

## 焊丝熔化填充方式对激光焊接熔池影响的数值模拟

彭进<sup>1,2</sup>, 张文洁<sup>1</sup>, 王星星<sup>1</sup>, 郭国全<sup>1</sup>, 张芙蓉<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学 机械学院, 河南 郑州 450045;  
2. 哈尔滨工业大学 先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001)

**摘要:** 结合激光深熔焊的焊接特性, 建立焊丝熔化后进入熔池过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型。研究了焊丝熔化填充方式对匙孔三维形态、熔池流动行为的影响, 最后分析了焊丝熔化填充对匙孔稳定性的影响机制。计算结果表明, 焊丝熔化以自由过渡的形式落入熔池对匙孔的形态影响较大, 对匙孔前壁的挤压作用非常明显, 造成了匙孔闭合、倒塌的情况; 焊丝熔化沿熔池边缘流入熔池对匙孔的形态影响相对较小, 匙孔下部会出现内凹的现象。焊丝熔化进入熔池之后在匙孔后方的熔池会产生两个顺时针的流动漩涡, 流动漩涡的存在会使熔池内部流动行为更加复杂。

**关键词:** 激光焊接; 焊丝熔化填充; 填充方式; 匙孔与熔池; 数值模拟

**中图分类号:** TG456.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201847.0306005

## Numerical simulation of effect of filler wire melting and filling mode on molten pool in laser welding

Peng Jin<sup>1,2</sup>, Zhang Wenjie<sup>1</sup>, Wang Xingxing<sup>1</sup>, Guo Guoquan<sup>1</sup>, Zhang Furong<sup>2</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China)

**Abstract:** Based on the welding characteristics of laser deep penetration welding, a three-dimensional transient thermal-flow coupling model of laser welding was established in the process when filler was melted into molten pool. The effect of filler metal filling mode on the three-dimensional shape of keyhole and the flow behavior of molten pool was studied. Finally, the influence mechanism of filler metal filling on keyhole stability was analyzed. The results show that filler metal in the form of a free transition into the molten pool had larger impact on the keyhole shape, causing the keyhole to close and collapse. The filler metal in the form of filling along the edge of the molten pool into the molten pool had relatively small impact on the keyhole shape, the keyhole bottom appeared concave phenomenon. After filler metal filled into the molten pool, two clockwise flow vortices were produced behind the keyhole wall, which made the flow behavior of the molten pool more complex.

**Key words:** laser welding; filler wire melting and filling; filling mode; keyhole and molten pool; numerical simulation

收稿日期: 2017-10-05; 修订日期: 2017-11-03

基金项目: 河南省自然科学基金(162300410191); 河南省高等学校重点科研项目(17A430021);

华北水利水电大学博士基金(201705006); 华北水利水电大学大学生创新创业训练计划(2017XB112)

作者简介: 彭进(1984-), 男, 讲师, 博士, 主要从事激光焊接方面的研究。Email: pengjin1985120@163.com

## 0 引言

激光技术是一种先进的材料连接技术<sup>[1-6]</sup>。激光填丝焊对焊丝的方向性要求较为严格,英国曼彻斯特大学 Syed<sup>[7]</sup>等人对比研究了前置送丝和后置送丝工艺,发现激光填丝焊过程中,采用前置送丝时,焊丝能稳定地熔化、填充进入熔池,因而能得到良好的焊缝成形。华中科技大学的余阳春<sup>[8]</sup>研究了激光填丝焊熔丝熔入方式对焊缝成形的影响,发现焊丝熔化填充进入熔池的方式有两种,一种是以滴状的形式落入熔池,另一种是沿熔池边缘流入熔池,而焊丝熔化沿熔池边缘流入熔池可得到良好的焊缝成形,焊接过程比较稳定,但关于焊丝熔入方式对熔池、匙孔内部行为的影响没做进一步研究。熔池、匙孔内部的动态行为对焊缝质量有直接的影响,是产生气孔、飞溅等激光焊接缺陷的本质原因。

