

引用格式:周子昂,范秋月,肖子华,等.基于风场的GMAW焊接电弧与熔池行为数值模拟研究[J].热加工工艺,2026,55(1):93-98+106. ZHOU Ziang, FAN Qiuyue, XIAO Zihua, et al. Numerical Simulation Study of Arc and Molten Pool Behavior in GMAW Welding Based on Wind Field [J]. Hot Working Technology, 2026, 55(1): 93-98+106.
DOI: 10.14158/j. cnki. 1001-3814. 20241761

基于风场的 GMAW 焊接电弧与熔池行为 数值模拟研究

周子昂^{1,2}, 范秋月², 肖子华², 李铭涛², 魏世轩²

(1. 福建理工大学 机械与汽车工程学院, 福建 福州 350118; 2. 龙岩学院 福建省焊接质量智能评估重点实验室, 福建 龙岩 364012)

摘要:为揭示风场环境对熔化极气体保护焊(GMAW)焊接过程中电弧与熔池行为的影响机理,考虑标准 $k-\varepsilon$ 湍流模型,建立电弧与熔池耦合的三维瞬态模型,对比分析垂直于焊接方向的侧向风场强度大小对电弧形态以及熔池形貌的影响规律。结果表明:侧向风场环境下,电弧等离子体的运动轨迹和速度发生变化,过大的侧向风场还削弱保护气体的保护效能,提高焊缝中气孔缺陷的形成风险;风场强度的提高使电弧弧长增加、散热速率加快,导致其对工件的热输入量降低,熔池形状尺寸变小。通过对比仿真结果与焊接实验拍摄的电弧形态和熔池形貌,验证了模型的可靠性。

关键词:熔化极气体保护焊;风场环境;湍流模型;电弧形态;熔池形貌

中图分类号: TG402

文献标识码: A

文章编号: 1001-3814(2026)01-0093-06

Numerical Simulation Study of Arc and Molten Pool Behavior in GMAW Welding Based on Wind Field

ZHOU Ziang^{1,2}, FAN Qiuyue², XIAO Zihua², LI Mingtao², WEI Shixuan²

(1. School of Mechanical and Automotive Engineering, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China; 2. Fujian Provincial Key Laboratory for Intelligent Assessment of Welding Quality, Longyan University, Longyan 364012, China)

Abstract: To reveal the influence mechanism of crosswind conditions on arc and molten pool behavior during the gas metal arc welding (GMAW) process, a three-dimensional transient model of arc and molten pool coupling was established using the standard $k-\varepsilon$ turbulence model. A comparative analysis was conducted on the effects of varying crosswind intensities perpendicular to the welding direction on arc morphology and molten pool morphology. The results show that under crosswind conditions, the arc plasma's trajectory and velocity change. Stronger crosswinds weakens the protective efficiency of the shielding gas, leading to the formation of vortices in the welding area and increasing the risk of porosity defects. The increase of wind field strength increases the arc length and accelerates the heat dissipation rate, leading to the decrease of the heat input to the workpiece and the smaller shape and size of the molten pool. The reliability of the model is verified by comparing the simulation results and arc morphology and pool morphology captured by welding test.

Key words: gas metal arc welding; crosswind conditions; turbulence model; arc morphology; molten pool morphology

熔化极气体保护焊(GMAW)具有焊接效率高、成本低、操作灵活等特点,是工业生产中常用的焊接方法之一^[1-2],但同样存在抗风性能差、熔滴过渡过程中电弧不稳定等问题。为满足工业生产需求,有学者

通过改变焊接环境条件或施加外部物理因素来调控焊接过程中电弧、熔滴和熔池的特性,进而改善焊缝成形质量^[3-8]。

Cai 等^[9-10]对比混合气体中部分气体含量对焊接过程造成的影响。Wang 等^[11-13]利用数值模拟技术,发现复合磁场的引入可有效抑制焊接缺陷的形成,同时加速熔滴过渡频率,增强熔池中液态金属的横向填充,使熔池的温度分布更加均匀。

另外,环境条件如温度、风速等因素对焊接质量也具有不可忽视的影响。董家兴等^[14]的初步研究表明,风速提升会导致焊缝中的气孔明显增多,但对焊

收稿日期:2024-08-28 修回日期:2025-09-01

基金项目:福建省青年基金项目(2022J05247); 2022 年度新罗区产学研科技联合创新项目(2022122708)

