

填材对激光焊接匙孔与熔池三维瞬态行为的影响

彭进^{1,2}, 胡素梦¹, 王星星¹, 王建升¹, 张芙蓉²

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 建立了填材送入过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型与组合热源模型,在模型中引入了反冲压力、表面张力、热浮力、重力等焊接驱动力。采用流体体积方法追踪匙孔的气-液界面,研究了填材对匙孔三维形态和熔池流动行为的影响。研究表明,在激光填丝焊中,填材不利于维持匙孔的稳定性,容易出现匙孔底部闭合的情况;在激光自熔焊过程中,匙孔壁面呈现由内向外和由下向上的流动趋势,这有利于匙孔的稳定张开。

关键词 激光技术; 激光焊接; 填材; 匙孔; 熔池; 三维瞬态; 数值模拟

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0102003

Effect of Filler Metal on Three-Dimensional Transient Behavior of Keyholes and Molten Pools in Laser Welding

Peng Jin^{1,2}, Hu Sumeng¹, Wang Xingxing¹, Wang Jiansheng¹, Zhang Furong²

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

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

Abstract The three-dimensional transient laser welding heat-flow coupling model for the filler metal feeding process and the combined heat source model are established, in which the welding driving forces, such as recoil pressure, surface tension, thermal buoyancy and gravity, are introduced. The volume-of-fluid method is used to track the gas-liquid interfaces of keyholes, and the effect of filler metal on the three-dimensional shape of keyholes and the flow behavior of molten pools is studied. The influence mechanism of the filler metal filling on the keyhole stability is analyzed. The research results show that the filler metal filling is unfavorable to the stability of keyholes and the keyhole bottom is prone to close. In the autogenous laser welding process, a flow from inside to outside and from bottom to top appears on the keyhole walls, which is favorable to the stable opening of keyholes.

Key words laser technique; laser welding; filler metal; keyhole; molten pool; three-dimensional transient state; numerical simulation

OCIS codes 140.3390; 160.3900; 350.3850

1 引 言

激光填丝焊接技术属于高能束焊接技术,在航空、航天及汽车等领域有广泛的应用^[1-5]。激光填丝焊可以降低激光自熔焊对装配间隙的苛刻要求^[6],通过调节焊丝的化学成分及送丝速度、送丝角度等工艺参数,可实现焊缝组织性能的冶金调节^[7]。

然而,激光填丝焊也存在一些问题。余阳春等^[8]对比分析了铝合金激光自熔焊和激光填丝焊对焊缝气孔率的影响,发现在相同工艺参数下,激光填丝焊的焊缝气孔率明显高于激光自熔焊的,分析认为焊丝前端的熔化金属(填材)易对匙孔形成冲击。梅汉华等^[9]进行了激光填丝焊的工艺研究,发现当焊丝直径在 0.8~1.6 mm 时,焊缝成形良好。激光

收稿日期: 2017-07-18; 收到修改稿日期: 2017-09-12

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费(201705006)、华北水利水电大学大学生创新创业训练计划项目(2017XB110)

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

焊接过程中熔池、匙孔的动态行为对焊接稳定性有重要影响,并最终决定了焊接接头的质量。

国内外对激光焊接匙孔、熔池行为的研究方法主要有两种:1)采用在线监测设备实时监测焊接过程中熔池动态行为的变化;2)采用数值模拟的方法对焊接过程中熔池的行为进行分析^[10-12]。考虑到设备的昂贵性,国内现阶段主要采用拍摄熔池表面的方法对匙孔、熔池的行为进行研究,而对熔池内部行为的研究较少。填充金属的加入会使激光深熔焊过程中熔池、匙孔的动态行为更加复杂,国内外对激光-熔化极稀有气体保护电弧(MIG)复合焊的数值模拟研究较多,而关于激光填丝焊的数值模拟研究鲜有报道。Cho等^[13]采用Flow-3D软件分析了激光-熔化极气体保护(GMA)复合焊接过程中液态金属对熔池的影响,在模型中考虑了菲涅耳吸收,并且考虑了电磁力、电弧力、表面张力等的作用,忽略了激光和MIG热源之间的相互作用,发现熔滴下落到熔池时会对匙孔形成冲击,使匙孔闭合,降低焊接过程的稳定性。Rao等^[14]认为,熔滴落入熔池不仅会对熔池形成冲击,还会影响熔池的温度场。Otto等^[15]采用流体力学软件OpenFOAM模拟了激光熔化焊丝的钎焊过程,并且采用流体体积(VOF)方法追踪焊接过程中的自由表面,发现受到温度差异的影响,液态熔滴在母材上的润湿铺展性不佳,而且会出现断续的现象。由于焊接过程中没有熔池、匙孔,该研究没有对液态金属进入熔池的过程进行有限元分析。

本文结合激光深熔焊的焊接特性,建立了填材送入过程的三维瞬态激光焊接热量-流体(热-流)耦合模型,并且采用了组合热源模型(高斯面热源和有限深度体热源),在模型中引入了反冲压力、表面张力、热浮力、重力等焊接驱动力,分别研究了填材对匙孔三维形态、熔池流动行为的影响,最后分析了填

表1 6056铝合金和ER4047焊丝的化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical compositions of 6056 aluminum alloy and ER4047 filler wire (mass fraction, %)

Composition	Si	Fe	Cu	Mn	Zn	Mg	Al
6056 aluminum alloy	1.0		0.8	0.6	0.4	0.9	Bal.
ER4047 filler wire	11.52	0.20	<0.001	0.01	0.001	0.01	Bal.

