

# YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢的熔池温度场预测

## Prediction of Temperature Distribution of Molten Pool for YAG Laser Full Penetration Welding of 304 Stainless Steel

武汉理工大学材料科学与工程学院 陈俊杰 于有生  
中航工业北京航空制造工程研究所 段爱琴

**[摘要]** 基于 Rosenthal 的移动线热源模型,通过与高速摄像对焊接过程中熔池特征量的测量结果对比,获得了 YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢时熔池特征量及温度场分布的预测模型。结果表明,在一定热输入范围内,计算与试验结果符合得很好,但当热输入使熔透焊接过程处于过度熔化和临界熔透时,计算值与试验值的偏差会变大。

**关键词:** 激光全熔透焊接 熔池 温度场

**[ABSTRACT]** A theoretical model used to predict features of the molten pool and temperature distribution for YAG laser full penetration welding of 304 stainless steel is achieved. The model is based on moving line source model and with the aid of experimental data which are measured by a high-speed video camera. The investigation results show that the calculated results conform well to experimental results when the heat inputs are in a certain range. The differences between the calculated and measured features of the molten pool become large in threshold penetration welding and excessive penetration welding.

**Keywords:** Laser full penetration welding Molten pool Temperature field

熔池的形状尺寸与焊接工艺参数以及焊缝的质量之间有内在的联系。控制焊接过程中的熔池特征量是保证焊接成形和焊接质量的关键所在,而建立焊接工艺参数与熔池特征量之间的关系是实现焊接结果(如焊缝的形状、组织,甚至力学性能)的预测和控制的前提。人们可以采用 CCD 摄像头和高速摄像机拍摄熔池图像,在获得熔池图像后,再对图像进行处理从而得到相关信息(如熔池的宽度、长度和面积),然后通过回归分析的方法,利用这些信息建立同激光焊接工艺参数之间的关系<sup>[1-2]</sup>;也可以通过焊接热过程分析,用一组描述焊接基本物理过程的数学方程来模拟激光焊接过程,采用数学方法求解温度场,以获得激光焊接过程中熔池与焊接

参数的关系<sup>[3-4]</sup>。此外,还可以采用试验与理论相结合的方法来研究熔池,这不仅能增加对焊接物理过程的理解,而且还达到了用比较简单、适用的方法改进数学模型的目的。

针对激光焊接,目前用于研究熔池及温度场的数学模型很多,主要有移动线热源模型、高斯分布的表面热源模型、双椭球热源模型、圆锥热源模型、指数衰减热源模型和组合热源模型等,其中移动线热源模型是后续很多热源模型的基础。单纯利用移动线热源进行熔池和温度场的计算,对激光深熔焊而言,有不少问题难以解决(如入射激光能量的有效吸收、焊缝表面加宽等问题),因而很多学者在移动线热源的基础上对此进行了修正。Kaplan<sup>[5]</sup>在 Rosenthal 的移动线热源基础之上,考虑了菲涅尔和等离子体逆韧致辐射吸收的激光能量,通过逐点计算小孔前后壁的能量平衡的方法计算了小孔壁及熔池的剖面形状。苏彦东<sup>[6]</sup>则针对 Kaplan 模型的不足,考虑了能量传输效率及等离子体内离子密度变化对逆韧致辐射吸收系数的影响,对其进行了修正。Lampa<sup>[7]</sup>以移动线热源的解析解为基础,采用能量平衡的方法对激光焊接奥氏体不锈钢的熔池宽度和深度进行了计算,在计算熔池底部宽度时取实际热导率,计算熔池顶部宽度时采用一个加大的热导率使其等于 2.5 倍实际热导率的办法,以考虑由于热毛细管(Marangoni)流而引起的熔池顶部尺寸扩大,使得计算结果与试验结果得到了很好地吻合。国内的王海星<sup>[8]</sup>也对上述模型进行了进一步的检验,但将这种方法推广用于 A3 钢时,发现熔池顶部的等效热导率需取为实际热导率的 4.0 倍,理论预测与试验结果符合得较好。这表明在应用时,需要根据被焊接的材料及焊接参数对模型中的热导率作适当调整。陈俐<sup>[9]</sup>则将焊缝分为 3 层,焊缝上下层,CO<sub>2</sub> 激光焊接取 2.0 倍的实际热导率, YAG 激光焊接取 1.5 倍的热导率,对于焊缝中部,2 种激光均取实际的热导率,对 BT20 钛合金激光焊的能量转换率和熔化效率进行了计算。

