

## 熔滴填充位置对激光焊接熔池动态行为的影响

彭 进<sup>1</sup>, 王星星<sup>1</sup>, 许红巧<sup>1</sup>, 杨嘉佳<sup>1</sup>, 张芙蓉<sup>2</sup>

(1. 华北水利水电大学, 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:** 借助熔滴作用下的三维瞬态激光焊接热-流耦合有限元模型, 对不同的熔滴填充位置下熔滴进入熔池过程的匙孔三维形貌、熔池金属流动特性进行研究。数值模拟计算结果表明, 熔滴填充位置对激光焊接过程中匙孔三维形貌及熔池液态金属的流动行为的影响较大。当熔滴填充位置由 0.5 mm 增大到 1.8 mm 时, 对匙孔三维形貌变化的影响减弱, 熔池内部挤压匙孔前壁和后壁驱使匙孔闭合的流动趋势减弱而维持匙孔壁张开的流动趋势增强, 匙孔底部液态金属流动速度的波动幅度减弱。

**关键词:** 熔滴; 激光焊接; 填充位置; 匙孔; 熔池动态行为

中图分类号: TG456.7 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA20200025

## Effect of droplet filling position on dynamic behavior of molten pool in laser welding

Peng Jin<sup>1</sup>, Wang Xingxing<sup>1</sup>, Xu Hongqiao<sup>1</sup>, Yang Jiajia<sup>1</sup>, Zhang Furong<sup>2</sup>

(1. 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:** With the three-dimensional transient thermal flow coupled finite element model of laser welding, the three-dimensional keyhole morphology and metal flow characteristics of the molten pool during the process of the droplet entering the molten pool at different droplet filling positions were studied. Numerical simulation results show that the droplet filling position had a significant effect on the three-dimensional morphology of keyhole and the flow behavior of molten pool during laser welding. When the droplet filling position was increased from 0.5 mm to 1.8 mm, the influence on the three-dimensional shape change of keyhole was weakened. The flow trend that the front and rear walls of the keyhole was squeezed inside the molten pool to drive the keyhole to close was weakened, while the flow tendency of maintaining the keyhole wall opening was enhanced, and the fluctuation amplitude of liquid metal flow velocity at the bottom of keyhole was weakened.

**Key words:** droplet; laser welding; filling position; keyhole; dynamic behavior of molten pool

收稿日期:2020-02-06; 修订日期:2020-03-31

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);华北水利水电大学高层次人才科研启动基金(201705006);华北水利水电大学大学生创新创业训练计划(2019XB005)

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

与传统的熔焊方法相比,激光焊接具有很高的能量密度<sup>[1-4]</sup>。而且激光焊接具有焊接效率高,热输入量小等优点<sup>[5-6]</sup>。由于焊丝的加入可以降低激光焊接对接板对接间隙的苛刻要求。通过选用合适的焊丝可以改善焊缝组织,进而提高焊缝的力学性能。

然而激光填丝焊由于需要依靠激光的能量熔化焊丝,焊丝通常距离匙孔的距离很近,容易影响匙孔的稳定性。为了提高激光填丝焊的稳定性,国内的学者 Yu<sup>[7]</sup>研究了焊接工艺参数对焊缝形貌的影响,研究发现焊接过程中熔池、匙孔的稳定性对焊缝成形有直接的影响。哈尔滨工业大学的彭进等<sup>[8]</sup>提出了激光液态填充焊新方法。通过研究发现激光液态填充焊焊丝前端的熔化金属(熔滴)与匙孔边缘的距离大于激光填丝焊焊丝前端的熔化金属(熔滴)与匙孔边缘的距离,熔化后可以沿熔池边缘流入,进而避免了焊丝对匙孔的直接冲击,匙孔未出现闭合的情况。

为获得激光焊接过程的熔池流动及匙孔形态,很多学者采用数值模拟的方法对激光自熔焊过程进行相应的研究。国外的学者 Sohail<sup>[9]</sup>等人采用数值模拟的方法研究了激光自熔焊熔池动态行为,研究发现提高焊接速度后熔池的尺寸减小,匙孔闭合的趋势减弱。国内的学者 Wang<sup>[10]</sup>等采用数值模拟的方法研究了激光深熔焊过程的熔池行为,当激光的能量使焊接工件实现单面焊双面成形时熔池的上方和下方都会产生液态金属的流动旋涡。

熔滴的加入会使激光深熔焊过程的熔池、匙孔动态行为更加复杂,然而国内外关于填充金属对熔池动态行为影响的研究相对较少。

基于以上分析,结合作者前期建立的熔滴送入过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型,研究了熔滴不同送进位置下液态金属进入熔池对匙孔形貌、熔池流场的影响。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程组