在激光焊接过程中,影响传热传质的因素很多,从数学模型的计算精度和效率角度出发,需要对模型进行一些简化,考虑主要因素对焊接过程的影响,可对次要影响因素进行一定的简化,故进行以下的假设。

1) 由于重点分析的是填材填充对熔池、匙孔特

性对匙孔稳定性的影响机制。

2 数学模型

2.1 计算域及基本假设

在激光焊接过程中,不同介质之间发生复杂的传热和传质现象,包括匙孔内部的金属蒸气与液态熔池之间的热量传输,以及液态熔池与未熔化母材之间的热量传输。在激光深熔焊过程中,同时存在着气、液、固三相,激光焊接模型中的气相和液相分别有不同的热导率、比热容、动力粘度等热物性参数。建立的数学模型在运行过程中,需要追踪匙孔界面(气-液界面)及固-液界面,并且要考虑到相变过程中的传热及传质问题。

图1所示为激光焊接过程的计算域,计算域包含两个部分,即金属区和气体区。顶部为空气区,面ABCD为压力入口,面AEFB、BFGC、CGHD、DHEA为压力出口;面EIJF、FJKG、GKLH、HLIE为金属区的壁面;底部为空气区,面INOJ、JOPK、KPQL、LQNI、NOPQ为压力出口。三维笛卡尔坐标系的X轴与Y轴位于金属区的表面,焊接起始位置位于金属区表面的中心线上,激光束以一定的速度沿X轴作匀速运动,Y轴方向为待焊工件的宽度方向,Z轴的负方向为待焊工件的厚度方向。使用VOF方法追踪焊接过程中的气-液界面,并且使用焓空隙法对焊接过程的固-液界面进行处理。激光填丝焊试验采用的母材为6056铝合金,其尺寸为100 mm×5 mm×4 mm,采用的ER4047焊丝直径为1.2 mm。6056铝合金及ER4047焊丝的化学成分见表1。光丝间距为0.3 mm,激光束的离焦量为0 mm(即聚焦状态),激光倾斜角度为5°。模型采用的激光功率为4500 W,焊接速度为3 m·min⁻¹。为减少计算机的工作量,同时保证计算精度,令待焊母材的尺寸为20 mm×5 mm×4 mm。

性的影响,为减少计算机的工作量,不考虑激光填丝焊的焊丝熔化过程,假设焊丝前端已经熔化且为自由表面,以液态熔滴的形式在一定速度下流入熔池。令熔滴的直径等于焊丝的直径(1.2 mm),熔滴流入熔池的初始速度等于送丝速度(3 m·min⁻¹),熔滴流入熔池的时间间隔为16 ms。

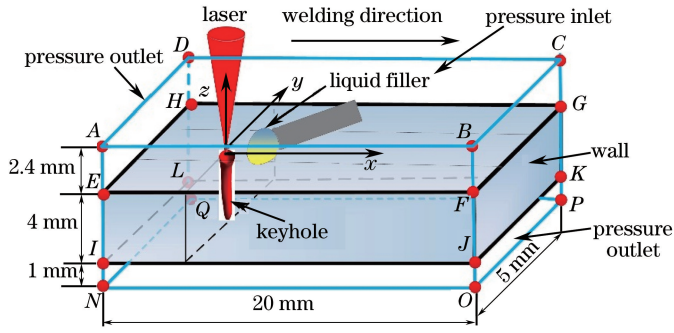


图 1 激光焊接过程的计算域

Fig. 1 Computational domain in laser welding process

2) 不考虑保护气对熔池温度场和流场的影响。

3) 待焊工件具有各向同性的特点,并且设定工件的比热容、热导率、动力粘度是随温度变化的函数,其他热物性参数为常数,不随温度的变化而变化。

4) 液态金属流动状态为层流,浮力源项采用 Boussinesq 近似。

熔化填材所需要的能量为

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

式中 Q_f 为熔化填材所需的能量, C_m 为填材的比热容, M 为熔化的填材的质量, ΔT 为填材的熔点与常温的差值。 M 可表示为

$$M = \rho S V t, \quad (2)$$

式中 ρ 为填材的密度, S 为填材的横截面面积, V 为送丝速度, t 为焊丝送进时间。液态填材送入并填充进熔池的过程是熔池内部液态金属周期性热熔的增加过程。液态填材液滴的输入热量 Q_a 为

$$Q_a = \rho_l \pi r_w^2 \omega_f H_d, \quad (3)$$

式中 ω_f 为液态填材的送进速度, ρ_l 为液态填材的密度, r_w 为液态填材的半径, H_d 为液态填材的总焓。 Q_a 需要维持液态填材的温度在液相线以上,因此液态填材带入熔池的有效热量 Q_d 为

$$Q_d = \rho_l \pi r_w^2 \omega_f C_{pl} (T_d - T_l), \quad (4)$$

式中 T_d 为液态熔滴的温度, C_{pl} 为液态填材的比热容, T_l 为液态填材液相线的温度。液态填材进入熔池的溶质增量和数学模型中平均时间体积质量源有很大的相关性。填材中净溶质质量 Q_t 为

$$Q_t = \rho_l \pi r_w^2 \omega_f (C_f - C), \quad (5)$$

式中 C 为焊接工件的溶质浓度, C_f 为熔滴的溶质浓度。模型中质量源区域内网格点上所含有的平均时间体积质量源为

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

式中 S_m 为质量源区内网格点上的平均时间体积质量源, D_d 为熔滴直径, d 为体热源高度。

2.2 控制方程组

激光焊接过程涉及到的传热传质物理现象符合三大方程组,分别是连续性方程(也称为质量守恒)、Navier-Stokes 方程(也称为动量守恒)、能量守恒方程^[16]。

