

钢铁成形

T型接头旋转激光+GMAW复合焊熔池动态行为数值分析模型

王艺瑾¹, 刘文¹, 胥国祥^{1*}, 朱杰¹, 胡庆贤¹, 杜宝帅², 龚祺龙¹

(1.江苏科技大学 江苏省先进焊接技术重点实验室, 江苏 镇江 212000;

2.国网山东省电力公司电力科学研究院, 济南 250002)

摘要: **目的** 研究 T 型接头旋转激光+GMAW 复合焊熔池的温度场和流态特征, 揭示气孔缺陷的产生及抑制机理。**方法** 依据光学、电磁学、传热学及流体动力学机理, 建立 T 型接头旋转激光+GMAW 复合焊熔池数值分析模型。使用 Fluent 软件对旋转频率分别为 50 Hz 和 100 Hz 的 T 型接头旋转激光+GMAW 复合焊进行温度场以及流态特征的模拟, 对比不同频率下 T 型接头横、纵截面, 从工艺和焊缝成形角度出发, 针对不同频率对熔池、小孔成形以及气孔抑制的影响进行讨论。**结果** 当旋转频率为 50 Hz 时, 纵截面内小孔最大深度为 5.4 mm, 横截面熔池内小孔开口直径相对较大, 旋转一周后, 小孔远离气泡, 气泡无法逸出, 形成气孔; 当旋转频率为 100 Hz 时, 纵截面内小孔深度显著降低, 熔池体积明显减小, 横截面内小孔最大开口直径和深度均降低, 熔池尺寸也有所减小, 在时间为 0.097 s 时, 小孔上方区域出现的顺时针涡流不仅能抑制气孔, 还能改善熔池的下垂以及立板焊趾处的咬边。**结论** 随着旋转频率的增大, 小孔的最大开口直径和深度均降低, 还对熔池具有搅拌作用, 使熔池体积变小。

关键词: T 型接头旋转激光+GMAW 焊; 数值分析; 旋转频率; 小孔; 气孔

DOI: 10.3969/j.issn.1674-6457.2024.04.018

中图分类号: TG456.7 **文献标志码:** A **文章编号:** 1674-6457(2024)04-0147-08

Numerical Analysis Model for Dynamic Behavior of Molten Pool in Rotating Laser+GMAW Hybrid Welding of T Joints

WANG Yijin¹, LIU Wen¹, XU Guoxiang^{1*}, ZHU Jie¹, HU Qingxian¹, DU Baoshuai², GONG Qilong¹

(1. Key Laboratory of Advanced Welding Technology, Jiangsu University of Science and Technology, Jiangsu Zhenjiang 212000, China; 2. State Grid Shandong Electric Power Research Institute, Jinan 250002, China)

ABSTRACT: The work aims to study the temperature field and flow characteristics of molten pool in rotating laser+GMAW hybrid welding of T-joints, to reveal the generation and inhibition mechanisms of pore defects. According to the optics, electromagnetic, heat transfer and fluid dynamics mechanisms, a numerical analysis model of molten pool in rotating laser+GMAW hybrid welding of T-joints was established. The temperature field and flow characteristics of the T-joint rotating laser+GMAW

收稿日期: 2023-12-28

Received: 2023-12-28

基金项目: 国家自然科学基金 (51975263, 52375340)

Fund: The National Natural Science Foundation of China (51975263, 52375340)

引文格式: 王艺瑾, 刘文, 胥国祥, 等. T 型接头旋转激光+GMAW 复合焊熔池动态行为数值分析模型[J]. 精密成形工程, 2024, 16(4): 147-154.

WANG Yijin, LIU Wen, XU Guoxiang, et al. Numerical Analysis Model for Dynamic Behavior of Molten Pool in Rotating Laser+GMAW Hybrid Welding of T Joints[J]. Journal of Netshape Forming Engineering, 2024, 16(4): 147-154.

*通信作者 (Corresponding author)

hybrid welding at rotation frequencies of 50 Hz and 100 Hz were simulated by Fluent software. Then, the screenshots of cross and longitudinal sections of the joints were compared. From the perspective of process optimization and seam forming, the effect of different rotation frequencies on the molten pool and keyholes and the inhibition mechanism of pore was discussed. When the rotation frequency was 50 Hz, the maximum depth of keyhole in the longitudinal section was 5.4 mm. The opening diameter of the keyhole in the cross section was relatively large. After rotation for a cycle, the keyhole was far away from the bubble and the bubble could not overflow, forming the pore. When the rotation frequency was 100 Hz, the depth of keyhole in the longitudinal section was significantly reduced just as the volume of the molten pool. In the cross section, the maximum opening diameter and the depth of keyhole were reduced respectively just as the size of the molten pool. When the time was 0.097 s, the clockwise vortex in the area above the keyhole was conducive to reducing the sagging phenomenon in the molten pool and the undercut phenomenon at the weld toe of the vertical plate, inhibiting the pore. With the increase of rotation frequency, the maximum opening diameter and depth of the keyhole decrease, which has a stirring effect on the molten pool, making the volume of molten pool smaller.

