

## 激光光斑尺寸对激光焊接熔池、匙孔行为的影响

彭进<sup>1,2,3</sup>, 许红巧<sup>1</sup>, 王永彪<sup>4</sup>, 王星星<sup>1</sup>, 张永振<sup>2</sup>, 龙伟民<sup>3</sup>, 张定宇<sup>1</sup>

- (1. 华北水利水电大学材料学院 河南省高效特种绿色焊接国际联合实验室, 河南 郑州 450045;
2. 河南科技大学 高端轴承摩擦学技术与应用国家地方联合工程实验室, 河南 洛阳 471023;
3. 中国机械总院集团宁波智能机床研究院有限公司, 浙江 宁波 315700;
4. 郑州轻工业大学 河南省机械装备智能制造重点实验室, 河南 郑州 450002)

**摘要:** 在激光焊接中, 激光光斑半径的大小直接影响激光功率密度, 不同的激光功率密度对熔池流场和小孔的三维形状有影响。然而, 关于激光光斑尺寸对激光熔池和小孔行为的影响的研究很少。基于 Fluent 软件建立了激光焊接热-流耦合模型, 研究了激光光斑尺寸下激光焊接过程的匙孔三维瞬态行为及熔池流场。研究表明, 随着光斑半径的增大, 匙孔的深度明显变小。光斑半径分别为 0.1 mm 和 0.15 mm 时, 焊接过程中均会出现匙孔底部闭合的情况, 当光斑半径为 0.2 mm 时, 匙孔未出现闭合的情况, 匙孔的稳定性有所提高。随着光斑半径的增大, 熔池最大流动速度波动相对较小, 熔池尺寸逐渐增大。

**关键词:** 激光焊接; 光斑尺寸; 匙孔; 熔池

**中图分类号:** TG456.7 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA20220130

### 0 引言

激光束具有单色性好、亮度高、方向性好等诸多优点<sup>[1-5]</sup>。激光深熔焊接过程包括母材对激光能量的吸收、激光能量穿过等离子体在匙孔壁内部的传输、母材材料的热物性参数的变化、熔池液态金属的流动行为、匙孔的动态波动、相变(熔化、匙孔内部气化、熔池凝固)等一系列复杂的物理过程<sup>[6-7]</sup>。

在激光焊接过程中, 匙孔是实时波动的。当匙孔闭合时会产生焊接气泡, 而且焊接过程中熔池表面会产生焊接飞溅, 这对焊缝质量产生较大的影响。

国内外学者对激光焊接熔池、匙孔行为进行了相应的研究。Matsunawa 等<sup>[8]</sup>通过在线监测系统对匙孔动态行为进行研究, 发现在匙孔波动过程中容易在匙孔底部产生焊接气泡, 受熔池流动行为的影响, 焊接气泡不易逃逸出熔池。Heider 等<sup>[9]</sup>对激光焊接过程

进行观察发现, 匙孔闭合后产生焊接气泡这一过程对焊接飞溅的形成有影响。

Zhang 等<sup>[10]</sup>发现激光焊接过程中匙孔前壁产生的凸起会影响激光能量的分布, 进而引起蒸气压力的变化。张高磊等<sup>[11]</sup>研究了离焦量对激光焊接飞溅的影响, 发现焊接飞溅数量与焊缝熔宽与离焦量成正相关的关系。Wu 等<sup>[12]</sup>通过有限元软件对激光焊接过程的飞溅行为进行研究, 发现提高焊接速度以及在熔池上方添加保护气可以提高匙孔的稳定性, 降低焊接飞溅的产生。

对于激光焊接, 激光光斑半径的尺寸对激光功率密度有直接影响, 而不同的激光功率密度又对熔池流场及匙孔三维形貌产生影响。文中基于 Fluent19.0 软件建立了激光焊接热-流耦合模型, 研究了不同激光光斑尺寸对匙孔三维瞬态行为及熔池流场的影

收稿日期: 2022-02-27; 修订日期: 2022-05-11

基金项目: 国家自然科学基金项目 (51705151); 河南省博士后科研项目 (202003076); 河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) 项目 (222102220082); 河南省本科高校省级大学生创新创业训练计划项目 (S202110078023); 华北水利水电大学高层次人才科研启动基金项目 (201705006); 2021 年华北水利水电大学教改项目-青年项目; 2022 年度河南省重点研发与推广专项 (科技攻关) 项目 (232102220052); 华北水利水电大学创新创业训练项目 (2022XA001)

作者简介: 彭进, 男, 副教授, 博士, 主要从事激光焊接、电弧焊接等方面的研究。

响,分析了激光光斑尺寸对熔池流场、匙孔的影响规律。

## 1 数学模型

### 1.1 控制方程组

激光焊接过程,需要满足连续性控制方程,其公式如下:

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

激光焊接过程需要满足动量守恒方程,其  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的公式如下:

$x$  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:

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

激光焊接过程要满足能量守恒方程,其公式如下:

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

式中:  $S_E$  为能量方程中的源项;  $P$  为压力;  $u_0$  为焊接速度;  $S_u$ 、 $S_v$ 、 $S_w$  分别为动量方程沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的源项;  $H$  为混合焓;  $\rho$  为母材的密度;  $T$  为温度;  $t$  为焊接时间;  $k$  为母材导热系数;  $u$ 、 $v$ 、 $w$  分别为沿  $x$ 、 $y$ 、 $z$  方向的速度矢量;  $\mu$  为液态流体的动力粘度。

### 1.2 控制方程源项

#### 1.2.1 动量守恒方程源项

文中采用焓孔隙法处理模型中的固-液界面, Boussinesq 模型处理激光焊接熔池的热浮力问题,

模型中的热浮力及重力的方向为  $z$  轴方向。动量守恒方程中的 Darcy 源项以及浮力源项<sup>[13]</sup> 的计算公式分别如下所示:

$$S_u = -\frac{\mu}{K}(u-u_0) \quad (6)$$

$$S_v = -\frac{\mu}{K}v \quad (7)$$

$$S_w = -\frac{\mu}{K}w + \rho_{ref}\beta g(T-T_{ref}) \quad (8)$$

式中:  $\beta$  为母材热膨胀系数;  $K$  为母材多孔介质渗透率,可由 Karman-kozeny 方程<sup>[14]</sup> 获得;  $T_{ref}$  为参考温度;  $\rho_{ref}$  为  $T_{ref}$  时母材密度;  $g$  为重力加速度。

