

# 考虑自由表面的定点 A-TIG 焊数值分析

盛文文, 樊丁, 黄健康, 黄琳\*

(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)

**摘要:** 根据流体力学基本原理, 并用 VOF 方法追踪自由表面, 建立了更接近实际情况的三维定点 A-TIG 焊熔池数学模型, 综合考虑了熔池液态金属所受的浮力、电磁力、电弧压力和表面张力, 同时考虑了熔池内液态金属的对流、辐射和热传导, 运用 FLOW-3D 软件求解得到了定点 A-TIG 焊熔池自由表面、温度场及流场, 并重点分析了有、无活性剂时熔池自由表面的变化情况。结果表明, 不使用活性剂时, 熔池自由表面呈中心下凹、两边凸起的形状; 使用活性剂时, 表面张力温度系数由负变正, 使熔池自由表面呈中心凸起、两边下凹的形状; 在焊接电流  $I \leq 150$  A 的条件下, 有、无活性剂时考虑自由表面变形情况下温度场、流场及熔池形貌的数值模拟结果与试验结果和不考虑自由表面变形时现有的数值模拟结果基本一致。

**关键词:** 熔池; 自由表面; 流场; 表面张力温度系数

中图分类号: TG 402 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2016)01-0041-05

## 0 序言

近年来, A-TIG 焊由于具有增加焊接熔深、提高焊接效率的优点, 引起了国内外研究者的广泛关注。目前, 对 A-TIG 焊的研究主要集中在活性剂的研制和焊接熔深增加的机理上, 张瑞华等人<sup>[1]</sup>针对低碳钢、不锈钢研制了活性焊剂, 实现了在等热量输入条件下焊缝熔深增加 2~3 倍。刘凤尧等人<sup>[2]</sup>针对不锈钢、钛合金制备了活性焊剂, 并从焊缝表面张力、电弧形态入手分析了 A-TIG 焊接熔深增加机理。魏艳红等人<sup>[3]</sup>通过相同焊接参数下 TIG 与 A-TIG 焊接温度场、流场及焊缝形貌的对比, 研究了 A-TIG 焊接熔深增加机理。但是, 人们对 A-TIG 焊接熔池自由表面的研究很少, 武传松等人<sup>[4]</sup>研究发现, 在电弧压力、熔池表面张力及熔池本身重力的作用下, 熔池自由表面会产生变形, 这种变形对熔池形貌有重要的影响。因此, 对 A-TIG 焊熔池自由表面变形及其影响的研究显得非常重要, 特别是 A-TIG 焊熔池自由表面的研究对进一步研究 A-TIG 焊接熔池行为有着重要意义。

文中采用 VOF 方法追踪自由表面, 建立了三维定点 A-TIG 焊熔池数学模型, 利用 FLOW-3D 软件求解得到了有、无活性剂时熔池的自由表面、温度场及流场, 分析了 A-TIG 焊接过程中引起熔池自由表面

变形的主要原因, 更加真实地描述了有、无活性剂时熔池的温度场、流场分布及熔池形貌。

## 1 数学模型

### 1.1 基本假设

根据 A-TIG 焊接过程的实际情况, 为简化计算, 做出假设:(1) 熔池内液态金属是粘性不可压缩的牛顿流体, 其流动方式为层流;(2) 热导率、粘度为随温度变化的函数;(3) 来源于电弧的热流密度分布和压力分布呈轴对称的 Gaussian 分布。

### 1.2 控制方程

#### (1) 连续性方程

$$V_F \frac{\partial p}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x}(\rho u A_x) + \frac{\partial}{\partial y}(\rho v A_y) + \frac{\partial}{\partial z}(\rho w A_z) = R_{SOR} \quad (1)$$

#### (2) 动量方程

$$\begin{aligned} \frac{\partial u}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial u}{\partial x} + v A_y \frac{\partial u}{\partial y} + w A_z \frac{\partial u}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial x} + G_x + f_x - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (u - u_w - u_s) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial v}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial v}{\partial x} + v A_y \frac{\partial v}{\partial y} + w A_z \frac{\partial v}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial y} + G_y + f_y - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (v - v_w - v_s) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial w}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left( u A_x \frac{\partial w}{\partial x} + v A_y \frac{\partial w}{\partial y} + w A_z \frac{\partial w}{\partial z} \right) = \\ - \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} + G_z + f_z - \frac{R_{SOR}}{\rho V_F} (w - w_w - w_s) \end{aligned} \quad (4)$$

