

铝合金激光深熔焊熔池小孔演变行为数值模拟研究

刘 伟, 丁子珊, 赵云辉

上海理工大学机械工程学院, 上海

收稿日期: 2022年12月20日; 录用日期: 2023年5月15日; 发布日期: 2023年5月22日

摘 要

高功率激光深熔焊接是目前工业应用当中最理想的先进技术。本文提出了一种三维数值模拟方法, 考虑了作用在熔池小孔上的表面张力、反冲压力, 利用VOF追踪气液界面, 利用焓-孔隙度法解决焊接过程中熔化凝固问题, 考虑了热对流、热辐射、小孔自由表面的多重吸收等传热过程, 采用随小孔深度变化的旋转高斯热源来简化焊接的过程。分析了熔池小孔的演变过程以及工艺参数对小孔形貌的影响, 结果表明: 熔池小孔的形貌变化是反冲压力作用的结果; 焊接速度对熔池小孔的深度影响不大, 焊接功率越大, 熔池小孔的深度越深。

关键词

深熔焊接, 反冲压力, VOF, 流体动力学, 高斯移动热源

Numerical Simulation of Pore Evolution Behavior in Laser Deep Penetration Welding of Aluminum Alloy

Wei Liu, Zishan Ding, Yunhui Zhao

School of Mechanical Engineering, University of Shanghai for Science and Technology, Shanghai

Received: Dec. 20th, 2022; accepted: May 15th, 2023; published: May 22nd, 2023

Abstract

High power laser deep penetration welding is the most ideal advanced technology in current industrial applications. In this paper, a three-dimensional numerical simulation method is pro-

posed, which considers the surface tension and recoil pressure on the orifice of the molten pool, uses VOF to track the gas-liquid interface, uses enthalpy porosity method to solve the melting and solidification problem in the welding process, and considers heat transfer processes such as heat convection, heat radiation and multiple absorption of the orifice free surface. A rotating Gaussian heat source varying with the depth of the hole is used to simplify the welding process. The evolution process of molten pool hole and the influence of technological parameters on the morphology of molten pool hole are analyzed. The results show that the morphology change of molten pool hole is the result of recoil pressure. The welding speed has little influence on the depth of molten pool holes. The greater the welding power, the deeper the depth of molten pool holes.

Keywords

Penetration Fusion Welding, Back-Flushing Pressure, VOF, Fluid Dynamics, Gaussian Moving Heat Source

Copyright © 2023 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

激光焊接作为一种新型的焊接技术,具有焊接速度快、焊缝深宽比大、变形小,能量密度高,同时也具有非常高的定位精度,焊接接头性能好等优点[1],已被广泛应用于航空航天、船舶、汽车、铁路、能源等重要的工业生产领域当中[2]。在焊接过程中,熔池小孔的瞬态行为对焊接质量有着很大的影响,所以对熔池小孔的演变行为进行数值模拟研究是必不可少的。Yue [3]等人提出了一种三维数值模拟方法,用于模拟研究小孔的轮廓特征以及小孔的演变对熔池的流动影响,该模型考虑了小孔自由表面、熔池表面和固-液-汽三相转变。Wang [4]等人建立了小孔、反冲压力、熔池的相互耦合的三维模型,采用旋转激光的方法,模拟研究了小孔和熔池流动的动态行为特征。Zhang [5]等人将流体体积法与射线追踪法相结合,模拟研究了激光全熔透焊接过程中小孔和熔池的动态耦合,研究表明,在全熔透焊接中,小孔熔池的瞬态演化具有周期性特征。邓集权[6]采用了 Level Set 方法追踪气液界面,混合模型处理固液界面,考虑了小孔内部多重的反射吸收、表面张力、反冲压力的影响,研究了小孔和熔池的动态形貌,以及熔池的温度场。冯燕柱[7]采用 FLOW 3D 流体仿真软件,对不同的激光入射角下,模拟研究了激光焊接在不同的熔透状态下小孔熔池的动态耦合行为,结果表明,激光入射角为正时,对熔池小孔的稳定性有很大的提高。吴家洲[8]建立了随小孔形状变化的自适应热源模型,考虑了反冲压力、表面张力、浮力对熔池小孔的影响,模拟研究了小孔和熔池的演变过程以及熔池的流动。Aparna [9]等人建立了三维瞬态传热数值模型,该模型考虑了表面张力、Marangoni 驱动力对熔池的影响。