对于匙孔边界的气-液界面,采用多相流模型中的 VOF 方法进行界面形貌的追踪。多相流 VOF 方法将用来控制气相和液相的体积分数 $F(x, y, z, t)$ 引入到模型中,其中 x, y, z 分别为 x, y, z 轴的坐标, t 为焊接时间。 $F(x, y, z, t)$ 函数所表达的具体内容如下:当 $F(x, y, z, t) = 1$ 时,模型中所对应的控制体积中没有气体,全部为液体;当 $0 < F(x, y, z, t) < 1$ 时,模型中所对应的控制体积中含有液体;当 $F(x, y, z, t) = 0$ 时,模型中所对应的控制体积中没有液体,全部为气体。

2.3 边界条件及熔池流动驱动力

初始条件为

$$T(x, y, z, t) = T_{ref}, \quad (7)$$

$$u = v = w = 0, \quad (8)$$

式中 T 为熔池的温度, T_{ref} 为环境温度, u, v, w 分别为 x, y, z 方向的速度。为了提高计算效率,所建立的数学模型体积为实际待焊工件体积的一半,激光焊接过程中工件上表面对流热损失的数学表示为

$$q_c = h_c (T - T_{ref}), \quad (9)$$

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,热辐射导致的单位面积热损失热流量 q_r 为

$$q_r = \epsilon \delta_0 (T^4 - T_{ref}^4), \quad (10)$$

式中 ϵ 为数学模型中工件材料的表面发射率,常数 $\delta_0 = 5.6697 \times 10^{-8}$ 。数学模型中固体区的数学表达式为

$$u = u_0, v = 0, w = 0, \quad (11)$$

式中 u_0 为焊接起始位置的沿 x 方向的速度。对称面的数学表达式为

$$\frac{\partial u}{\partial y} = 0, \frac{\partial w}{\partial y} = 0, v = 0, \frac{\partial T}{\partial y} = 0. \quad (12)$$

数学模型中自由表面法向压力的数学表达式为

$$p = p_\sigma + p_r, \quad (13)$$

式中 p_σ 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。反冲压力可表示为

$$p_r = AB_0 T_s^{-\frac{1}{2}} \exp\left(-\frac{U}{T_s}\right), \quad (14)$$

式中 A 为环境压力系数, B_0 为经验常数, T_s 为作用于工件表面的局部温度, U 为工件单位质量的能量。表面张力可表示为

$$p_\sigma = k_a \sigma, \quad (15)$$

式中 σ 为表面张力系数, k_a 为数学模型中自由表面的曲率。 k_a 可表示为

$$k_a = -\left[\nabla \cdot \left(\frac{\mathbf{n}'}{|\mathbf{n}'|}\right)\right] = \frac{1}{|\mathbf{n}'|} \left[\left(\frac{\mathbf{n}'}{|\mathbf{n}'|} \cdot \nabla\right) |\mathbf{n}'| - (\nabla \mathbf{n}') \right], \quad (16)$$

式中 \mathbf{n}' 为工件局部自由表面的法线矢量。

将数学模型中的反冲压力和表面张力引入到动量方程源项中, 从而把反冲压力和表面张力添加到匙孔壁的自由表面。

$$\delta(T) = \delta_0 + A_\delta(T - T_m), \quad (17)$$

式中 δ_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, δ 为工件材料的表面张力系数, A_δ 为表面张力梯度系数。激光焊接过程中, 熔池内部的热浮力 F_b 为

$$F_b = \rho_l g \beta(T - T_m), \quad (18)$$

式中 g 为重力加速度, β 为材料的热膨胀系数。

2.4 热源模型

模拟采用面热源和有限深度体热源的组合模型^[5], 模型包含了激光热源对熔池表面和匙孔内部的作用, 表现为激光热源在匙孔方向随着深度的增大而不断衰减。激光组合热源模型如图 2 所示。

在数学模型中, 面热源满足高斯分布的特征, 作用于熔池表面各点的面热源的热流密度为

$$q_s(x, y) = q_s(0, 0) \exp[-C_s(x^2 + y^2)/r_s^2], \quad (19)$$

式中 r_s 为作用于熔池表面的面热源半径, 一般为匙孔半径的两倍; 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。 $q_s(0, 0)$

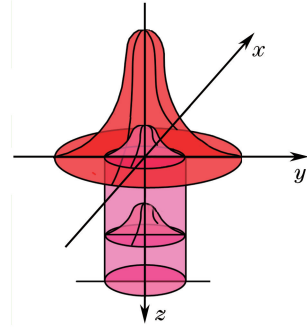


图 2 激光组合热源模型

Fig. 2 Laser combined heat source model

可表示为

$$q_s(0, 0) = \frac{C_s \chi \eta_s \varphi P}{\pi r_s^2}, \quad (20)$$

式中 P 为焊接过程中的激光功率, η_s 为数学模型中面热源的热源系数, φ 为焊接工件表面对激光热源的吸收系数, χ 为焊接过程中面热源能量的分配系数。

在激光焊接过程中, 当激光热源的能量作用于匙孔时, 由于匙孔内部等离子体对激光能量存在吸收, 实际到达匙孔壁的激光功率为

$$P_0 = (1 - \chi) \eta_v \varphi P, \quad (21)$$

式中 η_v 为有限深度体热源的热源系数。由于仅有位于匙孔半径范围内的激光可以进入匙孔内部, 故匙孔外部的激光可忽略, 由面热源替代。假定匙孔深度范围内的径向激光功率密度服从高斯分布, 则

$$P_v = \int_0^R I_w \exp(-2r^2/r_v^2) 2\pi r dr = \int_0^R \frac{2P_0}{\pi r_v^2} \exp(-2r^2/r_v^2) 2\pi r dr, \quad (22)$$

