

基于匙孔传热与能量衰减的半物理半智能热源模型

胡广旭¹, 高靖¹, 刘洋¹, 丁人杰¹, 巩庆涛²

(1. 哈尔滨商业大学, 轻工学院, 哈尔滨, 150028; 2. 鲁东大学, 蔚山船舶与海洋学院, 烟台, 264025)

摘要: 激光焊热源模型目前主要以随几何区域分布能量密度的形式加载, 其模型准确性与能量分布的几何区域尺寸密切联系, 但缺少与激光工艺参数和物理机制的映射关系, 难用于构建激光工艺装备的数字孪生技术。针对该问题, 文中探索一种基于激光焊匙孔传热与能量衰减的半物理半智能热源模型, 首先, 依据激光焊匙孔形成的传热物理机制, 通过算法确定激光能量分布的非线性几何区域; 然后, 面向随激光沿材料深度方向的吸收率衰减现象, 定义基于知识的非线性衰减曲线参数, 用于表达激光能量的衰减部分规律, 通过上述两者组合, 实现半物理半智能热源模型的建立。结果表明, 通过316L不锈钢激光焊的试验与模拟, 验证了热源模型的合理性与准确性, 探究了热源模型参数与激光功率、离焦量、焊接速度的映射关系, 为激光焊接工艺数字孪生实现奠定基础。

创新点: (1) 基于激光焊匙孔的传热物理机制和激光能量衰减现象建立了半物理半智能新型热源模型。
(2) 试验与数值仿真对照验证所建模型的准确性。
(3) 探究了热源模型参数与激光焊接工艺参数的映射关系。

关键词: 激光焊接; 热源模型; 匙孔传热; 能量衰减

中图分类号: TG 456.7 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20240527002

A semi-physical and semi-intelligent heat source model based on keyhole heat transfer and energy attenuation

HU Guangxu¹, GAO Jing¹, LIU Yang¹, DING Renjie¹, GONG Qingtao²

(1. College of Light Industry, Harbin University of Commerce, Harbin, 150028, China; 2. Ulsan Ship and Ocean College, LuDong University, Yantai, 264025, China)

Abstract: At present, the laser welding heat source model is mainly loaded in the form of energy density distribution in geometric regions, and its accuracy is closely related to the geometric region size of energy distribution. However, it lacks a mapping relationship with laser process parameters and physical mechanisms, making it difficult to use for constructing digital twin technology for laser process equipment. In response to this issue, a semi-physical and semi-intelligent heat source model based on laser welding keyhole heat transfer and energy attenuation was proposed. Firstly, based on the physical mechanism of heat transfer in laser welding keyhole formation, the nonlinear geometric region of laser energy distribution was determined through algorithms; Then, based on the absorption rate attenuation phenomenon of the laser along the depth direction of the material, a knowledge-based nonlinear attenuation curve parameter was defined to express the attenuation law of laser energy. By combining the above two methods, a semi-physical and semi-intelligent heat source model was established. The results verify the rationality and accuracy of the heat source model through experiments and simulations of 316L stainless steel laser welding. On this basis, the mapping relationship between heat source model parameters and laser power, defocus, and welding speed is explored, laying a foundation for the digital twin implementation of laser welding technology.

收稿日期: 2024-05-27

基金项目: 国家基金委-山东联合基金“宽频激励下海洋平台结构复杂多模态振动机理与控制”(U2006229); 山东省重大创新工程“海上卫星发射与回收”(2020CXGC010701)。

Highlights: (1) A new semi-physical and semi-intelligent heat source model was established based on the physical mechanism of heat transfer and laser energy attenuation phenomenon of laser welding keyhole.

- (2) The accuracy of the established model was compared and verified through experiments and numerical simulations.
 (3) The mapping relationship between heat source model parameters and laser welding process parameters was explored.

Key words: laser welding; heat source model; keyhole heat transfer; energy attenuation

0 序言

激光焊接技术是通过高能量密度激光束的照射将材料加热熔化, 实现材料连接的高效焊接技术^[1]。自 20 世纪 40 年代问世以来, 激光焊接技术已逐渐普及应用至各行业领域, 并向小型化、便携化和智能化发展, 其焊接效率和质量逐步提升, 在工业生产中发挥着重要作用^[2]。

由于激光焊接焊缝尺寸小、且成形凝固速度快, 试验中难以观测, 因此对激光焊接成形过程内部热—流—力学行为研究主要依靠数值模拟^[3]。其中焊接温度场是研究激光焊流场、力学行为以及组织演变的基础, 因此激光焊接温度场模拟是关键环节。开展激光焊接温度场模拟, 需要建立准确的激光焊热源模型, 才能保障其他物理场的数值模拟, 因此, 许多学者开展了激光焊接热源模型相关研究。陈鑫等人^[4]提出由高斯面热源+圆柱体热源+双椭球热源的组合热源, 并对铝合金进行动态模拟焊接, 模拟得出的焊缝形貌与实际焊缝形貌相吻合, 模拟出的温度场与实际测的温度场误差在允许的范围内; 乔及森等人^[5]在高强度钢约束电弧焊 T 形接头仿真中, 使用高斯面热源和柱型体热源进行加载, 得出的热循环曲线与实际相吻合; 孙振邦等人^[6]基于宏观焊接热过程的数值模拟需求, 建立了一种适用于 MIG 焊接的复合热源模型, 结果表明, 模拟获取的焊缝熔合线走势及形貌和实际焊接结果相吻合, 证明开发的热源模型能够准确描述 MIG 焊指状熔深特性和热传导过程; 张新瑞等人^[7]使用高斯面热源、双椭球热源和“高斯面热源+旋转高斯体热源”组合热源对铝合金航天用舱