收稿日期: 2015-01-23

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51205179)

\* 参加此项研究工作的还有黄勇

## (3) 能量方程

$$V_F \frac{\partial}{\partial t} (\rho E) + \frac{\partial}{\partial x} (\rho Eu A_x) + \frac{\partial}{\partial y} (\rho Ev A_y) + \frac{\partial}{\partial z} (\rho Ew A_z) = -p \left( \frac{\partial u A_x}{\partial x} + \frac{\partial v A_y}{\partial y} + \frac{\partial w A_z}{\partial z} \right) + I_{\text{SOR}} \quad (5)$$

式中: $V_F$  为流体总体积分数; $\rho$  为流体密度; $p$  为流体单位体积所受压力; $u, v, w$  分别表示流体在  $x, y, z$  方向的速度; $A_x, A_y, A_z$  分别表示在垂直于  $x, y, z$  面上流体所占的面积分数; $G_x, G_y, G_z$  为流体在  $x, y, z$  方向的重力加速度; $f_x, f_y, f_z$  为流体在  $x, y, z$  方向的粘滞力; $u_s, v_s, w_s$  为流体在  $x, y, z$  方向的速度源项; $u_w, v_w, w_w$  为表面流体在  $x, y, z$  方向的速度; $R_{\text{SOR}}$  为质量源项; $I_{\text{SOR}}$  为能量源项; $E$  为流体的宏观内能, 满足以下关系式, 即

$$E = CT + (1 - f_s) h_l \quad (6)$$

式中: $C$  为流体的比热容; $f_s$  为固相体积分数; $h_l$  为熔化/凝固潜热; $T$  为温度.

采用流体体积(VOF)方法来追踪熔池自由表面, 并且引入流体体积分数  $F(x, y, z, t)$  表示单位容积内流体所占的比例, 满足下式, 即

$$\frac{\partial F}{\partial t} + \frac{1}{V_F} \left[ \frac{\partial}{\partial x} (FA_x u) + \frac{\partial}{\partial y} (FA_y v) + \frac{\partial}{\partial z} (FA_z w) \right] = F_{\text{SOR}} \quad (7)$$

式中: $F$  为单位容积内流体所占的体积分数; $F_{\text{SOR}}$  为流体总体积分数随时间的变化率.

熔池中的浮力驱动流采用 Boussinesq 模型, 浮力和电磁力满足

$$f_b = -\beta g (T - T_0) \quad (8)$$

$$f_L = \mathbf{J} \times \mathbf{B} \quad (9)$$

式中: $f_b$  为浮力; $f_L$  为电磁力; $\beta$  为热膨胀系数; $T_0$  为室温; $\mathbf{J}$  为电流密度矢量; $\mathbf{B}$  为磁通量矢量.

## 1.3 初始条件和边界条件

## 1.3.1 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  $u = v = w = 0$ .

## 1.3.2 边界条件

## (1) 上表面边界条件

工件上表面热流密度分布

$$q_1 = \frac{3\eta UI}{\pi r^2} \exp\left(-\frac{3(x^2 + y^2)}{r^2}\right) - h_c(T - T_0) - \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (10)$$

式中: $q_1$  工件上表面热流密度; $\eta$  为电弧热效率; $U$  为电弧电压; $I$  为焊接电流; $r$  为电流密度有效半径; $h_c$  为对流换热系数; $\sigma$  为玻尔兹曼常数; $\varepsilon$  为表面辐射系数.

工件上表面压力分布为

$$p_1 = p_{\max} \exp\left(-\frac{x^2 + y^2}{2r^2}\right) + \gamma\kappa \quad (11)$$

式中: $p_1$  为自由表面总压力; $p_{\max}$  为最大电弧压力; $r$  为电弧压力分布半径; $\gamma$  为表面张力; $\kappa$  为表面曲率, 表示为

$$\kappa = -\left[\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|}\right)\right] = \frac{1}{|\mathbf{n}|} \left[ \left( \frac{\mathbf{n}}{|\mathbf{n}|} \cdot \nabla \right) |\mathbf{n}| - (\nabla \cdot \mathbf{n}) \right] \quad (12)$$

式中: $\mathbf{n}$  为自由表面法向向量, 表示为式(7)中体积分数  $F(x, y, z, t)$  的梯度, 即

$$\mathbf{n} = \nabla F \quad (13)$$

## (2) 下表面边界条件

工件下表面热边界条件

$$q_2 = -h_c(T - T_0) - \sigma\varepsilon(T^4 - T_0^4) \quad (14)$$

式中: $q_2$  工件下表面热分布; $h_c$  为对流换热系数; $\sigma$  为玻尔兹曼常数.