KEY WORDS: laser+GMAW hybrid welding of T-joints; numerical analysis; rotation frequency; keyhole; pore

激光电弧复合焊具有能实现优质、高效焊接的巨大潜力。与简单接头相比，T型接头或者角接头的焊接过程更为复杂。因此通过数值模拟方法深入分析T型接头复合焊熔池动力学特征，对系统理解复杂接头复合焊成形机理、优化工艺参数具有重要意义。

目前针对复杂接头复合焊熔池行为的研究相对较少，针对T型接头旋转激光+电弧复合焊熔池特性的研究更少。Peng等^[1]针对熔滴过渡模式对T型接头双面激光束焊接的影响进行了研究，发现与接触过渡相比，自由过渡和轻微接触过渡降低了金属在小孔壁上流动的稳定性和抑制气孔的研究。严佑锐^[2]对DP590双相钢和6016铝合金进行了激光振荡的焊接性能实验研究，发现振荡激光焊接时，熔池内部晶粒得到细化，提高振荡频率可以抑制气孔缺陷的产生，但未涉及T型接头旋转激光+GMAW焊接的研究。王学礼^[3]研究了磁场辅助T型接头旋转激光+GMAW复合焊熔池动态行为，发现外加纵向磁场有利于抑制咬边缺陷，外加横向磁场有利于抑制驼峰缺陷，但未研究不同频率下的熔池动态行为。张卫卫^[4]针对小孔对GMAW堆焊驼峰缺陷的改善进行了研究，发现采用适当的激光功率可以有效抑制驼峰缺陷的产生。Xu等^[5]研究了关于角接头激光MIG复合焊的焊缝成形，发现在较低的激光功率下，向下流动的液态金属导致熔融金属在水平板上积聚，使焊缝形貌不对称。周方明等^[6]研究了激光功率对镀锌板复合焊过程稳定性的影响，发现随着激光功率的增大，镀锌板焊接过程中的熔滴过渡更加稳定，规律性更高，但此研究仅涉及激光功率以及镀锌板复合焊。张甫^[7]研究了逆时针圆形旋转激光+MAG复合焊接的气孔抑制问题，发现逆时针圆形旋转使小孔的开口面积增大，气泡更有机会逸出，气孔缺陷得到明显改善，但未涉及T型接头旋转激光+GMAW焊的研究。

针对上述问题，本文针对T型接头旋转激光复合焊建立了数值模型，对不同旋转频率下的T型接头

横、纵截面温度场和流态特征进行了分析，以期之后T型接头旋转激光复合焊气孔抑制的研究提供基础。

1 实验

采用Q235低碳钢作为焊材，搭建6 kW光纤+电弧复合焊系统，包括ABB焊接机器人、水冷机、激光与电弧协同控制系统、焊接行走小车、Fronius TPS4000型自动化焊机、YLS-6000W激光器等。在焊接过程中，将焊枪与激光的夹角设为30°，焊丝初始位置在距离工件表面5 mm处，焊丝伸长量为15 mm，保护气体为99%（体积分数）Ar，光丝间距为2 mm，焊接电流为180 A，焊接速度为15 mm/s。底板和立板尺寸分别为150 mm×70 mm×6 mm和150 mm×30 mm×6 mm，T型接头示意图如图1所示。

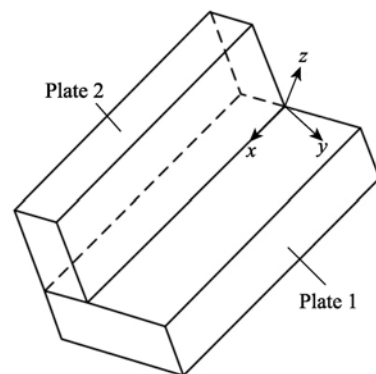


图1 T型接头示意图
Fig.1 Schematic diagram of T joint

2 数值分析模型

2.1 控制方程

由于焊接熔池受重力、电弧力、电磁力、光致蒸

气反作用力及表面张力等力, 为了突出研究要点, 需对模型进行简化, 建立熔池的数学模型, 并作出以下假设^[7-8]: 流体为层流且为不可压缩的理想牛顿流体; 小孔内压强为大气压强; 比热容、黏度等材料属性只与温度有关; 利用熔孔法处理焊接中的熔化与凝固过程。建立质量、动量和能量的控制方程如式 (1) ~ (5) 所示。

质量方程^[9]:

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

式中: ρ 为密度; v 为速度; t 为时间。

x 轴方向动量方程^[10]:

$$\frac{\partial \rho v_x}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} (\rho v v_x) = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_x}{\partial x} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial x} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_x}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial x} \right) \right] + j_y B_z - j_z B_y \quad (2)$$

y 轴方向动量方程^[10]:

$$\frac{\partial \rho v_y}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial y} (\rho v v_y) = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial y} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_y}{\partial y} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \right] + \frac{\partial}{\partial z} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial z} + \frac{\partial v_z}{\partial y} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \right] + j_z B_x - j_x B_z \quad (3)$$

z 轴方向动量方程^[10]:

$$\frac{\partial \rho v_z}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial z} (\rho v v_z) = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial z} \left[\left(2\mu \frac{\partial v_z}{\partial z} \right) - \frac{2}{3} \nabla \cdot v \right] + \frac{\partial}{\partial x} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial x} + \frac{\partial v_x}{\partial z} \right) \right] + \frac{\partial}{\partial y} \left[\mu \left(\frac{\partial v_z}{\partial y} + \frac{\partial v_y}{\partial z} \right) \right] + j_x B_y - j_y B_x \quad (4)$$

