

## 激光穿孔焊接过程热流场数值模拟

吴家洲, 张 华, 张奇奇, 罗兵兵

(南昌大学 江西省机器人与焊接自动化重点实验室, 江西 南昌 330031)

**摘 要:**采用随小孔形状实时变化的自适应热源,建立了三维光纤激光穿孔焊接过程的数值分析模型。激光热源加载在时变的气/液界面,考虑气相和液相转变过程中存在的传热与传质现象,利用焓-孔介质法处理焊接过程中动量损耗及相变潜热问题。小孔壁面计算主要考虑反冲压力和表面张力,求解VOF方程获得气/液界面。结果表明,焊接过程中可能产生飞溅、焊瘤和余高,小孔前部的金属液体沿着小孔回流至小孔尾部形成焊缝,小孔后部熔池左右两侧可能产生涡旋现象,光致等离子体产生时间极短,穿孔前等离子体最大速度快速增加到102.95 m/s左右,穿孔后速度值下降至80 m/s左右,仿真分析为实际焊接过程提供理论依据。

**关键词:**激光技术;激光穿孔焊接;数值模拟;热流场;熔池;小孔

**中图分类号:**TG456.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.1001-5078.2018.01.004

## Numerical simulation of temperature and velocity field in laser drilling weld

WU Jia-zhou, ZHANG Hua, ZHANG Qi-qi, LUO Bing-bing

(Key Laboratory of Robot & Welding Automation of Jiangxi, Nanchang University, Nanchang 330031, China)

**Abstract:** A three dimensional numerical simulation model of optical laser drilling weld was established, by using adaptive heat source with real-time variation of keyhole shape. The laser heat source was loaded at the time-varying gas/liquid interface, considering heat and mass transfer in the process of gas and liquid phase transition. The momentum loss and latent heat due to solidification and melting was dealt with by enthalpy-porosity technique. The keyhole wall was calculated by solving VOF equation, mainly considering recoil pressure induced by the metal evaporation and surface tension. The result shows that the welding process may produce flash, overlap and reinforcement. Welded joint is formed when the metal liquid flows back from the front to the rear of the keyhole, and a swirl may occur on the left and right sides the welding pool at the rear of the keyhole. The time of plasma generation is very short, and the maximum velocity of plasma increases rapidly to about 102.95 m/s before drilling, then it drops to about 80 m/s after drilling. The simulation analysis provides a theoretical basis for the actual welding process.

**Key words:** laser technique; laser drilling weld; numerical simulation; temperature and velocity field; welding pool; keyhole

**基金项目:**国家“863”科技计划项目(No. 2013AA041003)资助。

**作者简介:**吴家洲(1973-),男,博士研究生,讲师,研究方向为激光焊接过程数值模拟及相关机理研究。E-mail:woojz12@126.com

**通讯作者:**张 华(1964-),男,博士,教授,博士生导师,研究方向为光纤传感器,机器人焊接和质量控制。E-mail:h Zhang@ncu.edu.cn

**收稿日期:**2017-05-22; **修订日期:**2017-07-20

## 1 引言

激光穿孔连续焊接是一种常用的激光焊接方式,在工业生产中有着广泛的应用<sup>[1]</sup>,小孔的形成与穿孔过程影响激光能量向工件的传输,最终决定了焊接质量。液态金属在光束的持续作用下产生蒸发效应,反冲压力、气液界面表面张力和液体静压力共同作用生成小孔,反冲压力是小孔向下的“挖掘力”,同时,小孔深度增加使得光束在小孔壁面发生多重反射,提高了壁面对激光能量的吸收;液态金属蒸发时由于蒸发潜热影响需要吸收小孔壁面能量,其从液相转变成气相加速了小孔生成;金属蒸汽在激光作用下生成光致等离子体,等离子体对激光的逆韧致吸收减少小孔壁面菲涅尔吸收,过量等离子体甚至会阻隔激光传输并使光束发生散射,进一步降低了工件对激光能量的吸收。显然,激光焊接是一个复杂的传热传质过程,等离子体、小孔和熔池行为对焊接质量有重要影响。国内外学者采用仿真分析的方法对此作了许多研究。Jung-Ho Cho 等<sup>[2]</sup>和 Pang Shengyong 等<sup>[3]</sup>依据光束传播特点建立光线追踪的热源模型,考虑了蒸发效应所带来的传热与传质,研究了小孔和熔池的耦合行为及其对焊接质量的影响,获得了合理的小孔和熔池形状,但一般限于盲孔;Zhao Haiyan 等<sup>[4]</sup>和 R Rai 等<sup>[5]</sup>采用高斯热源密度方法作为热源模型,分析了小孔和熔池的热流场行为,Zhao Haiyan 等<sup>[4]</sup>还研究了焊接过程中“气孔”产生的机理,但也基本上限于盲孔焊接。李天庆<sup>[6]</sup>和王小杰等<sup>[7]</sup>进行等离子 PAW 的穿孔焊接,获得了合理的小孔形状。

