文章编号：1673-5196(2014)05-0014-05

# 定点TIG焊熔池自由表面演化行为

樊 丁[1]，黄 琳[2]，黄健康[2]，石 玗[1]

(1. 兰州理工大学 甘肃省有色金属新材料重点实验室，甘肃 兰州 730050；2. 兰州理工大学 有色金属合金及加工教育部重点实验室，甘肃 兰州 730050)

**摘要**：针对传统定点TIG焊，根据流体力学基本原理，通过加载高斯热源模型并用VOF方法追踪自由表面，建立更接近实际情况的三维定点TIG焊熔池模型.考虑熔池所受的电弧压力、电磁力、浮力及Marangoni剪切力的影响以及相变潜热，运用FLOW3D软件及其二次开发功能，求解得到定点TIG焊熔池的流场、温度场及自由表面，并重点分析熔池自由表面随时间的演化过程.结果表明：TIG焊熔池会产生自由表面变形，随着焊接时间的延长，TIG焊熔池熔深和熔宽均有所增加，形成宽而浅的熔池形貌，同时熔池表面的凹凸变形愈加明显.

**关键词**：演化行为；熔池；自由表面；数值分析

**中图分类号**：TG401 **文献标识码**：A

# Evolution behavior of pool free surface of fixed-point TIG welding

FAN Ding[1], HUANG Lin[2], HUANG Jian-kang[2], SHI Yu[1]

(1. State Key Laboratory of Gansu Advanced Nonferrous Metal Materials, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China; 2. Key Laboratory of Nonferrous Metal Alloys, The Ministry of education, Lanzhou Univ. of Tech., Lanzhou 730050, China)

**Abstract**: Aimed at the traditional fixed-point TIG welding and based on the basic principles of fluid dynamics, a more practical three-dimensional fixed-point TIG weld pool model was established by means of adding Gaussian heat source model and VOF method for tracing pool free surface. By taking account of the influence of arc force, electromagnetic force, buoyant force, and Marangoni shear stress, as well as the latent heat, the temperature and velocity fields and free surface of fixed-point TIG weld pool were calculated and obtained by using software FLOW3D and its secondary development function. And the evolution process of the free surface with time was emphatically analyzed. The result showed that the TIG weld pool would generate deformation of its free surface, with the progress of welding time, both the depth and width of TIG weld pool would increase, forming a wide and shallow pool appearance. Meanwhile, the concave and convex deformation of free surface of weld pool was even obvious.

**Key words**: evolution behavior; weld pool; free surface; numerical analysis

TIG焊是工业生产中应用最为广泛的焊接方法之一，具有焊接质量好、焊件焊后变形小、成形美观、易实现全位置自动化焊接等优点[1].由于其涉及到电弧物理、传热、冶金和力学等诸多方面的复杂过程，受目前实验条件的限制，通过实验手段来观察焊接熔池是非常困难的，因此采用数值模拟技术对焊接熔池进行定量的研究已成为焊接学科的重要技术手段[2].

美国麻省理工学院的Oreper和Szekeley[3]首先对固定电弧TIG焊接熔池内表面张力梯度、电磁力、浮力所引起的流体流动及传热过程建立了数学模型.S. Kou[4]假设熔池表面为不可变形的平面为前提条件建立了二维TIG焊熔池流体流动及传热模型.Zacharia[5]通过建立三维熔池的瞬态模型，并利用示踪标子方法识别和跟踪固液界面，考虑了熔池表面的变形.Thampson. M. E[6]的模型中设计到了熔池表面的变形，但其变形是预先给定的，并且只是二维对流模型，没有考虑工件的熔透情况.曹振宁、武传松[7]建立了熔透情况下的TIG焊接熔池的流场与热场的数学模型，其根据熔池本身重力、电弧力和表面张力之间的动态平衡，推导出了TIG焊熔

收稿日期：2014-01-09
基金项目：国家自然科学基金(51205179)
作者简介：樊 丁(1961-)，男，甘肃合水人，教授，博导.

