

# 交流脉冲 TIG 电弧增材制造熔池流动及焊道成形数值模拟

杨胜波<sup>1,2</sup>, 周祥曼<sup>2,3</sup>, 李梅<sup>4</sup>, 熊晓晨<sup>2,3</sup>, 付君健<sup>2</sup>

(1. 凯里学院微电子与人工智能学院, 贵州 凯里 556011; 2. 三峡大学机械与动力学院, 湖北 宜昌 443002; 3. 石墨增材制造技术与装备湖北省工程研究中心, 湖北 宜昌 443002; 4. 三峡大学创新创业学院, 湖北 宜昌 443002)

**摘要:** 为探究交流脉冲钨极惰性气体保护(Tungsten inert gas, TIG)焊电弧增材制造过程中熔池传热与流动动态的变化规律, 基于计算流体动力学仿真软件 Fluent, 建立了交流脉冲 TIG 电弧增材连续熔积的熔池三维瞬态数值仿真模型, 分析了不同时刻下的熔池形貌、流态及传热传质过程。数值模拟结果表明: 熔池形貌、温度场、流动状态随着周期性脉冲焊接电流的变化而呈现周期性变化, 当电流处于脉冲极大值时, 熔池具有较高的温度, 在电弧压力与电磁力的主导作用下, 熔融金属受到挤压而下沉形成凹陷的弧坑; 当电流处于脉冲极小值时, 熔池峰值温度降低, 电弧压力与电磁力减弱, 表面张力占主导作用, 使熔池向上收缩形成凸起; 电流脉冲的周期变化使得焊道形成了明显且规律鱼鳞纹。在相同工艺参数下, 试验焊道的形貌和截面轮廓与模拟焊道的形貌和截面轮廓吻合较好, 证明了数值模拟的可靠性。

**关键词:** 电弧增材制造; 数值模拟; 交流脉冲; 传热传质; 焊道形貌

**中图分类号:** TG409 **文献标志码:** A **文章编号:** 1009-6264(2026)01-0164-10

## Numerical simulation of molten pool flow and weld bead formation in AC pulse TIG arc additive manufacturing

YANG Sheng-bo<sup>1,2</sup>, ZHOU Xiang-man<sup>2,3</sup>, LI Mei<sup>4</sup>, XIONG Xiao-chen<sup>2,3</sup>, FU Jun-jian<sup>2</sup>

(1. College of Microelectronics and Artificial Intelligence, Kaili University, Kaili 556011, China; 2. College of Mechanical and Power Engineering, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 3. Hubei Engineering Research Center for Graphite Additive Manufacturing Technology and Equipment, China Three Gorges University, Yichang 443002, China; 4. College of Innovation and Entrepreneurship, China Three Gorges University, Yichang 443002, China)

**Abstract:** To investigate the changes in heat transfer and flow dynamics of the molten pool during the arc additive manufacturing process of AC (alternating current) pulse tungsten inert gas (TIG) welding, a three-dimensional transient numerical simulation model of the molten pool for continuous deposition of AC pulse TIG arc additive was established based on the computational fluid dynamics simulation software Fluent. The morphology, flow state, and heat and mass transfer processes of the molten pool at different time were analyzed. The numerical simulation results show that the morphology, temperature field, and flow state of the molten pool exhibit periodic changes with the variation of periodic pulse welding current. When the current is at the maximum value during the pulse, the molten pool has a higher temperature. Under the dominant action of arc pressure and electromagnetic force, the molten metal is squeezed and sinks to form a concave arc pit. When the current is at the minimum value during the pulse, the peak temperature of the molten pool decreases, the arc pressure and electromagnetic force weaken, and surface tension dominates, causing the molten pool to contract upwards and form a protrusion. The periodic variation of current pulses results in the formation of distinct and regular fish-scale patterns in the weld bead.

**收稿日期:** 2025-01-09 **修订日期:** 2025-03-27

**基金项目:** 水电机械设计与维护湖北省重点实验室开放基金(2024KJX09); 广西类脑计算与智能芯片重点实验室 2024 年开放基金(BCIC-24-K3); 凯里学院黔东南州玻璃重点实验室开放基金(WZG03)

**作者简介:** 杨胜波(1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事电弧增材数值模拟研究, 发表论文 2 篇, E-mail: 1803074534@qq.com.

**通信作者:** 李梅(1987—), 女, 副教授, 硕士, 主要从事金属材料各向异性研究, E-mail: limei@ctgu.edu.cn.

**引用格式:** 杨胜波, 周祥曼, 李梅, 等. 交流脉冲 TIG 电弧增材制造熔池流动及焊道成形数值模拟[J]. 材料热处理学报, 2026, 47(1):164-173.  
YANG Sheng-bo, ZHOU Xiang-man, LI Mei, et al. Numerical simulation of molten pool flow and weld bead formation in AC pulse TIG arc additive manufacturing[J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2026, 47(1):164-173.

Under the same process parameters, the morphology and cross-sectional profile of the experimental weld bead match well with those of the simulated weld bead, demonstrating the reliability of the numerical simulation.

**Keywords:** wire arc additive manufacturing; numerical simulation; AC pulse; heat and mass transfer; weld bead morphology

电弧增材制造是以电弧为热源,将丝材按照预定路径进行堆积成形的增材制造技术,该技术具有成本低、效率高等优点,已经在多个行业中得到了广泛的应用<sup>[1-3]</sup>。