作者简介:周子昂,男,硕士研究生,主要研究方向:熔化极气体保护焊数值模拟;E-mail:1476436586@qq.com

通讯作者:范秋月,女,副教授,硕士生导师,主要研究方向:焊接工艺与焊接质量评估的研究;E-mail:fanqiuyue1024@163.com

缝的力学性能等指标的影响不明显。孟宪伟^[15]设计了可调节风速的实验环境,探究风速大小对 A5083 铝合金焊接接头的抗拉强度、冲击韧性,以及显微硬度的影响变化。王璐等^[16]表明,强风环境下进行焊接作业,可通过增加保护气体流量来获得符合标准力学性能的焊接接头。邹晔等^[17]、梁明明等^[18]利用数值模拟技术得出,在有风环境下,选用合适的气体保护焊喷嘴结构,能显著提高保护气体的利用效率,增强焊接质量的稳定性。高延峰^[19-21]提出一种针对水下排水罩结构的局部干法横向焊接方法,通过适当调节排水罩内部形成的风场对熔池的吹袭作用,有助于抑制熔池下淌、改善焊缝成形。胡翱^[22]通过电弧传感检测技术和数值模拟手段,探究了排水罩内由高压气体产生局部风场对电弧特性的作用。研究表明,电弧在风力的作用下会产生偏移,且偏移角度与风速呈正比关系。同时,随着风速的增加,电弧的熄灭频率增加,传感性能下降。该研究中的数值模型主要针对微型排水罩内部的风场结构,并将气体流动状态简化为层流。而实际情况中,从喷嘴喷出的保护气体更符合湍流状态^[23-24]。

在自然环境下,风场对焊接操作的影响并非局限于局部区域,还会削弱焊接区域周围保护气体的浓度,缩小有效保护范围,提升熔融金属的冷却速率,对焊缝的物理性能产生一定的影响。根据 GB/T 50661—2011《钢结构焊接规范》中规定,气体保护焊作业时最大风速不宜超过 2m/s。在夏季,为了降温,工厂会配备大功率风扇以促进室内空气流通,但受施工场所限制,无法完全隔绝这些风扇产生的风场,导致焊接过程中会受到风场的干扰。本研究运用数值模拟技术,考虑气体湍流流动特性,建立电弧与熔池相互作用的三维瞬态模型,探讨了垂直于焊接方向的侧风强度对焊接电弧流场、电场以及温度场的影响机理,并通过焊接实验来验证仿真结果的准确性。

1 数学模型

1.1 基本假设

实际焊接过程中涉及的物理现象众多且复杂,在保证数值模拟的可靠性与合理性的前提下,作以下假设:

(1) 电弧等离子体为标准大气压下的不可压缩流体,气体域的流动状态为湍流,以贴近实际流场情况。

(2) 电弧等离子体区域需满足局部热力学平衡状态。

(3) 电弧满足光学薄性质,辐射相关参数用净辐射系数表示。

(4) 保护气体为理想气体,热物性参数仅为温度相关的函数,设置初始状态下气体域内充满保护气体。

(5) 侧向风场为均匀流场,由外界引入的气体为空气,不考虑外界引入的气体与保护气体之间的扩散混合效应,故将空气的物性参数设置与保护气体一致。

(6) 不考虑熔滴与电弧、熔池的相互作用,忽略金属蒸气的影响。

1.2 控制模型

焊接电弧为连续的导电流体,根据流体动力学理论三大守恒方程以及电磁学理论中的麦克斯韦方程组,建立本文的电弧与熔池耦合数值模型的控制方程。

质量守恒方程(连续性方程):

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{v}) + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1)$$

式中: $\mathbf{v}$ 为流体速度矢量; ρ 为流体密度; t 为时间。

动量守恒方程:

$$\frac{\partial (\rho \mathbf{v})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{v} \mathbf{v}) = -\nabla P + \nabla \cdot \boldsymbol{\tau} + \mathbf{j} \times \mathbf{B} + \rho \mathbf{g} \quad (2)$$

式中: P 为压力; $\boldsymbol{\tau}$ 为黏度张量; $\mathbf{j}$ 为电流密度矢量; $\mathbf{B}$ 为磁感应强度; $\mathbf{g}$ 为重力加速度。

能量守恒方程:

$$\rho C_p \left(\frac{\partial T}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla T \right) = \nabla \cdot (k_0 \nabla T) + \frac{J^2}{\sigma} + \frac{5k_B}{2e} \mathbf{j} \cdot \nabla T - S_R \quad (3)$$

式中: C_p 为比热容; T 为温度; k_0 为热导率; k_B 为玻尔兹曼常数; e 为电子电量; S_R 为热辐射损失。

1.3 湍流模型

流体的流动包括层流、湍流两类流动状态,通过分析雷诺数的大小,可以预测流体在不同工况下的流动状态和性能。

$$Re = \frac{\rho v L}{\mu} \quad (4)$$

式中: L 为特征长度,此处表示为喷嘴内孔直径; μ 为流体的动粘滞系数。雷诺数 $Re < 2000$ 为层流状态, $Re > 2000$ 为湍流状态,计算混合气体在常温条件下的雷诺数属于湍流状态,并选用范围广、精度高的标准 $k-\varepsilon$ 模型。该模型由Launder 和 Spalding 提出,是

常用湍流模型中的二方程模型,其湍流动能 k 和湍流耗散率 ε 的方程为

湍流动能 k :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho k) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho k u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_k} \right) \frac{\partial k}{\partial x_j} \right] + G_k + G_b - \rho \varepsilon \quad (5)$$