式中 P_v 为进入匙孔内部的激光功率, R 为激光束半径, r_v 为匙孔半径, I_w 为熔池表面最高的激光功率密度, r 为激光热源半径。匙孔内部发生的逆韧致吸收现象导致激光穿过匙孔内部的金属蒸气和等离子体时, 能量沿工件厚度方向出现一定的衰减, 该衰减服从 Bouguer-Lambert 定律, 即

$$I_c = I_s \exp(-\beta' h), \quad (23)$$

式中 β' 为介质的吸收系数, h 为激光束在金属蒸气和等离子体中穿过的距离, I_s 为匙孔表面中心最高激光功率密度, I_c 为衰减之后的激光功率密度。假定匙孔是半径为 r_v 、高度为 z_v 的圆柱体, 匙孔内部各位置的激光功率可以表示为

$$P_v = \int_{z_0}^z \int_0^R I_s \exp(-2r^2/r_v^2) \exp(-\beta' z) 2\pi r dr dz, \quad (24)$$

式中 z 为匙孔的深度, 介于 0 和 h 之间; R_0 为激光束半径, 介于 0 和 r_v 之间。

在激光深熔焊接过程中, 材料表面在足够大的激光功率密度作用下迅速蒸发汽化, 形成匙孔并沿工件厚度方向生长。随着匙孔深度的增大, 激光穿过金属蒸气和等离子体的距离增大, 功率密度出现衰减, 直至深度不再发生变化。此时, 假定衰减之后的激光功率密度为临界功率密度, 建立匙孔深度与临界功率密度之间的联系。材料的临界功率密度为

$$I_c = \frac{\sqrt{2\pi}\rho_{ref}C_p k(T_v - T_{ref})}{\varphi \cdot r_F \cdot \arctan(\sqrt{8kt_0}/r_F)}, \quad (25)$$

式中 r_F 为激光束聚焦光斑半径, T_v 为材料蒸发温度, t_0 为激光作用时间, ρ_{ref} 为室温电阻率, C_p 为电阻率温度系数。联立(21)~(24)式可得

$$h = \frac{1}{\beta'} \ln \left\{ \frac{2\beta' P_0}{\pi r_v^2 I_c [1 - \exp(-2R_0^2/r_v^2)]} + 1 \right\}, \quad (26)$$

$$I_s = \frac{2\beta' P_0}{\pi r_v^2} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-2R_0^2/r_v^2)} \cdot \frac{1}{1 - \exp(-\beta' h)}, \quad (27)$$

故匙孔内任意一点体热源的的能量密度为

$$q_v(x, y, z) = \frac{I_s}{h} \exp\left(-\frac{2r^2}{r_v^2}\right) \exp(-\beta' z). \quad (28)$$

2.5 热源模型的网格划分

模拟模型采用四面体网格形式进行划分, 为了保证计算的精确度和计算效率, 对激光束照射熔化的区域进行网格加密。图 3 所示为激光焊接模型的计算区域及网格划分, 沿 x 轴方向的网格尺寸为 0.05 mm; 沿 y 轴正方向 0~1 mm 之间的网格尺寸为 0.05 mm, 1~2.5 mm 之间的网格初始尺寸为 0.14 mm, 按 1.16 的比例系数逐渐增加; 沿 z 轴方向 -3~2.4 mm (工件及工件上方空气层的尺寸) 之间的网格尺寸为 0.05 mm, -5~-3 mm 的网格初始尺寸为 0.2 mm, 按 1.5 的比例系数沿 z 轴负方向逐渐增大。模型共包含 511407 个节点和 487200 个单元。

2.6 材料热物性参数

在焊接过程中, 材料的热物性参数会影响焊接工件对激光能量的吸收和熔池内部的热量传递。激光焊接过程中随温度变化的热物性参数包括材料的热导率、比热容、动量粘度, 以上参数可通过实际的低温试验测量及外推得到^[5], 其他热物性参数设定为常数。模型中 6056 铝合金的热物性参数见表 2。

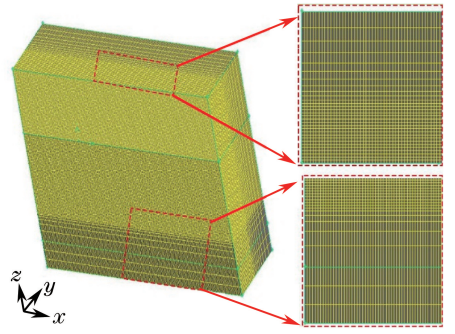


图 3 激光焊接模型的计算区域及网格划分

Fig. 3 Computational domain and mesh generation in laser welding model

表 2 模型中 6056 铝合金的热物性参数

Table 2 Thermal physical parameters of 6056 aluminum alloys used in model

Parameter	Value
Solid density / (kg·m ⁻³)	2720
Liquid density / (kg·m ⁻³)	2590
Solidus temperature /K	860
Liquidus temperature /K	917
Boiling temperature /K	2740
Latent heat of fusion / (J·kg ⁻¹)	3.87×10 ⁵
Latent heat of vapor / (J·kg ⁻¹)	1.08×10 ⁷
Thermal expansion coefficient /K ⁻¹	1.92×10 ⁻⁵
Convective heat transfer coefficient / (W·K ⁻¹ ·m ⁻²)	15
Surface tension coefficient / (N·m ⁻¹)	0.914
Surface tension gradient / (N·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	-3.5×10 ⁻⁴
Radiation emissivity	0.08
Ambient temperature /K	300