电弧增材过程中涉及到复杂的多物理场耦合作用下的传热传质过程,以及熔化凝固等物理冶金变化,采用实验方法较难去观测增材过程中各个物理场的耦合作用与传热传质过程,相比之下,数值模拟的方法能够实时仿真这些复杂过程,并探究其中的内在机理与规律<sup>[4]</sup>。Zhou 等<sup>[5-7]</sup>开发了电弧和金属传输的三维弱耦合建模方法,该方法即对电弧进行模拟,提取电磁力、电弧压力、等离子体剪切应力和热通量,并将其导入至金属输运模型中,通过该方法研究了无磁场、横向磁场及变位磁场作用下的熔滴滴入熔池后熔池流动机理;为进一步探究电弧增材过程中熔池连续熔积过程,周祥曼等<sup>[8-10]</sup>建立了 TIG 电弧增材成形过程的三维瞬态数值模型,分析了不同工艺参数(焊接速度、送丝速度和搭接中心距)对电弧增材熔池流动及焊道形貌的影响。Chen 等<sup>[11]</sup>考虑焊丝进给过程,建立了焊丝-熔池三维耦合数值模型,在此基础上研究了送丝速度对熔池传热传质的影响。Zhao 等<sup>[12-13]</sup>建立了电弧-熔滴-熔池全耦合模型,基于该模型,研究了金属蒸气对电弧等离子体特性的影响、熔滴生成对电弧等离子体特征的动态演变以及熔池的传热和流动行为。Wu 等<sup>[14]</sup>基于 COMSOL 流动分析软件建立了气体保护金属极电弧焊(Gas metal arc welding, GMAW)熔池三维数值模型,研究了外加不同强度作用下纵向磁场下熔池的传热与流动。Jeong 等<sup>[15]</sup>建立了铝合金变极性气体保护钨极电弧焊(Gas tungsten arc welding, GATW)的数值分析模型,提出了一种通过模拟确定热输入效率的方法,表明了不同极性对热输入效率的影响。Du 等<sup>[16]</sup>建立了铝合金变极性钨极气体保护焊熔池三维模型,预测了熔池表面的自由变形、熔池的传热与流动。赵光喜等<sup>[17]</sup>建立了交流脉冲 TIG 熔池三维模型模拟了焊波纹路的形成,但未考虑送丝过程。

上述及现有的电弧增材制造及电弧熔积数值模拟研究主要对直流及变极性电流条件下的熔池行为进行分析,在电弧增材及电弧熔积过程中,采用交流

脉冲电源可以降低热输入,从而增加焊接成形质量,但目前交流脉冲条件下的 TIG 电弧增材制造过程中熔池行为分析的研究较少见报道。因此本文建立了交流脉冲 TIG 电弧增材熔池连续熔积三维瞬态数值模型,分析熔池传热与流动的动态变化机理与规律,研究可为交流脉冲条件下的 TIG 电弧增材制造成形提供理论依据与参考。

## 1 数值模型

### 1.1 基本假设

为简化计算,做出如下假设:

- 1) 熔池中熔融金属为不可压缩且为层流的牛顿流体<sup>[18]</sup>;
- 2) 电弧热效应以能量和动量源项的形式加载<sup>[19]</sup>;
- 3) 送丝过程简化为熔滴以一定的直径与频率在熔池内部形成<sup>[20]</sup>;
- 4) 忽略金属蒸发而引起的质量与能量损失<sup>[21]</sup>。

### 1.2 控制方程

基于上述假设,求解式(1)~(3)控制方程:

质量守恒方程:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V}) = S_m \quad (1)$$

式中: $t$ 表示时间, $\rho$ 为密度, $\vec{V}$ 表示速度矢量, $S_m$ 表示质量源项。

动量守恒方程(N-S方程):

$$\frac{\partial \rho \vec{V}}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} \vec{V}) = \nabla \cdot (\mu \nabla \vec{V}) - \nabla p + S_M \quad (2)$$

式中: $\mu$ 为粘度, $p$ 为压强, $S_M$ 表示动量源项。

能量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{V} H) = \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (3)$$

式中: $H$ 表示焓, $k$ 表示热导率, $T$ 表示温度, $S_E$ 表示能量源项。

通过VOF (Volume of fluid)法可对气液表面进行追踪,如公式(4)所示:

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

式中:  $F$  为流体的体积分数, 对于熔融金属-氩气两相流模型, 当  $F$  为 1 时则表示单元充满熔融金属液体, 当  $F$  为 0 时, 表示单元全为氩气, 当  $F$  为 0 到 1 之间时, 表示单元里存在熔融金属与氩气之间的界面。

焓-孔隙模型可用来跟踪固液界面, 将糊状区视为多孔介质模型。其中, 材料的焓值可通过式(5)定义:

$$H = h_{\text{ref}} + \int_{T_{\text{ref}}}^T C_p + F_1 h_{\text{sf}} \quad (5)$$

式中:  $h_{\text{ref}}$  是参考焓值,  $T_{\text{ref}}$  为参考温度,  $C_p$  为比热容,  $h_{\text{sf}}$  为材料相变潜热,  $F_1$  为液体体积分数, 其中, 熔化过程中金属中液相体积分数通过式(6)定义:

$$F_1 = \begin{cases} 0 & (T \leq T_s) \\ \frac{T - T_s}{T_L - T_s} & (T_s \leq T \leq T_L) \\ 1 & (T > T_L) \end{cases} \quad (6)$$

式中:  $T_s$  和  $T_L$  分别为固相温度和液相温度, 当材料温度  $T \leq T_s$ , 认为材料为固相; 当材料温度  $T > T_L$ , 认为材料为液相; 否则为固-液糊状区域。

### 1.3 源项

#### 1.3.1 质量源项

数值模型中送丝过程简化为熔滴以一定的直径与频率在熔池表面形成, 因此忽略了熔滴长大与滴入过程, 熔滴以直径为 1.6 mm 小球在  $Z=0$  截面处以一定的频率生成<sup>[8-9]</sup>。熔滴质量源项可由式(7)计算:

$$s_m = \rho \frac{A_w V_w}{\frac{4}{3} \pi R_d^3} \quad (7)$$

式中:  $V_w$  为丝材送丝速度,  $A_w$  为丝材的横截面积,  $R_d$  为生成熔融熔滴的半径。

#### 1.3.2 动量源项

模型中动量源项由重力  $G$ 、电磁力  $F_{\text{JB}}$  与浮力  $F_{\text{buoyancy}}$  组成, 如式(8)所示:

$$S_M = G + F_{\text{JB}} - F_{\text{buoyancy}} \quad (8)$$

通过 Boussinesq 假设描述密度变化对浮力的影响, 计算方法如式(9)所示:

$$F_b = \rho \beta (T - T_{\text{ref}}) g \quad (9)$$

式中:  $\beta$  为热膨胀系数,  $g$  为重力加速度。

其中电磁力的计算可参考文献[22], 电磁力在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  方向的表达式如式(10)所示:

$$\begin{cases} F_{\text{JBx}} = -\frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right] \cdot \\ \left(1 - \frac{Z}{L_m}\right) \frac{(x - V_T t)}{r} \\ F_{\text{JBy}} = -\frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi^2 \sigma_j^2 r} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right) \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right] \cdot \\ \left(1 - \frac{Z}{L_m}\right) \frac{y}{r} \\ F_{\text{JBz}} = -\frac{\mu_0 I^2(t)}{4\pi^2 L_m r^2} \left[1 - \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right] \left(1 - \frac{Z}{L_m}\right) \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $\mu_0$  为磁导率,  $V_T$  为焊接速度,  $t$  为焊接时长,  $r$  为某点到焊枪中心的距离,  $L_m$  为基板厚度,  $\sigma_j$  为电流分布半径, 其取值与电流表达式  $I(t)$  相关, 如式(11)所示:

$$\sigma_j = 0.5342I(t)^{0.2684} \quad (11)$$

#### 1.3.3 能量源项

传递到熔池的热量由两个部分构成, 分别为电弧热  $Q_a$  与高温熔滴携带的热量  $Q_{\text{drop}}$ , 如式(12)所示:

$$S_E = Q_a + Q_{\text{drop}} \quad (12)$$

因双椭球形热源模型更为符合实际且误差较小, 因而广泛应用于电弧熔积数值模拟当中<sup>[23]</sup>, 因此本模型采用双椭球体热源分布模型作为电弧热源模型, 双椭球体热源分布可如式(13)所示:

$$Q_a = \begin{cases} \frac{6\sqrt{3}f_i \eta UI(t)}{\pi a_f b c \sqrt{\pi}} \exp \times \\ \left( \frac{-3(x - V_T t)^2}{a_f^2} + \frac{-3y^2}{b^2} + \frac{-3z^2}{c^2} \right) \\ \frac{6\sqrt{3}f_r \eta UI(t)}{\pi a_r b c \sqrt{\pi}} \exp \times \\ \left( \frac{-3(x - V_T t)^2}{a_r^2} + \frac{-3y^2}{b^2} + \frac{-3z^2}{c^2} \right) \end{cases} \quad (13)$$

式中:  $f_i$  和  $f_r$  分别为前半椭球和后半椭球热输入分布系数;  $a_f$  表示前半椭球的半轴长度;  $a_r$  表示后半椭球的半轴长度;  $b$  表示前半椭球于后半椭球宽度;  $c$  表示前半椭球于后半椭球厚度;  $\eta$  为电弧热效率, 当电流处于 EN 阶段时,  $\eta$  取 0.72<sup>[8]</sup>, 当电流处于 EP 阶段时,  $\eta$  取 0.4<sup>[24]</sup>;  $Q_{\text{drop}}$  表示高温熔滴携带的热量, 假设熔滴温度为 1200 K,  $Q_{\text{drop}}$  的计算方法如式(14)所示:

$$Q_{\text{drop}} = S_m \left( \Delta H + \int_{T_{\text{ref}}}^{1200} c_p dT \right) \quad (14)$$

### 1.4 物理模型及边界条

本模型计算域如图 1 所示,为增加计算效率,采用对称模型,其中 F 面为对称面。数值模拟与试验使用的材料为 6061 铝合金,6061 热物性参数参考文献 [15,18,25]。计算域大小设定为 70 mm×10 mm×15 mm,包括基板和其上方空气域。使用 ICEM 软件进行网格划分,采用六面体结构网格,最小网格尺寸为 0.3 mm×0.3 mm。

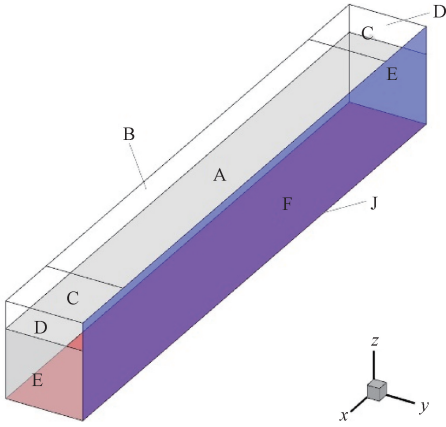


图 1 熔池计算域

Fig. 1 Numerical model of pool

电弧增材制造试验平台主要由逆变式交直流脉冲氩弧焊机 (AlphaWSE400W)、氩弧焊送丝机、JMC-F2-A6 多轴运动平台及其控制系统、气体保护设备组成。试验所用焊丝直径为 1.2 mm,焊接速度为 4 mm/s,保护气体流量为 18 L/min,电流波形如图 2 所示,其中脉冲频率为 2.5 Hz,交流频率为 20 Hz,交流正接 (Electrode positive, EP) 阶段的占空比 30%,电流大小为 100~200 A。

交流脉冲电弧增材连续熔积模型中内部边界条件包括熔池自由边界散热与辐射、熔池自由边界与保护气 (氩气) 相互接触的作用力、表面张力、电弧压力、电弧剪切力以及马兰戈尼力。

熔池边界散热与辐射可表示为:

$$q_{\text{loss}} = -h_{\text{conv}}(T - T_{\text{ref}}) - \varepsilon K_b(T^4 - T_{\text{ref}}^4) \quad (15)$$

式中:  $h_{\text{conv}}$  为热对流系数,  $\varepsilon$  为辐射系数,  $K_b$  为 Stefan-Boltzmann 常数。

熔池自由表面张力可表示为:

$$p_{\text{st}} = \gamma \kappa \quad (16)$$

式中:  $\gamma$  为表面张力系数,  $\kappa$  为熔池表面某一位置的曲率。

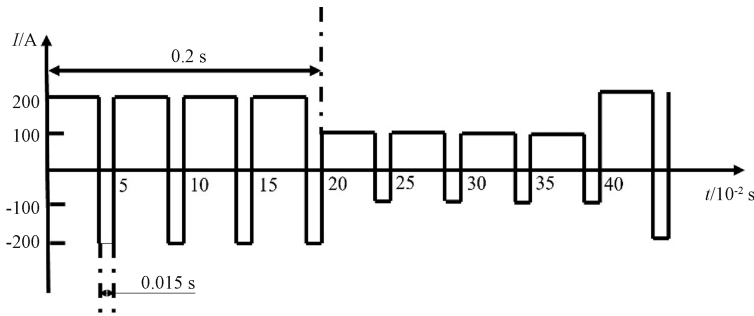


图 2 电流波形

Fig. 2 Current waveform

电弧压力服从高斯分布,如式 (17) 所示:

$$P_{\text{arc}} = \frac{\mu_0 I^2(t)}{2\pi\sigma_p^2} \exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_p^2}\right) \quad (17)$$

