

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.04.010

表面张力对激光深熔焊熔池小孔的影响

何林基¹, 张天雷², 徐刚¹, 顾广石³, 马春伟^{1*}

(1. 上海工程技术大学材料工程学院, 上海 201620; 2. 北京遥感设备研究所, 北京 100854;
3. 沈阳新松机器人自动化股份有限公司, 辽宁 沈阳 110169)

摘要:为了探究表面张力对于激光焊接熔池的影响,课题组使用移动旋转高斯体热源来简化焊接的热过程,建立数学模型,获得了奥氏体不锈钢深熔焊接过程中动态熔池的温度场以及流场分布;同时以奥氏体不锈钢为基板进行激光焊接试验,试验得到的焊缝横截面尺寸同模型计算结果得到的熔池尺寸相吻合,验证了模型的可靠性;以此为基础对2种不同表面张力系数下激光焊接熔池过程进行仿真。研究结果表明:激光深熔的过程中,表面张力系数较小时,焊接小孔深度较深,有利于热量向钢板厚度方向传递,增大了熔池深度,但是降低了焊接小孔的稳定性。因此,可以通过改变表面张力系数来调整熔池的流动行为,提高焊接质量。

关键词:激光深熔焊;表面张力;有限元仿真;FLUENT

中图分类号: TG402; TH142

文献标志码: A

文章编号: 1005-2895(2021)04-0051-05

Effect of Surface Tension on Keyhole in Molten Pool of Laser Deep Penetration Welding

HE Linji¹, ZHANG Tianlei², XU Gang¹, GU Guangshi³, MA Chunwei^{1*}

(1. School of Materials Engineering, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China;

2. Beijing Institute of Remote Sensing Equipment, Beijing 100854, China;

3. SIASUN Robot & Automation Co., Ltd., Shenyang 110169, China)

Abstract: In order to study the influence of surface tension on laser welding pool, a moving and rotating Gauss body heat source was used to simplify the welding heat process, and a mathematical model was established to obtain the temperature field and flow field distribution of the dynamic pool during the deep fusion welding of austenitic stainless steel. At the same time, austenite stainless steel was used as the base metal for laser welding experiments, and the weld cross-sectional fusion line of the test was consistent with the model calculation results, which verifies the reliability of the model. Based on this, the simulation was carried out for the molten pool process of laser welding under two different surface tension coefficients. The results show that when the surface tension coefficient is small, the welding hole depth is deep, which is conducive to the heat transfer to the thickness direction of the steel plate, and increases the welding pool depth, but reduces the welding hole stability. Therefore, the flow behavior of molten pool can be adjusted by changing the surface tension coefficient to improve the welding quality.

Keywords: laser deep fusion welding; surface tension; FEA (Finite Element Analysis); FLUENT

激光焊接作为一种借助电气自动化设备易于实现智能制造的加工技术,适用的材料类型多,具有极大的应用前景^[1-2]。由于激光焊接过程中激光光束与材料之间的相互作用异常复杂,同时影响熔池行为的因素

众多,因此随着计算机科学的发展,借助有限元方法对激光焊接熔池进行可视化的研究成为了可能^[3]。

表面张力对焊接熔池的流动行为具有极大的影响作用。郭超博^[4]使用 FLUENT 研究了表面张力温度

收稿日期:2020-11-08;修回日期:2021-04-12

第一作者简介:何林基(1997),男,四川平昌人,硕士研究生,主要研究方向为焊接熔池仿真。通信作者:马春伟(1970),男,甘肃兰州人,博士,讲师,硕士生导师,主要从事材料加工和结构完整性研究。E-mail:macwjx@sues.edu.cn

系数对 TIG 焊接熔池的影响。庞盛勇^[5]研究了在 2 种不同的表面张力温度系数下小孔耦合行为的差异。李俐群等^[6]通过活性剂改变焊接熔池的表面张力,研究了不同表面张力温度系数对于激光焊接熔池行为以及焊缝形貌的影响。课题组基于 FLUENT 对在不同表面张力系数下小孔稳定性进行了研究。

