

DOI: 10.7512/j.issn.1001-2303.2026.02.02

基于CFD模型的电弧焊接增材制造过程热物理分析及焊道形态研究

云 泽¹, 李 岩^{1,2*}, 吴娟慧¹, 朱建军^{1,2}

1. 中国石油大学(北京)机械与储运工程学院, 北京 102249

2. 过程流体过滤与分离技术北京市重点实验室, 北京 102249

摘要: 电弧焊接增材制造过程中, 熔滴过渡与熔池流动是决定焊道形貌的关键因素。本研究基于三维瞬态计算流体动力学模型, 通过耦合质量守恒、能量守恒、动量守恒方程和流体体积法, 建立了涉及熔滴过渡、重力、熔池流动以及固液相变的数值模型, 定量分析了焊接速度、熔滴温度与焊接位置对TIG工艺下Q235钢单层/多层焊道熔覆形貌的影响。结果表明, 焊接速度从8 mm/s提升至28 mm/s时, 单位时间热输入减少导致熔池高度显著下降59.14%, 且高速焊接加剧了熔池流动的不稳定性; 熔滴温度从2 300 K升高至3 100 K, 对应单位时间热输入增加, 熔池流量增多, 熔池高度上升19.86%、宽度上升11.64%, 同时熔池流动性增强使焊道表面更平滑; 焊接位置变化改变重力作用方向, 对熔池流动倾向产生较大影响, 多层熔覆过程中焊道普遍呈现熄弧位置低、起弧位置高的特征。通过平焊、横焊以及仰焊位的单道多层(5层)焊道熔覆形貌的模拟结果与实验数据进行比较, 验证了模型的准确性。

关键词: 计算流体动力学(CFD); 电弧焊接增材制造; 热质耦合; 熔池流动; 焊道形貌; 焊接位置

中图分类号: TG441 文献标识码: A 文章编号: 1001-2303(2026)02-0019-11

Thermophysical Analysis and Weld Pool Morphology Study of the Wire Arc Additive Manufacturing Process based on CFD Model

YUN Ze¹, LI Yan^{1,2*}, WU Juanhui¹, ZHU Jianjun^{1,2}

1. College of Mechanics and Transportation Engineering, China University of Petroleum Beijing, Beijing 102249, China

2. Beijing Key Laboratory of Process Fluid Filtration and Separation, Beijing 102249, China

Abstract: In wire arc additive manufacturing, droplet transfer and molten pool dynamics are critical factors influencing weld bead morphology. This study develops a three-dimensional transient computational fluid dynamics model that incorporates mass, energy, momentum, and volume of fluid equations. The model captures droplet transfer, gravity, molten pool flow, and solid-liquid phase transitions. Using this framework, we quantitatively analyze the effects of welding speed, droplet temperature, and welding position on the morphology of single-layer and multi-layer weld beads under the TIG process. The results indicate that increasing the welding speed reduces the molten pool height by 59.14% (from 8 mm/s to 28 mm/s) and intensifies the instability of molten pool flow at higher speeds. A higher droplet temperature corresponds to increased heat input per unit time, resulting in a larger molten pool volume. The molten pool height increases by 19.86%, while its width expands by 11.64% (from 2 300 K to 3 100 K). Changes in welding position, which alter the gravitational direction, significantly affect molten pool flow patterns. During multi-layer deposition, the weld bead morphology exhibits a lower profile at the arc extinction point and a higher profile at the arc initiation point. The accuracy of the model is validated by comparing the simulated multi-layer weld bead morphology in flat, horizontal, and overhead welding positions with experimental data.

Keywords: CFD; WAAM; thermo-mass coupling; molten pool flow; weld pass morphology; welding position

收稿日期: 2025-05-28 修回日期: 2025-10-14

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFC3070100); 国家自然科学基金项目(52076216, 51706246)

作者简介: 云 泽(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事高钢级管材焊缝成形以及高温熔融态金属物性参数计算的研究。

通讯作者: 李 岩, heartonelee@cup.edu.cn。

引用格式:云泽,李岩,吴娟慧,等.基于CFD模型的电弧焊接增材制造过程热物理分析及焊道形态研究[J].电焊机,2026,56(2):19-29.

Citation:YUN Ze, LI Yan, WU Juanhui, et al. Thermophysical Analysis and Weld Pool Morphology Study of the Wire Arc Additive Manufacturing Process based on CFD Model[J]. Electric Welding Machine, 2026, 56(2): 19-29.

0 引言

增材制造过程是基于三维切片数据,通过连续添加材料逐层堆积来完成物体制造的过程。其中电弧熔丝增材制造技术(Wire Arc Additive Manufacturing, WAAM)具有沉积效率高、材料利用率高、对零件尺寸限制较小等优点,被广泛应用于石油化工及航空航天等领域。但该过程涉及焊丝熔化、熔滴过渡、熔池内高温液态金属对流、熔池自由表面变形、导热传热与凝固形变等多种复杂的物理过程^[1]。这些复杂的物理过程综合决定了焊道熔覆的形状与尺寸^[2]、微观结构^[3]、力学性能^[4]、残余应力分布以及应变情况^[5]。此外,焊接位置的转变使得熔池形态受到较大影响,焊道熔覆形貌也因此发生变化。电弧及过渡熔滴携带着大量的热量,随着熔覆层增多,熔覆层累积效应以及热效应更为复杂,使得零件前期设计、路径规划以及加工过程存在较多的不稳定因素。

为研究多层多道熔覆过程中焊道形貌特征及其传热规律,研究人员选用直板进行对应实验与数值模拟工作。Hu^[6]建立了考虑熔滴撞击、重力、电弧力、传热和传质的熔池计算的流体动力学模型,研究了不同焊接位置下重力对于流体流动的影响;由于加工路径的变化,当焊接工艺参数一定时,随着热源移动,焊接位置常常由较为稳定的平焊位置转变为立焊位以及仰焊位置,重力对熔滴过渡行为逐渐由促进作用转为抑制,熔池也因重力、电弧力以及环焊缝承托能力的变化而发生扰动,因此实现全位置焊接关键是在不同位置控制不同的焊接线能量输入^[7-12]。Lu等^[13]使用了直径为0.8 mm的低碳钢镀铜焊丝在ASTM1045钢上进行焊道熔覆试验,发现焊道沉积高度随着层数增加而线性增加,且焊层高度明显高于自然冷却速度下的焊层高度。Gomez Ortega等^[14]利用电弧焊接技术进行Al5Si铝合金构件制造时发现,在多层焊道叠加熔覆过程中,需通过提高焊接速度以抵消热输入累积带来的

焊层高度的线性增加,从而保持恒定的焊层高度。胡智坤等^[15]以直径1.2 mm的H08Mn2Si焊丝为填充材料,在6 mm厚Q235低碳钢基板上开展不同焊接工艺的焊缝成形实验,当焊接速度为1.07 m/min时,焊缝成形状态良好;速度提升至1.30 m/min时,焊缝出现轻微咬边缺陷;进一步增至1.35 m/min时,出现了驼峰现象。孙红叶等^[16]搭建HPVP-GTAW电弧熔丝增材制造系统,在对比分析不同电弧热源对成形部件微观组织和力学性能影响的基础上,通过改变焊接速度和送丝速度,明确了关键工艺参数对焊道形貌和几何尺寸的定量影响关系。