综上所述,许多研究人员分析了激光焊小孔和熔池行为,但研究穿孔焊接的不多见。本文考虑激光的瑞利散射和工件上表面等离子热效应,建立了三维激光连续焊接过程热流场分析有限元模型,模拟了小孔和熔池行为,研究了熔池温度场和速度场分布,并对等离子体作了流场分析。

## 2 数学模型

激光穿孔焊接数值模拟的计算包括中部的工件区和工件上/下部的保护气区,如图1所示。焊接区域由于物理上对称性,考虑到计算速度问题,选取一半区域作为计算区。激光焊接是一个复杂的传热传质过程,计算时对模型进行简化,本文模型基于以下假设:①计算流体假设为不可压缩的牛顿流体,且流动为层流;②焊接过程中不考虑各相物质之间的化学反应;③高温金属蒸汽/等离子体处于局部热平衡状态,满足流体控制基本守恒方程;④激光束强度在平面上分布满足 Gauss 函数。

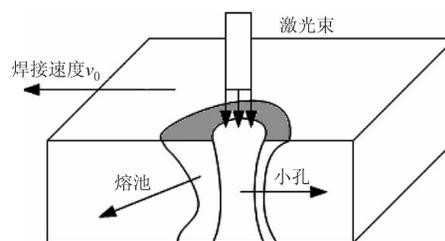


图1 激光穿孔焊接示意图

Fig. 1 Sketch of laser keyholing weld

### 2.1 热源模型

本计算模型中,热源主要加载在气液界面和小孔内金属蒸汽等离子体,研究小孔和熔池行为时考虑工件上表面等离子体热影响。热流密度依照公式(1)计算,参照公式(2)考虑激光的瑞利散射。公式(1)是面热源,参照文献[8]转变成体热源。工件表面热源有效半径取束腰半径的2倍。

基模高斯光束是目前光纤激光器光束的主要输出形式,其光斑呈圆形,光强的分布理论上满足 Gauss 函数,如式(1)所示:

$$q(r) = \frac{3q_{\max}}{\pi r_{\text{eff}}^2} \exp\left(-\frac{3r^2}{r_{\text{eff}}^2}\right) \quad (1)$$

式中,  $q_{\max}$ 、 $r$  和  $r_{\text{eff}}$  分别为激光热流密度最大值、光源半径和束腰半径;  $q(r)$  为半径  $r$  处的热流密度值。

激光连续焊接过程中,式(1)中  $r$  可表示为:

$$r = \sqrt{(x - v_0 t)^2 + y^2} \quad (2)$$

式中,  $v_0$  为焊接速度;  $t$  为焊接时间。

由于透射和反射作用,光束通过光路之后具有一定的发散性,一般用光的瑞利散射来描述,光束发散直接影响光束能量传输,目前主要采用 Siegman<sup>[9]</sup>提出的光束质量因子  $M^2$  理论来评价激光束质量的好坏,如式(3)所示:

$$r(z) = r_{\text{eff}} \sqrt{1 + \left(\frac{z - z_0}{Z_R}\right)^2} \quad (3)$$

式中,  $z_0$ 、 $Z_R$  和  $r(z)$  为束腰处的坐标、瑞利常数和 Gauss 光束半径。

### 2.2 控制方程

小孔的形成与穿孔是激光穿孔焊接重要特征,热源主要加载在小孔壁面,采用 VOF 方法计算气液界面,体积分数方程如式(4)所示:

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

式中,  $F$  为单元体积分数;  $v$  为速度。

气液界面温度升高至沸点之后,液态金属会产

生剧烈的汽化现象,产生较大的反冲压力,与表面张力和液体静压力等力共同作用生成小孔,其公式如式(5)所示:

$$P_r = AB_0 / \sqrt{T_w} \exp(-U/T_w) \quad (5)$$

式中,  $P_r$  是反冲压力;  $A$  为仿真系数,一般取 0.55;  $B_0$  是蒸发常数;  $T_w$  为小孔表面温度;  $U$  值是与材料相关的常数。

依据气体压力特性认为反冲压力垂直作用在气液界面,计算时必须分解成沿着各轴的轴向力,如式(6)所示:

$$P_x = \frac{n_x}{\sqrt{n_x^2 + n_y^2 + n_z^2}} \cdot P_r \quad (6)$$

式中,  $P_x$  是反冲压力在  $X$  轴向分量;  $n_x$ 、 $n_y$  和  $n_z$  是气液界面在各个轴向体积分数梯度。同理,可以计算出反冲压力在另外两个轴向分量;值得注意的是,计算出的反冲压力轴向分量是表面力,必须转变成体积力加载在动量源项中。

同样,气液界面温度升高至沸点之后液态金属的蒸发会带来能量损失和质量转变,由蒸发所带来的能量损失按式(7)计算:

$$q_v = WH_{lg} \quad (7)$$

式中,  $H_{lg}$  为材料蒸发潜热;  $W$  为材料蒸发速率,其计算公式<sup>[4]</sup>如式(8)所示,计算时也可采用气/液转变质量近似替代:

$$\log(W) = 2.52 + (60121 - \frac{18836}{T}) - 0.5 \log(T) \quad (8)$$

液体和气体之间能量转变源项如式(9)和式(10)所示:

$$S_{lg} = -m_{lg} \quad (9)$$

$$S_{gl} = m_{lg} \quad (10)$$

式中,  $m_{lg}$  单元质量,负号表示液相向气相转变吸收热量,正号表示气相向液相转变释放能量。

依据假设,计算流场遵循质量守恒、动量守恒和能量守恒方程如式(11)至式(13)所示:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho) + \nabla \cdot (\rho V) + S_{MA} = 0 \quad (11)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(V) + V \cdot \nabla V = -\frac{1}{\rho} \nabla P + \mu \nabla^2 V + S_{MT} + g \quad (12)$$

$$\frac{\partial h}{\partial t} + V \cdot \nabla h = k \nabla^2 T + S_E \quad (13)$$

式中,  $\rho$ 、 $V$ 、 $p$ 、 $g$ 、 $\mu$ 、 $h$ 、 $k$  和  $T$  分别为密度、速度矢量、压力、重力加速度、粘性系数、焓值、导热系数

和温度;  $S_{MA}$  为质量源项;  $S_{MT}$  为动量源项;  $S_E$  为能量源项。

采用焓-孔介质方法近似处理材料的熔化与凝固问题,材料潜热变化在随时间变化的比热中体现,凝固过程所带来的动量损失近似如式(14)所示:

$$S_{mush} = \frac{(1-f_l)^2}{f_l^3 + \phi} A_{mush} \cdot V \quad (14)$$

式中,  $S_{mush}$ 、 $f_l$ 、 $\phi$  和  $A_{mush}$  分别为动量损失源项、液相体积分数、为防止分母为零很小常数和多孔介质常数。

### 2.3 边界条件

#### 1) 能量边界

对流和辐射损失为:

$$q_{loss} = h_c(T - T_\infty) + \sigma \varepsilon(T^4 - T_\infty^4) \quad (15)$$