1 物理模型的建立

1.1 基本的假设

激光深熔焊过程涉及的物理与化学行为较为复杂,既要考虑材料的熔化与凝固的 2 种相变过程,还要考虑金属蒸气的反冲压力对熔池的挤压而形成小孔的问题。为了简化模型,作如下基本假设^[7]:①熔池中的液态金属为不可压缩,且为层流;②材料是各向同性的,热物理性质都不随温度变化,同时固-液相变时金属液体密度固定不变;③不考虑熔池与气体间的化学反应。

1.2 数值模型的建立

为了减少计算时间,模型采用对称模型,基板金属上层为空气域,其厚度为 1 mm。模型的尺寸为 30 mm × 5 mm × 6 mm,网格数量小于 100 000。几何模型如图 1 所示。

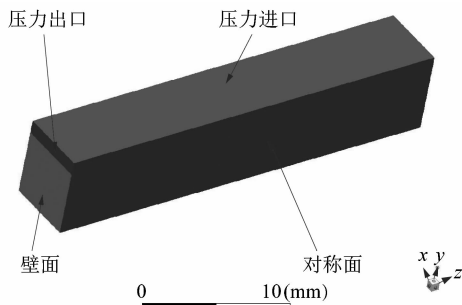


图 1 计算几何模型

Figure 1 Computational geometry mode

1.3 数值计算的边界条件

1.3.1 焊接热源

考虑到激光焊接过程中激光束流能量密度在板厚方向上逐步衰减,因此采用旋转曲面高斯热源作为焊接热源。热源方程为:

$$q(x, y, z) = \frac{9\eta P}{\pi H(1 - e^{-3})} \text{EXP} \left\{ \frac{-9(x^2 + y^2)}{R^2 \ln \left(\frac{H}{z} \right)} \right\} \quad (1)$$

式中: η 为热效率,文中取 0.7; H 为热源高度, P 为激光焊接输入功率; R 为热源最大有效半径。

热源示意图如图 2 所示,图中 R_0 为最大的热源半

径, R_e 为底部热源半半径, Q_0 为最大热流密度。

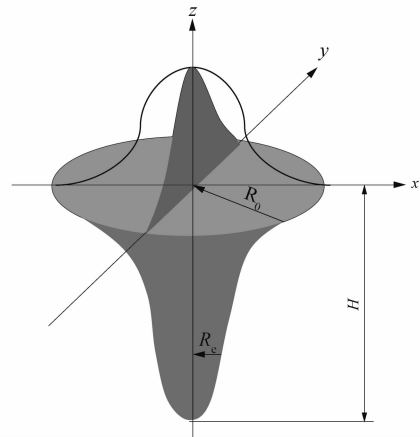


图 2 热源示意图

Figure 2 Schematic diagram of heat source

1.3.2 反冲作用力

激光焊接过程中由于材料蒸发产生的反冲蒸气力而形成小孔。笔者采用 Semak 等^[8]提出的模型来简化小孔受到的蒸气反冲压力。

$$p_r = 0.54AB_0(T)^{-1/2} \text{EXP} \left(\frac{-U}{kT} \right) \quad (2)$$

式中: A, B_0 均为与材料相关的常数; U, T 和 k 分别为原子的蒸发潜热、小孔的壁面温度以及玻尔兹曼常数。

1.3.3 边界的计算条件

焊接过程,基板与焊缝的热量传递主要依靠的是辐射、对流以及热传导进行,因此边界的能量守恒方程可以写为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = Q - h(T - T_\infty) - \varepsilon \sigma (T^4 - T_\infty^4) \quad (3)$$

式中: Q 为输入的热流密度; h 为对流换热系数,取 27 W/m²; ε 为黑体辐射系数,取 0.3; σ 为斯忒潘-兹曼系数, $\sigma = 5.66 \times 10^{-8}$ 。

2 计算参数以及仿真结果验证

2.1 材料热物理性能及计算参数

本研究中计算所采用的基板材料为奥氏体不锈钢,其热物理性能参数如表 1 所示^[9]。

表 1 A304 热物理参数值

Table 1 A304 thermophysical property parameters

线性膨胀系数/ 10 ⁻⁵ /K ⁻¹	表面张力温度系数/ 10 ⁻⁴ /(N·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	熔化潜热/ (kJ·kg ⁻¹)	气化潜热/ (kJ·kg ⁻¹)
1.96	-4.3	247	6 340
沸点/K	密度/(kg·m ⁻³)	固相温度/K	液相温度/K
3 100	7 800	1 670	1 727

