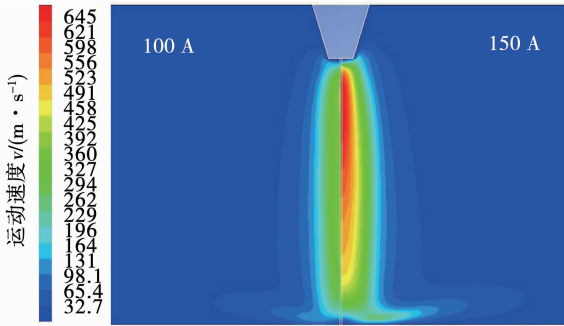


图 8 等离子体速度分布云图

Fig. 8 Distribution of plasma velocity

2.5 TIG 焊电弧形态试验验证

实际焊接过程中,电弧内部的流场和温度场是

复杂变化的,很难实现对其内部温度及等离子体流速的测定. 文中通过采集焊接电弧的形态来验证所建立模型的准确性. 图 9 给出了钨极直径 3.2 mm,焊接电流分别为 150 和 100 A 下的典型 TIG 焊电弧形态. 实际焊接中电弧也呈现钟罩形态,电流越大,最大温度越高,电弧有效作用面积更大,与仿真结果一致,这也侧面验证了模型的准确性. 但是由于实际焊接过程中,阴极和阳极之间距离过远存在引弧困难,电弧不稳定等问题,所以实际焊接电弧弧长有效值大约在 5 mm 左右,且实际焊接过程中存在电磁偏吹和阳极斑点等因素的影响,实际 TIG 焊电弧在轴向存在如图 9 中所示的压缩现象.

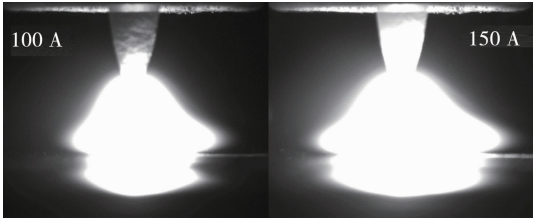


图 9 试验电弧形态

Fig. 9 Arc shape in experiment

3 结 论

(1) 当电弧处于稳定燃烧状态时,电弧温度场呈现钟罩形态,仿真值和计算值基本吻合;且电流越大电弧温度越高,加热半径越大.

(2) 电弧压力经过阴极最大,弧柱区下降和阳极区增长的分布规律. 电流差 50 A,峰值弧压差近 100 Pa.

(3) TIG 焊电弧在阴极区域存在较大的电势差,造成电弧等离子体在阴极区具有较大的运动速度;且电流越大,阴极区域电势差越大,从而等离子体运动的最大速度也越大.

参考文献:

[1] 张九海,王其隆,韦伟平. 小电流 TIG 焊电弧磁控特性的研究 [J]. 焊接学报, 1990, 11(1): 43-49.
Zhang Jiuhai, Wang Qilong, Wei Weiping. A study of the characteristics of magnetic control for low current TIG welding [J]. Transactions of the China Welding Institution, 1990, 11(1): 43-49.
[2] 黄瑞生,刘黎明,迟鸣声. 镁合金激光-TIG 焊接温度场的红外测量与数值模拟 [J]. 焊接学报, 2006, 27(10): 89-93.
Huang Ruisheng, Liu Liming, Chi Mingsheng. Infrared measurement and numerical simulation of temperature field in hybrid laser-TIG welding process of magnesium alloys [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2006, 27(10): 89-93.

参数范围为 d_{L-A} 为 3 mm, d_{L-w} 为 2 mm, 激光功率 4 200 ~ 4 600 W, 电弧电流 120 ~ 140 A, 焊接速度 1.4 ~ 1.8 m/min, 送丝速度 1.8 ~ 2.6 m/min 采用 Ar + 10% CO₂ 作为保护气体, 流量 20 ~ 25 L/min.

参考文献:

[1] 陈孝龙. D406A 钢焊接工艺研究[J]. 航天制造技术, 2004 (4): 12 - 15.
Chen Xiaolong. Study on welding process of D406A steel[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2004 (4): 12 - 15.

[2] Tomita Y. Development of fracture toughness of ultrahigh strength, medium carbon, low alloy Steels for aerospace applications[J]. International Materials Reviews, 2000, 45(1): 27 - 37.