2. 模型建立

激光深熔焊接的物理过程十分复杂,当高能量的激光密度照射在金属材料表面时,材料迅速熔化,熔化后的金属迅速汽化产生金属蒸气,在金属蒸气蒸发的反冲压力作用下,材料表面形成一个向下的小孔。为了便于计算,从而对模型做出以下假设:

- 1) 该工件材料均匀且各向同性。
- 2) 固-液相变时材料的密度不发生变化。

- 3) 熔融流动是层流，液态金属被认为是牛顿流体和不可压缩流体。
- 4) 激光束的热源呈高斯分布。
- 5) 不考虑保护气体对熔池小孔的影响。
- 6) 不考虑熔体与气体间的相互作用。

2.1. 计算域和控制方程

为了简化计算，采用对称模型，工件上方为气相区，厚度为 2 mm，计算模型尺寸为 40 mm × 5 mm × 6 mm，采用正六面体划分网格，如图 1 所示，图中，面 ABCD、AA₁B₁B、DD₁C₁C、BB₁C₁C 设置为壁面，面 EFGH 设置为压力入口，面 A₁EFB₁、B₁FGC₁、D₁HGC₁ 设置为压力出口。图 2 所示为观察激光焊接过程的实验装置图。

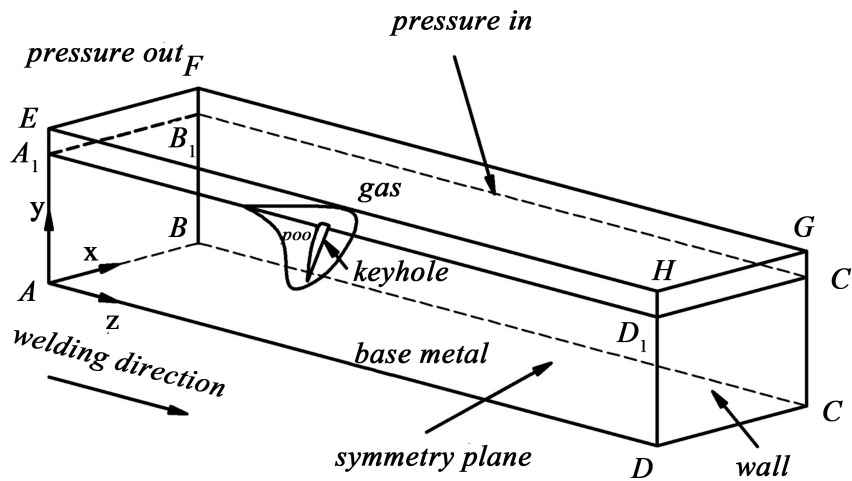


Figure 1. Schematic diagram of calculation model
图 1. 计算模型示意图

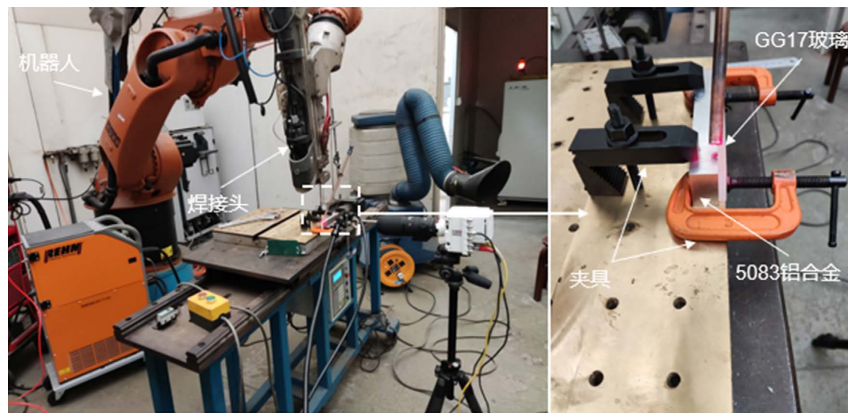


Figure 2. Diagram of experimental device
图 2. 实验装置图

基于以上假设，列出计算所用的质量方程、动量方程、能量守恒方程来模拟熔池小孔的演变过程。

1) 质量守恒方程如下所示：

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

式中： ρ 是熔融金属材料的密度， u 表示流体的速度矢量。

2) 动量守恒方程如下所示：

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial t} + \rho \nabla \cdot (u \cdot u) = \nabla \cdot (\mu \nabla u) - \nabla p + S_M \quad (2)$$

