

激光深熔焊熔池三维瞬态行为数值模拟

夏胜全 何建军* 王巍 吕学超 张彤燕

中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621907

摘要 考虑熔池蒸气反冲压力、表面张力、热浮力等力学因素和熔池内、外部的对流、辐射等热学过程,采用沿深度方向衰减的旋转高斯体热源简化熔池对激光的吸收,采用流体体积法追踪气/液界面,采用液相体积分法法和熔-孔隙度法分别处理熔化凝固潜热及液-固糊状区的动量损失,建立了激光深熔焊接熔池的三维瞬态模型。运用该数学模型获得了不锈钢激光深熔焊接过程中熔池及小孔温度场和流场的瞬态变化。计算表明,熔池最高温度呈现线性增长、趋于平稳和小幅振荡三个阶段;小孔在焊接过程中呈现前倾和后倾两种姿态,且存在周期性振荡行为。计算得到的熔池形状和焊缝横截面的试验结果基本吻合,小孔振荡行为也从相关文献的实验结果中得到了验证。

关键词 激光技术; 三维瞬态模型; 流体动力学; 深熔焊; 振荡

中图分类号 TG402

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1102004

Simulation of Three-Dimensional Transient Behavior of Molten Pool in Laser Deep Penetration Welding

Xia Shengquan He Jianjun Wang Wei Lü Xuechao Zhang Tongyan

China Academy of Engineering Physics, Mianyang, Sichuan 621900, China

Abstract We set up the three-dimensional transient model of laser deep welding considering the mechanical factors such as evaporative recoil back pressure, the surface tension, the thermal buoyancy and the thermal parameters such as the convection and radiation in and out of pool. In the model, the rotary Gauss body heat source attenuation along depth direction was applied to solving the laser absorption of molten pool, the volume of fluid method was adopted to realize the tracking of gas-liquid interface, and the liquid volume fraction method and enthalpy-porosity technique were used to compute the latent heat of molten metal solidification and the momentum loss in the liquid-solid mush zone. Then the transient temperature and flow field of pool and keyhole were obtained in the laser deep penetration welding of stainless steel with this numerical model. The results show that there are three stages for the maximum temperature in the welding, which are the linear growth, the tending to stable and the small oscillation, and there are two kinds of keyhole orientations, forward and backward, and there is periodic oscillation for keyhole in the welding. The simulation results of final weld formation agree with experimental data of weld cross section well, and the oscillatory behavior of keyhole is also verified by relevant references.

Key words Laser technique; three-dimensional transient model; fluid dynamics; deep penetration welding; oscillation

OCIS codes 140.3390;140.6810; 140.3380

1 引言

激光焊接作为一种重要的加工技术得到了日益广泛的应用和研究^[1]。物理过程相对热导焊更为复杂的深熔焊是激光焊接的典型代表^[2],具有高深宽比和低应力特点^[3]。但单一采用实验方式进行研究困难较大。自 Rosenthal^[4]建立移动线热源的模型以来,很多学者均采用数值模拟研究激光深熔焊熔池和小孔的动态行

收稿日期: 2016-06-23; 收到修改稿日期: 2016-07-24

作者简介: 夏胜全(1982—),男,博士,工程师,主要从事高能束焊接过程及仿真方面的研究。

E-mail: xiashengquan2001@163.com

* 通信联系人。E-mail: arrowblue81@163.com

为。Peretz^[5]最先考虑固/液相变建立了二维移动线热源模型,发展后的三维热源模型主要有高斯热源、双椭球热源、锥状热源、旋转体热源、光线追踪热源等,也越来越关注小孔的动态行为。Rai 等^[6]建立了典型的考虑等离子、匙孔的传热作用及 Marangoni 应力等因素的模型。Ki 等^[7]建立了综合考虑三维小孔和熔池的瞬态演化、小孔内部的蒸气运动、熔池流体流动和传热,以及多重反射菲涅耳吸收、蒸发、熔化、凝固等重要物理现象的数学模型。然而该模型中小孔边界两侧的气-液流动速度不连续,小孔不稳定;小孔不稳定时得到的熔池内部流场结果与 X 射线试验结果不吻合。Mazumder 等^[8]提出的基于水平集(Level Set)法的多相模型,能同时模拟金属蒸气、熔池流动,但计算量很大,且计算结果与试验结果相差较大。Sana 等^[9]采用 FLUENT 软件,结合双椭球热源,探讨了保护气体对激光焊接熔池和温度场的影响,模型中未考虑熔池表面变形。汪任凭^[10]通过流体体积(VOF)法追踪匙孔的自由面,对激光深熔焊接过程传输现象进行数值模拟,却没有考虑小孔振荡。Jungho 等^[11]采用 VOF 法在 Flow3D 平台上实现了脉冲激光定点焊三维瞬态模型。庞盛永^[12]采用 Level Set/Particle Level Set 法追踪小孔自由界面,同时对小孔及熔池的演化以及熔池内部流动和传热等进行模拟,考虑了小孔的振荡行为,且计算结果和 X-射线结果吻合。在其较新的计算模型中,同时考虑了周围环境压力对熔池小孔的影响^[13]。Tan 等^[14]在采用 Level Set 法建立的小孔动态模型中,考虑了辅吹气体的影响。Mickael 等^[15]采用 Level Set 法建立了激光定点焊的二维轴对称模型,计算熔池形状和实际焊缝尺寸较为吻合,但是在其将模型转化为三维模型时做了较多简化。Kuang 等^[16]将高斯面热源模型和体热源模型相结合建立了 Nd:YAG 脉冲激光焊的二维轴对称模型,采用实际焊缝形状作为验证条件,忽略了流体流动。

