

文章编号: 2095-2163(2020)05-0251-06

中图分类号: TG4;TH16

文献标志码: A

# 基于 MIG 的电弧增材制造熔池行为的数值模拟

张天雷<sup>1</sup>, 徐刚<sup>1</sup>, 沈艳涛<sup>2</sup>, 何林基<sup>1</sup>, 马春伟<sup>1</sup>

(1 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2 北京海基科技发展有限公司, 北京 100192)

**摘要:** 为了分析研究基于 MIG 的电弧增材制造过程中熔池的特性, 采用 VOF 方法和焓-孔隙度方法分别追踪熔池自由表面和融化凝固界面, 考虑熔池表面动态变形, 建立了随熔池表面变动的自适应双椭球热源、电弧力及电磁力模型, 同时考虑熔滴过渡的影响。基于 FLUENT 软件进行了电弧增材制造熔池在凸曲面上形成的数值模拟。分析结果表明, 电弧增材制造熔池在电弧压力作用下呈现出熔池前方低, 熔池后方高的楔型形态, 熔池在凸面上形成时有向两侧流淌的趋势, 并通过实验结果与模拟结果对比, 验证了模型的准确性。

**关键词:** 电弧增材制造; 数值模拟; 熔池; FLUENT 软件

## Numerical simulation of molten pool behavior of MIG-based additive manufacture

ZHANG Tianlei<sup>1</sup>, XU Gang<sup>1</sup>, SHEN Yantao<sup>2</sup>, HE Linji<sup>1</sup>, MA Chunwei<sup>1</sup>

(1 College of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2 Beijing Hi-Key Tech. Co. LTD, Beijing 100192, China )

**[Abstract]** In order to analysis and study based on MIG arc increases the material characteristics of the molten pool, in the process of producing the VOF method and enthalpy - porosity method respectively to track free surface of molten pool and melting solidification interface, considering the molten pool surface dynamic deformation, along with the changes in the surface of the molten pool is established adaptive double ellipsoid heat source, arc force and electromagnetic force model, considering the influence of the droplet transition at the same time. Based on FLUENT software, the numerical simulation of arc additive manufacturing melt pool on convex surface was carried out. The analysis results show that the arc additive manufacturing pool shows a shape of low front and high back under the action of arc pressure, and the pool tends to flow on both sides when it is formed on the convex surface. The accuracy of the model is verified by comparing the experimental results with the simulation results.

**[Key words]** Wire and arc additive manufacturing; numerical simulation; molten pool; FLUENT software

## 0 引言

增材制造 (Additive Manufacturing, AM), 也称为 3D 打印, 是通过三维建模, 切片处理, 逐层制造的技术<sup>[1]</sup>。金属增材制造主要包括四类: 粉末床熔融 (PBF, Powder Bed Fusion), 直接能量沉积 (DED, Direct Energy Deposition), 粘结剂喷射 (Binder Jetting) 和薄片叠层 (Sheet Lamination)。直接能量沉积法中的金属材料可以是粉末或者丝材, 热源可选择激光、电子束和电弧<sup>[2]</sup>。基于 MIG (Metal Inert-Gas Welding) 的电弧增材制造 (Wire and Arc Additive Manufacturing, WAAM) 是以焊接电弧为热源, 在惰性气体的保护下, 焊丝通过送丝机构传送到焊枪, 并在电弧的作用下融化, 以点-线-面-体的形式制造工件, 具有沉积效率高、打印尺寸大、零件致密度高、材料及设备便宜等优点<sup>[3]</sup>。