尽管当前研究通过实验与数值模拟的结合,在WAAM形貌控制及工艺应用已经取得一定进展,但现有研究中在焊接工艺参数和焊接位置的变化下,针对TIG沉积成形特点的定量分析仍较为匮乏。本文以TIG焊接工艺为核心,构建考虑熔滴过渡、重力作用、熔池流动及固液相变的三维瞬态计算流体动力学(CFD)数值模型,通过该模型系统研究五组不同焊接电流、焊接速度与熔滴温度组合条件下,单道单层焊道的熔池特征尺寸分布规律;同时,针对平焊、横焊、仰焊三组典型焊接位置,分析单道多层焊道的熔覆形貌特征,进一步揭示了焊接工艺参数对焊道成形的影响规律,为电弧增材制造工艺优化与技术提升提供了可靠的参考依据。

1 材料、方法与模型

1.1 材料性能

以Q235低碳钢为基材,其力学性能参数为:屈服强度为235 MPa,抗拉强度375 MPa,断后伸长率26%。试验选用ER80S-G焊丝作为填充材料,焊丝直径为1.0 mm,保护气体为80%Ar+20%CO₂混合气体。焊缝与母材保持等强或高强匹配。Q235钢与ER80S-G焊丝的化学成分分别如表1、表2所示。

1.2 数值模型

采用商业CFD软件FLOW-3D用于求解控制

表1 Q235钢的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition of Q235 low carbon steel(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cu
≤0.20	≤0.50	≤1.70	≤0.035	≤0.035	≤0.30
Ni	Cr	Mo	V	Nb	Ti
≤0.50	≤0.30	≤0.02	≤0.15	≤0.07	≤0.20

表2 E80S-G焊丝的化学成分组成(质量分数,%)

Table 2 Chemical composition of E80S-G wire(wt. %)

C	Si	Mn	P	S	Cr	Mo	Ni	Cu
≤0.06	≤0.68	≤1.57	≤0.009	≤0.008	≤0.02	≤0.01	≤0.87	≤0.04

方程和相关物理模型,该模型使用FLOW-3D独有的Tru-VOF方法,对自由表面的追踪问题具有很高的精度以及出色的计算效率。在本研究中,熔滴过渡、焊层成形以及传热计算基础是基板几何模型与热源模型的准确构建。在模型建立以及计算中忽略熔滴过渡的飞溅所带来的质量损失和热量损失;熔池内部流动形态为层流,不涉及湍流计算,并且流体状态为不可压缩流体;基板模型置于室温下(300 K)进行计算,与外部能量交换方式主要为对流和辐射换热,忽略熔池内流体蒸发导致的质量损失和热量损失。

1.2.1 熔池流动控制方程

基于以上假设,熔池流动、熔滴过渡及焊接传热计算受到能量守恒、质量守恒、动量守恒方程及VOF方程共同控制,其中VOF方程用于计算熔池内熔体运动及熔池表面形貌变化^[17]。

质量守恒方程:

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

能量守恒方程:

$$\frac{\partial(\rho T)}{\partial t} + \text{div}(\rho v T) = \text{div}\left(\frac{k}{c} \text{grad} T\right) + S_r \quad (2)$$

动量守恒方程:

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{V}}{\partial t} + (\mathbf{V} \cdot \nabla) \mathbf{V} \right) = -\nabla p + \mu \nabla^2 \mathbf{V} + \mathbf{J} \times \mathbf{B} + \mathbf{M} \quad (3)$$

VOF方程:

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

式中 ρ 为密度(单位: $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$); $\mathbf{V}$ 为速度矢量(单位: $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$); c 为比热容; T 为温度; k 为流体热导率; S_r 为流体的内热源以及由于粘性作用而使流体机械能转换的热能; p 为流体微元体积上的压力; μ 为动

力粘度; J 为焊接电流密度; B 为磁感应强度; M 为动量源项; F 为计算区域内网格单元中流体的平均体积分。 $F=1$ 表示流体完全充满网格单元; $0 < F < 1$ 表示流体处于计算单元内,存在间隙; $F=0$ 表明网格单元内尚不存在流体。计算域中第一相与第二相均为流体,在温度影响下则会展示出不同的物态。由于固-液混合区被视为孔隙度等于液体分数 f 的多孔区,因此采用焓-孔隙度方法追踪固液界面,即流体和非流体共存的界面单元;在该界面处加载能量源相实现对基材的加热,并且随着能量加载和能量的传播液固界面不断向固体方向迁移,能量源项也一同沿焊接方向运动。

1.2.2 电弧热输入

在电弧焊接过程的热结构模拟中,双椭球热源^[18]常常被用来应用于电弧热的能量描述。但在针对具有自由表面的熔池传热计算时,受电弧柱的匙孔效应^[19]的影响,易导致热流密度分布计算出现偏差。此外电弧热被视为其中且分布均匀的能量束,为提升熔池温度场与流场计算精度,选用高斯热源模型对电弧热流密度进行数学描述^[20]

$$q_{arc}(r) = \frac{Q_{arc}}{2\pi\sigma_a^2} \exp\left(\frac{-r^2}{2\sigma_a^2}\right) \quad (5)$$

$$r = \sqrt{x^2 + y^2}$$

其中, σ_a 可以根据以下的经验公式进行确定^[6]:

$$\sigma_a = 0.533 I^{0.2941} (\text{mm}) \quad (6)$$

1.2.3 熔滴热输入

焊丝熔化所需热量主要来源于电弧对焊丝前端的加热作用。当熔滴由焊丝前端过渡至熔池内,此时熔池热量与电弧热量共同作用于基板区域并进行后续的传热过程。当忽略液滴飞溅与蒸发损失后,熔滴的过渡频率 f_d 可通过以下公式进行计算:

$$f_d = \frac{3\rho_s d_w^2 v_w}{2\rho_l d_d^3} \quad (7)$$

式中 ρ_s 为固体焊丝材料密度; d_w 为焊丝直径; v_w 为送丝速度; ρ_l 为液态熔滴密度; d_d 为过渡熔滴直径。

当熔池在环焊缝区域初步形成后,输入的热量会通过热传导快速向基板内部(下方)及熔池两侧扩散,同时部分热量通过对流与辐射作用散失至空气中。 Q_{arc} 作用于熔池的表面,通过熔滴的稳定过渡,熔池内部具有稳定的热量 Q_{drop} , 可通过以下公式

进行计算:

$$Q_{drop} = c_L m_d f_d \Delta T = \frac{\pi c_L f_d \rho_L d_d^3 (T_d - T_0)}{6} \quad (8)$$

