TIG焊熔池在阶跃参数下的数值分析

黄健康[1]， 郭朝博[2]， 石 玗[2]， 樊 丁[1]
（1. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室，兰州 730050；
2. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室，兰州 730050）

黄健康

摘 要：建立了恒流作用下TIG焊熔池的非稳态三维数学模型，利用FLUENT软件，通过选择合适的边界条件和热物理性能参数，强烈耦合控制方程组得到焊接熔池温度场、流场等的变化规律，针对熔池尺寸及相对于熔池中心等距点的温度，分析了在不同焊接工艺参数阶跃下的变化规律. 结果表明，随着焊接大电流向小电流的阶跃，熔池的尺寸及内部的流速都有一定程度的减小，随着电弧电压、焊接速度、工件板厚和板宽的阶跃，其变化都具有一定的滞后性，通过各种调整焊接工艺参数均可以达到调节熔池尺寸的效果.

关键词：TIG焊；熔池；数值模拟；FLUENT
中图分类号：TG402 **文献标识码**：A **文章编号**：0253-360X(2012)09-0017-04

0 序 言

焊接熔池是焊接中最重要也是最复杂的区域，其中焊接工艺参数的变化会影响到熔池的尺寸大小及内部流场的情况. 由于通过试验方法观测液态金属的流动是十分困难的，因此通过数值分析的方法对熔池内部的流动及传热过程进行分析是一种可行的办法. Oreper等人[1]于1984年首次对电弧固定时熔池中的流动及传热过程建立了数学模型. 之后国内外研究人员分别建立了二维[1]、三维[2-4]瞬态模型，但是对于焊接参数在阶跃情况下的数值分析还很欠缺. 文献[5]对焊接电流和速度阶跃是在熔透的情况下进行了分析，但未考虑电弧电压、工件尺寸等的跃变后焊接熔池的变化情况.

采用FLUENT软件，对在恒流及脉冲电流作用下的非稳态TIG焊熔池的流动和传热过程建立了数学模型，分析了在焊接电流、电弧电压、焊接速度、工件的宽度、厚度、脉冲峰值电流、基值电流、频率及占空比阶跃的情况下焊接熔池的变化规律.

1 数学模型

1.1 基本假设

由于焊接过程是一个涉及到电场、热场、磁场、流场交互作用的复杂过程，为了简化计算，在三维熔池模型的建立过程中作如下假设. 熔池的自由表面为平面；热流密度分布和电流密度分布为高斯分布；熔池为层流、不可压缩流体；只在重力项中考虑密度的变化，浮力项的处理方法采用Boussinesq假设. 图1为焊接熔池模型的示意图，坐标原点为工件左侧前顶点，其中A点为工件上表面始终距离熔池中心5 mm处的动点.

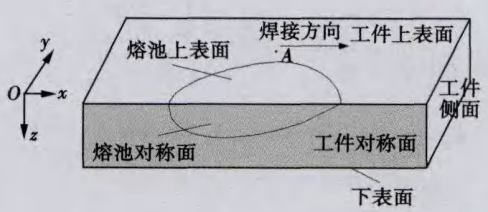


图1 熔池模型示意图
Fig. 1 Model of welding pool

1.2 控制方程

根据上述假设，采用三维直角坐标系，从质量、动量和能量方程出发得到如下控制方程.

连续性方程为

$$\frac{\partial U}{\partial x}+\frac{\partial V}{\partial y}+\frac{\partial W}{\partial z}=0 \tag{1}$$

式中：U,V,W分别为在x,y,z方向上的速度.

动量守恒方程为

$$\rho\frac{\mathrm{d}\boldsymbol{V}}{\mathrm{d}t}=S-\nabla p+\mu\nabla^2\boldsymbol{V} \tag{2}$$

收稿日期：2011-07-05
基金项目：国家自然科学基金资助项目(51165023)

式中：$\boldsymbol{V}$ 为速度矢量；p 为流体内的压力；μ 为液态金属的动力粘度系数；S 为动量源项；ρ 为密度；t 为时间.