将修正了热导率的熔池计算结果与实际测量结果

相对比,发现虽然在熔池横截面和剖面形状上吻合比较好,但是在熔池的长度方向上相差比较大。分析原因,主要是因为 Rosenthal 的模型中的假设条件与实际焊接过程不相符,同时由于激光焊接时的小孔效应等其中的热物参数也有比较大的变化。因而本文拟利用实际测量的熔池结果,来确定模型中的热物参数的等效量值。从而在 Rosenthal 经典移动线热源模型的基础上,获得能在实际焊接中预测激光焊接熔池与温度场的模型。

## 1 试验设备及材料

激光焊接设备: AM356 型 YAG 激光器,最大输出功率 4.5kW; 焦斑直径 0.6mm,采用氩气作为同轴保护气。

熔池图像测量设备: Phantom 高速摄像系统,最高分辨率 512×512 像素(1000 帧/秒时);

焊接材料: 304 不锈钢,板厚 2mm,熔点 1693K,沸点 3375K。

## 2 理论模型

对于薄板全熔透焊,在准稳定焊接状态下, Rosenthal 移动线热源温度场解析表达式<sup>[10]</sup>为:

$$T(x, r) - T_0 = \frac{p_{\text{abs}}}{2\pi\delta\lambda} \exp\left(\frac{-vx}{2a}\right) K_0\left(r\sqrt{\frac{v^2}{4a^2} + \frac{b}{a}}\right), \quad (1)$$

式中,  $r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 是计算点与移动热源之间的距离 (mm);  $T(x, r)$  是工件中计算点  $(x, r)$  处的温度 (K);  $T_0$  为工件的初始温度 (K);  $p_{\text{abs}}$  是有效激光功率 (W);  $\delta$  是板厚 (mm);  $\lambda$  是热导率 ( $\text{J}/(\text{mm} \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ );  $v$  是焊接速度 (mm/s);  $\alpha$  是热扩散率 ( $\text{mm}^2/\text{s}$ ),  $\alpha = \lambda / (C_p \rho)$ ,  $C_p$  为等压比热容 ( $\text{J}/(\text{g} \cdot \text{K})$ ),  $\rho$  为密度 ( $\text{g}/\text{mm}^3$ );  $b = 2(\alpha_c + \alpha_r) / (c_p \rho \delta)$ , 为传热系数 ( $1/\text{s}$ ),  $\alpha_c$  为对流传热系数 ( $\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ ),  $\alpha_r$  为热辐射传热系数 ( $\text{J}/(\text{mm}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{K})$ );  $K_0$  为第二类零阶修正贝塞尔函数。

式(1)是在以下假设条件的基础上推导出来的:

(1) 热源集中于一线(热源沿板厚方向均匀分布,热流只在热源的径向传播);

(2) 材料的热物理性质均为不随温度变化的常数;

(3) 不考虑吸热或放热的物态变化;

(4) 忽略对流和辐射传热;

(5) 焊件为无限大薄板。

在实际的激光全熔透焊接中,利用以上的模型进行计算,其假设条件与实际焊接有如下不相符之处:

(1) 在激光焊接过程中,激光被小孔壁吸收然后形成熔池,对小孔及金属蒸汽的研究结果表明,其在材料厚度方向能量并不完全相等。

(2) 由于材料对入射激光具有明显的反射作用,因而材料的有效吸收率也是一个很难确定的值,它与材料、温度以及小孔结构等密切相关。

(3) 材料的热物理性质是随温度而变的,在激光焊接过程的温度范围内,材料的热物理参数变化很大。由于小孔的结构以及金属蒸气的作用,在材料厚度方向上材料的热物理性质也会发生变化。