综上所述,综合考虑深熔焊三维熔池和小孔瞬态振荡行为的研究相对较少,本文采用沿深度方向衰减的旋转高斯曲面体热源模型,考虑深熔焊过程中小孔对激光的多重反射菲涅耳吸收以及等离子体(或金属蒸气)对熔池表面的加热,考虑表面张力、蒸气反冲压力及深熔小孔的振荡行为,结合流体动力学原理,建立激光深熔焊熔池及小孔的三维瞬态数学模型,并采用相应的试验数据和文献结论进行对比。

2 模型建立

激光深熔焊物理过程非常复杂,不仅需要考虑材料的熔化与凝固,还要考虑金属蒸气对熔池的挖掘从而形成小孔。为简化计算,建立模型前作如下基本假设:

- 1) 熔池中的液态金属假设为不可压缩的牛顿流体,层流状态;
- 2) 固-液相变时密度不发生显著变化,热浮力采用 Boussinesq 近似;
- 3) 只考虑金属蒸气/等离子体对熔池的影响,不考虑其内部的复杂流动行为;
- 4) 不考虑熔体与气体间的化学反应。

2.1 计算域及控制方程

为提高计算速度,建立一半对称模型,且只保留焊缝上方附近一定范围内的气体域,如图 1 所示。

图 1 中平面 $DCHG$ 和平面 $CNIH$ 即为中心对称面,母材左右两侧为壁面,焊接方向沿着笛卡儿坐标系的 x 方向。基本的控制方程有连续性方程、动量守恒方程和能量守恒方程,分别描述如下。

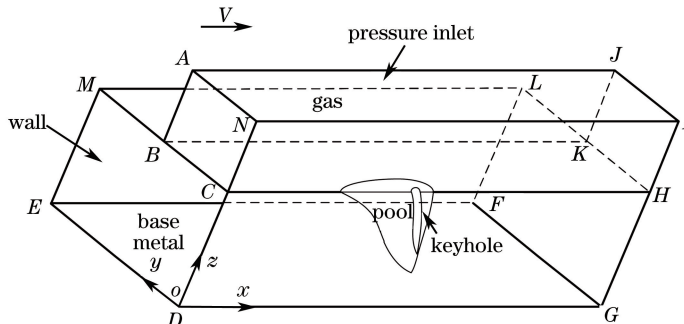


图 1 主要计算域

Fig. 1 Main computational domain

连续性方程为

$$\nabla \cdot (\rho \mathbf{u}) = 0, \quad (1)$$

动量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho \mathbf{u})}{\partial t} = -\rho \nabla \cdot (\mathbf{u} \cdot \mathbf{u}) + \nabla \cdot (\mu \nabla \mathbf{u}) - \nabla p + S_M, \quad (2)$$

能量守恒方程为

$$\frac{\partial(\rho H)}{\partial t} = -\nabla \cdot (\rho \mathbf{u} H) + \nabla \cdot \left(\frac{k}{C_p} \nabla H \right) + S_H. \quad (3)$$

(1)~(3)式中 ρ 、 μ 、 k 、 C_p 、 H 分别为材料的密度、动力黏度、热导率、比热容和熔化焓； \mathbf{u} 为流体速度，包括 x 、 y 和 z 三个方向的速度分量，分别为 u 、 v 和 w ； p 为压力； S_M 、 S_H 分别为动量源项（表面张力、蒸气反冲压力源项等）和能量源项（焊接热源、对流和辐射等源项），采用附加源项法施加。

2.2 热源模型

依据激光深熔焊焊缝的基本特点，主要采用沿深度方向衰减的旋转高斯曲面体热源模型，其生热率 $q(x, y, z)$ 为

$$q(x, y, z) = \frac{9\eta P}{\pi H(t) R^2 [1 - \exp(-3)]} \exp\left\{-\frac{9(x^2 + y^2)}{R^2 \ln\left[\frac{H(t)}{z}\right]}\right\}, \quad (4)$$

式中 η 、 P 、 R 分别为热源效率、激光功率和激光光斑直径， $H(t)$ 为熔池深度，计算过程中每个时间步计算熔池深度，并将计算值代入(4)式。热源效率近似等于材料对激光的吸收系数，取 $0.65^{[17]}$ 。