激光焊接过程的物理量要满足以下三大控制方程组。

连续性控制方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho v)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho w)}{\partial z} = 0 \quad (1)$$

Navier-Stokes 控制方程

*x* 方向:

$$\frac{\partial(\rho u)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uu)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho uu_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho uv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho uw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial u}{\partial z} \right) + S_u \quad (2)$$

*y* 方向:

$$\frac{\partial(\rho v)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vu)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho vu_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho vw)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial y} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial v}{\partial z} \right) + S_v \quad (3)$$

*z* 方向:

$$\frac{\partial(\rho w)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wu)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho wu_0)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho wv)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho ww)}{\partial z} = -\frac{\partial P}{\partial z} + \frac{\partial}{\partial x} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( \mu \frac{\partial w}{\partial z} \right) + S_w \quad (4)$$

能量守恒控制方程

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} + \frac{\partial(\rho uH)}{\partial x} - \frac{\partial(\rho u_0H)}{\partial x} + \frac{\partial(\rho vH)}{\partial y} + \frac{\partial(\rho wH)}{\partial z} = \frac{\partial}{\partial x} \left( k \frac{\partial T}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( k \frac{\partial T}{\partial y} \right) + \frac{\partial}{\partial z} \left( k \frac{\partial T}{\partial z} \right) + S_E \quad (5)$$

式中:  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  分别为动量方程沿 *x*、*y*、*z* 方向的源项;  $S_E$  是能量源项; 字母 *u*、*v*、*w* 分别为文中所建立的数学模型的 *x*、*y*、*z* 方向的速度矢量;  $\rho$  是焊接工件的密度(文中所用材质为铝合金);  $P$  为压力;  $\mu$  为焊接材质熔化为液态后的动力粘度;  $H$  是混合焓。

### 1.2 匙孔动力学

在焊接初始阶段,焊接工件在激光热源的作用下不断熔化,当激光功率密度达到一定值时,焊接匙孔形成,由于匙孔壁面为气-液界面,也就是说在匙孔边界存在液相和气相的不断动态变化(即能量的不断变化),文中采用 VOF 方法 (Volume of Fluid) 来处理匙孔壁面的气-液转化问题。

VOF 控制方程为:

$$\frac{\partial F}{\partial t} + u \frac{\partial F}{\partial x} + v \frac{\partial F}{\partial y} + w \frac{\partial F}{\partial z} = 0 \quad (6)$$

式中: *u*、*v*、*w* 分别是液态金属沿 *x*、*y*、*z* 方向的流动速度。

激光焊接过程中,匙孔壁面的焊接驱动力对匙孔稳定性起至关重要的作用。

匙孔表面受液态金属蒸发的反冲压力  $P_r$  的作用,对于所建的模型可以将反冲压力以源项的方式引入到 Navier-Stokes 方程,反冲压力的方程如公式 (7) 所示:

$$P_r = AB_0 T_s^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right) \quad (7)$$

式中:符号  $B_0$  为焊接工件的蒸发常数; $U$  为焊接工件单位质量的能量; $T_s$  为焊接工件的局部温度; $A$  为常数。

表面张力  $p_\sigma$  的数学表达式如下:

$$p_\sigma = k\sigma \quad (8)$$

式中: $\sigma$  为表面张力系数; $k$  是自由表面曲率,其数学表达式为:

$$k = -\left[\nabla \cdot \left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|}\right)\right] = \frac{1}{|\vec{n}|} \left[ \left(\frac{\vec{n}}{|\vec{n}|} \cdot \nabla\right) |\vec{n}| - (\nabla \cdot \vec{n}) \right] \quad (9)$$

液态熔池的热浮力为:

$$\delta(T) = \delta_0 + A_\delta(T - T_m) \quad (10)$$

式中: $\delta_0$  的物理含义为纯金属熔点的表面张力系数; $T_m$  的物理含义为模型中焊接母材的熔点。

模型中熔滴模型的表达式以及热源模型、边界条件见作者发表的参考文献 [11]。

### 1.3 数值计算方法

采用流体动力学软件 FLUENT15.0 对模型进行数值模拟计算。模型采用 C/C++ 计算机语言对模型软件进行二次开发,将热源模型、焊接驱动力等引入计算模型中。由于文中主要分析焊丝端部熔化成熔滴后,熔滴在匙孔前壁不同位置填充对匙孔及熔池的影响,为了减少计算机计算过程的工作负担,不考虑焊丝端部由固态熔化成液态的过程,假设焊丝端部已经熔化并且以熔滴的形式流入熔池,因此通过采用 FLUENT 软件在建立的模型采用功能键“patch”熔滴。