式中,  $h_c$ 、 $T_\infty$ 、 $\sigma$  和  $\varepsilon$  分别为对流换热系数、环境温度、玻尔兹曼常数和发射率。

#### 2) 动量边界

$$\text{表面张力为: } P_s = \kappa \gamma \quad (16)$$

表面张力系数  $\gamma$  与温度  $T$  关系式为:

$$\gamma(T) = \gamma_m - \lambda(T - T_m) \quad (17)$$

式中,  $\gamma_m$  为熔化温度  $T_m$  时表面张力系数;  $\lambda$  为表面张力温度梯度。

### 3 结果及分析

数值分析采用 FLUENT 软件并行计算,采用正六面体网格划分,用 C 语言编制区域初始化、材料属性随温度变化和控制方程源项等各种 UDF 函数,采用压力隐式算子分割算法(PISO)进行速度场计算,通过能量方程求解获得温度场;用焓-孔介质法近似处理熔化/凝固问题,小孔壁面追踪求解体积分数方程 VOF。计算选取固定时间步长  $5 \times 10^{-6}$  s。焊接试验中,激光器选取美国 IPG 公司光纤激光器 YLS-2000,焊接功率取 800 W,焊接速度取 1.8 m/min。选取钛合金 TC4 为试件材料,材料的密度、粘度系数、热导率和比热均与温度有关,均来自于 JMatPro 软件计算。

#### 3.1 小孔和熔池行为分析

图 2 给出了激光穿孔连续焊接过程中小孔、熔池和等离子体行为变化过程。小孔的形成和穿孔是激光焊接关键特征。焊接开始时光束作用于工件表面熔化固态金属为液态,由于金属液态时密度小于固态,熔化的液态金属会略微高于工件表面,使得工件表面与光束作用面不再是镜面,工件对激光的反射减小,能量吸收系数迅速提高,当表面温度大于等于材料沸点时,产生剧烈的蒸发现

象,同时金属蒸汽在激光的作用下分解生成光致等离子体,温度急剧上升。液态金属蒸发传质以及反冲压力向下的“挖掘”作用生成向下的小孔,如图2(a)所示。生成小孔后传热机制发生改变,光束作用于小孔壁面并多重反射,小孔壁面菲涅尔吸收激光能量,同时,光致等离子体也逆韧至吸收光束能量,通过传导和对流方式将热量传递给工件。激光是一种能量高度集中的热源,焊接时生成的熔池较薄,反冲压力可能使得熔池内液体被“挤出”熔池,在小孔内喷出的高速等离子体的作用下克服重力脱离工件表面形成焊接“飞溅”,冷却后可能形成余高和“焊瘤”,如图2(b)所示。飞溅不仅会损害光路,还会凝固在工件表面形成焊珠,高度过大的余高和“焊瘤”会影响焊接质量。

图2(c)是焊接穿孔瞬间小孔状态,可以看出工件下表面在金属蒸发传质、向上的反冲压力、液体静压力和表面张力共同作用下略有内陷,工件下表面金属蒸汽也有一个向上的进入小孔作用力,可能使空气混入小孔形成气孔,但仿真结果表明:小孔内部等离子体压力大于下部压力,外部气体并没有混入小孔。

图2(d)是焊接完全穿孔后的准稳态过程,激光束完全穿过小孔,壁面液态金属在小孔内喷出的高速等离子体和重力的共同作用下脱离熔池向下形成焊接“飞溅”,小孔作为焊接热源以一个相对稳定的形态向前移动,完成整个焊接过程。

### 3.2 熔池热流场分析

分析焊接熔池上表面的热流场,忽略工件上表面等离子体热效应,如图3(a)所示。在工件上表面,在反冲压力作用下,熔池前部的金属液体以一定的速度从小孔内壁向外流向熔池边缘,这是由TC4钛合金表面张力梯度系数为负值,Marangoni力作用的结果,然后绕过小孔向后回流到焊缝区域,靠近液