Karman-kozeny 方程的公式为:

$$K = \frac{f_i^3 + \xi}{A_{mush}(1-f_i^2)} \quad (9)$$

式中:  $A_{mush}$  为达西常数;  $f_i$  为液相体积百分比。

$f_i$  的公式为:

$$f_i = \begin{cases} 0 & T < T_S \\ \frac{T-T_S}{T_L-T_S} & T_S < T < T_L \\ 1 & T > T_L \end{cases} \quad (10)$$

式中:  $T_S$  为固相线的温度;  $T_L$  为液相线的温度。

#### 1.2.2 能量守恒方程源项

对于激光焊接的相变问题的处理上,可以用  $H$  表示混合焓,其公式如下:

$$H = h + \Delta H \quad (11)$$

式中:  $h$  为模型的显焓;  $\Delta H$  为相变潜热。  $h$  的公式如下:

$$h = h_{ref} + \int_{T_{ref}}^T C_p dT \quad (12)$$

式中:  $h_{ref}$  为参考热焓;  $C_p$  为定压比热容。

相变潜热  $\Delta H$  可用熔化潜热  $L_m$  表示,其公式如下:

$$\Delta H = f_l L_m \quad (13)$$

对于气相和液相的处理,设置  $m_{lg}$  为母材液相转为气相的质量,则液相质量守恒源项公式为:

$$S_l = -m_{lg} \quad (14)$$

液相能量守恒源项公式为:

$$S_{lg} = -m_{lg} L_v \quad (15)$$

气相质量守恒源项公式为:

$$S_g = m_{lg} \quad (16)$$

液相能量守恒源项公式为:

$$S_{gl} = m_{lg}L_v \quad (17)$$

式中:  $L_v$  为母材的蒸发潜热。

### 1.3 材料热物性参数

材料的热物性参数会影响到激光能量作用于母材的能量传输,母材 6056 铝合金热物性参数如表 1 所示。

表 1 6056 铝合金热物理性能参数

Tab.1 Thermal physical properties of 6056 aluminum alloy

Physical quantity	Symbol	Numerical value
Solid density	$\rho_s$	2720
Liquid density	$\rho_l$	2590
Solidus temperature	$T_s$	860
liquidus line emperature	$T_L$	917
Gas line temperature	$T_v$	2740
Latent heat of fusion	$L_m$	$3.87 \times 10^5$
Latent heat of vaporization	$L_v$	$1.08 \times 10^7$
Thermal expansion coefficient	$\beta_k$	$1.92 \times 10^{-5}$
Heat transfer coefficient	$h_c$	15
Surface tension at 930 K	$\delta$	0.914
Surface tension gradient coefficient	$d\delta/dT$	$-3.5 \times 10^{-4}$
Emissivity	$\varepsilon$	0.08
Ambient temperature	$T_{ref}$	300

文中模型激光焊接过程的计算域示意图如图 1 所示。

该模型同时考虑了重力、表面张力、反冲压力等焊接驱动力的作用,模型中热源模型、边界条件、焊接驱动力参见文献 [15]。模型计算的工艺参数:激光功率 2800 W,焊接速度为 3.0 m/min。建立的模型进

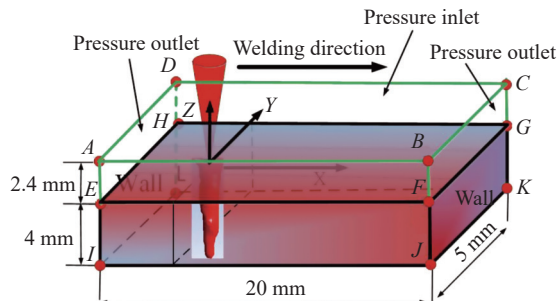


图 1 激光焊接计算域

Fig.1 Calculation domain of laser welding

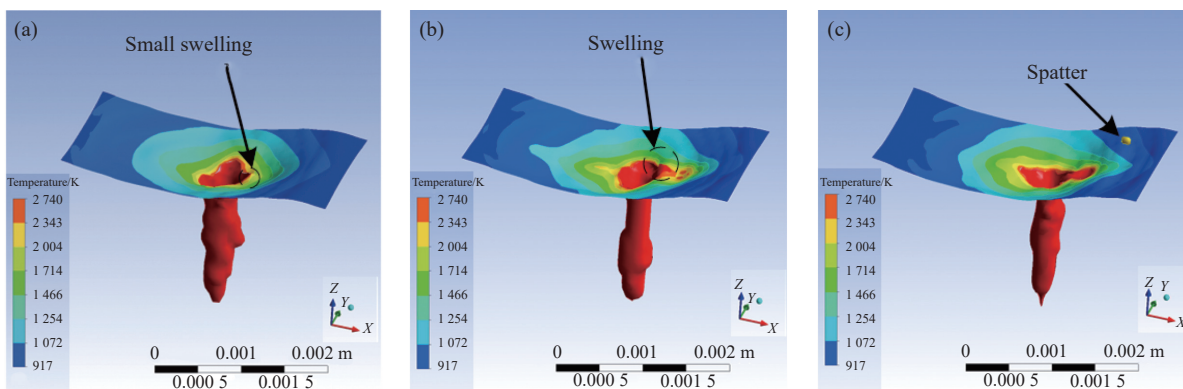
行以下假设:忽略焊接保护气对熔池匙孔的影响;熔池为不可压缩的牛顿流体,为层流。

## 2 计算结果与分析

该文分别对焊光斑半径为 0.1、0.15、0.2 mm 的接起始阶段的匙孔三维瞬态行为及熔池流场进行了计算和研究。

### 2.1 光斑尺寸对匙孔三维瞬态行为的影响

文中首先对光斑半径分别为 0.1 mm 的匙孔三维瞬态行为 (图 2) 和 0.15 mm 的匙孔三维瞬态行为 (图 3) 进行分析。图 2 为光斑半径为 0.1 mm 的匙孔三维瞬态行为。当焊接时间为  $t$  ms ( $t=25$  ms) 时 (图 2(a)), 匙孔前壁中部的的位置出现匙孔外壁外凸 (内壁内凹) 的形状,在匙孔壁前方的熔池表面出现了较小尺寸的液态金属隆起。当焊接时间为  $t+3.5$  ms 时 (图 2(b)), 在匙孔壁前方熔池表面的液态金属隆起变大。当焊接时间为  $t+3.8$  ms (图 2(c)) 以及焊接时间为  $t+3.9$  ms 时 (图 2(d)), 在匙孔壁前方出现了焊接飞溅。当焊接时间为  $t+4.1$  ms 时 (图 2(e)), 匙孔底部出现了闭合的情况,而且在匙孔后壁的中部位置、匙孔前壁中下部位置出现了匙孔外壁外凸的形状。