(4) 受蒸气反冲力的影响,激光焊接过程中存在明显的对流现象,特别是沿熔池长度方向。图 1 为 304 不锈钢焊接时连续变化的一组熔池,从图中可以明显看出熔池在长度方向的对流现象。

基于以上因素,直接利用 Rosenthal 移动线热源模型来计算熔池的温度场和特征量,存在比较大的偏差。尽管如此,移动线热源对于激光深熔焊接而言,仍是一种非常有用的模型,我们试图通过引入一些等效参量来使之与实际激光焊接过程的结果更加接近,并用之来进行预测。

本课题针对 304 不锈钢激光深熔焊过程,在模型公式(1)中进行如下的假设:

(1) 在计算中对模型进行离散化处理,假设各层无限薄;

(2) 模型中使用 1000K 时的材料热物理参数值,其准确值利用等效系数修正;

(3) 能量值使用实际激光输出功率值,其有效能量利用综合系数修正。

基于以上假设,针对不同的厚度,在公式中引入 2 个无量纲等效系数  $k_z$  和  $\beta_z$ ,则公式(1)可写为:

$$T(x, r) - T_0 = \frac{k_z p}{2\pi\lambda\delta} \exp\left(\frac{-vx}{2\beta_z a}\right) K_0\left(\frac{vr}{2\beta_z a}\right), \quad (2)$$

其中,  $p$  为实际激光输出功率 (W);  $k_z$  为与能量吸收效

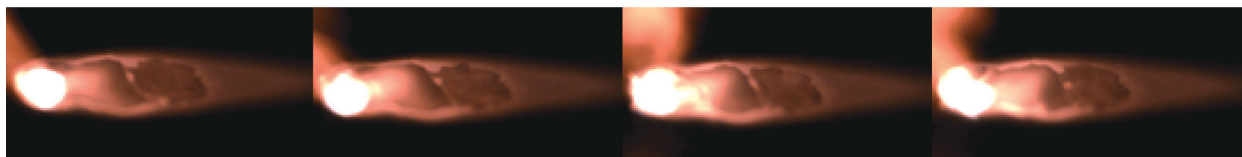


图1 YAG激光焊接304不锈钢熔池图像

Fig.1 Images of molten pool during YAG laser welding of 304 stainless steel

率和材料热物参量相关的综合等效系数； $\beta_2$  为热扩散率等效系数。

### 3 计算结果及分析

本课题针对 YAG 激光焊接 2mm 厚 304 不锈钢进行研究,通过高速摄像分别获得了不同焊接参数下正面熔池和背面熔池的图像,并利用测量结果对公式(2)中的等效系数  $k_2$  和  $\beta_2$  进行确定。

#### 3.1 正面熔池及温度场计算结果与分析

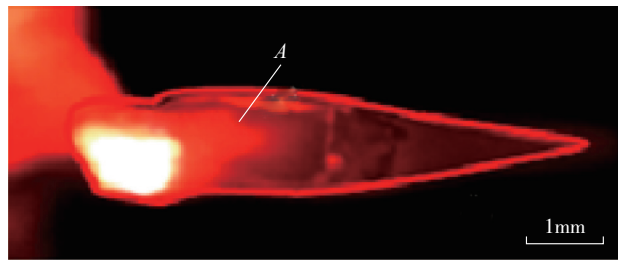
图 2 (a) 为高速摄像所拍摄的激光功率 2000W、焊接速度  $V_{焊}$  为 1.5m/min 时, YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢熔池正面图像,图中轮廓线包围区域 A 就是熔池区域,测得熔池长度和宽度分别为 6.21mm 和 1.85mm。图 2 (b) 为熔池正面温度场。利用公式(2) 进行计算,并与所测的正面熔池特征量进行对比,发现当正面等效系数  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  时,计算得到的正面熔池长度和宽度分别为 6.6mm 和 1.96mm, 此时长度和宽度的计算值比实测值大 6%, 计算结果与测量结果相符合。