其中, Q_{arc} 与 Q_{drop} 共同组成了计算区域内部热量总和 Q :

$$Q = Q_{arc} + Q_{drop} \quad (9)$$

式中 c_L 为熔滴当前温度比热容; m_d 为熔滴质量; f_d 为熔滴过渡频率; T_d 为滴落时刻的熔滴温度; T_0 为焊丝前端初始温度。

1.2.4 熔滴温度

焊接短路时刻的熔滴温度由熔滴热焓和比热容确定:

$$T_d = \frac{H_d - H_i}{C_{drop}} + T_i \quad (10)$$

式中 T_d 为短路时刻的熔滴温度(单位: $^{\circ}\text{C}$); H_d 为温度为 T_d 时的熔滴热焓; H_i 为温度为 T_i 时的低碳钢热焓值; C_{drop} 为熔滴比热。由于熔滴过渡行为中熔滴瞬时温度较难获取, 因此根据低碳钢熔滴热焓与焊接电流的关系数据^[21-22], 结合低碳钢比热容随温度的变化曲线, 可获得熔滴温度 T_d 与焊接电流 I 的近似表达式为:

$$T_d = 0.02825I + 2438.3 \quad (50 \leq I \leq 250) \quad (11)$$

由上式计算可知, 焊接电流 I 在上下界限值时, T_d 分别为 2 718.51 K 与 2 712.86 K, 两者相差较小; 为定量观察焊接过程中 Q_{arc} 与 Q_{drop} 的共同作用, 因此熔滴温度 T_d 统一设置为 2 700 K。

1.2.5 边界条件

电弧向环焊缝传递热能的过程是通过一定作用面积进行的。当熔池自由表面发生变形以后, 作用于其上的热流密度分布会相应变化。考虑到环焊缝区域熔池表面变形量较小, 可假设贴体坐标系下的热能边界条件保持不变。因此环焊缝材料表面散热损失的对流热 Q_{conv} 、辐射热 Q_{rad} 的表达式为:

$$Q_{conv} = h_c (T - T_f) \quad (12)$$

$$Q_{rad} = \sigma_s \varepsilon (T^4 - T_f^4)$$

基于此, 计算模型的边界条件设置如下^[24]:

$$k \frac{\partial T}{\partial Z^*} \times \frac{\partial Z^*}{\partial Z} = Q_{drop} + Q_{arc} - Q_{conv} - Q_{rad} \quad (13)$$

1.3 计算区域与模型设定

为提高计算效率, 对基板模型进行比例简化,

将简化后的基板固体模型与电弧热源模型、熔滴过渡模型耦合, 以模拟重力作用下的焊道形态演变及焊缝侧壁-母材区域的温度场变化历程^[24-30]。熔滴过渡至熔池内传热相变后形成固态焊层, 在该过程中需对其热导率、比热容等热物性参数采用随温度变化的动态设置(如图 1 所示); 对于高温熔融态金属, 由于其热物性参数实验获取难度大, 参考现有文献^[31]将其设为定值。结合 Q235 低碳钢的熔滴过渡特性(熔滴直径约为焊丝直径的 1.1~1.2 倍), 将熔滴直径 d_d 统一设定为 1.2 mm^[32], 送丝速度设定为 1.5 m/min; 模型所用材料的关键热物理性能参数如表 3 所示。

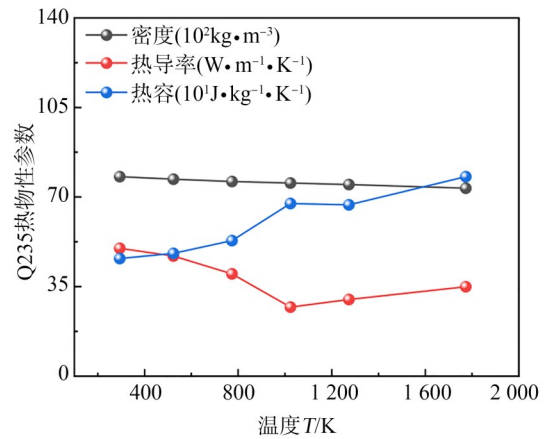


图1 随温度变化的Q235低碳钢材料的热物理性质
Fig. 1 The thermal physical properties of Q235 low-carbon steel materials that vary with temperature

表3 模型用材料热物理性能参数

Table 3 Thermal-physical material properties used in simulation

性质	值	单位
密度(ρ)	图1	kg/m^3
比热(c)	图1	J/K
热导率(k)	图1	$\text{W}/(\text{m} \cdot \text{K})$
表面张力($\partial\gamma/\partial T$)	-2×10^{-4}	$\text{N}/(\text{m} \cdot \text{K})$
剪切粘度(μ)	0.003 9	$\text{kg}/(\text{m} \cdot \text{s})$
液相线温度(T_L)	1 759	K
固相线温度(T_S)	1 693	K
熔化潜热(h_f)	2.47×10^5	J/kg
传热系数(h_c)	20	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$
辐射系数(ε)	0.9	—
斯蒂芬-玻尔兹曼常数(σ)	5.67×10^{-8}	$\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K}^4)$

如图2所示, 焊道熔覆计算模型的几何尺寸为: 长 100 mm, 高 5 mm, 宽 10 mm, 沿 Z 轴上半部分(高度 5 mm)设为真空区域, 以模拟实际焊接的保护气

体环境(见图2)。熔滴以固定参数(温度 2 700 K、速度 0.3 m/s、直径 1.2 mm)向熔池过渡^[32-33],并在熔滴滴落位置耦合高斯热源模型形成贴合现场实际的熔滴热 Q_{drop} 与电弧热 Q_{arc} 的共同热输入作用。网格划分采用Non-Conforming类型,网格尺寸设定为 0.5 mm,该尺寸可充分描述熔池自由表面的细微变化;采用 GMRES 解算器求解压力-速度耦合方程,使用拉格朗日分裂方法追踪气-液尖锐界面,初始时间步长设置为 2.5×10^{-5} s。

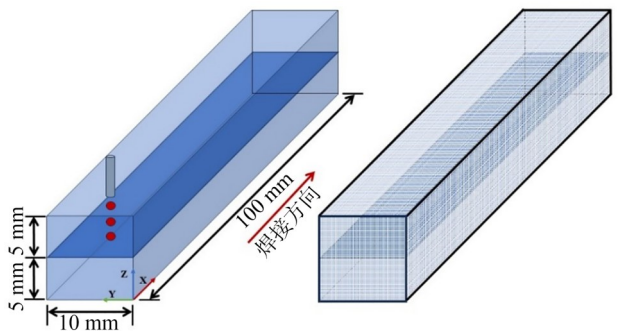


图2 焊道熔覆计算模型以及网格模型

Fig. 2 Weld pass cladding calculation model and mesh model

焊接位置通过改变重力方向影响熔滴过渡与熔池流动,本研究选取平焊、横焊、仰焊三种典型位置,如图3所示:平焊位——重力促进熔滴过渡(见图3a),横焊位——重力方向与焊接方向垂直,熔池稳定性受到影响(见图3b),仰焊位——相较于其他两个焊接位置,熔滴过渡方向与重力方向相反(见图3c),重力对熔滴的拖曳力抑制其稳定过渡。当焊接工艺参数固定时,仰焊位的熔滴过渡频率会下降、熔滴尺寸增大,过渡至熔池后易引发自由表面出现较大扰动而形成焊接缺陷。此外,熔池中心(高温区)与两侧(低温区)的表面张力梯度驱动 Marangoni 对流,会进一步加剧自由表面的不稳定性。

