DOI: 10.3901/JME.2020.22.082

激光入射角影响焊接熔池匙孔瞬态行为 数值模拟^{*}

高向东¹ 冯燕柱¹ 桂晓燕¹ 彭 聪¹ 张艳喜¹ 潘春荣²

(1. 广东工业大学广东省焊接工程技术研究中心 广州 510006;

2. 江西理工大学机电工程学院 赣州 341000)

摘要: 在激光焊接中, 激光入射角直接影响着熔池匙孔瞬态行为, 而仅采用工艺试验方法难以探索其规律。利用数值模拟技术模拟激光入射角分别为 30° 、 0° 、 -30° 的焊接过程, 研究激光入射角对熔池匙孔瞬态行为的影响。同时通过激光焊接试验对仿真结果进行验证, 数值仿真的焊缝横截面形貌与试验结果吻合较好, 表明仿真结果能够反映激光焊接过程。分析不同激光入射角下温度场、熔池内流场、匙孔后壁反冲压力、匙孔深度和匙孔后壁静压力的变化。结果表明, 激光入射角的正负影响熔池内部流动的快慢; 激光入射角为正时, 有利于抑制飞溅形成, 而激光入射角为负时, 则促进飞溅生成; 激光入射角的正负明显影响匙孔的稳定性, 当激光入射角为负时, 匙孔稳定性降低, 坍塌频率增加, 产生气泡的概率提高。使用合适的激光正入射角有利于提高激光焊接质量。

关键词: 激光焊接; 激光入射角; 熔池; 匙孔

中图分类号: TG456

Numerical Simulation of Effects of Laser Incident Angle on Transient Behaviors of Molten Pool and Keyhole during Laser Welding

GAO Xiangdong¹ FENG Yanzhu¹ GUI Xiaoyan¹ PENG Cong¹
ZHANG Yanxi¹ PAN Chunrong²

(1. Guangdong Provincial Welding Engineering Technology Research Center,

Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006;

2. School of Mechanical and Electrical Engineering,

Jiangxi University of Science and Technology, Ganzhou 341000)

Abstract: The laser incident angle affects the transient behaviors of a molten pool and keyhole in the process of laser welding. However, it is difficult to investigate its impact rule only by using technical experimental methods. Three processes of laser welding with the laser incident angle of 30° , 0° , -30° are respectively simulated by the numerical simulation technology to study the effects of laser incident angle on transient behaviors of a molten pool and keyhole. At the same time, the simulated results are validated through the laser welding experiments. The cross-section geometry of simulated welds agrees well with the experimental results, which indicates that the simulated results can represent the laser welding process. The variations of temperature field, flow field in a molten pool, recoil force on the rear keyhole wall, the depth of keyhole and static pressure on the rear keyhole wall are analyzed at different laser incident angles. The results show that when the laser incident angle is positive, the flow is slow in a molten pool, when it is negative, the flow is faster. Also it can be found that the positive incident angle welding is helpful to suppress the formation of spatters, while the negative promotes the generation of spatters. When the laser incident angle is positive, the stability of a keyhole increases. When it is negative, the stability of a keyhole decreases, and the collapse of a keyhole increases which raises the probability of bubbles generation. Thus, it is shown that the laser welding quality can be improved with a suitable positive laser incident angle.

^{*} 国家自然科学基金(51675104)、广州市科技计划(202002020068, 202002030147)和广东省教育厅创新团队(2017KCXTD010)资助项目。
20200107 收到初稿, 20200527 收到修改稿

Key words: laser welding; laser incident angle; molten pool; keyhole

0 前言

激光焊相对于传统焊接方式具有功率密度高、焊速快、变形小、熔深大等优点^[1-2], 激光焊接过程中, 熔池匙孔瞬态行为直接影响着焊接接头质量, 研究熔池匙孔瞬态行为已成为激光焊接领域的技术重点。不少学者使用在线检测方法研究焊接过程中熔池匙孔的特征并取得较大进展^[3-4], 但是仅靠在线检测方法难以准确观察焊件内部熔池匙孔瞬态行为。随着高性能计算机发展, 数值分析法逐渐被应用于研究激光焊接过程熔池匙孔行为。