文中进行模拟采用的实际激光类型为光纤激光器。

计算机计算过程中不断进行迭代求解,最终判定计算收敛并终止迭代的判断依据为:

$$\frac{\max(|\phi_i^{n+1} - \phi_i^n|)}{\phi_i^{n+1}} \leq R_\phi \quad (11)$$

式中: $\phi_i^{n+1}$  为模型计算迭代的实时迭代值; $\phi_i^n$  为  $n+1$  迭代步的上一步迭代值。

所建立的模型中考虑了温度对材料热物性参数

的影响。焊接母材采用的是 6056 铝合金,其比热容、热导率以及动力粘度参数随温度变化的数学表达式如下<sup>[12]</sup>。

当  $T \geq 573 \text{ K}$  时,比热容的数学表达式为:

$$C_p(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) = -0.001 \times T^2 + 1.1609 \times T + 267.71 \quad (12)$$

当  $573 \text{ K} \leq T \leq 913 \text{ K}$  时,比热容的数学表达式为:

$$C_p(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) = 0.0009 \times T^2 - 0.3901 \times T + 514.45 \quad (13)$$

当  $T > 913 \text{ K}$  时,比热容的数学表达式为:

$$C_p(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1}) = -0.0001 \times T^2 + 0.5832 \times T + 435.14 \quad (14)$$

当  $T > 860 \text{ K}$  时,热导率的数学表达式为:

$$k(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = 0.0001 \times T^2 - 0.0697 \times T + 95.334 \quad (15)$$

当  $860 \text{ K} < T \leq 917 \text{ K}$  时,热导率的数学表达式为:

$$k(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = -0.0048 \times T^2 + 9.2812 \times T - 4275.6 \quad (16)$$

当  $917 \text{ K} < T \leq 2740 \text{ K}$  时,热导率的数学表达式为:

$$k(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = -0.00001 \times T^2 + 0.0582 \times T + 148.74 \quad (17)$$

当  $T > 2740 \text{ K}$  时,热导率的数学表达式为:

$$k(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}) = -0.00001 \times T^2 + 0.085 \times T + 71.111 \quad (18)$$

当  $897 \text{ K} \leq T \leq 937 \text{ K}$  时,动力粘度的数学表达式为:

$$\mu(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = 1 \times 10^{-7} \times T^2 - 0.0002 \times T + 0.1202 \quad (19)$$

当  $937 \text{ K} < T \leq 2650 \text{ K}$  时,动力粘度的数学表达式为:

$$\mu(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = 2 \times 10^{-11} \times T^2 - 5 \times 10^{-7} \times T + 0.0038 \quad (20)$$

当  $2650 \text{ K} < T \leq 2720 \text{ K}$  时,动力粘度的数学表达式为:

$$\mu(\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}) = -6 \times 10^{-8} \times T^2 + 0.0003 \times T - 0.4151 \quad (21)$$

模型计算的流程图如图 1 所示。

模型计算的工艺参数:激光功率 4500 W,熔滴流入熔池的初始速度为 3 m/min,焊接速度为 3.0 m/min,熔滴送进位置距离匙孔前壁  $L$  分别为 0.5 mm 和 1.8 mm。焊丝材料为 6056 铝合金,焊丝直径为 1.2 mm。熔滴填充位置图如图 2 所示。