池表面变形的计算公式,以此来研究 TIG 焊自由表面的变形. 芦风桂[8]运用建立的三维统一数学模型对 TIG 焊接电弧与熔池进行了动态耦合数值模拟,揭示了电弧熔池相互作用的机制以及电弧熔池动态行为的基本规律,但其熔池界面变形采用表面变形公式进行处理,不能很好地反映实际焊接过程中熔池的变形情况. 张瑞华[9]用 Phoenics 软件模拟了 GTA 焊接过程的温度场及熔池流体流动,模型中考虑了电磁力、浮力和表面张力对熔池形状的影响,但未考虑自由表面的变化.

本文针对低碳钢定点 TIG 焊,应用 VOF 方法追踪自由表面变化,建立了三维 TIG 焊熔池数学模型. 利用 FLOW3D 软件并进行二次开发,求解得到了 TIG 焊熔池温度场及流场,并得到了 TIG 焊熔池自由表面随时间的动态变化过程,更加真实地描述了定点 TIG 焊熔池随时间的动态变化.

## 1　数学模型

### 1.1　基本假设

根据三维瞬态 TIG 焊过程的实际情况,为简化计算,做出如下假设:1) 熔池内液态金属为层流、不可压缩的 Newton 流体. 2) 来源于电弧的热流密度分布和电流密度分布呈轴对称的 Gaussian 分布. 3) 所有热物理参数与温度无关.

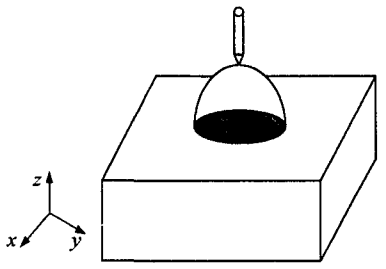



**图 1　TIG 焊示意图**

**Fig. 1　Schematic diagram of TIG welding**

### 1.2　控制方程与源项

通用控制方程如式(1)所示[10]:

$$\frac{\partial(\rho\Phi)}{\partial t}+\mathrm{div}(\rho\boldsymbol{u}\Phi)=\mathrm{div}(\Gamma\mathrm{grad}\,\Phi)+S \quad (1)$$

式中:$\Phi$ 为通用变量,可代表速度、温度等求解变量;$\Gamma$ 为广义扩散系数;$S$ 为广义源项,当取不同值时可得到相应的守恒方程.

TIG 焊熔池流体流动受到的主要驱动力有熔池表面张力、电磁力、电弧力和浮力.

采用流体体积(VOF)法来追踪熔池自由表面流动时的变化及位置[11],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,满足以下方程:

$$\frac{\mathrm{d}F}{\mathrm{d}t}=\frac{\partial F}{\partial t}+(\boldsymbol{V}\cdot\nabla)F=0 \quad (2)$$

在计算网格单元内取平均值,即为该单元内流体所占的容积分量. 若 $F=1$,则对应的单元格内充满液体金属;若 $F=0$,则单元格内没有液体金属;而当 $0<F<1$ 时,表示金属的自由表面位于该单元格内. 这样,可利用 $F$ 计算自由表面单元及其法线方向,确定熔池的自由表面轮廓.

熔池自由表面的压力满足如下方程[11]:

$$P=P_{\mathrm{arc}}+\gamma\kappa \quad (3)$$

式中:$P$ 为自由表面总压力,$P_{\mathrm{arc}}$ 为电弧压力,$\gamma$ 为表面张力. $\kappa$ 为表面曲率,其方程如下[11]:

$$\kappa=-\left[\nabla\cdot\left(\frac{\boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{n}|}\right)\right]=\frac{1}{|\boldsymbol{n}|}\left[\left(\frac{\boldsymbol{n}}{|\boldsymbol{n}|}\cdot\nabla\right)|\boldsymbol{n}|-(\nabla\cdot\boldsymbol{n})\right] \quad (4)$$

式中:$\boldsymbol{n}$ 为自由表面法向向量,其为 VOF 方程(2)中体积分数 $F(x,y,z,t)$ 的梯度:

$$\boldsymbol{n}=\nabla F \quad (5)$$

假设电弧压力服从 Gaussian 分布,表达式为[12]:

$$P_{\mathrm{arc}}=P_{\max}\exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_p{}^2}\right) \quad (6)$$

式中:$\sigma_p$ 为高斯压力分布参数,$P_{\max}$ 是电弧压力分布的最大值,$r$ 是高斯压力分布半径,$r=\sqrt{x^2+y^2}$.