式中： p 为流体的压力， μ 为金属材料的动力粘度， S_M 为动量源项。

3) 能量守恒方程如下所示：

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho u H) = \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla H \right) + S_E \quad (3)$$

式中： k 为热导率， H 为熔化焓， C_p 为材料的比热容， S_E 为能量源项。

2.2. 反冲压力模型

在激光深熔焊接过程中，激光辐射导致材料蒸发过程中的反冲压力是小孔形成过程中的主要驱动力。因此在本文中，采用 Matsunwa [10] 等人提出的反冲压力模型，公式如下所示：

$$p_r = 0.54 A B_0 (T)^{-0.5} \exp\left(-\frac{U}{KT}\right) \quad (4)$$

式中： p_r 为反冲压力， A ， B_0 为材料的相关常数：即压力系数、蒸发常数， T 表示小孔的壁面温度， K 表示斯蒂芬-玻尔兹曼常数， U 表示每个原子的蒸发潜热。

2.3. 材料的热物理参数

本文所选用的材料是 5083 铝合金，物理参数如下表 1 所示：

Table 1. The rmophysical parameter value of 5083 aluminum alloy

表 1. 5083 铝合金热物理参数值

物理属性	取值
固相温度/(K)	847
液相温度/(K)	933
固相密度/(kg·m ⁻³)	2660
液相密度/(kg·m ⁻³)	2380
表面张力/(N·m ⁻¹)	0.871
表面张力温度系数/(N/m·K)	-1.55 × 10 ⁻⁴
比热容/(J/kg·K)	1050
热膨胀系数/(K ⁻¹)	1.5 × 10 ⁻⁴
熔化潜热/(J/kg)	3.87 × 10 ⁵
气化潜热/(J/kg)	1.05 × 10 ⁷
热导率/(W/m·K)	90
传热系数/(W/m ² ·K)	20
环境温度/(K)	298

2.4. 热源模型

激光深熔焊接中，热源模型对熔池小孔的演变是非常重要的，基于激光深熔焊接中熔池小孔形成的特点，本文采用随小孔深度方向变化的旋转高斯曲面体热源模型，其表达式如下：

$$q(x, y, z) = \frac{9\eta Q}{\pi R_0^2 H(t)(1-e^{-3})} \exp\left(\frac{-9(x^2 + y^2)}{\ln(H(t)/z)}\right) \quad (5)$$

式中： η 为激光的热源效率，本文中取为 0.65， Q 为激光的总功率， $H(t)$ 是随时间变化的小孔深度， R_0 为激光热源作用在材料表面的光斑半径。

2.5. 边界条件

1) 热对流边界：

$$q_c = h_c(T - T_0) \quad (6)$$

式中： h_c 为对流系数， T_0 为环境温度。

2) 热辐射边界：

$$q_r = \varepsilon_r \sigma_0 (T^4 - T_0^4) \quad (7)$$

式中： ε_r 为热辐射率， σ_0 为斯蒂芬 - 玻尔兹曼常数。

3) 小孔自由表面考虑热辐射、热对流、激光吸收以及蒸发的热边界条件：

$$q' = q_{absorb} - h_c(T - T_0) - \varepsilon_r \sigma_0 (T^4 - T_0^4) - W_{evap} H_v \quad (8)$$