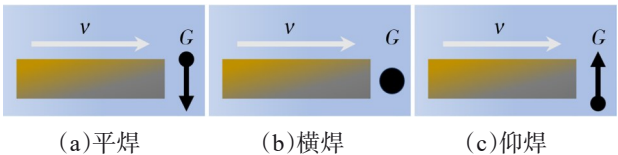


图3 焊接位置示意

Fig. 3 Welding position diagram

为定量分析焊接工艺参数和焊接位置对单层单道焊道熔覆形态及熔池流动性的影响,设计多组模拟工况,通过调整焊接速度 v 、熔滴温度 T_{drop} 及焊

接位置,观察焊道尺寸特征参数的变化,具体模拟参数如表4所示。

表4 模拟用焊接工艺参数

Table 4 Welding condition parameters selected for simulation

组别	焊接速度 $v/(\text{mm}\cdot\text{s}^{-1})$	熔滴温度 T_{drop}/K	焊接 位置	焊接电流 I/A	焊接电压 U/V
1	8	2 300	平焊	180	22
2	13	2 500	横焊	180	22
3	18	2 700	仰焊	180	22
4	23	2 900	仰焊	180	22
5	28	3 100	仰焊	180	22

2 结果与讨论

本研究通过三维瞬态 CFD 模型模拟 TIG 焊接增材制造过程,重点分析焊道熔覆计算模型中 XZ 截面与 YZ 截面的熔池流动状态及特征尺寸(熔池长度、高度、宽度),如图4所示。熔池流动形态直接反映焊道成形趋势与焊接质量风险,通过量化不同工艺参数下熔池特征尺寸的变化规律,可明确熔池流动行为与焊道形貌的内在关联,为焊接工艺参数优化提供理论依据。

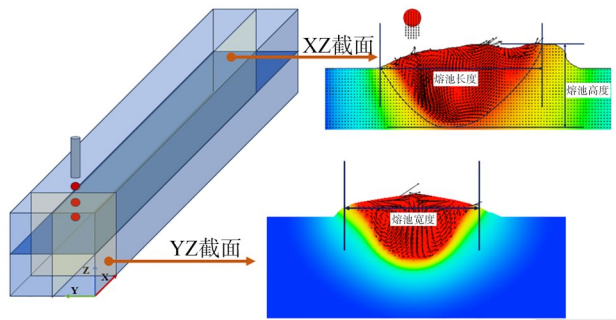


图4 焊道截面以及熔池特征尺寸示意

Fig. 4 Weld layer cross-section and molten pool characteristic size diagram

以焊接速度 8 mm/s 的标准工艺,首先分析熔池生长与焊道熔覆的动态过程,如图5所示。初始时刻,熔滴过渡至基板上表面,基板在熔滴热 Q_{drop} 与 Q_{arc} 的共同作用下局部熔化形成熔池,并随热输入累积逐渐长大,最后趋于稳定状态。 $t=0.7$ s时,熔池呈现“左低右高”分布,焊道尾部($x\approx15$ mm)已冷却凝固,焊层高度约为 1.12 mm。随着熔覆过程持续,焊层高度在 $t=1.3$ s时上升 51.78%至 1.70 mm; $t=1.9$ s时,焊道固态区域呈现较好的均一性,熔池形态与 t

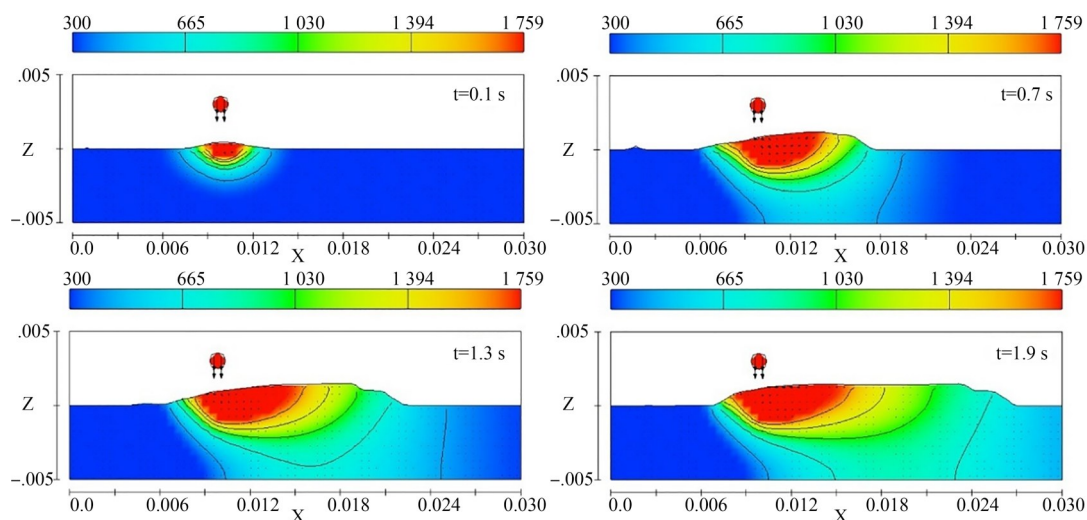


图5 不同时刻熔池生长以及焊道熔覆状态

Fig. 5 Molten pool growth and weld layer cladding state at different moment

=1.3 s时刻状态相近,表明熔池尺寸变化平稳,熔覆过程进入稳定阶段。

2.1 焊接速度的影响

焊接速度直接关联着焊接效率,较大的焊接速度会在一定程度减少操作时间。提升焊接速度可缩短加工时间,但在其他参数固定时,焊接线能量随速度升高而降低,易导致焊缝熔深、熔宽减小,诱发未熔合、咬边等缺陷;若速度过慢,单位长度焊缝热输入过高,会造成熔池尺寸异常增大、熔覆量堆积,甚至出现焊透问题。此外,焊丝移动及熔池流动性的共同作用会使熔滴过渡后向熔池尾端运动,

可能形成驼峰形貌。

图6为5种焊接速度(8~28 mm/s)下的焊道熔覆状态。整体看来,随着焊接速度由初始的8 mm/s上升至28 mm/s后,焊道高度显著下降,且温度高于300 K的区域面积大幅缩减,表明 Q_{arc} 与 Q_{drop} 的热输入无法在焊道区域有效积累,单位时间熔覆量减少导致熔池难以扩张,焊道特征尺寸整体缩小。同时,当焊接速度过快时,受液柱效应影响,高温熔滴进入熔池后易向熔池尾端流动并冲出熔池形成焊珠,即为驼峰现象。可以看到,当焊接速度为15、23、28 mm/s时, $X=28$ 、14、21 mm位置,焊道上表面