体结构进行了焊接过程的数值模拟, 结果表明, 其温度能够很好的反映熔池形貌。

以往热源模型研究中, 均采用以几何区域为能量密度分布的建模方法, 建立热源模型基础, 这种建模思路主要来源于高斯与双椭球热源模型的基本思想。然而, 在激光焊工艺研究中, 不同的激光焊接功率、焊接速度、离焦量以及材料属性情况下, 调整热源模型作用区域的几何参数是热源建模的关键问题, 这种基于几何区域的能量分布在激光焊接工艺改变时, 其几何参数应对应变化, 这种修正欠缺与具体激光工艺参数的映射联系。针对上述激光焊接热源模型的问题, 文中从半物理半智能方向出发, 构建与激光焊接工艺具有直接映射关系的热源模型, 为实现激光焊接工艺数字孪生技术奠定基础。

1 试验方法

试验材料为 316L 不锈钢^[8-9], 其化学成分见表 1, 焊接设备采用杰普特生产的 JPT-HY2000-S 进行激光焊, 试验模型由两个大小不同的长方体块组成, 尺寸分别为 40 mm × 5 mm × 5 mm 和 8 mm × 5 mm × 5 mm。试验前, 先用 400 目、800 目、1 200 目砂纸去除焊材表面的氧化层, 然后用酒精清除表面污垢, 并置于通风处干燥备用。采用对接激光焊进行焊接, 焊接过程激光倾角为 0°, 试件正面和背面的保护气体为 Ar(99.99%), 且气流量均为 25 L/min, 激光加工示意图, 如图 1 所示^[10-11], 焊接工艺参数见表 2。焊接后使用数控铣床铣出试验件焊缝部分, 表面磨抛、氢氧化钾溶液腐蚀后, 使用 Zeiss AX10 光学显微镜对熔池截面进行观测。

表 1 316L 不锈钢的化学成分(质量分数, %)
 Table 1 Chemical compositions of 316L stainless steel

Cr	Ni	Mo	Si	C	Mn	P	S	Fe
16.0 ~ 18.0	10.0 ~ 14.0	2.0 ~ 3.0	< 1.0	< 0.03	< 2.0	< 0.045	< 0.03	余量

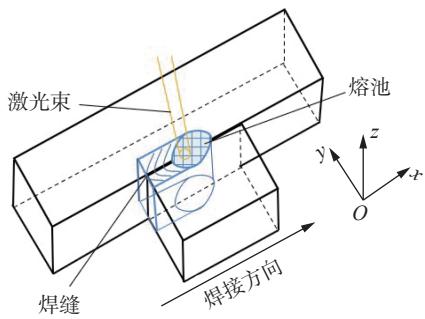


图 1 激光加工示意图

Fig. 1 Laser processing schematic diagram

表 2 焊接工艺参数
Table 2 Welding experiment paramters

焊接组数	激光功率 P/W	焊接速度 v/(mm·s ⁻¹)	离焦量 d/mm
1	2 520	23	-1.5
2	2 520	23	0
3	2 520	23	1.7
4	2 520	18	1.7
5	2 520	23	1.7
6	2 520	28	1.7
7	2 000	23	-1.5
8	2 520	23	-1.5
9	3 000	23	-1.5

2 半物理半智能热源模建模

建模从半物理半智能方向出发, 在建立激光焊热源模型时主要通过两个部分模型实现, 第 1, 针对激光匙孔金属蒸发与材料热传导物理部分, 采用 C++ 编程技术实现算法计算, 拟合得到激光能量的体积分布函数 r_{art} ; 第 2, 采用指数衰减函数 β_t 表达激光能量沿材料深度方向传导时的衰减作用, 并通过模拟与试验结果数据不断修正 β_t ; 最后, 结合上述两者非线性函数, 确定激光焊接热源的能量分布函数, 激光热源原理图, 如图 2 所示。

2.1 基于匙孔热传导物理机制建模

激光焊接的能量作用于工件表面过程中, 首先材料瞬间吸收高密度能量后蒸发, 在热与压作用下产生匙孔^[12]。在这一部分能量建模过程中, 按照能量守恒关系, 总能量用于汽化材料和热传导。当剩余能量低于汽化材料所需的能量时, 能量不足以汽化材料, 传递系统进行热传导过程, 熔池内部逐步