式中： q_{absorb} 为激光吸收的能量， W_{evap} 为蒸发速率， H_v 为气化潜热。

4) 对于其他表面的热边界条件：

$$q'' = -h_c(T - T_0) - \varepsilon_r \sigma_0 (T^4 - T_0^4) \quad (9)$$

2.6. 气液界面的追踪与熔化凝固处理

在激光深熔焊接过程中，气液界面的形状是不断变化的，使用 VOF 方法对于追踪自由界面是非常重要的。VOF 方法是基于流体体积占单元格体积的百分比来判断自由界面的，通过求解体积分数 F 的连续性方程，可以判断出单元所属状态。 F 的值域为 [0, 1]，当 $F = 0$ 时，单元全部状态为气相；当 $F = 1$ 时，单元全部状态为液相；当 F 在 0 和 1 之间时，表明既有液相也有气相，这些单元所形成的面即为自由表面[11]。其 VOF 方程如下：

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \cdot \nabla F = 0 \quad (10)$$

式中： F 为体积分数， u 为速度， t 为时间。

在金属凝固熔化过程中，相变潜热可以通过液相体积分数法来处理，糊状区域的动量损失采用焓 - 孔隙度法近似。用多孔介质处理相变的控制体，孔隙度等于液相体积分数 f_l ，通过计算每个控制体来计算固液界面[3]。糊状区域为液相分数在 0~1 之间的区域，看作孔隙度从 0 到 1 递增的多孔介质，动量损失源项 A_{mush} 满足：

$$S_{mush} = \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + \varepsilon} A_{mush} \cdot v \quad (11)$$

式中： ε 为取值很小的常数， A_{mush} 为与糊状区枝晶尺寸有关的常数， v 为该单元的速度矢量。

3. 计算结果及讨论

3.1. 小孔形成演变过程

图 3 所示为激光深熔焊接过程中，小孔的形成演变过程，采用的激光功率为 3 KW，焊接速度为 6 m/min。从图中可以看出，当高能量的激光密度照射在材料表面时，少量的金属材料迅速熔化，从图 3 中 a1 图可以看出材料表面有向下凹的趋势；随着焊接时间持续增加，更多的金属材料迅速熔化，被熔化的金属温度逐步升高超过了材料的沸点迅速蒸发，材料蒸发会产生反冲压力，小孔在反冲压力、表面张力的作用下，小孔的深度也逐渐增加，由公式(5)可知，反冲压力是随着温度的升高而加大的，随着时间一直增加，使得材料表面的温度急剧升高，材料蒸发所产生的反冲压力也越来越大，在 $t = 25 \text{ ms}$ 的时候，小孔的深度达到了 3 mm，小孔达到了稳定阶段。