式中:  $\mu_0$  真空磁导率,  $\sigma_p$  为电弧压力分布参数,其取值与电流相关,如式 (18) 所示:

$$\sigma_p = 1.4043 + 0.000174 \cdot I(t) \quad (18)$$

电弧剪切力服从双椭球分布,可以表示为:

$$\tau_{\text{arc}} = 0.069 \cdot I(t)^{1.5} \cdot g_a(r) \cdot \vec{\tau} \quad (19)$$

式中:  $\vec{\tau}$  为切应力单位矢量,  $g_a(r)$  为分布函数,其表达如式 (20) 所示:

$$g_a(r) = \begin{cases} a_{g1}r^3 + a_{g2}r^3 + a_{g3}r + a_{g4} & (r \leq r_d) \\ a_{g4} \exp\left(-\frac{r}{a_{g6}}\right) + a_{g7} & (r > r_d) \end{cases} \quad (20)$$

式中:  $r_d$  为电弧剪切力分布半径,  $a_{g1} \sim a_{g7}$  取值见文献 [24]。

马兰戈尼力可以表示为:

$$\tau_m = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial S} \quad (21)$$

式中:  $\frac{\partial \gamma}{\partial T}$  为表面张力梯度系数,  $\frac{\partial T}{\partial S}$  为熔池表面附近的温度梯度。

熔池表面辐射与散热为表面边界条件,表面张力、电弧压力、电弧剪切力、马兰戈尼力为表面力,需通过连续表面力法(Continuous surface force, CSF)将表面热源与表面力转化为体积热源  $Q_{vi}$  与体积力  $F_{vs}$ ,以源项的形式添加。连续表面力法可表示为:

$$F_{vs} = F_s \nabla F \frac{(1-F)\rho_1 + F\rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \quad (22)$$

$$Q_{vi} = q_{loss} \nabla F \frac{(1-F)\rho_1 + F\rho_2}{\frac{1}{2}(\rho_1 + \rho_2)} \quad (23)$$

式中: $F_s$  为表面力, $\rho_1$  和  $\rho_2$  分别表示气相和液相温度。

保护气体速度计算方法如式(24)所示:

$$V_z = \frac{2Q_{Ar}}{\pi} \frac{R_n^2 + r^2 + (R_n^2 - R_w^2) \frac{\ln(r/R_n)}{\ln(R_n/R_w)}}{R_n^4 - R_w^4 + \frac{(R_n^2 - R_w^2)^2}{\ln(R_n/R_w)}} \quad (24)$$

式中: $V_z$  表示保护气体速度, $Q_{Ar}$  表示氩气流量, $R_n$  表示保护气喷嘴内径, $R_w$  表示钨极半径。

数值模型外部边界条件如表1所示,其中A面为速度入口,B、C、D面为压力出口,F面为对称面,E、J为壁面,环境温度为300 K,大气压为101325 Pa。

表1 边界条件

Table 1 Boundary conditions

Boundary name(Type)	$T$	$V$	$P$
A (Velocity inlet)	300 K	Formula (24)	101325 Pa
B、C、D (Outflow)	300 K	$\partial V/\partial n=0$	101325 Pa
F (Symmetry)	$\partial T/\partial n=0$	$\partial V/\partial n=0$	-
E、J (Wall)	Formula (15)	-	-

## 2 结果与讨论

### 2.1 交流脉冲 TIG 电弧增材熔池传热传质行为

图3(a)~3(i)为电弧熔积4 s后不同时刻下脉冲频率为2.5 Hz条件熔池整体形貌,可以看出在熔积4 s后,焊道有着明显的鱼鳞纹,熔池温度总体呈现中心温度高,而外侧与尾部随着距离中心越远而逐渐降低分布。当熔积时长从4 s增至4.20 s时,如图3(a)~3(e),即电流处于极大值周期内,可以发现熔池最高温度与熔池体积随着熔积时长增加而增加,熔池形貌由中心凸起逐渐向四周凹陷,当处于4.20 s时刻时,如图3(e),焊道的一道鱼鳞纹形成,可见鱼鳞纹路数跟脉冲周期相关。当熔积时长从4.20 s增至4.40 s时,如图3(e)~3(i),即在电流处于极小值周期内,熔池最高温度与熔池体积随着熔积时长增加

而减小,熔池形貌由中心向四周凹陷逐渐向四周凸起。当熔积时长从4.40 s增至4.45 s时,如图3(i)~3(j),熔池最高温度和熔池体积再次增加,熔池再次凹陷,可以发现此时刻熔池形貌与4.05 s时刻(图3b)形貌相同,即进入下一个脉冲周期。由此可见,熔池形貌与温度场随脉冲周期而呈周期性变化,当电流处于脉冲极大值时,熔池具有较高的温度,熔池形貌由中心向四周凹陷,而当电流处于脉冲极小值时,熔池温度降低,熔池形貌向四周凸起,正是因为熔池形貌与温度场呈周期性变化,使得焊道具有规律性的鱼鳞纹路。

图4(a)~4(i)为XZ截面( $X=0$ )在4 s后不同时刻的熔池速度与温度云图,可以看到,熔滴在熔池内部生成,熔池内部流动呈现从熔池中心向后方低温区流动,这是因为熔池中心温度明显高于熔池后方温度,所以在Marangoni力的作用下,熔池内部由熔池中心向熔池后方的低温区流动。当熔积时长从4 s增至4.20 s时,如图4(a)~4(e),熔池整体流动趋势为由熔池中心向下沉并在熔池尾部形成回流,熔池由中心往下沉是因为此时段电流处于脉冲极大值,使得此时段熔池温度持续升高,根据文献[15]可知,6061铝合金的表面张力系数为 $-0.000035 \text{ N}\cdot\text{m}^{-1}\cdot\text{K}^{-1}$ ,熔池温度越高,表面张力系数越小,所以此时段的表面张力减弱,同时电弧压力与电磁力随着电流的变化而变化,由式(17)与式(10)可知熔池所受的电弧压力与电磁力跟电流呈现正相关,电流处于极大值使得此时熔池中心受到的较强的电弧压力与电磁力,也使得在熔池中心电弧压力与电磁力起主导作用,所以在电弧压力与电磁力共同作用下,熔池中心受到挤压而下沉形成凹陷的弧坑,这也是图3(c)~3(e)所示的当电流处于脉冲极大值时,熔池形貌由中心向四周凹陷的原因。当熔积时长从4.20 s增至4.40 s时刻时,如图4(e)~4(i),此时段电流处于脉冲极小值,电弧压力与电磁力及熔池温度随着电流的减弱而减小与降低,熔池的表面张力系数因熔池温度的减低而增大,使得熔池的表面张力增大,在表面张力的作用下熔池向上收缩,所以导致了图3(f)~3(i)中,电流处于极小值周期内,熔池形貌由中心向四周凹陷逐渐向四周凸起的变化。当熔积时长为4.45 s时(图4i),熔池流动状态与4.05 s时(图4b)相同,从而进入到下一个脉冲周期的循环,由此可见,熔池的流动状态随着电流脉冲周期的变化而变化,当电流处于脉冲极大值时,熔池中心电弧压力占主导地位,熔池中心受