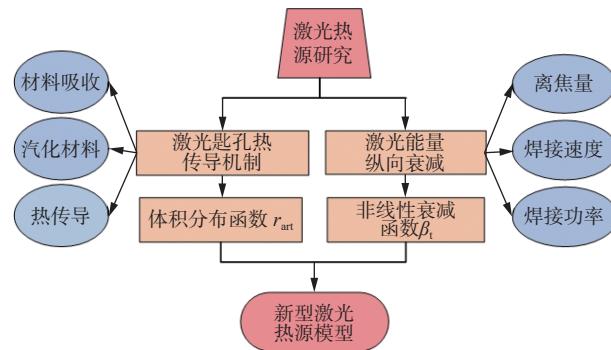


图 2 激光热源建立原理图

Fig. 2 Schematic diagram of laser heat source establishment

形成稳定的匙孔。在热传导的过程中, 通过固体内部分子振动和碰撞传递热量的方式, 能量沿着工件的轴向和径向进行传导。激光传导损耗的能量, 可以通过材料熔点和 200 °C 之间温度区间的面积求和来计算。热传导系统示意图, 如图 3 所示, 能量为

$$Q_z = Q_a + Q_l \quad (1)$$

$$Q_a = \int_{T_0}^{T_s} C_p \rho V_{(i,j)} dT + Q_{s-l} + Q_{l-g} \quad (2)$$

$$Q_l = \sum \left[\left(\left(\frac{1}{2} \pi (z_{1400}^2 - z_m^2) \right) \cdot l \rho \right) \cdot (C_p (T_{1400} - T_0)) + \left(\left(\frac{1}{2} \pi (z_{1300}^2 - z_{1400}^2) \right) \cdot l \rho \right) \cdot (C_p (T_{1300} - T_0)) + \cdots \left(\left(\frac{1}{2} \pi (z_{200}^2 - z_{300}^2) \right) \cdot l \rho \right) \cdot (C_p (T_{200} - T_0)) \right] \quad (3)$$

式中: Q_z 为激光总能量; Q_a 为蒸发所需能量; Q_l 为传导所损失能量; $\int_{T_0}^{T_s} C_p \rho V_{(i,j)} dT$ 为升温吸收能量; Q_{s-l} 固液相变潜热; Q_{l-g} 为汽化相变潜热; z_{200} 是表面与温度为 1400 °C 的等温线之间的距离; T 是温度; z_m 是熔化区的深度; l 是焊缝长度; ρ 是密度; C_p 是热容。

其中, 激光焊接形成的稳定热传导系统呈现“杯”形, 因此 r_{art} 体积分布函数采用非线性函数形式为

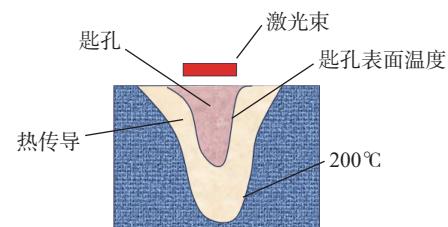


图 3 热传导系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of heat conduction system

$$r_{\text{art}} = k_1 z^3 + k_2 z^2 + k_3 z + k_4 \quad (4)$$

式中: k_1, k_2, k_3, k_4 为体积作用区域几何参数. 为了建立热源模型几何参数与实际激光焊接工艺映射关系, k_1, k_2, k_3, k_4 通过计算激光能量作用形成匙孔的热传导理论和 C++ 编程技术智能计算出匙孔半径和深度, 从而确定热源模型体积分布函数 r_{art} , 具体算法流程, 如图 4 所示.

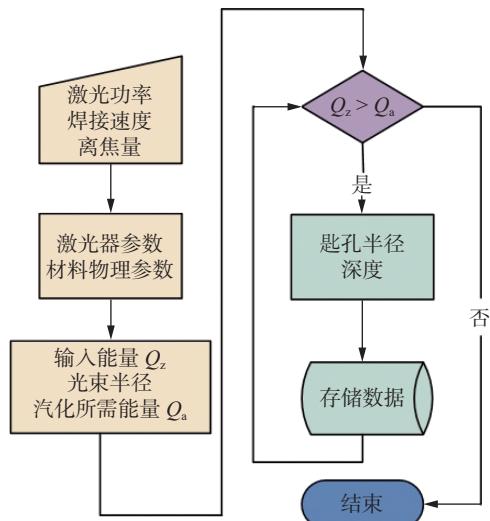


图 4 钥匙孔轮廓计算流程图

Fig. 4 Keyhole contour calculation flowchart

2.2 基于能量衰减原理智能建模

激光焊接受等离子云团和金属蒸气的挤压作用, 能量沿深度方向衰减时在材料表面附近衰减较快, 随后逐渐减缓. 熔池截面形貌多为“钉头状”, 即在靠近工件上表面的部分熔池尺寸要大于光斑作用于工件表面的尺寸, 熔池内部匙孔的尺寸接近光斑尺寸, 因此衰减系数表达为随深度变化的指数函数为

$$\beta_t = a_f (z + b_f)^{c_f} + d_f \quad (5)$$

式中: a_f, b_f, c_f, d_f 为衰减曲线参数, 杨兴亚^[13] 在不同的焊接工况条件下, 考虑等离子云团对激光光束的屏蔽及材料对激光吸收作用, 衰减函数变化对熔池轮廓尺寸产生影响, 但缺少对焊接工艺参数与衰减函数之间映射关系的探究.

为此进行 9 组试验和数值模拟, 通过对焊接离焦量、速度、功率的调节, 间接实现对衰减函数曲线中参数的调节. 表 3 为模拟所得不同焊接工艺参数与衰减函数参数对应表, a_f, b_f, c_f, d_f 值与焊接工艺参数用如下

$$T_f = \frac{i}{5}P + \frac{j}{5}v + \frac{k}{5}d \quad (6)$$

式中: P 激光功率; v 为焊接速度; d 为离焦量; T_f 代表 a_f, b_f, c_f, d_f ; i, j, k 值分别为 1, 2, 3, 4, 5 中任意值.