[3] 张 鹏, 张 文, 王生斌. 固体火箭发动机用 D406A 钢前连接件的加工工艺研究[J]. 航天制造技术, 2011 (4): 12 - 14, 27.
Zhang Peng, Zhang Wen, Wang Shengbin. Machining process study on D406 steel front joint piece applied in solid rocket motor [J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2011 (4): 12 - 14, 27.

[4] 彭昌永. 超高强钢壳体的电子束及手工钨极氩弧焊接技术研究[D]. 成都: 四川大学, 2003.

[5] 张林杰, 张建勋, 曹伟杰, 等. 工艺参数对 304 不锈钢脉冲 Nd:YAG 激光/TIG 电弧复合焊焊缝成型的影响[J]. 焊接学报, 2011, 32(1): 33 - 36.
Zhang Linjie, Zhang Jianxun, Cao Weijie, *et al.* Effect of process parameters on weld formation of 304 stainless steel by

pulsed Nd: YAG laser/TIG arc hybrid welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(1): 33 - 36.

[6] 冉国伟, 宋永伦, 闫思博, 等. 2219 铝合金复合热源焊接工艺及接头性能[J]. 焊接学报, 2011, 32(9): 25 - 29.
Ran Guowei, Song Yonglun, Yan Sibo, *et al.* Welding process and joint performance of 2219 aluminum alloy with compound heat source[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2011, 32(9): 25 - 29.

[7] 陈彦宾, 陈 杰, 李俐群, 等. 激光与电弧相互作用时的电弧形态及焊缝特征[J]. 焊接学报, 2003, 24(1): 18 - 19.
Chen Yanbing, Chen Jie, Li Liquan, *et al.* Arc shape and characteristics of welds in the interaction of laser and arc[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(1): 18 - 19.

[8] 马 然, 董韶喆, 吴世凯, 等. 薄板钛合金光纤激光-TIG 电弧复合焊接工艺研究[C]//第 15 届全国特种加工学术会议, 2013.

[9] 莫仲海. 30CrMnSiA 钢激光焊接气孔成因及控制[D]. 绵阳: 中国工程物理研究院, 2008.

[10] Mazar Atabaki M, Ma J, Liu W, *et al.* Pore formation and its mitigation during hybrid laser/arc welding of advanced high strength steel[J]. Materials & Design, 2015, 67: 509 - 521.

作者简介: 杨雨禾,男,1992 年出生,硕士. 主要从事激光焊接方面的研究. Email: yyh_hit@163.com

通讯作者: 雷正龙,男,博士,副教授. Email: leizhenglong@hit.edu.cn

[上接第 80 页]

[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.
Lu Fenggui, Yao Shun, Qian Weifang. Numerical analysis on tungsten inert gas welding arc[J]. Journal of Shanghai Jiaotong University, 2003, 37(12): 1862 - 1865.

[4] 芦凤桂, 姚 舜, 楼松年, 等. 熔池表面变形对电弧行为特征的影响[J]. 焊接学报, 2004, 25(2): 57 - 60.
Lu Fenggui, Yao Shun, Lou Songnian, *et al.* Effects of weld pool surface deformation on behavior characters of welding arc [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2004, 25(2): 57 - 60.

[5] Lu F, Tang X, Yu H, *et al.* Numerical simulation on interaction between TIG welding arc and weld pool[J]. Computational Materials Science, 2006, 35(4): 458 - 465.

[6] Ushio M, Matsuda F. Mathematical modelling of heat transfer of

welding arc (part 1) (welding physics, processes and instruments)[J]. Transactions of Jwri, 1982, 11(1): 7 - 15.

[7] Fan D, Ushio M, Matsuda F. Numerical computation of arc pressure distribution (welding physics, process & instrument) [J]. Transactions of Jwri, 1986, 15(1): 1 - 5.

[8] 郭朝博, 石 玟, 黄健康, 等. 基于 Fluent 的 TIG 焊电弧数值模拟[J]. 电焊机, 2011, 41(3): 11 - 14.
Guo Chaobo, Shi Yu, Huang Jiankang, *et al.* Numerical simulation of TIG welding arc based on fluent[J]. Electric Welding Machine, 2011, 41(3): 11 - 14.

作者简介: 张晓鸿,男,1991 年出生,硕士研究生. 主要研究方向为焊接结构及应力计算. Email: inovme@163.com

通讯作者: 陈静青,女,博士,硕士研究生导师. Email: manbu880@163.com