2.3 蒸气反冲压力

Semak 等^[18]提出的蒸气反冲压力模型为

$$p_r = 0.54AB_0 T^{-0.5} \exp\left(-\frac{U}{kT}\right), \quad (5)$$

(5)式中 A 、 B_0 均为与材料相关的常数， U 为每个原子的蒸发潜热， T 为小孔的壁面温度， k 为波尔兹曼常数。如图 2 所示，计算过程中采用上述公式对文献[19]中金属 Fe 的蒸发压力数据进行拟合。拟合公式为

$$p_r = \frac{5.270155 \times 10^{15}}{\sqrt{T}} \exp\left(-\frac{72859.42768}{T}\right), \quad (6)$$

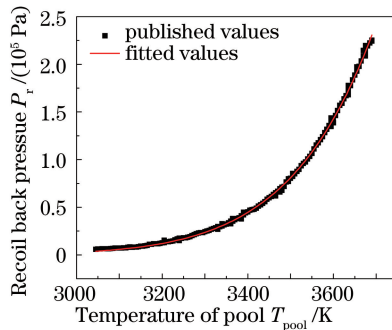


图 2 Fe 金属蒸气压力数据拟合
Fig. 2 Fe vapor pressure fitting

2.4 气/液界面追踪及熔化凝固处理

充分考虑熔池上下表面变形，采用 VOF 法跟踪气/液界面，通过处理控制体中流体和控制体体积分数的函数获取自由面。采用 Young 几何重构技术实现较高精度的界面重构。

相变潜热问题可通过液相体积分法处理，糊状区的动量损失采用焓-孔隙度法^[20]近似。用多孔介质处理相变的控制体，孔隙度等于液相体积分数 f_1 ；通过计算每个控制体 f_1 来估算固液界面。糊状区为液相分数在 $0 \sim 1$ 之间的区域，看作孔隙度从 0 到 1 递增的多孔介质，动量损失源 S_{mush} 满足

$$S_{\text{mush}} = \frac{(1 - f_1)^2}{f_l^3 + \epsilon} A_{\text{mush}} \cdot \mathbf{v}, \quad (7)$$

式中 ϵ 为取值很小的常数; A_{mush} 为与糊状区枝晶形貌有关的常数; \mathbf{v} 为该单元的速度矢量。

2.5 边界条件

在固/液相界面上,

$$u = 0, \nu = 0, \omega = 0, \quad (8)$$

熔池上表面自由面的连续性条件为

$$\mu \frac{\partial u}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial x}, \mu \frac{\partial \nu}{\partial z} = \frac{\partial \gamma}{\partial T} \frac{\partial T}{\partial y}, \quad (9)$$

中心对称面绝热边界为

$$\frac{\partial T}{\partial y} = 0, \quad (10)$$

中心对称面的动量边界条件为

$$\nu = 0, \frac{\partial u}{\partial y} = 0, \frac{\partial \nu}{\partial y} = 0, \quad (11)$$

对流换热边界条件为

$$q_{\text{conv}} = h_c (T - T_\infty), \quad (12)$$

热辐射边界条件为

$$q_{\text{rad}} = \sigma \epsilon (T^4 - T_\infty^4). \quad (13)$$

式中 q_{conv} 、 q_{rad} 、 h_c 、 ϵ 、 T_∞ 、 σ 分别为对流散热、辐射散热、对流换热系数、发射率、环境温度和斯特藩-玻尔兹曼常数。

3 计算及工艺实验条件

完全采用变密度的正六面体划分网格,最小网格尺寸 0.04 mm,划分后节点数 316575,气体层厚度 1 mm,母材厚度 2 mm,采用自适应时间步长,最小时间步长 1×10^{-6} s,最大时间步长 4×10^{-5} s,考虑到实际计算量,参考相关文献,计算时间约 20 ms。计算过程中实时监测并输出熔池的最高温度,熔池的熔深和熔宽,小孔的体积、尺寸等。材料为奥氏体不锈钢,主要材料属性如图 3 所示。焊接采用 Nd:YAG 盘式激光器,输出功率为 800 W,焊接速度为 1.0 m/min,光斑直径为 0.4 mm。

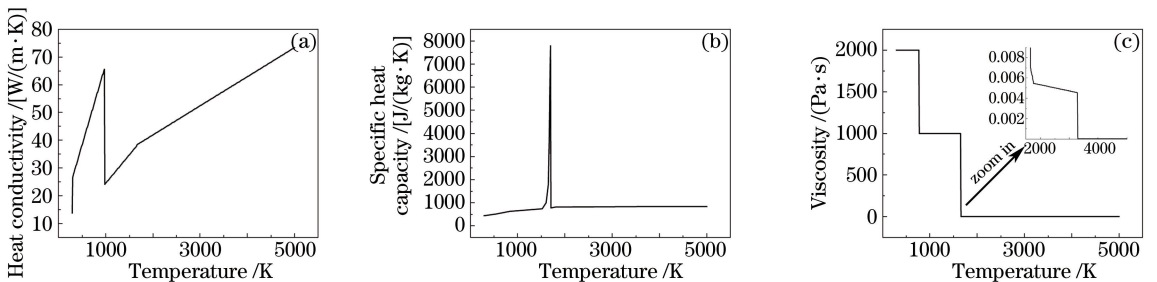


图 3 主要材料属性。(a) 热导率; (b) 比热容; (c) 黏度

Fig. 3 Main material properties. (a) Heat conductivity; (b) specific heat capacity; (c) viscosity