式中: v_x 、 v_y 、 v_z 分别为 x 、 y 和 z 方向上的速度矢量分量; P 为压力; μ 为速度; j_x 、 j_y 、 j_z 分别为磁场在 x 、 y 和 z 方向上感应的电流密度分量; B_x 、 B_y 、 B_z 分别为电场在 x 、 y 和 z 方向上感应的磁场强度分量。

能量守恒方程^[11]:

$$\frac{\partial \rho H}{\partial t} + (v_x - u_0) \frac{\partial \rho H}{\partial x} + v_y \frac{\partial \rho H}{\partial y} + v_z \frac{\partial \rho H}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left(k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left(k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_v \quad (5)$$

式中: H 为混合焓; u_0 为 x 方向上的初始速度矢量; k 为导热系数; T 为温度; S_v 为内部热源。

2.2 坐标系转换及旋转路径

本文针对旋转激光进行模拟计算, 在 T 型接头焊接过程中, 热源是倾斜的, 这会影响热流分布和相关作用力的加载, 其焊接示意图如图 1 所示。激光束的轨迹主要考虑了旋转半径和旋转频率的影响, 其旋转路径公式如式 (6) 所示^[12]。

$$\begin{cases} x(t) = x_0 + u_0 t + a \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t) \\ y(t) = a \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) \end{cases} \quad (6)$$

式中: a 为旋转半径; f 为旋转频率。

当自定义坐标系 ($O'-x'y'z'$) 与焊枪旋转相同的角度时, 自定义坐标系 ($O'-x'y'z'$) 中的热源和力源与原始坐标系 ($O-xyz$) 中的热源和力源具有相同的分布函数。因此, 在确定原始坐标系和自定义坐标系之间的关系后, 倾斜的热源和力源可以通过矩阵转换获得原始坐标系中的特定表达式, 如图 2 所示。实行自定义坐标系和原始坐标系的转换公式如式 (7) 所示。

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta & -\sin \theta \\ 0 & \sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x - vt \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: θ 为焊枪的倾斜角度。

2.3 电弧焊热源模型

热源模型电弧热输入的分布公式如式 (8) ~ (11) 所示^[13]。

$$q_a = \frac{\eta IU}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \exp \left(-\frac{x_r^2}{2\sigma_{x1}^2} - \frac{y_r^2}{2\sigma_{y1}^2} \right) x \geq 0, y \geq 0 \quad (8)$$

$$q_a = \frac{\eta IU}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \exp \left(-\frac{x_r^2}{2\sigma_{x1}^2} - \frac{y_r^2}{2\sigma_{y2}^2} \right) x \geq 0, y < 0 \quad (9)$$

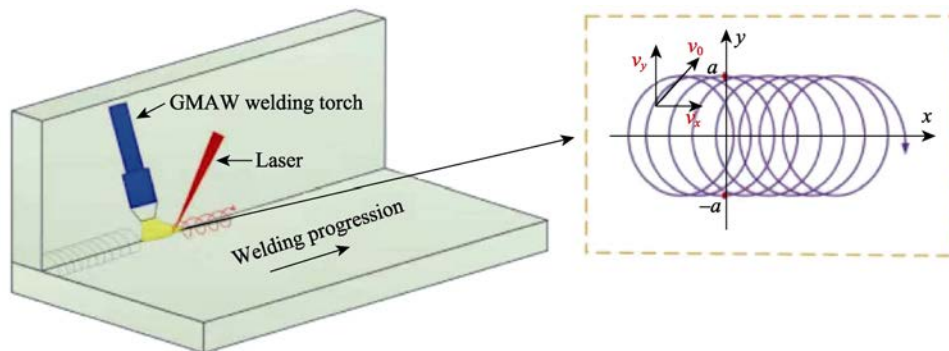


图 2 复合焊过程示意

Fig.2 Schematic diagram of hybrid welding process

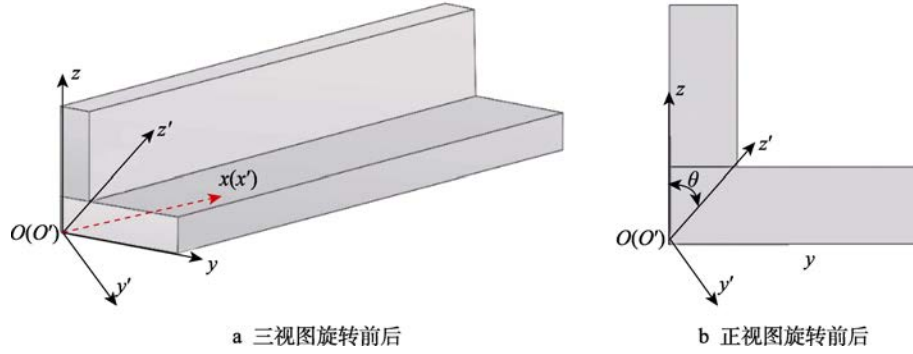


图3 坐标系转换示意

Fig.3 Schematic diagram of coordinate system conversion: a) three-dimensional view before and after rotation; b) front view before and after rotation

$$q_a = \frac{\eta IU}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x_r^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_r^2}{2\sigma_y^2}\right) x < 0, y \geq 0 \quad (10)$$

$$q_a = \frac{\eta IU}{2\pi\sigma_x\sigma_y} \exp\left(-\frac{x_r^2}{2\sigma_x^2} - \frac{y_r^2}{2\sigma_y^2}\right) x < 0, y < 0 \quad (11)$$