进一步利用  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  时的数学模型计算 YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢其他焊接参数下的熔池正面温度场和特征量,图 3 和表 1 为其对应的结果。结果表明,随着焊接速度增加,输入线能量减小,熔池的长度和宽度都在逐渐减小。

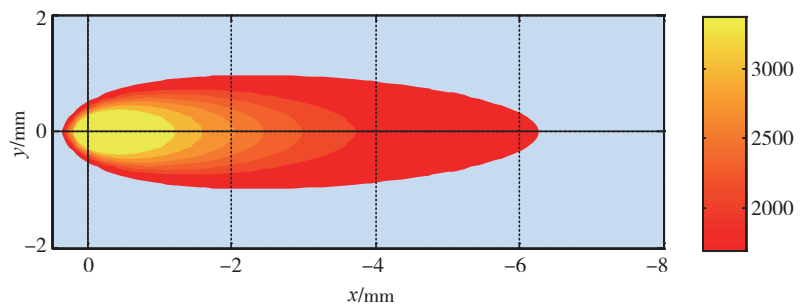
(1) 焊接速度降低为 1m/min (线能量 120J/mm) 时,按等效系数  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  计

算的正面熔池的长度和宽度分别为 9.8mm 和 2.93mm。与实测值相比长度的计算值比实测值大 17%,宽度的计算值比实测值大 19%; 如果按等效系数  $k_1=0.73$ 、 $\beta_1=1.3$  来计算,所得的正面熔池的长度和宽度分别为 8.24mm 和 2.66mm, 此时计算值与实测值吻合得很好,其中长度的偏差只有 2%,宽度的偏差也只有 8%。

(2) 焊接速度为 2m/min (线能量 60J/mm) 时,按等效系数  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  计算的正面熔池的长度和宽度分别为 4.93mm 和 1.47mm, 正面熔池长度的计算值要比实



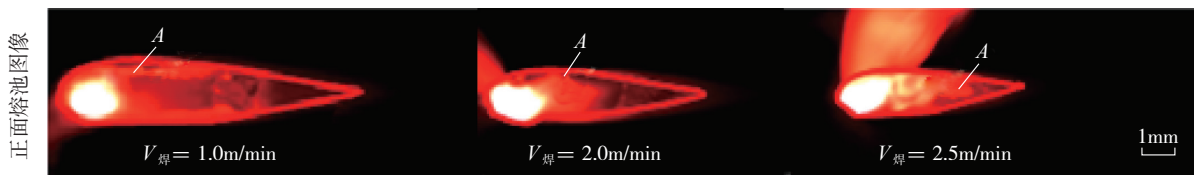
(a) 正面图像



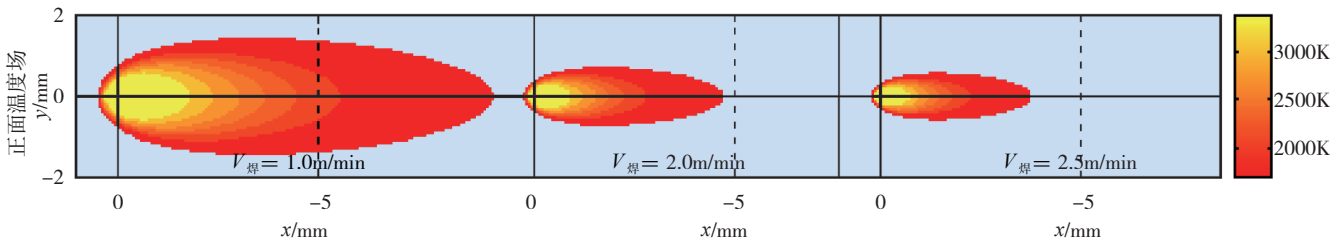
(b) 正面温度场

图2 熔池正面图像及温度场

Fig.2 Facade image and temperature field of molten pool



(a) 正面图像



(b) 温度场

图3 改变焊接速度时熔池正面图像及温度场

Fig.3 Facade images and temperature fields of molten pool at different welding speeds