3 结果与分析

3.1 模型的验证

当焊接速度为 3 m·min⁻¹ 时, 焊缝横截面的模拟结果与试验结果对比如图 4 所示。可以看出, 焊缝横

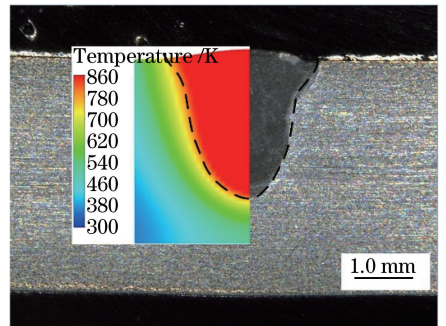


图 4 焊缝横截面的模拟与试验结果对比

Fig. 4 Comparison of simulated and experimental results of weld cross section

截面形貌较为吻合,模拟的焊缝横截面上部熔合线内凹位置与试验的略有差别。这是由于模拟的焊接工件外部热传导辐射条件与试验的略有差别。

3.2 匙孔的三维形态

在激光焊接过程中,匙孔的动态波动可以反映焊接过程的稳定性。令激光填丝焊的焊丝熔化端部与匙孔之间的距离为 0.3 mm ^[17],图 5、6 所示分别为不同作用时间内激光自熔焊和激光填丝焊过程中匙孔的三维形态。可以发现,当进行激光填丝焊时,由于填材对匙孔的冲击,匙孔底部的稳定性有所下降,而且出现了匙孔底部闭合的情况;而当进行激光

自熔焊时,由于没有填材对匙孔进行冲击,匙孔的稳定性相对较好,没有出现匙孔底部闭合的现象。

当激光作用时间为 200 ms 时,焊接过程中匙孔深度随焊接时间的变化如图 7 所示。可以发现,激光自熔焊与激光填丝焊的匙孔都发生了一定程度的波动和闭合的现象,但激光自熔焊的匙孔闭合次数明显少于激光填丝焊的,在 60 ms 内,激光自熔焊的匙孔闭合了 2 次,而激光填丝焊的匙孔闭合了 6 次。与激光自熔焊相比,激光填丝焊的匙孔闭合次数较多,这主要是由于填材的填充距离很小,填材对匙孔造成了冲击。

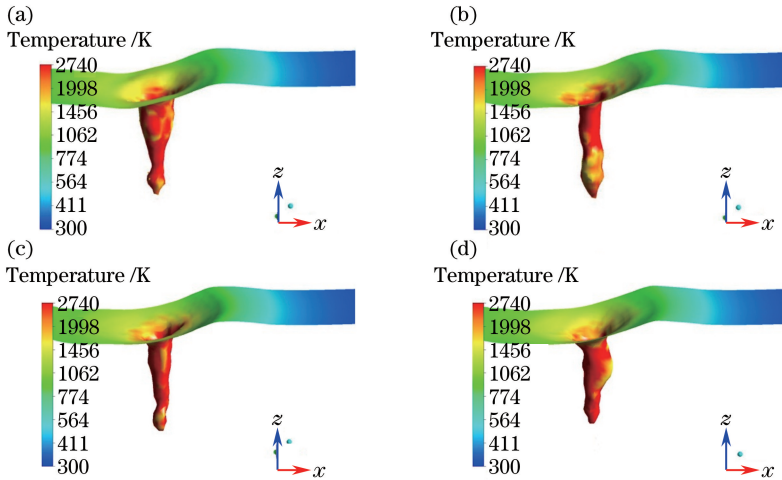


图 5 不同作用时间内激光自熔焊过程中匙孔的三维形态。(a) 200 ms ; (b) 203 ms ; (c) 206 ms ; (d) 210 ms
Fig. 5 Three dimensional shapes of keyholes in process of autogenous laser welding under different operation time.

(a) 200 ms ; (b) 203 ms ; (c) 206 ms ; (d) 210 ms

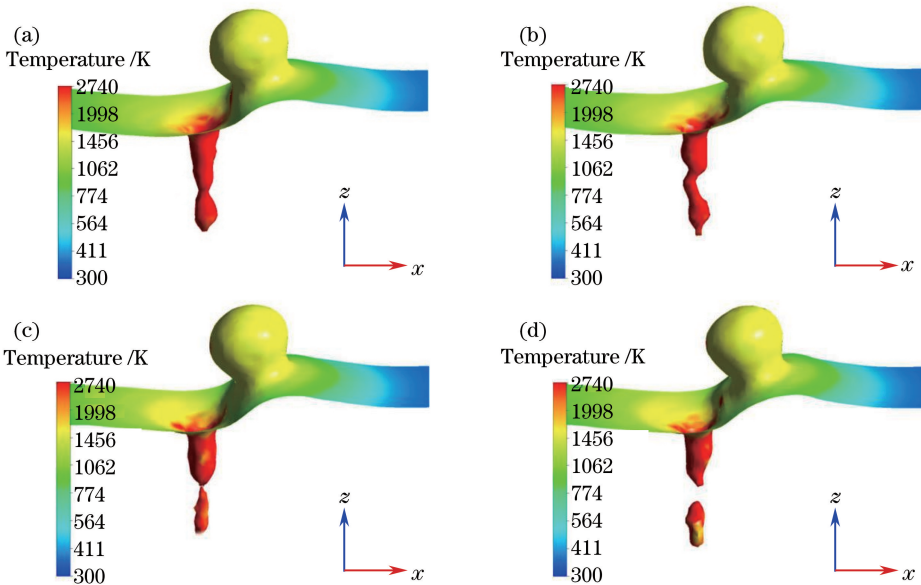


图 6 不同作用时间内激光填丝焊过程中匙孔的三维形态。(a) 200 ms ; (b) 203 ms ; (c) 206 ms ; (d) 210 ms
Fig. 6 Three dimensional shapes of keyholes in process of laser welding with filler wire under different operation time.

