

活性元素氧对 AA-TIG 焊熔池传输行为影响的数值模拟

樊 丁¹, 黄自成^{1,2}, 黄健康¹, 王新鑫³, 郝珍妮⁴, 黄 勇¹

(1. 兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050;

2. 安徽工程大学机电学院, 芜湖 241000; 3. 重庆理工大学 材料科学与工程学院, 重庆 400054;

4. 唐山开元焊接自动化技术研究所, 唐山 063020)

摘 要: 电弧辅助活性 TIG 焊(arc assisted activating TIG welding, AA-TIG 焊), 采用辅助电弧以 $\text{Ar} + \text{O}_2$ 作为保护气体预熔待焊母材表面以形成氧化层, 再进行常规 TIG 焊, 可使熔深明显增加. 文中结合 AA-TIG 焊熔池氧元素分布的实验研究, 提出焊接熔池表面氧元素的两种不均匀分布模式, 考虑浮力、电磁力和表面张力, 建立了更完善的电弧辅助活性 TIG 焊熔池模型, 模拟研究氧元素在熔池表面呈不均匀分布时, AA-TIG 焊瞬态熔池中动量及能量的传输行为. 假设熔池内部液态金属是湍流、不可压缩 Newton 流体, 使用 FLUENT RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行处理. 结果表明, 当氧在熔池上表面呈非均匀分布, 并且氧的不均匀分布模型为低氧模型时, 熔池内部仍然以内对流流动为主.

关键词: 不均匀分布; 氧; AA-TIG 焊; 传输行为; 数值模拟

中图分类号: TG 402 **文献标识码:** A **文章编号:** 0253-360X(2016)03-0062-05

0 序 言

为了克服钨极惰性气体保护焊(tungsten inert gas welding, TIG 焊)存在的焊缝熔深浅、焊接效率低等问题, 20 世纪 60 年代, 乌克兰巴顿焊接研究所开发了活性 TIG 焊方法^[1]. 此后, 引起了很多学者的关注. 项目组通过改变活性元素引入方式, 提出了电弧辅助活性 TIG 焊(arc assisted activating TIG welding, AA-TIG 焊)^[2,3].

对于活性剂增加熔深机理的研究表明: 铁系合金的熔池表面张力温度系数改变是其熔深增加的主要原因^[4-8], 有色金属轻合金则是由于电弧收缩所致^[9-11]. 不锈钢 AA-TIG 焊熔深增加的原因则属于前者. Sahoo 等^[12]基于热力学基本关系和吸附等温式, 给出的一个复杂的函数关系, 表面张力是温度和活度的二元函数. Sahoo 的函数关系式在众多的模拟研究中^[7,8,13,14]被采用, 获得了和实验一致的结果, 其实质是以焊缝中的活性元素含量代替焊接熔池表面的氧含量. Sahoo 等的研究也在活性焊实验研究中被采用, 以解释表面张力的变化^[6,15]. 而且这些研究中, 忽略了活性元素在熔池的中的不均匀

性产生的影响.

AA-TIG 焊时, 在主电弧高温作用下, 预熔母材表面形成的氧化层一部分分解进入电弧氛围, 另一部分则与熔池作用使熔池内氧含量增加. 电弧热分布的不均匀性使熔池表面温度梯度变化很不一致, 氧元素在熔池表面的分布也可能呈现不均匀性. 为此, 针对 AA-TIG, 测定了焊接熔池表面的氧含量及其分布^[3].

文中针对 SUS304 不锈钢分离电弧 AA-TIG 焊过程, 结合 AA-TIG 焊熔池氧元素分布的实验研究结果, 提出焊接熔池表面氧元素的两种不均匀分布模式, 建立三维瞬态移动热源下的熔池数学模型. 研究活性元素氧在熔池表面呈不均匀分布时, AA-TIG 焊瞬态熔池传输行为. 为进一步深入研究氧在活性焊中的作用机理提供依据, 并为 AA-TIG 焊的推广应用提供参考.

1 数学模型

1.1 基本假设

(1) 熔池内部液态金属为湍流、不可压缩 Newton 流体, 用 FLUENT RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型进行处理; (2) 熔池上表面是平面; (3) 不考虑熔池表面上方电弧力的影响; (4) 除表面张力温度梯度系数、热导率、粘度和换热系数外, 其余热物理常数与温度无关.