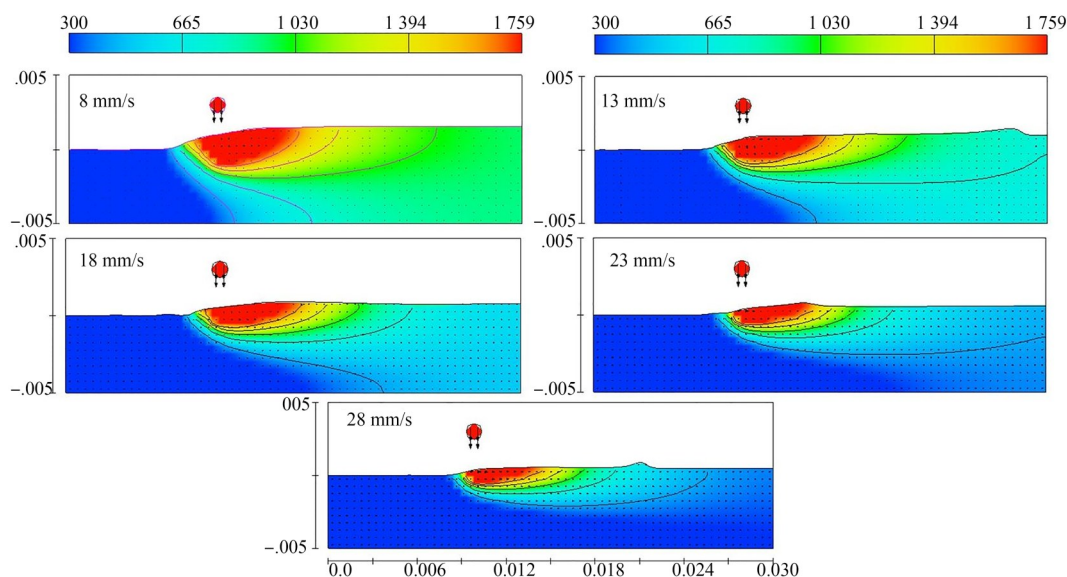


图6 不同焊接速度下熔池生长及焊道熔覆状态

Fig. 6 Molten pool growth and weld layer cladding state at different welding velocities

出现轻微的凸起状态。

图7为单层单道焊过程中焊接速度与熔池特征尺寸的关系。可以看出,随着焊接速度的上升,熔池长度和熔池深度呈下降趋势。当焊接速度为8 mm/s时,熔池长度、高度分别为7.11 mm、2.79 mm;当焊接速度上升至28 mm/s时,二者分别下降20.39%、59.14%。这一差异源于高速焊接下单位时间基板表面热输入骤降,熔覆量不足导致焊道高度难以积累,且熔池高度对速度变化的敏感度高于长度。

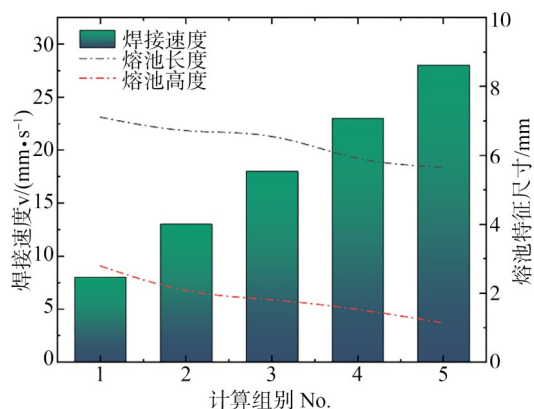


图7 单层单道焊道熔覆过程中焊接速度与熔池特征尺寸关系

Fig. 7 Correlation between welding velocity and molten pool characteristic size in single-layer single-pass cladding

2.2 熔滴温度的影响

熔池流动性主要取决于液态金属的剪切粘度与表面张力。熔滴温度越高,过渡至熔池后可提升熔池整体温度,降低剪切粘度、增强表面张力梯度效应,从而改善熔池流动性,使焊道熔宽增大;但在

横焊、仰焊等位置时,重力会驱动熔池向下方流动,过高的流动性反而可能导致焊道形貌不规则,因此需根据焊接位置控制熔滴温度。

本研究设置5组熔滴温度(2 300~3 100 K)进行模拟。XZ截面如图8所示,随着熔滴温度的上升,熔池截面面积逐渐增大,表明高温熔滴携带更多热量,促进基板材料熔化且熔滴与熔池的融合性提升,焊道表面平整度改善。同时,基板受传热影响快速升温,等温线分布显示高温区域(接近液相线温度1 759 K)比例随熔滴温度升高而扩大。图9的YZ截面进一步表明,熔池宽度随熔滴温度升高而增大,验证了高温熔池流动性增强、更易向两侧扩展的规律。

图10为熔滴温度对熔池特征尺寸的影响。焊接速度固定为8 mm/s时,熔滴初始温度从2 300 K升至3 100 K,熔池高度由2.77 mm上升19.86%至3.32 mm,熔池宽度从4.64 mm上升11.64%至5.18 mm;熔池长度初始值(2 300 K时)为7.07 mm,随温度升高分别上升6.51%、9.83%、4.84%、11.30%,最终达到9.65 mm(3 100 K)。相较于长度,熔池高度与宽度对温度变化的影响更明显。

2.3 焊接位置的影响

焊接位置随工件加工路径动态变化,在2.2小节中已讨论过平焊位熔滴温度对焊道成形的影响,而横焊、仰焊位因重力方向改变,熔池流动稳定性更易受扰动。为对比不同位置的成形差异,本研究

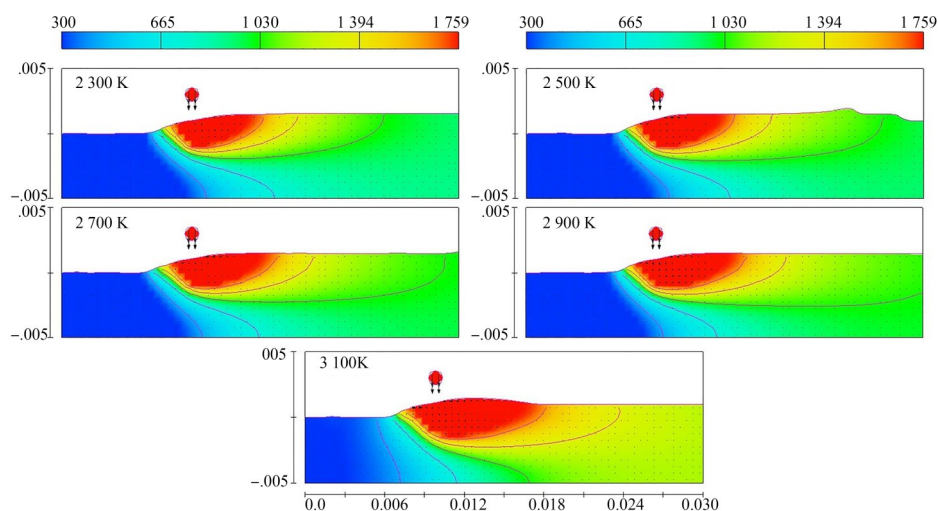


图8 不同熔滴温度下熔池以及焊道形貌XZ截面

Fig. 8 Molten pool and weld layer morphology cross-sections XZ at different droplet temperatures