式中： σ_{x1} 、 σ_{x2} 、 σ_{y1} 、 σ_{y2} 为几何参数， $\sigma_x = (\sigma_{x1} + \sigma_{x2})/2$ ， $\sigma_y = (\sigma_{y1} + \sigma_{y2})/2$ ，根据电弧热流分布范围取值； η 为电弧热效率； I 为焊接电流； U 为电弧电压。

2.4 激光深熔焊热源模型

热流分布函数如式(12)~(13)所示^[14]。

$$q_1 = \frac{3\omega_1 Q_1}{\pi(1-e^{-3})(a+b)} \left[\frac{(1-\chi)z_i z_e}{z_i - z_e} \frac{1}{z} + \frac{\chi z_i - z_e}{z_i - z_e} \right] \exp\left\{-\frac{3(x^2 + y^2)}{[r_0(z)]^2}\right\} \quad (12)$$

$$r_0(z) = \frac{r_e - r_i}{z_e^2 - z_i^2} z^2 + \frac{r_i z_e^2 - r_e z_i^2}{z_e^2 - z_i^2} \quad (13)$$

式中： r_e 和 r_i 分别为锥体热源上、下表面半径； $a+b$ 为热源高度，由小孔深度决定，可参考高速摄像观测到的小孔尺寸； Q_1 为实际激光功率； ω_1 为激光热效率，用来补偿损耗在熔池外的能量，大约提高8%左右； χ 为锥体热源上下表面热流峰值之比； z_e 和 z_i 分别为热源上表面和下表面在 z 轴上的位置。本文激光热源深度设为3 mm，激光半径设为1 mm。

2.5 熔滴过渡模型

熔滴的初速度可以用式(14)估算^[15]。

$$v_{dr} = \sqrt{0.33692 + 0.00854[I/(2r_{dr})]} \quad (14)$$

式中： r_{dr} 为熔滴半径。熔滴过渡过程还考虑了受到的电弧等离子体的阻力，其表达式如式(15)所示^[16-17]。

$$F_a = \eta_d \pi r_{dr}^2 \left[\frac{\rho_0 (c_k I)^2}{2} \right] \quad (15)$$

式中： η_d 为阻力系数； ρ_0 为等离子体密度； c_k 为系数。

2.6 边界条件

在焊接过程中，熔池内的边界条件分别为能量边界和动量边界。动量边界条件包括电弧压力、表面张力、蒸气反作用力和浮力。能量边界条件如式(17)~(18)所示。

熔池自由表面^[18]：

$$-k\partial T/\partial n = q_{arc} + q_{laser} - c_z(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) - m_e L_b \quad (17)$$

其他表面^[19]：

$$-k\partial T/\partial n = -c_z(T - T_0) - \varepsilon\sigma(T^4 - T_0^4) \quad (18)$$

式中： n 为法向量； T_0 为初始温度； ε 为辐射系数； σ 为斯蒂芬-玻尔兹曼常数； q_{arc} 和 q_{laser} 分别为电弧和激光热输入； c_z 为对流和辐射的综合散热系数； L_b 为蒸发潜热； m_e 为蒸发率。动量边界条件如式(19)所示。

$$P = P_a + P_1 + P_d - P_s \quad (19)$$

式中： P_a 为电弧压力； P_1 为蒸气反作用力； P_d 为浮力； P_s 为表面张力。相关作用力的表达式和作用模型可见参考文献[20]~[25]。

3 结果与分析

旋转激光+GMAW复合焊在频率为50 Hz时不同时刻下的熔池纵截面的温度云图和流态如图4所示。当激光束向A和C位置移动时，小孔深度变小，当激光束向B和D位置移动时，小孔深度逐渐增大。当时间为0.102 s时，激光束由位置D转移到位置A；在电弧压力的作用下，小孔底部液态金属流动方向为顺时针，后部出现顺时针涡流，液态金属从高温区向低温区流动。当时间为0.110 s时，受马兰戈尼力和高速等离子流力影响，小孔下方涡流向熔池后方流动。当激光束位于B位置、在0.117 s时，熔深最大，达到5.4 mm，如图4d所示。在0.121 s时，激光束由B位置转向C位置，在反冲压力作用下，液态金属向小孔底部高速流动，并在黏滞力和表面张力的作用下，按顺时针方向流向熔池表面，如图4e所示。