由于增材制造环境复杂, 其熔池温度较高, 很难

用实验方法观测到熔池行为。而数值方法不仅可以模拟熔池的相变过程, 还可以进一步计算分析表面张力、电磁力、浮力、熔池重力、电弧压力和熔滴过渡等对熔池形貌和内部流动的影响<sup>[4]</sup>。由于使用焊接工艺, 电弧增材制造过程中传热特征和焊接熔池类似。国内外学者建立了多种 CFD 模型模拟焊接过程熔池行为, Rao 等人建立了三维数值模型研究周期性熔滴过渡对焊接熔池传热和传质的影响。尽管电弧增材使用焊接工艺, 但是相比于焊接电弧增材的熔池, 是在前一层熔覆层的曲面上生成, 而不是在平板上或者预先加工的坡口中形成, 没有了基板的支撑, 电弧增材制造的熔池更加不稳定, 熔滴过渡对熔池的影响更大; Zhao 等人建立了三维数值模型, 模拟了电弧增材制造过程中的电弧形态和熔滴过渡过程; Hu 等人模拟了基于电子束增材制造的传热和传质的耦合行为; Bai 等人建立了基于等离子弧的

**基金项目:** 上海工程技术大学研究生科研创新项目 (E3-0903-19-01145)。

**作者简介:** 张天雷 (1993-), 男, 硕士研究生, 主要研究方向: 金属增材制造; 马春伟 (1970-), 男, 博士, 讲师, 主要研究方向: 材料加工和结构完整性研究。

**收稿日期:** 2020-03-20

电弧增材制造过程多层熔覆过程模拟,分析了层高及弧坑对熔池的影响;Ou等人建立了单道单层的电弧增材制造模型,分析了熔池速度场、温度场的特性。此模型的熔池是在平板上形成,没有考虑多层堆积过程中熔池在曲面上形成时的特性。

本研究采用 FLUENT 软件,耦合多相流 VOF 模型和融化凝固模型,基于自由表面,建立基于 MIG 的电弧增材制造的三维熔池数值模型,模拟了熔池在曲面上生成、流动及相变情况,分析了多场耦合下熔池表面变形以及温度场和速度场的变化规律,并探讨了熔滴过渡对熔池的影响。

## 1 电弧增材制造熔池有限元模型的建立

### 1.1 基本假设

图1为基于MIG的电弧增材制造示意图。由于其物理过程非常复杂,为了简化计算做如下假设:(1)熔池中液态金属为非可压牛顿流体,其流动方式为层流。(2)将焊接电弧传热的能量,以双椭球热源形式代替。(3)金属材料的热物理属性除粘度,热导率,比热容外其余皆为常数。(4)熔滴的温度,直径和频率皆为固定值。

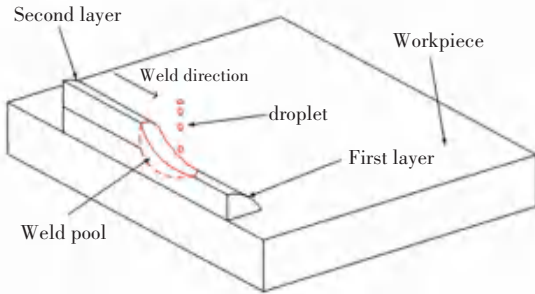


图1 电弧增材制造示意图

Fig. 1 The schematic of wire and arc additive manufacturing

### 1.2 控制方程

通过求解流体力学中的三大守恒方程来计算电弧增材制造过程中的传热传质和流体流动过程。采用多相流 VOF 模型追踪金属和气体的自由表面。

连续性方程(1):

$$\frac{\partial y}{\partial x} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = S_c. \quad (1)$$

式中,  $\rho$  为密度,  $\mathbf{V}$  为速度矢量,  $S_c$  为熔滴质量源项。

动量方程(2):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \mathbf{V}) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = -\nabla p + \nabla \cdot (\rho \nabla \mathbf{V}) +$$

$$\mathbf{F}_{ms} + \mathbf{F}_g + \mathbf{F}_{jb} + \mathbf{F}_{st} + \mathbf{F}_{ap} + \mathbf{F}_{ma} \mathbf{F}_{as}. \quad (2)$$

式中,  $p$  为压力,  $\mathbf{V}$  为流体粘度,  $\mathbf{F}_{ms}$  为熔-孔隙

度模型的动量源项,  $\mathbf{F}_g$  为重力源项,  $\mathbf{F}_{jb}$  为电磁力源项,  $\mathbf{F}_{st}$  为表面张力源项,  $\mathbf{F}_{ap}$  为电弧压力源项,  $\mathbf{F}_{ma}$  为马拉格尼力源项,  $\mathbf{F}_{as}$  为电弧剪切力源项。