目前,国内外学者主要对激光自熔焊匙孔、熔池的动态行为进行相应的数值模拟方面的研究。Geiger 等<sup>[9]</sup>建立了激光深熔焊热源模型,通过研究发现熔池内部匙孔前壁的流动速度最高,而且液态金属沿匙孔前壁向下流动的趋势较明显,这样易造成匙孔形态的波动,降低焊接过程稳定性。国外的学者 Sohail<sup>[10]</sup>等人研究了激光功率对激光焊接熔池的影响,发现增大激光功率会增大熔池的体积,进一步使熔池内部的流动漩涡增强,进而增加了熔池流动行为的复杂性。国内的学者 Zhao<sup>[11]</sup>等人研究了激光焊接过程的匙孔形态的变化情况,发现焊接过程中,匙孔的三维形态会发生变化,而且当匙孔底部倒塌时,会伴随焊接气泡的产生。通过上述文献可知,激光焊接过程的熔池、匙孔行为十分复杂,而焊丝的加入势必会使激光深熔焊过程的熔池、匙孔动态行为更加复杂。

基于以上分析,结合激光深熔焊的焊接特性,建立焊丝熔化填充进入熔池过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型。模型中采用流体体积 (volume of fluid, VOF)方法追踪匙孔的气-液界面。研究了焊丝熔化填充方式对匙孔三维形态、熔池流动行为的影响,以及焊丝熔化填充对匙孔稳定性的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 计算域及基本假设

首先建立了焊丝熔化填充送入过程的计算域,

图1为计算域。计算区域包含两个部分:金属区和气体区,中间的区域为金属区,顶部和底部为空气区。三维笛卡尔坐标位于金属区的表面,激光焊接过程中,其起始位置为三个坐标轴(x轴,y轴,z轴)的交点位置。激光焊接模型计算的工艺条件:激光功率4.5 kW,焊接速度3 m/min,液态熔滴送进速度3 m/min。

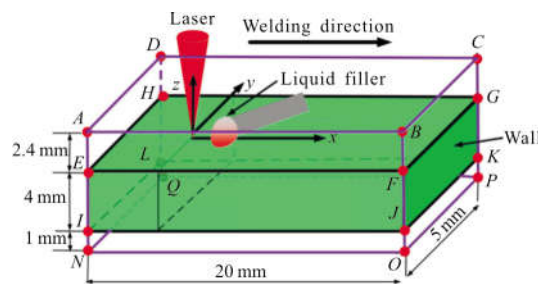


图1 激光焊接过程的计算域示意图

Fig.1 Schematic diagram of computation domain in laser welding process

激光焊接过程中熔化焊丝所需要的能量表达式如下:

$$Q_f = C_m M \Delta T \quad (1)$$

式中: $Q_f$ 为熔化焊丝所需的能量; $C_m$ 为焊丝的比热容; $M$ 为焊丝的质量; $\Delta T$ 为焊丝熔点温度与常温的差值。其中焊丝熔化质量的表达式如下:

$$M = \rho S V dt \quad (2)$$

式中: $\rho$ 为焊丝的密度; $S$ 为焊丝的横截面面积; $V$ 为送丝速度。

液态熔滴的热量计算公式为:

$$Q_a = \rho_L \pi r_w^2 w_f H_d \quad (3)$$

式中: $w_f$ 为液态熔滴的送进速度; $\rho_L$ 为液态熔滴的密度; $r_w$ 为液态熔滴的半径; $H_d$ 为液态熔滴的总焓。在实际的焊接过程中为了保持熔滴处于液态,则熔滴进入熔池的实际有效热量的计算公式为:

$$Q_a = \rho_L \pi r_w^2 w_f C_{pl} (T_a - T_l) \quad (4)$$

式中: $T_a$ 为液态熔滴的温度; $C_{pl}$ 为液态熔滴的比热容; $T_l$ 为液态熔滴液相线的温度。熔滴中净溶质质量 $Q_i$ 的计算公式为:

$$Q_i = \rho_L \pi r_w^2 w_f (C_f - C) \quad (5)$$

式中: $C$ 为焊接母材的溶质浓度; $C_f$ 为熔滴的溶质浓度。质量源区域内网格点上所含有平均时间体积质

量源  $S_m$  的数学表达式为:

$$S_m = \frac{Q_t}{\pi D_d^2 d} \quad (6)$$

文中的模型采用多相流 VOF 方法对匙孔边界的气-液界面进行实时追踪。多相流模型中 VOF 控制方程的表达式为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + (V \cdot \nabla) F = 0 \quad (7)$$

$$\sum_{i=1}^n F = 1 \quad (8)$$

### 1.2 边界条件及熔池流动驱动力

初始条件:

$$T(x, y, z, t) = T_{ref} \quad (9)$$

$$u = v = w = 0 \quad (10)$$

工件上表面对流热损失的数学表示如下:

$$q_c = h_c(T - T_0) \quad (11)$$

式中:  $q_c$  为数学模型中的对流热流量;  $h_c$  为数学模型中对流换热系数。

激光焊接过程中, 通过热辐射导致的单位面积热损失流量  $q_r$  的数学表达式如下:

$$q_r = \varepsilon \delta_a (T^4 - T_0^4) \quad (12)$$

式中:  $\varepsilon$  为数学模型中工件表面发射率,  $\delta_a = 5.6697 \times 10^{-8}$ 。

自由表面的能量条件的公式为:

$$k \frac{\partial T}{\partial n} = q_{eng} - q_{conv} - q_{radi} - q_{evap} \quad (13)$$

式中:  $q_{eng}$ 、 $q_{conv}$ 、 $q_{radi}$ 、 $q_{evap}$  分别为入射激光能量、对流热损失、辐射热损失、蒸发热损失。

固体区的数学表达式如下:

$$u = u_0, v = 0, w = 0 \quad (14)$$

对称面的数学表达式如下:

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0 \quad (15)$$

自由表面法向压力的数学表达式如下:

$$p = p_\sigma + p_r \quad (16)$$

式中:  $p_\sigma$  为表面张力;  $p$  为作用于自由表面法线方向的压力;  $p_r$  为反冲压力。

反冲压力  $p_r$  的数学表达式如下:

$$p_r = AB_0 T_s^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right) \quad (17)$$

式中:  $A$  为与周围压力有关的系数;  $B_0$  为蒸发常数;  $T_s$  为工件表面的局部温度;  $U$  为工件单位质量的能量。

表面张力  $p_\sigma$  的数学表达式如下:

$$p_\sigma = k\sigma \quad (18)$$

$k$  为自由表面曲率, 其表达式如下:

$$k = -\left[ \nabla \cdot \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \right) \right] = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[ \left( \frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot \nabla \right) |\vec{n}| - (\nabla \cdot \vec{n}) \right] \quad (19)$$

$\delta$  是表面张力系数, 其数学表达式为:

$$\delta = \delta_0 + A_\delta(T - T_m) \quad (20)$$

式中:  $\delta_0$  为纯金属处于熔点温度时的表面张力系数;  $T_m$  为待焊工件的熔点。

激光焊接过程中, 熔池内部热浮力的数学表达式如下:

$$F_b = \rho_l g \beta (T - T_m) \quad (21)$$

式中:  $g$  为重力加速度;  $\beta$  为材料的热膨胀系数。

### 1.3 热源模型及热物性参数

激光焊接过程中, 工件表面上方的等离子体云温度很高(20 000 K 左右), 因此采用面热源来模拟等离子体云对熔池的加热效应; 用体热源来模拟激光热源作用于匙孔内部的热效应。

焊接熔池表面的各坐标点的高斯分布的面热源热流密度的计算公式如下:

$$q_s(x, y) = q_s(0, 0) \exp[-C_s(x^2 + y^2)/r_s^2] \quad (22)$$

式中:  $r_s$  为面热源半径;  $C_s$  为热流集中系数;  $q_s(0, 0)$  为作用于面热源中心位置的热流密度的最高值,  $q_s(0, 0)$  的计算公式为:

$$q_s(0, 0) = \frac{C_s \chi \eta_b \phi P}{\pi r_s^2} \quad (23)$$

式中:  $P$  为激光功率;  $\eta_b$  为热源系数;  $\phi$  为焊接母材对激光能量的吸收吸收;  $\chi$  为面热源能量的分配系数。

激光发射出的能量作用于匙孔后, 匙孔内部的等离子体会消耗一部分激光能量, 因此实际作用于匙孔壁面的激光功率  $P_0$  的计算公式为:

$$P_0 = (1 - \chi) \eta_b \phi P \quad (24)$$

式中:  $\eta_b$  为有限深度体热源的热源系数。

6056 铝合金的热物理性质参数。比热容、热导率、动力粘度的表达式见参考文献[12]。

## 2 计算结果与分析

### 2.1 对匙孔三维形态的影响

图 2 和图 3 分别为填充金属落入熔池(自由过渡)和沿熔池边缘流入熔池(接触过渡)过程的不同焊接时刻的匙孔形态变化图像。由图 2 可知, 当填充金属

落入熔池时会对匙孔造成一定的冲击,匙孔的形态会发生一定程度的波动,焊接时刻  $t=300\text{ ms}$  时匙孔的深度为  $1.8\text{ mm}$ ,当焊接时间为  $t+5\text{ ms}$  时,在填充金属的冲击作用下匙孔的深度有所增加(匙孔深度为  $2.2\text{ mm}$ ),而匙孔的深度突然增大后,很容易使作用于匙孔壁面的作用力发生变化,进一步导致匙孔稳定性下降,可以看到,当焊接时刻进行到  $t+6\text{ ms}$  时出