焊接参数如表 2 所示,分别计算了表面张力系数在 0.8 和 1.2 N/m 时的流场分布。计算软件为 FLUENT,采用 PISO 算法进行计算,时间步长 $1\text{E}-5$,总计算时间为 1 s。

表 2 焊接参数

Table 2 Welding parameters

焊接功率/W	焊接速度/($\text{m} \cdot \text{min}^{-1}$)	离焦量/mm
3 500	1.2	-3

2.2 仿真结果验证

为了验证熔池仿真模型的准确性,采用如表 2 所示的焊接参数进行了激光焊接试验。

图 3 所示为仿真熔池三维视图以及实际焊缝横截面与仿真结果的对比图,可以看出实际焊缝的熔合线轮廓与仿真得到焊缝截面吻合较好。

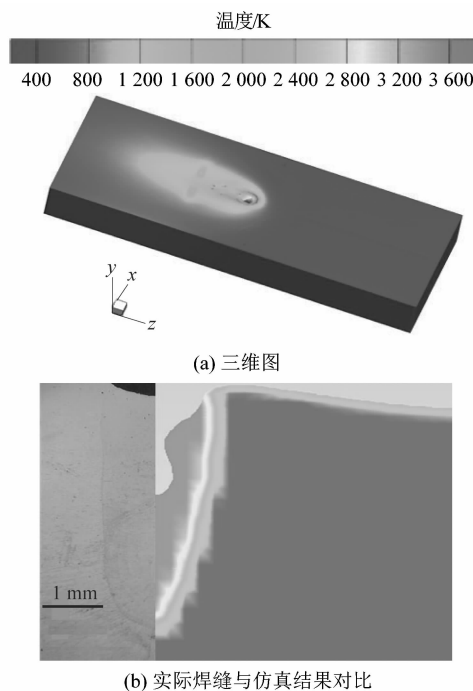


图 3 仿真结果

Figure 3 Example of simulation results

3 仿真结果与分析

3.1 不同表面张力下小孔的行为

图 4 是在不同表面张力系数下,小孔的形成过程。从图 4 可以看出,开始时刻金属液面受到反冲压力的作用,液面下凹,随着时间的推移,焊接热量不断地输入,凹面的向下的程度增加,形成一个盲孔。表面张力系数为 0.8 N/m 时,小孔深度达到 1.48 mm,且在小孔的前壁形成一个凸台。而当表面张力系数为 1.2 N/m 时,形成的小孔的深度为 0.91 mm,同时在小孔的壁面

未形成凸台。这是因为熔池的液态金属在表面张力的作用下不断向熔池边缘流动,表面张力的方向是沿着液面的切线方向;金属液面在反冲力的作用下呈凹面,此时表面张力的方向是沿着小孔壁面向上,与反冲压力的方向相反;当张力系数较大时,会对小孔的底部的金属液体有一个向上的拖拽,从而使得小孔的深度降低。金属液体在流体静水压力的作用下以及反冲压力的作用下,向小孔中心流动,较小的表面张力难以抵消 2 者的作用,在熔池前端壁面各项力平衡后,形成如图 4(c)所示凸台。而表面张力较大时,在静水压以及反冲压力作用下仍能使得金属液体向熔池边缘流动,因此没有形成凸台。

图 5 所示为不同表面张力系数形成稳定小孔时的流场分布。图 5(a)和(b)分别为表面张力系数为 0.8 N/m 时纵截面、顶部流场分布。图 5(c)和(d)分别为表面张力系数为 1.2 N/m 时纵截面、顶部流场分布。

从图 5(a)中可以看出熔池沿小孔壁面向熔池后部与前端流动,形成回流。图 5(b)显示金属液体从小孔中心向熔池边缘流动,同时越是靠近熔池边缘,流动速度越慢。这是因为熔池边缘区域温度比熔池中心温度低,而金属液体的黏度系数随温度降低而增加,降低了溶液的流动性。对比图 5(a)和(c)可以发现表面张力系数为 1.2 N/m 时,流动速度明显加快。同时在小孔前壁未存在凸台,熔池的稳定性因此提高。