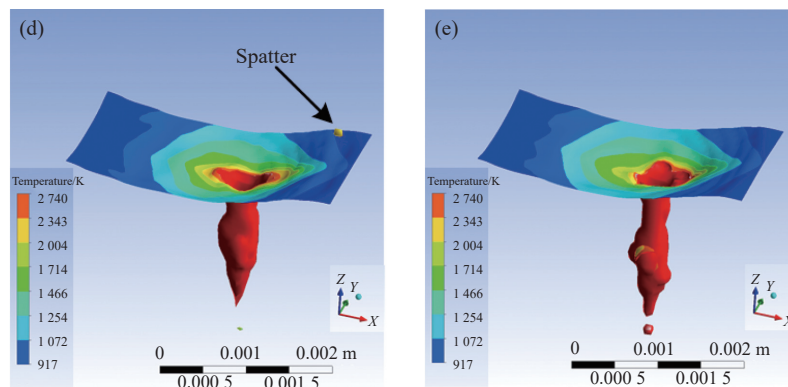


图 2 光斑半径为 0.1 mm 的三维瞬态行为。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.2 Three dimensional transient behavior with laser spot radius of 0.1 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

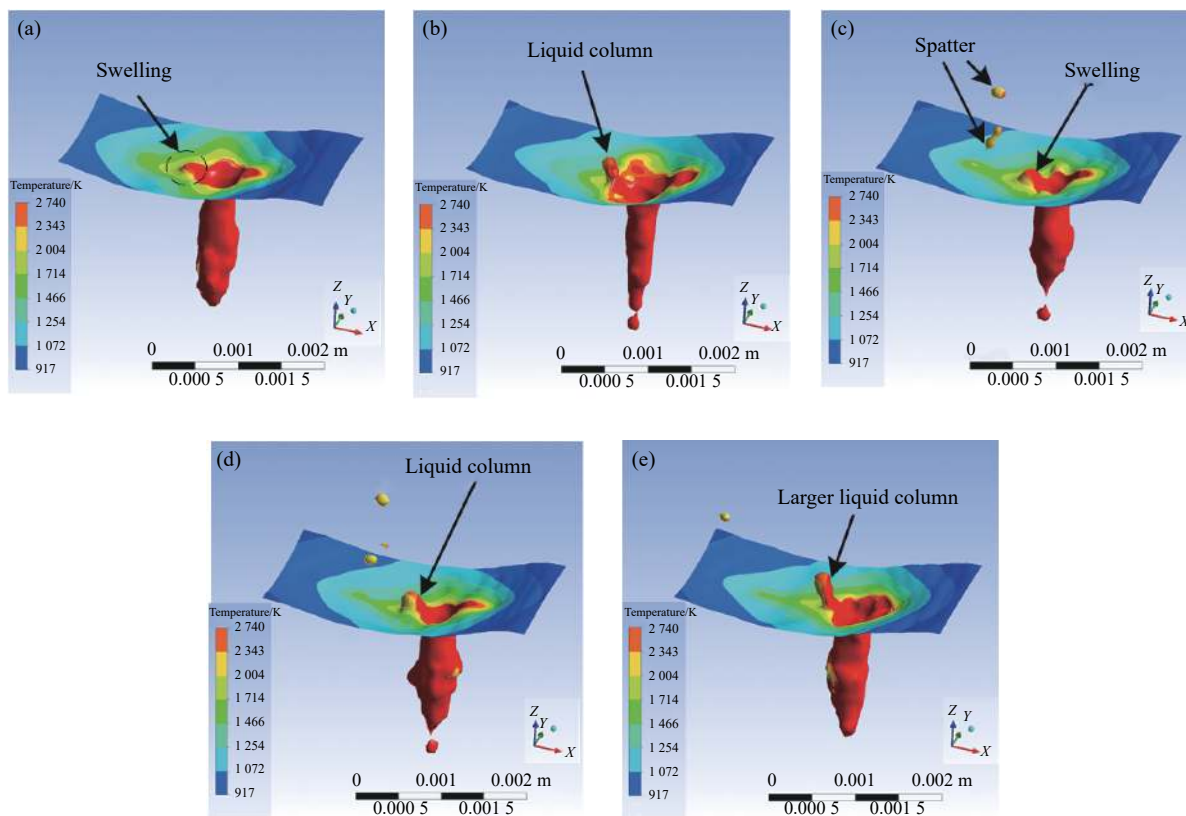


图 3 光斑半径为 0.15 mm 的三维瞬态行为。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.3 Three dimensional transient behavior with laser spot radius of 0.15 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

图 3 为光斑半径为 0.15 mm 的匙孔三维瞬态行为。当焊接时间为  $t$  ms ( $t=25$  ms) 时 (图 3(a)), 在匙孔壁后方熔池表面出现了一定尺寸的液态金属隆起。焊接时间为  $t+3.5$  ms 时 (图 3(b)), 匙孔中部及下部的直径明显变小, 在匙孔壁后方熔池表面的隆起转变为小液柱而且匙孔底部出现了闭合的趋势, 这表明作用

于匙孔下部壁面的表面张力及熔池流动的挤压力要大于维持匙孔张开的反冲压力。焊接时间为  $t+3.8$  ms 时 (图 3(c)), 在匙孔壁后方的液态金属与液柱分离形成焊接飞溅, 在匙孔壁后方熔池表面出现了液态金属隆起, 在匙孔底部出现了闭合的情况。焊接时间为  $t+3.9$  ms 时 (图 3(d)), 匙孔壁后方的焊接飞溅的数量

增多,而且在匙孔壁后方的熔池表面出现了金属液柱。焊接时间为  $t+4.1$  ms 时 (图 3(e)), 在匙孔壁后方的熔池表面出现了较大尺寸的液柱。

图 4 为光斑半径为 0.2 mm 的匙孔三维瞬态行为。如图 4 所示,从焊接时刻  $t$  ms 到  $t+4.1$  ms 时刻,可以发现与光斑半径为 0.1 mm 和 0.15 mm 相比,随着光斑半径的增大,匙孔的深度明显变小,而且形成

的焊接隆起的尺寸逐渐增大。这主要是由于随着光斑半径的增大,作用于匙孔壁面的能量密度变小,匙孔壁面的蒸发剧烈程度降低导致的。

光斑半径分别为 0.1 mm 和 0.15 mm 时焊接过程中均会出现匙孔底部闭合的情况,当光斑半径为 0.2 mm 时,匙孔未出现闭合的情况,匙孔的稳定性有所提高。

