● 试验研究 Experimental Research ●
DOI:10.16410/j.issn1000-8365.2023.3175

# 倾斜基面电弧增材制造熔池形貌演变机制研究

黄如峰[1,2],伊 浩[1,2],曹华军[1,2],杨海欧[3]
(1. 重庆大学 机械与运载工程学院,重庆 400030; 2. 重庆大学 机械传动国家重点实验室,重庆 400044; 3. 西北工业大学 凝固技术国家重点实验室,陕西 西安 710072)

**摘 要**:电弧增材制造技术凭借其制造周期短、制造零件无尺寸限制等优点广泛应用于航空航天、武器装备等领域。而电弧增材制造技术实现复杂金属零件直接成形的基础是沉积过程中堆积焊道的形貌具有均匀稳定的重复再现性。但电弧增材制造是一个涉及电场、磁场等多物理场耦合的过程,当金属液滴的沉积行为发生在倾斜基面上,熔池在重力诱导下容易发生失稳流淌,造成非对称的焊道形貌,降低零件的成形精度。基于此,本文采用实验与仿真结合的方法开展电弧增材制造过程中非对称熔池的诱发机理与熔池形貌演变机理研究,探究倾斜基面上焊道形貌的成形规律。研究发现,随着基面倾角的增加,焊道偏移量逐渐增大(0、0.454 9、1.937 4、2.331 9 mm),熔池深度逐渐减小(1.935、1.763、1.684、1.576 mm),成形焊道非对称程度逐渐增加;进一步基于实验及数值仿真的方式研究了沉积过程中非对称熔池形貌的演变规律,揭示了重力诱导下表层金属流体的不对称流动是导致焊道形貌恶化的诱因,为后续非对称焊道形貌抑制方法的研究及三维复杂金属构件的高质量成形提供指导。

**关键词**:电弧增材制造;倾斜基面;非对称熔池;熔池行为;演变机制
**中图分类号**:TG156.88; TB114.2 **文献标识码**:A **文章编号**:1000-8365(2023)09-0821-10

# Research on the Morphology Evolution Mechanism of Molten Pool on Inclined Surface in Wire Arc Additive Manufacturing

HUANG Rufeng[1,2], YI Hao[1,2], CAO Huajun[1,2], YANG Haiou[3]
(1. College of Mechanical and Vehicle Engineering, Chongqing University, Chongqing 400030, China; 2. State Key Laboratory of Mechanical Transmissions, Chongqing University, Chongqing 400044, China; 3. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract**: Wire arc additive manufacturing technology is widely used in aerospace, weapon equipment and other fields due to its advantages of short manufacturing cycle and no size limitation of manufacturing parts. The basis of wire arc additive manufacturing technology to realize the direct forming of complex metal parts is that the morphology of the welding bead has uniform and stable repeatability in the deposition process. However, wire arc additive manufacturing is a process involving multiple physical fields such as electric field and magnetic field coupling. When the deposition behavior of metal droplets occurs on non-horizontal surface, the molten pool is prone to destabilizing flow under gravity induction, resulting in asymmetric weld bead topography, reducing the forming accuracy of parts, and even leading to forming defects. Based on this, the induction mechanism and morphology evolution mechanism of the asymmetric molten pool in the wire arc additive manufacturing process were studied by combining experiments and simulations, and the forming characteristics of the weld bead was explored. It was found that with increasing plate angle, the deflection of the weld pass increased gradually (0, 0.454 9, 1.937 4, 2.331 9 mm), the depth of the molten pool decreased gradually(1.935, 1.763, 1.684, 1.576 mm), and the degree of asymmetry of the formed weld pass increased gradually. In addition, the evolution law of the asymmetric molten pool morphology during the deposition process was studied by means of experiments and numerical simulations, and it was revealed that the asymmetric flow of surface metal fluid induced by gravity is the cause of the deterioration of

**收稿日期**:2023-06-21
**基金项目**:国家自然科学基金(52375306,52005059);装备预研教育部联合基金(8091B032107);凝固技术国家重点实验室开放课题(SKLSP202217)
**作者简介**:黄如峰,1998 年生,硕士生.研究方向为电弧增材制造研究.Email: 202007021154t@cqu.edu.cn
**通讯作者**:伊 浩,1988 年生,博士,副教授.研究方向为增材制造与绿色制造研究.Email: haoyi@cqu.edu.cn
**引用格式**:黄如峰,伊浩,曹华军,等.倾斜基面电弧增材制造熔池形貌演变机制研究[J].铸造技术,2023,44(9): 821-830.
HUANG R F, YI H, CAO H J, et al. Research on the morphology evolution mechanism of molten pool on inclined surface in wire arc additive manufacturing[J]. Foundry Technology, 2023, 44(9): 821-830.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

the weld bead morphology. This study provides useful guidance for the subsequent research on the suppression of asymmetric pass morphology and the high quality forming of three-dimensional complex metal components.

**Key words**: wire arc additive manufacturing; inclined surface; asymmetric molten pool; molten pool behavior; evolution mechanism

增材制造技术(additive manufacturing, AM),也被称为“3D打印”,作为一种制造成本低、成形效率高的绿色化制造技术,凭借其无需模具、直接成形的特点在金属制造领域受到广泛关注[1]。与减材工艺“自上而下”的制造过程相比,该技术提出了一种“自下而上”、逐层堆叠沉积制造金属构件的方法,不仅可以实现任意形状零件的定制化直接成形,而且具有材料利用率高、制造成本低的优势,在绿色制造与再制造领域具有较大潜力。而电弧增材制造技术(wire arc additive manufacturing, WAAM)作为增材制造技术的一项分支,其不仅兼具制造成本低、环境受限小的优势,相较于其他金属制造工艺(如激光增材制造、电子束增材制造等)还具有沉积效率高、零件成形尺寸不受限等特点,在大型与超大型零件的快速制造成形上具有较大优势,广泛应用于航空航天[2]、武器装备[3]、轨道交通[4]、海洋工程[5]、生物医学[6]等领域。然而,电弧增材制造是一个涉及电磁效应、流体流动、传热传质、液固相变、界面演化等多物理场耦合的过程,金属熔池在沉积过程中的流动与凝固行为较为复杂[7];特别是面向复杂三维金属构件的制造成形时,当金属液滴的沉积过程发生在倾斜基面时,熔池在重力诱导下容易发生失稳流淌,造成非对称的焊道形貌,难以形成均匀、对称的沉积层,这可能会降低零件的成形精度,甚至导致成形缺陷的产生。因此,如何实现非水平基面电弧增材制造过程中熔池形貌的对称稳定是原位制备高质量金属构件的一个重要挑战。