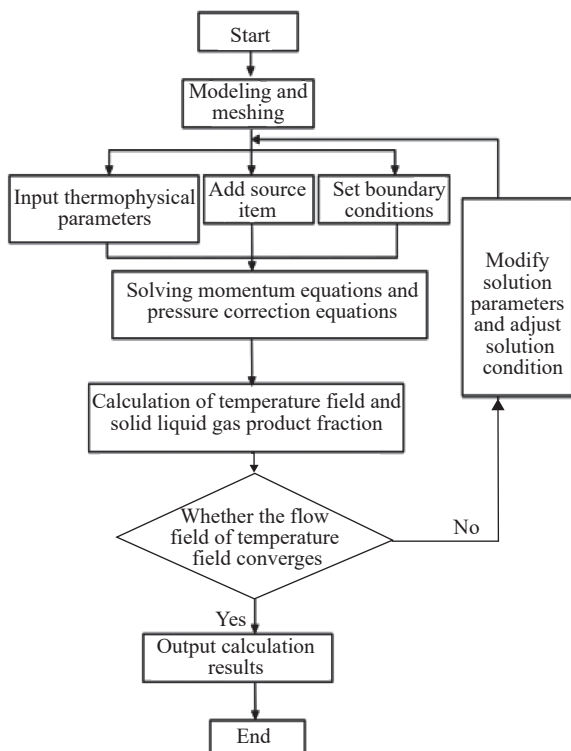


图 1 模型计算流程图

Fig.1 Flow chart of model calculation

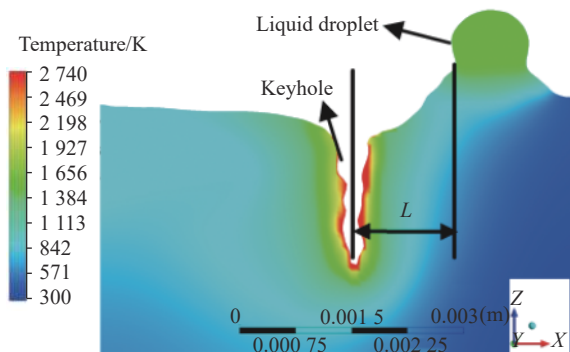


图 2 熔滴填充位置图

Fig.2 Location of liquid droplet filling

## 2 计算结果与分析

### 2.1 熔滴填充位置对匙孔形貌的影响

文中首先研究了熔滴填充位置分别为 0.5 mm 和 1.8 mm 的匙孔三维形貌波动特性, 分别如图 3 和图 4 所示。由图 3 可知, 熔滴填充位置为 0.5 mm 时, 由于液态金属距离匙孔很近, 当熔滴不断填送进熔池时, 匙孔三维形貌变化较大, 而且容易出现匙孔底部闭合的现象; 而熔滴填充位置为 1.8 mm 时, 由于熔滴与匙孔的距离较远, 当熔滴流入熔池时, 对匙孔的冲击较

小, 匙孔的三维形貌也会出现一定程度的波动, 但未出现匙孔闭合的现象。

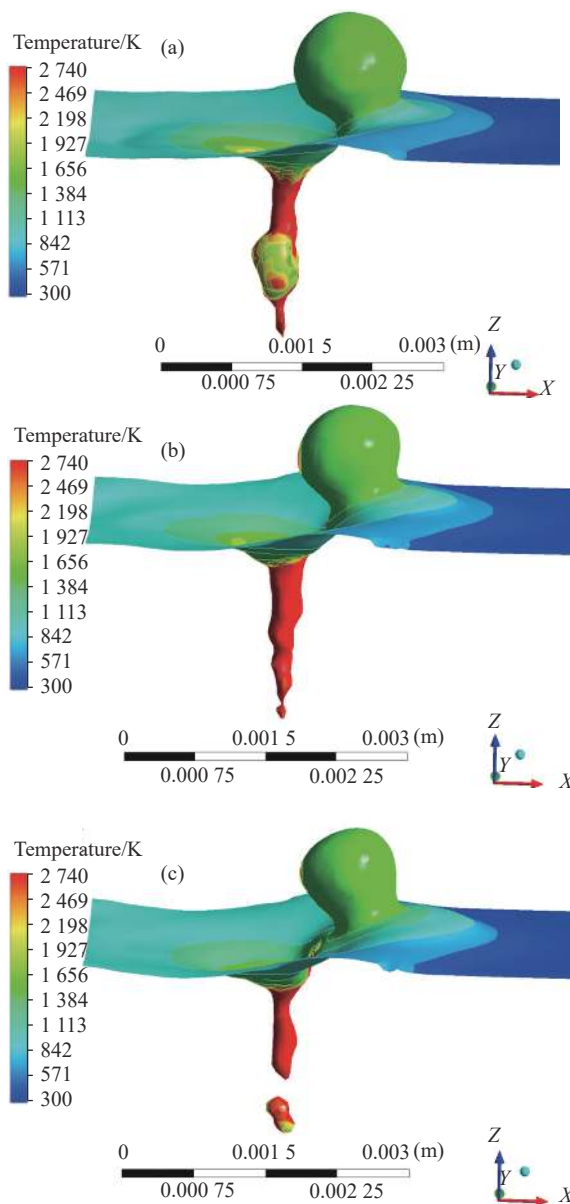


图 3 熔滴填充位置为 0.5 mm 时的匙孔形态

Fig.3 Keyhole morphology of liquid droplet filling position at 0.5 mm

进一步对不同焊接时刻的熔滴填充位置分别为 0.5 mm 和 1.8 mm 的匙孔深度的变化进行了对比分析, 如图 5 所示。由图 5 可知, 熔滴填充位置为 0.5 mm 时, 匙孔深度变化的幅度比熔滴填充位置为 1.8 mm 时匙孔深度变化的幅度要大。熔滴填充位置为 0.5 mm 时, 匙孔深度变化的最大值为 2.9 mm, 最小值为 1.1 mm; 熔滴填充位置为 1.8 mm 时, 匙孔深度变化的最大值为 2.9 mm, 最小值为 1.7 mm。