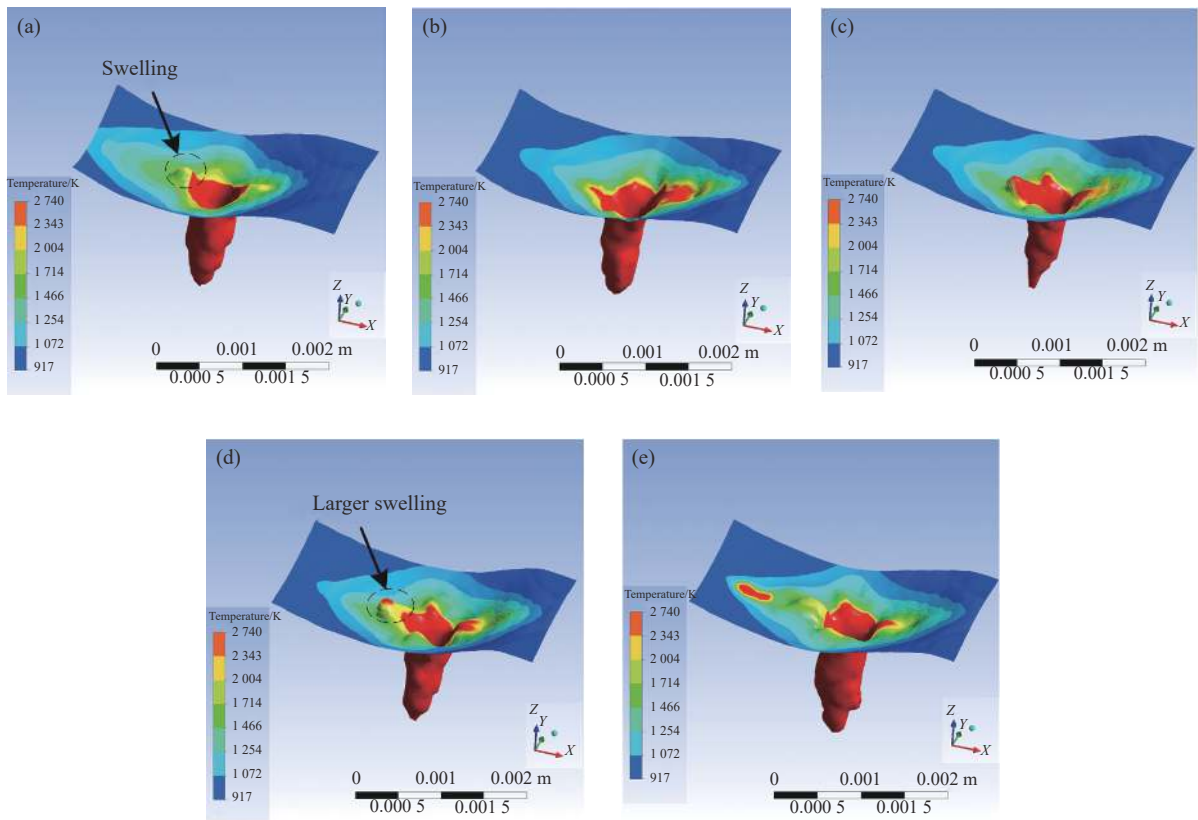


图 4 光斑半径为 0.2 mm 的三维瞬态行为。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.4 Three dimensional transient behavior with laser spot radius of 0.2 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

## 2.2 光斑尺寸对熔池流场的影响

进一步对光斑半径分别为 0.1 mm 的熔池流场 (图 5) 和 0.15 mm 的熔池流场 (图 6) 进行分析,图 4 为光斑半径为 0.1 mm 的熔池流场。当焊接时间为  $t$  ms ( $t=25$  ms) 时 (图 5(a)), 在匙孔壁开口处前方和后方均出现了由匙孔开口处向熔池边缘的流动趋势,这主要是由于 Marangni 力的作用下熔池的液态金属由匙孔上部温度高(表面张力较低)的区域流向熔池边缘温度低(表面张力高)的区域,而且在匙孔壁前方的熔池表面出现了较小尺寸的液态金属隆起,在匙孔壁的后

方出现了顺时针的流动漩涡。当焊接时间为  $t+3.5$  ms 时 (图 5(b)), 匙孔壁开口处前方熔池液态金属向上方的流动趋势增强,这时匙孔壁开口处前方熔池表面的液态金属隆起的尺寸变大。当焊接时间为  $t+3.8$  ms 时 (图 5(c)), 在匙孔壁前方出现了焊接飞溅,此时匙孔开口处周围的向上的流动趋势变弱。当焊接时间为  $t+3.9$  ms 时 (图 5(d)), 匙孔开口处出现熔池金属向上的流动趋势。当焊接时间为  $t+4.1$  ms 时 (图 5(e)), 匙孔开口处出现熔池金属向上的流动趋势增强,匙孔底部受到熔池金属的挤压作用,出现闭合的现象。