为了深入研究电弧增材制造过程中熔池的传热传质行为,国内外研究学者通过实验与数值模拟的方式展开了进一步的研究。山东大学 Zhao[8]和 Wu[9]基于数值仿真模型定量分析了运动电弧作用下增材制造过程中熔池的三维形貌、熔池表面的变形及熔池内部流场、温度场的瞬态行为,对理解电弧增材制造过程中熔池形貌的演变机理有较大的指导价值;华南理工大学 Bai 等[10]建立了电弧增材制造三维瞬态仿真模型,定量研究了多层沉积过程中熔池温度的变化及熔池流体的流动状态,研究发现在水平表面沉积时熔池的截面形貌接近对称的圆形;Cadiou 等[11]首次以完全耦合的方式建立三维仿真模型,揭示了焊丝与熔池之间的相互作用,分析了沉积过程中温度场和流场速度的演变;Wu 等[12-13]利用 Flow 3D 建立了三维数值仿真模型,探讨了水平位置上电弧增材制造过程中驼峰的形成及抑制机理。

以上研究表明,通过实验与仿真结合的方式深入探究不同工艺参数下电弧增材制造沉积过程中热场–流场的演变机理、分析沉积过程中的传热传质行为对金属构件的成形工艺参数优化和成形尺寸调控有较大的指导作用。但上述研究主要面向水平位置电弧增材制造沉积过程,而对于三维复杂构件的制造成形,其沉积过程不再局限于水平基面上的熔池沉积成形;特别是当沉积过程发生在倾斜基面时,在重力诱导下熔池的热–流场演变更加复杂,影响焊道成形形貌的对称性与均匀性,导致成形零件的精度与质量难以调控。因此,对于倾斜基面上的熔池动态行为和成形特性的研究已经成为另一个研究热点。Park 等[14]基于数据采集系统及高速摄像系统研究了顶置及垂直向下位置下熔池流动行为对焊道微观组织的影响规律,结果表明,重力对熔池传热传质行为的影响显著,不仅改变了焊道的成形形貌,还使得焊道各位置的微观组织发生变化;类似的,Tümer 等[15]基于超高强度钢研究了不同焊接位置(水平及垂直向下位置) 和不同热输入量对零件成形形貌、微观组织、力学性能的影响;Yuan 等[16]利用高速摄像系统深入研究了悬垂、垂直向上、垂直向下、水平位置沉积过程中熔池的流动行为,并对沉积过程中出现的驼峰现象展开了详细的形成机理研究,并通过改变焊接参数与焊接位置验证了该机理;Cho 等[17]建立三维瞬态电弧增材制造仿真模型进一步研究了垂直向上位置沉积过程中熔池驼峰动态流动行为,总结不同沉积位置的熔池流动规律,揭示不同位置熔池形貌演变机理;周祥曼等[18]针对电弧增材制造过程中熔池沉积环境不对称的问题建立三维仿真模型,研究了沉积过程中不对称的温度场、速度场及压力场分布,探究了非水平表面沉积过程中电弧形态对零件成形的影响。在此基础上,Hu 等[19-20]基于三维瞬态仿真模型和高速摄像系统分别研究了水平、悬空、垂直向上、垂直向下位置沉积时熔池动力学行为,分析了焊接工艺参数与沉积表面几何形状对零件成形形貌的影响,其研究为复杂金属构件的制造成形调控提供了理论参考。

综合上述研究表明,电弧增材制造过程中的熔

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

池动态行为及热-流场分布直接影响了零件的成形精度与质量；特别是当沉积过程发生在倾斜基面时，在重力诱导下熔池流动行为更加不稳定，焊道形貌特征发生显著改变，无法维持成形焊道均匀稳定的重复再现性。尽管已有研究针对该问题开展了相关研究，但大多数研究主要集中在置顶、悬垂、垂直等极限位置的熔池动态行为及焊道的成形特征研究，而对于一般倾斜位置沉积过程中熔池传热传质行为及非对称熔池形貌的演变机理仍未清晰。基于此，本文旨在深化对倾斜基面沉积过程中熔池传热传质行为的认识，开展非对称熔池形貌演化机理的研究，分析倾斜基体表面电弧增材制造过程中熔池在重力诱导下发生的成形形貌恶化机理，为实现三维金属构件高质量制造成形提供理论基础。

# 1　实验与仿真模型

## 1.1　实验方案

本文基于 CMT 电弧增材制造试验平台开展非对称熔池形貌的实验研究，其原理如图 1 所示。焊接电源为弗尼斯 CMT 4000 Advanced 数字化逆变焊接电源；采用库卡 KR60-3 六自由度机器人执行焊枪的自由移动，最大移动速度可达 250 mm/s；采用体积分数为 80%的 Ar+20% $CO_2$ 混合气作为保护气体；采用超景深显微镜测量焊道三维几何轮廓尺寸；同时为研究沉积过程中的熔滴过渡行为，采用高速摄像机捕获瞬时熔池流动行为；沉积基材被固定在旋转平台，保证在预设的倾斜位置进行沉积实验。

以金属构件多层多道沉积成型为例开展非对称熔池形貌演变机理的研究，采用的焊丝材料为 ER50-6，基板材料为 Q235，其具体化学成分如表1所示。试验前需要对尺寸为 200 mm×200 mm×10 mm 的碳钢基板表面进行打磨去除表面杂质与氧化层，然后将其固定在旋转基体上完成焊道沉积试验。

**表1 焊丝与基板化学成分组成**
**Tab.1 Chemical composition of thesubstrate and welding wire**

(mass fraction/%)

| Material | C | Mn | Si | Ni | S | P | Fe |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| ER50-6 | 0.077 | 1.540 | 0.920 | 0.006 | - | ≤0.025 | Bal |
| Q235 | 0.14 | 0.50 | 0.30 | - | 0.04 | ≤ 0.35 | Bal |

## 1.2　数值仿真模型

为深入开展沉积过程中非对称熔池的形貌演变机理研究，基于 FLUENT 仿真软件建立电弧增材制造数值仿真模型，以便深入研究沉积过程中熔池动态行为，探索非对称熔池形貌的演变机制及抑制机理。

电弧增材制造过程中存在多能场的耦合作用，包含凝固熔化、固液相变等复杂物理化学过程，在数值仿真建模时无法考虑所有因素，并且在保证数值模拟结果准确的情况下，为便于建模与计算，对模型做适当简化，忽略焊丝与基板之间的成分差异，采用同一物性参数。熔池中的熔融金属为不可压缩黏性牛顿流体；熔滴以一定频率、速度、温度向基板流动，基板上方假设为空气域[19]。

### 1.2.1　控制方程

仿真模型的控制方程如式(1)~(3)所示[21]：

质量守恒方程：

$$\frac{\partial\rho}{\partial t}+\nabla(\rho\vec{v})=\frac{\partial\rho}{\partial t}+\frac{\partial(\rho u)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho v)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho w)}{\partial z}+S_{\mathrm{m}} \quad (1)$$