4 计算结果及讨论

4.1 熔池最高温度及熔池形状

熔池最高温度可以在一定程度上反映熔池熔化和蒸发过程,因此选熔池最高温度为研究对象;熔池形状主要包括熔池宽度和熔池深度。图 4 所示为焊接过程中熔池的最高温度随时间的变化曲线。

由图 4 可知,在 3 ms 内熔池最高温度急剧上升到母材沸点,此时蒸发、对流、辐射相对较小,温度处于线

性增长阶段;达到沸点后蒸发、对流和辐射等由于温度的升高和熔池体积的增加而加强,熔池热流入和流出趋于平衡,温度趋于平稳;小孔振荡形成时,由于等离子(或金属蒸气)影响,热输入和输出开始小幅振荡。此时熔池内存在剧烈蒸发,在激光热输入和热损失(蒸发、对流、辐射等)的动态平衡作用下,熔池最高温度在一个较小的范围内振荡。图5为熔池深度和横截面宽度随时间的变化曲线。由图5可知,一定时间后,熔池的宽度和深度相对平稳。一般认为,焊接达到准稳态后,熔池温度分布相似,熔深基本稳定。此时获得的熔深和熔池冷却后形成焊缝的熔深基本一致。

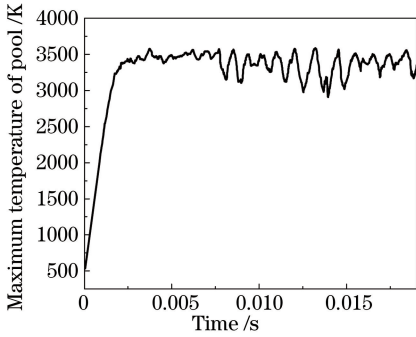


图4 熔池最高温度随时间的变化
Fig. 4 Time history of maximum temperature of pool

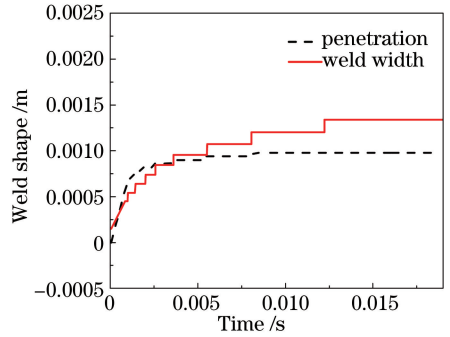


图5 熔池深度和横截面宽度随时间的变化
Fig. 5 Time history of penetration and cross section width of pool

4.2 熔池温度场及流场的瞬态行为

图6分别为1.658, 2.236, 3.616, 9.863 ms 4个典型时刻的焊缝纵截面的温度场和流场行为。图6中黑色箭头表示熔体流动方向和大小,由图6可知,在1.658 ms时刻,深熔焊还未形成,处于热导焊状态;随着蒸发的加强(2.236 ms时刻),蒸气反冲压力增大,在蒸气反冲压力的作用下,小孔开始形成;到3.616 ms时刻,向后倾斜的小孔基本形成;图6(d)中9.863 ms为典型的熔池内部空腔形成时刻,由于小孔倾斜,造成部分区域在流动过程中封闭,该区域中形成的气泡如果未来得及析出,将形成典型的焊缝气孔,该类气孔称为小孔型气孔。其形成过程可分为三个阶段^[2]:1) 由于小孔内压力失衡或金属蒸气向外喷发引起涡流,保护气体被卷入小孔内;2) 小孔壁局部强烈蒸发产生凹陷或小孔底部失稳坍塌,形成与小孔分离的封闭空间,生成主