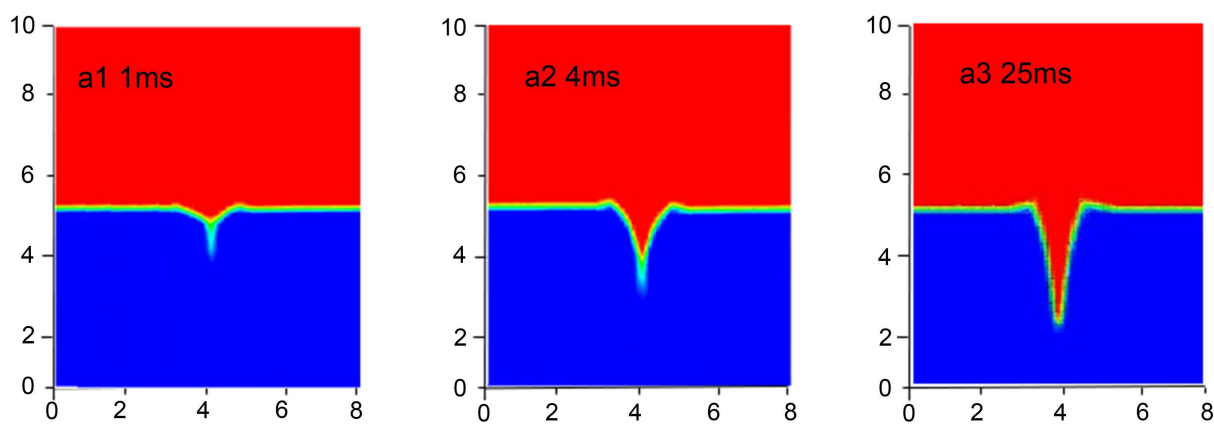


Figure 3. The evolution of a small hole
图 3. 小孔的演变过程

3.2. 熔池演变过程

图 4 则为熔池的演变过程，采用的激光功率为 3 KW，焊接速度为 6 m/min。熔池的演变过程与小孔的演变过程类似，随小孔是呈正相关性的，小孔形成后，随着焊接的时间增加，小孔深度逐渐加大，此时，传递到小孔壁面的激光能量也越来越多，小孔后方的熔池通过小孔壁面菲涅尔吸收激光束能量，吸收的能量使材料持续熔化，延长了材料凝固的时间。所以熔池的宽度也要比小孔的宽度更宽。

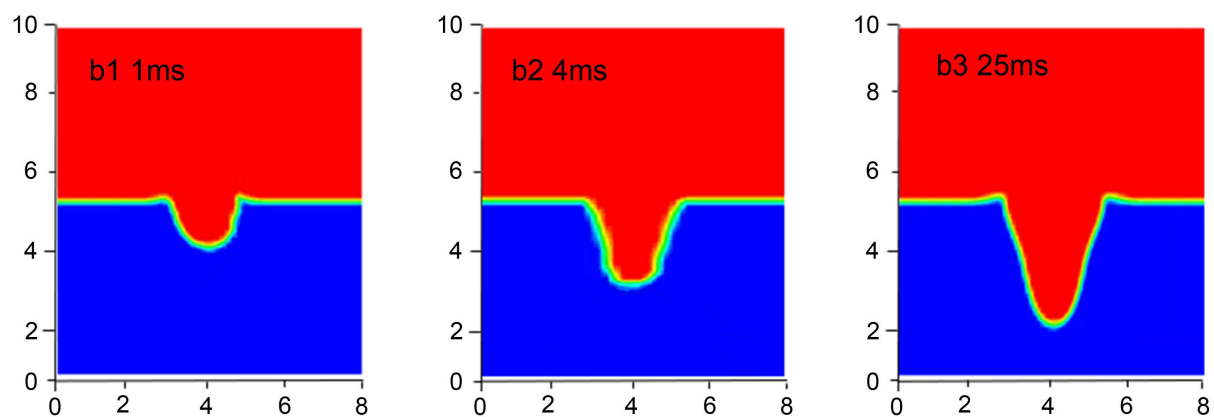


Figure 4. The evolution of a molten pool
图 4. 熔池的演变过程

3.3. 焊接速度对小孔形貌的影响

图 5 则为相同的激光功率 3 KW，其焊接速度不同，观察焊接速度对小孔形貌的影响。随着焊接速度的增加，小孔深度略有下降。这是因为焊接速度越高，焊接热输入减少，到达材料表面的激光能量也相应减少，反冲压力的作用也相应减弱，所以小孔的深度也略有下降。但总的来说，焊接速度对熔池小孔的深度影响不大。但在焊接速度为 2 m/min 时，小孔上部开口较大，这是因为焊接速度越低，激光的线能量越高，辐射在材料表面的能量也越多，熔化的金属材料也相应的增加，反冲压力的作用也越强，且熔化的金属液向小孔后下方流动，导致小孔的后壁面在凝固后变得陡峭。焊接速度对熔池的影响的规律与小孔的影响规律大致一样，此处不再详细介绍。