能量守恒方程：

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t}+\frac{\partial(\rho uT)}{\partial x}+\frac{\partial(\rho vT)}{\partial y}+\frac{\partial(\rho wT)}{\partial z}=\frac{\partial}{\partial x}\left(\frac{k}{c_{\mathrm{p}}}\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\frac{k}{c_{\mathrm{p}}}\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\frac{k}{c_{\mathrm{p}}}\frac{\partial T}{\partial z}\right)+S_{\mathrm{m}} \quad (2)$$

动量守恒方程：

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho\vec{v})+\nabla(\rho\vec{v}\vec{v})=-\nabla p+\nabla(\bar{\bar{\tau}})+\rho\vec{g}+\vec{F}+S_{\mathrm{mom}} \quad (3)$$

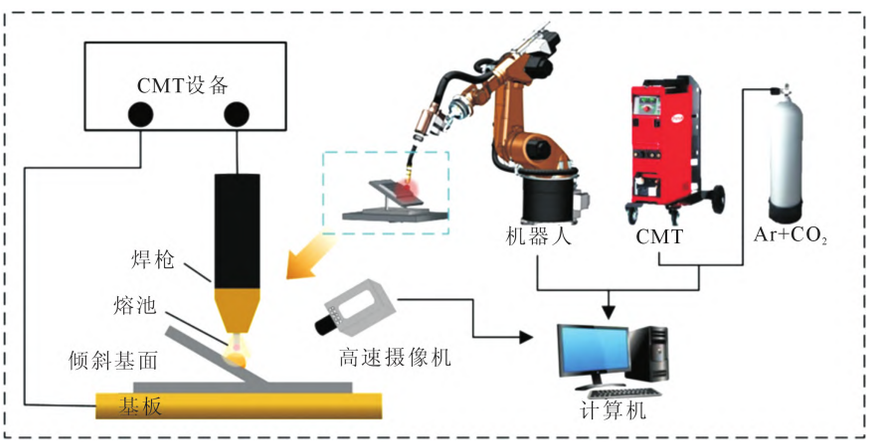


图 1 电弧增材制造系统及工作原理示意图
Fig.1 Experimental system: schematic illustration of the device

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

式中，$t$ 为时间；$u, v, w$ 分别为速度$\vec{v}$在 $x, y, z$ 方向的速度矢量；$\mu$, $p$, $T$, $c_p$, $\rho$ 与 $k$ 分别为黏度、压力、温度、比热容、密度及热导系数；$\bar{\bar{\tau}}$为应力张量；$S_{mom}$ 为动量源项；$\rho\vec{g}$, $\vec{F}$分别为重力体积力及其他体积力；$S_m$ 为体积质量源。

采用 VOF（Volume of Fluid）模型追踪熔池自由界面[20]，计算每个网格单元的相位体积分数，可通过计算液态金属相的连续性方程实现对气液两相界面的追踪：

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

式中，$F$ 为流体体积分数；$V$ 为速度矢量。

**1.2.2　热源及动量方程**

考虑到移动速度的影响，电弧热流密度呈现出双椭圆分布[22]。在本研究中，选择双椭圆体热源模型来模拟电弧的热作用。假设前半椭圆体的半轴长度为 $a_f$，宽度为 $b$，厚度为 $c$，热输入份额为 $f_f$；后半椭圆体的半轴长度为 $a_r$，宽度为 $b$，厚度为 $c$，热输入份额为 $f_r$。半轴热流分布 $q_f$、$q_r$ 为：

$$q_f(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_f\eta_{arc}UI}{a_f bc\pi^{3/2}}\exp\left(-\frac{3(x-x_0-vt)^2}{a_f^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z_s^2}{c^2}\right)$$
$$(x\geqslant x_0+vt) \tag{5}$$

$$q_r(x,y,z)=\frac{6\sqrt{3}f_r\eta_{arc}UI}{a_r bc\pi^{3/2}}\exp\left(-\frac{3(x-x_0-vt)^2}{a_r^2}-\frac{3y^2}{b^2}-\frac{3z_s^2}{c^2}\right)$$
$$(x<x_0+vt) \tag{6}$$

式中，$U$ 为焊接电压；$I$ 为焊接电流；$v$ 为焊接速度；$x_0$ 为起始焊接点 $x$ 轴坐标；$z_s$ 为沉积层高度。

表面张力是流体表面两个相邻部分之间的自由气液界面上的力，它引发马兰戈尼流以驱动流体流动。马兰戈尼对流驱动着熔池金属流体向表面张力增大的区域流动，可表示为[23]：

$$P_s=\gamma k \tag{7}$$

式中，$\gamma$ 为表面张力系数；$k$ 为熔池表面曲率。

电弧压力主要作用于气-液界面，导致熔池表面的变形。假设电弧压力是以高斯函数的形式分布，可表示为[24]：

$$F_{arc}=C\frac{\mu_0 I^2}{8\pi^2\sigma_p^2}\exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_p^2}\right) \tag{8}$$

式中，$C$ 为校正系数；$r$ 为电弧半径；$\sigma_p$ 为电弧压力分布半径。

温度分布不均匀的熔池由于密度差的存在，液态金属在温度场的驱动下有上升的趋势，即浮力，可大小表示为[25]：

$$F_f=-\rho g\beta(T-T_m) \tag{9}$$

式中，$\rho$ 为液态金属密度；$\beta$ 为体积热膨胀系数；$T$ 为熔池温度；$T_m$ 为参考温度。

电弧增材制造过程中电弧力可通过下述公式计算[26]：

$$F_x=-\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2\sigma_j^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{-r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\cdot\left(1-\frac{z}{L_m}\right)^2\frac{x-x_0-vt}{r} \tag{10}$$

$$F_y=-\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2\sigma_j^2}\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]\cdot\left(1-\frac{z}{L_m}\right)^2\frac{y-y_0}{r} \tag{11}$$

$$F_z=-\frac{\mu_m I^2}{4\pi^2\sigma_j^2}\left[1-\exp\left(-\frac{r^2}{2\sigma_j^2}\right)\right]^2\left(1-\frac{z}{L_m}\right) \tag{12}$$

式中，$F_x$，$F_y$ 和 $F_z$ 为在 $x$，$y$，$z$ 方向上的电磁力；$\sigma_j$ 为电压分布参数；$\mu_m$ 为磁导率；$L_m$ 为基板厚度。

**1.2.3　物理模型及边界条件**

本文基于电弧增材制造实际过程建立边界条件，几何模型如图 2 所示，具体边界条件如表 2 所示，所使用材料的物性参数如表 3 所示，碳钢材料的导热系数和比热受温度影响。