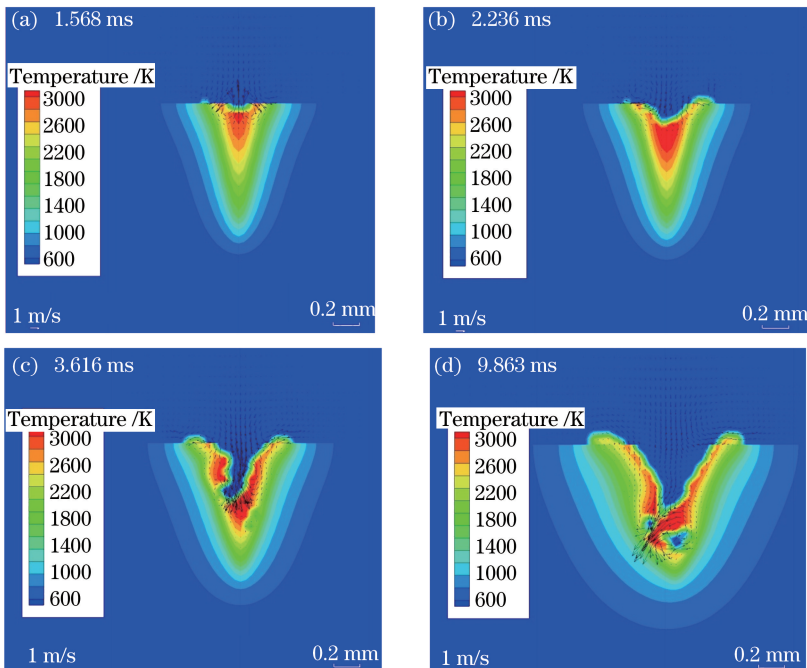


图6 典型时刻熔池纵截面温度及流场

Fig. 6 Temperature and flow field of longitudinal section of pool at typical moment

要包含惰性气体的气泡;3) 气泡来不及逸出残留在焊缝内,形成气孔。该气孔主要存在于熔池的中下部^[21-22],一方面是因为小孔口的闭合作用,另一方面可能是因为气泡从小孔底部产生,如图 6(d)所示,来不及上浮逸出,同时中下部流动相对复杂,导致气泡难以上浮逸出。

4.3 熔池温度的实验验证

熔池冷却后形成焊缝,可选取焊缝横截面形状作为实验数据来检验数学模型的适应性^[23-24]。熔池达到准稳态后的焊缝横截面与实验结果进行对比,如图 7 所示。熔深、熔宽的计算值分别为 1.02 mm 和 1.34 mm;熔深、熔宽的实验值分别为 1.03 mm 和 1.47 mm。熔深、熔宽的计算值和实验值吻合较好。但半熔深对应的宽度比实验值小,可能是因为实际焊接过程中,形成的等离子体(或金属蒸气)也对熔池有明显的加热作用,而本数学模型中采用旋转高斯体热源,对等离子体的影响考虑较少,存在一定的改进空间。

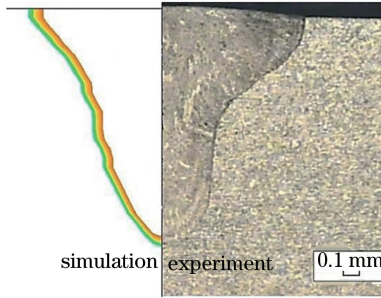


图 7 数学模型温度场实验验证

Fig. 7 Experimental verification of temperature field in the mathematical model

4.4 小孔动态行为

熔池小孔的倾斜方向不是唯一的,有必要选取典型倾斜方向的小孔作为研究对象。此外,在达到准稳定状态后,虽然熔池的深度和宽度相对稳定,然而小孔在不停地振荡,且存在小孔口闭合现象。

4.4.1 小孔附近温度场及流场

图 8 所示为小孔后倾和前倾两种典型状态下沿焊缝纵截面一半模型的小孔附近的温度场及流场分布。

图 8(a)中小孔后倾时,高温区域位于小孔前壁下部,存在剧烈蒸发,蒸气反冲压力使得下部流体继续向下流动,上部流体由小孔中心向四周流动,同时在小孔前壁,还能看到凸状隆起,与 Matsunawa 等^[25]的分析结果一致。在小孔后方,可以观察到流体漩涡,图 8(b)中,小孔前倾,高温区域相对较小,小孔后壁的流体有向前运动的趋势,同样在负温度系数的表面张力等作用下,上部流体由小孔中心向四周流动。图 8(a)、(b)中均能看到流体由中心向四周流动造成的小孔周围熔体高于母材表面的现象,最终形成焊缝的余高。

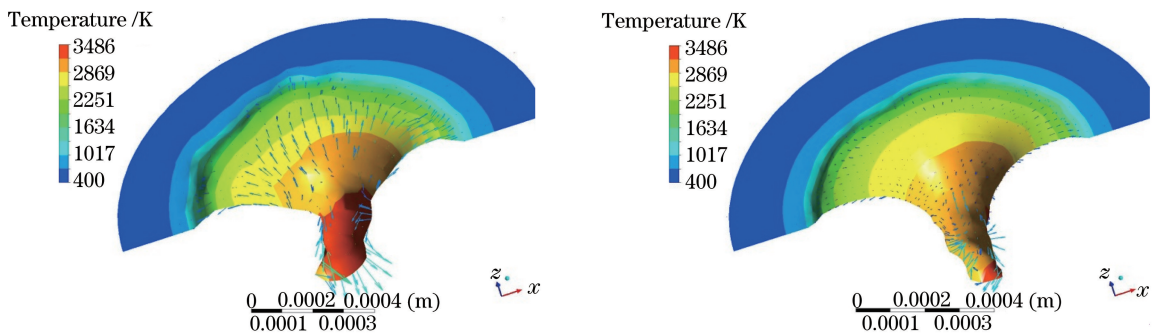


图 8 典型小孔周围温度场及流场。(a) 小孔后倾;(b) 小孔前倾

Fig. 8 Typical temperature and flow field around keyhole. (a) Backward-style keyhole; (b) forward-style keyhole