1.2 控制方程

根据上述基本假设,质量、动量和能量方程的通用控制方程为

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho v \Phi) = \nabla \cdot (\Gamma \nabla \Phi) + S \quad (1)$$

式中: ρ 为密度; t 为时间; Φ 为通用变量,可代表速度、温度等求解变量; v 为速度矢量; Γ 为广义扩散系数; S 为广义源项。当这几个参数取不同的对应变量,就可以得到相应的守恒方程。如表1所示。

表1 广义变量和方程的对应关系

Table 1 Corresponding relations between the general variables and conservation equations

控制方程	F	Γ	S
质量	1	0	0
动量	v	μ	(2)
能量	$T(H)$	k	(3)

表中 μ 为黏度, k 为热导率, T 为温度, H 为焓。动量源项(2)和能量源项(3)的详细叙述见文献[16]。

1.3 边界条件

图1为熔池计算模型和边界示意图,熔池上表面的热边界条件为

$$-k \frac{\partial T}{\partial z} = q_{\text{arc}} - h_c(T - T_a) - \varepsilon \sigma_b(T^4 - T_a^4) - \omega H_v \quad (2)$$

式中: h_c 为对流传热系数; T 为工件表面温度; T_a 为环境温度; ε 表面辐射系数; σ_b 为 Stefan-Boltzman 常数; ω 为蒸发率; H_v 为液-气相变潜热。式(2)右侧分别为来自电弧热量(q_{arc})、对流热损失、辐射散热和蒸发散热。熔池侧面和下表面上只有对流热损失和蒸发散热。对称面的热边界条件是温度梯度为零。来自电弧热量 q_{arc} 是采用的双椭圆热源模型,具体的公式见文献[16]。

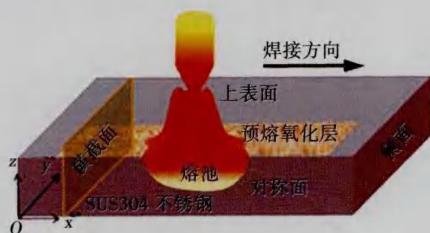


图1 熔池计算模型和边界示意图

Fig. 1 Computational model and boundaries for the weld pool

钢材蒸发率与温度的关系式为^[17]

$$\lg \omega = 2.52 + \lg p_{\text{atm}} - 0.5 \lg T \quad (3)$$

式中: p_{atm} 为环境压力,可表示为

$$\lg p_{\text{atm}} = 6.121 - \frac{18\,836}{T} \quad (4)$$

熔池上表面存在的表面张力是表面张力温度系数和表面张力浓度系数共同作用的函数,其沿熔池表面的变化与流体的切应力相平衡,具体表示如下

$$-\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial a_i} \left(\frac{\partial a_i}{\partial x} \right) \quad (5)$$

$$-\mu \frac{\partial v}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \left(\frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial \gamma}{\partial a_i} \left(\frac{\partial a_i}{\partial y} \right) \quad (6)$$

式中: μ 是粘度; $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 是金属材料的表面张力; $\frac{\partial \gamma}{\partial a_i}$ 是表面张力温度系数; $\frac{\partial \gamma}{\partial a_i}$ 是表面张力浓度系数; a_i 是活性元素氧的含量,表达式为

$$a_i = C_{i1}x + C_{i2}y + C_{i3} \quad (7)$$

式中: C_{i1} , C_{i2} 和 C_{i3} 是常数; x 和 y 是熔池上表面以热源中心为坐标原点的两方向坐标值。由于辅助电弧中的氩气和氧气混合比例的不同将导致焊缝表面氧含量的不同,所以在此以辅助电弧中的氩气和氧气的摩尔混合比例来作为区分。讨论 Ar-15.4% O_2 和 Ar-3.4% O_2 这两种不同混合比例情况下,熔池上表面氧含量呈不均匀分布时的模拟结果。