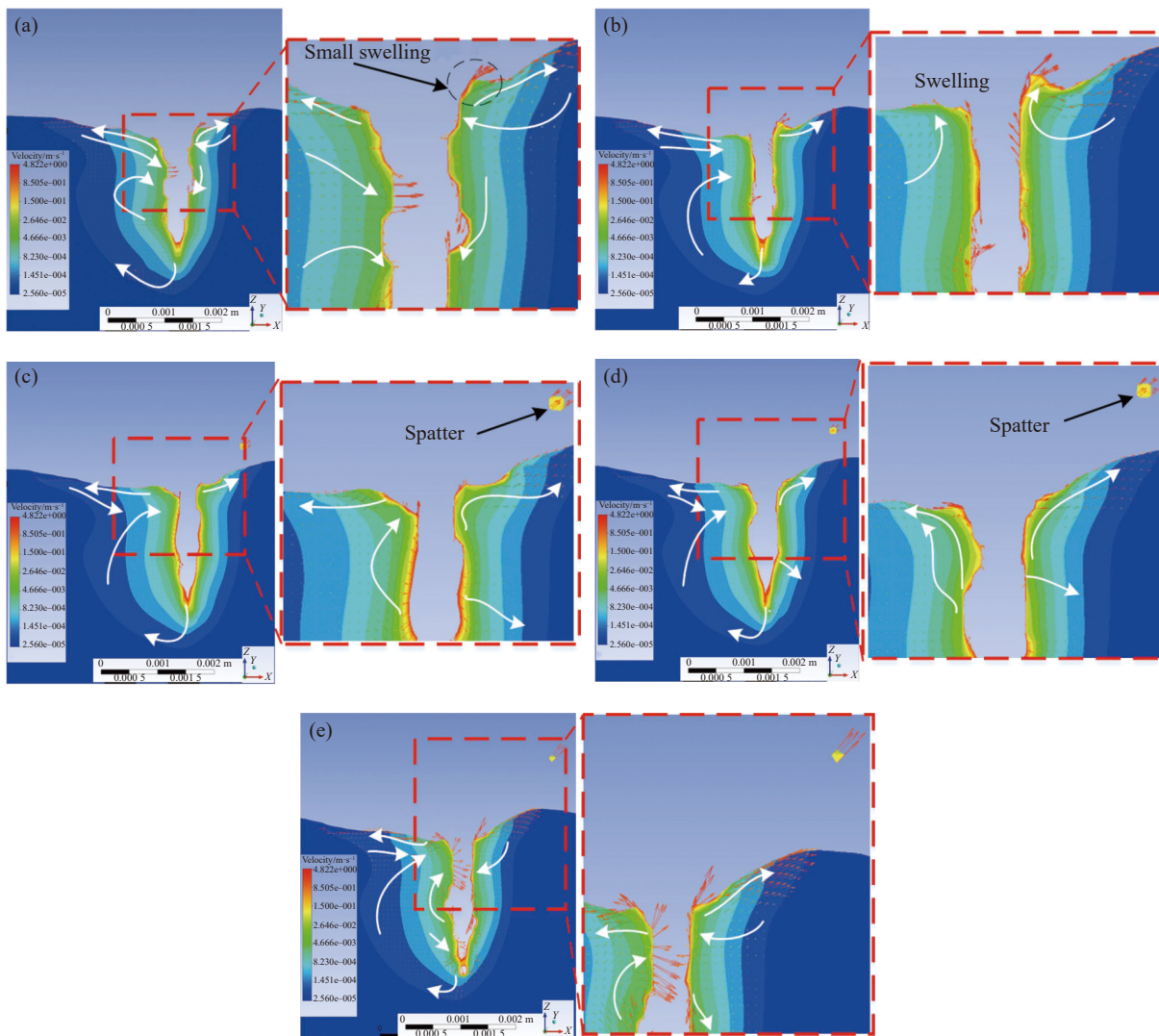


图 5 光斑半径为 0.1 mm 的熔池流场。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.5 Flow field of molten pool with laser spot radius of 0.1 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

图 6 为半径为 0.15 mm 的熔池流场。当焊接时间为  $t$  ms ( $t=25$  ms) 时 (图 6(a)), 出现在 Marangni 力的作用下液态金属由匙孔开口处向熔池边缘的流动趋势, 而且在匙孔壁后方熔池表面出现了一定尺寸的液态金属隆起, 在匙孔底部的后方出现了顺时针的流动漩涡。焊接时间为  $t+3.5$  ms 时 (图 6(b)), 在匙孔壁后方中上部位的流体斜向上和斜向下的流动冲击作用下, 匙孔壁后方熔池表面的隆起转变为小液柱, 匙孔底部在顺时针的流体流动的冲击作用下出现了闭合的趋势。焊接时间为  $t+3.8$  ms 时 (图 6(c)), 在匙孔壁后方的液态金属与液柱分离形成焊接飞溅, 在匙孔壁后方熔池表面出现了液态金属隆起, 焊接飞溅的形成

表明其积累的斜向上的能量足以摆脱表面张力和重力的束缚, 此时在匙孔底部出现了闭合的情况。焊接时间为  $t+3.9$  ms 时 (图 6(d)), 匙孔壁后方的焊接飞溅的数量增多, 而且在匙孔壁后方的熔池表面出现了金属液柱, 匙孔底部后方的顺时针漩涡出现了上移的情况, 熔池流体对匙孔底部的挤压的流动趋势消失。焊接时间为  $t+4.1$  ms 时 (图 6(e)), 在匙孔壁后方的熔池表面出现了较大尺寸的液柱, 但此时液柱根部出现了向下的流动趋势。

半径为 0.2 mm 的熔池流场如图 7 所示, 从焊接时刻  $t$  ms 到  $t+4.1$  ms 时刻, 可以发现在匙孔开口的后方也会出现液态金属的隆起长大过程。通过与图 5、