3.2 表面张力对小孔震荡的影响

图 6 所示为 2 种不同表面张力系数下,小孔深度随时间变化的曲线。

从图 6 中可以看出,焊接小孔并不是一个稳定存在,而是随着热源的移动而动态变化的。激光深熔焊在焊接过程中小孔的行为可以分为 2 个阶段,即小孔的快速形成与动态平衡^[10]。表面张力系数为 1.2 N/m 时,在 0.00 ~ 0.30 s 内平均小孔深度约为 0.89 mm;而张力系数为 0.8 N/m 时,小孔的平均深度约为 1.28 mm。同时表面张力系数为 1.2 N/m 时,小孔深度变化周期在 6 ~ 15 ms 之间;而张力系数为 0.8 N/m 时,小孔深度变化在 10 ~ 40 ms 之间。相对比之下,表面张力系数小,小孔深度增加,而小孔的稳定性下降。因为较小的表面张力,使得金属流体在流体静水压与反冲压力下将流向熔池底部,但同时又难以维持小孔壁面的稳定,易于在小孔壁面形成凸台,随着热源的移动,凸台接触小孔壁面,使得小孔坍塌。

如图 7 所示,在开始阶段,材料在激光光源的作用下,开始熔化和蒸发,产生等离子体,由此形成的向下

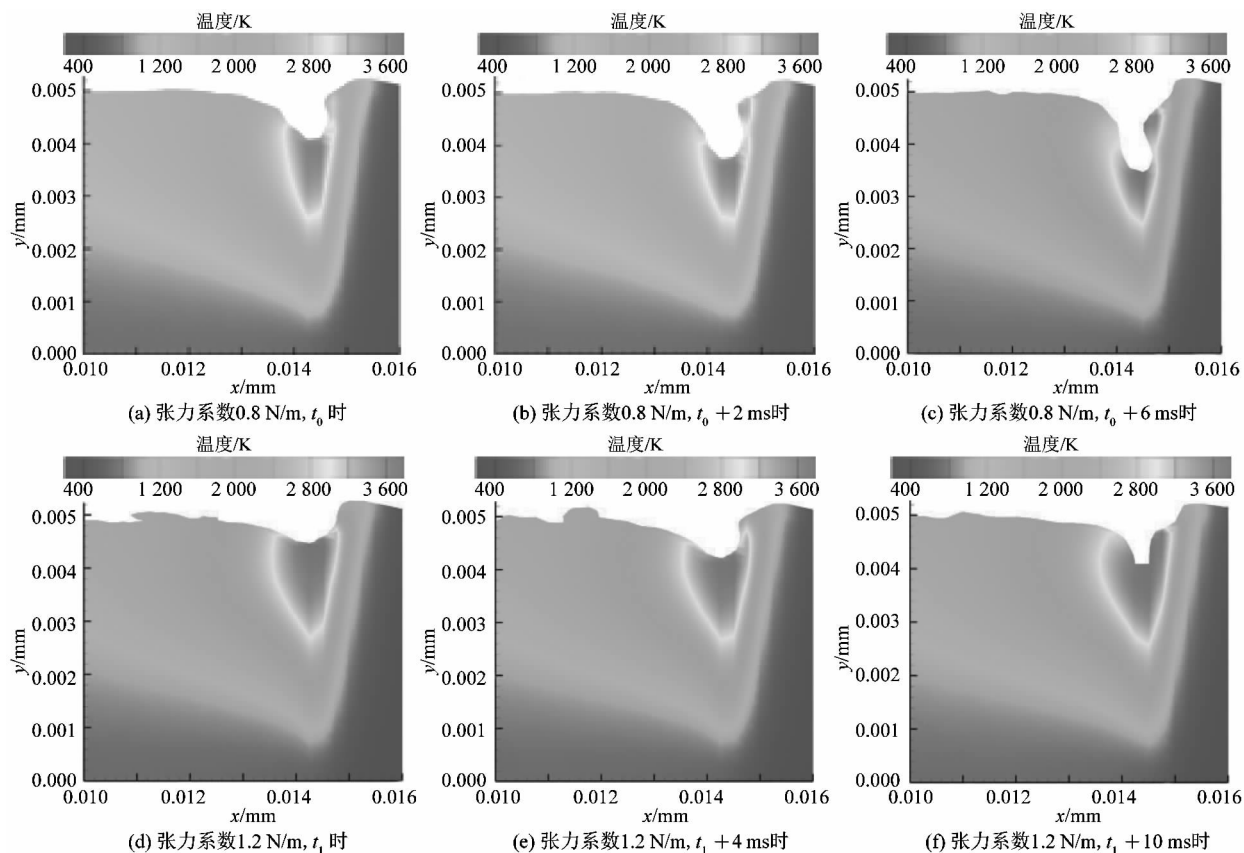


图4 不同表面张力系数下小孔形成过程

Figure 4 Formation process of keyholes under different surface tension coefficients