能量方程(3):

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho h) + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} h) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \mathbf{q}_{arc} + \mathbf{q}_{metal} + \mathbf{q}_{loss}. \quad (3)$$

式中,  $\mathbf{q}_{arc}$  为电弧能量源项,  $\mathbf{q}_{metal}$  为熔滴热量源项,  $\mathbf{q}_{loss}$  为热对流和热辐射散失的能量源项。

VOF 方程(4):

$$\frac{\partial F}{\partial t}(\mathbf{V} \cdot \nabla) F = 0. \quad (4)$$

式中,  $F$  为多相流中相占网格的体积分,若网格中占满某一相则该相  $F = 1$ ;若网格中不含某一相,则该相  $F = 0$ ;若网格中某相  $F$  介于0到1之间则表面该网格在相界面上,用此方法来追踪金属和气体的自由界面。

### 1.3 相变模型

在 FLUENT 融化模型中,运用焓-多空度技术处理糊状区为一个多空区域,用来追踪凝固过程中的固液界面,  $f_l$  为网格中液体的体积分,其值与温度相关的方程表示如下<sup>[5]</sup>:

$$f_l = \begin{cases} 0, & (T \leq T_s); \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s}, & (T_s < T < T_L); \\ 1, & (T \geq T_L). \end{cases} \quad (5)$$

式中,  $T_s$  为固相线温度,  $T_L$  为液相线温度。

在焓-多空度模型中加入一个动量源项,用来使糊状区和固体区的速度衰减,其表达式(6):

$$\mathbf{F}_{ms} = \mathbf{A}_{mushy} \frac{(1 - f_l^2)}{(f_l^3 + \epsilon_0)}. \quad (6)$$

式中,  $\mathbf{F}_{ms}$  为熔-孔隙度模型的动量源项;  $\mathbf{A}_{mushy}$  为糊状区常数,用来表示糊状区域速度衰减的快慢,其值在 104 到 107 之间,数值越大速度衰减越快,如果数值过大会出现凝固震荡;  $\epsilon_0$  为一个不为零的小数其值为 0.001,防止分母为 0。

### 1.4 电弧增材制造热力模型

#### 1.4.1 热源模型

由于电弧增材过程中熔池上表面不再是平面,传统的双椭球热源模型已不能完全反应电弧增材制造的热源,因此基于双椭球热源修改为双椭球上表面随熔池自由变化的自适应热源,公式(7)、公式(8)如下<sup>[6]</sup>:

$$q_{ar}(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}Q_{arc}}{(a_1+a_2)bc\pi} \exp\left[-\frac{3(x-x_0-V_Tt)}{a_1^2} - \frac{3(y-y_0)}{b^2} - \frac{3z_s^2}{b^2\delta}\right] (x-x_0-V_Tt > 0). \quad (7)$$

$$q_{ar}(x,y,z) = \frac{12\sqrt{3}Q_{arc}}{(a_1+a_2)bc\pi} \exp\left[-\frac{3(x-x_0-V_Tt)}{a_2^2} - \frac{3(y-y_0)}{b^2} - \frac{3z_s^2}{b^2\delta}\right] (x-x_0-V_Tt \leq 0). \quad (8)$$

其中,  $q_{ar}$  为前半椭圆热源分布,  $q_{af}$  为后半椭圆热源分布,  $x_0, y_0$  为热源起始点坐标,  $z_s$  为熔池上表面  $z$  方向坐标值,  $V_T$  为热源移动速度,  $t$  为热源移动时间,  $a_1, a_2, b, c$  为双椭圆热源参数。