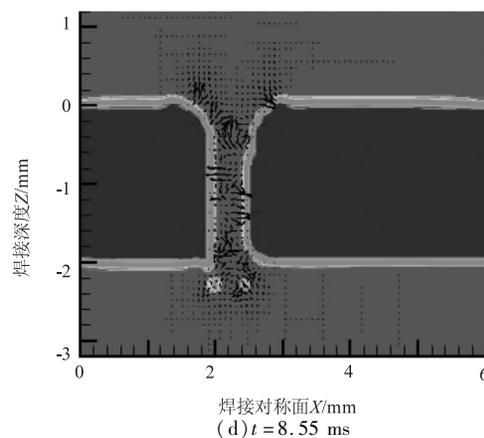
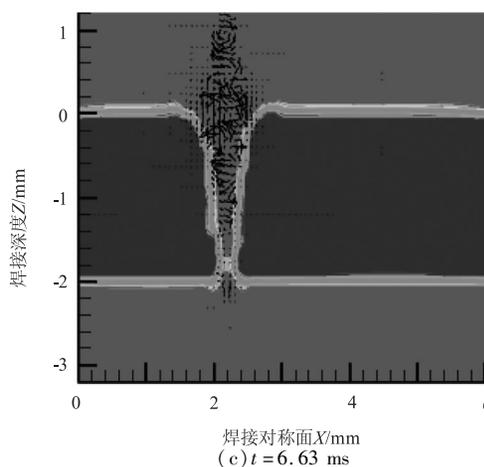
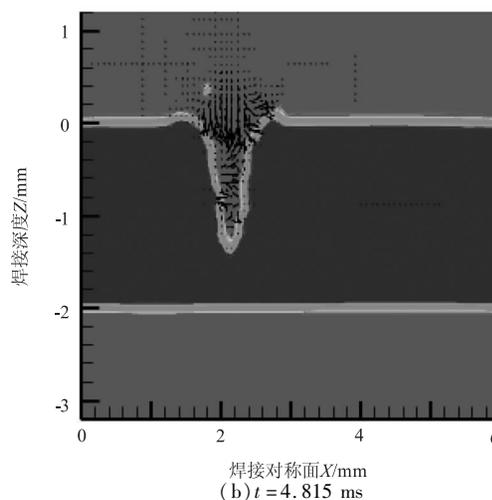
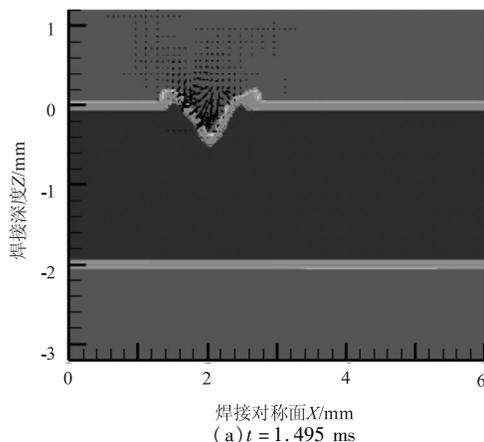


图2 不同时刻的小孔形貌

Fig. 2 Keyhole morphology at different moments

固边缘流体由于达摩西力的作用,速度迅速衰减为零;回流的液态金属继续向后流动遇到凝固的焊缝再转向向前流动,同时靠近小孔壁面所有液体在反冲压力作用下都有向外流动的趋势,在焊缝后部左右两侧会产生“涡旋”现象,这与吴冰等<sup>[10]</sup>给出结论一致。与焊缝后部相比,焊缝前部等温线相对密集,温度梯度大,热量由小孔壁面向外通过对流和传导方式向外传递。

工件下表面热流场与上表面类似,如图3(b)所示。熔池前部金属液体向前流动,遇到固相区后回流至焊缝区,继续向后流动遇到焊缝区后再转向向前流动,同样,在焊缝后部左右两边也会产生“涡旋”现象,这是熔池液体流动复杂性带来的。热量由小孔壁面通过对流和热传导方式向外传递,焊缝前部比后部等温线密集,温度梯度也较大。

而工件内部焊缝靠近小孔壁面的熔池流体流动非常复杂,从图3(c)可以看出。小孔内金属蒸汽等离子体速度很快,运动非常复杂,从图2(c)和图2(d)可以看到明显“涡旋”现象,等离子体对靠近壁面的金属液体力的作用影响壁面流体的运动;但是,靠近焊缝的流体在反冲压力作用下,在焊缝中下部的某个区域开始,上部流体向上流动,下部流体向下流动。热量以小孔为中心,通过对流和传导方式从小孔壁面向外传递。