根据试验与模, 获得合理的工艺参数与非线性衰减曲线参量之间的调整规则, i, j, k 的端点取值与实际激光焊接工艺存在差异, 调节过程中, 不取端点值, a_f 值基本与焊接功率无关, 默认取 $i = 3$. 根据激光焊接的特性、不锈钢的熔点、调节次数等因素, j 和 k 的初始取值定为 $j = 4, k = 4$, 往下进行调节. b_f 值中默认为 $j = 3, i = 3$, 考虑离焦量对其影响, k 的初始值定为 $k = 2$ 向上对其进行调节. c_f 值调整规则参照 a_f . d_f 值中忽略焊接速度对其影响, 默认取 $j = 3, i$ 和 k 的初始取值定为 $i = 4, k = 2$, i 向下调节, k 向上调节. 通过模拟所得熔池截面与试验进行对照来判断所调试的准确性, 若熔池形貌参数误差小于等于 10%, 则存储数据, 获得衰减函数具体参数值; 反之, 则重新调试焊接工艺参数以修正获取

表 3 不同焊接工艺参数与衰减函数参数对应表

Table 3 Corresponding table of different welding process parameters and attenuation function parameters

激光功率 P/W	焊接速度 $v/(\text{mm} \cdot \text{s}^{-1})$	离焦 d/mm	a_f	b_f	c_f	d_f
2520	23	-1.5	1.2	0.3	-0.2	-0.1
2520	23	0	1.4	0.5	-0.1	-0.1
2520	23	1.7	1.7	0.6	-0.1	0.2
2520	18	1.7	1.6	0.6	-0.2	0.2
2520	23	1.7	1.7	0.5	-0.5	0.1
2520	28	1.7	1.6	0.5	-0.7	0.1
2000	23	-1.5	1.2	0.6	-0.1	0.1
2520	23	-1.5	1.2	0.6	-0.2	0.2
3000	23	-1.5	1.1	0.5	-0.2	0.3

最佳衰减函数参数。根据工艺参数选择与之适配的衰减函数参数, 即热源模型进行数值模拟, 衰减函数曲线参数智能校核选流程, 如图 5 所示。

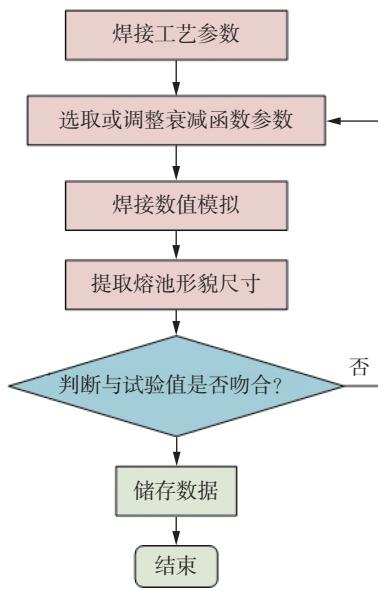


图 5 衰减函数曲线参数校核流程图

Fig. 5 Flow chart for parameter verification of attenuation function curve

2.3 新型激光热源模型

基于上述两者热源模型体积函数以及衰减函数的组合, 最终可以获得热源模型能量分布函数为

$$q(r, z) = \pi r_{\text{art}}^2 \beta_t q_m \quad (7)$$

其能量分布函数满足下式

$$Q = \int_0^H \int_0^r q(r, z) dr dz \quad (8)$$

计算所得热流密度值函数为

$$Q_m = q_m \beta_t \quad (9)$$

式中: q_m 为热源加载于网格的最大热流密度值; Q_m 为热源每一层的热流密度值, 热源模型示意图, 如图 6 所示。

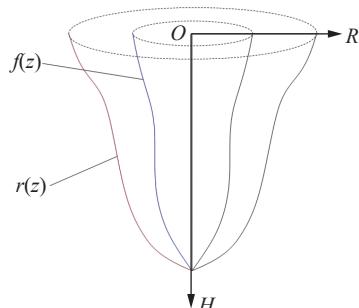


图 6 热源模型示意图

Fig. 6 Schematic diagram of heat source model

3 温度场模拟

3.1 网格划分

为确保计算效率和计算质量, 使用密集型网格, 网格尺寸为 $0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm} \times 0.2 \text{ mm}$, 距离焊缝较远区域和工件边缘区域, 即使用稀疏型网格, 传热网格单元类型选择 DC3D8 热传导单元, 网格总数量为 33 689, 如图 7 所示。

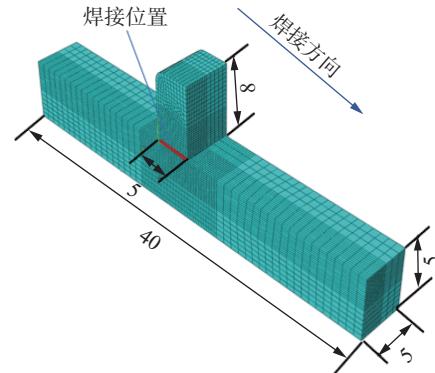


图 7 网格划分示意图 (mm)