现了匙孔底部闭合、倒塌的情况,而这种情况极易导致焊接气泡的产生;由图 3 可知,当填充金属沿熔池边缘流入熔池的过程中匙孔的波动程度相对较小,匙孔下部会发生一定程度的形状变化,焊接时刻  $t=300\text{ ms}$  时匙孔的深度为  $1.8\text{ mm}$ ,当焊接时间为  $t+2\text{ ms}$  时,在熔滴的冲击作用下匙孔的深度变为  $2.1\text{ mm}$ ,匙孔下部出现内凹的现象。

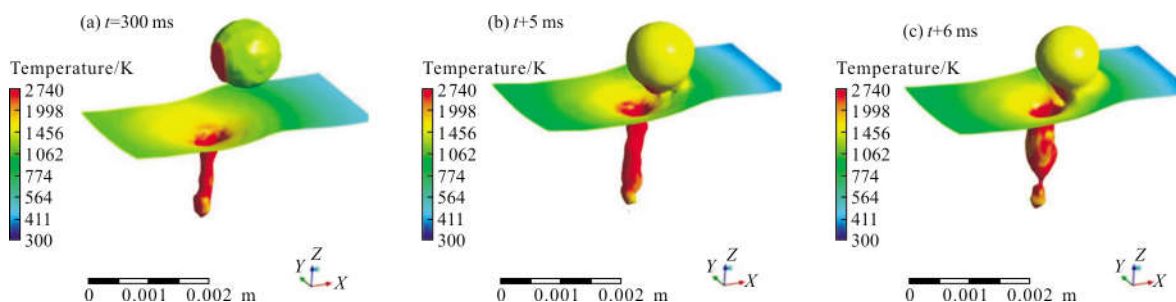


图 2 填充金属落入熔池的匙孔形态变化

Fig.2 Keyhole morphology changes during filler metal falling into the molten pool

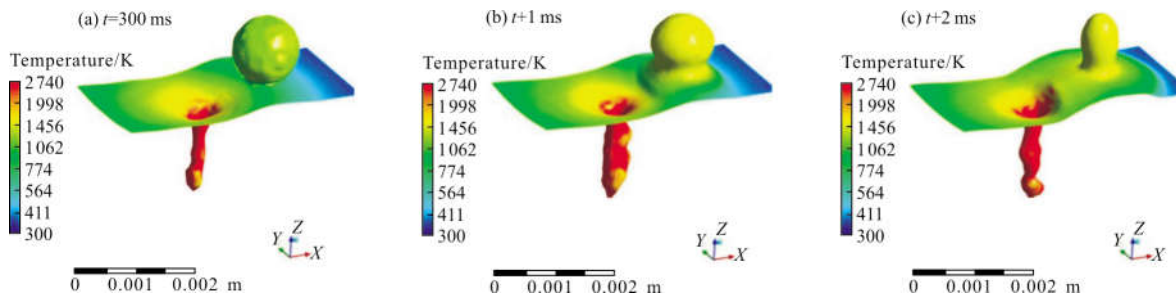


图 3 填充金属沿熔池边缘流入熔池的匙孔形态变化

Fig.3 Keyhole morphology changes during filler metal flowing into the molten pool along the edge of molten pool

### 2.2 对熔池流动行为的影响

文中进一步对熔池内部的流动行为做相关研究。图 4 和图 5 为分别为填充金属落入熔池和沿熔池边缘流入熔池过程的熔池纵截面流场。由图 4 可知,当  $t=300\text{ ms}$  时(图 4(a)),熔池内部会出现挤压匙孔前壁的流动趋势(图 4(a)中粗黑箭头所示),当  $t+5\text{ ms}$  时(图 4(b)),随着填充金属落入熔池,会造成匙孔壁面的变形,在匙孔前壁的下部产生一个凸起,而且从熔池流体的流动趋势可以看出,熔池流体会对匙孔前壁的下部产生一个挤压的作用,随着焊接时刻进行到  $t+6\text{ ms}$  时(图 4(c)),在匙孔底部挤压匙孔前壁的流动趋势更加强烈,而且造成了匙孔闭合、倒