表1 熔池正面特征量的计算值与实测值的比较

焊接速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	线能量 / (J·mm <sup>-1</sup> )	正面熔池长度		正面熔池宽度	
		实测值 /mm	计算值 /mm	实测值 /mm	计算值 /mm
1	120	8.4	9.8	2.47	2.93
1.5	80	6.21	6.6	1.85	1.96
2	60	5.35	4.93	1.58	1.47
2.5	48	4.26	3.96	1.2	1.17

测值小 8%,宽度的计算值要比实测值小 7%。

(3)焊接速度增加到 2.5m/min (线能量 48J/mm)时,按等效系数  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  计算的正面熔池的长度和宽度分别为 3.96mm 和 1.17mm,正面熔池长度的计算值只比实测值小 7%,宽度的计算值也仅比实测值小 3%。

可见,当正面等效系数  $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$  时,在一定的线能量范围内,所得正面熔池特征量的计算值与实测值相差低于 10%,但输入线能量增加到一定程度,正面等效系数  $k_1$  要减小才能与实测值相符。这主要是由于熔透焊接中不同的熔透状态下,小孔特征的变化导致焊件吸收的能量发生变化而引起的。焊接速度为 1m/min (线能量 120J/mm)时,焊接过程处于过熔透状态,此时背面小孔的开口时间增加,能量直接从小孔开口处穿出,从而使能量的传输效率降低,导致实际焊接过程中工件吸收的有效能量减小。

### 3.2 背面熔池及温度场计算结果及分析

进一步研究背面熔池。图 4 (a) 为高速摄像所拍摄的激光功率 2000W、焊接速度  $V_{焊}$  为 1.5m/min 时, YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢熔池背面图像,图中 A 区域为熔池区域。通过测量得到的背面熔池长度和宽度分别为 7.7mm 和 1.82mm。图 4 (b) 为熔池背面温度场。利用公式 (2) 进行计算并与所测的背面熔池特征量进行对比,发现当  $k_2=1$ 、 $\beta_2=1$  时,背面熔池长度和宽度的计算值分别为 7.87mm 和 1.9mm,此时长度的计算值仅比实测值大 2%,宽度的计算值也比实测值大 4%,而且计算所得到的熔池各个部分与实际测量结果都符合得很好。

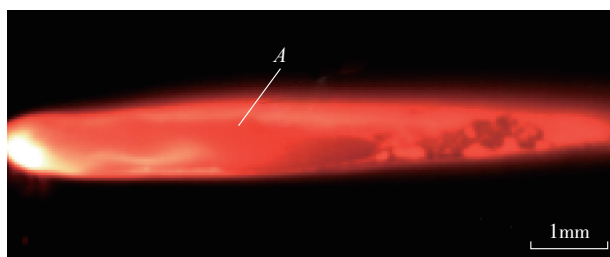
利用  $k_2=1$ 、 $\beta_2=1$  时的数学模型计算 YAG 激光全熔透焊接 304 不锈钢其他焊接参数下的熔池背面温度

场和特征量,其结果如图 5 和表 2 所示。随着焊接速度的增加,输入线能量降低,熔池尺寸逐渐减小,实际背面熔池宽度方向上的尺寸相对于长度方向上变化得更加剧烈,熔池也显得愈发的细长。