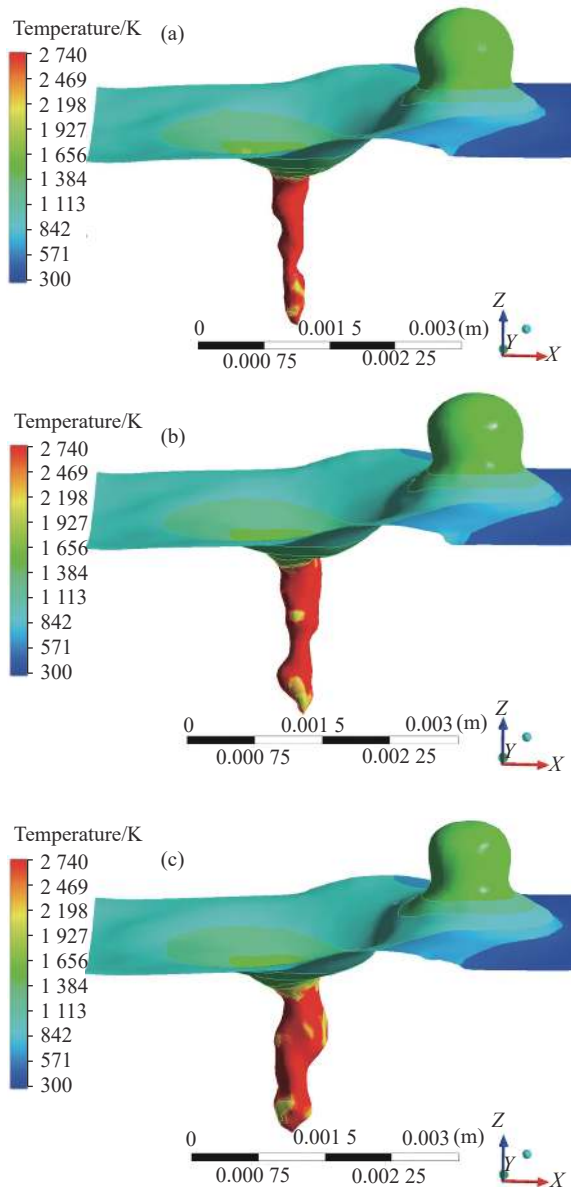


图 4 熔滴填充位置为 1.8 mm 时的匙孔形态

Fig.4 Keyhole morphology of liquid droplet filling position at 1.8 mm

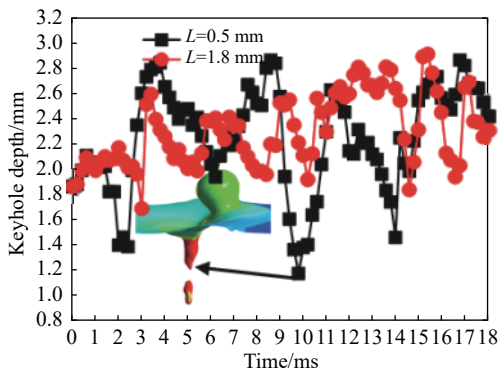


图 5 熔滴填充位置为 0.5 mm 和 1.8 mm 的匙孔深度变化

Fig.5 Keyhole depth change for liquid droplet filling positions at 0.5 mm and 1.8 mm

## 2.2 熔滴填充位置对熔池流动特性的影响

激光焊接过程中熔池内部液态金属的流动行为会影响到匙孔形态的稳定性,匙孔闭合时会产生焊接气泡,进而会影响焊缝质量。文中进一步对比分析熔滴填充位置分别为 0.5 mm 和 1.8 mm 的熔池纵截面的流场,分别如图 6 和图 7 所示。由图 6 可知,当熔滴距离匙孔较近时,熔池内部产生了挤压匙孔前壁和后壁的流动趋势(图 6(a)),在熔池金属的挤压匙孔壁的作用下匙孔底部出现了闭合的现象(图 6(b)、(c)),而且液态金属对匙孔底部的挤压趋势十分明显;由图 7 可知,当熔滴距离匙孔较远时,液态金属填充进入熔