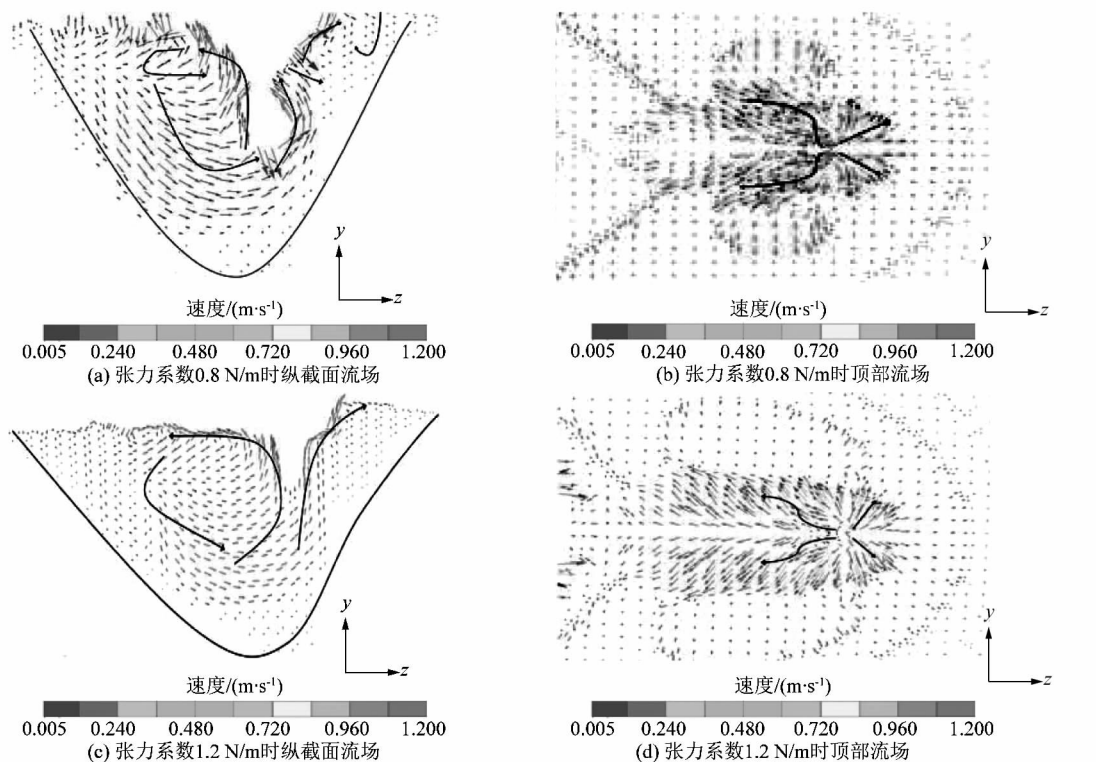


图5 熔池流场分布

Figure 5 Molten pool flow field distribution

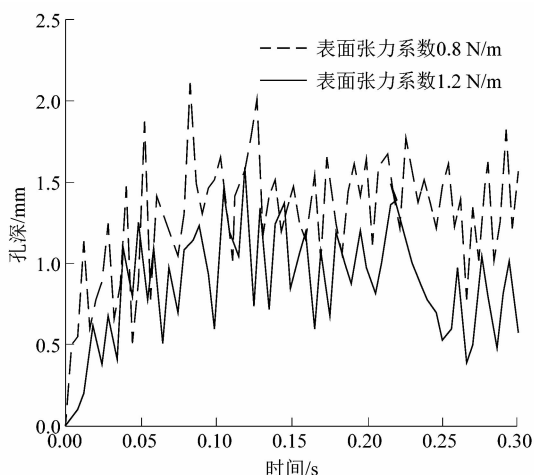


图6 小孔深度随时间变化曲线

Figure 6 Keyhole depth versus time curve

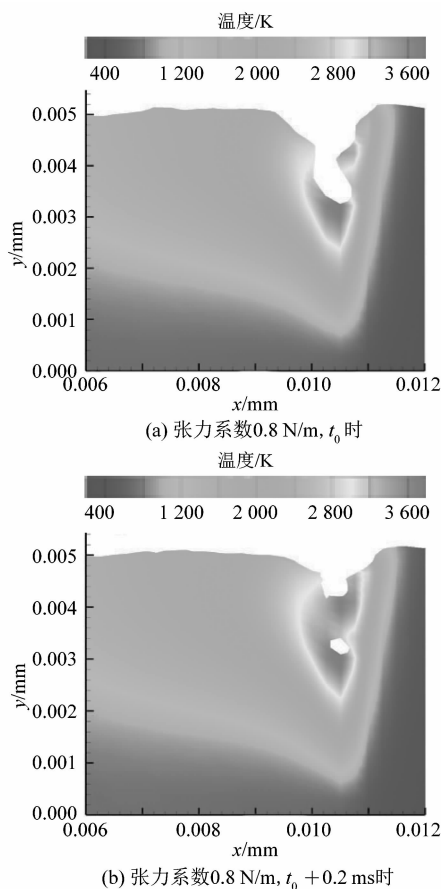


图7 小孔闭合

Figure 7 Keyhole closure

的蒸气反冲力直接作用于熔化的金属上。流动的金属不存在刚度,熔池迅速变形,向下凹陷,形成小孔。同

时流动的金属液体将热能带到了熔池的底部,使得小孔在深度方向进一步拓展。当小孔达到一定深度后,材料的熔化与蒸发消耗了大量的热量,随着激光光源的移动,使得在厚度方向上能量密度下降,反冲作用力也随之降低,同时在表面张力、流体的静水压力的作用下,使得小孔无法维持并闭合。同时在不同的表面张力系数下,小孔的深度有明显的不同。表面张力对熔池的作用明显,激光深熔焊小孔的稳定性主要受表面张力、流体静水压、蒸气反冲力的影响。

4 结语

课题组建立了激光深熔焊的熔池三维仿真模型,并以奥氏体不锈钢为基板进行焊接试验,验证了模型的准确性;研究了在不同表面张力系数下,激光焊接小孔行为的差异。得出以下结论:

1) 激光深熔焊接过程中,表面张力系数较小时,激光焊接小孔较深,有利于热量向下传递,能够获得更大焊缝深度;表面张力系数较大时,焊接小孔的深度有所降低,但熔池与小孔更加稳定。

2) 激光焊接过程中,可以通过改变材料表面张力数值来调整焊接熔池流动行为,提高焊接熔池的稳定性,降低焊接缺陷率,提高焊接接头的质量。

参考文献:

- [1] 曹晨,江洪,叶茂. 全球激光焊接专利技术研究进展[J/OL]. 激光杂志: 1-8 [2020-12-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1085.TN.20200828.1018.008.html>.
- [2] 李苏,张占辉,韩善果,等. 激光技术在材料加工领域的应用与发展[J]. 精密成形工程,2020,12(4):76-85.
- [3] 梁融. 基于热流固耦合的激光焊接数值模拟方法研究[D]. 上海: 上海交通大学,2019:6-17.
- [4] 石珂,郭朝博,许乐生,等. 基于 FLUENT 熔池内部受力的数值分析[J]. 电焊机,2011,41(9):21-24.
- [5] 庞盛永. 激光深熔焊接瞬态小孔和运动熔池行为及相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学,2011:73-75.
- [6] 李俐群,郝雨,彭进. 表面张力对激光深熔焊熔池流动的影响[J]. 焊接学报,2019,40(2):13-19.
- [7] 吴向阳,徐剑侠,高学松,等. 激光-MIG 复合焊接热过程与熔池流场的数值分析[J]. 中国激光,2019,46(9):91-102.
- [8] MATSUNAWA A, SEMAK V. The simulation of front keyhole wall dynamics during Laser welding[J]. Journal of physics D: Applied Physics,1997,30(5):798-809.
- [9] 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]. 南昌: 南昌大学,2019:36-37.
- [10] 夏胜全,何建军,王巍,等. 激光深熔焊熔池三维瞬态行为数值模拟[J]. 中国激光,2016,43(11):94-103.