(1) Ar-15.4% O_2 时:根据 AA-TIG 焊熔池中氧元素俄歇电子能谱分析结果,进行半定量计算^[3],根据试验测得氧元素分布情况,文中建立了熔池上表面氧的呈非均匀分布模型:如图1所示,焊接起始点在 $x=0$ mm 处,假设在熔化区域内 $x=2$ mm 处,熔池表面的氧含量为 0.747 7%,在 $x \leq -2$ mm 处,熔池表面的氧含量为 0.1%,由此解得 $C_{11}=162$, $C_{12}=162$, $C_{13}=0.133\,8$ 根据实验测量前部多后部少的规律,则氧元素在熔池表面的分布满足下式:

$$a_1 = \begin{cases} 162x + 162y + 0.1338 & (x > -2 \text{ mm}) \\ 0.1 & (x \leq -2 \text{ mm}) \end{cases} \quad (8)$$

(2) Ar-3.4% O_2 时:根据 AA-TIG 焊熔池半定量计所得的氧的分布状况^[3],并结合课题组之前的研究^[18],提出假设为:在熔化区域内 $x=2$ mm 处,熔池表面的氧含量为 0.05%,在 $x \leq -2$ mm 处,熔池表面的氧含量为 0.005%,由此解得 $C_{21}=33$, $C_{22}=33$, $C_{23}=0.005$,根据实验测量前部多后部少的规律,则氧元素在熔池表面的分布满足下式

$$a_2 = \begin{cases} 33x + 33y + 0.005 & (x > -2 \text{ mm}) \\ 0.005 & (x \leq -2 \text{ mm}) \end{cases} \quad (9)$$

根据 Sahoo 等人^[12]的研究结果,可以进一步推导出表面张力温度系数和表面张力浓度系数的表达式分别为

表面张力温度系数 $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$ 为

$$\frac{\partial T}{\partial y} = -A - R\Gamma_s \ln(1 + K_{seg} a_i) - \frac{K_{seg} a_i}{(1 + K_{seg} a_i)} \frac{\Gamma_s (\Delta H^0)}{T} \quad (10)$$

表面张力浓度系数 $\frac{\partial \gamma}{\partial a_i}$ 为

$$\frac{\partial \gamma}{\partial a_i} = -\frac{RT\Gamma_s K_{seg}}{1 + K_{seg} a_i} \quad (11)$$

式中: A 是表面张力随温度的变化速率; R 是气体常数; T 是温度; Γ_s 是表面的过饱和度; ΔH^0 是吸收的标准热; k_1 是表面偏聚熵常数; K_{seg} 是吸收系数,表达式为

$$K_{seg} = k_1 \exp\left[\frac{-\Delta H^0}{RT}\right] \quad (12)$$

在熔池侧面和下表面上的速度边界条件为零速度. 对称面的边界条件为 y 项的速度梯度为零,其余方向是零速度.

1.4 源项处理

能量守恒方程的源项包括非稳态项和对流项引起的相变潜热变化. 动量守恒方程的源项包括 Darcy 项、熔池中的电磁力和浮力.

用 Enthalpy-Porosity 方法处理工件熔化凝固过程,用 Boussinesq 方法处理浮力驱动流,用 FLUENT RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型处理 AA-TIG 熔池中低雷诺数流动,通过 UDF 编程将电磁力作为动量源项加载到动量方程中.

电磁力的表达式^[16] 是:

$$F = J \times B \quad (13)$$

式中: J 为电流密度矢量; B 为磁通量矢量. 详细的表达式见文献^[16].

2 数值求解中涉及到的参数

计算材料是 SUS304 不锈钢,材料的其它热物参数和焊接参数如表 2 所示^[16],材料的对流换热系数 $a_c/[W/(m^2 \cdot K)]$ 、热导率 $\lambda/[W/(m \cdot K)]$ 和粘度 $\mu/[10^{-3} kg/(m \cdot s)]$ 的表达式见文献^[16].

3 计算结果与讨论

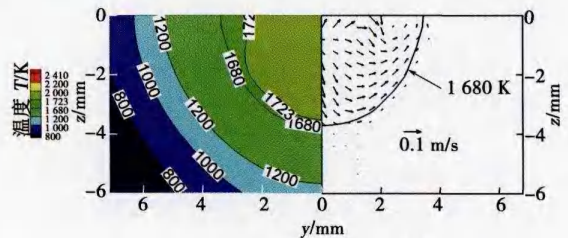
3.1 计算结果分析

图 2 所示的是活性元素氧在液态熔池表面不均匀分布且辅助电弧中混合气体为 Ar-3.4% O₂ 时,熔池 yOz 面和上表面的温度场和流场. 由图 2a 可以发现,除了一个起主导作用的大涡流使熔池形成内对