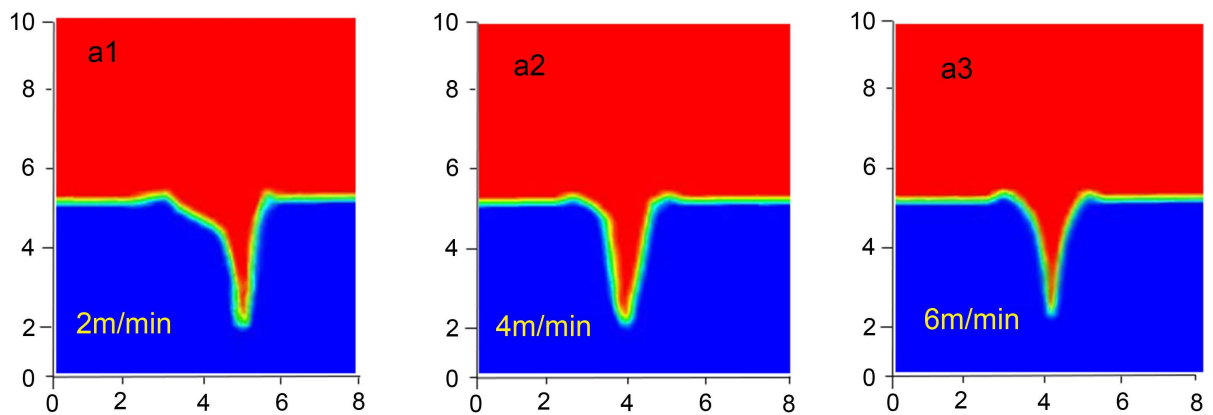


Figure 5. Morphology of small holes at different welding speeds

图 5. 不同焊接速度下小孔的形貌

3.4. 焊接功率对小孔形貌的影响

图 6 为不同的激光功率对小孔形貌的影响，焊接速度取为 4 m/min。上述我们分析了焊接速度对小孔形貌的影响，得出了焊接速度对小孔深度影响不大的结论。实际上，对小孔深度影响较大的是激光功率，当功率为 5 KW 时，小孔的深度有了明显的增加，且小孔上部开口较大。这是因为相同时间内，功率越大，能量密度也越大，激光对材料的熔化作用也越强，作用在材料表面的反冲压力也大，所以小孔的深度也明显增加。

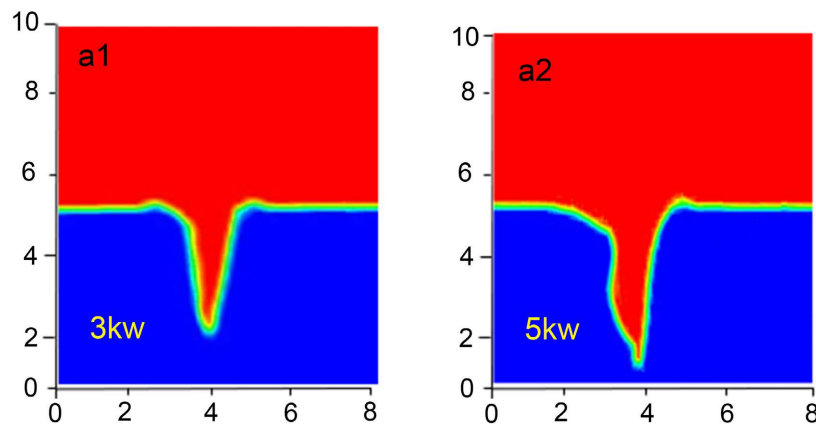


Figure 6. Morphology of small holes at different welding power

图 6. 不同焊接功率下小孔的形貌

3.5. 实验验证

为了验证模型的正确性, 本文进行了焊接速度为 2 m/min 和焊接速度为 4 m/min 激光焊接实验, 利用小孔的深度和小孔开口大小来验证模型的准确性, 实验结果如图 7 所示。通过实验结果可知, 焊接速度越低, 线能量就越高, 导致小孔上方开口较大, 与仿真结果较吻合, 从而验证了模型的准确性。