塌的情况;由图 5 可知,当  $t=300\text{ ms}$  时(图 5(a)),熔池内部会出现挤压匙孔前壁的流动趋势,当  $t+1\text{ ms}$  时(图 5(b)),匙孔前壁的流体挤压作用消失,产生由匙孔壁向外的维持匙孔张开的流动趋势,当  $t+2\text{ ms}$  时(图 5(c)),匙孔前壁也会出现内凹的情况,进而在匙孔前壁产生凸起。图 4 和图 5 可知,在匙孔后方的熔池上部都会出现一个逆时针的流动趋势,这主要是由于 Marangoni 流力作用所引起的。由图 4 可知,当填充金属未落入熔池之前,匙孔后方的熔池有一个流动漩涡;而填充金属落入熔池之后在匙孔后方的熔池会产生两个顺时针的流动漩涡,流动漩涡的存在会使熔池内部流动行为为更加复杂,而且不利于

焊接气泡逸出熔池。

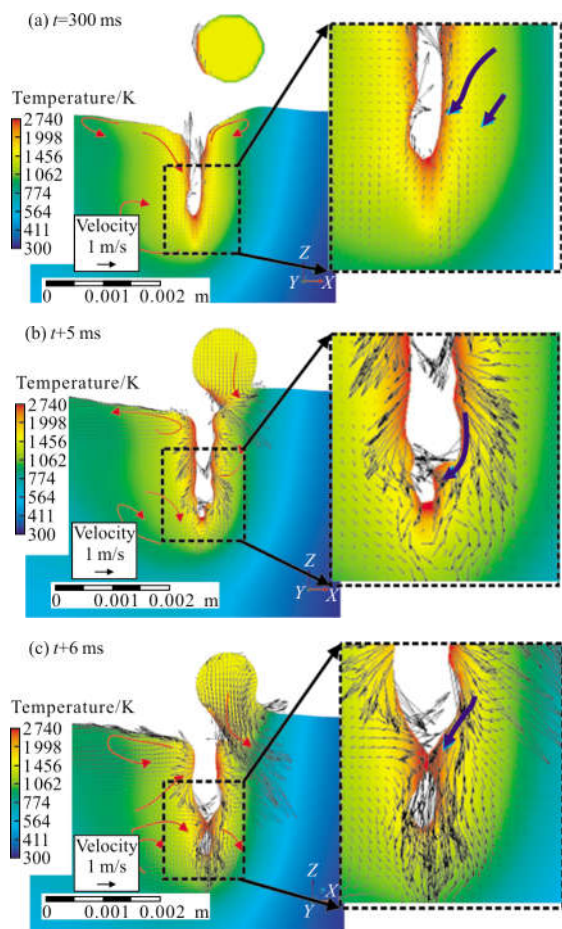


图 4 填充金属落入熔池的熔池流场

Fig.4 Flow field of molten pool during filler metal falling into the molten pool

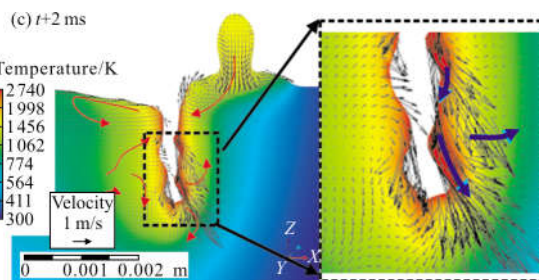
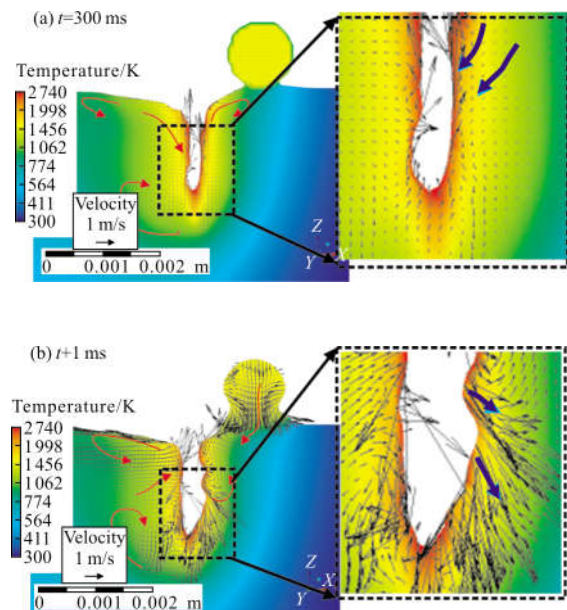