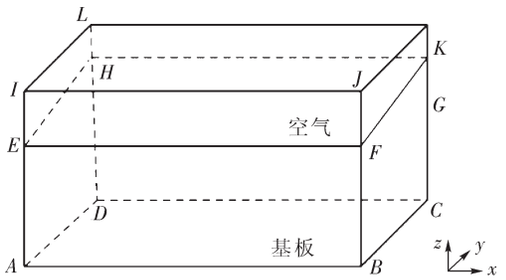


图 2 电弧增材制造几何模型

Fig.2 Geometry of the computational domains

**表2 模型边界条件**

**Tab.2 Boundary conditions of the numerical model**

| 边界条件 | 温度/K | 速度/(m·s⁻¹) | 压力/Pa |
|---|---|---|---|
| EFJI，FGKJ，KGHL，LHEI，(Pressure outlet) | 300 | — | 101 325 |
| IJKL(Velocity inlet) | — | $v_w$ | 101 325 |
| ABJI(Wall) | 式(13) | $V$=0 | — |
| ABFE, BCGF, CDHG, ADHE, ABCD (Wall) | 式(13) | $V$=0 | — |

基板壁面的热边界条件可表述为[27]：

$$q_{loss}=-h_{conv}(T-T_{ref})-\varepsilon K_b(T^4-T_{ref}^4) \tag{13}$$

式中，$h_{con}$ 为对流换热系数；$\varepsilon$ 为辐射系数；$T_{ref}$ 为参考温度；$K_b$ 为玻尔兹曼常数。

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

表 3 材料物性参数[28]

Tab.3 Thermo-physical material properties of steel[28]

| 物性参数 | 值 | 单位 |
|---|---|---|
| 环境温度 ($T_0$) | 298 | K |
| 液相温度 ($T_l$) | 1 727 | K |
| 固相温度 ($T_s$) | 1 670 | K |
| 表面张力温度系数 (dγ/dT) | -0.000 3 | N/(m·K) |
| 重力加速度 ($g$) | 9.8 | m/s$^2$ |
| 液相导热系数($k_L$) | 26.9 | W/(m·K) |
| 固相导热系数 ($k_S$) | 32.3 | W/(m·K) |
| 黏度 (μ) | 0.005 5 | kg/(m·s) |
| 液相比热容 ($C_{pL}$) | 730 | J/(kg·K$^{-1}$) |
| 固相比热容 ($C_{pS}$) | 720 | J/(kg·K$^{-1}$) |
| 熔池密度 ($\rho$) | 7 200 | kg/m$^3$ |
| 换热系数 ($a_c$) | 100 | W/(m$^2$·K) |
| 辐射系数 ($\varepsilon$) | 0.8 | - |
| 热膨胀系数($\beta$) | $10^{-4}$ | K$^{-1}$ |
| 表面张力 ($\gamma$) | 1.2 | N/m |
| 熔化潜热($H_m$) | $2.47\times10^5$ | J/kg |
| 蒸发潜热 ($H_v$) | $73.43\times10^5$ | J/kg |

### 1.2.4 模型验证

本章通过试验进一步验证模型的准确性，设定焊接电流 225 A，焊接速度 300 mm/min，保护气体流速 15 L/min，干伸长量 17 mm，基板倾角 30°，以验证倾斜沉积模型的准确性。实验结束后对制件进行切样处理获取焊道截面样件，并对样件进行研磨、抛光、腐蚀和清洗等，最终选用超景深显微镜观察和测量截面的宏观形貌。具体实验结果如图 3 所示，结果表明，仿真模拟的焊道形貌与实验测量结果基本一致，误差在 10%以内，其中误差来源主要是仿真模型的散热状态与实际沉积过程存在一定差异，并且熔滴沉积过程中在多能场耦合作用下，熔池稳定性存在一定波动，使得实际熔池的凝固熔化行为及焊道的成形形貌与仿真结果有一定差异。

## 2 结果与讨论

以金属构件多层多道沉积成型为例开展非对称熔池形貌演变机理的研究，本研究采用的焊丝材料为 ER50-6，基板材料为 Q235，其具体化学成分如表 1 所示。试验前需要对 200 mm×200 mm×10 mm 的碳钢基板表面进行打磨，去除表面杂质与氧化层，然后将其固定在旋转基体上完成焊道沉积试验。根据相关文献和实验室前期工作基础选取保护气体为20% $CO_2$ 和 80% Ar 混合气体，流量大小为 15 L/min；干伸长量确定为 17 mm。基于前期实验参数探索，选取焊接电流参数为 225 A，焊接速度参数为 300 mm/min，在不同倾斜角度(0、15°、30°、45°)的基板上保持焊枪倾角不变开展焊道沉积试验，线切割取样后进行打磨、腐蚀、酒精清洗等操作，通过超景深显微镜测量焊道几何形貌，获得焊道形貌几何尺寸数据，具体如图 4 所示[29]。随着沉积基面倾角的增加，沉积过程中熔池中的部分流体在重力的诱导下沿基面流动，焊道的形貌逐渐从对称向非对称转变，且程度逐渐加剧。为衡量焊道的形貌变化程度，本章引入焊道偏移量 $L_m$ 来定量分析基面倾角对焊道成形形貌的影响，其中 $L_m$ 为焊道中点与焊道最高点的水平距离，如图 4(b)所示。图 5 为 0~45°倾斜基面上焊道的焊道偏移量与熔池深度的变化，偏移量 $L_m$ 值分别约为 0、0.454 9、1.937 4 和 2.331 9 mm，熔

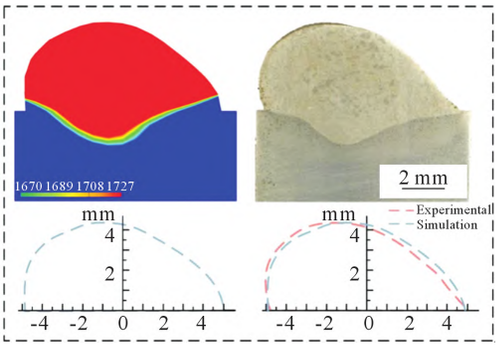


图 3 数值模拟与实际焊道形貌比较结果：30°倾斜基面上焊道形貌比较[29]

Fig.3 Comparative analysis of bead geometry of the numerical model and the actual welding results: comparison of bead geometry on 30° inclined surface[29]

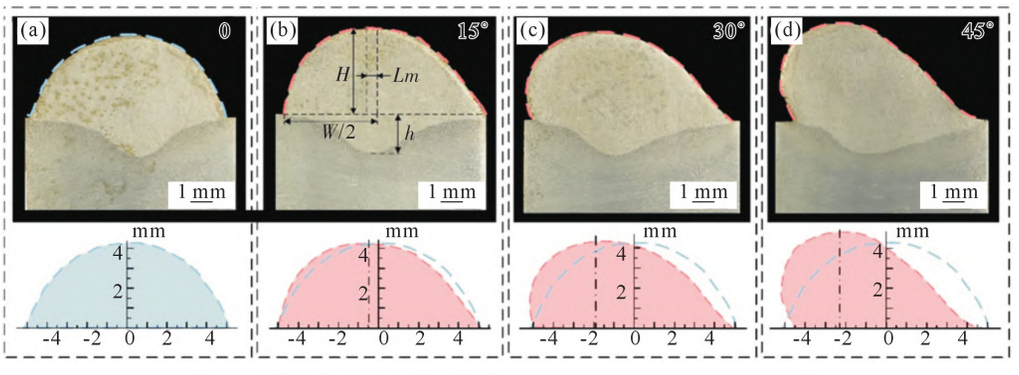


图 4 不同倾斜基面上焊道形貌：(a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°[29]