能量守恒方程为

$$\rho c_p\left(\frac{\partial T}{\partial t}+U\frac{\partial T}{\partial x}+V\frac{\partial T}{\partial y}+W\frac{\partial T}{\partial z}\right)=\lambda\left(\frac{\partial^2 T}{\partial x^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial y^2}+\frac{\partial^2 T}{\partial z^2}\right)+\Delta H \tag{3}$$

式中：λ 为热导率；c_p 为定压比热容；ΔH 为熔化相变潜热；T 为温度.

1.3 控制方程源项

对于 TIG 熔池受到的体积力源项为浮力，只存在于 z 轴方向，其表达式为

$$G=-\rho g\beta(T-T_0) \tag{4}$$

式中：β 为膨胀系数；T_0 为熔点温度；g 为重力加速度.

对于熔池所受到的电磁力，其中 x 方向电磁力为

$$F_x=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2\sigma_j^2 r}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\left(1-\frac{z}{z_L}\right)^2\frac{x}{r} \tag{5}$$

式中：I 为焊接电流；σ_j 为电流发布参数；μ_0 为真空磁导率；σ_j 为电流分布参数；z_L 为工件的厚度；$r=\sqrt{(x-v_0t)^2+y^2}$，其中 v_0 为焊接速度.

y 方向的电磁力为

$$F_y=-\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2\sigma_j^2 r}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\left(1-\frac{z}{z_L}\right)^2\frac{y}{r} \tag{6}$$

z 方向的电磁力为

$$F_z=\frac{\mu_0 I^2}{4\pi^2 z_L r^2}\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\left(1-\frac{z}{z_L}\right)^2 \tag{7}$$

1.4 边界条件

对于上表面可分为熔池区与非熔池区，在熔池区上，有

$$k\left(\frac{\partial T}{\partial z}\right)=q_{arc}-a_c(T-T_a)-\varepsilon\sigma_b(T^4-T_a^4)-\omega H_v \tag{8}$$

式中：a_c 为换热系数；ε 为辐射系数；ω 为蒸发系数；σ_b 为 Stefan-Boltzmann 常数；T_a 为环境温度；H_v 为蒸发潜热；k 为换热系数；q_{arc} 为电弧输入热，即

$$q_{arc}=\frac{3\eta U_a I}{\pi r_q^2}\exp\left(-\frac{3r^2}{r_q^2}\right) \tag{9}$$

式中：η 为有效率；U_a 为电弧电压；I 为焊接电流；r_q 为电流分布半径.

在工件表面的非熔池边界上，有

$$-k\left(\frac{\partial T}{\partial \boldsymbol{n}}\right)=a_c(T-T_0)+\varepsilon\sigma_b(T^4-T_a^4) \tag{10}$$

式中：$\boldsymbol{n}$ 为法线方向.

$$U=V=W=0 \tag{11}$$

2 数值模拟

基于上述模型，文中对 TIG 焊熔池进行了数学模拟，文中所采用的工件材料为低碳钢，其参数选自文献[6]. 其中焊接电流为 100 A，电弧电压为 16 V，焊接速度为 2 mm/s. 由于熔池尺寸较小，且受到工作站计算能力的限制，建立了 40 mm × 40 mm × 4 mm 的数学模型，应用 GAMBIT 软件对其进行网格划分，由于在焊接熔池部分存在较大的温度梯度和流体速度，故在此区域采用较密的网格，在远离此区域选用较稀疏的网格. 对计算区域所划分的网格如图 2 所示. 随后采用 FLUENT 软件对熔池模型进行初始化 $T=300$ K；$U=V=W=0$.