工件下表面所受压力  $p_2$  为空气压力, 即

$$p_2 = 101.325 \text{ kPa} \quad (15)$$

## (3) 其它表面边界条件

为了减小区域边界对整个计算结果的影响, 工件其它表面采用连续性(C)边界, 如图 1 所示, 在该连续性边界条件下, 流体的速度、压力、温度等在边界处不变.

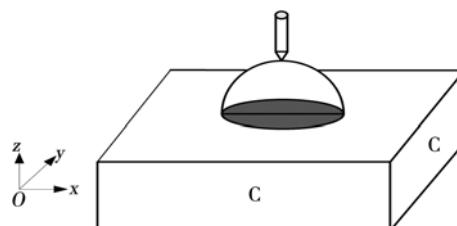


图 1 三维定点 A-TIG 连续性边界条件示意图

Fig. 1 Schematic of 3D fixed-point TIG welding continuous boundary

## 2 网格和参数

几何模型及网格划分如图 2 所示, 在电弧中心附近的网格较密, 远离电弧区域的网格相对较粗, 计算域大小为  $20 \text{ mm} \times 20 \text{ mm} \times 6 \text{ mm}$ , 除上、下表面之外, 计算域其它表面由于采用了连续性边界条件, 该边界条件保证了较小的计算区域对计算结果无太大的影响.

模拟所用材料为低碳钢, 其热导率和粘度参照文献[5], 表示为随温度变化的函数, 涉及到的材料热物理参数如表 1 所示<sup>[6]</sup>. 分析所用的焊接工艺参数如表 2 所示<sup>[2]</sup>.

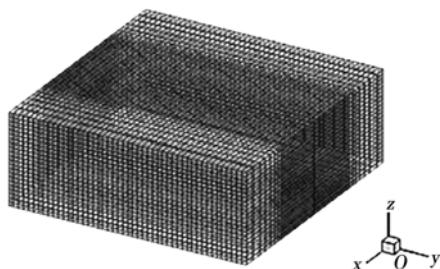


图 2 网格划分  
Fig. 2 Mesh model

### 3 结果与分析

#### 3.1 不使用活性剂条件下的熔池行为

不使用活性剂时,熔池大部分区域表面张力温度系数为负,图 3 为不同负表面张力温度系数下的熔池自由表面变化情况,其中表面张力温度系数的选取参照文献[7]. 从图 3 中可以看出,在负的表面张力温度系数下,熔池自由表面呈两边凸起、中间下凹的形状.

表 1 材料热物理参数

Table 1 Material thermal physical parameters

密度 $\rho$ / (kg·m <sup>-3</sup> )	液相线温度 $T_l$ /K	固相线温度 $T_s$ /K	环境温度 $T_0$ /K	固相比热 $C_s$ / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	液相比热 $C_l$ / (J·kg <sup>-1</sup> ·K <sup>-1</sup> )	Stefan-Boltzmann 常数 $\sigma$ / (10 <sup>-8</sup> W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-4</sup> )	热膨胀系数 $\beta/10^{-5}$ K <sup>-1</sup>	潜热 $Q_L$ / (10 <sup>5</sup> J·kg <sup>-1</sup> )	辐射系数 $\varepsilon/K^{-1}$	表面热系数 $h_c$ / (W·m <sup>-2</sup> ·K <sup>-1</sup> )	对流换热系数 $h_a$ / (10 <sup>-6</sup> H·m <sup>-1</sup> )	真空磁导率 $\mu_0$ /
7 200	1 800	1 750	300	700	780	5.67	4.95	2.47	0.4	100	1.26	