Fig. 7 Grid division diagram

模拟中使用的 316L 不锈钢热物理性能参数经过测量见表 4。在焊接的过程中, 激光产生的能量巨大, 对工件进行加热, 工件温度瞬间升高, 与周围产生温差进而空气发生热量的传导与散失^[14]。在焊接模拟中和外界的相互作用主要包括与空气的对流换热和工件表面的辐射散热如下

$$Q_c = h A_s (T - T_0) \quad (10)$$

$$Q_r = \sigma \epsilon A_s (T^4 - T_0^4) \quad (11)$$

式中: Q_c 和 Q_r 分别为工件表面对流和辐射所散失的热量; A_s 为物体的表面积; T 、 T_0 分别为工件加热时温度和初始温度; h 为换热系数; ϵ 为物体的辐射率;

表 4 316L 不锈钢随温度变化的材料参数

Table 4 Material parameters of 316L stainless steel with temperature variation

温度 T/K	热导率 $h/(\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	比热容 $c/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1})$	热膨胀系数 $\alpha (10^{-6} \cdot \text{K}^{-1})$
25	14.45	0.47	13.4
200	17.14	0.54	16.7
400	19.59	0.56	17.8
500	20.81	0.58	18.1
600	21.86	0.58	18.3
700	23.14	0.60	18.7
800	24.59	0.64	19.0
900	27.68	0.87	19.1

σ 为波尔赫兹常数, 为 $\sigma = 5.67 \times 10^8 \text{ W}/(\text{m}^2 \cdot \text{k})$.

4 试验分析与讨论

4.1 模拟与试验熔池形貌对照分析

激光焊接过程能量分布集中, 焊接路径中心能量密度高, 因此以激光能量中心形成的熔池截面形

貌来验真激光能量热源模型的准确性. 在焊接试验中, 通过加工截取 316L 不锈钢激光焊熔池截面形貌并形成焊缝截面, 在数值模拟中, 通过焊接温度场数据中提取高于 316L 不锈钢熔点 (1 400 °C) 焊接熔池中心云图结果以获取模拟焊接熔池截面形貌 (左为试验熔池形貌图, 右为模拟熔池截面图), 如图 8 所示.

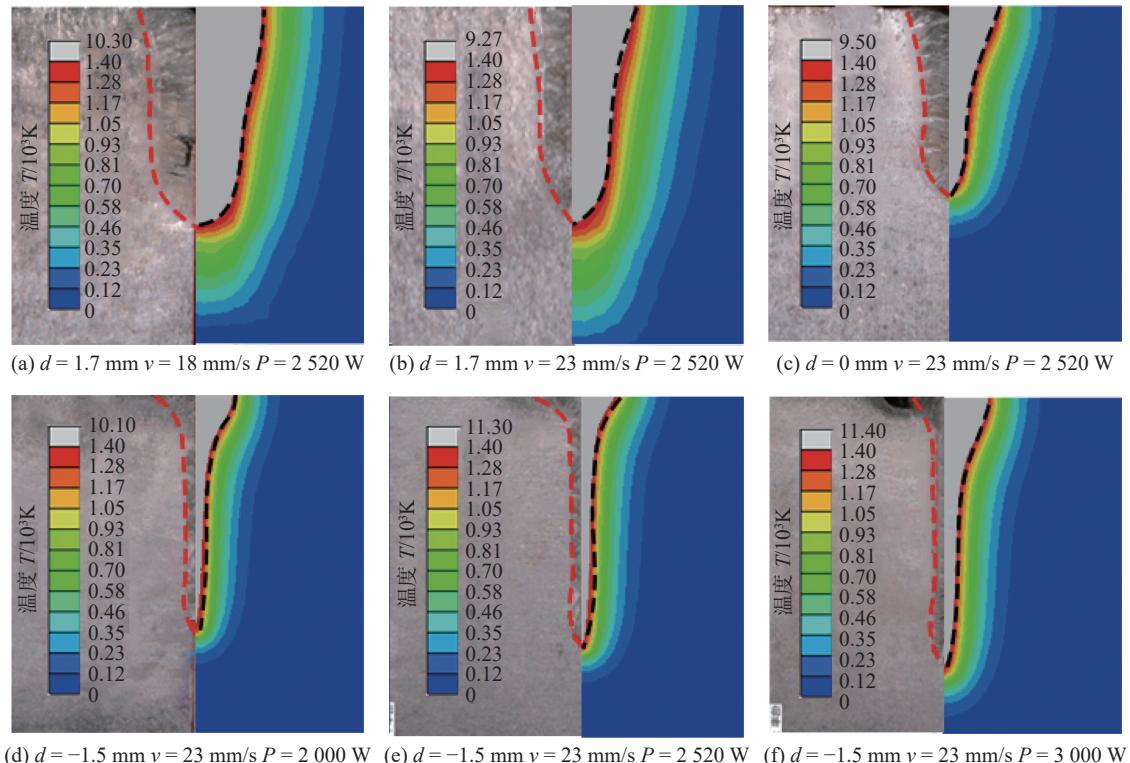


图 8 试验与模拟熔池形貌图对照

Fig. 8 Comparison of experimental and simulated melt pool morphology images. (a) $d = 1.7 \text{ mm}$ $v = 18 \text{ mm/s}$ $P = 2 520 \text{ W}$; (b) $d = 1.7 \text{ mm}$ $v = 23 \text{ mm/s}$ $P = 2 520 \text{ W}$; (c) $d = 0 \text{ mm}$ $v = 23 \text{ mm/s}$ $P = 2 520 \text{ W}$; (d) $d = -1.5 \text{ mm}$; $v = 23 \text{ mm/s}$ $P = 2 000 \text{ W}$; (e) $d = -1.5 \text{ mm}$ $v = 23 \text{ mm/s}$ $P = 2 520 \text{ W}$; (f) $d = -1.5 \text{ mm}$ $v = 23 \text{ mm/s}$ $P = 3 000 \text{ W}$