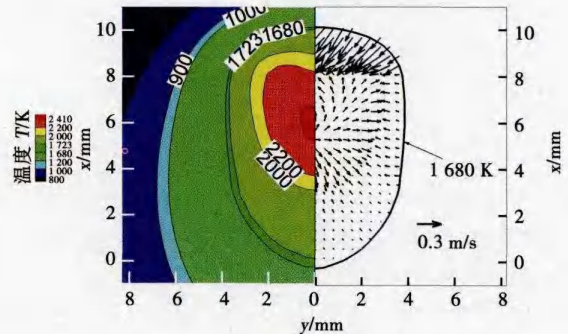
表 2 材料热物理性参数和焊接参数^[16]

Table 2 Thermal physical properties of material and welding condition

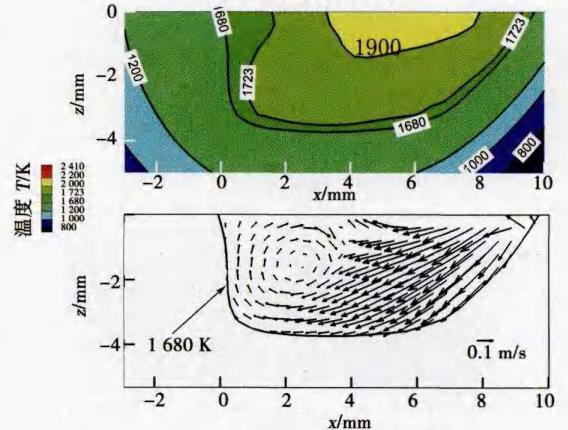
参数	数值
密度 $\rho/(kg \cdot m^{-3})$	7 200
液相线 T_l/K	1 723
固相线 T_s/K	1 680
环境温度 T_a/K	300
比热 $C_p/(kg \cdot K)$	753
Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma_b/(W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4})$	5.67×10^{-8}
热膨胀系数 β/K^{-1}	10^{-4}
熔化潜热 $Q_L/(J \cdot K^{-1})$	2.47×10^5
表面辐射系数 ε/K^{-1}	0.4
真空磁导率 $\mu_0/(H \cdot m^{-1})$	1.26×10^{-6}
蒸发相变潜热 $H_v/(J \cdot K^{-1})$	7.343×10^6
焊接电流 I/A	160
电弧电压 U/V	14
电弧热效率 $\eta(\%)$	70



(a) yOz 面温度场与速度场



(b) $z=0$ 面温度场和流场



(c) xOz 面温度场和速度场

图 2 Ar-3.4% O₂ 下 yOz 面 (a)、 $z=0$ 面 (b) 和 xOz 面 (c) 的温度场和速度场

Fig. 2 Temperature and velocity fields at yOz face (a), $z=0$ face (b) and xOz face (c) in Ar-3.4% O₂

流外,熔池上部还有两个流动形式相反的小涡流.由图2b可以观察到熔池前部金属液体聚集后向熔池中部流动,这两种流动在温度2 200 K左右的地方汇聚而后向熔池内部流动,和C. X. Zhao^[15]试验结果吻合良好.因此,熔池表面的复杂流动状态与熔池上表面氧的不均匀分布有密切的关系.图2c为熔池对称面即 xOz 面上的温度场和流场,熔池内部为大的涡流流动.

图3所示的是活性元素氧在液态熔池表面不均匀分布且辅助电弧中混合气体为Ar-15.4% O_2 时,熔池 yOz 面和 $z=0$ 面的温度场和流场.由图4a可知,熔池内部有两个涡流,小涡流存在于熔池边缘,

大涡流为向内流动,整体的向内流动向熔池底部冲击,促进热量传输给母材,从而加速该区域的溶解,大大增加了焊接熔深.由图3b可知,当氧以较高含量非均匀分布于熔池表面时,熔池的流动方式趋于向内流动.图3c与图2c对比可知,熔池前部的流动更加利于热量向基材传输,因而熔深更大.

对比图2和图3可知,在一定的范围内,随着熔池上表面不均匀分布的氧的含量整体增加时,熔池上表面的流动状态由复杂的涡流流动变成了单一的向中心流动,熔深有所增加.活性元素氧的含量及不均匀分布状态直接影响了熔池的传输行为,改变熔池上表面的流动模式.