### 1.4.2 电磁力模型

在前人简化的电磁力基础上, 将电磁力作用区域改为随熔池表面变化的自适应模型, 方程(9)~方程(12)如下:

$$F_{jbx} = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_j^2\delta}\right] - \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_j^2\delta}\right] \frac{z}{L_0\delta} \frac{(x-x_0-V_Tt)}{r}. \quad (9)$$

$$F_{jby} = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_j^2\delta}\right] - \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_j^2\delta}\right] \frac{z}{L_0\delta} \frac{(y-y_0-V_Tt)}{r}. \quad (10)$$

$$F_{jbx} = -\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2 \sigma_j^2} \exp\left[-\frac{r^2}{2\sigma_j^2\delta}\right] - \frac{z-z_0}{L_0\delta}. \quad (11)$$

$$r = \sqrt{(x-x_0-V_Tt)^2 + (y-y_0)^2}. \quad (12)$$

其中,  $F_{jbx}$  为  $x$  方向电磁力源项,  $F_{jby}$  为  $y$  方向电磁力源项,  $F_{jbx}$  为  $z$  方向电磁力源项,  $\sigma_j$  为电弧密度分布,  $r$  为  $xy$  平上半径,  $z_0$  为熔池上表面坐标。

### 1.4.3 浮力

电弧增材制造过程中, 熔池所收到的浮力可用 Boussinesq 近似替代, 浮力表达式(13)如下:

$$F_b = -\rho\beta g(T - T_m). \quad (13)$$

其中,  $F_b$  为浮力源项,  $\rho$  为金属密度,  $\beta$  为热膨胀系数,  $g$  为重力加速度,  $T$  为温度,  $T_m$  为金属熔点。

### 1.4.4 电弧压力和剪切力模型

根据双椭圆体热源的特征, 电弧压力简化为双椭圆分布, 方程(13)、(14)如下<sup>[7]</sup>:

$$\begin{aligned} P_{af} &= \frac{6P_{total}}{\pi(a_{p1}+a_{p2})b_p} \exp\left[-\frac{3x_r^2}{a_{p1}^2} - \frac{y_r^2}{b_p^2\delta}\right]; \\ P_{ar} &= \frac{6P_{total}}{\pi(a_{p1}+a_{p2})b_p} \exp\left[-\frac{3x_r^2}{a_{p2}^2} - \frac{y_r^2}{b_p^2\delta}\right]. \end{aligned} \quad (14)$$

式中,  $a_{p1}, a_{p2}, b_p$  为形状分布系数,  $P_{af}$  为前半球电弧压力,  $P_{ar}$  为后半球压力,  $P_{total}$  为电弧总压力。

电弧总压力根据公式(15)计算<sup>[8]</sup>:

$$P_{total} = -0.04017 + 0.0002553I. \quad (15)$$

其中,  $I$  为焊接电流。

电弧剪切力简化模型如公式(16)所示<sup>[9]</sup>:

$$\tau = \frac{\rho_p v_{p0}^2 g_2 (r_r/H_a)}{R_0^{1/2} (H_a/D_n)^2}. \quad (16)$$

式中,  $R_0$  为雷诺数,  $H_a$  为焊枪口到熔池表面的距离,  $D_n$  为焊丝直径,  $g_2$  是通用方程;  $v_{p0}$  是电弧等离子弧速度。

等离子弧速度由公式(17)求解:

$$v_{p0} = k_p I. \quad (17)$$

式中:  $k_p$  为计算系数, 本例中为 0.5,  $I$  为焊接电流。

### 1.4.5 熔滴过渡模型

在计算过程中熔滴被假设为高温的液滴, 以固定的初速度和频率过渡到熔池中。熔滴直径为焊丝直径, 熔滴温度设定为 2400K。熔滴过渡频率取决于送丝速度和熔滴速度。

熔滴初速度计算公式(18)如下<sup>[17]</sup>:

$$v_{d0} = \sqrt{0.33692 + 0.00854(I/2r_d)}. \quad (18)$$

其中,  $r_d$  为焊丝半径,  $I$  为焊接电流,  $v_{d0}$  为熔滴初速度。

### 1.5 边界条件

在模拟过程中基板及熔池表面考虑对流换热和辐射散热, 为了简化计算, 建立对称模型, 中心对称面为绝热面。空气域四周为压力出口边界条件, 熔池上方为以焊丝直径为圆形的速度入口边界, 计算公式(19)如下:

$$q_{loss} = h_c(T - T_0) + \sigma\delta(T^4 - T_0^4). \quad (19)$$

其中,  $h_c$  为对流换热系数,  $T_0$  为环境温度, 式中  $\sigma$  为 Stefan-Boltzmann 参数;  $\varepsilon$  为表面辐射。