激光焊焊缝横截面形貌参数测量尺寸示意图, 如图 9 所示, 图中 TW 为熔合线上工件上表面焊缝最大宽度, H 为焊缝深度, MW 为熔合线上焊缝截面宽度变化趋势改变位置的焊缝宽度, BW 为熔合线上焊缝底部最小宽度, HO 为 TW-MW 熔宽之间的熔深距离. 通过熔池形貌对照可以看出, 模拟与实际焊接两者的焊缝形状基本相同, 焊接功率 2 520 W、焊接速度 23 mm/s、离焦量 -1.5 mm 试验与模拟标定对照见表 5. 模拟得出焊缝形貌参数与试验误差在 10% 以内, 熔池轮廓能够与实际熔池契合, 验证了热源模型的准确性.

4.2 热源参数与焊接工艺参数的映射规律

4.2.1 离焦量的影响

离焦量的变化会直接影响光束照射到工件表

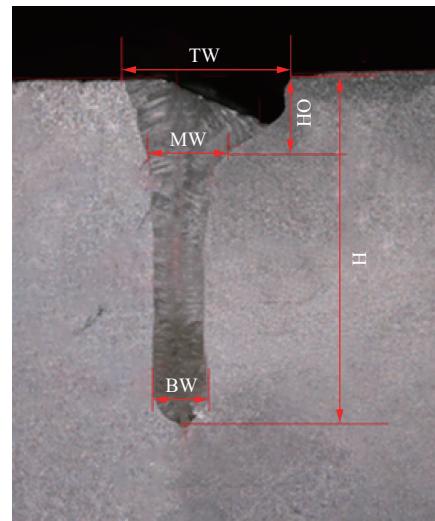


图 9 焊缝熔池形貌各参数标注图

Fig. 9 Annotation diagram for various parameters of weld pool morphology

表5 模拟标定参数对比

Table 5 Comparison of simulated calibration parameters

熔池尺寸	试验 a/mm	计算 b/mm	误差 $\delta(\%)$
TW	1.12	1.20	7.1
MW	0.518	0.54	4.2
BW	0.45	0.48	7
HO	1.0	0.9	10
H	3.328	3.55	6.7

面的光斑尺寸和焦点位置,对焊缝尺寸影响明显。如图10所示,从整体的试验焊接结果分析,在负离焦量范围内的熔池焊接质量较好,且随离焦量增加,熔深明显减小,熔池熔宽有增加趋势。如图11所示,衰减函数系数 a_f 主要影响熔池深度,(激光功率和焊接速度相同)随着离焦量的增加, a_f 和 b_f 明显增加, c_f 和 d_f 基本保持不变。

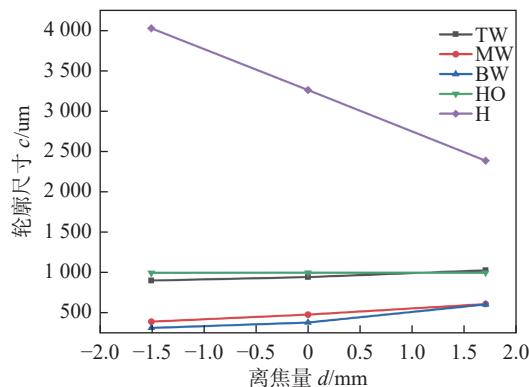


图10 不同离焦量下熔池轮廓尺寸长度变化图

Fig. 10 Changes in the contour size and length of the melt pool under different defocusing amounts

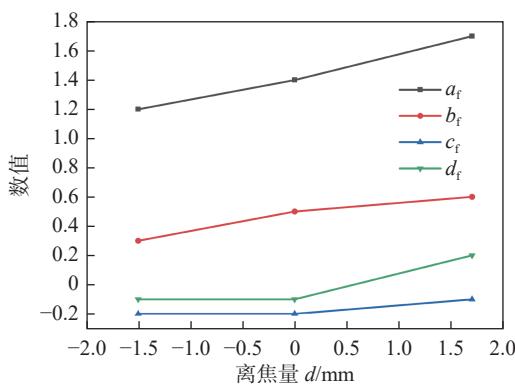


图11 不同离焦量与衰减函数参数对应图

Fig. 11 Corresponding graph of different defocusing amounts and attenuation function parameters

4.2.2 焊接速度的影响

如图12所示,焊接速度增加时,熔池上半部尺寸变化较小,这部分区域直接受到激光冲击作用,

其形貌主要取决于激光能量,热输入量减少会导致熔池形貌下半部有较明显的收缩,底部熔宽变窄。在衰减函数中, c_f 影响函数的开口和坡度大小。如图13所示,焊接速度由18 mm/s到28 mm/s变化过程中, c_f 系数从-0.2减小至-0.7,为衰减函数系数中主要影响因子,其余衰减系数基本保持不变。