3.2 模拟结果和试验结果的比较

图4是熔池形貌在焊接时间为5 s时,试验结果和模拟结果对比示意图.由此可以看出,模拟结果和试验结果较为吻合.

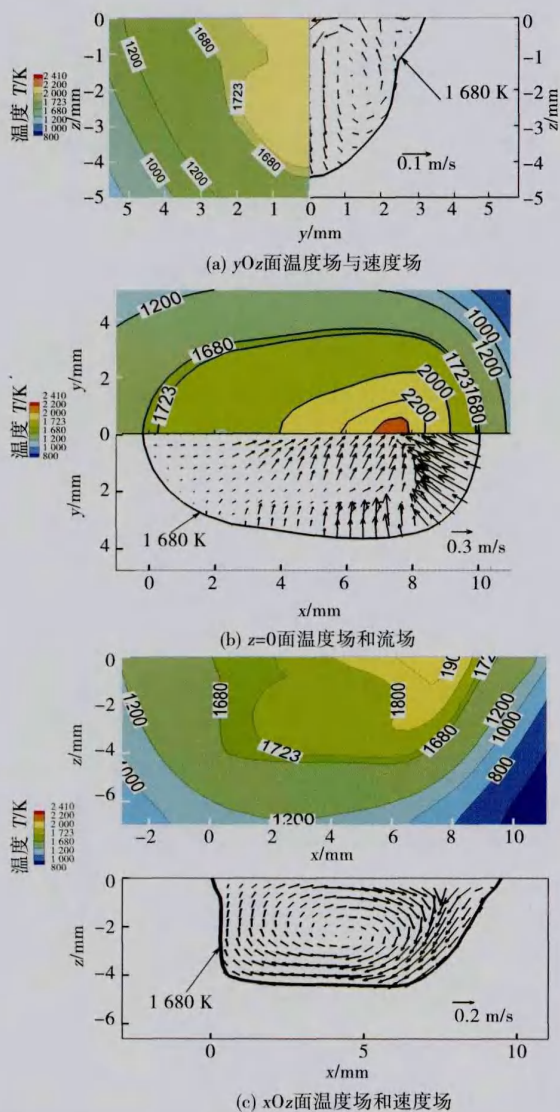


图3 Ar-15.4% O_2 下 yOz 面 (a)、 $z=0$ 面 (b) 和 xOz 面 (c) 的温度场和速度

Fig. 3 Temperature and velocity fields at yOz face (a), $z=0$ face (b) and xOz face (c) in Ar-15.4% O_2

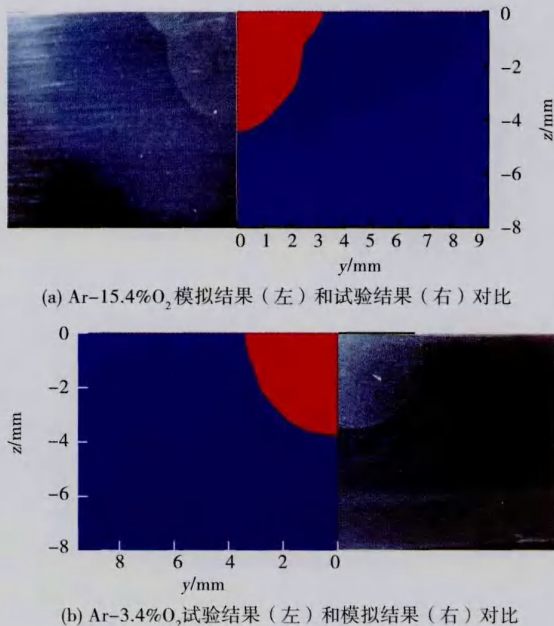


图4 AA-TIG 焊试 Ar-15.4% O_2 (a) 和 Ar-3.4% O_2 (b) 熔池形貌的试验结果和模拟结果对比

Fig. 4 Comparison between calculated and experimental AA-TIG weld shape for Model Ar-15.4% O_2 (a) and model Ar-3.4% O_2 (b)

4 结 论

(1) 基于试验结果和课题组之前的研究成果,提出了氧的两种不均匀分布模型.