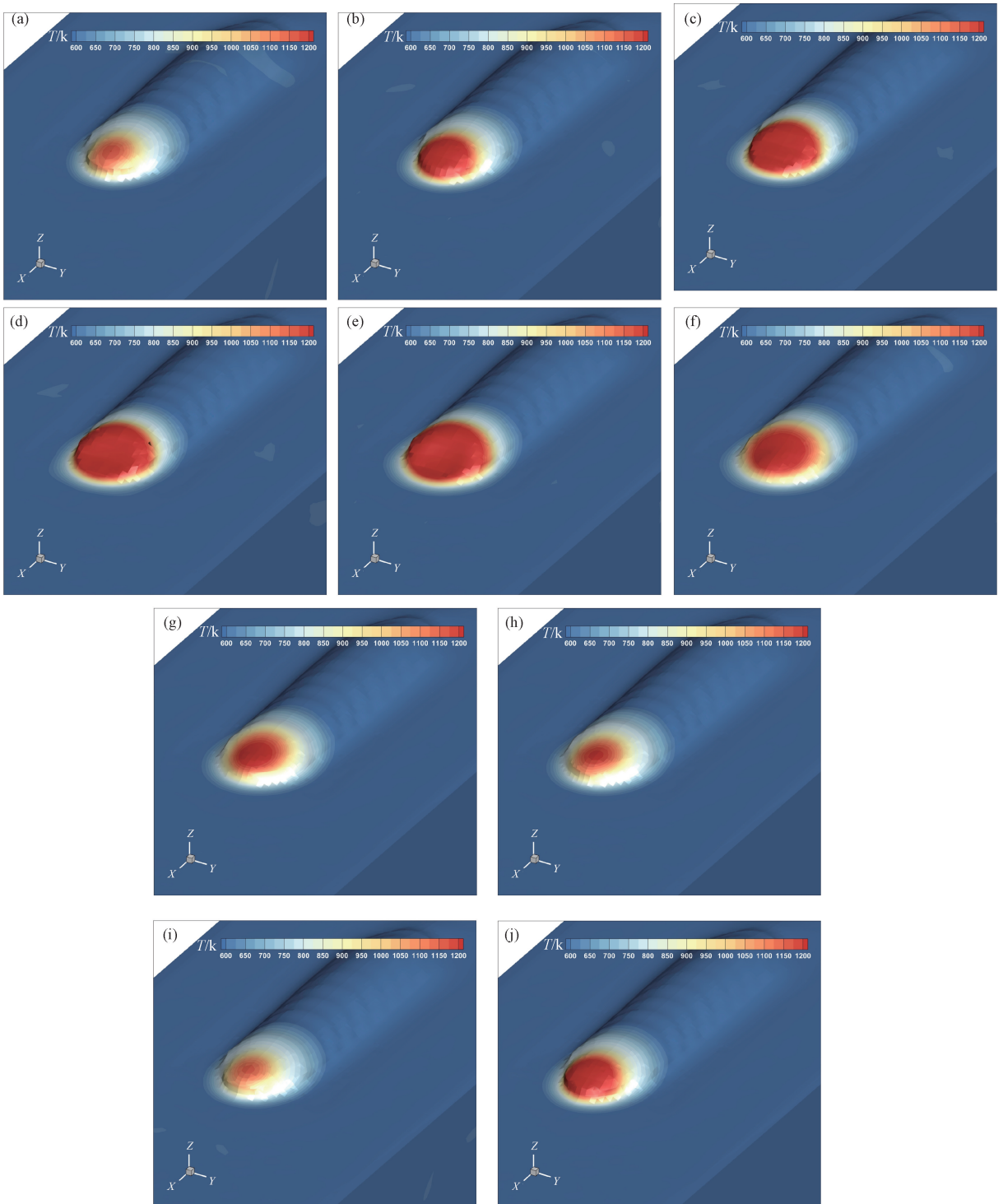


图 3 不同时刻下熔池及焊道形貌

(a) 4.00 s; (b) 4.05 s; (c) 4.10 s; (d) 4.15 s; (e) 4.20 s; (f) 4.25 s; (g) 4.30 s; (h) 4.35 s; (i) 4.40 s; (j) 4.45 s  
 Fig. 3 Molten pool and weld bead morphology at different time

(a) 4.00 s; (b) 4.05 s; (c) 4.10 s; (d) 4.15 s; (e) 4.20 s; (f) 4.25 s; (g) 4.30 s; (h) 4.35 s; (i) 4.40 s; (j) 4.45 s