湍流耗散率 ε :

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \varepsilon) + \frac{\partial}{\partial x_i}(\rho \varepsilon u_i) = \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\left(\mu + \frac{\mu_t}{\sigma_\varepsilon} \right) \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_j} \right] + G_{1\varepsilon} \frac{\varepsilon}{k} (G_k + G_{3\varepsilon} G_b) - G_{2\varepsilon} \rho \frac{\varepsilon^2}{k} \quad (6)$$

式中: u_i 为流体平均速度; σ_k 、 σ_ε 分别表示 k 、 ε 对应的普朗克常数,通常取值 $\sigma_k=1.0$ 、 $\sigma_\varepsilon=1.3$; G_k 、 G_b 分别为由平均速度梯度引起的湍流动能、由浮力引起的湍流动能; $G_{1\varepsilon}$ 、 $G_{2\varepsilon}$ 、 $G_{3\varepsilon}$ 为模型常数,分别取值为 1.44、1.92、0.09; μ_t 为湍流动力黏性系数。

1.4 几何模型与边界条件

图 1 为三维计算域模型。该模型由工件、气体域和喷嘴 3 部分组成,总尺寸为 60 mm×60 mm×38 mm,喷嘴内孔直径为 $\phi 15$ mm,导电嘴外部直径为 $\phi 6$ mm,电弧弧长为 4 mm,焊丝直径为 $\phi 1.2$ mm。工件选用厚度为 6 mm 的 Q235 低碳钢板,其热物性参数来源于文献[25]。从喷嘴流出的保护气体为 85%Ar+15%CO₂ 的混合气体,气体流量为 20 L/min,气体热物性参数参考文献[26],两种气体的混合物性参数可由混合定律得到[27]。

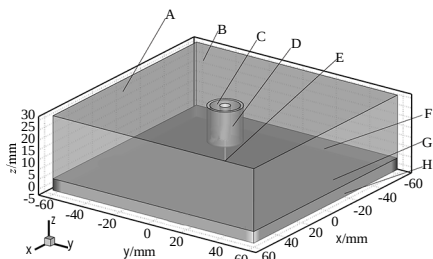


图 1 三维计算域模型

Fig.1 Three-dimensional computational domain model

表 1 为边界条件。给出了图 1 计算域的边界条件设置。保护气体入口的气体速度与流量及其喷嘴尺寸的相关公式为

$$v_i = \frac{Q}{\pi(r_2^2 - r_1^2)} \quad (7)$$

式中: Q 为保护气体流量; r_2 为喷嘴内孔直径; r_1 为导电嘴外部直径。

工件壁面与外界空气发生热交换,考虑对流和辐射散热的作用,计算式为

表 1 边界条件
Tab.1 Boundary conditions

边界	类型	速度 /(m·s ⁻¹)	温度 /K	电势 /V	磁矢势 /(Wb·s ⁻¹)
A	侧向风场	0, 1, 2, 3	400	$\partial\varphi/\partial n=0$	$\partial A/\partial n=0$
B	自由出口	-	-	-	-
C	混合气体入口	(7)	400	$\partial\varphi/\partial n=0$	$\partial A/\partial n=0$
D	喷嘴	-	400	耦合	耦合
E	焊丝端面	-	2000	$\partial\varphi/\partial n=-I/\pi r^2$	$\partial A/\partial n=0$
F	自由出口	-	-	-	-
G	电弧-工件交界面	-	耦合	耦合	耦合
H	工件壁面	-	(8)	$\partial\varphi/\partial n=0$	$\partial A/\partial n=0$

$$-k_0 \frac{\partial T}{\partial n} = -h_c(T_w - T_0) - \varepsilon_0 \sigma_0(T_w^4 - T_0^4) \quad (8)$$

式中: n 为单位向量; h_c 为对流换热系数; ε_0 为壁面辐射散热系数; σ_0 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数; T_w 为母材表面温度; T_0 为环境温度。

在电弧与工件之间的交界面处存在非局部热力学平衡状态,等离子体在该处的温度、电压存在较大的梯度变化。本文在数值模拟中应用“局部热力学平衡-扩散”模型[28],将电弧-工件交界面处的网格尺寸划分为 0.05 mm,以避免出现电导率小计算不收敛等问题,工件表面的热输入方程为

$$q_c = -k_{\text{eff}} \left(\frac{T_{\text{aw}} - T_{\text{ap}}}{\delta} \right) - L_v \phi_v - \varepsilon_0 \sigma_0 T_c^4 - q_h \quad (9)$$

式中: k_{eff} 为热导率; T_{aw} 和 T_{ap} 分别为工件与电弧交界面附近的温度; δ 为边界层网格长度; L_v 为蒸发潜热; ϕ_v 为蒸发速率; q_h 为有侧向风场吹袭时,外界气体与工件上表面发生的对流换热效应。式(9)右边分别为热传导、蒸发热损失和辐射散热,以及侧风场吹袭时工件上表面与外界环境发生对流换热。