图 6 对比可以发现,随着光斑半径的增大,匙孔开口处形成隆起的尺寸逐渐变大,而且形成焊接飞溅的液

态金属尺寸逐渐变大。这表明,随着光斑半径的增大,熔池流体流动的剧烈程度有所降低。

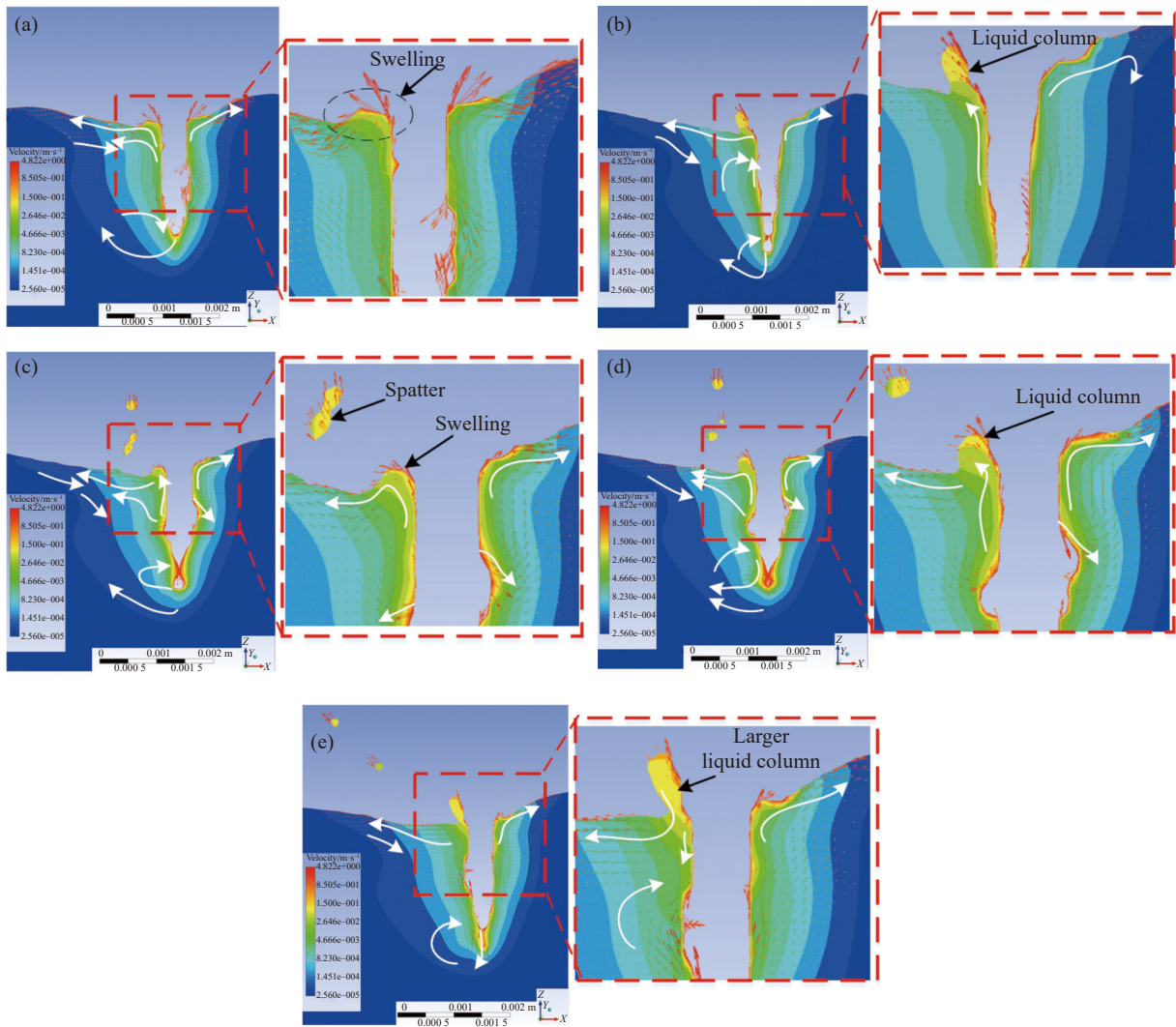


图 6 光斑半径为 0.15 mm 的熔池流场。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.6 Flow field of molten pool with laser spot radius of 0.15 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

分别对光斑半径分别为 0.1、0.15、0.2 mm 的  $t$  ms 到  $t+4.1$  ms 的熔池最大流动速度进行统计,如图 8 所示。可见,当光斑半径到 0.2 mm 时,随着焊接时间的增加,熔池最大流动速度波动相对较小。光斑半径为 0.1、0.15、0.2 mm 的熔池最大流动速度平均值分别为 10.9、10.3、7.9 m/s。随着光斑半径增大, $t$  ms 到  $t+4.1$  ms 的熔池最大流动速度平均值降低。这主要是由于随着激光半径的变大,作用于焊接工件的能量密

度变小,匙孔壁面的蒸发剧烈程度降低,熔池流体流动的稳定性提高,因此,熔池最大流动速度波动幅度降低。

进一步对光斑半径分别为 0.1、0.15、0.2 mm 的  $t$  ms 到  $t+4.1$  ms 的熔池表面长度进行统计,如图 9 所示。可见,随着激光光斑半径的增大,熔池尺寸逐渐增大,光斑半径为 0.1、0.15、0.2 mm 的熔池长度平均值分别为 3.5、3.8、4.1 mm。

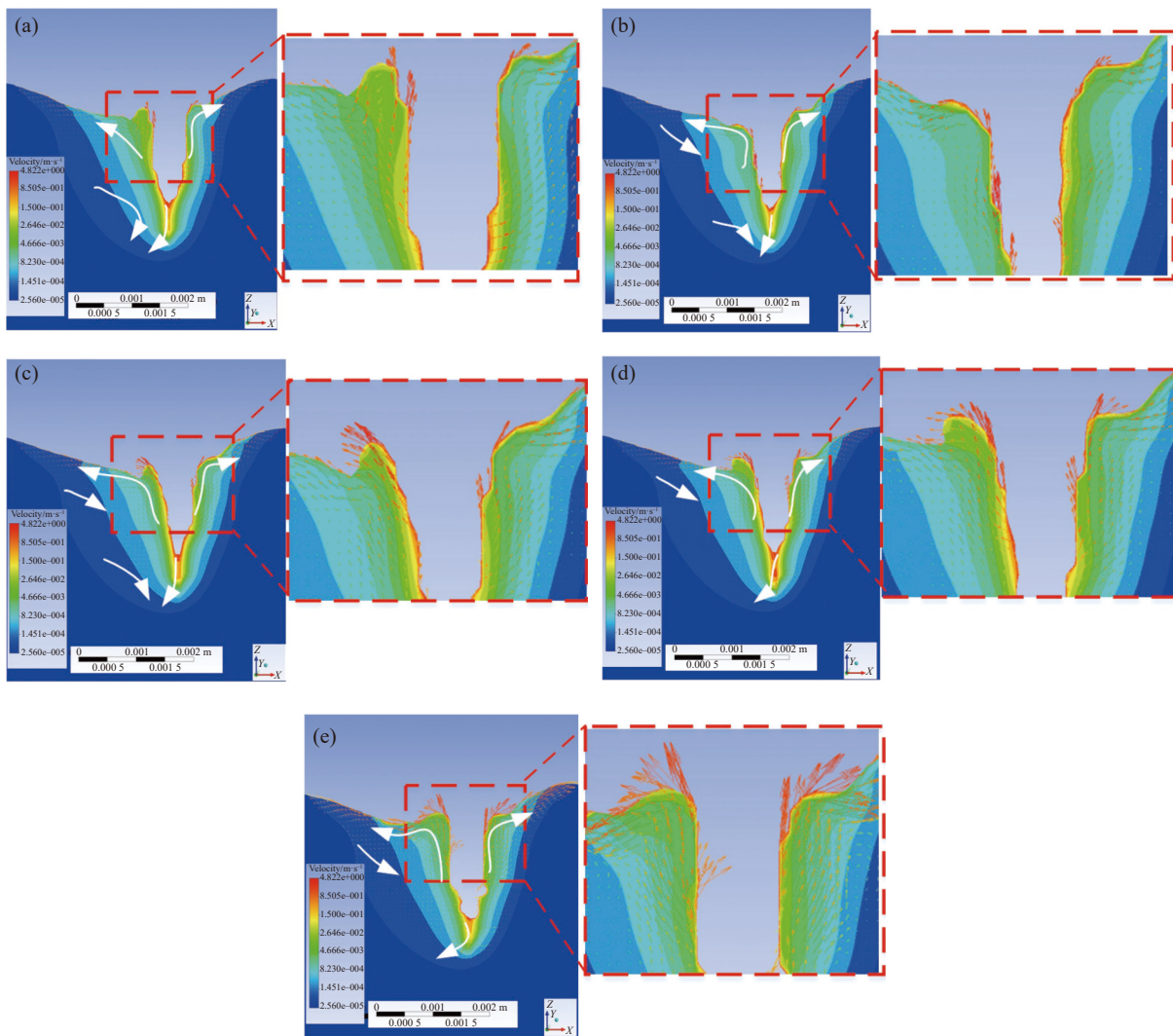


图 7 光斑半径为 0.2 mm 的熔池流场。(a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

Fig.7 Flow field of molten pool with laser spot radius of 0.2 mm. (a)  $t$  ms; (b)  $t+3.5$  ms; (c)  $t+3.8$  ms; (d)  $t+3.9$  ms; (e)  $t+4.1$  ms