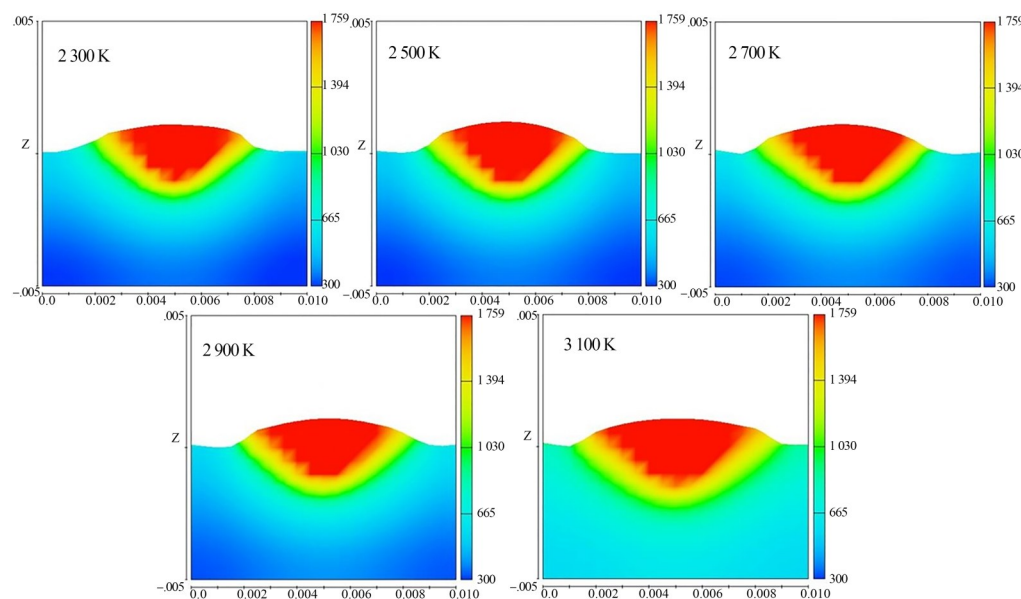


图9 不同熔滴温度下熔池以及焊道形貌YZ截面

Fig. 9 Molten pool and weld layer morphology cross-sections YZ at different droplet temperatures

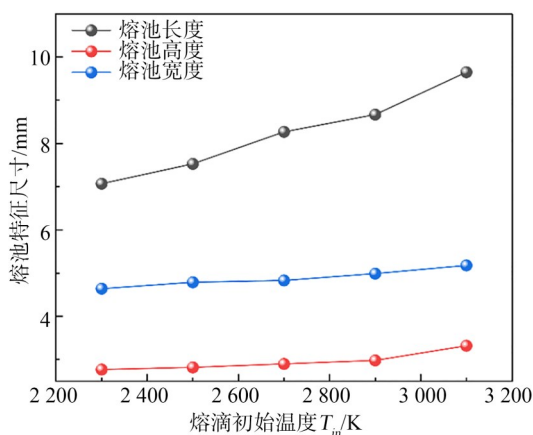


图10 不同熔滴温度下熔池及焊道形貌截面尺寸信息

Fig. 10 Cross-sectional size information of molten pool and weld layer morphology at different droplet temperatures

选取平焊、横焊、仰焊三种典型位置,在熔滴温度固定为2300 K、无层间冷却时间、焊接方向沿X轴正方向至负方向条件下,开展单道多层(5层)熔覆模拟。

图11为三种位置下多层焊道的熔覆形貌(XZ截面, $Y=0.00$ m)。第一道焊层熔覆后,起弧位置与熄弧位置高度较为一致,且结束时刻,熄弧位置熔池尺寸较为平均;随着过程进行,第四层熔覆结束后,焊层左端(熄弧端)相较于右端(起弧端)出现明显的高度差异。整体熔覆结束后,焊道形貌整体呈现“左低右高”的倾斜状态。

为了着重分析熔覆过程中焊层高度变化,选取

焊道左端($X=0.02$ m,熄弧端)、中部($X=0.05$ m)、右端($X=0.08$ m,起弧端)三个典型位置记录熔覆高度,如图12所示。随着焊道熔覆过程进行,各位置熔覆高度呈现非线性增长。整体看来,第二层焊道熔覆后三者较为相近;第三层焊道熔覆后,焊道左端高度明显低于中部和右端位置,平焊、横焊、仰焊的左端高度分别为0.45 mm、0.30 mm、0.47 mm;熔覆至第五层结束,右端与左端的高度差 ΔH 分别为2.53 mm(平焊)、2.41 mm(横焊)、2.19 mm(仰焊)。进一步分析重力的作用机制:平焊时重力与熔滴过渡方向一致,促进熔融金属堆积,焊层高度差最大;横焊时重力方向与焊接方向垂直,熔池向X轴正方向偏移,导致左端高度下降;仰焊时重力与熔滴过渡方向相反,不仅抑制熔滴稳定过渡,还削弱熔池内部Marangoni对流效应,加剧熔池扰动,但因熔池流动性受重力抑制,高度差反而小于平焊与横焊。

为验证数值模型的准确性,本研究选用Q235低碳钢基板,采用与模拟条件一致的焊接参数(电流为180 A,电压为22 V,焊接速度为8 mm/s,保护气体为80%Ar+20%CO₂)进行了单道多层(5层)焊道熔覆实验。如图13所示,三个焊位下的熔覆形态有明显不同:平焊试样右侧起弧端高度为9.56 mm,比左侧熄弧端高约2.03 mm,焊道上表面因表面张力作用呈现出较为“平滑”的状态;横焊试样左右端

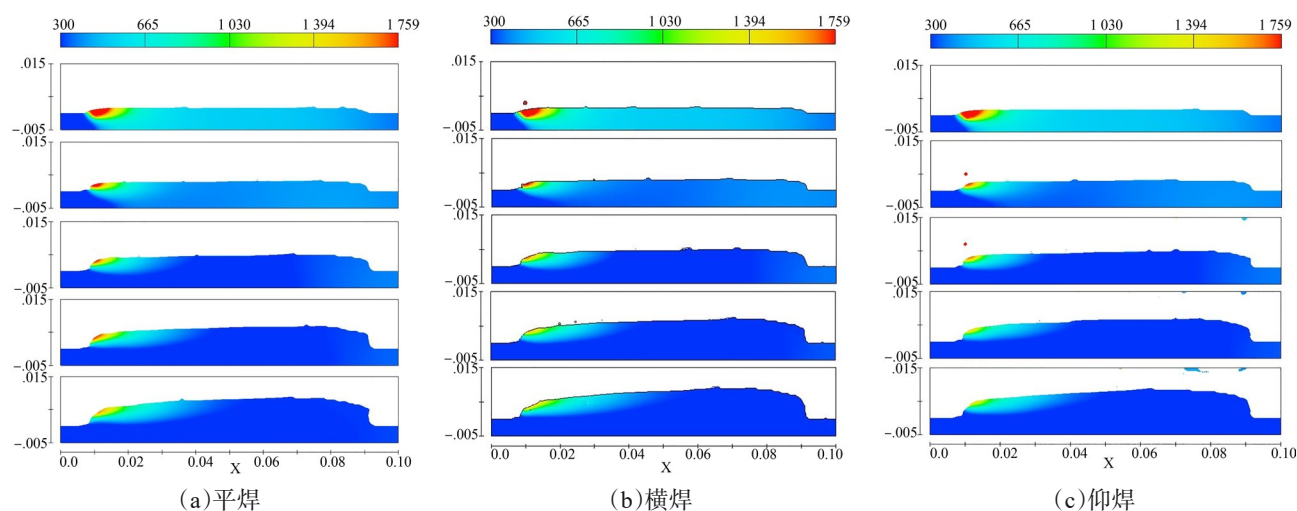


图 11 平、横、仰焊位下多层熔覆形貌轮廓

Fig. 11 Morphology of multi-layer cladding at flat, horizontal and overhead welding positions