(a) 200 ms ; (b) 203 ms ; (c) 206 ms ; (d) 210 ms

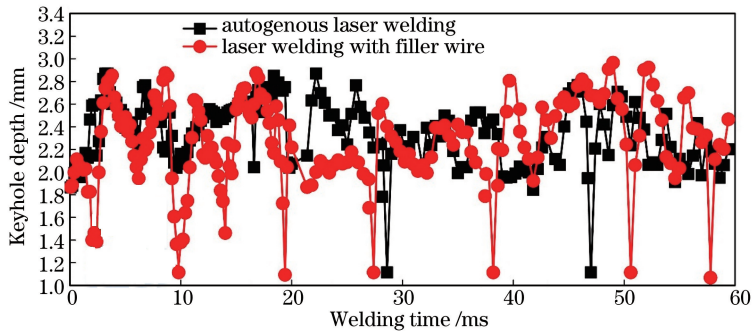


图 7 焊接过程中匙孔深度随焊接时间的变化

Fig. 7 Keyhole depth versus welding time in laser welding process

图 8 所示为激光自熔焊和激光填丝焊匙孔壁面的流场。匙孔壁面的流场可以较清晰地显示匙孔受力后的变化趋势,可更深入地解释匙孔出现不稳定的原因。可以发现,激光自熔焊的匙孔壁面上的速度方向朝上(匙孔开口方向),这是

匙孔内蒸汽压力的驱动作用造成的,这种流动趋势有利于提高匙孔的稳定性^[18]。激光填丝焊的匙孔上半部分壁面的向上流动趋势变弱,而且出现了逆时针的漩涡,这不利于维持匙孔形态的稳定性。

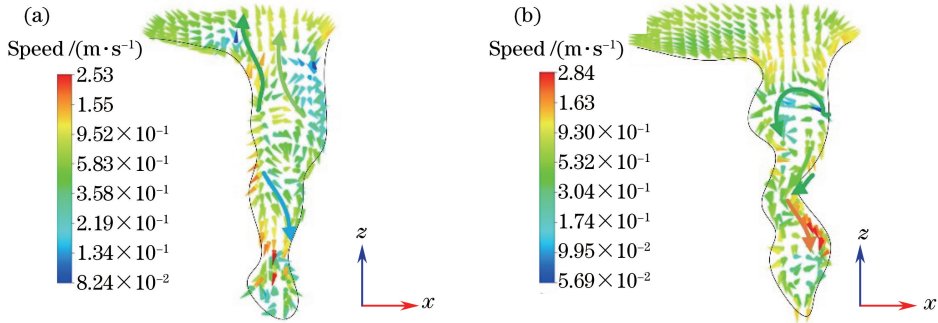


图 8 (a)激光自熔焊和(b)激光填丝焊的匙孔壁面流场

Fig. 8 Flow fields on keyhole walls in (a) autogenous laser welding and (b) laser welding with filler wire

当激光作用时间为 200 ms 时,匙孔壁面 H 点流动速度随焊接时间的变化如图 9 所示,内插图为 H 点位置的示意图。激光填丝焊的匙孔壁底部的速度波动十分剧烈,最大值为 $2989 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,最小值为 $118 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均流动速度为 $967 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。激光自熔焊的匙孔壁底部的速度波动幅度较小,最大值为 $1978 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,最小值为 $113 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$,平均

流动速度为 $664 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$ 。

3.3 熔池内部的流动行为

分别沿匙孔中心位置取熔池的横截面及纵截面的流场,熔池的纵、横截面的位置如图 10 所示。

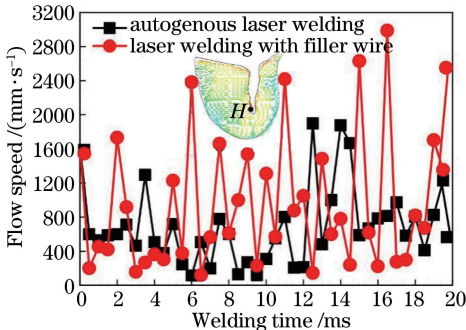


图 9 H 点流动速度随焊接时间的变化

Fig. 9 Flow speed of point H versus welding time

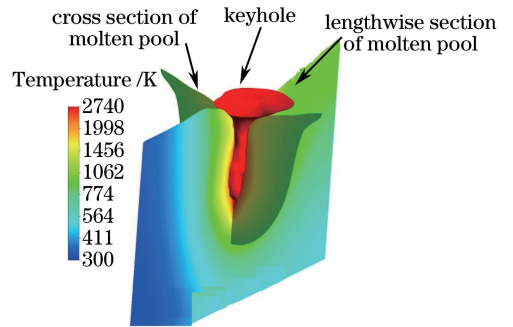


图 10 熔池的纵、横截面的位置示意图

Fig. 10 Location diagram of longitudinal section and cross section of molten pool

图 11、12 所示分别为激光自熔焊和激光填丝焊的熔池纵截面及横截面的流场分布。可以发现,激

光填丝焊的熔池纵截面流动趋势与激光自熔焊的有很大不同:激光填丝焊匙孔后方的熔池流动轨迹较为复杂,匙孔后方形成了两个顺时针流动的漩涡,而且匙孔壁前方的流体流动对匙孔前壁的挤压作用十分显著;而激光自熔焊的熔池后方形成了一个顺时针流动的漩涡。从熔池横截面的流场来看,二者差别也十分明显:激光填丝焊驱使匙孔闭合,挤压匙孔壁的流体流动趋势变得很强,这表明匙孔内部的反冲压力无法克服表面张力及流体静压力的作用,匙