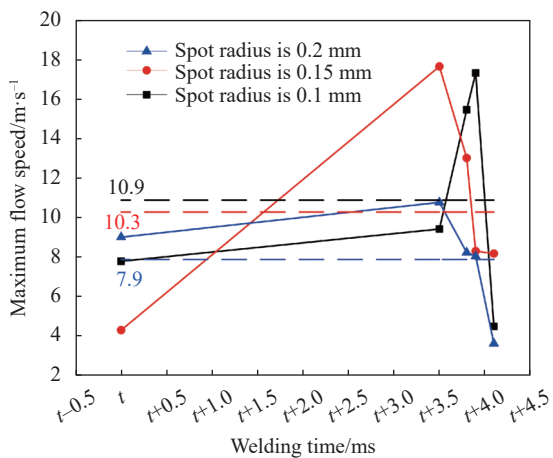


图 8 不同光斑半径下的熔池最大流动速度

Fig.8 Maximum flow velocity of molten pool under different spot radius

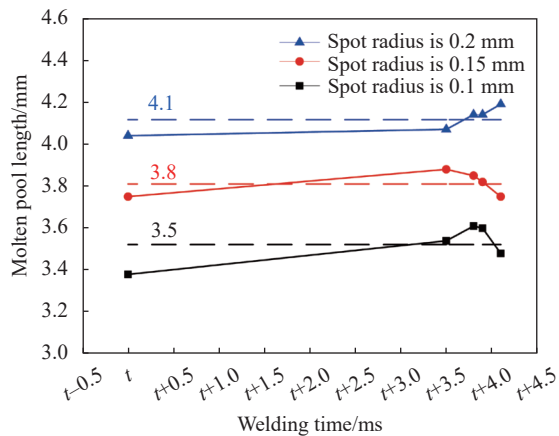


图 9 不同光斑半径下的熔池表面长度

Fig.9 Surface length of molten pool under different spot radius



### 2.3 匙孔壁面气化机理

激光深熔焊过程中,匙孔前壁内侧会出现一定程度的凸起,这将影响作用于匙孔的激光能量的分布,当激光束接触到匙孔前壁时,由于匙孔前壁的倾角的原因导致匙孔前壁气化反冲压力为斜向上的方向。随着焊接过程的进行,这种斜向上的气化反冲压力和整体向上流动的蒸气作用,使匙孔后壁液态金属被产生的蒸气波逐步推向匙孔上方,最后熔池表面形成凸起、液柱和焊接飞溅。匙孔壁面气化和蒸气流的行为示意图如图 10 所示。

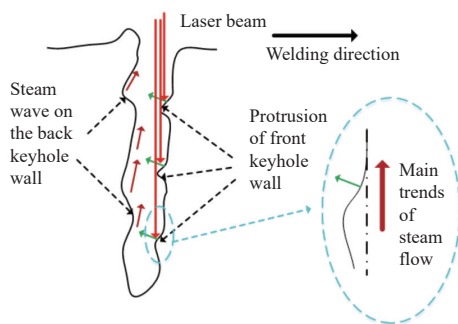


图 10 匙孔壁面气化和蒸气流行为示意图

Fig.10 Schematic diagram of gasification and vapour flow behavior on the wall of the keyhole

### 2.4 模型的验证

文中采用高速摄像机在线监测系统对铝合金激光过程进行在线监测,焊接参数与数值模拟参数相同,光斑半径为 0.2 mm,焊接时刻为 28.5 s,图 11 为该时刻拍摄的熔池图像与数值模拟的熔池图像的对比验证,可以发现高速摄像的熔池轮廓与数值模拟的熔池轮廓基本吻合,进而验证了该模型的准确性。

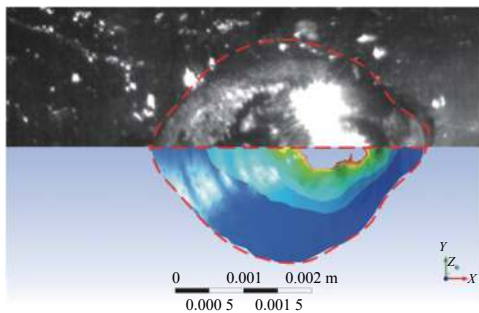


图 11 实验熔池图像与数值模拟熔池图像

Fig.11 Experimental weld pool image and numerical simulation weld pool image

## 3 结 论

基于 Fluent19.0 软件建立了激光焊接热-流耦合模型,研究了激光光斑尺寸分别为 0.1、0.15、0.2 mm 时对匙孔三维瞬态行为及熔池流场的影响,分析了激光光斑尺寸对熔池流场、匙孔的影响规律。具体结论如下:

1) 随着光斑半径的增大,匙孔的深度明显变小。光斑半径分别为 0.1 mm 和 0.15 mm 时,焊接过程中均会出现匙孔底部闭合的情况,当光斑半径为 0.2 mm 时,匙孔未出现闭合的情况,匙孔的稳定性有所提高。

2) 随着光斑半径的增大,熔池最大流动速度波动相对较小。光斑半径为 0.1、0.15、0.2 mm 的熔池最大流动速度平均值分别为 10.9、10.3、7.9 m/s。

3) 随着激光光斑半径的增大,熔池尺寸逐渐增大,光斑半径为 0.1、0.15、0.2 mm 的熔池长度平均值分别为 3.5、3.8、4.1 mm。

### 参考文献:

- [1] Song B W, Li J W. Rapid fabrication of hollow double helix microrobot using femtosecond laser dynamic holographic method [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(9): 2101-2107. (in Chinese)
- [2] Guo X T, Jia Y. Self-calibration method for pulse-3D terrestrial laser scanner based on least-square collocation [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2021, 29(4): 665-673. (in Chinese)
- [3] Zhang L, Xie X C, Wu Y, et al. Performance studies on laser absorbing coating [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 560-565. (in Chinese)
- [4] Huang Z Y, Wang C S, He S, et al. Improvement of the ultrasonic testing accuracy of laser welding fusion width [J]. *Chinese Optics*, 2021, 14(3): 652-660. (in Chinese)
- [5] Zhu M Z, Chen X, Liu X, et al. Situation and key technology of tactical laser anti-UAV [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2021, 50(7): 20200230. (in Chinese)
- [6] Chen G Y, Zhong P X, Cheng S X. Coupling behavior between glass frit and plate during laser-assisted glass frit bonding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(18): 1802005. (in Chinese)
- [7] Peng J, Wang X X, Xu H Q, et al. Effect of droplet filling position on dynamic behavior of molten pool in laser welding [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2020, 49(6): 20200025.