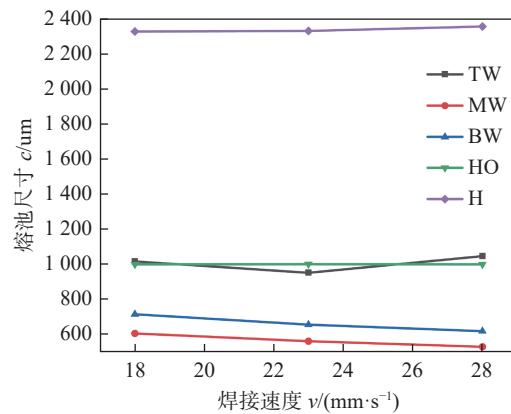


图12 不同焊接速度下熔池轮廓尺寸长度变化图

Fig. 12 Diagram of changes in the contour size and length of the molten pool under different welding speeds

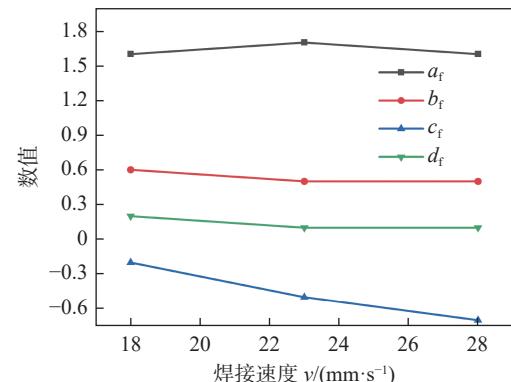


图13 不同焊接速度与衰减函数参数对应图

Fig. 13 Corresponding diagram of different welding speeds and attenuation function parameters

4.2.3 焊接功率的影响

激光能量是影响焊接熔池形貌最重要因素,随能量输入增加,熔池整体尺寸发生明显变化,如图14所示,激光能量增加,熔池熔宽和熔深都有变化,其中熔宽增加较小,熔深增加显著。如图15所示,在衰减函数系数中, a_f 和 d_f 影响函数与x、y轴交点位置,随着焊接功率的增加, a_f 从1.4减小至1.1, d_f 从0.1缓慢增加至0.3。

5 结论

(1) 文中提出了一种基于匙孔传热与能量衰减

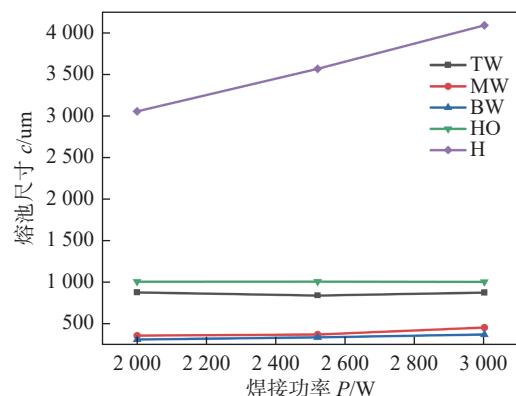


图 14 不同焊接功率下熔池轮廓尺寸长度变化图

Fig. 14 Diagram of changes in the contour size and length of the molten pool under different welding powers

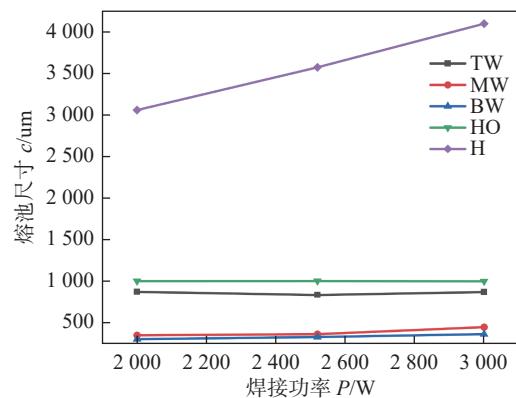


图 15 不同激光功率与衰减函数参数对应图

Fig. 15 Corresponding diagrams of different laser powers and attenuation function parameters

的半智能半物理激光热源模型, 该模型的建立依据匙孔形成的物理机制和智能算法实现, 由体积函数和衰减函数共同组成, 其中体积函数主要控制激光工艺参数, 衰减函数控制激光热流衰减, 两函数整体形式呈“杯状”。

(2) 基于半物理半智能热源模型建立, 开展了激光焊接数值模拟研究, 模拟结果的焊缝形貌与试验的焊缝形貌相吻合, 验证了所提热源模型的准确性。

(3) 探究了热源模型与激光焊工艺参数变化规律, 不同焊接工艺(离焦量、焊接功率、焊接速度)对熔池形貌形成影响不同。在衰减函数中 a_f 、 c_f 、 d_f 为主要影响因子, 受离焦量和焊接功率变化影响较大。随着焊接离焦量增大, a_f 值逐渐变大。随着焊接功率的增大, a_f 值逐渐变小, d_f 值逐渐变大。

参考文献

[1] AMMAR Elsheikh, MOHAMED A E Omer, ALI Basem, et al.

Recent advances and future prospects of laser welding technology for polymeric materials: A review[J]. Journal of Materials Research and Technology, 2025, 25: 7417 – 7440.