图 5 填充金属沿熔池边缘流入熔池的熔池流场

Fig.5 Flow field of molten pool during filler metal flowing into the molten pool along the edge of molten pool

图 6 为不同时刻 ( $t+0, \dots, t+7, t=300 \text{ ms}$ ) 填充金属落入熔池和沿熔池边缘流入熔池过程的匙孔壁前方熔池 A 点流速随焊接过程进行的变化规律。可以发现,填充金属落入熔池作用下的熔池流体流动速度波动幅度较大,流动速度的最大值为  $1558 \text{ mm/s}$ ; 而填充金属沿熔池边缘流入熔池作用下的流体流动速度也会发生波动,但波动幅度相对较小,流动速度的最大值为  $1237 \text{ mm/s}$ 。

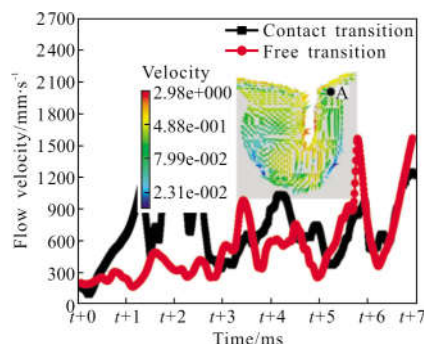


图 6 熔池流体流动速度随焊接时间的变化

Fig.6 Flow velocity of molten pool varies with welding time

### 2.3 对匙孔稳定性的影响机制

在匙孔型的激光熔池中,匙孔壁面处于动态波动状态,而作用于匙孔壁面的力包括:驱使匙孔张开的反冲压力  $P_r$  和蒸汽压力  $\sigma P_g$ ,驱使匙孔闭合的表面张力  $P_\sigma$  和流体静压力  $P_h$ ,匙孔壁面的作用力如图 7 所示。匙孔稳定时,作用于匙孔壁的作用力的公式为:

$$P_r + \delta P_g = P_\sigma + P_h \quad (25)$$

在激光焊接过程中,液态熔滴进入熔池易造成对匙孔的冲击作用,对匙孔前壁造成挤压变形的影响。从而引起作用于匙孔内部的激光能量密度分布及匙孔前壁金属蒸发量的变化,以及作用于匙孔壁

不同部位的蒸汽反冲压力的剧烈波动,因此匙孔的稳定性下降,易出现匙孔倒塌、闭合的情况。

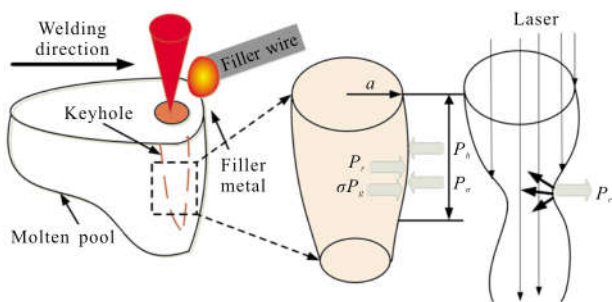


图7 匙孔壁面的作用力

Fig.7 Acting force of keyhole wall

### 2.4 模型的验证

焊缝横截面的数值模拟结果与实验结果的对比图像如图8所示。从图中可以看出数值模拟得到的熔化区形貌与实验结果的形貌较为吻合。这也说明了文中所建立的激光焊接热-流耦合模型的合理性。

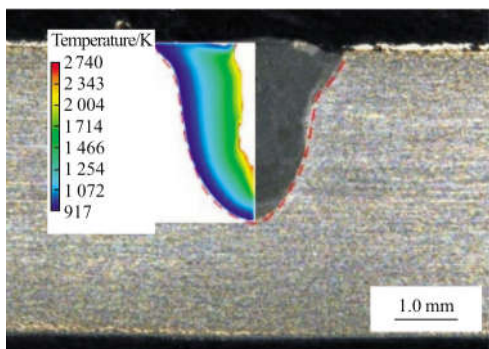


图8 焊缝横截面数值模拟结果与实验结果

Fig.8 Comparison of weld cross section calculation results with the experimental results