### 1.6 网格划分及实验数据

模型计算尺寸为 25 mm×10 mm×11.5 mm, 基板厚度 5 mm, 第一层熔覆层根据实验数据建立, 主要模拟第二层熔池在曲面上形成过程。采用 Gambit 软件进行网格划分, 基板厚度方向近熔池区域为加

密网格,远离熔池区域为稀疏网格,最小网格尺寸为 0.25 mm,网格总数为 6 800,节点总数为 74 235。

实验基板为 SU304 不锈钢,焊丝为 ER308,假定两者的热物理属性相同,其参数如表 1 所示<sup>[10]</sup>。

表 1 材料物理属性

Tab. 1 The material physical properties

Nomenclature	Value
Specific heat of liquid phase, $c / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$0.078 \times 10^4$
Specific heat of plasma, $c_{pl} / (J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	$0.049 \times 10^3$
Latent heat of fusion, $H / (J \cdot kg^{-1})$	$0.247 \times 10^6$
Thermal conductivity of liquid phase, $k_l / (W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$0.022 \times 10^3$
Density of liquid phase, $\mu / (kg \cdot m^{-3})$	$0.069 \times 10^5$
Dynamic viscosity, $\mu / (kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	0.006
Solidus temperature, $T_s / K$	$0.167 \times 10^4$
Liquidus temperature, $T_m / K$	$1.727 \times 10^3$
Ambient temperature, $T_\infty / K$	$0.003 \times 10^5$
Thermal expansivity, $\beta / (K^{-1})$	$0.495 \times 10^6$
Surface tension at $T_m / (N \cdot m^{-1})$	$0.012 \times 10^2$
Surface tension gradient, $A_\sigma / (N \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	$0.043 \times 10^{-2}$

仿真过程参数根据实验参数确定,电弧增材制造过程工艺参数如表 2 所示。

表 2 工艺参数

Tab. 2 Process parameters

Parameters	Value (unit)
Deposition welding current	$1.68 \times 10^2 A$
Deposition arc voltage	$0.28 \times 10^2 V$
Deposition welding speed	$0.17 \times 10^2 cm/min$
Wire feeding rate	$0.73 \times 10^1 m/min$
Shielding gas flow rate	$0.01 \times 10^3 L/min$
Ambient temperature	$0.03 \times 10^4 K$
Wire diameter	$0.12 \times 10^1 mm$

## 2 结果与分析

### 2.1 熔池表面形貌

电弧增材制造熔池是由焊丝融化过渡到基板或前一层熔覆层和基板或前一熔覆层融化的金属部分组成,图 2 是电弧增材制造过程中 0 s-3 s 的熔池表面形貌和温度场演变的过程。由图 2(a)和(b)可以看出,在 0 s-1 s 熔池形成初期阶段,熔池在表面张力的作用下,成近半球形的状态;由图 2(c)的(d)可以看出,在熔池长大阶段,由于焊丝向焊接方向移动,熔滴过渡向前,熔池被拉长,熔池前方在电弧压力的作用下,导致熔池前方液态金属少,熔池后方液态金属多,形成熔池前方低、后方高近似楔形的形状。由图 2(e)和(f)可以发现,当电弧增材 2 s 之后熔池形貌基本稳定,由于熔池在曲面上形成,熔池两侧没有支撑熔池有向两侧流动的倾向。