熔池的上表面存在表面张力,表面张力梯度(Marangoni 力)和表面流体的粘性剪切力相平衡:

$$-\mu\frac{\partial u}{\partial z}=\frac{\partial\gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial x} \quad (7)$$

$$-\mu\frac{\partial v}{\partial z}=\frac{\partial\gamma}{\partial T}\frac{\partial T}{\partial y} \quad (8)$$

熔池中的浮力驱动流采用 Boussinesq 模型,浮力表达式为

$$S_B=-\rho g\beta(T-T_1) \quad (9)$$

式中:$\rho$ 为液态金属密度,$g$ 为重力加速度,$\beta$ 为熔池液态金属体积膨胀系数,$T_1$ 为熔池金属液相线温度.

焊接熔池中的电磁力表达式[13]为

$$\boldsymbol{F}=\boldsymbol{J}\times\boldsymbol{B} \quad (10)$$

式中:$\boldsymbol{J}$ 为电流密度矢量,$\boldsymbol{B}$ 为磁通量矢量.

### 1.3　初始条件和边界条件

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 $u=v=w=0$.

假设热损失为对流损失、辐射散热和蒸发损失,则作用于工件上表面的热边界条件为[9]:

$$-\kappa\frac{\partial T}{\partial z}=q_{\mathrm{arc}}-q_{\mathrm{conv}}-q_{\mathrm{radi}}-q_{\mathrm{evap}} \quad (11)$$

式中：$q_{arc}$为 TIG 焊电弧对熔池上表面的热源，服从 Gaussian 分布，可表示如下：

$$q_{arc}=\frac{3\eta UI}{\pi r_H^2}\exp\left(-\frac{3r^2}{r_H^2}\right) \tag{12}$$

式中：$\eta$为电弧功率有效系数，$I$ 为焊接电流，$U$ 为电弧电压，$r$ 为离加热中心的距离，$r=\sqrt{x^2+y^2}$，$r_H$为加热斑点半径.

$q_{conv}$为对流换热边界：

$$q_{conv}=h_c(T-T_0) \tag{13}$$

式中：$h_c$ 为对流换热系数，$T_0$ 为环境温度.

$q_{radi}$为辐射散热边界：

$$q_{radi}=\sigma\varepsilon(T^4-T_0^4) \tag{14}$$

式中：$\sigma$ 为 Stenfan-Boltzmann 常数，$\varepsilon$ 为表面辐射系数.

$q_{evap}$为蒸发散热边界：

$$q_{evap}=\omega H_v \tag{15}$$

式中：$H_v$为蒸发潜热，$\omega$ 为蒸发率.

侧表面和下表面的热边界条件为工件与环境间的对流与辐射传热条件：

$$-\kappa\frac{\partial T}{\partial z}=q_{conv}+q_{radi}=$$
$$h_c(T-T_0)+\sigma\varepsilon(T^4-T_0^4) \tag{16}$$

## 2 数值方法

模型采用 FLOW3D 软件求解，采用二次开发功能进行高斯热源及电弧压力的加载. 模型计算域大小为 20 mm×20 mm×6 mm，计算材料为低碳钢，模拟中涉及到的其他相关参数如表 1 所示[14].