孔稳定性变差,很容易出现匙孔底部闭合的现象;而激光自熔焊的熔池横截面的流场整体表现出由匙孔壁面向外流动的趋势,这表明匙孔内部的反冲压力足以克服表面张力及流体静压力的作用,维持匙孔的张开状态。与激光填丝焊相比,激光自熔焊的匙孔中部两侧流体向上的流动趋势增强。激光填丝焊的熔池横截面匙孔上部两侧熔池的流动趋势与激光自熔焊的大致相似,两侧均出现了流动漩涡,这主要是熔池表面张力引起的 Marangoni 力造成的。

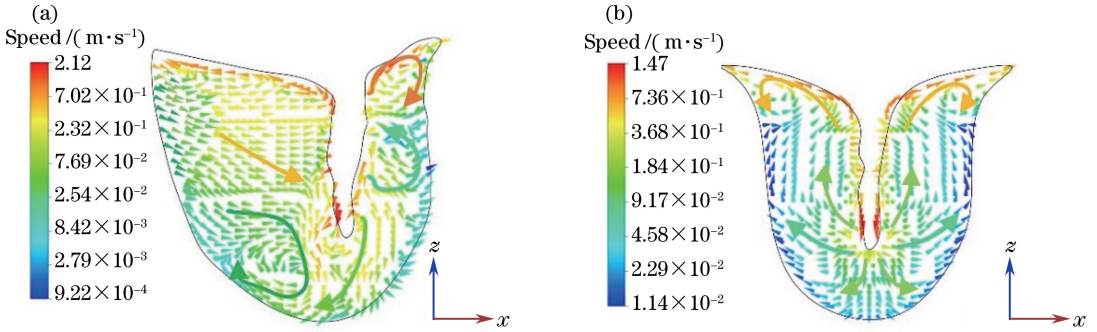


图 11 激光自熔焊熔池的流场分布。(a)纵截面;(b)横截面

Fig. 11 Flow field distributions of molten pools by autogenous laser welding.

(a) Longitudinal section; (b) cross section

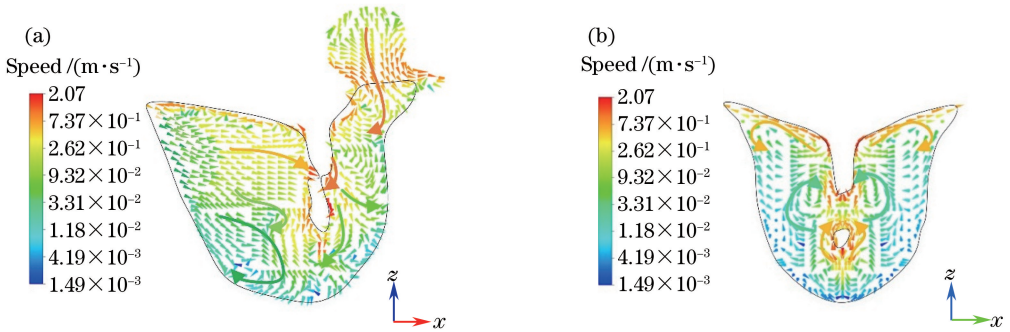


图 12 激光填丝焊熔池的流场分布。(a)纵截面;(b)横截面

Fig. 12 Flow field distributions of molten pools by laser welding with filler wire.

(a) Longitudinal section; (b) cross section

3.4 填材对匙孔稳定性的影响

在激光焊接过程中,匙孔内部维持匙孔张开的反冲压力和额外的蒸汽压力,以及试图闭合匙孔的表面张力和流体静压力共同维持着匙孔壁受力平衡。匙孔稳定时,有

$$P_r + \delta_i P_g = P_\sigma + P_h, \quad (29)$$

式中 P_r 为维持匙孔张开状态的反冲压力; δ_i 为材料的表面张力, P_g 为蒸汽压力与大气压力的差值, $\delta_i P_g$ 为额外的蒸汽压力, P_σ 为试图闭合匙孔的表面张力, P_h 为流体静压力。匙孔壁面的作用力如图 13 所示。

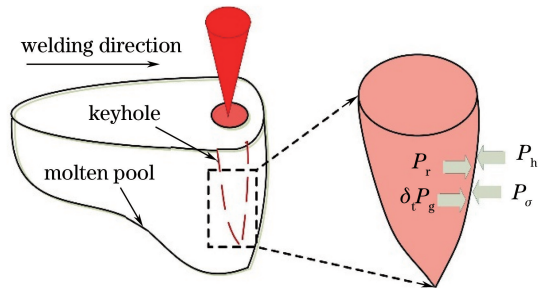


图 13 匙孔壁面的作用力示意图

Fig. 13 Schematic of acting force on keyhole wall

沿孔壁上,前沿孔壁的金属熔化,流体在反冲压力和蒸汽流作用力的驱动下向匙孔后方流动,从而形成

在激光焊接过程中,激光束通常照射到匙孔前

匙孔后方的熔池。当填材沿匙孔填充时,容易对匙孔壁面造成冲击,使匙孔前壁发生较大的波动。当匙孔前壁的波动较大时,匙孔内部没有被激光束照射的区域面积增大,进而导致匙孔内部激光能量密度分布不均匀,引起局部蒸发量的变化,在金属蒸气量较少的区域就会形成低压区;激光束能量照射到的区域,蒸汽反冲压力变大,引起匙孔内不同部位的蒸汽反冲压力剧烈波动,因此匙孔的稳定性变差,甚至出现匙孔闭合的情况。在激光焊接过程中,沿匙孔边缘填充的填材对匙孔稳定性的影响如图 14 所示。