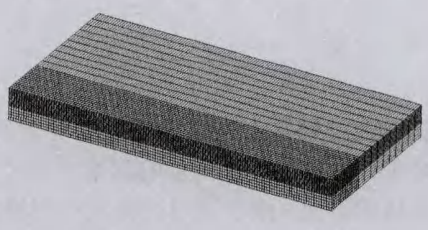


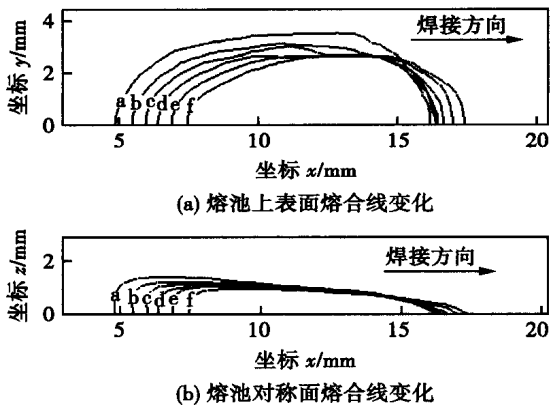
图 2 计算区域划分的网格

Fig. 2 Grid of computational domain

坐标原点距工件左侧边缘为 5 mm. 在焊接电流和电弧电压阶跃时，通过调整有效热源半径的大小，在焊接工件阶跃时，通过电磁力大小的变化对其进行数值求解，在求解过程中，时间步长为 0.001 s，模拟的实际焊接时间为 15.0 s.

3 试验结果与分析

为了研究焊接电流对焊接熔池的影响，对焊接电流由 120 A 跃变到 80 A 后 1 s 内熔池熔合线的变化情况进行了提取，如图 3 所示，图 3 坐标原点为图 1 坐标系中(5，0，0)点处，坐标系方向不变. 图 3 中从左到右每条曲线之间的时间间隔为 0.2 s，电流向下阶跃后，由于焊接熔池前端熔化金属的量小于熔池后端金属凝固的量，造成熔池尺寸是逐渐减小的，且在电流开始跃变时，熔池的变化幅度较大，如图 3 中 a，b 二条线，然后熔池形状的变化逐渐变缓，如图 3a 中 e，f 二条线，最后趋于宏观准稳态.



(a) 熔池上表面熔合线变化

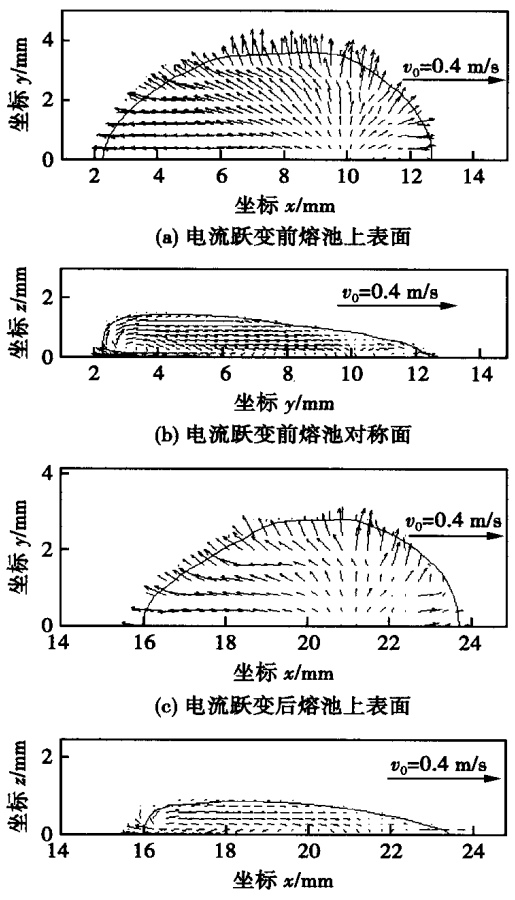
(b) 熔池对称面熔合线变化

图 3　电流阶跃后熔合线的变化

Fig. 3　Changes of fusion line under action of current step

为了能够更形象地描述熔池的变化情况,对焊接电流在跃变情况下的焊接熔池进行了数值分析.