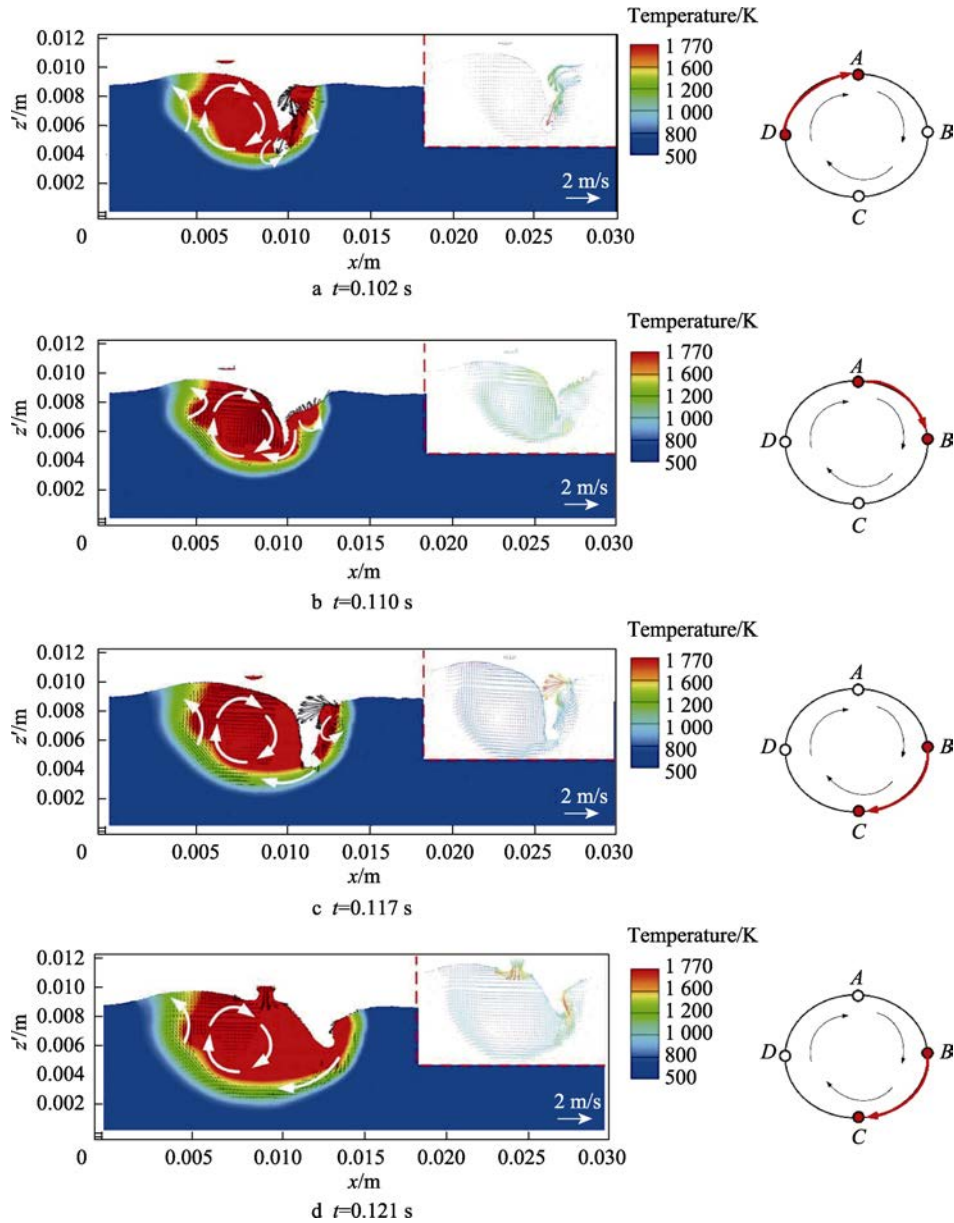


图 4 不同时刻下复合焊熔池纵截面温度场和流场分布云图 (50 Hz)

Fig.4 Temperature and flow fields at longitudinal section of molten pool at different time (50 Hz)

旋转频率为 100 Hz 时熔池纵截面的温度云图和流态如图 5 所示。可知, 与 50 Hz 相比, 小孔最大深度由 5.4 mm 降为 2.5 mm, 熔池体积也显著缩小; 这是因为频率较大, 激光束移动较快, 受蒸气反作用力的影响, 作用在同一位置的时间缩短, 铁金属的蒸气量减少。在 0.062 s 时, 小孔在 A 附近完全闭合, 激光也已经远离此处截面。小孔在 B 附近受到反冲压力, 并随着激光束越来越靠近此截面, 小孔开口直径逐渐增大。

频率为 50 Hz 的复合焊在 $x=8$ mm 处熔池横截面的温度云图和流态如图 6 所示。此时, 小孔开口直径相对较大。这是由于小孔从底板到立板再到底板, 形成了周期性高频运动, 从而扩大了蒸气反作用力的范围。当时间为 0.102 s 时, 小孔两侧的液态金属沿着