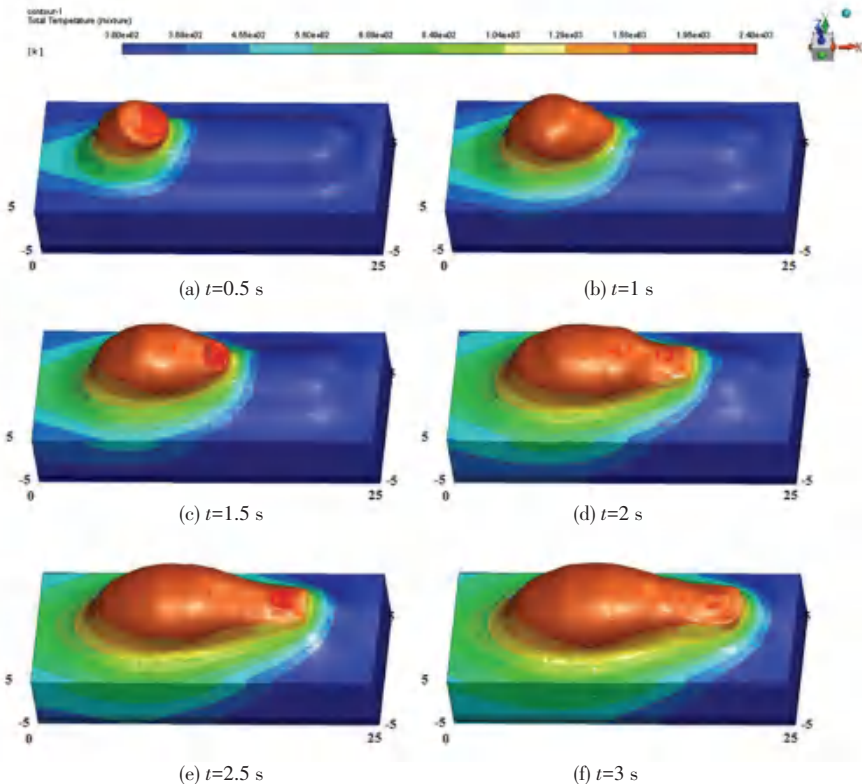


图 2 熔池表面形貌演变过程

Fig. 2 Themolten pool surface evolution



### 2.2 熔池温度场和流场

#### 2.2.1 熔池横界面温度场和流场

图 3 为电弧增材制造过程 2.000 s-2.010 s 时, 熔滴过渡不同时刻的熔池横截面温度场和流场分布。图 3(a) 为 2.000 s 时熔滴刚形成还未脱落。由于焊接速度较快, 熔池前半主要受电弧热源和熔滴热焓作用, 材料没有来得及完全融化, 呈现出熔池前方熔深较小, 融化后方熔深较大的现象。在电弧压力作用下, 熔池前方电弧作用区呈现斜坡式形态, 液态金属在马拉格尼力作用下向后方移动, 在熔池内部形成逆时针环流; 由图 3(b) 可以看出, 当 2.025 s

时熔滴完全生成, 开始过渡到熔池中, 由于焊接电流为电流熔滴以大滴形式过渡, 熔滴直径约为 1.2 mm, 熔滴速度在 0.5 m/s 左右; 当时间为 2.075 s 时, 如图 3(c) 熔滴完全落入熔池中, 熔池上表面受到熔滴的冲击形成凹陷面; 当时间为 2.01 s 时, 如图 3(d) 所示, 被熔滴冲击的凹陷面被周围液态金属填充, 焊接熔池在周期性熔滴过渡的影响下, 熔池也呈现出周期性的波动状态。