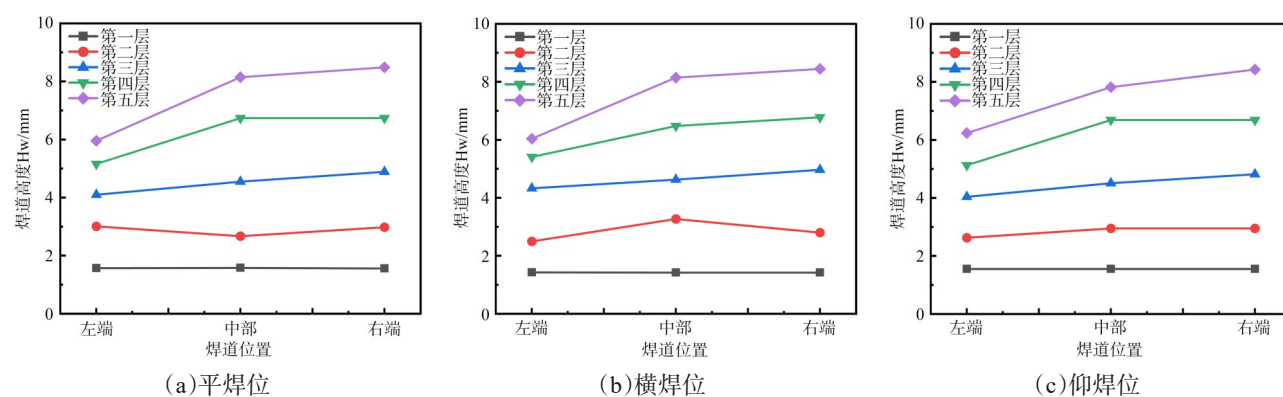


图 12 平、横、仰焊位下熔覆层典型位置沉积高度

Fig. 12 Deposition heights at typical positions of cladding layers in flat, horizontal, and overhead welding positions

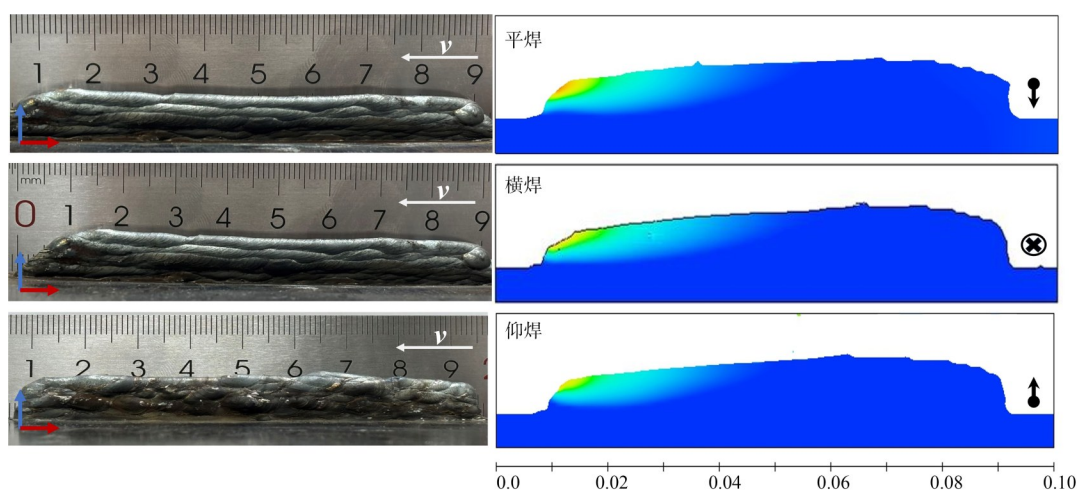


图 13 焊道熔覆实验

Fig. 13 The welding cladding experiments

高度差为 1.84 mm, 焊道整体沿 X 轴正方向倾斜; 仰焊试样在距右端 25.00 mm 处高度波动较大(差值

0.35 mm), 熔池扰动特征明显。实验与模拟结果对比显示, 模拟预测的端部高度差(平焊 2.53 mm、横

焊2.41 mm、仰焊2.19 mm)略大于实验值,主要源于模拟中忽略层间冷却导致的累积热输入影响以及熔滴飞溅导致的质量损失。随着焊层数的增加,熔池的热累积效应使得端部塌陷量呈现非线性增长,这一趋势与模拟预测一致。

3 结论

本文针对TIG焊接增材制造过程中焊道形貌难以控制的问题,以Q235低碳钢为研究对象,通过建立三维瞬态CFD数值模型,考虑了熔池流动、熔滴过渡、重力影响以及固液相变等因素,定量分析了焊接速度、熔滴温度以及焊接位置对单层/多层焊道熔覆形貌以及熔池尺寸变化影响。主要结论如下:

(1)焊接速度上升(8 mm/s上升至28 mm/s)导致单位时间内熔滴过渡量下降,熔池体积减小,熔池高度下降59.14%,熔池长度下降20.39%;且高速焊接因液柱效应,焊层出现驼峰现象,表明高速焊接一定程度降低了熔池稳定性。

(2)熔滴温度上升(2 300 K上升至3 100 K),熔池高度增加19.86%,熔宽增加11.64%,熔池温度上升导致的Marangoni对流增强了熔体流动性,相应的焊道表面更为平滑;但横焊、仰焊位需控制熔滴温度,避免重力导致的焊道形貌不规则。

(3)焊接位置转变(平焊-横焊-仰焊),代表重力方向与熔滴过渡方向偏移,其对熔滴过渡行为、熔池流动行为以及熔覆形貌造成影响。平焊时重力促进熔滴过渡与熔融金属堆积,横焊时重力使熔池向一侧偏移,仰焊时重力抑制熔滴过渡并削弱Marangoni对流,三者多层熔覆后均呈现“熄弧端低、起弧端高”的形貌特征,起弧/熄弧高度差为:平焊(2.53 mm)>横焊(2.41 mm)>仰焊(2.19 mm)。

(4)经实验验证,平焊、横焊、仰焊的实验高度差与模拟值误差较小,且“端部高度差随层数非线性增长”的趋势完全一致;模拟值略高于实验值的差异主要源于忽略层间冷却与熔滴飞溅损失,证实该CFD模型可精准预测TIG-WAAM焊道形貌,为工艺参数优化提供可靠工具。

参考文献:

[1] DebRoy T, David S A. Physical processes in fusion weld-

ing[J]. Reviews of modern physics, 1995, 67(1):85.