表 2 焊接工艺参数  
Table 2 Welding parameters

电弧电压 $U/V$	焊接电流 $I/A$	焊接热效率 $\eta$	高斯热流分布半径 $r/mm$
20	150	0.65	4

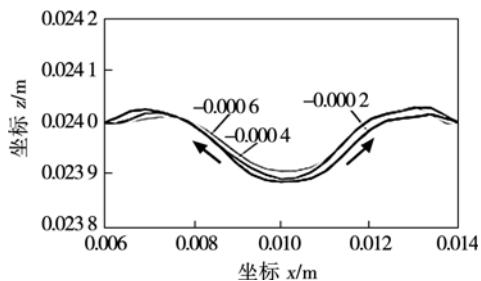


图 3 不同负表面张力温度系数作用下熔池自由表面变化  
Fig. 3 Molten pool's free surface under different negative surface tension temperature coefficients

凹的形状.

图 4 为不同负表面张力温度系数下的熔池自由表面变形量,从图 4 可以看出,在负的表面张力温度系数下,随着表面张力温度系数的增大,自由表面上凸量减小,而自由表面下凹量增大,且下凹量大于上凸量.

不使用活性剂时,根据文献[4]的分析,电弧压力是引起熔池自由表面中心下凹、两边凸起的主要原因,在电弧压力的作用下,熔池中处于电弧正下方区域的液态金属被挤向熔池周围,形成如图 5 所示的流向,液态金属由熔池中心流向边缘,从而使熔池自由表面呈中心下凹、两边凸起的形状. 从图 5 可

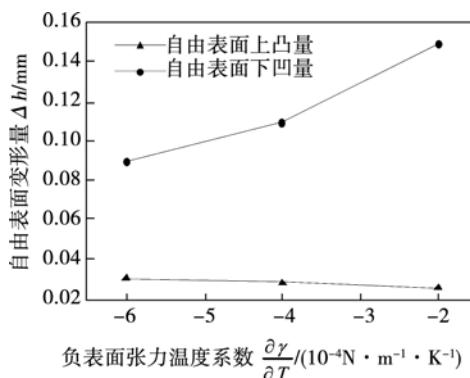


图 4 自由表面变形量随负表面张力温度系数的变化曲线  
Fig. 4 Free surface deformation varies with negative surface tension temperature coefficients

以看出,液态金属由熔池中心流向边缘,然后沿熔合线流向熔池底部,再由底部沿中心线流向熔池表面,形成宽而浅的熔池形貌.

#### 3.2 使用活性剂条件下的熔池行为

使用活性剂时,熔池大部分区域表面张力温度系数为正,图 6 为不同正表面张力温度系数下的自由表面变化情况,其中表面张力温度系数的选取参照文献[7]. 从图 6 中可以看出,在正的表面张力温度系数下,熔池自由表面呈中间凸起、两边下凹的形状. 图 7 为不同正表面张力温度系数下的自由表面变形量,从图 7 可以看出,在正表面张力温度系数下,随着表面张力温度系数的增大,自由表面上凸量增大,而自由表面下凹量减小,且自由表面上凸量大于下凹量.

由图 6,图 7 可知,使用活性剂时,由于表面张力温度系数由负变正,使熔池中液态金属的流向发

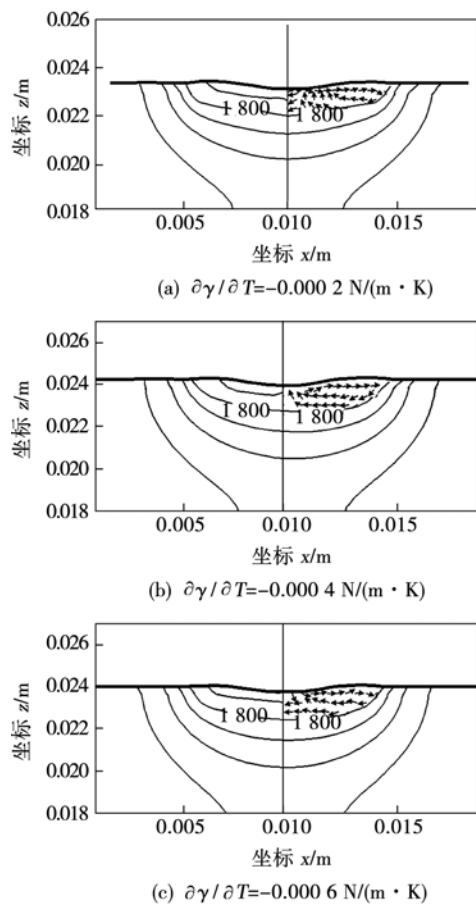


图5 不同负表面张力温度系数作用下熔池温度场和流场  
Fig. 5 Molten pool temperature and flow field under different negative surface tension temperature coefficient