孔壁流向底部, 类似于无旋转激光复合焊的流态, 如图 6a 所示。当时间为 0.112 s 时, T 型接头复合焊立板上的液态金属受重力的影响较大, 造成熔池塌陷, 形成了气泡。当时间为 0.117 s 时, 激光束向底板移动, 小孔开始靠近底板, 气泡受到小孔的挤压, 向下流动, 如图 6c 所示。当时间为 0.121 s 时, 激光束向立板上偏转, 气泡在浮力和流体动压力的作用下向上偏转, 如果气泡接触到立板的固/液界面, 则气泡快速凝固后形成气孔。随着小孔开口面积的增大, 液态金属主要从小孔原位置的底部开始填充, 不会造成因液态金属倒卷而导致的小孔塌陷, 减小了气泡产生的概率。但是, 如果气泡已经形成, 旋转频率过低, 小孔圆周方向移动较慢, 当小孔旋转一周后, 在焊接方向已经远离气泡位置, 无法与气泡合并, 使气泡逸出。

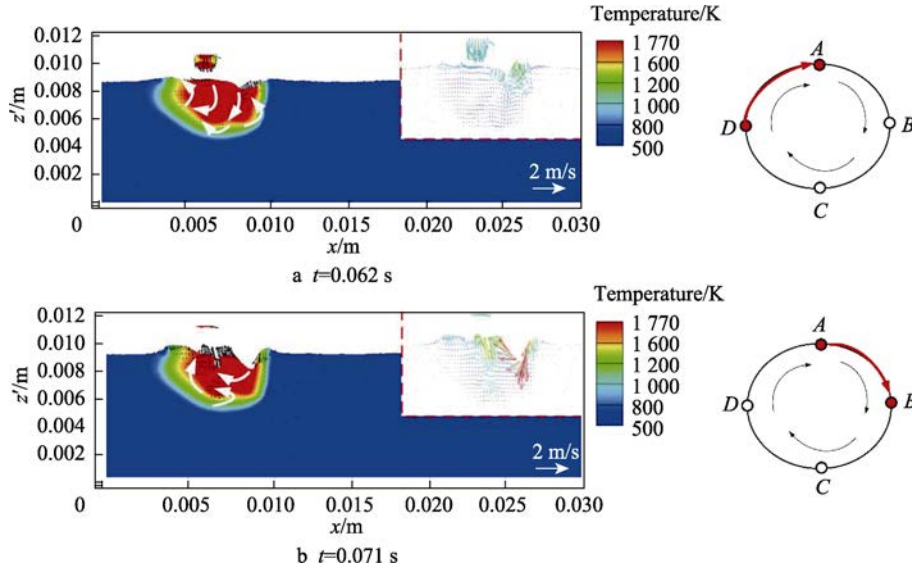


图5 不同时刻下复合焊熔池纵截面温度场和流场分布云图 (100 Hz)
 Fig.5 Temperature and flow fields at longitudinal section of molten pool at different time (100 Hz)

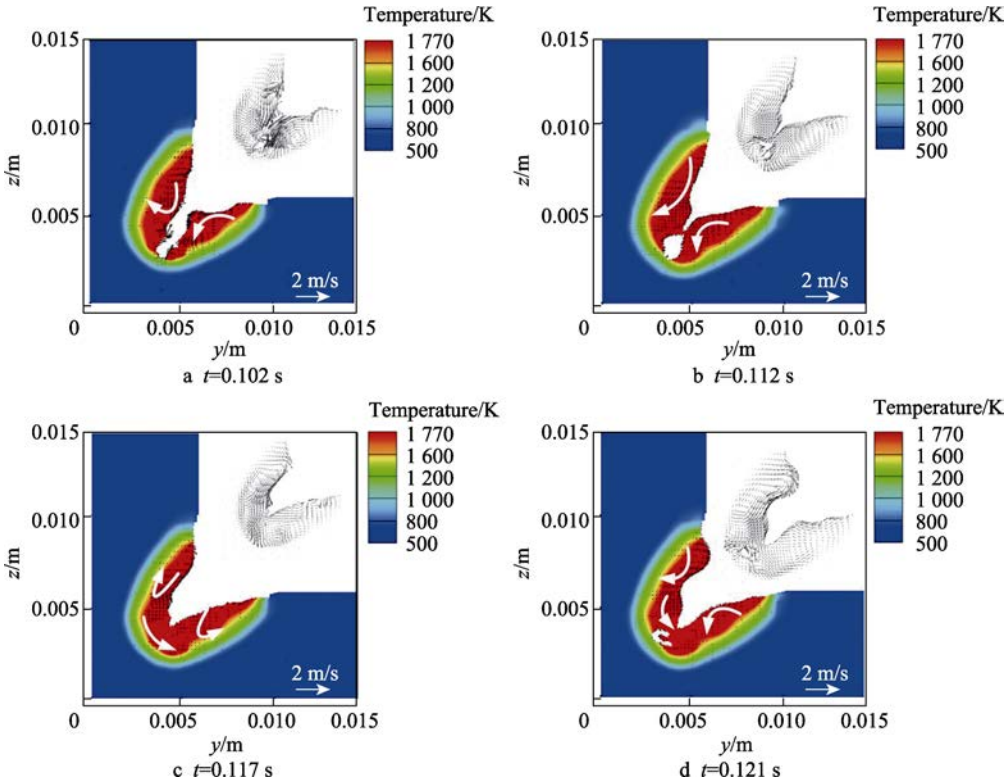


图6 不同时刻下复合焊接横截面温度场和流场分布云图 (50 Hz)
 Fig.6 Temperature and flow fields at cross section of molten pool at different time (50 Hz)