图 4 为焊接电流由 120 A 跃变到 80 A 时熔深、熔宽及 A 点处(图 1)温度的变化曲线,在电流发生跃变之后,熔池的尺寸有一定的减小,这是由于电流减小之后,造成对工件的热输入降低,致使熔池尺寸降低. 且在焊接电流跃变后其数值均可达到稳定值,熔宽、熔深的尺寸分别可以由跃变之前的 6.8, 1.43 mm 变为 6.0,0.67 mm. 距离熔池中心 5 mm 处 A 点的温度值可以由约 1 200 K 过渡到约 1 050 K. 然而在焊接电流发生跃变后,熔深、熔宽及温度的变化并不是随着电流的突变而达到准稳态,而是有一定的滞后期. 可见焊接电流对焊接熔池产生的影响较大,通过调节焊接电流的大小,可以有效的调整熔池的尺寸. 为了进一步研究焊接电流的变化对熔池内部流场的影响,对焊接速度为 0.4 m/s 时电流跃变前后的流场进行了分析,如图 5 所示,坐标系选取见图 3. 在熔池上表面产生从熔池中心向外的流动,且速度逐渐增大,在熔合线附近达到最大值. 在熔池对称面上从熔池底部向熔池中心流动. 焊接电流减小之后导致熔池内部所受电磁力的降低,致使流速的减小,最终致使其对熔池的搅拌能力下降. 由于 TIG 焊的工艺参数还有很多,下面对电弧电压和焊接速度发生阶跃后的焊接熔池进行了数值分析. 当电弧电压由 16 V 跃变到 12 V 后,熔池内部的变化如图 6 所示,从图 6 中可以看出,随着电流的阶跃,熔深、熔宽和 A 点的温度都有一定程度的降低,且其变化都具有一定的滞后性,熔宽由 6.0 mm



(a) 电流跃变前熔池上表面

(b) 电流跃变前熔池对称面

(c) 电流跃变后熔池上表面

(d) 电流跃变后熔池对称面

图 5　电流阶跃前后熔池内部流场的变化情况

Fig. 5　Changes of flow under action of current step

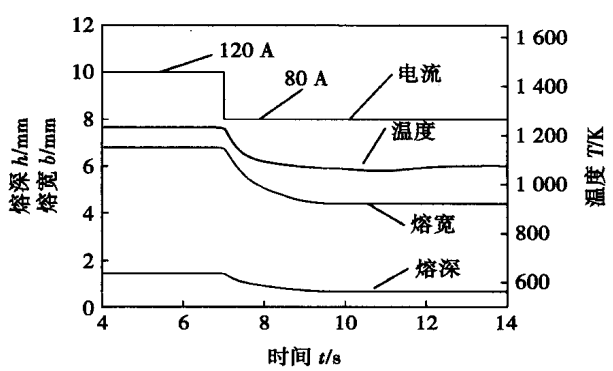


图 4　电流跃变时熔池参数的变化情况

Fig. 4　Changes of pool under action of current step

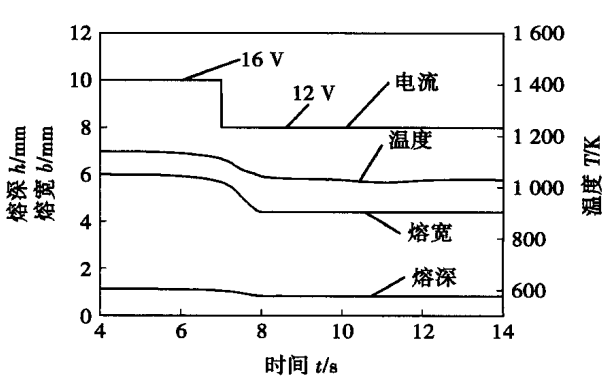


图 6　电压跃变时熔池的变化情况

Fig. 6　Changes of pool under action of voltage step

变化为 4.4 mm,熔深由 1.12 mm 变化为 0.82 mm,温度值由 1 140 K 变为 1 030 K.

当焊接速度由 2 mm/s 跃变到 1 mm/s 时,焊接熔深、熔宽及 A 点处温度的变化情况如图 7 所示,速度阶跃后,熔深、熔宽及 A 点处温度都有大幅度的增加,熔宽由 6.0 mm 变化为 6.8 mm,熔深由 1.12 mm 变化为 1.57 mm,温度值由 1 140 K 变为 1 430 K. 可见焊接速度的降低,电弧对焊接工件的热输入增大,致使提供给熔池的能量增多,熔池的尺寸增大,能够更有效地调整熔池的尺寸大小.