**表 1 材料热物理参数和焊接参数**

**Tab. 1 Thermo-physical parameters of material and welding parameters**

| 参数 | 数值 |
|---|---|
| 密度 $\rho$/(Kg·m$^{-3}$) | 7 200 |
| 液相线 $T_l$/K | 1 800 |
| 固相线 $T_s$/K | 1 750 |
| 环境温度 $T_0$/K | 300 |
| 固相比热 $C_s$/(J·(kg·K)$^{-1}$) | 700 |
| 液相比热 $C_l$/(J·(kg·K)$^{-1}$) | 780 |
| 动力粘度 $\mu$/(kg·(m·s)$^{-1}$) | 0.006 |
| Stenfan-Boltzmann 常数 $\sigma$/(W·(m$^2$·K$^4$)$^{-1}$) | $5.67\times10^{-8}$ |
| 热膨胀系数 $\beta$/K$^{-1}$ | $4.95\times10^{-5}$ |
| 熔化潜热 $Q_L$/(J·kg$^{-1}$) | $2.47\times10^5$ |
| 热导率 $\lambda$/(W·(m·K)$^{-1}$) | 22 |
| 表面辐射系数 $\varepsilon$/K$^{-1}$ | 0.4 |
| 对流换热系数 $h_c$/(W·m$^{-2}$·K$^{-1}$) | 100 |
| 真空磁导率 $\mu_0$/(H·m$^{-1}$) | $1.26\times10^{-6}$ |
| 热流分布半径 $r_H$/mm | 4.5 |
| 焊接电流 $I$/A | 150 |
| 焊接电压 $U$/V | 20 |
| 电流热效率 $\eta$ | 0.65 |
| 表面张力温度系数$\partial r/\partial T$/(N·(m·K)$^{-1}$) | $-4.3\times10^{-4}$ |

图 2 为工件模型及网格划分. 在电弧加热中心附近温度梯度较大，采用精细的网格；在远离电弧区域可用相对较粗的网格，在保证计算精度的同时兼顾了计算效率.

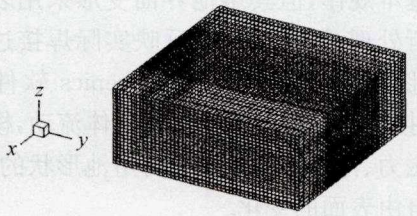



**图 2 工件模型及网格划分**

**Fig. 2 Workpiece model and grid division**

## 3 结果与分析

图 3 为焊接电流 150 A，焊接时间 $t=6.0$ s 时熔池的温度场和自由表面，为清楚表示，只截取四分之一部分.

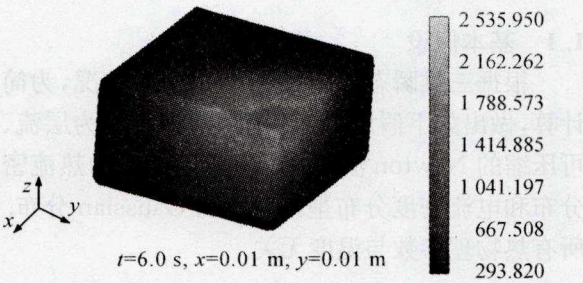
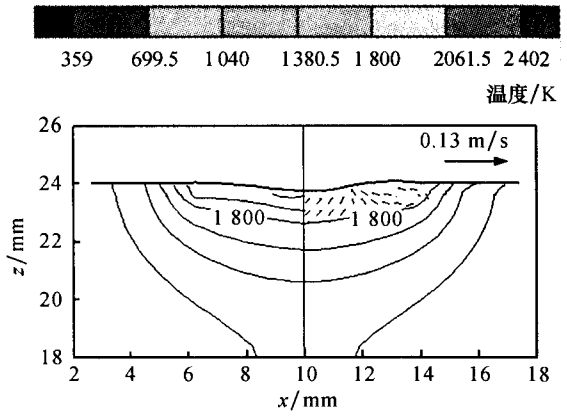



**图 3 焊接时间 $t=6.0$ s 时熔池温度场和自由表面**

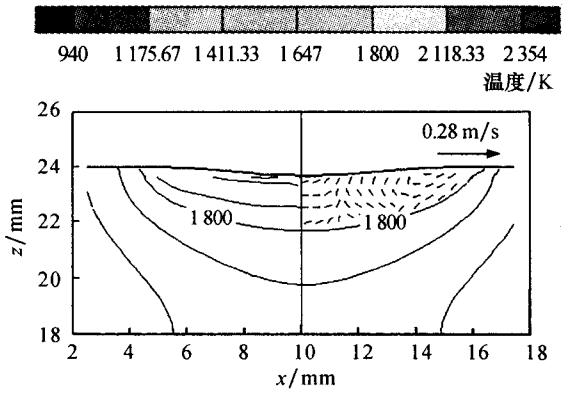
**Fig. 3 Temperature field and free surface of weld pool with welding time $t=6.0$ s**

从图 3 可以看出，熔池自由表面发生了明显的凹凸变形，且熔池中心明显下凹，变形比熔池周边更大，这是由于电弧压力在熔池中心的作用力最大，向熔池周边逐渐递减，导致熔池中心变形更大，周围变形较小.