(2) 使用 FLUENT RNG $k-\varepsilon$ 湍流模型对 AA-TIG 熔池模型进行数值计算,考虑了表面张力是

表面张力温度梯度和表面张力浓度梯度共同作用的函数。求解得出了熔池上表面的复杂流动及熔池的温度场和速度场。

(3) 当氧在熔池上表面呈非均匀分布,并且氧的不均匀分布模型为低氧模型时,熔池内部仍然以内对流流动为主,熔深较深,熔池上表面的流动方式复杂。

参考文献:

- [1] Gurevich S M, Zamkov V N, Kushmienko N A. Increase in the efficiency of penetration of titanium alloys in argon-arc welding [J]. *Avtomaticheskaya Svarka*. 1965(9): 1-4.
- [2] 樊 丁, 林 涛, 黄 勇, 等. 电弧辅助活性 TIG 焊接法 [J]. *焊接学报*, 2008, 29(12): 1-4.
Fan Ding, Lin Tao, Huang Yong, *et al.* Arc assisted activating TIG welding process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2008, 29(12): 1-4.
- [3] 康再祥. 不锈钢分离电弧 AA-TIG 焊氧元素过渡行为研究 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2012.
- [4] Heiple C R, Roper J R, Stagner R T, *et al.* Surface Active Element Effects on the Shape of GTA, Laser, and Electron Beam Welds [J]. *Weld J*, 1983, 62: 72.
- [5] Pollard B. The effect of minor elements on the welding characteristics of stainless steel [J]. *Weld J*, 1988, 67: 202.
- [6] Fujii H, Sato T, Lu S, Nogi K. Development of an advanced A-TIG (AA-TIG) welding method by control of Marangoni convection [J]. *Mater Sci Eng A*, 2008, 495: 296-303.
- [7] Zhang R H, Fan D. Numerical simulation of effects of activating flux on flow patterns and weld penetration in A-TIG welding [J]. *Sci Technol Weld Join*, 2007, 12: 15.
- [8] 董文超, 陆善平, 李殿中, 等. 微量活性组元氧对焊接熔池 Marangoni 对流和熔池形貌影响的数值模拟 [J]. *金属学报*, 2008, 44(2): 249-256.
- [9] Dong Wenchao, Lu Shanpin, Li Dianzhong, *et al.* Numerical simulation of effects of the minor active-element oxygen on the marangoni convection and the weld shape [J]. *Acta Metallurgica Sinica*, 2008, 44(2): 249-256.
- [10] Marya M, Edwards G R. Chloride contributions in flux-assisted GTA welding of magnesium alloys [J]. *Weld J*, 2002, 81: 291.
- [11] Huang Y, Fan D, Shao F. Alternative current flux zoned tungsten inert gas welding process for aluminium alloys [J]. *Sci Technol Weld Join*, 2012, 17: 122.
- [12] Simonik A G. Effect of halides on penetration in argon2arc welding of titanium alloys [J]. *Svarchnoye Proizvodstvo*, 1974, 21: 81.
- [13] Sahoo P, Debroy T, Mcnallan M J. Surface Tension of Binary Metal-Surface Active Solute Systems under Conditions Relevant to Welding Metallurgy. *Metall. Trans*, 1988, 19B(6): 483-491.
- [14] Zhao Y, Shi Y, Lei Y. The study of surface-active element oxygen on flow patterns and penetration in A-TIG welding [J]. *Metall. Trans. B*, 2006, 37B: 485.
- [15] Wang Y, Shi Q, Tsai H L. Modeling of the effects of surface-active elements on flow patterns and weld penetration [J]. *Metall Mater Trans B*, 2001, 32B: 145.
- [16] Zhao C X, vanSteijn V, Richardson I M, *et al.* Unsteady interfacial phenomena during inward weld pool flow with an active surface oxide [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2009, 14(2): 132-140.
- [17] 武传松. 焊接热过程与熔池形态 [M]. 北京: 机械工程出版社, 2008.
- [18] Zacharia T, David S A, Vitek J M. *Metall Trans*, 1991, 22B: 233.
- [19] 郝珍妮. AA-TIG 焊三维熔池行为的数值分析 [D]. 兰州: 兰州理工大学, 2013.

作者简介: 樊 丁,男,1961 年出生,教授,博士研究生导师. 主要从事焊接物理、焊接智能控制以及激光加工等方面的研究. 发表论文 200 余篇. Email: fand@lut.cn