- (in Chinese)
- [8] Matsunawa A. Problems and solutions in deep penetration laser welding [J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2001, 6(6): 351-354.
- [9] Heider A, Sollinger J, Abt F, et al. High-speed X-ray analysis of spatter formation in laser welding of copper [J]. *Physics Procedia*, 2013, 41: 112-118.
- [10] Zhang M J, Chen G Y, Zhou Y, et al. Observation of spatter formation mechanisms in high-power fiber laser welding of thick plate [J]. *Applied Surface Science*, 2013, 280: 868-875.
- [11] Zhang G L, Kong H, Zou J L, et al. Spatter characteristics of high-power fibre laser deep penetration welding and effect of defocus on spatter [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2021, 48(22): 2202008. (in Chinese)
- [12] Wu D S, Hua X M, Li F, et al. Understanding of spatter formation in fiber laser welding of 5083 aluminum alloy [J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 2017, 113: 730-740.
- [13] Amara E H, Fabbro R. Modelling of gas jet effect on the melt pool movements during deep penetration laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2008, 41(5): 055503.
- [14] Chakroborty S, Dutta P. A generalized formulation for evaluation of latent heat functions in enthalpy-based macroscopic model for convection diffusion phase change process [J]. *Metallurgical and Materials Transactions B*, 2001, 32(3): 562-564.
- [15] Peng J, Hu S M, Wang X X, et al. Numerical simulation of effect of filler metal on three-dimensional transient behavior of keyhole and molten pool in laser welding [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(1): 0102003. (in Chinese)

## Effect of laser spot size on the behavior of molten pool and keyhole in laser welding

Peng Jin<sup>1,2,3</sup>, Xu Hongqiao<sup>1</sup>, Wang Yongbiao<sup>4</sup>, Wang Xingxing<sup>1</sup>,  
Zhang Yongzhen<sup>2</sup>, Long Weimin<sup>3</sup>, Zhang Dingyu<sup>1</sup>

(1. Henan International Joint Laboratory of High-efficiency Special Green Welding, Material College, North China University of Water Resources and Electric Power, Zhengzhou 450045, China;

2. National United Engineering Laboratory for Advanced Bearing Tribology, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471023, China;

3. China Academy of Machinery Ningbo Academy

of Intelligent Machine Tool Co., Ltd., Ningbo 315700, China;

4. Henan Key Laboratory of Mechanical Equipment Intelligent Manufacturing, Zhengzhou Light Industry University, Zhengzhou 450002, China)

### Abstract:

**Objective** Laser beam has many advantages, such as good monochromaticity, high brightness, good directivity, etc. Laser technology in laser deep penetration welding process includes a series of complex physical processes, such as the absorption of laser energy by the base metal, the transmission of laser energy through the plasma in the keyhole wall, the change of thermophysical parameters of the base material, the flow behavior of liquid metal in the molten pool, the dynamic fluctuation of keyhole, and phase transformation (melting, solidification of molten pool). In the process of laser welding, when the temperature of the base material in the laser heat source area reaches the critical point of melting and vaporization, the vaporization of the metal produces very high steam pressure, which blows the liquid metal around, thus forming the keyhole. Under the action of recoil pressure, surface tension and other forces, the formed keyhole is always in the process of dynamic fluctuation, that is, the transient change of keyhole. During laser welding, keyhole fluctuates in real time. When the keyhole is closed, welding bubbles will be generated, and welding spatter will be generated on the surface of the molten pool during welding, which will have a great impact on the welding quality. In laser welding, the size of laser spot radius has a

direct impact on laser power density, and different laser power density has an impact on the molten pool flow field and the three-dimensional shape of keyhole. However, there are few studies on the influence of laser spot size on the behavior of laser welding pool and keyhole.

**Methods** Based on the above analysis, the heat flow coupling model of laser welding was established based on Fluent software, the effects of laser spot size on the three-dimensional transient behavior of keyhole and the flow field of molten pool during laser welding were studied. The control equation adopted continuity control equation, momentum conservation equation and energy conservation equation. The source term was introduced into the momentum conservation equation and energy conservation equation. Material thermophysical parameters were introduced into the software, including solid density, liquid density, solidus temperature, liquidus line temperature, gas line temperature, latent heat of fusion, latent heat of vaporization, thermal expansion coefficient, heat transfer coefficient, surface tension gradient coefficient and other parameters.

**Results and Discussions** When the light spot radius was 0.1 mm (Fig.2), welding spatter appeared in front of the keyhole wall, the bottom of the keyhole was closed, and the outer wall of the keyhole was convex at the middle of the keyhole rear wall and the middle and lower part of the keyhole front wall; When the light spot radius was 0.15 mm (Fig.3), the liquid metal behind the keyhole wall was separated from the liquid column to form welding spatter, and the liquid metal bulge appeared on the surface of the molten pool behind the keyhole wall, and the closure occurred at the bottom of the keyhole. When the light spot radius was 0.2 mm (Fig.4), the keyhole was not closed, and the stability of the keyhole was improved.

**Conclusions** The conclusion of the paper was as follows: (1) With the increase of the spot radius, the depth of the keyhole decreased significantly. When the light spot radius was 0.1 mm and 0.15 mm respectively, the bottom of the keyhole was closed during welding. When the light spot radius was 0.2 mm, the keyhole was closed, and the stability of the keyhole was improved. (2) With the increase of the spot radius, the fluctuation of the maximum flow velocity of the molten pool was relatively small. The average maximum flow velocity of molten pool with spot radius of 0.1 mm, 0.15 mm and 0.2 mm is 10.9 m/s, 10.3 m/s and 7.9 m/s respectively. (3) With the increase of the laser spot radius, the size of molten pool gradually increased, and the average length of molten pool with spot radius of 0.1 mm, 0.15 mm and 0.2 mm was 3.5 mm, 3.8 mm and 4.1 mm, respectively.

**Key words:** laser welding; spot size; keyhole; molten pool

**Funding projects:** National Natural Science Foundation of China (51705151); Post-doctoral Scientific Research Project of Henan Province (202003076); Key R & D and Promotion Project of Henan Province (Science and Technology Research) (222102220082); Provincial Innovation and Entrepreneurship Training Program for undergraduate students in Henan Province (S202110078023); Project of the Research Foundation for High-level Talents in North China University of Water Resources and Electric Power (201705006); 2021 Education Reform Project-Youth Project in North China University of Water Resources and Electric Power; 2022 Key R & D and Promotion Project of Henan Province (Science and Technology Research) (232102220052); Innovation and entrepreneurship training program in North China University of Water Resources and Electric Power (2022XA001)