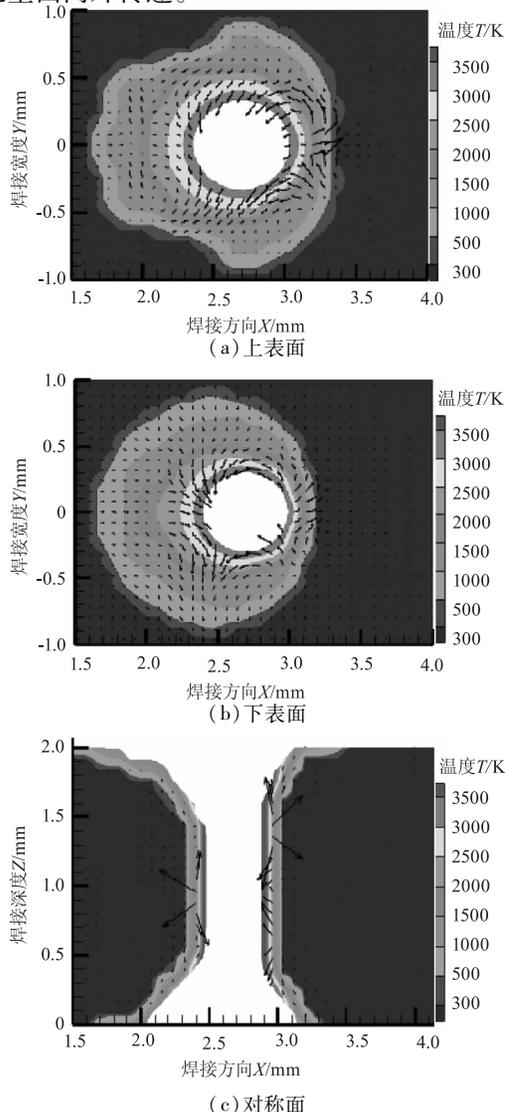


图3 熔池热流场分布( $t = 23.71\text{ms}$ )

Fig. 3 Temperature and velocity distribution of welding pool

### 3.3 蒸汽等离子体流场分析

激光深熔焊接过程中,能量的输运方式主要是小孔壁面对光束的非涅尔吸收,以及高温蒸汽等离子体通过小孔壁面对熔池的传导和对流换热,小孔行为决定激光焊接过程中热量传输。小孔形成主要是由于液态金属蒸发所带来的对壁面的反冲压力,以及光致等离子体急剧膨胀对小孔壁面压力“挤压”出来的,因此,蒸汽等离子体流场分析对于焊接过程影响至关重要,国内外学者对等离子体研究甚少,国内张屹等<sup>[11]</sup>对此作了研究。图4是金属蒸汽等离子体最大速度随时间变化图,可以看出,小孔产生前等离子体速度初始化为0 m/s,小孔开始生成时等离子体速度快速增大到58.58 m/s,这与光致等离子体极速产生现象相吻合;随着小孔的逐步加深等离子体速度继续增大,直至到穿孔前速度达到最大值102.95 m/s;小孔穿孔后速度开始下降,但并不是直线下降,而是在80 m/s上下波动,这是由于穿孔后小孔内部蒸汽压力减小,等离子体通过工件下部小孔喷出而使得最大速度减少缘故。

从图2(b)至图2(d)可以看出,小孔内等离子体流动非常复杂,小孔形状对其速度分布影响非常巨大,小孔内部和外部都有可能产生“涡旋”现象。等离子体行为影响了小孔的形状,而小孔内部“凸起”是气孔产生的重要原因,这在Matsunawa等<sup>[12]</sup>研究中得到证实。

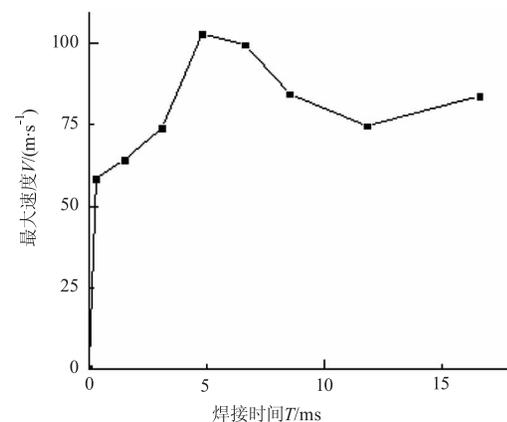


图4 等离子体最大速度

Fig. 4 maximum velocity value of plasma

## 4 结论

(1) 建立了激光穿孔连续焊接过程三维数值计算模型,热源通过小孔壁面加载,考虑激光的瑞利散射、气/液相转变过程中存在的传热与传质现象,小孔形成主要考虑反冲压力和表面张力作用。