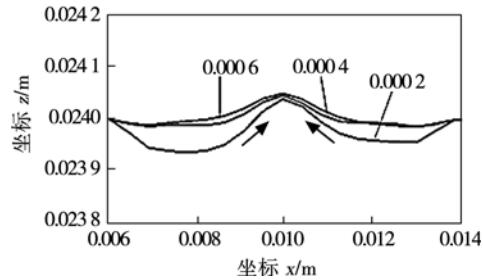


图6 不同正表面张力温度系数作用下的熔池自由表面变化  
Fig. 6 Molten pool's free surface under different positive surface tension temperature coefficients

生改变,形成如图8所示的流向,液态金属由熔池边缘流向熔池中心,使熔池周围的液态金属向熔池中心堆积,最终使熔池自由表面形成中心凸起、两边下凹的形状。因此,使用活性剂时,表面张力温度系数由负变正是引起熔池自由表面中心凸起、两边下凹的主要原因。由图8可知,由于液态金属形成向内的涡流,把电弧热能带入了熔池底部,加速了熔池底部金属的熔化,使熔深急剧增加,最终形成窄而深的熔池形貌。

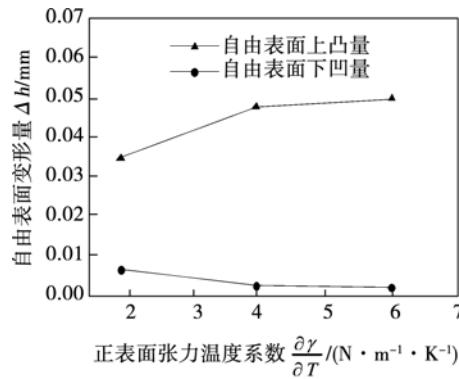


图7 自由表面变形量随正表面张力温度系数的变化曲线  
Fig. 7 Free surface deformation varies with positive surface tension temperature coefficient

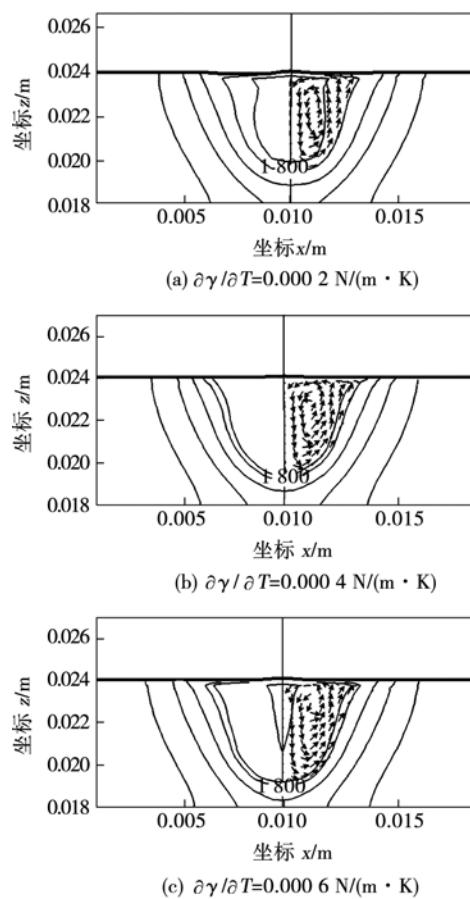


图8 不同正表面张力温度系数作用下的熔池温度场和流场  
Fig. 8 Molten pool temperature and flow field under different positive surface tension temperature coefficients

为了验证考虑自由表面变形情况下数值模拟结果的正确性,进行了有、无活性剂时定点A-TIG焊接试验,得到如图9,图10不使用活性剂和使用活性剂时试验与计算的比较结果,由图9,图10可知,计算结果与试验结果吻合良好。说明考虑自由表面变形情况下的数值模拟结果是正确的。