Fig.4 The morphologies of weld beads at different inclined angles: (a) 0°, (b) 15°, (c) 30°, (d) 45°[29]

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

池深度分别为 1.935、1.763、1.684、1.576 mm。从图中不难发现，随着基面倾斜角度的增加，焊道的形貌趋于不对称，偏移量逐渐增大；并且在 15°~30°基板倾角区间内焊道偏移增长趋势相较于 0~15°区间显著增加，重力对熔池流体的影响效果更加显著，当倾角达到 30°后偏移量的增长趋势有所缓解，而在实际实验中当基板倾角超过 45°，熔池可能突破表面张力、流体黏性的阻碍发生坍塌，导致焊道形状失稳。结果表明：随着沉积基面倾斜角度的增加，更多的金属流体在重力的诱导下沿着基面向下流动，破坏了对称的焊道形貌，当基板倾角过大时金属流体甚至可能突破表面张力等阻碍，熔池失稳流体沿基板发生流淌，影响焊道成形。此外，从图中可以发现随着基板倾角的增加，熔池深度也逐渐减小。分析认为随着基板角度的增加，在重力的作用下更多熔池上端的金属流体沿基面方向向下流动，减缓了熔滴对熔池的冲击作用，使得金属流体向熔池底部的流动减弱，同时抵达熔池底部的高温金属流体减少，阻碍了电弧热量和质量的传递，减少了熔池对基板的“挖掘”能力，从而使焊道熔深呈现逐渐减小的趋势。

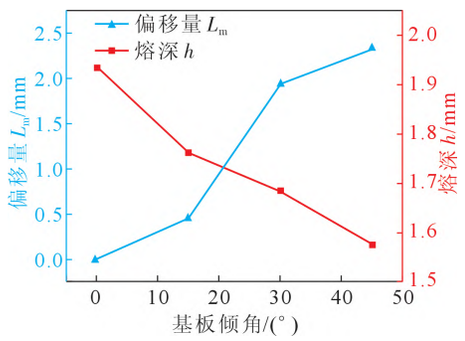


图 5 变基板倾角下焊道偏移量与熔深变化
Fig.5 The values of the offset and the depth of the molten pool with different inclined angles of the subtra

电弧增材制造过程中伴随着电、磁、热等多能场的耦合，液态熔池受到多个力的作用，包括电弧力、重力、表面张力等，在非水平基面上发生熔池流淌的现象，影响焊道的成形形貌。为了进一步揭示倾斜基面上电弧增材制造过程中熔池非对称形貌的演变过程及机制，本文借助三维仿真模型对沉积过程中的熔池温度场、流场分布展开研究。由前期工作研究发现[29]，当沉积过程发生在水平基面上时，重力对熔池各位置的作用效果一致，金属液体的流动受重力的影响较小；熔滴进入熔池后在熔滴冲击力、电弧力等作用下由熔池顶端向底部流动，然后沿熔合线向熔池表面流动，在两侧形成对流环。并且横截面上熔池速度、温度趋于对称分布，由中央区域向两侧逐渐减小，最终形成对称的焊道形貌。而当沉积表面倾斜时，熔池中流体受力平衡状态被打破，在重力，表面张力和电弧力等综合作用下，熔池的流动行为及温度场、速度场的分布发生了改变，影响熔池成形形貌。其中的电弧力主要包括电磁力，等离子流力等[30]；其中电磁力是由于在焊丝末端电弧半径微小而在基板上扩展到较大直径，电弧直径的变化导致从焊丝到基板存在较大的压力差，产生从焊丝指向熔池的轴向电磁推力，作用于焊丝与液态熔池。而等离子流力则是在增材制造过程中焊丝末端产生大量气体离子，在电磁力作用下以等离子流的形式向熔池流动，并对熔池表面产生压力。两者在电弧力中占主要地位，其沿焊丝轴向作用于熔池，影响金属液体的流动行为，其大小与焊接电流成正相关，与重力、表面张力等综合作用决定液态金属的流动行为[31]。

图 6 为 15°基板倾角下的熔池横截面流动状态，从图中可以观察到 $t_1$ 时刻在液滴冲击力、电弧力的作用下熔池表面发生下凹产生弧坑，金属液滴被推向两侧。在重力的影响下右侧沿基面向下流动的金属液滴增多，速度矢量更加密集；随着熔滴进入熔池，动能、热量和金属液体传递到熔池，在重力、电弧力、表面张力等作用下由熔池上端向底部流动，并在温度梯度驱动下沿固液界面向熔池表面流动。在 $t_1$+0.008 s 时可以观察到在对流环作用下抵达熔池上端的部分流体在重力作用下沿熔池表面向下流动，速度矢量向右侧集中，使得熔池右侧速度矢量分布相较于左侧更加密集，更多金属液体堆积在左侧，导致熔池形貌产生偏移。从图中可以看到流体的不对称流动同样导致了熔池温度分布及速度分布的变化，文章从基板上方沿 $a$ 到 $b$ 方向选取 50 个采样点提取熔池温度及熔融流体速度数值，如图 6(b)所示。从图中可以观察到熔池温度仍呈现中央温度最高，并逐渐向两侧减小的分布状态。但相较于水平基面沉积过程中的温度部分，由于熔池流动的不对称，随着金属液体在右侧的堆积，右侧区域温度高于左侧。对比横截面上熔池速度场的分布发现右侧金属流体在重力作用下向下流动的趋势得到增强，左侧金属流体的流动方向与重力方向相反使流动受阻，熔池速度有所减小，速度峰值的位置向右发生了轻微偏移，流体速度分布趋于不对称。

图 7 为 30°基面倾角下熔池横截面流动状态，从图 7(a)中发现熔池温度场分布更加不对称，速度矢量更加向一侧集中。在 $t_2$ s 时熔滴接近熔池，在熔滴冲击力、电弧力作用下熔池表面发生变形，金属流体被推开形成弧坑，随着基面倾角的增加，重力对熔