1.5 求解方法

电弧-熔池耦合模型的计算区域采用六面体网格划分,并对焊丝附近及电弧-工件交界面处的网格进行加密处理,其他区域划分疏松,网格最小尺寸为 0.05 mm,模型单元总计 285312。采用压力基求解器与 SIMPLEC 算法,离散方程使用二阶迎风格式,以保证计算结果的精度。

2 模拟结果与分析

2.1 电弧流场分析

图 2 为不同侧向风场强度下电弧的流场分布。图中白色实线表示保护气体与侧向风场的流动方向,云图则表示电弧速度场的分布。在没有侧向风场

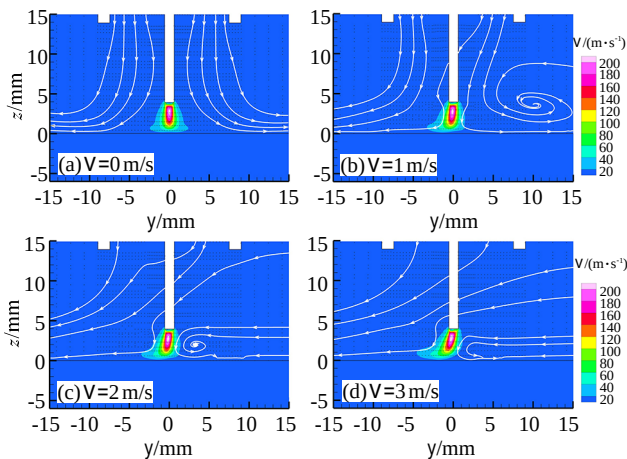


图2 不同侧向风场强度下电弧的流场分布
Fig.2 Velocity field distribution of arc under different crosswind intensities

的环境下,保护气体从喷嘴进入焊接区域,于高温下电离形成电弧等离子体。随后,等离子体由焊丝末端流向工件表面,到达工件表面后,由于受到阻挡,电弧等离子体速度减缓,开始沿工件表面向边缘扩散。侧向风场改变了电弧等离子体的运动轨迹,等离子体获得了横向加速度,不再沿着焊丝轴线向下流动,此时电弧等离子体的速度成为轴向和横向速度的合速度。在无侧向风场时,电弧等离子体竖直向下流动,最大速度为 206.8 m/s;当侧向风场逐渐增强时,电弧等离子体的最大速度分别增加到 206.9、209.4 和 212.0 m/s。这表明电弧等离子体的速度随侧向风场强度的增加而上升,侧风越强,电弧偏转越明显。在工件上表面附近,由于受阻碍作用,电弧等离子体轴向速度较小,偏转程度尤为明显。观察气体流动方向发现,保护气体流动受侧风挤压向左侧有一定程度的偏转。侧向风场达到 1 m/s 时,在远离电弧的区域,保护气体与侧向风场交汇形成涡流;侧向风速达到 2 m/s 时,涡流在电弧区附近交汇,保护气体流动方向出现明显偏转。这种偏转削弱了对焊接区域的保护效果,使得外界空气容易被卷入,增大气孔缺陷的形成风险。

2.2 电弧电场分析

图 3 为不同侧向风场强度下电弧的电场分布。图中白色实线表示电流密度的流动路径,云图则表示电势分布。可见,电流密度在焊丝表面附近高度集中,从焊丝末端流向工件的过程中,电流密度的大小自上而下逐渐减小。无侧向风场环境下,焊丝末端的电流密度为 $1.39 \times 10^8 \text{ A/m}^2$,到达工件表面时降至 $1 \times$

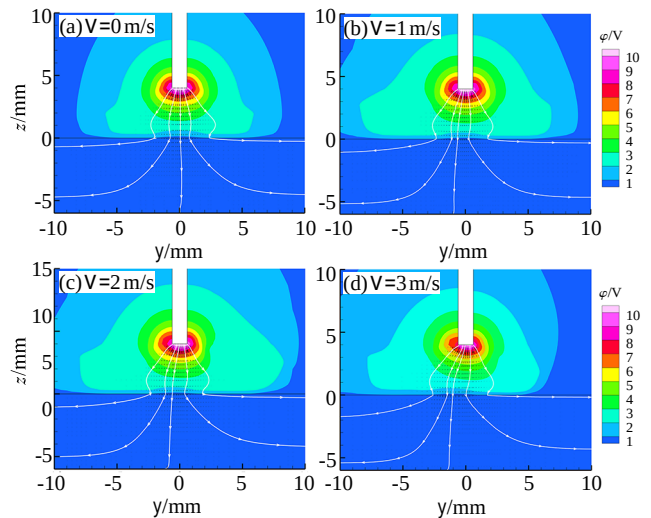


图3 不同侧向风场强度下电弧的电场分布
Fig.3 Electric field distribution of arc under different crosswind intensities