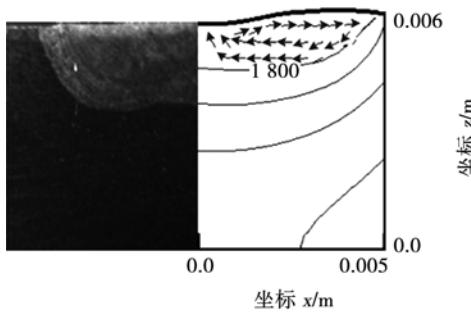


图9 无活性剂时试验结果与计算结果对比

Fig. 9 Comparison between experimented and simulated results without active flux

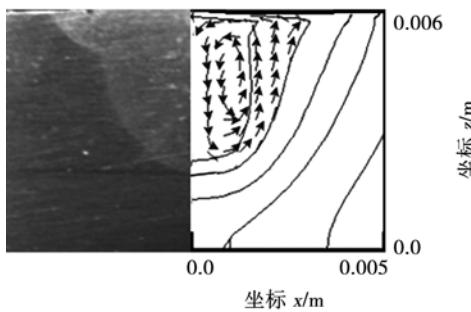


图10 有活性剂时试验结果与计算结果对比

Fig. 10 Comparison between experimented and simulated results with active flux

## 4 结 论

(1) 不使用活性剂时,熔池自由表面呈中心下凹,两边凸起的形状,且随着表面张力温度系数的增大,自由表面上凸量减小,而自由表面下凹量增大。

(2) 使用活性剂时,表面张力温度系数由负变正,引起熔池中液态金属由熔池边缘流向熔池中心,最终使熔池自由表面呈中心凸起,两边下凹的形状,且随着表面张力温度系数的增大,自由表面上凸量增大,而自由表面下凹量减小。

(3) 在焊接电流  $I \leq 150$  A 的条件下,有、无活

性剂时考虑自由表面变形情况下温度场、流场及熔池形貌的数值模拟结果与试验结果和不考虑自由表面变形时现有的数值模拟结果基本一致。

## 参考文献:

- [1] 张瑞华,樊丁,余淑荣.低碳钢 A-TIG 焊的活性剂研制[J].焊接学报,2003,24(2):16-18.  
Zhang Ruihua, Fan Ding, Yu Shurong. Study activating flux for mild steel [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2003, 24(2): 16 - 18.
- [2] 刘凤尧,林三宝,杨春利,等.活性化 TIG 焊中活性剂和焊接参数对焊缝深宽比的影响[J].焊接学报,2002,23(2):6-8.  
Liu Fengyao, Lin Sanbao, Yang Chunli, et al. The influence of active agent and welding parameters on welding depth/width ratio in A-TIG [J]. Transactions of the China Welding Institution, 2002, 23(2): 6 - 8.
- [3] 魏艳红,徐艳利,孙燕洁,等.A-TIG 焊接熔深增加机理[J].焊接学报,2009,30(2):37-39.  
Wei Yanhong, Xu Yanli, Sun Yanjie, et al. Mechanism of increasing welding penetration with A-TIG welding[J]. Transactions of the Welding China Institution, 2009, 30(2): 37 - 39.
- [4] 曹振宁,武传松,吴林.TIG 焊接熔池表面变形对流场与热场的影响[J].金属科学与工艺,1992,11(4):108-113.  
Cao Zhenming, Wu Chuansong, Wu Lin. Effect of surface deformation on fluid flow and heat transfer in TIG weld pool [J]. Metal Science and Technology, 1992, 11(4): 108 - 113.
- [5] Toulokian Y S. Thermal physical properties of matter[M]. New York: Plenum Press, 1970.
- [6] Rao Z H, Zhou J, Liao S M, et al. Three-dimensional modeling of transport phenomena and their effect on the formation of ripples in gas metal arc welding[J]. Journal of Applied Physics, 2010, 107(5): 1 - 14.
- [7] 王新鑫.电弧辅助活性焊电弧熔池耦合行为研究[D].兰州:兰州理工大学, 2014.

**作者简介:** 盛文文,女,1990年出生,硕士研究生。主要从事焊接物理方面的研究。Email: shengw59@163.com

**通讯作者:** 樊丁,男,教授,博士研究生导师。Email: fand@lut.cn