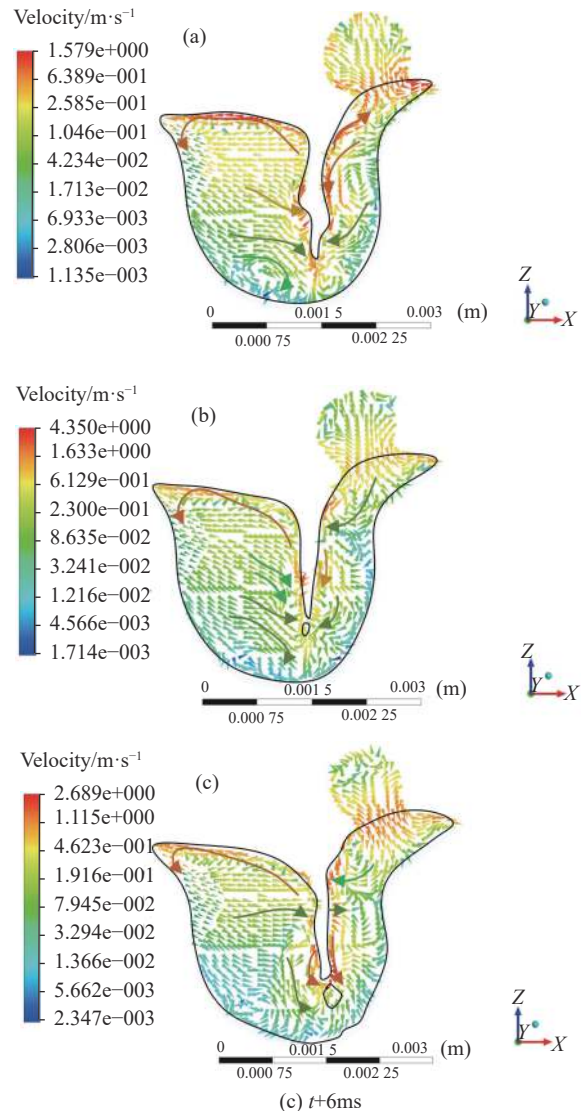


图 6 熔滴填充位置为 0.5 mm 的熔池流场

Fig.6 Molten pool flow field for liquid droplet at 0.5 mm filling position

池,虽然也会产生液态金属流动挤压匙孔壁的现象,但这种挤压趋势很弱,维持匙孔壁张开的流动趋势较为明显。由图 6 和图 7 可知,在 Marangoni 流力的作用下,在熔池上部出现液态金属流向熔池后方的逆时针流动现象。

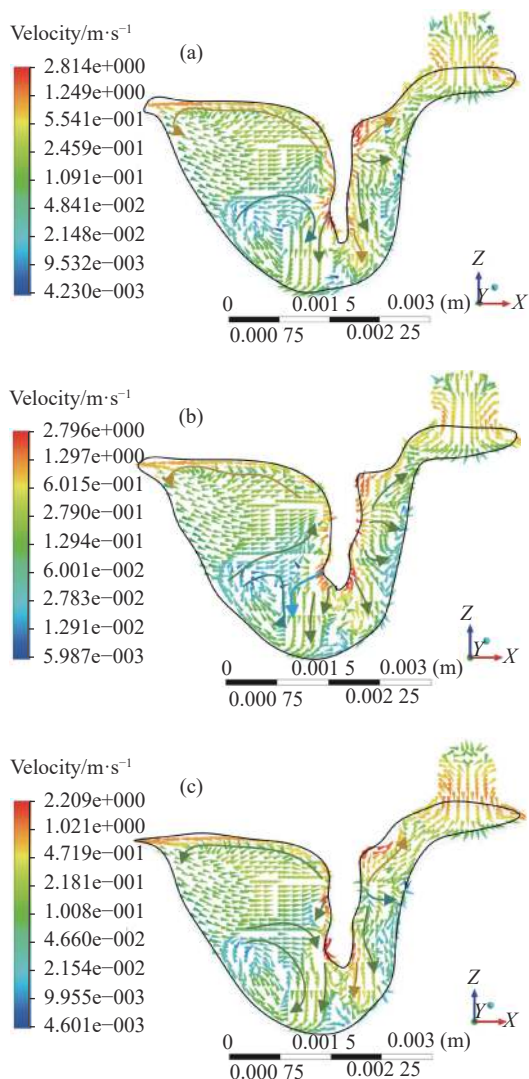


图 7 熔滴填充位置为 1.8 mm 的熔池流场

Fig.7 Molten pool flow field for liquid droplet at 1.8 mm filling position

参考文献 [13] 表明激光深熔焊过程中匙孔形态不断出现波动,当匙孔下部波动剧烈时,匙孔底部容易产生焊接气泡。匙孔壁面液态金属的流动速度波动情况可以间接反映匙孔的稳定性。激光焊接过程中,填充金属的存在一定程度上增大了小孔前壁的流体静压力作用,对匙孔后壁也有一定程度的影响,这是由于当匙孔前壁内部有凸起时会反射一部分激光