合适的热源模型是准确实现激光焊接过程数值模拟的前提^[5], 目前在激光深熔焊接数值模拟中较为广泛使用的热源模型为体积热源和光线追踪热源, 其中光线追踪热源更加准确反映激光在匙孔内部多重反射吸收的情况^[6]。激光深熔焊接熔池匙孔瞬态行为的研究主要包括熔池匙孔耦合行为研究^[7-8]、焊接缺陷研究^[9-10]、焊接工艺对熔池匙孔行为影响的研究等^[11-13]。在实际焊接过程中, 为了保护激光设备和避免焊接接头与焊件或者夹具产生干涉常需要偏转焊接头, 导致激光束入射角不为零。研究表明在高强钢对接焊接中, 当激光入射角小于 40° 时可以获得较好的焊接质量^[14], 在激光焊接铝合金中, 当激光入射角为 45° 时气孔量比较少^[15]。在聚合物与金属激光 T 型焊中, 激光入射角对焊缝的熔宽与熔深有影响^[16]。研究者通过激光焊接工艺试验表明激光入射角为正时可抑制飞溅^[17]。可见, 激光入射角直接影响着焊缝成形质量, 其影响可通过熔池与匙孔的瞬态行为进行分析。虽然激光深熔焊接熔池匙孔瞬态行为已有大量的研究, 但激光入射角对熔池匙孔瞬态行为影响的研究相对较少。

基于流体动力学基本方程, 采用有限体积法、自由表面跟踪算法和光线追踪热源模型建立了激光深熔焊接的三维瞬态模型, 在模型中考虑了反冲压力、表面张力和马兰戈尼力等各种物理因素。对三种不同激光入射角的深熔焊接过程进行了数值模拟, 同时通过激光焊接工艺试验验证所建立的数值模拟模型。利用模拟结果, 对三种不同激光入射角焊接情况进行了对比, 并分析激光入射角对熔池瞬态流动行为、匙孔形态的影响, 为深入了解激光深熔焊接熔池匙孔的瞬态行为提供一定的参考。

1 激光焊接试验

试验使用大功率连续光纤激光器对厚度为 4 mm 的 304 不锈钢板材进行焊接。光纤激光器波长 $1.07\ \mu\text{m}$, 焦半径 $234\ \mu\text{m}$, 焦距 300 mm。激光头安装于焊接机器人末端, 激光入射角度可调。试验使用的激光功率为 2.4 kW, 焊接速度为 20 mm/s, 离焦量为 0, 保护气体为高纯氩气, 流量为 20 L/min。定义激光束向焊接反方向倾斜为正入射角, 向焊接方向倾斜为负入射角。进行三种条件下激光焊接试验, 其激光入射角分别为 30° 、 0° 、 -30° 。图 1 为激光焊接试验示意图。

图 1 激光焊接试验示意图

2 数学模型

2.1 计算模型参数

激光焊接过程的计算区域由空气区和材料区组成, 如图 2 所示。为了提高计算效率和保证计算精度, 图中中心区域使用大小为 $0.1\ \text{mm}$ 六面体网格进行均匀划分, 其余区域使用相对较大的六面体网格逐渐过渡划分。仿真计算中使用的 304 不锈钢材料热物理性能参数如表 1 所示。

图 2 激光焊接过程的计算域示意图

表 1 304 不锈钢热物理性能参数

名称	数值
固相温度 T_s/K	1 633
液相温度 T_m/K	1 727
固相密度 $\rho_s/(kg \cdot m^{-3})$	7 350
液相密度 $\rho_l/(kg \cdot m^{-3})$	6 900
固相热导率 $k_s/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	40
液相热导率 $k_l/(W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1})$	24
固相比热容 $c_{ps}/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	720
液相比热容 $c_{pl}/(J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1})$	800
沸点 T_b/K	3 000
蒸发潜热 $H_v/(MJ \cdot kg^{-1})$	6.36
表面张力 $\sigma/(N \cdot m^{-1})$	1.87
动力黏度 $\mu/(kg \cdot m^{-1} \cdot s^{-1})$	0.006