到挤压而下沉形成凹陷的弧坑, 电流处于脉冲极小值时, 熔池向上收缩形成凸起。

为更加清晰地表示脉冲条件下交流熔池形貌、温度与流动, 沿熔池中心作如图 5 所示的路径 1 与路径

2, 分别提取 4、4.10、4.20、4.30 和 4.40 s 下两条路径上的熔池自由表面高度、温度与速度。

图 6 为路径 1 上熔池自由表面高度与温度分布, 可以看出焊道有着规律性的鱼鳞纹路, 当电流由脉冲极

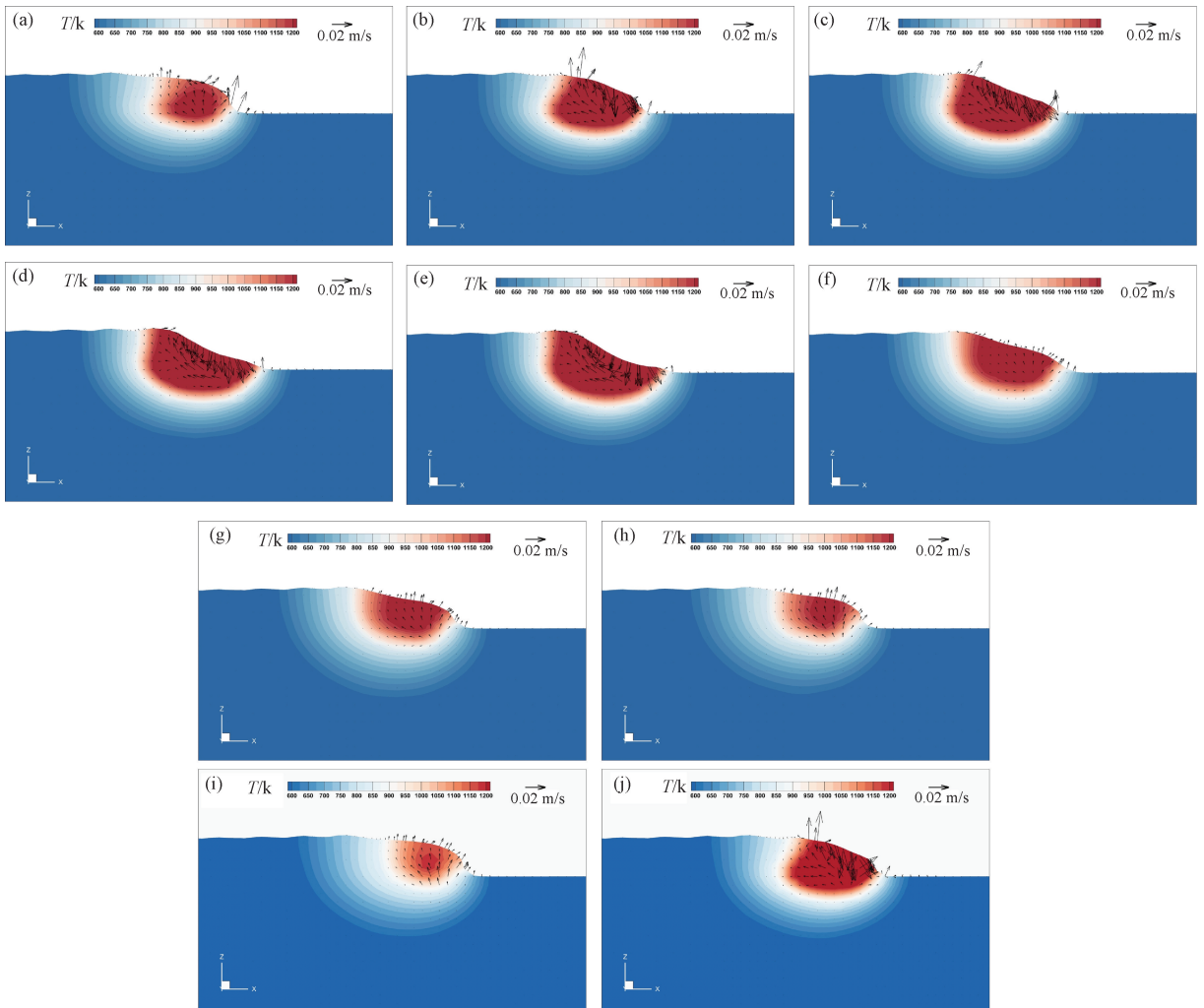


图4 不同时刻下熔池速度场与温度场

(a) 4.00 s; (b) 4.05 s; (c) 4.10 s; (d) 4.15 s; (e) 4.20 s; (f) 4.25 s; (g) 4.30 s; (h) 4.35 s; (i) 4.40 s; (j) 4.45 s

Fig. 4 Velocity field and temperature field of Melt pool at different time

(a) 4.00 s; (b) 4.05 s; (c) 4.10 s; (d) 4.15 s; (e) 4.20 s; (f) 4.25 s; (g) 4.30 s; (h) 4.35 s; (i) 4.40 s; (j) 4.45 s

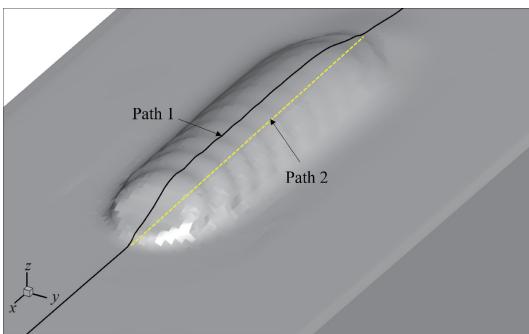


图5 路径示意图

Fig. 5 Schematic diagram of path

大值变化为脉冲极小值时,一个鱼鳞纹路形成;熔池最高温度出现在熔池中心,熔池后方的温度明显小于熔池中心,这也是图4所示熔池内部流动状态为由熔

池中心向熔池后方流动的原因。熔池最高温度随着焊接时长增加而变化,当处于电流极大值时最后时刻时,熔池温度达到最大,当处于电流极小值时最后时刻时,熔池温度达到最低。

图7为路径1与路径2上的速度分布,可以看出在路径1上熔池表面速度产生明显的波动,这是因为熔池表面同时受到表面张力、Marangoni力、电弧剪切力等多个瞬态力的作用,而这些瞬态力随着熔池温度、熔池形貌动态变化,所以导致了路径1上熔池表面出现速度波动。路径1上熔池自由表面速度随着焊接时长的增加而变化,总体上处于电流脉冲极大值段时的熔池速度大于处于电流脉冲极小值段时熔池速度,这是因为处于电流脉冲极大值段时,熔池温度及熔池所受到的电弧压力、电磁力、Marangoni力

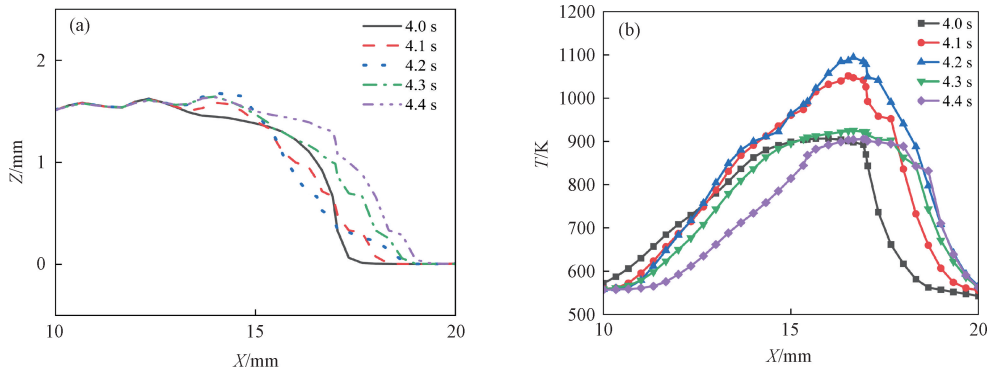


图 6 路径 1 自由表面的高度(a)与温度(b)