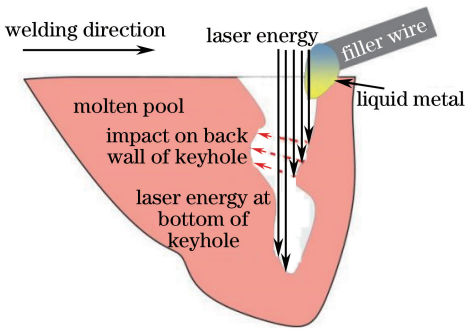


图 14 沿匙孔边缘填充的填材对匙孔稳定性的影响
Fig. 14 Effect of filler metal filling along keyhole edge on keyhole stability

4 结 论

建立了填材送入过程的三维瞬态激光焊接热-流耦合模型,并在模型中引入了反冲压力、表面张力、热浮力、重力等焊接驱动力。模拟获得的焊缝形貌与试验结果基本一致,验证了模型的合理性与准确性。

在激光填丝焊中,填材会影响匙孔底部的稳定性,容易出现匙孔底部闭合的情况;而在激光自熔焊中,匙孔的稳定性相对较好。

填材对匙孔壁面及熔池的流动行为有明显影响,匙孔壁面上侧出现逆时针流动的漩涡,匙孔周边呈现由外向内挤压匙孔壁的流动趋势,这不利于维持匙孔的稳定性,匙孔后方形成两个顺时针流动的漩涡;在激光自熔焊中,匙孔壁面呈现由内向外、由下向上的流动趋势,这有利于匙孔的稳定张开,匙孔后方形成一个顺时针流动的漩涡。

激光填丝焊的匙孔壁底部速度波动十分剧烈,最大值为 $2989 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值为 $118 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,平均流动速度为 $967 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$;而激光自熔焊的匙孔壁底部流动速度的波动幅度较小,最大值为

$1978 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,最小值为 $113 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,平均流动速度为 $664 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 。

参 考 文 献

- [1] Chen G Y, Xia H L, Zhou C, *et al.* Study on the mechanism of root humping of laser welding with high power fiber laser[J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(2): 0203004.
陈根余, 夏海龙, 周聪, 等. 高功率光纤激光焊接底部驼峰的机理研究[J]. 中国激光, 2015, 42(2): 0203004.
- [2] Peng J, Li L Q, Zhang R Z, *et al.* Study on aluminum alloy laser welding with pre-melted liquid filler by arc[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2017, 54(6): 061404.
彭进, 李俐群, 张瑞珠, 等. 铝合金电弧预熔丝激光焊工艺特性研究[J]. 激光与光电子学进展, 2017, 54(6): 061404.
- [3] 彭进, 李俐群, 林尚扬, 等. 激光液态填充焊的填材熔化与过渡稳定性[J]. 焊接学报, 2016, 37(7): 9-12.
- [4] Qiao J N, Wang Q M, Zou J L, *et al.* Microstructure and mechanical property of A7N01 aluminum alloy joints by fiber laser-variable polarity TIG hybrid welding with filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2016, 43(9): 0902001.
乔俊楠, 王启明, 邹江林, 等. 光纤激光-变极性 TIG 复合填丝焊接 A7N01 铝合金接头的组织与力学性能 [J]. 中国激光, 2016, 43(9): 0902001.
- [5] Peng J, Li L Q, Lin S Y, *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: 1-13.
- [6] Kabir A S H, Cao X, Wanjara P, *et al.* Use of filler wire for laser welding of Ti-6Al-4V [J]. Canadian Metallurgical Quarterly, 2012, 51(3): 320-327.
- [7] 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.
- [8] Yu Y C, Wang C M, Hu X Y, *et al.* Porosity in fiber laser formation of 5A06 aluminum alloy [J]. Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(5): 1077-1082.
- [9] Mei H H, Xiao R S, Zuo T C. The study on laser welding with filler wire [J]. Journal of Beijing Polytechnic University, 1996, 22(3): 38-42.
梅汉华, 肖荣诗, 左铁钊. 采用填充焊丝激光焊接工

- 艺的研究[J]. 北京工业大学学报, 1996, 22(3): 38-42.
- [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] 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] Lu F G, Li X B, Li Z G, *et al.* Formation and influence mechanism of keyhole-induced porosity in deep-penetration laser welding based on 3D transient modeling[J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 2015, 90: 1143-1152.
- [13] Cho J H, Na S J. Three-dimensional analysis of molten pool in GMA-laser hybrid welding [J]. Welding journal, 2009, 80(2): 35-44.
- [14] Rao Z H, Liao S M, Tsai H L. Modelling of hybrid laser-GMA welding: Review and challenges [J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2011, 16(4): 300-305.
- [15] Otto A, Schmidt M. Towards a universal numerical simulation model for laser material processing [J]. Physics Procedia, 2010, 5: 35-46.
- [16] Voller V R, Prakash C. A fixed grid numerical modeling methodology for convection-diffusion mushy region phase-change problems [J]. International Journal of Heat and Mass Transfer, 1987, 30(8): 1709-1719.
- [17] Peng J, Li F Q, Li L Q, *et al.* Comparative Study on laser welding with pre-melting liquid filler and conventional filler wire [J]. Chinese Journal of Lasers, 2015, 42(1): 0103003.
彭进, 李福泉, 李俐群, 等. 激光液态填充焊与常规激光填丝焊特性的对比研究 [J]. 中国激光, 2015, 42(1): 0103003.
- [18] Kawahito Y, Mizutani M, Katayama S. Elucidation of high-power fibre laser welding phenomena of stainless steel and effect of factors on weld geometry [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2007, 40(19): 5854-5859.