- [2] IMRE Timár, ISTVÁN W árpád. Optimal design of the fillet weld fastening the wind turbine column[J]. China Welding, 2024, 33(3): 39 – 43.
- [3] GAO Q Y, BU H C, LING W L, et al. Effect of defocusing amount on morphology and microstructure of 8-mm-thick Ti-6Al-4 V laser deep penetration welded joint[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2022, 119(5-6): 3747 – 3756.
- [4] 陈鑫, 杨立飞, 王佳宁, 等. 6061-T6 铝合金薄板双脉冲 MIG 焊动态组合热源模型[J]. 湖南大学自然科学版, 2022, 49(12): 83 – 91.
- CHEN Xin, YANG Lifei, WANG Jianing, et al. Dynamic combined heat source model for double pulse MIG welding of 6061-T6 aluminum alloy thin plate[J]. Hunan University Natural Science Edition, 2022, 49(12): 83 – 91.
- [5] 乔及森, 芮正雷, 高振云, 等. 组合热源模型下焊剂片约束电弧焊温度场预测[J]. 兰州理工大学学报, 2020, 46(4): 27 – 32.
- QIAO Jisen, RUI Zhenglei, GAO Zhenyun, et al. Prediction of temperature field in flux sheet constrained arc welding under combined heat source model[J]. Journal of Lanzhou University of Technology, 2020, 46(4): 27 – 32.
- [6] 孙振邦, 刘乐乐, 童嘉晖, 等. 基于改进热源模型的铝合金 MIG 焊数值分析[J]. 焊接学报, 2023, 44(2): 111 – 116.
- SUN Zhenbang, LIU Lele, TONG Jiahui, et al. Numerical analysis of aluminum alloy MIG welding based on improved heat source model[J]. Transactions of The China Welding Institution, 2023, 44(2): 111 – 116.
- [7] 张新瑞, 王晨, 雷正龙, 等. 薄壁舱体构件电子束焊接变形模拟分析与优化[J]. 焊接, 2024(5): 1 – 8.
- ZHANG Xinrui, WANG Chen, LEI Zhenglong, et al. Simulation analysis and optimization of deformation during electron beam welding of thin-walled cabin components[J]. Welding Joining, 2024(5): 1 – 8.
- [8] KORINKO P S, MALENE S H. Considerations for the weldability of types 304L and 316L stainless steel[J]. Practical Failure Analysis, 2001, 1(4): 61 – 68.
- [9] Mazumder J, Steen W M. Heat transfer model for cw laser material processing[J]. Journal of Applied Physics, 1980, 51(2): 941 – 947.
- [10] 车用高强钢光纤激光对接焊工艺研究 [D]. 长沙: 湖南大学, 2011.

- Research on fiber laser docking welding process of high strength steel for vehicles [D]. Changsha: Hunan University, 2011.
- [11] CHEN S A, WU Y F, LI Y, et al. Study on 2219 Al-Cu alloy T-joint used dual laser beam bilateral synchronous welding: Parameters optimization based on the simulation of temperature field and residual stress[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 132: 106481 – 106498.
- [12] 韩立军. 汽车车身激光焊接技术发展与应用 [J]. 电焊机, 2020, 50(7): 64 – 73.
- HAN Lijun. Development and application of laser welding technology for automobile body[J]. Electric Welding Machine, 2020, 50(7): 64 – 73.
- [13] 杨兴亚. 基于近似能量衰减匙孔模型的激光焊熔池形貌专家系统研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨商业大学, 2023.
- YANG Xingya. Research on laser welding pool morphology expert system based on approximate energy attenuation keyhole model [D]. Harbin: Harbin University of Commerce, 2023.
- [14] PIEKARSKA W, KUBIAK M. Theoretical investigations into heat transfer in laser-welded steel sheets[J]. Journal of Thermal Analysis and Calorimetry, 2012, 110(1): 159 – 166.

第一作者: 胡广旭, 博士, 讲师, 硕士研究生导师; 主要研究方向焊接结构数值模拟与智能焊接技术; Email: hgxu_2020@126.com.

(编辑: 刘启明)

(上接第 88 页)

- [14] AMAN Singh, VIVEK Singh, AJAY Pratap Singh, et al. Experiment analysis of A-TIG welding and comparison between TIG, Double-TIG, and A-TIG of Hastelloy C-276[J]. Materials Today: Proceedings, 2023, 100: 102 – 107.
- [15] LIU L M, XU X K, ZHU Y L. Study on synchronous induction of arc plasma by laser in laser-double TIG hybrid welding[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 133(10): 106130.1 – 106130.10.
- [16] SCHWEDERSKY M B, SILVA R, DUTRA J C, et al. Two-dimensional arc stagnation pressure measurements for the double-electrode GTAW process[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2016, 21(4): 275 – 80.
- [17] 徐信坤. 小功率脉冲激光诱导增强双电弧物理机制及焊接工艺研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2022.
- XU Xinkun. Physical mechanism and welding process of low power pulsed laser induced enhanced twin arc[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.
- [18] WANG B, ZHANG H, SANG J. Study on arc characteristics and weld appearance of laser-twin-arc-GTAW hybrid welding[J]. China Welding, 2025, 34(1): 12 – 27.

第一作者: 梁晓梅, 硕士, 高级工程师; 主要研究方向为激光电弧复合焊接及增材制造; Email: lxmeihwi@126.com.
通信作者: 黄瑞生, 博士, 正高级工程师; Email: huangrs8@163.com.

(编辑: 刘启明)