Fig. 6 Height (a) and temperature (b) of free surface of path 1

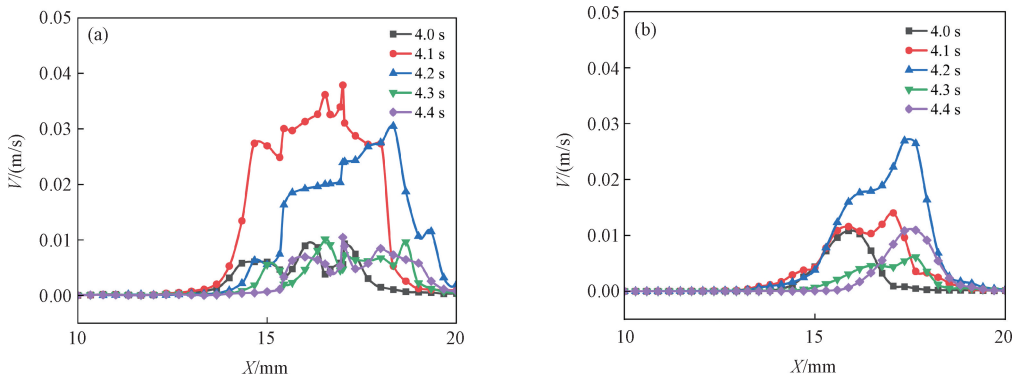


图 7 熔池自由表面速度及熔池内部速度 (a) 路径 1 熔池自由表面速度; (b) 路径 2 熔池内部速度

Fig. 7 Velocity of free surface and internal flow of the molten pool

(a) free surface velocity along path 1 in the molten pool; (b) internal flow velocity along path 2 in the molten pool

增大,使得在电流脉冲极大值时段熔池具有较快的流动速度。路径 1 上 4.10 s 时刻明显大于 4.20 s 时刻是因为从图 3(e) 可知,4.20 s 时刻时熔池表面具有较强的形变,由式(16)可知,表面张力除了跟熔池温度相关,还与熔池表面曲率相关,较强的形变导致较大的表面曲率,使得表面张力增加以对抗电弧压力,所以导致了 4.20 s 时刻的熔池速度弱于 4.10 s 时刻的熔池速度。在路径 2 上熔池内部速度也随着焊接时长的增加而变化,在熔池内部,熔池主要受到 Marangoni 力的作用,Marangoni 力与温度梯度呈正相关,如图 4 所示,电流处于脉冲极大值时的温度梯度大于脉冲极小值,因此熔池内部流速在脉冲极大值阶段大于脉冲极小值阶段。

## 2.2 试验验证

图 8 为相同工艺下的试验焊道形貌与模拟焊道形貌对比,对比发现模拟与试验所得焊道均有着规律且明显的鱼鳞纹路,且试验与模拟所得焊道鱼鳞纹路相吻合。图 9 为模拟所得焊道截面轮廓与试验焊道

截面轮廓对比,可以发现模拟与试验轮廓有着较为良好的吻合,证明了数值模拟的可靠性。但是可以发现试验结果与模拟还存在着一定的误差,这是因为现实中交流脉冲电弧变化较为复杂,数值模型对交流脉冲电弧热源进行了一定的简化。其次,数值模型忽略了母材及焊丝氧化物对熔池的传热传质的影响,同时 6061 的热物性参数大多来自文献中试验测定,与试验中所用的 6061 铝合金热物性参数不能完全一致。

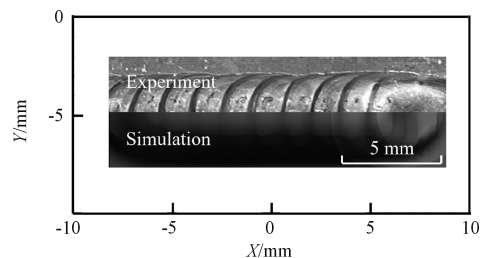


图 8 试验与模拟焊道形貌对比

Fig. 8 Comparison of experimental and simulated weld bead morphology

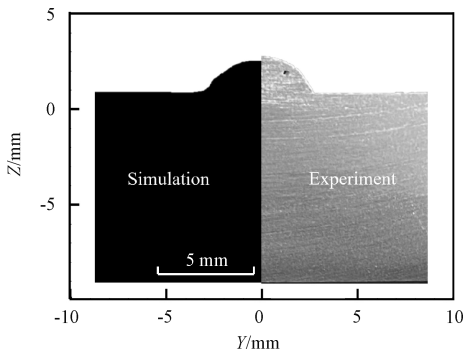


图9 试验与模拟焊道轮廓对比

Fig. 9 Comparison of experimental and simulated weld bead profiles

### 3 结论

1) 熔池形貌与温度场随脉冲周期而呈周期性变化,当电流处与脉冲极大值时,熔池具有较高的温度,熔池形貌由中心向四周凹陷,而当电流处与脉冲极小值时,熔池温度降低,熔池形貌向四周凸起,正是因为电流脉冲的周期变化,从而形成了焊道明显而规律的鱼鳞纹;