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

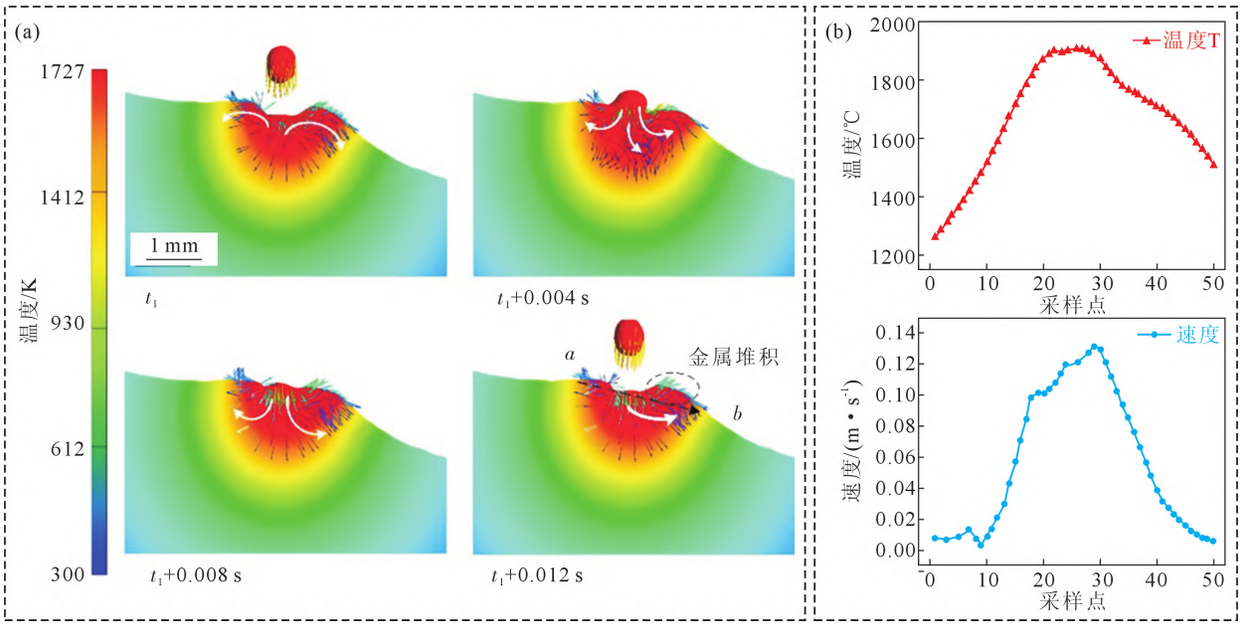


图 6　15°倾斜基面上熔池流动状态：(a) 电弧增材制造过程中熔池流动行为，(b) 基板表面熔池温度场、速度场分布

Fig.6　Flow state of the molten pool on a 15° inclined substrate: (a) molten pool flow behaviour during the wire arc additive manufacturing, (b) temperature and velocity field distribution of the molten pool on the substrate surface

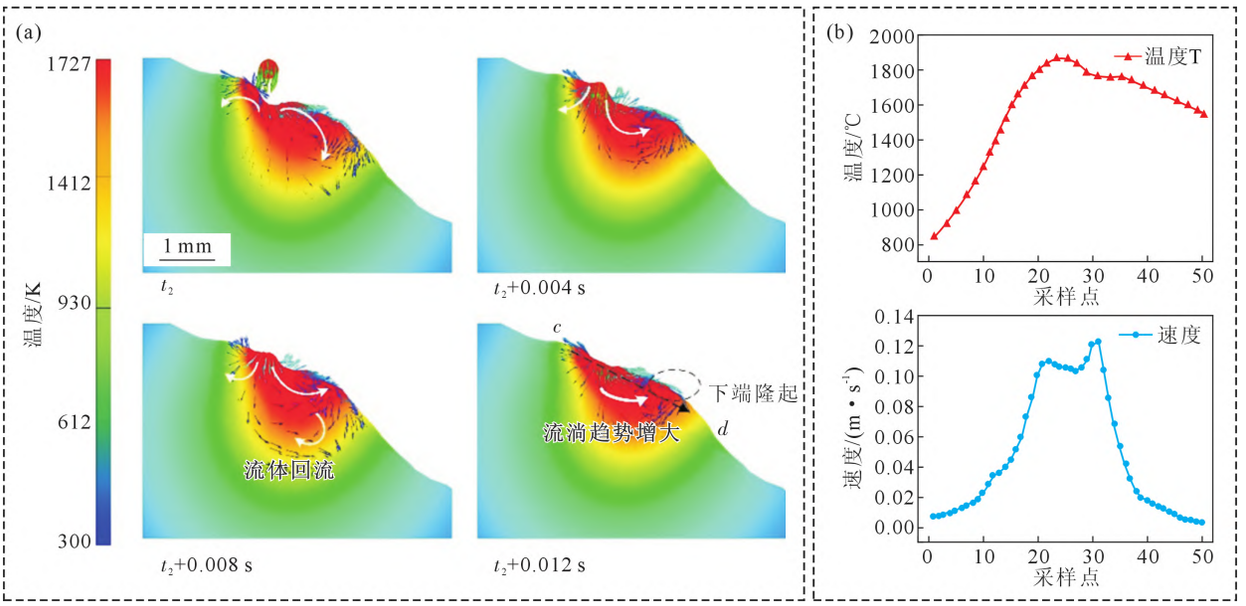


图 7　30°倾斜基面上熔池流动状态：(a) 电弧增材制造过程中熔池流动行为，(b) 基板表面熔池温度场、速度场分布

Fig.7　Flow state of the molten pool on a 30° inclined substrate: (a) molten pool flow behaviour during the wire arc additive manufacturing, (b) temperature and velocity field distribution of the molten pool on the substrate surface

池流体的影响效果增大，熔池右侧沿基面向下流动的金属流体相较于左侧反方向流动的流体显著增多，速度矢量主要集中在右侧，使得金属流体在右侧堆积；在 $t_2$+0.004 s 时刻金属熔滴开始融入熔池，随着金属质量、能量传递到熔池，在重力、电弧力作用下金属流体从熔池表层向底部流动并沿熔合线向两侧流动形成对流环，相较于 15°基面上的熔池流场分布，该状态下重力、电弧力对熔池流动行为的影响进一步增强，右侧环流相较于左侧环流汇聚更多的金属流体，更多回流到表层的熔融金属在重力作用下沿着熔池表面向下流动，右侧向下流动的速度矢量分布更加密集，使得熔池的偏移程度进一步增强。此外，随着凝固线附近的金属流体开始凝固，部分向下流动的液体受到阻挡产生回流，缓解了右侧金属流体的堆积现象。同样地，从基板上方沿 $c$ 到 $d$ 方向选取 50 个采样点提取熔池温度及熔融金属流速数值，如图 7(b)所示。从图中可以发现流体温度呈现中间最高逐步向两侧降低的分布状态，同时由于熔池右侧更多金属流体的堆积使得熔池冷却速率得到缓解，热量累积在右侧，熔池左右两侧温度梯度进一步增大，增强了熔池内部热对流，增大了熔池深度。同时，随着重力对熔池作用效果的增强，右侧沿熔池表