[2] Ou W, Wei Y, Liu R, et al. Determination of the control points for circle and triangle route in wire arc additive manufacturing (WAAM)[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 53:84-98.

[3] Su C, Chen X, Gao C, et al. Effect of heat input on microstructure and mechanical properties of Al-Mg alloys fabricated by WAAM [J]. Applied Surface Science, 2019, 486:431-440.

[4] Gierth M, Henckell P, Ali Y, et al. Wire Arc Additive Manufacturing (WAAM) of Aluminum Alloy AlMg5Mn with Energy-Reduced GMAW [J]. Materials, 2020, 13(12):2671.

[5] Oyama K, Diplas S, M'Hamdi M, et al. Heat Source Management in Wire-Arc Additive Manufacturing Process for Al-Mg and Al-Si Alloys [J]. Additive Manufacturing, 2019, 26:180-192.

[6] 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.

[7] 王定洲,陈刚,张宇,等. 空间焊接位置对熔滴过渡的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版), 2018, 32(5):633-636.

WANG D Z, CHEN G, ZHANG Y, et al. Effect of spatial welding positions on molten droplet transfer [J], Journal of Jiangsu University of Science and Technology (Natural Science Edition), 2018, 32(5):633-636.

[8] Alireza D T. Neutralizing the effect of the angle variations on the drop detachment in automatic GMAW system [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2010, 54(1-4):123-137.

[9] 黄丹,蒋国志,先泽均,等. 山地管道全位置自动焊工艺[J]. 焊接技术, 2023, 52(09):69-72.

HUANG D, JIANG G Z, XIAN Z J, et al. All position automatic welding process of mountainous pipelines [J], Welding Technology, 2023, 52(09):69-72.

[10] 刘文吉,肖宇,杨嘉昇,等. 窄间隙P-GMAW仰焊位置熔滴过渡影响因素及控制方法[J]. 焊接学报, 2024, 45(01):58-63+132-133.

LIU W J, XIAO Y, YANG J S, et al. Influence factors and control methods of droplet transfer in narrow gap P-GMAW overhead welding position [J]. Transactions of the Chian Welding Institution, 2024, 45(01):58-63+132-133.

[11] 黄龙鹏. X70钢管自保护药芯焊丝全位置自动焊接接

- 头组织与力学性能研究[J]. 电焊机, 2020, 50(05): 1-9+133.
- HUANG L P. Study on microstructure and properties of automatic all-position welding joint with self-shielded flux-cored wire for X70 steel pipe[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(05): 1-9+133.
- [12] 周林, 龚永飞, 杨党辉, 等. 全位置药芯焊丝自保护焊厚壁钢管焊接试验[J]. 北京石油化工学院学报, 2007(04): 4-6.
- ZHOU L, GONG Y F, Yang D H. Experimental Research on All-position Thick Steel Tube Using Self-shielded Flux-wire Welding[J]. Journal of Beijing Institute of Petro-chemical Technology [J]. 2007(04): 4-6.
- [13] Lu X, Zhou Y F, Xing X L, et al. Open-source wire and arc additive manufacturing system: formability, microstructures, and mechanical properties[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2017, 93(5-8): 2145-2154.
- [14] Gomez O A, Corona G L, Deschaux-Beaume F, et al. Effect of process parameters on the quality of aluminium alloy Al5Si deposits in wire and arc additive manufacturing using a cold metal transfer process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2017, 23(4): 316-332.
- [15] 胡志坤, 武传松. 高速MAG电弧焊驼峰焊道产生过程的实验研究[J]. 金属学报, 2008, 44(12): 1445-1449.
- HU Z K, WU C S. Experimental investigation on forming process of humping bead in high speedmag arc welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2008, 44(12): 1445-1449.
- [16] 孙红叶, 从保强, 苏勇, 等. Al-6.3Cu铝合金电弧填丝增材制造成形与组织性能[J]. 航空制造技术, 2017(14): 72-76.
- SUN H Y, CONG B Q, SU Y, et al. Geometry, Microstructure and Properties of Wire+Arc Additive Manufacturing Al-6.3Cu Alloy Deposits [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2017(14): 72-76.
- [17] 武传松. 焊接热过程与熔池形态[M]. 北京: 机械工业出版社, 2008: 110.
- [18] Wu D S, Hua X M, Ye D J, 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.
- [19] Goldak J, Chakravarti A, Bibby M. A new finite element model for welding heat sources[J]. Metall Trans B, 1984, 15: 299-305.
- [20] Bai X, Colegrove P, Ding J, et al. Numerical analysis of heat transfer and fluid flow in multilayer deposition of PAW-based wire and arc additive manufacturing[J]. Int. J. Heat Mass Transf., 2018; 124: 504-516.
- [21] 曹振宁. TIG/MIG焊接熔透熔池流场与热场的数值分析[D]. 长沙: 中南大学, 2010. CAO Z N.
- [22] 夏胜全, 朱志明, 孙晓明. 熔滴短路过渡建模及熔池三维瞬态行为模拟[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2016, 48(05): 160-165.
- XIA S Q, ZHU Z M, SUN X M. Modeling of droplet short-circuiting transfer and simulation of three-dimensional transient behavior of molten pool[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2016, 48(05): 160-165.
- [23] Zhou J, Tsai H L. Modeling of transport phenomena in hybrid laser-MIG keyhole welding [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2008, 51(17-18): 4353-4366.
- [24] 王洪铎, 常素腾, 路永新, 等. SS304和Q235异种钢搅拌摩擦焊接头腐蚀有限元模拟[J]. 焊接, 2024(05): 44-50+62.
- WANG H D, CHANG S T, LU Y X, et al. Finite element simulation of corrosion of SS304 and Q235 dissimilar steel friction stir welded joints [J]. Welding & Joining, 2024(05): 44-50+62.
- [25] 姚相林, 周宏. 基于Ansys的Q235A焊接数值模拟[J]. 舰船科学技术, 2022, 44(13): 85-89.
- YAO X L, ZHOU H. Numerical simulation of Q235A welding based on Ansys [J]. Ship Science and Technology, 2022, 44(13): 85-89.
- [26] 汪小锋, 刘宏, 唐小波. 热输入对Q235钢焊接接头缺陷、组织和力学性能的影响[J]. 材料热处理学报, 2022, 43(04): 162-169.
- WANG X F, LIU H, TANG X B. Effect of heat input on defects, microstructure and mechanical properties of welded joint of Q235 steel [J]. Transactions of Materials and Heat Treatment, 2022, 43(04): 162-169.
- [27] 赵琦, 程家豪, 焦传佳, 等. Q235薄板焊接变形的试验研究与模拟分析[J]. 电焊机, 2023, 53(06): 76-82.
- ZHAO Q, CHENG J H, JIAO C J, et al. Q235 Sheet Welding Deformation Analysis of the Experiment and Simulation [J]. Electric Welding Machine, 2023, 53(06): 76-82.
- [28] 徐育焱, 钱鹏, 李敬勇, 等. 304&Q235异种钢TIG焊接接头组织及力学性能研究[J]. 电焊机, 2022, 52(01):