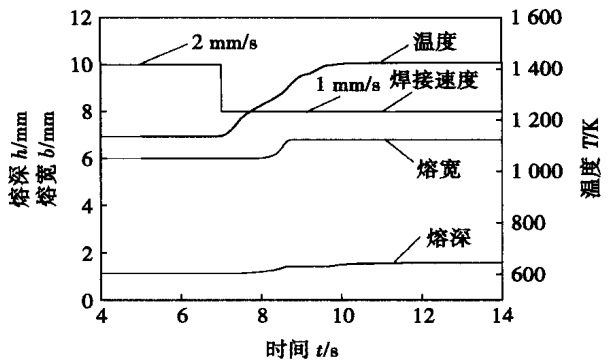


图 7 焊接速度跃变时熔池的变化情况

Fig. 7 Changes of pool under action of speed step

焊接工件尺寸具有多样性,焊接工件的变化对焊接过程会产生一定的影响. 图 8 为工件尺寸的厚度由 8 mm 跃变到 4 mm 时熔池的变化情况,从图 8 中可以看出,熔宽由 5.2 mm 变化为 6.0 mm,熔深由 1.1 mm 变化为 1.4 mm,温度由 1 030 K 变为 1 100 K. 可见由于板厚的变化致使工件的边界发生变化,工件内部的热传导及工件与周围环境的热交换产生变化,进一步影响了熔池尺寸的变化,但其变化幅度不是很大,尤其是温度的变化,仅升高了 30 K,这是由于其它焊接工艺参数不变,致使对工件的热输入变化不大,最终导致熔池尺寸及温度的变化不大. 当工件宽度由 40 mm 跃变到 20 mm 时,焊接熔深、熔宽及 A 点处温度的的变化情况如图 9 所示,从图 9 中可以看出,熔宽由 5.2 mm 变化为 6.0 mm,熔深由 1.3 mm 变化为 1.4 mm,温度由 1 100 K 变为 1 120 K. 这也是由于改变了工件内部的热传导及工件与周围环境的热交换引起的,从图 9 中可知,熔宽有一定程度的增加,但熔深及温度在板宽跃变前后的变化并不明显.

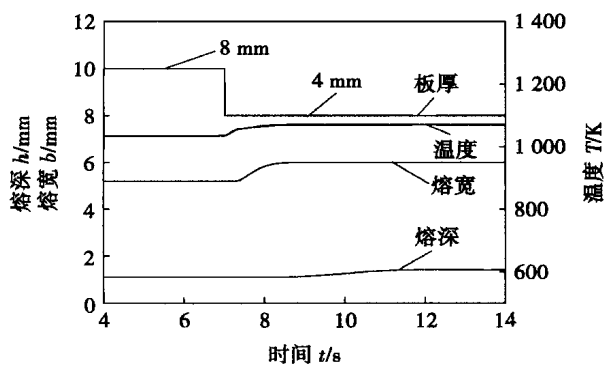


图 8 工件厚度跃变时熔池的变化情况

Fig. 8 Changes of pool under action of thickness step

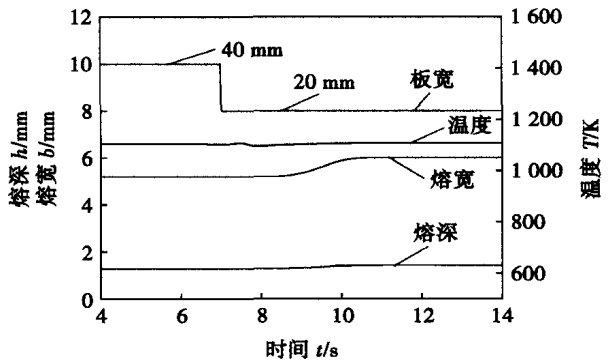


图 9 工件宽度跃变时熔池的变化情况

Fig. 9 Changes of pool under action of width step

通过以上分析,对不同焊接工艺参数阶跃前后焊接熔池的变化情况进行了分析,但分析过程中熔池表面始终考虑为平面,这与实际情况不符,在下一步分析过程中,应该考虑自由表面的变化情况.

4 结 论

(1) 在焊接工艺参数发生阶跃后,熔深、熔宽及温度场的变化具有一定的滞后性.

(2) 随着焊接大电流向小电流的阶跃,熔池的尺寸及内部的流速都有一定程度的减小.

(3) 工件的宽度、厚度对焊接熔池有一定程度的影响,通过调整焊接电流、电压、速度可实现对焊接尺寸的调节.