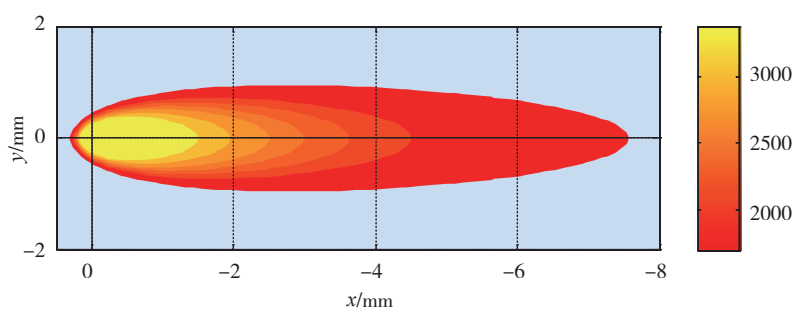
(1)焊接速度 1m/min (线能量 120J/mm)时,背面熔池长度和宽度的计算值分别为 11.78mm 和 2.86mm,比实测的长度小 8%,比实测的宽度大 5%。

(2)焊接速度为 2m/min (线能量 60J/mm)时,背面熔池长度和宽度的计算值分别为 5.89mm 和 1.43mm,长度的计算值比实测值小 9%,宽度的计算值比实测值大 10%。

(3)焊接速度增加到 2.5m/min (线能量 48J/mm)时,背面熔池长度和宽度的计算值分别为 4.74mm 和



(a) 背面图像



(b) 背面温度场

图4 熔池背面图像及温度场

Fig.4 Back image and temperature field of molten pool

表2 熔池背面特征量的计算值与实测值的比较

焊接速度 / (m·min <sup>-1</sup> )	线能量 / (J·mm <sup>-1</sup> )	背面熔池长度		背面熔池宽度	
		实测值 /mm	计算值 /mm	实测值 /mm	计算值 /mm
1	120	12.82	11.78	2.73	2.86
1.5	80	7.7	7.87	1.82	1.9
2	60	6.5	5.89	1.3	1.43
2.5	48	4.85	4.74	0.94	1.11

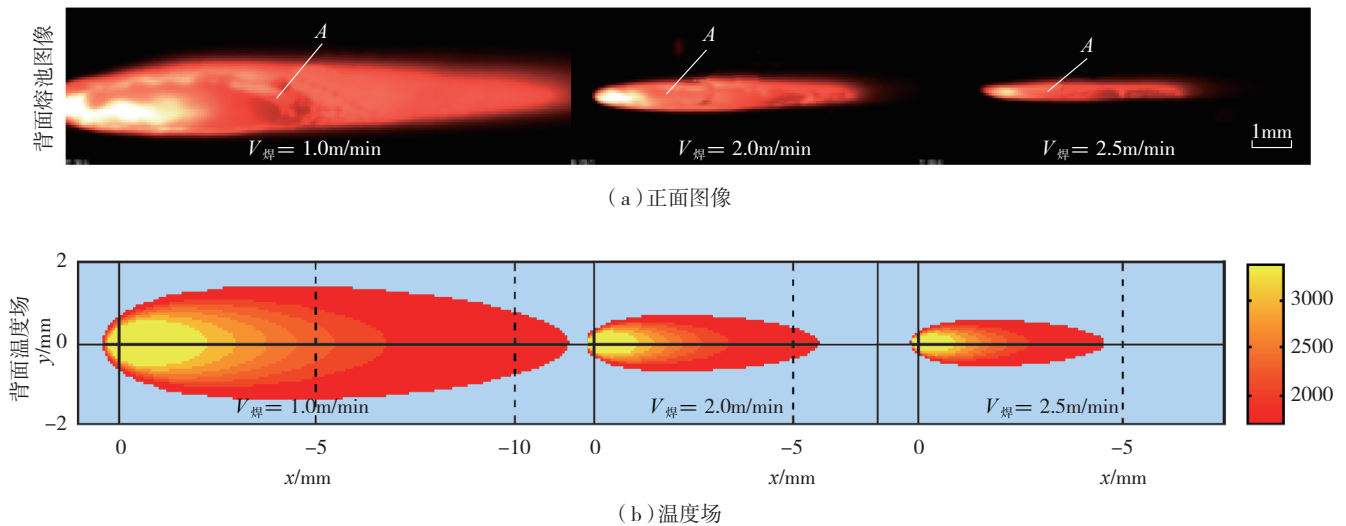


图5 改变焊接速度时熔池背面图像及温度场

Fig.5 Back images and temperature fields of molten pool at different welding speeds