图 4a、b 所示分别为电流 150 A，焊接时间 $t=1.5$ s 和 $t=5.0$ s 时熔池内部温度场和速度场分布情况. 由图 4a、b 可知，随着焊接时间的延长，高温区域越来越大，等温线逐渐向外扩展. 这是由于电弧传给焊件的热量大于工件向周围环境散发的热量，从而使工件内的热量逐渐累积，使高温区域逐渐向外扩展. 在熔池表面，液体由温度高的熔池中心流向温度低的熔池边缘，在熔合线附近又由边缘流向中心，形成一个环流，同时熔池中心处的流体向上向外流动，促使熔宽不断增大，熔深有所增加. 这主要是因为在熔池中心热输入比较集中，温度较高，且在熔池形成过程中，Marangoni 力为主要驱动力，在热传导




(a) $t$=1.5 s时熔池温度场和速度场




(b) $t$=5.0 s时熔池温度场和速度场

**图 4　焊接时间 $t$=1.5 s 和 5.0 s 时熔池的温度场及速度场**

**Fig. 4　Velocity field and temperature field of weld pool with wleding times $t$=1.5 s and 5.0 s**

及 Marangoni 力的共同作用下,熔池内部液体金属向外向上流动,在熔池内形成环流,从而形成宽而浅的 TIG 焊熔池.

图 5 为不同时刻熔池自由表面的演化过程. 由图可见,$t$=1.5 s 时,熔池自由表面变形较小,随着焊接时间的延长,$t$=6.0 s 时,熔池表面变形相对较大,熔池宽度和熔池深度均有所增加. 熔池表面变形越大时,熔池宽度越大,熔池两旁的堆高也越大. 这是由于电弧压力的作用,造成了熔池表面的凹凸变形.

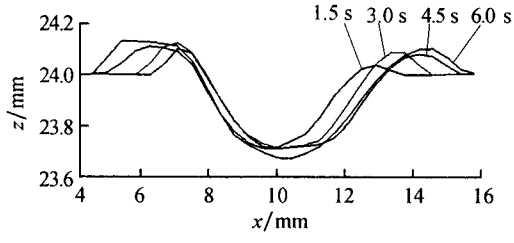



**图 5　不同时刻熔池自由表面演化过程**

**Fig. 5　Evolutionary process of free surface of weld pool with respect to different time instance**

图 6 为熔池形状特征参数示意图,熔池形状特征参数包括熔深 $H$、熔宽 $W$、自由表面变形最大上凸量 $h_1$ 和最大下凹量 $h_2$.

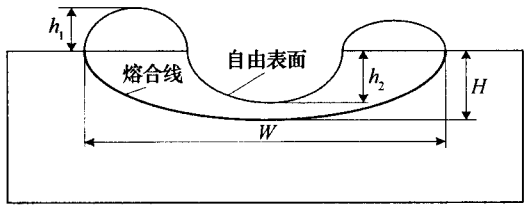
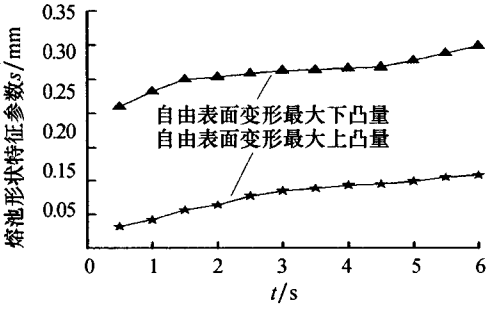