激光深熔焊接过程中,一方面底部材料吸收热量较少,蒸发速度较慢,上、下吸收热量不一致,在移动热源条件下小孔容易弯曲。另一方面,小孔的具体形状为蒸气反冲压力、熔池流体压力、表面张力及蒸气流的剪切摩擦力综合作用的结果,在小孔向下挖掘的过程中,某一方面不平衡,就可能造成小孔的弯曲,发生前倾或后倾。前倾和后倾两种姿态可能相互转化,图 9 为后倾小孔转化为前倾小孔的一种情况。图 9(a)中小孔后倾,激光束主要照射在小孔前壁,造成前壁的剧烈蒸发,喷射的金属蒸气对相应位置的小孔后壁造成强烈

的冲击,使得小孔后壁对应位置出现凹坑,如图 9(b)所示,在流体压力等作用下最终转化为前倾形式。同样,前倾小孔也可能因为后壁蒸气作用变为后倾小孔,原理和上述情况类似。由于小孔受力和熔池流动复杂,这种转化的出现不是必然的,具有一定的随机性。然而由于焊接速度的影响,激光束和工件相对运动使得底部材料吸收的热量较少,气化速度较慢,形成弯曲的小孔^[26],即后倾小孔形成的几率更大,且焊接速度越大,弯曲角度越大^[27]。计算发现,出现后倾小孔的时间确实长于前倾小孔,20 ms 内后倾小孔出现时间约为前倾小孔的 1.5 倍。

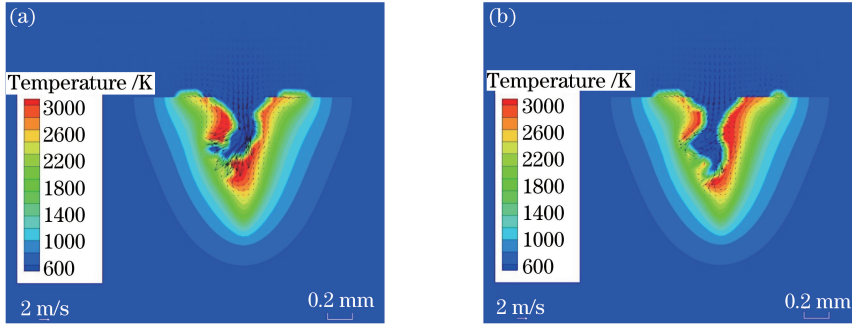


图 9 蒸气反冲压力驱动后倾小孔转化为前倾小孔。(a)前壁的蒸气反冲压力作用于后壁;(b)后壁形成凹坑

Fig. 9 Change from backward-style keyhole to forward-style driven by evaporative recoil back pressure. (a) Action to back wall of evaporative recoil pressure from anterior wall; (b) formation of pit on back wall

4.4.2 小孔体积变化行为

小孔体积可整体上反映小孔的动态行为。图 10 所示为小孔体积及熔池体积的变化行为,可以看到形成小孔后,小孔体积出现大小交替变化,此时小孔大小处于振荡状态。这可能为热源周期性作用的结果。当小孔形成时,产生的等离子体(或金属蒸气)对激光有一定的屏蔽和散射作用,熔池吸热减少,温度有所下降,而由前述所知,温度和反冲压力几乎呈指数关系,温度的变化较小使反冲压力变化较大,加上金属熔体的回流作用,使得小孔有闭合趋势,造成小孔体积减小。温度的降低又导致等离子体(或金属蒸气)的减少,对激光的屏蔽和散热减弱,使得温度再次回升。上述周期行为造成了小孔体积的周期性变化,由图 10 可知,计算得到的小孔体积振荡周期约为 1 kHz。计算结果表明,熔池体积还在增大,但是其增长速度随时间增加而减缓。

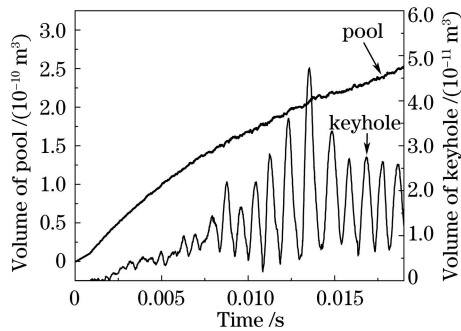


图 10 小孔体积及熔池体积随时间的变化

Fig. 10 Time history of volume of pool and volume of keyhole

4.4.3 小孔形貌变化

为了进一步了解小孔几何尺寸的变化,选取小孔深度和宽度作为研究对象,图 11 为小孔深度和宽度随时间的变化。由图 11 可知,小孔的深度和宽度也处于动态变化过程中,与小孔体积的周期性振荡相吻合。