2.2 模型条件与控制方程

激光焊接过程十分复杂,为简化研究模型,作出以下假设:① 熔融金属为不可压缩的牛顿流体,流动状态为层流;② 空气与液态金属之间的自由界面由 VOF 方程控制,流体之间不相互渗透;③ 焊接过程中产生的气泡视为绝热气泡,其内部压强仅与体积相关,忽略气体与熔融金属之间热量传输和质量交换;④ 激光能量密度为高斯分布;⑤ 工件的初始温度为 298 K。

由连续性方程、动量方程、能量方程和 VOF 方程控制整个计算区域流动与传热,具体方程组为^[18]

$$\nabla \cdot \mathbf{v} + S_m = 0 \quad (1)$$

$$\frac{\partial \mathbf{v}}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \nabla \mathbf{v} = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{v}) - K_1 \mathbf{v} + P_r \cdot \mathbf{n} + \rho \beta g (T - T_m) \quad (2)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + \nabla \cdot (\mathbf{v}h) = \frac{1}{\rho} \nabla \cdot (k \nabla T) + S_E \quad (3)$$

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

式中, $\mathbf{v}$ 为速度; S_m 为质量源; t 为时间; ρ 为密度; P 为压强; μ 为黏度; K_1 为阻力系数; P_r 为反冲压力,可由式(11)计算获得。 $\mathbf{n}$ 为表面法矢量; β 为热膨胀率; g 为重力加速度; T 为温度; T_m 为材料液相温度; h 为焓; k 为热导率; S_E 为能量源; F 为体积分。动量方程中 $K_1 \mathbf{v}$ 一项表示固相与液相交界面处阻碍流体流动的力, K_1 的数值可通过下列公式计算获得^[19]

$$K_1 = C_s \frac{F_s^2}{(1 - F_s)^3 + B} \quad (5)$$

式中, C_s 为比例系数,选用默认值 1.0; F_s 为单元格中固态金属的百分比; B 为趋于零的量纲一正数,此处选为 10^{-10} 。

2.3 激光热源模型

为了描述激光在匙孔内多重反射菲涅尔吸收机制,采用光线追踪热源模型。首先假设激光束由许

多条能量射线组成,初始时每一条能量射线都赋予特定的方向矢量与能量。当激光入射角为 0° 时,能量射线的初始方向矢量设为 $(0, 0, -1)$; 当激光入射角为 30° 时,能量射线的初始方向矢量设为 $(1/2, 0, -\sqrt{3}/2)$; 当激光入射角为 -30° 时,能量射线的初始方向矢量设为 $(-1/2, 0, -\sqrt{3}/2)$ 。激光束辐照于工件表面的区域视为辐照平面,将辐照平面内原始单元格再细分为一系列子单元格,每一个子单元格包含两条相同的能量射线,图 3 给出了辐照平面及原始单元格细化图。每一条能量射线赋予的能量 $q(x, y)$ 由子单元格中心点到辐照平面中心点的距离决定,可根据下列高斯分布能量公式计算获得^[20]

$$q(x, y) = \frac{2\eta Q}{\pi R^2} \exp[-2(x^2 + y^2)/R^2] \quad (6)$$

式中, η 为有效功率系数; Q 为激光功率; R 为辐照平面半径,当离焦量为 0 时, R 等于焦点半径。

图 3 激光束离散化示意图

能量射线的追踪、材料对射线能量的吸收和自由界面的重构详细介绍可参考文献[19, 21]。

2.4 边界条件

图 2 中所示的计算区域上表面和下表面设为压力出口条件,其他四个表面设为连续性条件。工件的上表面和下表面存在对流换热和辐射换热,能量边界条件为^[20]

$$k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = -h_c (T - T_0) - \varepsilon_r \sigma (T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