10^7 A/m^2 。随着侧向风场的吹袭,电弧等离子体的运动轨迹发生偏转,导致电流密度的分布向 Y 轴负方向偏转,偏转程度随着侧向风场强度的增加而逐渐显著。侧向风场达到 3 m/s 时,焊丝末端的电流密度分布变得紧凑,峰值上升至 $1.58 \times 10^8 \text{ A/m}^2$,电流密度的增加,加剧了焊丝末端的焦耳热效应,导致电弧温度升高。分析图中电弧电势分布云图可知,电弧电势均在焊丝端部出现最大值。由于侧向风场引起电弧等离子体运动轨迹的变化,导致电弧等离子体从焊丝末端到工件表面的路径延长,使得电弧弧长提高,焊丝端部的电势峰值在侧向风场的环境下分别达到 11.09、11.18、11.28 V。本研究构建的数值模型并未纳入焊丝阳极与工件阴极鞘层区压降的物理特性,故模拟得到的电压仅代表弧柱区的压降。在没有侧风的环境下,模拟所得的电弧电势最大值为 10.9 V,而实际焊接中电弧电压大约为 24 V。根据文献[29]的实验数据,电极鞘层区存在 11.7~12.0 V 的压降,据此对模拟所得的电压进行修正,修正后的结果与实际电压值相近,证实了模拟结果合理可信。

2.3 电弧与熔池温度场分析

图 4 为不同侧向风场强度下电弧的温度分布。图中白色实线表示电弧偏转角度,黑色实线表示熔池内部的流动。无侧向风场环境下,焊丝末端附近的电流密度显著高于工件表面,焊丝末端处的电弧受到更强的电磁力,收缩程度大于工件表面,电弧温度场呈现出沿焊丝轴线对称的“钟罩”型分布。当侧向风场达到 1 m/s 时,电弧的最高温度从 20957.2 K 上

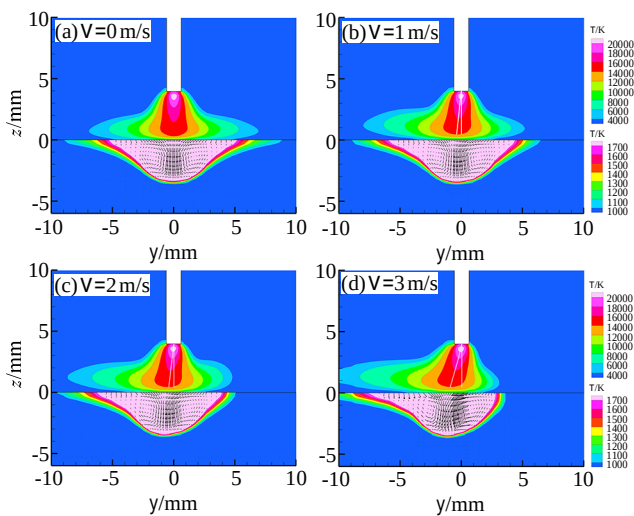


图4 不同侧向风场强度下电弧的温度分布
Fig.4 Temperature distribution of arc under different crosswind intensities

升至 21025.2 K, 中心弧柱区与焊丝轴线形成的夹角约为 3.6° 。此时, 电弧对工件沿焊丝轴线左侧的传热范围扩大, 而右侧缩小。随着侧向风场的进一步增强, 中心弧柱区与焊丝轴线的夹角在 3 m/s 的侧风下增长至 11.6° , 电弧的最高温度在此刻达到 21122.8 K。电弧右侧的边缘温度分布梯度向中心弧柱区压缩, 使得沿焊丝轴线左侧的电弧长度比右侧更长, 电弧弧长的长度增加, 导致电弧对工件的传热变得不均匀, 熔池形貌发生变化。从图中熔池温度场分布可以看出, 侧向风场由 0 m/s 增至 3 m/s 过程中, 熔池内部出现沿 Y 轴负方向流动的趋势, 熔池整体向左侧发生偏移, 其温度分布不再对称。同时, 侧向风场的增强加快了电弧的散热速率, 导致电弧对工件的热输入量降低, 熔池形状尺寸随之变小。

3 实验验证

3.1 电弧图像分析

为验证仿真模型的可靠性, 进行侧向风场环境下的焊接实验。实验中使用 230 W 大功率风扇产生垂直于焊接方向的侧向风场, 通过调整焊接工作台与风扇之间的距离来控制风场强度大小, 利用 TESTO 叶轮式风速测量仪测量对焊接区域的风速进行测量。在焊接方向安装高速摄像机, 以捕捉焊接过程中电弧的形态变化, 随后使用图像处理工具对捕捉到的图像开展进一步的处理, 以获得更清晰的电弧轮廓。受实验设备的限制以及电弧在侧向风场环境下的不稳定性, 选取电弧形态较为稳定的图像