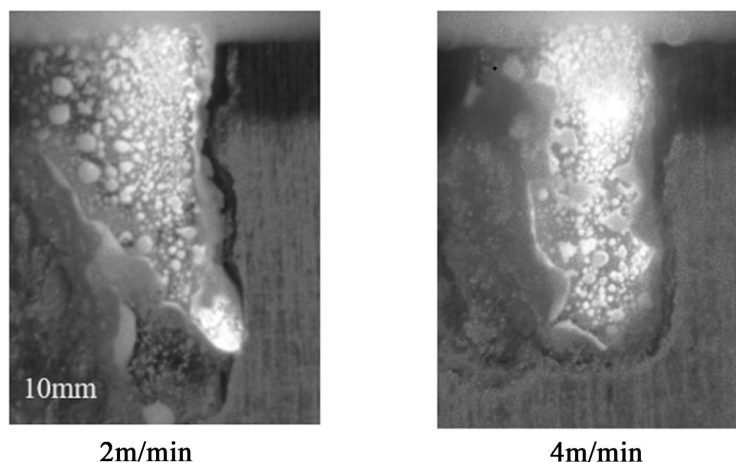


Figure 7. Keyhole experiment results
图 7. 小孔实验结果图

4. 总结

本文建立了一个考虑表面张力、反冲压力等力的三维数值模型, 用 VOF 方法追踪气液界面, 用焓-孔隙度法解决熔化凝固问题, 考虑了激光的热辐射、热对流, 小孔自由表面对激光的多重吸收, 分析了熔池小孔的演变过程, 并讨论了焊接速度和焊接功率对熔池小孔的影响。得出结论: 小孔的形成是作用在表面上反冲压力的结果, 反冲压力越大, 小孔的深度越深, 熔池深度与小孔的深度呈正相关性; 焊接速度对熔池小孔影响的作用不大, 焊接速度越低时, 小孔的开口较大; 激光功率对熔池小孔的影响较大, 功率越大, 作用在材料表面的能量密度越高, 金属液蒸发所形成的反冲压力也越大, 熔池小孔的深度相应的增加。

参考文献

- [1] 庞盛永. 激光深熔焊接小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]: [博士学位论文]. 武汉: 华中科技大学, 2011.
- [2] 左铁钊, 陈虹. 21 世纪的绿色制造——激光制造技术及应用[J]. 机械工程学报, 2009, 45(10): 106-110.
- [3] Ai, Y.W., Jiang, P., Wang, C.M., Mi, G.Y., *et al.* (2018) Experimental and Numerical Analysis of Molten Pool and Keyhole Profile during High-Power Deep-Penetration Laser Welding. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, **126**, 779-789. <https://doi.org/10.1016/j.ijheatmasstransfer.2018.05.031>
- [4] Wang, X.L., Liu, W., Xu, G.X., *et al.* (2022) Numerical Analysis of Dynamic Coupling between the Keyhole and Molten Pool in the Rotating Laser Welding Process of Aluminum Alloy. *Research Square*. <https://doi.org/10.21203/rs.3.rs-1427293/v1>
- [5] Zhang, L.J., Zhang, J.X., Gumenyuk, A., Rethmeier, M. and Na, S.J. (2014) Numerical Simulation of Full Penetration Laser Welding of Thick Steel Plate with High Power High Brightness Laser. *Journal of Materials Processing Technology*, **214**, 1710-1720. <https://doi.org/10.1016/j.jmatprotec.2014.03.016>
- [6] 邓集权. 激光深熔焊接小孔和熔池动态行为的模拟与试验研究[D]: [硕士学位论文]. 长沙: 湖南大学, 2016.
- [7] 冯燕柱. 不锈钢激光焊接熔池匙孔瞬态行为数值模拟研究[D]: [硕士学位论文]. 广州: 广东工业大学, 2020. <https://doi.org/10.27029/d.cnki.ggdgu.2020.002088>

- [8] 吴家洲. 激光深熔焊接过程流体流动分析和传热传质机理研究[D]: [博士学位论文]. 南昌: 南昌大学, 2019.
- [9] Duggirala, A., Kalvettukaran, P., Acherjee, B. and Mitra, S. (2021) Numerical Simulation of the Temperature Field, Weld Profile, and Weld Pool Dynamics in Laser Welding of Aluminium Alloy. *Optik*, **247**, Article ID: 167990. <https://doi.org/10.1016/j.ijleo.2021.167990>
- [10] Matsunawa, A. and Semak, V. (1997) The Simulation of Front Keyhole Wall Dynamics during Laser Welding. *Journal of Physics D*, **30**, 798-809. <https://doi.org/10.1088/0022-3727/30/5/013>
- [11] Meng, X.M., Artinov, M., Bachmann, M., *et al.* (2019) Experimental and Numerical Assessment of Weld Pool Behavior and Final Microstructure in Wire Feed Laser Beam Welding with Electromagnetic Stirring. *Journal of Manufacturing Processes*, **45**, 408-418. <https://doi.org/10.1016/j.jmapro.2019.07.021>