式中, h_c 为对流传热系数; T_0 为环境温度; ε_r 为辐射系数; σ 为玻尔兹曼常数。

匙孔表面存在吸收的激光能量、对流换热、辐射换热和金属蒸发损失能量,其能量边界条件为^[20]

$$k \frac{\partial T}{\partial \mathbf{n}} = q_a - h_c (T - T_l) - \varepsilon_r \sigma (T^4 - T_l^4) - q_e \quad (8)$$

$$q_e = m_{\text{evap}} (c_p T + H_v) \quad (9)$$

$$m_{\text{evap}} = \lambda P_r \sqrt{\frac{1}{2\pi R_0 T}} \quad (10)$$

$$P_r = A p_0 \exp\left(H_v \frac{T - T_v}{R_0 T T_v}\right) \quad (11)$$

式中, q_a 为吸收的激光能量; T_1 为金属蒸气温度; q_e 为金属蒸发损失能量; m_{evap} 为金属蒸发速率; c_p 为液态金属比热容; H_v 为金属蒸发潜热; λ 为修正系数; R_0 为金属蒸气气体常数; A 为修正系数; p_0 为大气压强; T_v 为金属沸点温度。

匙孔表面上的作用力有反冲压力、表面张力、流体静压力和流体动压力, 压力平衡方程为^[18, 20]

$$P = P_r + \gamma / R_c + P_s + P_d \quad (12)$$

$$\gamma(T) = 1.87 - 4.3 \times 10^{-4}(T - 1727) \quad (13)$$

式中, P_r 为反冲压力; γ 为表面张力系数; R_c 为表面曲率半径; P_s 为流体静压力; P_d 为流体动压力。

3 数值计算与验证

激光入射角分别为 30° 、 0° 、 -30° , 计算初始时间步长设为 10^{-5} s, 最小时间步长限制为 10^{-15} s, 计算时间步长由计算过程的稳定性与收敛性控制。对焊接试验后的样件焊缝区进行磨削、抛光、腐蚀, 使用光学显微镜获取焊缝横截面形貌, 将数值模拟结果与焊接试验结果进行比较, 如图 4 所示。图 4 中虚线表示焊接试验结果焊缝横截面形貌的轮廓, 可看出仿真结果与激光焊接试验结果基本吻合, 表

(c) 激光入射角 -30°

图 4 数值仿真与激光焊接试验结果对比

明所用仿真模型能够反映激光焊接过程。

4 结果与讨论

4.1 熔池形态及温度变化过程分析

图 5a、5b 和 5c 分别为激光入射角 30° 、 0° 和 -30° 焊接过程在 $t=10$ ms、 $t=50$ ms、 $t=150$ ms、 $t=250$ ms 四个时刻的熔池纵截面上温度场, 可以看出, 随着激光焊接的进行, 熔池尺寸逐渐增大直至趋于稳定, 但不同激光入射角所对应的熔池形貌不相同。当激光入射角为 30° 时, 工件未被焊透, 由表面张力梯度引起的马兰戈尼效应发生在熔池上表面, 再加上熔池底部被热导率大的固态金属包围使得热扩散较快, 最终导致熔池上部大于熔池底部。当激光入射角为 0° 和 -30° 时, 工件未熔透时, 熔池上部大于熔池底部; 工件熔透时, 熔池底部逐渐增大直至等于或大于熔池上部。由于工件熔透, 熔池下表面也存在马兰戈尼力促使熔池下表面的液态金属向焊接反方向流动, 因此熔池底部逐渐增大。若熔池下表面的温度梯度大于熔池上表面, 则马兰戈尼

图 5 熔池纵截面($y=0$ mm)温度场

效应比熔池上表面更加剧烈, 熔池底部将大于熔池上部。

4.2 激光入射角对熔池流动行为的影响

为了研究熔池内部流动情况, 提取焊接进入准稳态后不同时刻($t=245\text{ ms}$, $t=250\text{ ms}$, $t=255\text{ ms}$)熔池中的流线与速度大小, 如图 6 所示。从图 6 可以看出, 匙孔壁附近的流体速度很大, 最大流速可达到 500 mm/s 以上; 而熔池中心区域的流体速度相对较小。当激光入射角为 30° 时, 在熔池上方存在一个逆时针涡流, 熔池下方存在一个顺时针涡流, 如图 6a 所示。由于熔池上表面温度分布不均匀, 使得表