与模拟结果进行对比分析。

图 5 为电弧形态图对比。其中, 侧向风场环境下的电弧形态如图 5(a) 所示, 当侧向风场强度为 0 m/s 时, 电弧保持稳定, 沿焊丝轴线呈左右对称分布。随着侧向风场强度的增加, 电弧逐渐偏转, 伴有明显的飞溅出现。图 5(b) 和图 5(c) 分别展示了经过图像处理后的电弧轮廓以及模拟得到的电弧形态, 对比发现二者的电弧轮廓吻合较好。表 2 为偏转角度模拟与实验结果对比。可见模拟电弧的偏转角度略大于实验观测到的角度, 误差在 10% 以内。因此, 仿真模拟结果能够反映侧向风场强度对电弧形态的影响。

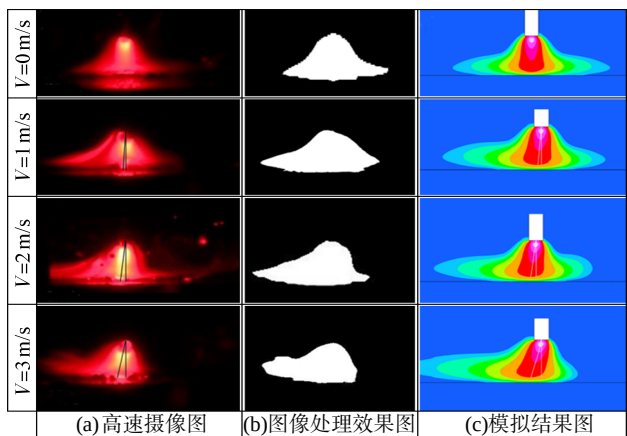


图5 电弧形态图对比
Fig.5 Comparison of arc morphologies

表2 偏转角度模拟与实验结果对比
Tab.2 Comparison of simulated and experimental results for the deflection angle

风速 $/(m \cdot s^{-1})$	偏转角度	
	模拟值	实验值
0	0	0
1	3.6°	3.1°
2	6.3°	5.8°
3	11.5°	10.9°

3.2 熔池形貌分析

图 6 为不同侧向风场强度下的焊缝截面。可知, 在侧向风场环境下, 熔池整体形貌逐渐偏移焊丝轴线, 且随侧向风场强度增强而偏移量增大。风场强度达到 2 m/s 时, 保护气体的保护效能削弱, 外界空气渗入焊接区域, 导致焊缝中出现大小不一的气孔缺陷。随着风场强度增加至 3 m/s, 除了出现大小不一的气孔外, 焊缝外型轮廓在侧向风场的吹袭下向左偏移, 同时熔池出现了方向相反的偏移。这可能是由于强风直接作用在处于熔融状态的液态金属, 扰乱其内部流动, 最终改变了焊缝的轮廓形状。

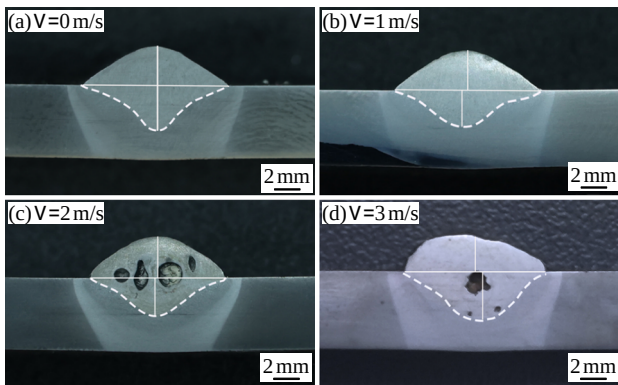


图6 不同侧向风场强度下的焊缝截面

Fig.6 Weld cross-sections under different crosswind intensities

表3为熔池形状尺寸模拟与实验结果对比。根据表3中的模拟与实验数据,随风场强度的提高,模拟得到的熔池宽度从10.6mm减少至10.19mm,降幅为3.8%;而实验得到的熔池宽度从11.9mm降至10.9mm,降幅为8.4%。由于数值模型未考虑金属蒸气和熔滴对熔池的冲击作用,且在实际焊接实验中,电弧受侧风吹袭会变得不稳定,甚至发生熄弧,而模拟电弧却能始终保持稳定的传热状态。这些因素导致熔池深度和偏移量的模拟与实验结果出现较大的误差。若除去两者显著的偏差数据,熔深与偏移量的误差均在10%以内。故数值模拟的熔池形状尺寸在一定程度上可反应实际的焊接情况。

表3 熔池形状尺寸模拟与实验结果对比(mm)

Tab.3 Comparison of simulated and experimental results for the dimension of the molten pool (mm)

风速 ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	熔宽		熔深		偏移量	
	模拟	实验	模拟	实验	模拟	实验
0	10.60	11.90	3.50	3.70	0	0
1	10.34	11.60	3.42	2.87	0.35	0.37
2	10.25	11.10	3.40	3.10	0.59	0.42
3	10.19	10.90	3.39	3.48	1.02	0.57