能量到匙孔后壁进而引起匙孔形态的波动,而匙孔的波动较大时会出现匙孔中下部断开的情况,进而产生气泡,因此文中对匙孔后壁下部的 H 点(如图 8 所示)的不同焊接时刻的流动速度进行观察,发现液态金属不同填充位置下的 H 点的流动速度也会出现一定程度的波动。由图 8 可知,熔滴填充位置为 0.5 mm 时熔池内部 H 点的流动速度波动较大。熔滴填充位置为 0.5 mm 时熔池内部 H 点的流动速度最大值和最小值分别为 2 989 mm/s, 118 mm/s。熔滴填充位置为 0.5 mm 时,熔池内部 H 点的流动速度平均值为 967 mm/s; 熔滴填充位置为 1.8 mm 时,熔池内部 H 点的流动速度波动相对较小。熔滴填充位置为 1.8 mm 时,熔池内部 H 点的流动速度最大值和最小值分别为 1 953 mm/s, 243 mm/s。熔滴填充位置为 1.8 mm 时,熔池内部 H 点的流动速度平均值为 848 mm/s。

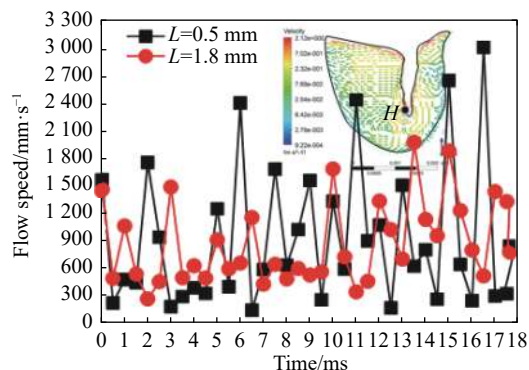


图 8 熔滴填充位置为 0.5 mm 和 1.8 mm 的熔池内部 H 点流动速度变化

Fig.8 Flow velocity change at the H point inside the molten pool with liquid droplet filling position of 0.5 mm and 1.8 mm

### 2.3 熔滴填充对匙孔稳定性的影响机制

对于激光深熔焊,匙孔壁面处于实时波动状态,维持匙孔张开的作用力为反冲压力 ( $P_r$ ) 和匙孔内部金属元素蒸发的蒸气压力 ( $\delta P_g$ ); 而驱使匙孔闭合的作用力为表面张力 ( $P_\sigma$ ) 以及熔池内部的液态金属流体静压力 ( $P_h$ )。当匙孔处于稳定状态时,有如下公式:

$$P_r + \delta P_g = P_\sigma + P_h \quad (22)$$

激光深熔焊过程中,由于熔滴的加入,很容易造成对匙孔前壁的冲击作用,而当匙孔前壁波动较大时,会影响激光束照射到匙孔内部的激光能量密度分

布的均匀性,进而会影响激光深熔焊匙孔内部金属元素的蒸发量,在匙孔内部激光束照射到的区域,金属气化的蒸气反冲作用力增大,而激光束无法照射到的区域,金属气化的蒸气反冲作用力减小,进一步会造成匙孔形貌出现剧烈的波动,熔滴填充进入熔池对匙孔影响的原理图,如图 9 所示。

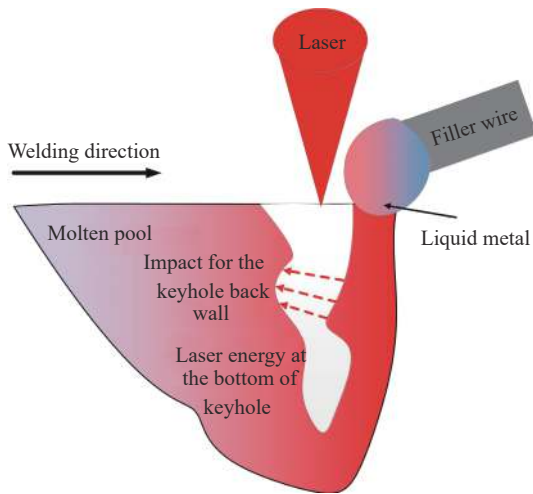


图 9 熔滴对匙孔稳定性影响的原理图

Fig.9 Schematic diagram for the keyhole stability influence by liquid droplet

### 3 结 论

(1) 熔滴填充位置为 0.5 mm 时,由于熔滴距离匙孔很近,当液态金属不断填送进熔池时,匙孔三维形貌变化较大,而且容易出现匙孔底部闭合的现象;而熔滴填充位置为 1.8 mm 时,由于熔滴与匙孔的距离较远,当液态金属流入熔池时,对匙孔的冲击较小,匙孔的三维形貌也会出现一定程度的波动,但未出现匙孔闭合的现象。