面张力梯度存在, 进而引起马兰戈尼效应。在马兰戈尼效应影响下, 熔池上表面的液态金属沿焊接反方向流动, 使得在熔池上部形成逆时针涡流。熔池底部的熔融金属在反冲压力作用下向焊接反方向流动, 因固液界面受阻往上流动, 在向上流动过程因遇到熔池上部往下流动液体而改变方向, 向匙孔后壁流动, 最终促使熔池下部形成顺时针涡流。当激光入射角为 0° 和 -30° 时, 熔池内部流动以顺时针涡流为主, 如图 6b 和 6c 所示。同时较强的顺时针涡流削弱了由马兰戈尼效应引起的熔池顶部和底部对流。

图 6 熔池纵截面($y=0\text{ mm}$)流线与速度大小

从图 6 也可以看出, 当激光入射角为 -30° 时, 熔池内部流体速度大, 流动比较剧烈; 而当激光入射角为 30° 时, 熔池内部流体流速较小, 流动较平缓。当激光束以一定倾斜角度进行焊接时, 在熔池内部形成的匙孔也会倾斜一定角度, 从而反冲压力对匙孔后壁作用效果也将改变。当激光入射角为正时, 匙孔后壁受到反冲压力 F_r 水平方向分力 F_{r1} 和垂直方向分力 F_{r2} 的作用。如图 7a 所示, 水平方向分力 F_{r1} 促使液态金属往焊接反方向流动形成顺时

针涡流, 而垂直方向分力 F_{r2} 向液态金属施加一个垂直向下的压力, 抑制液态金属流动。当激光入射角为负时, 匙孔后壁受到反冲压力 F_r 水平方向分力 F_{r3} 和垂直方向分力 F_{r4} 的作用。如图 7b 所示, 水平方向分力 F_{r3} 同样使得液态金属往焊接反方向流动形成顺时针涡流, 而垂直方向分力 F_{r4} 方向垂直向上可以抵抗流体重力效应, 促进液态金属流动。因此激光入射角为 -30° 时, 熔池内部流体流动比较剧烈; 而激光入射角为 30° 时, 熔池内部流体流动较平缓。

图 7 匙孔后壁反冲压力分析示意图

由于激光入射角为 30° 时, 熔池内部流动减弱, 使匙孔后壁附近的高温液态金属扩散较慢, 不利于该区域热量的散发, 而熔池底部金属流体得到的热量也会相应减少, 使得熔深减小, 焊件未熔透。当激光入射角为 -30° 时, 熔池内部流动加剧, 使得匙孔后壁附近的高温液态金属快速扩散, 加快了热量散发, 熔池底部熔融金属可获得较多的热量, 使得熔深增大, 焊件熔透。同时垂直向下分力 F_{r2} 对匙孔后壁上液态金属施加向下压力, 使其难以逃脱熔池形成飞溅; 而垂直向上分力 F_{r4} 对匙孔后壁上液态金属施加向上压力, 容易促进飞溅生成。因此, 激光入射角为正时, 一定程度上可抑制飞溅形成; 当激光入射角为负时, 易促进飞溅生成。

4.3 激光入射角对匙孔行为的影响

选择激光焊接进入准稳态后不同时刻匙孔三维形态进行研究, 图 8 为不同激光入射角焊接状态在

图 8 匙孔三维形态图

$t=200$ ms, $t=205$ ms, $t=210$ ms 三个时刻的匙孔三维形态。由图 8 可知, 匙孔表面的温度分布不均匀, 有些区域的温度可达到 $3\,000$ K 以上。当激光入射角为 30° 时, 匙孔直径尺寸较大且匙孔波动较小; 当激光入射角为 0° 时, 匙孔中间附近出现坍塌现象; 而当激光入射角为 -30° 时, 匙孔中间附近也出现坍塌现象且匙孔底部的直径尺寸变化较大。