频率为 100 Hz 时复合焊接横截面的温度云图和流态如图 7 所示。与 50 Hz 的复合焊接相比,小孔的最大开口直径和深度分别减小到 1.2 mm 和 2.3 mm,熔池尺寸也有所减小。当时间为 0.090 s 时,小孔位置靠近底板,液态金属受到反冲压力,从小孔底部顺时针向立板方向流动,一个逆时针涡流则在立板附近的熔池处形成。这是由于立板与底板附近区域的液态金属温度差值较大,低温区液态金属流向高温区,如图 7a 所示。当时间为 0.097 s 时,激光束开始靠近立板,

小孔底部为逆时针涡流。这是因为受到了蒸气反作用力的牵引,流向小孔所在位置,如图 7b 所示。小孔的周期性旋转运动减弱了液态金属下垂的趋势,从而导致熔池在横截面上较为对称;小孔上方区域的顺时针涡流则有利于改善立板焊趾处的咬边以及熔池的下垂。

随着频率的增大,小孔圆周方向的速度也增大,激光多次作用在同一位置。已凝固的气泡受反冲压力的作用被再次破坏,使气孔与未逸出的气泡合并,故频率增到 100 Hz 对气孔有抑制作用。

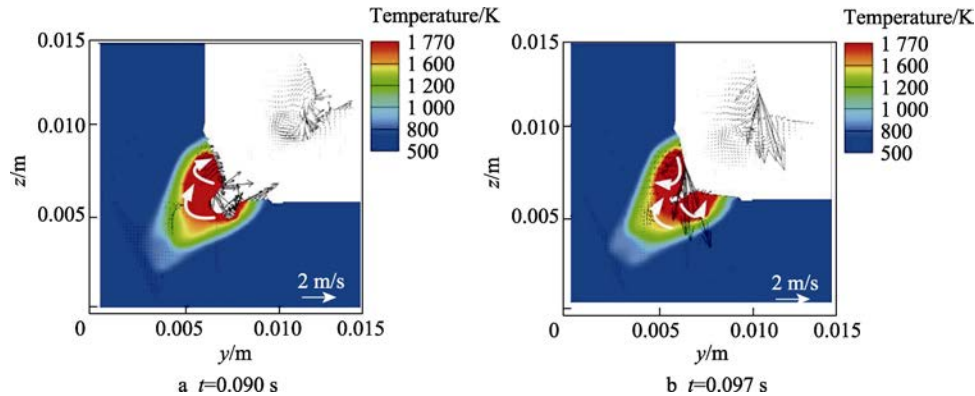


图 7 不同时刻下复合焊熔池横截面温度场和流场分布云图 (100 Hz)

Fig.7 Temperature and flow fields at cross section of molten pool at different time (100 Hz)

4 结论

1) 综合考虑了 T 型接头热源和相关力源的倾斜、不同时刻下的不同频率以及旋转激光热源的移动路径,建立了 T 型接头旋转光纤激光+GMAW 复合焊熔池数值分析模型;模拟计算出不同时刻下不同频率的复合焊熔池表面的温度场和流场;分析了不同频率对熔池、小孔成形的影响,并通过相关实验证明了其合理性。

2) 当旋转频率为 50 Hz 时,纵截面内小孔最大深度为 5.4 mm,横截面熔池内小孔开口直径相对较大,在旋转一周后,小孔远离气泡,气泡无法逸出;当旋转频率为 100 Hz 时,纵截面内小孔深度显著降低,熔池体积明显减小,横截面内小孔最大开口直径和深度分别降低,熔池尺寸也有所减小,在时间为 0.097 s 时,小孔针对熔池也具有搅拌作用,小孔上方区域出现的顺时针涡流有利于改善熔池内的下垂缺点以及立板焊趾处出现的咬边现象。

参考文献:

- [1] PENG J, LIU J, YANG X, et al. Numerical Simulation of Droplet Filling Mode on Molten Pool and Keyhole during Double-Sided Laser Beam Welding of T-Joints[J]. Crystals, 2022, 12(9): 1-14.
- [2] 严佑锐凌. 激光摆动模式对钢/铝异种金属焊接接头组织性能的影响[D]. 长沙: 湖南大学, 2021: 47-65.
YAN Y R L. Effects of Laser Oscillation on the Mechanical Property and Microstructure of the Steel/Aluminum Alloy Dissimilar Metals Welding Joint[D]. Changsha: Hunan University, 2021: 47-65.
- [3] 王学礼. 磁场辅助 T 型接头旋转激光+GMAW 复合焊电弧与熔池动态行为数值分析[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2022: 73-94.
WANG X L. Numerical Analysis on the Dynamic Behaviour of Arc and Molten Pool by the Magnetic Field-Assisted Rotating Laser+GMAW Hybrid Welding of T Joints[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2022: 73-94.
- [4] 张卫卫. 激光+GMAW 复合热源焊缝缺陷机理研究[D]. 镇江: 江苏科技大学, 2015: 1-84.
ZHANG W W. Study on Weld Defect Mechanism of Laser+GMAW Hybrid Heat Source Welding[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2015: 1-84.
- [5] XU G X, LI L, WANG H X, et al. Simulation and Experimental Studies of Keyhole Induced Porosity in Laser-MIG Hybrid Fillet Welding of Aluminum Alloy in the Horizontal Position[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 119: 105667.
- [6] 周方明, 毕研华, 陈丽丽, 等. 激光功率对镀锌板复合焊接过程稳定性的影响[J]. 镇江: 江苏科技大学学报, 2023, 37(5): 27-31.
ZHOU F M, BI Y H, CHEN L L, et al. Effect of Laser Power on the Stability of Induction Welding Process of Galvanized Sheets[J]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 2023, 37(5): 27-31.
- [7] 张甫. 42CrMoA 中碳调质钢扫描激光-MAG 复合焊接特性研究[D]. 北京: 北京科技大学, 2016: 24-81.
ZHANG F. Study on Scanning Laser -MAG Hybrid Welding Characteristics of Medium Carbon Quenched and Tempered Steel in 42CrMoA[D]. Beijing: Beijing University of Science and Technology, 2016: 24-81.
- [8] MURPHY A B, TANAKA M, YAMAMOTO K, et al. Modelling of Arc Welding: the Importance of Including the Arc Plasma in the Computational Domain[J]. Vacuum, 2010, 85(5): 579-584.
- [9] WU C S, USHIO M, TANAKA M. Analysis of the TIG Welding Arc Behavior[J]. Computational Materials Science, 1997, 7(3): 308-314.
- [10] RIBIC B, RAI R, DEBROY T. Numerical Simulation of Heat Transfer and Fluid Flow in GTA/Laser Hybrid Welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2008, 13(8): 681-690.
- [11] CHO J H, NA S J. Three-dimensional Analysis of Molten Pool in GMA-Laser Hybrid Welding[J]. Welding Journal, 2009(88): 35-43.
- [12] PIEKARSKA W, KUBIAK M. Three-dimensional

- Model for Numerical Analysis of Thermal Phenomena in Laser-Arc Hybrid Welding Process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2011(54): 4966-4974.
- [13] HUGGER F, HOFAMN K, KOHL S, et al. Spatter Formation in Laser Beam Welding Using Laser Beam Oscillation[J]. *Welding in the World*, 2015, 59(2): 165-172.
- [14] ZHAO H, DEBROY T. Macroporosity Free Aluminum Alloy Weldments through Numerical Simulation of Keyhole Mode Laser Welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 93(12): 1089-1096.
- [15] SEMAK V, MATSUNAWA A. The Role of Recoil Pressure in Energy Balance during Laser Materials Processing[J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1997, 30: 2541-2552.
- [16] WANG Y, TSAI H L. Impingement of Filler Droplets and Weld Pool Dynamics during Gas Metal Arc Welding Process[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2001, 44: 2067-2080.
- [17] ZHANG Z Z, WU C S. Effect of Fluid Flow in the Weld Pool on the Numerical Simulation Accuracy of the Thermal Field in Hybrid Welding[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2015, 20: 1-12.
- [18] XU G X, LI L, WAN H X, et al. Simulation and Experimental Studies of Keyhole Induced Porosity in Laser-MIG Hybrid fillet Welding of Aluminum Alloy in the Horizontal Position[J]. *Optics and Laser Technology*, 2019, 119: 1-13.
- [19] 夏胜全, 李玉斌, 何建军, 等. 基于组合热源的激光深熔焊熔池三维瞬态模拟[J]. *热加工工艺*, 2016, 13: 216-219.
- XIA S Q, LI Y B, HE J J, et al. Three-dimensional Transient Simulation of Laser Deep Penetration Welding Pool Based on Combined Heat Source[J]. *Hot Working Technology*, 2016, 13: 216-219.
- [20] DAI Z D, JIANG M R, DAI Q Y, et al. Homoclinic Bifurcation for Boussinesq Equation with Even Constraint[J]. *Chinese Physics Letters*, 2006, 23(5): 1065-1067.
- [21] CHO M H, LIM Y C, FARSON D F. Simulation of Weld Pool Dynamics in the Stationary Pulsed Gas Metal Arc Welding Process and Final Weld Shape[J]. *Welding Journal*, 2016, 85: 271-283.
- [22] KIM C H, ZHAG W, DEBROY T. Modeling of Temperature Field and Solidified Surface Profile during Gas-Metal Arc Fillet Welding[J]. *Journal of Applied Physics*, 2003, 94: 2667-2679.
- [23] ROEBER V, CHEUNG K F. Boussinesq-type Model for Energetic Breaking Waves in Fringing Reef Environments[J]. *Coastal Engineering*, 2012, 70(4): 1-20.
- [24] 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: 4353-4366.
- [25] PANG S, CHEN W, ZHOU J, et al. Self-consistent Modeling of Keyhole and Weld Pool Dynamics in Tandem Dual Beam Laser Welding of Aluminum Alloy[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2015, 217: 131-143.