4.4.4 小孔振荡行为的验证

采用实验手段研究小孔动态行为相对复杂,成本较高,但是国内外也有很多学者直接采用实验手段研究激光深熔焊小孔的振荡行为,很多学者发现,即使是连续激光焊接,小孔在焊接过程中也存在周期性的振荡行为。Matsunawa 等^[25]通过 X 射线和高速摄影相结合的装置拍摄了 304 不锈钢的 CO₂ 激光深熔焊小孔行为,观察到等离子体和小孔的周期性行为,图 12 为其实验结果的示意图。Wang 等^[28]则直接采用高速摄

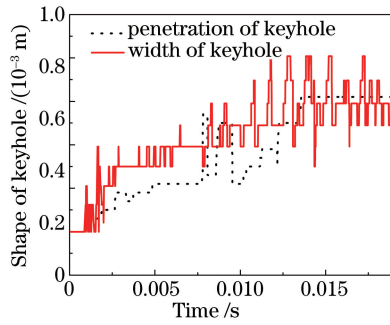


图 11 小孔深度和宽度随时间的变化

Fig. 11 Time history of penetration and width of keyhole

影观察深熔焊等离子体振荡行为,采用光纤激光器连续焊接 ZL114 的等离子体振荡周期约为 $450\sim 600\ \mu\text{s}$ 。Klein 等^[29]建立了激光焊接小孔数学模型,小孔出现多个方向上的振荡,其频率可达 $1000\ \text{Hz}$,与其试验中声光信号检测到的频率处于同一水平。计算结果与上述文献得出的振荡周期和数量级基本一致。

type 304 (8 mm ^w), $P_0=15\ \text{kW}$, $v=25\ \text{mm/s}$, $f_d=0\ \text{mm}$ ($f=381\ \text{mm}$), shielding gas: N_2 , $R_g=8.5\times 10^{-4}\ \text{m}^3/\text{s}$										
plasma	6 mm metallic plasma	gas plasma	specimen							
keyhole	3 mm									no keyhole
time	$t+0\ \text{ms}$	$t+0.9\ \text{ms}$	$t+1.8\ \text{ms}$	$t+2.7\ \text{ms}$	$t+3.6\ \text{ms}$	$t+4.5\ \text{ms}$	$t+5.4\ \text{ms}$	$t+6.3\ \text{ms}$	$t+7.2\ \text{ms}$	$t+8.1\ \text{ms}$
plasma		plasma								
keyhole	no keyhole	no keyhole	no keyhole							
time	$t=9\ \text{ms}$	$t=27.9\ \text{ms}$	$t=28.8\ \text{ms}$	$t=29.7\ \text{ms}$	$t=30.6\ \text{ms}$	$t=31.5\ \text{ms}$	$t=32.4\ \text{ms}$	$t=33.3\ \text{ms}$	$t=34.2\ \text{ms}$	$t=35.1\ \text{ms}$

图 12 文献[25]中小孔动态行为的实验结果

Fig. 12 Experiment data of dynamic behavior of keyhole in reference [25]

数学模型得到的小孔振荡现象和文献基本吻合,一定程度上说明了数学模型的适用性。此外,图 11 中 $t+5.4\ \text{ms}$ 、 $t+6.3\ \text{ms}$ 和 $t+7.2\ \text{ms}$ 时刻均能观察到前倾小孔的存在,也从侧面验证了小孔存在前倾和后倾两种姿态的结果。

5 结 论

熔池最高温度在焊接开始后 $3\ \text{ms}$ 内达到母材沸点,快速气化,之后最高温度在沸点附近振荡;熔池最高温度呈现线性增长、趋于平稳和小幅振荡三个阶段。激光深熔焊过程中,熔池形状基本不变,但小孔处于振荡过程中,振荡频率约为 $1\ \text{kHz}$,且小孔存在前倾和后倾两种姿态。激光深熔焊过程中小孔型气孔由于小孔口的闭合作用容易存留于熔池中下部。