为了进一步分析激光入射角对匙孔行为的影响, 选取激光焊接进入准稳态后的 200 ms 至 230 ms 时间区域, 获取匙孔在该时间区域内的深度信息, 如图 9 所示。图 9 中圆点标记实线表示匙孔深度(匙孔中心线方向的深度), 虚线是对圆点标记实线 10 阶多项式的拟合结果。在 30 ms 内, 激光入射角为 30° 时匙孔深度最大值为 3.58 mm, 最小值为 0.92 mm。激光入射角为 0° 时匙孔深度最大值为 4.00 mm, 最小值为 0.7 mm。激光入射角为 -30° 时匙孔深度最大值为 4.62 mm, 最小值为 0.81 mm。可以发现, 激光焊接准稳态过程中匙孔深度在一定范围内波动且匙孔都会出现坍塌现象。由于匙孔坍塌, 匙孔深度会振荡变化。匙孔坍塌时, 匙孔深度减小, 同时在匙孔的前后壁间形成桥段。随着焊接进行, 激光束直接辐照在桥段上产生很大的蒸发反冲压力, 使得匙孔再次张开, 从而使匙孔深度增加。当激光入射角为 -30° 时, 匙孔深度的变化幅度比激光入射角为 30° 时大, 同时通过对比匙孔深度变化的拟合曲线可发现该情况下匙孔深度的波动性较大。由于激光入射角为负时, 所形成匙孔中心线与沿焊接方向水平线的夹角为锐角, 因此匙孔后壁正上方的液态金属近似悬空状态。匙孔后壁需要承受这部分液态金属产生的静压力, 促使匙孔坍塌, 导致匙孔的稳定性降低, 所以匙孔深度振荡会更剧烈。

(b) 激光入射角 0° (c) 激光入射角 -30°

图9 匙孔深度变化曲线图

随着焊接从非稳态进入准稳态,匙孔后壁正上方的液态金属体积增大,匙孔表面受到静压力也增大,这将使匙孔更加容易坍塌。由此可推断,相比于激光入射角为正时,激光入射角为负的焊接过程中匙孔稳定性更差。所以当激光入射角为 -30° 时,相比于激光入射角为 30° ,匙孔深度的变化幅度和波动性都较大,振荡会更剧烈。当匙孔坍塌时,匙孔断开分成两部分如图8c第200 ms所示,位于熔池底部那一部分将进入熔池内部成为气泡,若此气泡未能逃离熔池或破裂将成为焊缝中的气孔缺陷,严重影响焊接接头力学性能。由于激光入射角为负时,匙孔的稳定性差,匙孔发生坍塌现象的概率将提高,因而气泡更加容易形成,不利于抑制气孔缺陷的产生。

5 结论

(1) 激光入射角不但对熔池形貌产生影响,而且影响着熔池内部的流动。当激光入射角为正时,

熔池内部流动减弱;当激光入射角为负时,熔池内部流动加剧。

(2) 不同激光入射角焊接时匙孔后壁反冲压力的作用结果表明,飞溅的形成会因激光入射角的正负而不同。激光入射角为正时,有利于抑制飞溅形成;而激光入射角为负时,则促使飞溅生成。

(3) 匙孔深度变化曲线和匙孔后壁静压力的变化情况表明,激光入射角影响匙孔的稳定性。激光入射角为负时,匙孔容易坍塌,稳定性降低,匙孔深度振荡更强烈。由于匙孔稳定性降低,产生气泡的概率将提高。

参考文献

- [1] ZHANG Yi, LIU Tongwei, LI Bin, et al. Simultaneous monitoring of penetration status and joint tracking during laser keyhole welding[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2019, 24(4): 1732-1742.
- [2] GAO X, YOU D, KATAYAMA S. Seam tracking monitoring based on adaptive kalman filter embedded elman neural network during high-power fiber laser welding[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2012, 59(11): 4315-4325.
- [3] AI Yuewei, JIANG Ping, WANG Chunming, et al. Investigation of the humping formation in the high power and high speed laser welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 107: 102-111.
- [4] 王煜, 高向东, 陈子琴, 等. 激光-MAG 复合焊接过程金属蒸气和背部熔池图像分析[J]. 机械工程学报, 2019, 55(19): 167-173.
WANG Yu, GAO Xiangdong, CHEN Ziqin, et al. Analysis of the images of metal vapor and bottom-molten pool in laser-MAG hybrid welding process[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55(19): 167-173.
- [5] DAL M, FABBRO R. An overview of the state of art in laser welding simulation[J]. Optics and Laser Technology, 2016, 78: 2-14.
- [6] 武传松, 孟祥萌, 陈姬, 等. 熔焊热过程与熔池行为数值模拟的研究进展[J]. 机械工程学报, 2018, 54(2): 1-15.
WU Chuansong, MENG Xiangmeng, CHEN Ji, et al. Progress in numerical simulation of thermal processes and weld pool behaviors in fusion welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2018, 54(2): 1-15.
- [7] ZHANG Dabin, WANG Meng, SHU Chengsong, et al. Dynamic keyhole behavior and keyhole instability in high