### 3 结论

(1) 建立了焊丝熔化填充进入熔池过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型。焊丝熔化后以自由过渡的形式落入熔池对匙孔的形态影响较大,在匙孔前壁的下部产生一个凸起,进而产生匙孔闭合、倒塌的情况;填充金属沿熔池边缘流入熔池对匙孔的形态影响相对较小,但匙孔下部会出现内凹的现象。

(2) 熔滴落入熔池后,匙孔后方的熔池会产生两个顺时针的流动漩涡,流动漩涡的存在会使熔池内部流动行为更加复杂。

(3) 熔滴以自由过渡的形式落入熔池,熔池流体流动速度波动幅度较大,匙孔壁前方流体流动速度最大值为1558 mm/s;而熔滴沿熔池边缘流入熔池,流体流动速度波动幅度相对较小,流体流动速度的最大值为1237 mm/s。

### 参考文献:

[1] Liu Yuliang, Liang Wangguo, Zhou Huang, et al. Compact 532 nm microchip laser array utilizing optical contact Nd: YVO<sub>4</sub>/PPMgOLN[J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2017, 46(6): 0605003.

[2] Sekou Singare, Chen Shenggui, Zhong Huanhuan. Finite element analysis of laser transmission welding of polycarbonate [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(2): 0206005. (in Chinese)

Sekou Singare, 陈盛贵, 钟欢欢. 激光透射焊接聚碳酸酯的有限元分析[J]. *红外与激光工程*, 2016, 45(2): 0206005.

[3] Chen Ziqin, Gao Xiangdong, Wang Lin. Weld width prediction of weldment bottom surface in high-power disk laser welding [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2017, 25(9): 2524-2531. (in Chinese)

陈子琴, 高向东, 王琳. 大功率盘形激光焊焊缝背面宽度预测[J]. *光学精密工程*, 2017, 25(9): 2524-2531.

[4] Gao Xiangdong, Li Zhuman, You Deyong, et al. Analysis of laser welding keyhole characteristics based on near-infrared high speed camera and X-ray sensing [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(10): 2400-2407. (in Chinese)

高向东, 李竹曼, 游德勇, 等. 激光焊匙孔特征的近红外与X射线传感分析[J]. *光学精密工程*, 2016, 24(10): 2400-2407.

[5] An Haixia, Deng Kun, Bi Zhiyue. Miniaturization and lightweight technology of high-power laser equipment [J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 321-330. (in Chinese)

安海霞, 邓坤, 闭治跃. 高功率激光设备小型化轻量化技术[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 321-330.

[6] Zhang Min, Liu Chang, Ren Bo, et al. Microstructure and mechanical properties of porous Ni alloy fabricated by laser 3D printing[J]. *Chinese Optics*, 2016, 9(3): 335-341. (in Chinese)

张敏, 刘畅, 任博, 等. 3D打印激光制备多孔镍合金组织和力学性能研究[J]. *中国光学*, 2016, 9(3): 335-341.

[7] Syed W U H, Li L. Effects of wire feeding direction and location in multiple layer diode laser direct metal deposition [J]. *Applied Surface Science*, 2005, 248(1): 518-524.

- [8] Yu Y C, Huang W, Wang G Z, et al. Investigation of melting dynamics of filler wire during wire feed laser welding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27(4): 1097–1108.
- [9] Geiger M, Leitz K H, Koch H, et al. A 3D transient model of keyhole and melt pool dynamics in laser beam welding applied to the joining of zinc coated sheets [J]. *Production Engineering*, 2009, 3(2): 127–136.
- [10] Sohail M, Han S W, Na S J, et al. Characteristics of weld pool behavior in laser welding with various power inputs[J]. *Welding in the World*, 2014, 58(3): 269–277.
- [11] Zhao H Y, Niu W C, Zhang B, et al. Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2011, 44(48): 485302.
- [12] Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, et al. High-speed X-ray transmission and numerical study of melt flows inside the molten pool during laser welding of aluminum alloy [J]. *Mathematical Problems in Engineering*, 2016, 2016: 1409872.