参 考 文 献

- 1 陈彦宾. 现代激光焊接技术[M]. 北京: 科学出版社, 2005: 2.
- 2 陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 11.
- 3 Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool support system for high power laser beam welding of austenitic stainless steel[J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2014, 214(3): 578-591.
- 4 Rosenthal D. The theory of moving sources of heat and its application to metal treatments[M]. Cambridge: ASME, 1946: 849-866.
- 5 Peretz R. Workpiece temperature distribution for deep penetration welding with high energy focused beams[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 1986, 7(2): 69-81.
- 6 Rai R, Elmer J W, Palmer T A, *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*, 2007, 40(18): 5753-5766.
- 7 Ki H, Mazumder J, Mohanty P S. Modeling of laser keyhole welding: Part I. Mathematical modeling, numerical methodology, role of recoil pressure, multiple reflections, and free surface evolution[J]. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 2002, 33(6): 1817-1830.
- 8 Ki H, Mazumder J, Mohanty P S. Modeling of laser keyhole welding: Part II. Simulation of keyhole evolution, velocity, temperature profile, and experimental verification[J]. *Metallurgical and Material Transaction A*, 2002, 33(6): 1831-1842.
- 9 Bannour S, Abderrazak K, Mhiri H, *et al.* Effects of temperature-dependent material properties and shielding gas on molten pool formation during continuous laser welding of AZ91 magnesium alloy[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(8): 2459-2468.
- 10 Wang Renping. Numerical simulation of transport phenomena during laser keyhole welding [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2011.
汪任凭. 激光深熔焊接过程传输现象的数值模拟[D]. 北京: 北京工业大学, 2011.
- 11 Cho J H, Farson D F, Hollis K J, *et al.* Numerical analysis of weld pool oscillation in laser welding[J]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2015, 29(4): 1715-1722.
- 12 Pang Shengyong. A study on the transient keyhole and moving weld pool behaviors and mechanisms of deep penetration laser welding[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2011.
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.
- 13 Pang S Y, Hirano K, Fabbro R, *et al.* Explanation of penetration depth variation during laser welding under variable ambient pressure[J]. *Journal of Laser Applications*, 2015, 27(2): 022007.
- 14 Tan W D, Shin Y C. Analysis of multi-phase interaction and its effects on keyhole dynamics with a multi-physics numerical model[J]. *Journal of Physics D*, 2014, 47(34): 345501.
- 15 Courtois M, Carin M, Le Masson P, *et al.* A complete model of keyhole and melt pool dynamics to analyze instabilities and collapse during laser welding[J]. *Journal of Laser Applications*, 2014, 26(4): 042001.
- 16 Kuang J H, Hung T P, Chen C K. A keyhole volumetric model for weld pool analysis in Nd:YAG pulsed laser welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(5): 1521-1528.
- 17 Mei Lifang, Chen Youhai, Yan Dongbing, *et al.* Three dimensional numerical simulation of characteristics of laser welding pool[J]. *Journal of Zhengzhou University (Engineering Science)*, 2015, 36(6): 85-89.
梅丽芳, 陈由海, 严东兵, 等. 激光焊接熔池特性的三维数值模拟[J]. *郑州大学学报(工学版)*, 2015, 36(6): 85-89.
- 18 Matsunawa A, Semak V. The simulation of front keyhole wall dynamics during laser welding[J]. *Journal of Physics D*, 1997, 30(5): 798-809.
- 19 Wang Zhiyong, Chu Xinjun, Chen Hong, *et al.* Numerical simulation and experiment study on keyhole in laser penetration welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(2): 1-5.
王智勇, 初新俊, 陈虹, 等. 激光深熔焊接抛物面小孔模型[J]. *焊接学报*, 2006, 27(2): 1-5.
- 20 Voller V R, Brent A D, Prakash C. The modelling of heat, mass and solute transport in solidification systems[J]. *International Journal of Heat and Mass Transfer*, 1989, 32(9): 1719-1731.
- 21 Bachmann M, Avilov V, Gumenyuk A, *et al.* Experimental and numerical investigation of an electromagnetic weld pool control for laser beam welding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 515-524.
- 22 Chongbunwatana K. Simulation of vapour keyhole and weld pool dynamics during laser beam welding[J]. *Production*

- Engineering: Research and Development, 2014, 8(4): 499-511.
- 23 Sohail M, Han S W, Na S J, *et al.* Characteristics of weld pool behavior in laser welding with various power inputs[J]. Weld World, 2014, 58(3): 269-277.
- 24 Cho W I, Na S J, Thomy C, *et al.* Numerical simulation of molten pool dynamics in high power disk laser welding[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2012, 212(1): 262-275.
- 25 Matsunawa A, Mizutani M, Katayama S, *et al.* Porosity formation mechanism and its prevention in laser welding[J]. Welding International, 2003, 17(6): 431-437.
- 26 Chen Genyu, Chen Xiaofeng, Zhou Cong, *et al.* Numerical simulation and experimental research of slender keyholes during deep penetration laser welding[J]. Laser Technology, 2015, 39(2): 170-175.
陈根余, 陈晓锋, 周 聪, 等. 激光深熔焊细长小孔数值模拟与试验研究[J]. 激光技术, 2015, 39(2): 170-175.
- 27 Fabbro R, Chouf K. Keyhole modeling during laser welding[J]. Journal of Applied Physics. 2000, 87(9): 4075-4083.
- 28 Wang J, Wang C M, Meng X X, *et al.* Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. Optics & Laser Technology, 2012, 44(1): 67-70.
- 29 Klein T, Vicanek M, Kroos J, *et al.* Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding[J]. Journal of Physics D, 1994, 27(10): 2023-2030.