#### 2.2.2 熔池纵截面温度场和流场

如图 4 所示为焊接时间为 2.0 s 时, 熔池的不同位置横截面温度场和速度场分布。

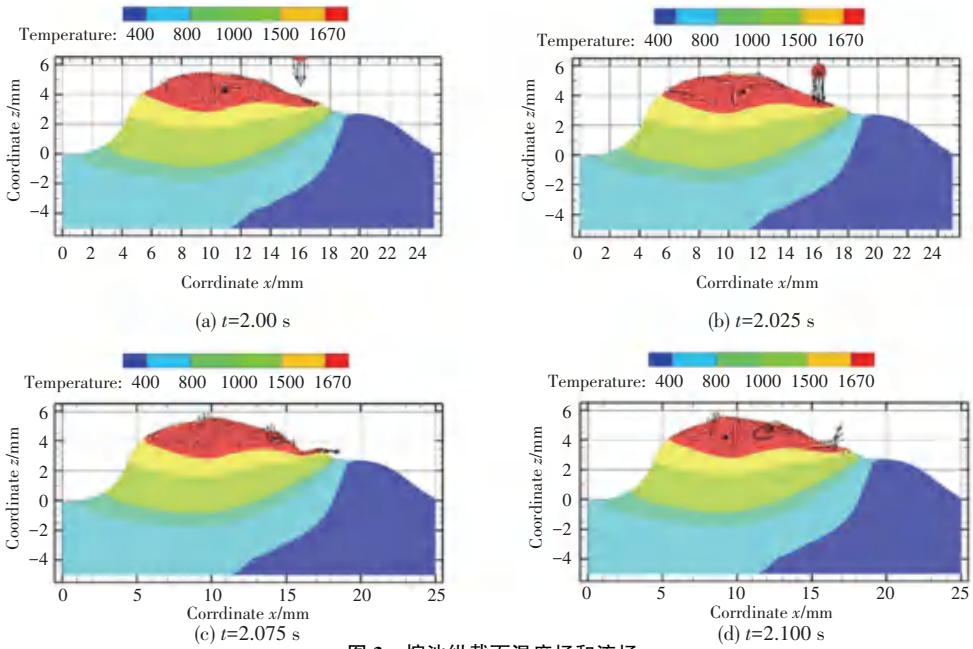


图 3 熔池纵截面温度场和流场  
Fig. 3 Temperature fields and velocity fields in longitudinal section

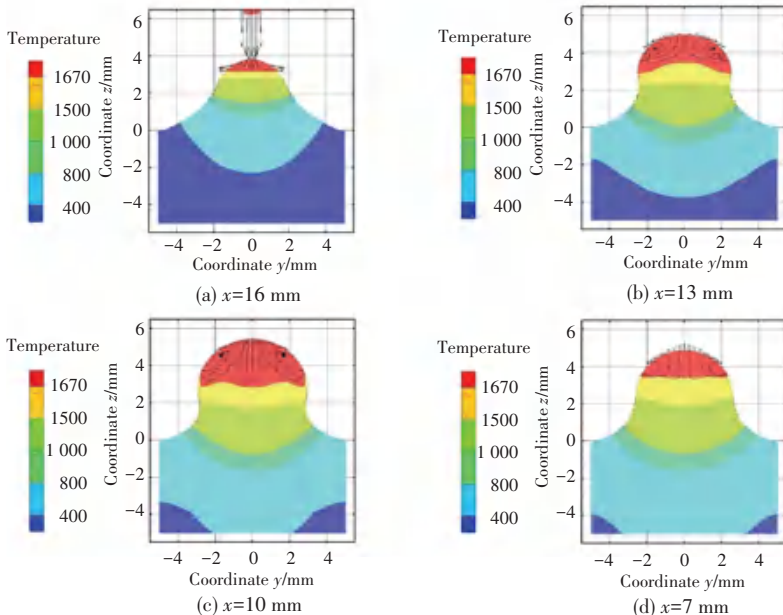


图 4 熔池横截面温度场和流场  
Fig. 4 Temperature fields and velocity fields in cross section

图4(a)为 $x = 16$  mm熔滴正下方熔池横截面,熔池在表面张力作用下,呈现出凸面的形态,由于金属熔化需要一定时间,熔池在熔滴正下方熔深很小;熔池中部如图4(b)  $x = 13$ 和图4(c)  $x = 10$ 所示,熔池深度加深,熔池表面受表面张力的作用形成半球面状态,熔池表面温度分布不均,在马拉格尼力作用下,由中心流向两侧。由于熔池两侧没有固态金属的支撑,流向熔池两侧的金属在重力作用下,有向下流淌的趋势,在表面张力的作用下未脱落形成圆弧的形态。由于熔池上表面液态金属流向熔池两侧,熔池中心液态金属向上流动,熔池底部金属向熔池中心填充形成回流。在熔池后方如图4(d)  $x = 6$ 所示,液态金属减少,熔池开始凝固,温度场向底部传导,温度场分布较熔池前方均匀。