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

面向下流动的金属液体流动性得到增强，流速波动增大，熔池的速度分布更加不对称，速度峰值逐渐向右侧移动，右侧速度矢量也更加密集，增强了熔池形貌的不对称程度。

图 8 为 45°基面倾角下熔池横截面流动状态，如图 8(a)所示为沉积过程中熔池的流场、温度场的演变过程，从图中不难看出随着基面倾角的进一步增大，温度场分布更加不均匀，热量与金属流体在熔池右侧累积，熔池形貌的非对称程度进一步加剧。在$t_3$时刻熔滴接近熔池，在熔滴冲击力、电弧力的驱动下熔滴下方熔池表面发生凹陷产生弧坑，金属流体被推向四周，由于重力、电弧力对流体流动的显著影响，流体沿熔池表面向下的流动得到增强、向上的流动受到阻碍，使得速度矢量集中在右侧；在$t_3$+0.004~$t_3$+0.008 s 时熔滴逐渐融入熔池，熔融金属在重力、表面张力等作用下从熔池上方向熔池底部流动，然后向两侧流动形成对流环。从图中可以观察到随着基板倾角的增加，熔池左侧环流几乎消失，右侧环流汇聚着大部分金属液体，回到熔池表层的金属流体在重力作用下沿熔池表面向下方流动，热量逐渐在右侧累积，且右侧熔池的速度矢量分布更密集，使得熔池的不对称程度进一步增加。同时随着凝固线附近的金属流体凝固，部分向下流动的流体受到阻碍发生回流，缓解了右侧金属液体的堆积，图 8(b)为熔池基板上方位置熔池速度场和温度场分布（沿 ef 方向等距设置一系列采样点），从图中可以观察到熔池温度分布状态与 15°、30°倾斜基面熔池温度分布相似，仍呈现由中央向两侧减小的趋势，但由于更多的金属液体聚集在右侧，熔池右侧热量累积、温度的下降趋势明显减小，右侧温度分布总体高于左侧，且熔池两侧温度梯度增大，热对流增强，熔池深度进一步增加，并且由于流体的凝固速度减小，金属流体向下流动的时间增加使得凝固后焊道的偏移程度进一步增加；从流体速度分布图也可以观察到速度分布的不对称性进一步加剧，左侧向上流动的流体受重力、电弧力的阻碍流动速度逐渐减小，左右两侧流体的流速差距进一步增大，右侧流体沿熔池表面向下的流动进一步增强，速度峰值向熔池右侧移动，使得熔池形貌的偏移进一步增强。

综上所述，倾斜基面上的电弧增材制造是一个非稳态过程，随着沉积基面的倾斜角度的增加，重力对熔池流动状态的影响更加显著，表层熔融液体在重力的诱导下向熔池一侧堆积，流体速度峰值向一侧发生偏移，使得金属液体、速度矢量和热输入量逐渐向一侧聚集，熔池温度场及速度场分布逐渐趋于不对称，导致焊道形貌非对称程度的加剧，影响复杂构件的成形精度。

## 3 结论

(1)随着基板角度的增加，在重力的作用下更多熔池上端的金属流体沿基面方向向下流动，焊道形貌的不对称程度逐渐增加，焊道偏移量分别为 0、0.454 9、1.937 4、2.331 9 mm；同时由于表层金属流体的向下流动减缓了熔滴对熔池的冲击作用，使得金属流体向熔池底部的流动减弱，传递到熔池底部的热量与质量减少，削弱了熔池对基板的“挖掘”能力，焊道熔深逐渐减小，深度分别为 1.935、1.763、1.684、1.576 mm。

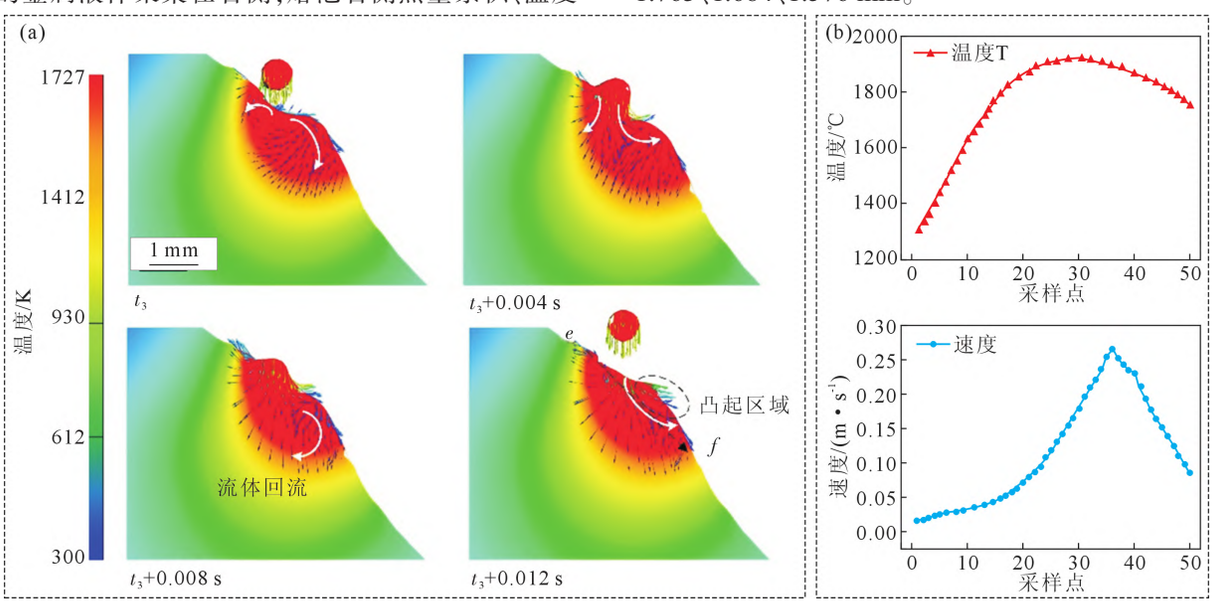


图 8 45°倾斜基面上熔池流动状态：(a) 电弧增材制造过程中熔池流动行为，(b) 基板表面熔池温度场、速度场分布

Fig.8 Flow state of the molten pool on a 45° inclined substrate: (a) molten pool flow behaviour during the wire arc additive manufacturing, (b) temperature and velocity field distribution of the molten pool on the substrate surface

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net

(2)倾斜基面上非对称熔池形貌的演变过程受到重力显著影响，结合熔池内部温度、速度和流体流动状态变化表明，随着基面倾角的增加，熔池两侧对称环流被打破，更多流体在对流环驱动下汇聚在熔池一侧并在重力诱导下沿熔池表面向下流动，热量在熔池右侧累积，促进温度分布不对称，且熔池两侧的温度梯度增大，热对流增强；流体速度场分布逐渐不对称，熔池右侧速度矢量分布更密集；同时熔池内部左右两侧流速差值增大，内部流体速度峰值逐渐向一侧发生偏移，使得焊道形貌的偏移程度不断增加。

**参考文献：**


[1] 卢秉恒，李涤尘. 增材制造(3D 打印)技术发展 [J]. 机械制造与自动化，2013, 42(4): 1-4.
LU B H, LI D C. Development of additive manufacturing (3D printing) technology[J]. Machine Building & Automation, 2013, 42 (4): 1-4.