4 结论

(1) 侧向风场的引入,使得电弧等离子体获得横向加速度而发生偏转,偏转角度随风场强度的增大而增大,外界空气被卷入焊接区域的机率提高,气孔缺陷的形成风险上升。

(2) 随着侧向风场强度的增加,电弧等离子体明显偏转,电弧弧长增加,焊丝与工件之间的电压增大;焊丝端部的电流密度峰值在3m/s的风场下提高至 $1.58\times 10^8\text{ A/m}^2$,电弧产生更多的焦耳热,电弧最高温度升高。

(3) 侧向风场的存在,使电弧与熔池形貌发生偏转与偏移,电弧的散热速率加快,对工件的热输入量减少,导致熔池的形状尺寸总体变小。

(4) 通过对比模拟与实验结果的偏转角度和熔池形状尺寸变化,一定程度上验证了数值模型的可靠性。

参考文献:

- [1] Kah P, Suoranta R, Martikinen J. Advanced gas metal arc welding processes [J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2012, 67(1/4): 655-674.
- [2] Xu J, Ma Y, Wang L, et al. Numerical investigation on the influence of current waveform on droplet transfer in pulsed gas metal arc welding[J]. Vacuum, 2022, 203: 111230.
- [3] Chen S, Zhang J, Zhao H, et al. Development of ultra-high frequency adjustable multi-pulsed gas tungsten arc welding power supply and analysis of arc morphology [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2024, 125: 295-305.
- [4] Hertel M, Rose S, Füssel U. Numerical simulation of arc and droplet transfer in pulsed GMAW of mild steel in argon [J]. Welding in the World, 2016, 60(5): 1055-1061.
- [5] Wang L, Wu C, Chen J, et al. Experimental measurement of fluid flow in high-speed GMAW assisted by transverse magnetic field[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 1193-1200.
- [6] 王燮阳, 曹彪, 庞世炫, 等. 高频脉冲微 TIG 焊接电弧基值效应研究[J]. 热加工工艺, 2024, 53(5): 91-96.
- [7] Yang T, Chen L, Zhuang Y, et al. Arcs interaction mechanism in Plasma-MIG hybrid welding of 2219 aluminium alloy [J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 56: 635-642.
- [8] Zhao W, Jin H, Du X, et al. A 3D arc-droplet-molten pool integrated model of Al alloy GMAW process: heat transfer, fluid flow and the effect of external magnetic field [J]. Vacuum, 2022, 202: 111129.
- [9] Cai X, Lin S, Murphy A B, et al. Influence of helium content on a ternary-gas-shielded GMAW process [J]. Welding in the World, 2018, 62(5): 973-984.
- [10] 王新鑫, 迟露鑫, 伍光凤, 等. Ar-O₂ 混合气体电弧的数值模拟 [J]. 物理学报, 2019, 68(17): 261-270.
- [11] Wang L, Chen J, Wu C. Numerical investigation on the effect of process parameters on arc and metal transfer in magnetically controlled gas metal arc welding[J]. Vacuum, 2020, 177: 109391.
- [12] Wang L, Chen J, Zhang S, et al. Numerical simulation of coupled arc-droplet-weld pool behaviors during compound magnetic field assisted gas metal arc welding [J]. AIP Advances, 2021, 11(6): 065221.
- [13] Wang L, Chen J, Jiang C, et al. Numerical simulations of arc plasma under external magnetic field-assisted gas metal arc welding[J]. AIP Advances, 2020, 10(6): 065030.

(下转第 106 页)

PCB 板上器件分布密度越大, 温度梯度就越大, 器件温度变化越慢。

(4) 通过对焊球、引脚等器件连接结构温度变化的分析发现, 相同焊接条件下球栅阵列封装器件连接结构位置处的温度比引脚封装器件低 $3\sim 4^{\circ}\text{C}$ 。

参考文献:

- [1] 蔡海涛,李威,王浩. 回流焊接温度曲线控制研究[J]. 微处理机,2008,29(5):24-26.
- [2] Illes B, Bako I. Numerical study of the gas flow velocity space in convection reflow oven[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2014,70(3):185-191.
- [3] 范鹏,赵麦群,孙杰,等. 回流温度对 Sn-58Bi 焊点显微组织及剪切强度的影响[J]. 热加工工艺,2019,48(17):168-171.
- [4] 王坤,孙茜,孙齐政,等. 无铅钎料焊点界面组织及性能研究进展[J]. 热加工工艺,2024,53(19):1-9.
- [5] Tsai T. Modeling and optimization of reflow thermal profiling operation;a comparative study [J]. Journal of Industrial and Production Engineering,2009,26(6):480-492.
- [6] 王小伟,王凤江. Sn-58Bi 微焊点组织与力学性能的尺寸效应行为[J]. 焊接学报,2023,44(12):70-74.
- [7] 朱桂兵,陈文所,赵雄明. 基于回流焊温度曲线优化预防缺陷的研究[J]. 热加工工艺,2011,40(19):133-135.
- [8] 成军,屈敏,崔岩,等. 回流焊次数对 Sn-3.0Ag-0.5Cu 焊点界面金属间化合物生长的影响[J]. 热加工工艺,2018,47(3):40-44.
- [9] Tuegel E J, Ingrassia A R, Eason T G, et al. Reengineering aircraft structural life prediction using a digital twin[J]. International Journal of Aerospace Engineering,2011,1687:5966.
- [10] Schleich B, Anwer N, Mathieu L, et al. Shaping the digital twin for design and production engineering [J]. CIRP Annals,2017,66(1):141-144.
- [11] 张少敏,毛冬,保义. 大数据处理技术在风电机组齿轮箱故障诊断与预警中的应用[J]. 电力系统自动化,2016(14):129-134.
- [12] 张雨婷. 回流焊中 PCB 组件的回流温度分析[D]. 西安:西安电子科技大学,2023.
- [13] Deng S S, Hwang S J, Lee H H. Temperature prediction for system in package assembly during the reflow soldering process [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2016,98:1-9.
- [14] 程浩. 回流焊热等效模型的建立与温度曲线仿真研究[D]. 桂林:桂林电子科技大学,2020.
- [15] Lai Y, Pan K, Cai C, et al. Smarter temperature setup for reflow oven to minimize temperature variation among components [J]. IEEE Transactions on Components, Packaging and Manufacturing Technology,2022,12(3):562-569.
- [16] Fang J, Gong Y, Zhang H. Improving the temperature field model of hot air reflow soldering based on reverse problem analysis [C]/2022 23rd International Conference on Electronic Packaging Technology(ICEPT). Dalian,China;IEEE,2022:1-5.
- [17] Zambra C E, Moraga N O, Rosales C, et al. Unsteady 3D heat and mass transfer diffusion coupled with turbulent forced convection for compost piles with chemical and biological reactions [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2012,55(23/24):6695-6704.
- [18] Launder B E, Spalding D B, Lectures in mathematical models of turbulence[M]. London,England:Academic Press,1972.
- [19] Mathey F. Numerical up-scaling approach for the simulation of heat-transfer in randomly packed beds[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer,2013,61:451-463. 
- [20] 董家兴,徐宝发,李立良,等. 风对焊接质量影响初探[J]. 石油工程建设,1988(3):7-11.
- [21] 孟宪伟. 风对 A5083 铝合金焊接接头力学性能及微观组织的影响[J]. 机械,2017,44(8):31-33.
- [22] 王璐,常海林,王小瑞,等. Q355C 钢大风量环境焊接实验研究[J]. 焊接技术,2021,50(9):75-78.
- [23] 邹晔,裴宏杰,陈林锋,等. 气体保护焊喷嘴对保护气量的影响[J]. 江苏科技大学学报(自然科学版),2018,32(4):481-485.
- [24] 梁明明,刘晓文,侯昊,等. 焊枪喷嘴结构对保护气体流场的影响[J]. 油气储运,2024,43(4):449-456.
- [25] 高延峰,吴东. 局部干法焊接侧向风场对电弧传感特性影响的实验研究[J]. 热加工工艺,2017,46(5):82-85.
- [26] 高延峰,吴东,黄林然. 旋转电弧横向焊接及侧向风场对其焊缝成形影响的实验研究[J]. 热加工工艺,2018,47(15):22-25.
- [27] 高延峰,吴东,黄林然. 局部干法环境下 GMAW 横向焊接熔滴过渡特性[J]. 焊接学报,2019,40(9):82-86.
- [28] 胡翱. 微型罩局部干法焊接风场结构与电弧特性研究[D]. 南昌:南昌航空大学,2015.
- [29] 陈林锋. 熔焊保护气体最小用量的研究[D]. 镇江:江苏大学,2017.
- [30] Ramsey G M, Galloway A M, Campbell S W, et al. A computational fluid dynamic analysis of the effect of side draughts and nozzle diameter on shielding gas coverage during gas metal arc welding [J]. Journal of Materials Processing Technology,2012,212(8):1694-1699.
- [31] Xiao L, Fan D, Huang J. Numerical study on arc plasma behaviors in GMAW with applied axial magnetic field[J]. Journal of the Physical Society of Japan,2019,88:074502.
- [32] Murphy A B. The effects of metal vapour in arc welding[J]. Journal of Physics D:Applied Physics,2010,43:434001.
- [33] 付瑜,韩绍华,薛丁琪. 基于金属蒸汽和外加磁场的 MIG 电弧模拟[J]. 兵器材料科学与工程,2021,44(3):94-98.
- [34] Lowke J J, Tanaka M. 'LTE-diffusion approximation' for arc calculations[J]. Journal of Physics D:Applied Physics,2006,39(16):3634.
- [35] 田君国,邓晶,李要建,等. 自由燃烧电弧的磁流体动力学数值模拟[J]. 力学学报,2011,43(1):32-38. 

(上接第 98 页)