### 2.3 实验验证

为了验证上述模型的可行性和准确性,对模拟结果和试验结果做了对比验证,图5为熔池横截面实验与模拟形貌对比,可见熔池的界面的计算结果和试验结果吻合良好,说明此电弧增材制造熔池计算模型合理。

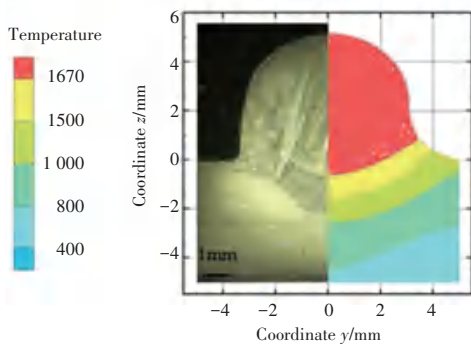


图5 熔池横截面实验结果与模拟结果对比

Fig. 5 Comparison of simulated molten pool shape with actual molten pool morphology

## 3 结束语

(1)基于 fluent 软件考虑熔滴过渡和电弧热力耦合,通过VOF方法追踪自由界面建立的自适应热源,电弧压力和电磁力,建立了适合基于MIG的电弧增材制造熔池数值模型,通过数值模拟结果和试

验结果对比,验证了模型的可靠性,为后续研究提供了基础。

(2)电弧增材制造熔池开始阶段在表面张力作用下为圆形,随着熔池向前移动,在电弧压力作用下呈现熔池前方低,后方高的楔型状态。

(3)电弧增材制造熔池在凸曲面平面上形成时,熔池两侧有没支撑的情况下,熔池两侧有向下流淌的趋势,在表面张力作用下保持平衡。

## 参考文献

- [1] DEBROY T, WEI H, ZUBACK J, et al. Additive manufacturing of metallic components - Process, structure and properties [J]. Progress in Materials Science, 2018, 92:pp. 112-224.
- [2] SAMES WJ, LIST FA, PANNALA S, et al. The metallurgy and processing science of metal additive manufacturing [J]. International Materials Reviews. 2016;61(5):315-60.
- [3] BRANDL E, BAUFELD B, LEYENS C, et al. Additive manufactured Ti-6Al-4V using welding wire: comparison of laser and arc beam deposition and evaluation with respect to aerospace material specifications[J]. Physics Procedia. 2010;5:595-606.
- [4] LI S, XIAO H, LIU K, et al. Melt-pool motion, temperature variation and dendritic morphology of Inconel 718 during pulsed- and continuous-wave laser additive manufacturing: A comparative study[J]. Materials & Design. 2017;119:351-60.
- [5] VOLLER V R, BRENT A D, PRAKASH C. The modelling of heat, mass and solute transport in solidification systems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1989, 32(9): 1719-1731.
- [6] BAI X, ZHANG H, WANG G. Improving prediction accuracy of thermal analysis for weld - based additive manufacturing by calibrating input parameters using IR imaging [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2013;69(5-8):1087-95.
- [7] KUMAR A, DEBROY T. Heat Transfer and Fluid Flow during Gas-Metal-Arc Fillet Welding for Various Joint Configurations and Welding Positions [J]. Metallurgical and Materials Transactions A. 2007;38(3):506-19.
- [8] CHO MH, FARSON DF. Understanding Bead Hump Formation in Gas Metal Arc Welding Using a Numerical Simulation [J]. Metallurgical and Materials Transactions B. 2007;38(2):305-19.
- [9] WU L, CHEON J, KIRAN DV, et al. CFD simulations of GMA welding of horizontal fillet joints based on coordinate rotation of arc models[J]. Journal of Materials Processing Technology. 2016; 231:221-38.
- [10] WANG R, LEI Y, SHI Y. Numerical simulation of transient temperature field during laser keyhole welding of 304 stainless steel sheet[J]. Optics & Laser Technology. 2011;43(4):870-3.