(2) 当熔滴距离匙孔较近时 ( $L=0.5$  mm), 熔池内部产生了挤压匙孔前壁和后壁的流动趋势,在熔池金属的挤压匙孔壁的作用下匙孔底部出现了闭合的现象,这样容易产生焊接气泡,进而造成焊缝工艺气孔率增高;当熔滴距离匙孔较远时 ( $L=1.8$  mm), 液态金属填充进入熔池时产生的液态金属流动挤压匙孔壁的挤压趋势很弱,维持匙孔壁张开的流动趋势较为明显,降低了因匙孔闭合形成的焊缝工艺气孔数量。

(3) 熔滴填充位置为 0.5 mm 时熔池内部  $H$  点的流动速度波动较大,其流动速度最大值和最小值分别

为 2 989 mm/s, 118 mm/s, 熔池内部  $H$  点的流动速度平均值为 967 mm/s; 熔滴填充位置为 1.8 mm 时, 熔池内部  $H$  点的流动速度波动相对较小,其流动速度最大值和最小值分别为 1 953 mm/s, 243 mm/s, 熔池内部  $H$  点的流动速度平均值为 848 mm/s。

### 参考文献:

- [1] Yang Zhibin, Li Haozhe, Wang Bin, et al. Laser process for high strength aluminum alloys [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(9): 0906004. (in Chinese)  
杨志斌, 李浩哲, 王斌, 等. 铝合金 T 型接头双侧激光焊接气孔缺陷影响规律研究[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(9): 0906004.
- [2] Shi Junkai, Wang Guoming, Ji Rongwei, et al. Compact dual-wavelength continuous-wave Er-doped fiber laser [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(4): 811-819. (in Chinese)  
石俊凯, 王国名, 纪荣伟, 等. 结构紧凑的双波长连续波掺铒光纤激光器[J]. *中国光学*, 2019, 12(4): 811-819.
- [3] Meng Jia, Zhang Wei, Zhao Kaiqi, et al. Investigation on the performance of a homemade thulium-doped fiber laser oscillator [J]. *Chinese Optics*, 2019, 12(5): 1109-1116. (in Chinese)  
孟佳, 张伟, 赵开祺, 等. 国产化掺铥光纤激光振荡器性能研究[J]. *中国光学*, 2019, 12(5): 1109-1116.
- [4] Wu Y, Cai Y, Wang H, et al. Investigation on microstructure and properties of dissimilar joint between SA553 and SUS304 made by laser welding with filler wire [J]. *Materials & Design*, 2015, 87: 567-578.
- [5] Wang Yunzhi, Xie Fang, Chen Longhui, et al. Research on optical fiber multi-wave-length laser for measuring displacement precisely [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(9): 2036-2042. (in Chinese)  
王韵致, 谢芳, 陈龙辉, 等. 用于高精度测量位移等参量的光纤多波长激光器[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(9): 2036-2042.
- [6] Li Yanzhou, Shi Yan. Microstructure and process optimization of AlCrFeCoNiCu high-entropy alloy by laser deposition [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2019, 27(4): 795-806. (in Chinese)  
李彦洲, 石岩. 铝合金表面激光沉积 AlCrFeCoNiCu 高熵合金组织与工艺优化[J]. *光学精密工程*, 2019, 27(4): 795-806.
- [7] Yu Yangchun. Study on the technology and filler wire melting dynamics during the laser welding with filler wire[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2010: 60-83. (in Chinese)  
余阳春. 激光填丝焊的焊丝熔入行为及工艺研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2010: 60-83.

- [8] Peng Jin, Li Liqun, Lin Shangyang, et al. Stability of filler melting and transfer with pre-melting liquid filler [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2016, 37(7): 9–12. (in Chinese)  
彭进, 李俐群, 林尚扬 等. 激光液态填充焊的熔滴熔化与过渡稳定性[J]. *焊接学报*, 2016, 37(7): 9–12.
- [9] 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.
- [10] Wang H, Shi Y W, Gong S L. Numerical simulation of laser keyhole welding processes based on control volume methods [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(21): 4722–4730.
- [11] Peng Jin, Zhang Wenjie, Wang Xingxing, et al. Numerical simulation of effect of filler wire melting and filling mode on molten pool in laser welding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0306005. (in Chinese)  
彭进, 张文洁, 王星星, 等. 焊丝熔化填充方式对激光焊接熔池影响的数值模拟[J]. *红外与激光工程*, 2018, 47(3): 0306005.
- [12] Yang Zhibin. Study on double-sided laser beam welding characteristics and weld pool behavior for aluminium alloy fuselage panel structure[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2003, 17(6): 431-437. (in Chinese)  
杨志斌. 铝合金机身壁板结构双侧激光焊接特征及熔池行为研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2013: 74-90.
- [13] Matsunawa A, Kim J D, Seto N, et al. Dynamics of keyhole and molten pool in laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 1998, 10(6): 247–254.