1.11mm,长度的计算值只比实测值小2%,但宽度的计算值比实测值大了18%。如果按等效系数 $k_2=0.94$ 、 $\beta_2=1$ 计算,所得的熔池长度和宽度分别为4.38mm和1mm,与实测值相比,长度之间的偏差为10%,宽度之间的偏差为6%,此时计算结果与试验结果吻合得比较好。

可见,当背面等效系数 $k_2=1$ 、 $\beta_2=1$ 时,在一定的线能量范围内,所得的背面熔池特征量的计算值与实测值符合得很好;当线能量减小到一定程度,背面等效系数 $k_2$ 要减小才能与实测值相符。这是因为当焊接速度增大到2.5m/min(线能量为48J/mm)时,焊接过程处于临界熔透状态,此时小孔并未完全穿透熔池背面,使得实际传到熔池背面的能量相对较少,则相对于计算中所采用的有效能量,实际背面熔池的形成所需的有效能量要小,则在长度相差不大的情况下,计算所得的熔池就明显比实际熔池宽。

#### 4 结论

采用高速摄像获得的YAG激光全熔透焊接304不锈钢熔池正、背面特征量的测量结果,分别对基于Rosenthal移动线热源模型正、背面的等效系数进行了确定。

(1)当正面等效系数 $k_1=0.8$ 、 $\beta_1=1.3$ 时在48~120J/mm的线能量范围内,所得的正面熔池特征量的计算值与实测值符合得很好;当速度减小、热输入使焊接过程处于过度熔化时,由于小孔开口时间增加,实际焊接过程中工件吸收的有效能量减小,导致正面熔池的长度和宽度的计算值都明显比实测值大。

(2)当背面等效系数 $k_2=1$ 、 $\beta_2=1$ 时,在48~120J/mm

的线能量范围内,计算所得的背面熔池的理论结果与试验结果吻合得很好;但当速度增加、热输入使焊接过程处于临界熔透状态时,由于孔并未完全穿透熔池背面,使得实际传到熔池背面的能量减少,在长度相差不大的情况下,计算所得的熔池就明显比实际熔池宽。

#### 参考文献

- [1] Li L, Steen W M, Modern P. Melt pool behavior monitoring and adaptive control of laser surface treatment through machine vision. ICALEO' 93, Orlando, America, 1993:372-381.
- [2] 段爱琴. CO<sub>2</sub>激光深熔焊不稳定穿孔过程特征与相关机理研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2006.
- [3] Steen W, Dowden J, Davis M, et al. A point and line source model of laser keyhole welding. Journal of Physics D: Applied Physics, 1988, 21 (8): 1255-1260.
- [4] Bonollo F, Tiziani A, Zambon A. Model for CO<sub>2</sub> laser welding of stainless steel, titanium, and nickel: parametric study. Materials Science and Technology, 1993, 9 (2): 1137-1145.
- [5] Kaplan A. A Model of deep penetration laser welding based on calculation of the keyhole profile. Journal of Physics D: Applied Physics, 1994, 27 (9): 1805-1814.
- [6] 苏彦东. 激光深熔焊接热效率的研究[D]. 北京: 北京航空航天大学, 2000.
- [7] Lamapa C, Kaplan A, Power J, et al. An analytical thermodynamic model of laser welding. Journal of Physics D: Applied Physics, 1997, 30 (9): 1293-1299.
- [8] 王海兴, 陈熙. 用能量平衡法确定激光焊接熔池尺寸. 工程热物理论, 2002, 23 (增刊): 153-156.
- [9] 陈俐. 航空钛合金激光焊接全熔透稳定性及其焊接物理冶金研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2005.
- [10] D. 拉达伊. 焊接热效应温度场、残余应力、变形. 北京: 机械工业出版社, 1997.

(责编 三丰)