2) 熔池的流动状态随着电流脉冲周期的变化而变化,当电流处于脉冲极大值时,熔池中心电弧压力与电磁力占主导地位,熔池中心受到挤压而下沉形成凹陷的弧坑,电流处于脉冲极小值时,电弧压力与电磁力减弱,表面张力增加,熔池向上收缩形成凸起。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Jafari D, Vaneker T H J, Gibson I. Wire and arc additive manufacturing: Opportunities and challenges to control the quality and accuracy of manufactured parts[J]. *Materials & Design*, 2021, 202: 109471.
- [ 2 ] 田根, 王文宇, 常青, 等. 电弧增材制造技术研究现状及展望[J]. *材料导报*, 2021, 35(23): 23131-23141.  
TIAN Gen, WANG Wen-yu, CHANG Qing, et al. Research progress and prospect of wire and arc additive manufacture [J]. *Materials Reports*, 2021, 35(23): 23131-23141.
- [ 3 ] 刘洋, 周建平, 张晓天. 增材制造技术在载人航天工程中的应用与展望[J]. *北京航空航天大学学报*, 2023, 49(1): 83-91.  
LIU Yang, ZHOU Jian-ping, ZHANG Xiao-tian, et al. Application and prospect of additive manufacturing technology in manned space engineering[J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2023, 49(1): 83-91.
- [ 4 ] 李春风, 肖笑, 尹玉祥, 等. TIG 电弧增材熔池行为的数值模拟研究现状[J]. *材料热处理学报*, 2020, 41(7): 25-32.  
LI Chun-feng, XIAO Xiao, YIN Yu-xiang, et al. Research status of numerical simulation of TIG arc additive molten pool behavior [J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2020, 41(7): 25-32.
- [ 5 ] Zhou X, Zhang H, Wang G, et al. Three-dimensional numerical simulation of arc and metal transport in arc welding based additive manufacturing[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2016, 103: 521-537.
- [ 6 ] 周祥曼, 田启华, 杜义贤, 等. 外加横向磁场作用电弧增材成形过程中的传热传质仿真[J]. *机械工程学报*, 2018, 54(12): 193-206.  
ZHOU Xiang-man, TIAN Qi-hua, DU Yi-xian, et al. Simulation of heat and mass transfer in arc welding based additive forming process with external transverse magnetic field[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2018, 54(12): 193-206.
- [ 7 ] Zhou X, Fu Z, Zhou X, et al. Numerical simulation of heat and mass transient behavior during WAAM overlapping deposition with external deflection magnetic field[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2024, 218: 124780.
- [ 8 ] 周祥曼, 王礴允, 袁有录, 等. 焊接速度对电弧增材熔池流动及焊道形貌影响的数值模拟研究[J]. *机械工程学报*, 2022, 58(10): 103-111.  
ZHOU Xiang-man, WANG Bo-yun, YOU You-lu, et al. Numerical simulation study of the effects of travel speed on the molten pool flow and weld bead morphology of WAAM [J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2022, 58(10): 103-111.
- [ 9 ] 周祥曼, 傅子川, 柏兴旺, 等. 送丝速度对电弧增材熔池流动及焊道成形影响的数值模拟[J]. *焊接学报*, 2023, 44(5): 109-116.  
ZHOU Xian-man, FU Zi-chuan, BAI Xing-wang, et al. Numerical simulation of the effect of wire feeding speed on the flow of arc additive molten pool and weld bead WAAM [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2023, 44(5): 109-116.
- [ 10 ] 周祥曼, 王印权, 王礴允, 等. 搭接中心距对电弧增材熔池流动及熔积层形貌影响的数值模拟[J]. *材料热处理学报*, 2024, 45(3): 195-204.  
ZHOU Xian-man, WANG Yin-quan, WANG Bo-yun, et al. Numerical simulation of effect of overlapping distance on molten pool

- flow and deposited layer morphology of WAAM[J]. *Transactions of Materials and Heat Treatment*, 2024, 45(3):195–204.
- [11] Chen X, Wang C, Ding J, et al. A three-dimensional wire-feeding model for heat and metal transfer, fluid flow, and bead shape in wire plasma arc additive manufacturing[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2022, 83:300–312.
- [12] Zhao W, Tashiro S, Murphy A B, et al. Deepening the understanding of arc characteristics and metal properties in GMAW-based WAAM with wire retraction via a multi-physics model[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 97:260–274.
- [13] Zhao W, Wei Y, Tashiro S, et al. Numerical investigations of arc plasma characteristic parameters evolution and metal properties in GMAW-based WAAM of Al alloy with an integrated model[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2023, 99:321–337.
- [14] Wu C, Han S, Xue D, et al. On the fluid behavior and stability of Ti-6Al-4V titanium alloy GMAW molten pool: Effect of the longitudinal magnetic field[J]. *Modern Physics Letters B*, 2021, 35(17):2150283.
- [15] Jeong H, Park K, Cho J. Numerical analysis of variable polarity arc weld pool[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2016, 30(9):4307–4313.
- [16] Du J, Zhao G, Wei Z. Effects of welding speed and pulse frequency on surface depression in variable polarity gas tungsten arc welding of aluminum alloy[J]. *Metals (Basel)*, 2019, 9(2):114.
- [17] 赵光喜, 程祥, 杨先海, 等. 交流脉冲 TIG 焊波成形过程数值分析(英文)[J]. *稀有金属材料与工程*, 2023, 52(1):133–138.  
ZHAO Guang-xi, CHENG Xiang, YANG Xian-hai, et al. Numerical analysis of ripple formation process during-pulsed TIG welding [J]. *Rare Metal Materials and Engineering*, 2023, 52(1):133–138.
- [18] Zhao W, Wei Y, Long J, et al. Modeling and simulation of heat transfer, fluid flow and geometry morphology in GMAW-based wire arc additive manufacturing[J]. *Welding in the World*, 2021, 65(8):1571–1590.
- [19] Cao H, Huang R, Yi H, et al. Asymmetric molten pool morphology in wire-arc directed energy deposition: Evolution mechanism and suppression strategy[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 59:103113.
- [20] Hu Z, Hua L, Qin X, et al. Molten pool behaviors and forming appearance of robotic GMAW on complex surface with various welding positions[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2021, 64:1359–1376.
- [21] Ni M, Qin X, Hu Z, et al. Forming characteristics and control method of weld bead for GMAW on curved surface[J]. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2022, 119(3/4):1883–1908.
- [22] 武传松, 陈定华, 吴林. TIG 焊接熔池中的流体流动及传热过程的数值模拟[J]. *焊接学报*, 1988(4):263–269.  
WU Chuan-song, CHEN Ding-hua, WU Lin. Numerical simulation of the fluid flow and heat transfer in 'TIG welding molten pools [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 1988(4):263–269.
- [23] 朱志明, 符平坡, 杨中宇, 等. 电弧焊接数值模拟中热源模型的研究与发展[J]. *工程科学学报*, 2018, 40(4):389–396.  
ZHU Zhi-ming, FU Ping-po, YANG Zhong-yu, et al. Research and development of a heat-source model in numerical simulations for the arcwelding process[J]. *Chinese Journal of Engineering*, 2018, 40(4):389–396.
- [24] Du J, Zhang Y, Wei Z, et al. Offset impacting of a liquid aluminum droplet train on a molten pool on a horizontally moving substrate during TIG-assisted droplet deposition manufacturing[J]. *Additive Manufacturing*, 2022, 58:103039.
- [25] Guo L, Li Y, Geng S, et al. Numerical and experimental analysis for morphology evolution of 6061 aluminum alloy during nanosecond pulsed laser cleaning[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2022, 432:128056.