参考文献:

[1] Oreper G M, Szekely J. The effect of an externally imposed magnetic field on buoyancy driven flow in a rectangular cavity[J]. Journal of Crystal Growth, 1983, 64(3): 505 - 515.

[2] Hirata Y, Asai Y, Takenak K, *et al*. 3-D numerical model predicting penetration shape in GTA welding[J]. Materials Science Forum, 2003, 426/432: 4045 - 4050.

[下转第 28 页]

（2）材料热物理与力学参量中的屈服强度、热导率、比热容、弹性模量、线膨胀系数、密度以及泊松比共同影响着构件中的焊接残余应力水平，即焊接残余应力为上述几个因素的综合参量. 即焊接残余应力可表述为 $\sigma_x = f(R_{eL}, \lambda, c, E, \alpha, \rho, \nu)$.

参考文献：

[1] Ogawa K, Deng D, Kiyoshima S, *et al*. Investigations on welding residual stresses in penetration nozzles by means of 3D thermal elastic plastic FEM and experiment[J]. Computational Materials Science, 2009, 45(4): 1031 - 1042.

[2] 闫德俊, 刘雪松, 杨建国, 等. 有限元分析热物理参量对焊接残余应力峰值特征的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(6): 56 - 60.
Yan Dejun, Liu Xuesong, Yang Jianguo, *et al*. Effect of thermophysical parameters on the hump feature of welding residual stress by finite element analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(6): 56 - 60.

[3] 刘雪松, 闫德俊, 杨建国, 等. 有限元分析热力学参量对焊接残余应力峰值特征的影响[J]. 焊接学报, 2010, 31(7): 27 - 34.
Liu Xuesong, Yan Dejun, Yang Jianguo, *et al*. Effect of thermomechanical parameters on hump feature of welding residual stress by finite element analysis[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2010, 31(7): 27 - 34.

[4] 闫德俊. A7N01 铝合金焊接接头疲劳裂纹扩展特性[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2011.

[5] Lindgren L E. Finite element modeling and simulation of welding. part 2: improved material modeling[J]. Journal of Thermal Stresses, 2001, 24(3): 195 - 231.

[6] Preston R V, Shercliff H R, Withers P J, *et al*. Synchrotron X-ray measurement and finite element analysis of residual strain in tungsten inert gas welded aluminum alloy 2024[J]. Metallurgical and Materials Transactions A, 2006, 37(12): 3629 - 3637.

[7] Zhang Z L, Silvanus J, Li H K, *et al*. Sensitivity analysis of history dependent material mechanical models for numerical simulation of welding process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(5): 422 - 429.

[8] 张玉龙, 赵忠魁. 实用轻合金材料手册[M]. 北京: 化学工业出版社, 2006.

[9] 刘静安, 谢水生. 铝合金材料的应用于技术开发[M]. 北京: 冶金工业出版社, 2004.

[10] Kammer C. 铝手册[M]. 卢惠民, 译. 北京: 化学工业出版社, 2009.

作者简介： 闫德俊，男，1978 年出生，博士. 主要从事焊接结构力学与疲劳寿命评估. 发表论文 15 篇. Email: yandejun_2003@163.com

[上接第 20 页]

[3] 张瑞华, 尹 燕, 樊 丁. A-TIG 焊熔深增加机理的数值模拟[J]. 机械工程学报, 2008, 44(5): 175 - 180.
Zhang Ruihua, Yin Yan, Fan Ding. Numerical simulation of the mechanism for penetration increasing of A-TIG welding[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(5): 175 - 180.

[4] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 焊接电弧与活性组元对 TIG 焊熔池形貌影响的数值模拟[J]. 焊接学报, 2009, 30(11): 49 - 56.
Dong Wenchao, Lu Shanping, Li Dianzhong, *et al*. Numerical simulation of welding arc and surface-active element on weld shape in TIG welding[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2009, 30(11): 49 - 56.

[5] Zhao P C, Wu C S, Zhang Y M. Numerical simulation of the dynamic characteristics of weld pool geometry with step-changes of welding parameters[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12: 765 - 780.

[6] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008.

作者简介： 黄健康，男，1981 年出生，博士，讲师. 主要从事焊接过程智能控制及焊接物理方面的研究. 发表论文 20 余篇. Email: sr2810@163.com