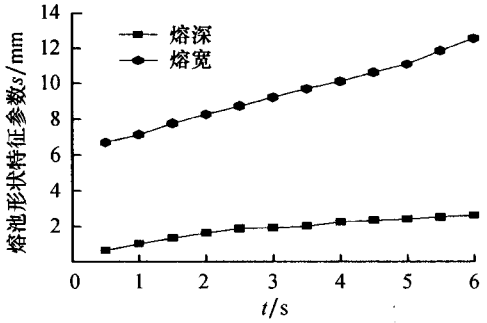

**图 6　熔池形状特征参数示意图**

**Fig. 6　Schematic diagram of shape characteristic parameters of weld pool**

图 7 为熔池形状特征参数随时间的动态变化曲线. 图 7a 曲线反映了熔池自由表面变形最大上凸量和最大下凹量随时间的动态变化情况. 从图中可以看出,自由表面变形最大,上凸量和下凹量均随着时间的延长不断增大,但增加的幅度较小,自由表面变形最大下凹量明显大于最大上凸量. 在 $t$=0.5 s 时,自由表面最大上凸量和下凹量分别为 0.032 4、0.210 1 mm,在 $t$=6.0 s 时,自由表面最大上凸量和下凹量分别为 0.108 6、0.298 4 mm,自由表面最大上凸量和下凹量变形均较小,由此可见,熔池表面的变形随着焊接时间的延长在不断增大,但增加的幅度较小.




(a) 自由表面变形最大上凸量和下凹量动态变化曲线




(b) 熔深和熔宽动态变化曲线

**图 7　熔池形状特征参数动态变化曲线**

**Fig. 7　Transient variation curves of shape characteristic parameters of weld pool**

图 7b 曲线反映了熔深和熔宽随时间的动态变化情况. 从图中可以看出,熔深和熔宽均随着焊接时间的延长有所增大,且熔宽增加的幅度大于熔深的增大幅度,熔宽有持续增大的趋势,而熔宽变化较小,到 4.5 s 后几乎保持稳定,形成宽而浅的熔池形貌.

## 4 结论

采用 VOF 法追踪熔池自由表面,建立了更接近实际情况的三维 TIG 焊熔池模型,利用 FLOW3D 软件求解,获得了 TIG 焊熔池自由表面随时间的动态演化过程,并有如下结论:

1) 在定点 TIG 焊过程中,在电弧压力的作用下,熔池自由表面发生凹凸变形.

2) 自由表面变形最大上凸量和下凹量均随着时间的延长不断增大,但增加的幅度较小,自由表面变形最大下凹量明显大于最大上凸量.

3) 随着焊接时间的延长,熔深和熔宽均有所增加,但熔深增加幅度较熔宽小,从而形成宽而浅的熔池形貌.

**参考文献:**


[1] ZHAO P S, WU C S, ZHANG Y M. Numerical simulation of dynamic characteristics of weld pool geometry with step changes of welding parameters [J]. Modeling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(7): 765-780.

[2] 潘际銮. 展望 21 世纪焊接科研 [J]. 中国机械工程, 2000, 11(1/2): 21-25.

[3] OREPER G M, SZEKELY J. Heating and fluid flow phenomena in weld pool [J]. Journal of Fluid Mechanics, 1984, 147(1): 53-79.

[4] KOU S, WANG Y H. Weld pool convection and its effect [J]. Welding Journal, 1986, 65(3): 63-69.

[5] ZACHARIA T, ERASLAN A H. Modeling of autogenous welding [J]. Welding Journal, 1988, 67(3): 53-62.

[6] THOMPSON M E, SZELEL Y J. The transient behavior of weld pools with a deformed free surface [J]. Heat Mass Transfer, 1989, 32(6): 1007-1019.

[7] 曹振宁, 武传松. 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(3/4): 108-113.

[8] 芦凤桂, 唐新华, 李少青, 等. 定点 TIG 焊接电弧与熔池交互耦合数值模拟 [J]. 焊接学报, 2005, 26(9): 69-76.

[9] 张瑞华, 樊 丁, 杜华云. GTA 焊接熔池特性的数值模拟 [J]. 兰州理工大学学报, 2004, 30(5): 21-23.

[10] 张帅帅. 计算流体动力学及其应用 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2011.

[11] KOTHE D B, MJOLSNESS R C. A new model for incompressible flows with free surfaces [J]. AIAA Journal, 1992, 30(11): 2694-2700.

[12] USHIO M, WU C S. Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow in a moving gas metal arc weld pool [J]. Metal Mater Trans B, 1997, 28(3): 509-516.

[13] 武传松. 焊接热过程与熔池形态 [M]. 北京: 机械工程出版社, 2008.

[14] 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): 0549051-05490514.