[2] 熊江涛，耿海滨，林鑫，等. 电弧增材制造研究现状及在航空制造中应用前景[J]. 航空制造技术，2015, 493-494(Z2): 80-85.
XIONG J T, GENG H B, LIN X, et al. Research status and application prospect of arc additive manufacturing in aeronautical manufacturing[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2015, 493-494(Z2): 80-85.

[3] SHRIVASTAVA A, S A K, RAO S, et al. Remanufacturing of nickel-based aero-engine components using metal additive manufacturing technology[J]. Materials Today: Proceedings, 2021, 45 (6): 4893-4897.

[4] DING D, SHEN C, PAN Z, et al. Towards an automated robotic arc-welding-based additive manufacturing system from CAD to finished part [J]. Computer-Aided Design, 2016, 73: 66-75.

[5] 张金田，王任甫，王杏华. 船用钢电弧增材制造的焊道尺寸预测[J]. 材料开发与应用，2018, 33(2): 17-22.
ZHANG J T, WANG R F, WANG X H. Weld bead size prediction for marine steel arc additive manufacturing [J]. Materials Development and Application, 2018, 33(2): 17-22.

[6] SONI R, JHAVAR S, TYEB S, et al. Wire arc additive manufacturing of zinc as a degradable metallic biomaterial [J]. J Funct Biomater, 2022, 13(4): 212.

[7] 李岩，苏辰，张冀翔. 电弧熔丝增材制造综述:物理过程、研究现状、应用情况及发展趋势[J]. 焊接，2020, 567(9): 31-37, 63.
LI Y, SU C, ZHANG J X. Summary of arc fuse additive manufacturing: Physical process, research status, application and development trend[J]. Welding, 2020, 567(9): 31-37, 63.

[8] ZHAO P C, WU C S, ZHANG Y M. Numerical simulation of the dynamic characteristics of weld pool geometry with step-changes of welding parameters[J]. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 2004, 12(5): 765.

[9] WU C S, ZHAO P C, ZHANG Y M. Numerical simulation of transient 3-D surface deformation of a completely penetrated GTA weld[J]. Welding Journal, 2004, 83(12): 330s-334s.

[10] BAI X W, COLEGROVE P, DING J L, et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 124: 504-516.

[11] CADIOU S, COURTOIS M, CARIN M, et al. 3D heat transfer, fluid flow and electromagnetic model for cold metal transfer wire arc additive manufacturing (Cmt-Waam)[J]. Additive Manufacturing, 2020, 36: 101541.

[12] WU D, HUA X, Ye D, et al. Understanding of humping formation and suppression mechanisms using the numerical simulation [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 104: 634-643.

[13] WU D, HUA X, YE D, et al. Understanding of the weld pool convection in twin-wire GMAW process[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 88: 219-227.

[14] PARK J H, KIM S H, MOON H S, et al. Influence of gravity on molten pool behavior and analysis of microstructure on various welding positions in pulsed gas metal arc welding[J]. Applied Sciences, 2019, 9(21): 4626.

[15] TÜMER M, WARCHOMICKA F G, PAHR H, et al. Mechanical and microstructural characterization of solid wire undermatched multilayer welded S1100MC in different positions [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2022, 73: 849-860.

[16] YUAN L, PAN Z, DING D, et al. Investigation of humping phenomenon for the multi-directional robotic wire and arc additive manufacturing[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2020, 63: 101916.

[17] CHO D W, NA S J, CHO M H, et al. A study on V-groove GMAW for various welding positions [J]. Journal of Materials Processing Technology, 2013, 213(9): 1640-1652.

[18] 周祥曼，王礴允，田启华，等. 焊枪偏转对电弧增材制造搭接熔积电弧形态影响的仿真模拟[J].材料热处理学报，2020, 41(8): 148-156.
ZHOU X M, WANG B Y, TIAN Q H, et al. Simulation of the effect of welding gun deflection on the shape of fused arc in arc additive manufacturing [J]. Journal of Heat Treatment of Materials, 2020, 41(8): 148-156.

[19] HU Z Q, 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.

[20] 胡泽启. 车用锻模型腔电弧熔丝随形增材成形特性与轨迹规划研究[D]. 武汉：武汉理工大学，2020.
HU Z Q. Research on shape additive forming characteristics and trajectory planning of arc fuse in cavity of vehicle forging die[D]. Wuhan: Wuhan University of Technology, 2020.

[21] GU H, LI L. Computational fluid dynamic simulation of gravity and pressure effects in laser metal deposition for potential additive manufacturing in space [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 140: 51-65.

[22] GOLDAK J, CHAKRAVARTI A, BIBBY M. A new finite element model for welding heat sources [J]. Metallurgical Transactions B, 1984, 15: 299-305.

[23] KOTHE D B, MJOLSNESS R C. RIPPLE: A new model for in-


(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved.　http://www.cnki.net

compressible flows with free surfaces[J]. AIAA Journal, 1992, 30 (11): 2694-2700.

[24] USHIO M, WU C S. Mathematical modeling of three-dimensional heat and fluid flow in a moving gas metal arc weld pool[J]. Metallurgical and Materials Transactions B, 1997, 28: 509-516.

[25] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[J]. 制造技术与机床,2008 (7): 52-52.
WU C S. Welding thermal process and molten pool morphology [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2008(7): 52-52.

[26] SONG W C, TSAO K C. Modelling the three-dimensional fluid flow and heat transfer in a moving weld pool[J]. Engineering Computations, 1990, 7(3): 241-248.

[27] WANG N, SHEN J, HU S, et al. Numerical analysis of the TIG arc preheating effect in CMT based cladding of Inconel 625[J]. Engineering Research Express, 2020, 2(1): 015030.

[28] 雷洋洋. GMA 增材制造熔池热场及流场数值分析[D]. 成都：西南交通大学,2019.
LEI Y Y. Numerical analysis of heat field and flow field of GMA additive manufacturing melt pool[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2019.

[29] CAO H J, HUANG R F, 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.

[30] LIN M L, EAGAR T W. Pressures produced by gas tungsten arcs [J]. Metallurgical Transactions B,1986, 17: 601-607.

[31] ROKHLIN S I, GUU A C. A study of arc force, pool depression, and weld penetration during gastungsten arc welding[J]. Welding Journal, 1993, 72(8): 381-390.

(C)1994-2023 China Academic Journal Electronic Publishing House. All rights reserved. http://www.cnki.net