(2) 反冲压力是小孔形成和穿孔的主要作用力,对熔池的挤压作用可能形成飞溅、焊瘤和余高,

穿孔后,小孔和熔池形状基本保持不变,焊接过程稳定性逐步加强。

(3)焊接过程中,小孔前部的金属熔液沿着小孔回流至小孔尾部形成焊缝,在小孔尾部左右两侧熔池区可能存在涡旋现象,这不利于焊缝生成。

(4)金属蒸汽在光束作用下极速分解生成光致等离子体,等离子体速度迅速增加,穿孔前等离子体最大速度逐步上升至 102.95 m/s,穿孔后速度下降至 80 m/s 左右。

#### 参考文献:

- [1] DU Hanbin, HU Lunji, WANG Dongcuan, et al. Simulation of the temperature field and flow field in full penetration laser welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2005, 26(12): 65-68. (in Chinese)  
杜汉斌, 胡伦骥, 王东川, 等. 激光穿透焊温度场及流动场的数值模拟[J]. 焊接学报, 2005, 26(12): 65-68.
- [2] Jung-Ho Cho, Suck-Joo Na, et al. Implementation of real-time multiple reflection and Fresnel absorption of laser beam in keyhole[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2006, 39(1): 5372-5378.
- [3] Shengyong Pang, Weidong Chen, Jianxin Zhou, et al. Self-consistent modeling of keyhole and weld pool dynamics intandem dual beam laser welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 131-143.
- [4] Haiyan Zhao, Wenchong Niu, Bin Zhang, 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: 1-13.
- [5] R Rai, J W Elmer, T A Palmer, et al. Heat transfer and fluid flow during keyhole mode laser welding of tantalum, Ti-6Al-4V, 304L stainless steel and vanadium[J]. Journal of Physics D: applied Physics, 2007, 40: 5753-5766.
- [6] LI Tianqing. Numerical analysis of plasma arc heat and pressure distribution with keyhole evolution in PAW[D]. Ji'nan: Shandong University, 2014: 63-68. (in Chinese)  
李天庆. 等离子弧热-力作用随熔池穿孔动态演变过程的数值分析[D]. 济南: 山东大学, 2014: 63-68.
- [7] WANG Xiaojie, WU Chuansong, CHEN Maoai, et al. Numerical simulation of weld pool keyholing process in stationary plasma arc welding[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2010, 46(8): 984-990. (in Chinese)  
王小杰, 武传松, 陈茂爱, 等. 等离子弧定点焊熔池穿孔过程的数值分析[J]. 金属学报, 2010, 46(8): 984-990.
- [8] J Zhou, H L Tsai. Investigation of mixing and diffusion processes in hybrid spot laser-MIG keyhole welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2009, 42: 1-15.
- [9] A E Siegman. New developments in laser resonators[J]. SPIE 1990, 1224: 2-14.
- [10] WU Bing, GONG Shuili, PANG Shengyong, et al. Numerical simulation of transient evolvement of molten pool in laser deep penetration welding[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2010, 31(10): 1-4. (in Chinese)  
吴冰, 巩水利, 庞盛永, 等. 激光深熔焊运动熔池瞬态形成过程数值模拟[J]. 焊接学报, 2010, 31(10): 1-4.
- [11] ZHANG Yi, LIU Xixia, SHI Rukun, et al. Numerical simulation of deep-penetration laser welding based on level-set method[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2016, 37(4): 29-34. (in Chinese)  
张屹, 刘西霞, 史如坤, 等. 基于 Level-Set 方法的小孔及熔池动态形成数值模拟[J]. 焊接学报, 2016, 37(4): 29-34.
- [12] A Matsunawa, M Mizutani, S Katayama, et al. Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding[J]. Welding International, 2003, 17(6): 431-437.