- power fiber laser welding of stainless steel[J]. Optics and Laser Technology, 2019, 114: 1-9.
- [8] AI Yuewei, JIANG Ping, WANG Chunming, et al. Experimental and numerical analysis of molten pool and keyhole profile during high-power deep-penetration laser welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 126(A): 779-789.
- [9] WU Dongsheng, HUA Xueming, HUANG Lijing, et al. Numerical simulation of spatter formation during fiber laser welding of 5083 aluminum alloy at full penetration condition[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 100: 157-164.
- [10] LIANG Rong, LUO Yu, LI Zhuguo. The effect of humping on residual stress and distortion in high-speed laser welding using coupled CFD-FEM model[J]. Optics and Laser Technology, 2018, 104: 201-205.
- [11] ZHANG Y, HAN S, CHEON J, et al. Effect of joint gap on bead formation in laser butt welding of stainless steel[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2017, 249: 274-284.
- [12] LUO Manlelan, HU Renzhi, LI Quanhong, et al. Physical understanding of keyhole and weld pool dynamics in laser welding under different water pressures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 137: 328-336.
- [13] LI Liquan, PENG Genchen, WANG Jiming, et al. Numerical and experimental study on keyhole and melt flow dynamics during laser welding of aluminium alloys under subatmospheric pressures[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2019, 133: 812-826.
- [14] 陈根余, 康斌, 张屹, 等. 光纤激光入射角对高强钢对接焊焊接性能的影响[J]. 中国激光, 2012, 39(1): 104-109.
- CHEN Genyu, KANG Bin, ZHANG Yi, et al. Effects of incident angle on welding performance of fiber laser butt welding of high-strength automobile steel[J]. Chinese Journal of Lasers, 2012, 39(1): 104-109.
- [15] LIN Runqi, WANG Huiping, LU Fenggui, et al. Numerical study of keyhole dynamics and keyhole-induced porosity formation in remote laser welding of Al alloys[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2017, 108(A): 244-256.
- [16] RODRIGUEZ-VIDAL E, SANZ C, SORIANO C, et al. Effect of metal micro-structuring on the mechanical behavior of polymer-metal laser T-joints[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2016, 229: 668-677.
- [17] ZHANG Mingjun, CHEN Shun, ZHANG Yingzhe, et al. Mechanisms for improvement of weld appearance in autogenous fiber laser welding of thick stainless steels[J]. Metals, 2018, 8(8): 625-637.
- [18] GAO Zhongmei, JIANG Ping, MI Gaoyang, et al. Investigation on the weld bead profile transformation with the keyhole and molten pool dynamic behavior simulation in high power laser welding[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2018, 116: 1304-1313.
- [19] CHO W, NA S, THOMY C, et al. Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 262-275.
- [20] ZHANG Ruolin, TANG Xinhua, XU Lidong, et al. Study of molten pool dynamics and porosity formation mechanism in full penetration fiber laser welding of Al-alloy[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2020, 148: 119089.
- [21] HAN S, AHN J, NA S. A study on ray tracing method for CFD simulations of laser keyhole welding: Progressive search method[J]. Welding in the World, 2016, 60(2): 247-258.

作者简介: 高向东(通信作者), 男, 1963 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要从事焊接自动化方面的研究。

E-mail: gaofd@gdut.edu.cn

冯燕柱, 男, 1993 年出生。主要从事激光焊接数值模拟方面的研究。

E-mail: 1549080499@qq.com