

基于同轴视觉监测的激光深熔焊缝熔深监测

秦国梁 林尚扬

(哈尔滨焊接研究所 哈尔滨 150080)

摘要: 基于激光深熔焊接过程中稳态下小孔前壁材料气化满足的能量平衡以及在同轴视觉传感监测中提取出的小孔的径向尺寸建立了小孔深度的提取迭代方程, 并基于小孔的深度实现了焊缝熔深的同轴视觉传感监测。试验结果表明: 工件未焊透时, 焊缝熔深的监测—计算值和试验测量值具有较好的一致性, 其监测误差一般不超过 12%; 而工件完全焊透后, 焊缝熔深的监测—计算值大于工件厚度, 并基于此实现了工件是否焊透的判断。研究结果表明: 基于同轴视觉传感和小孔前壁材料气化能量平衡建立的激光深熔焊缝熔深提取模型, 可以有效实现激光深熔焊缝熔深的监测。

关键词: Nd: YAG 激光深熔焊 小孔 能量平衡 焊缝熔深 同轴视觉传感

中图分类号: TG456.7

0 前言

激光焊接过程的监测主要是基于声、光、电及热等信号监测焊接过程中气孔等缺陷的形成, 但对未焊透时焊缝的成形状况特别是焊缝熔深则缺乏有效的监测, 这主要是由于很难在熔深和监测信号之间建立一个稳定、直接的映射关系。在过去对熔深的监测多采用“黑箱”模型——将监测信号和试验所测得的焊缝熔深直接拟合得到监测信号与熔深之间的映射关系, 或者采用人工神经网络来建立两者之间的对应关系^[1-2]。

同轴视觉传感是一种先进的激光焊接过程监测方法, 可以实现焊接过程的可视化、直接监测。但是激光致等离子体和金属蒸气对熔池和小孔的覆盖, 使其在对激光深熔焊接过程同轴视觉传感监测过程中观测不到小孔的底部, 并且小孔同轴图像灰度值的变化也不能表征小孔深度的变化^[3-4]。因此不能利用图像三维形状恢复技术或小孔同轴图像灰度值与焊缝熔深的标定曲线, 来实现激光深熔焊接过程中焊缝熔深的监测。

尽管小孔的同轴视觉图像不能反映出小孔底部的三维形状和深度信息, 但仍然能够反映出小孔底部的径向形状和大小^[3-4]。因此可以通过图像处理提取出小孔的径向尺寸。在提取出小孔径向尺寸的基础上基于 Nd: YAG 激光深熔焊接过程中小孔前壁材料蒸发满足的能量条件来求解小孔的深度, 并基于所提取出的小孔的深度实现了激光深熔焊接过程中焊缝熔深的直接监测。

该焊缝熔深监测方法是基于图像处理结果和焊接过程中小孔前壁满足的能量平衡进行的, 不依赖于等离子体的辐射光强, 是一种直接监测的方法。

1 小孔前壁的能量平衡

在给定焊接规范下, 当焊接过程达到稳态时, 小孔也达到了动态平衡状态: 小孔深度和焊缝熔深不再变化, 接受激光束辐照的小孔前壁材料不断熔化和气化, 孔内脱离激光辐照的金属等离子体不断复合成金属蒸气, 并和孔内未电离的, 且不在激光辐照区域内的金属蒸气一起液化形成小孔的后部。这样随着激光束在工件表面上的连续扫描, 小孔前壁的材料不断气化, 焊接过程不断地进行。小孔前壁受激光辐照的示意图如图 1 所示。

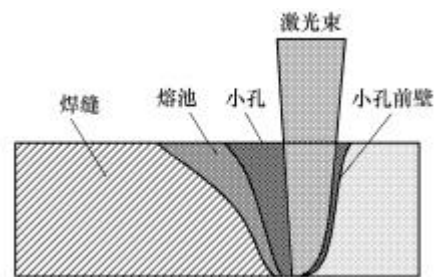


图 1 激光深熔焊接过程中小孔受辐照示意图

小孔前壁吸收的激光能量除了使材料达到气化状态并使金属蒸气具有一定的动能外, 还有一部分能量通过热传导的方式传递到母材中去。因此小孔前壁不断气化满足的能量条件为

$$E_a = E_v + E_k + E_t \quad (1)$$

式中 E_a ——被小孔前壁吸收的激光束能量
 E_v ——小孔前壁气化所需要的能量

E_k ——蒸发后金属蒸气的动能，为能量损失
 E_1 ——通过热传导损失的能量

由于金属蒸气的动能 E_k 与材料蒸发所需要的能量 E_v 相比很小，可以忽略不计^[5]。由小孔经热传导传递到液态层和母材中的能量 E_1 和材料蒸发所需要的能量 E_v 之间近似有如下关系^[4]

$$e = \frac{E_1}{E_v} = \frac{cT_v}{E} \quad (2)$$

式中 e ——热传导造成的能量损失与材料蒸发所需的能量之比

E ——单位质量的材料蒸发所需要的能量

c ——材料的比热容

T_v ——材料的沸点

因此，小孔前壁的能量平衡条件可简化为

$$E_a = (1 + e)E_v \quad (3)$$

在激光深熔焊接过程中，辐照在小孔前壁的激光功率密度是小孔前壁材料蒸发的决定性因素。考虑到计算小孔前壁的体积及其消耗的能量需要较多的假设条件，将会产生很大误差。因此，以单位面积的材料蒸发所需要的能量密度为基础建立小孔前壁材料气化的能量平衡方程。

用功率密度表示的小孔前壁气化过程中满足的能量平衡方程为

$$\frac{AP}{\pi R^2} = (1 + e) r v_d E \quad (4)$$

式中 A ——工件材料对 Nd : YAG 激光的吸收率

P ——激光功率

R ——激光光斑半径

ρ ——材料密度

v_d ——小孔前壁加深的平均速度

在式(4)中，只有小孔前壁平均加深速度是与小孔深度紧密相关的未知量。

2 小孔深度的求解

2.1 小孔平均加深速度的求解

小孔前壁加深速度是由辐照在其上方的激光焊接体能量决定的，其瞬时下降速度因受各种条件的限制很难将其求出。因此，需根据小孔的径向尺寸求解小孔前壁的平均加深速度。

图 2 为小孔纵断面的示意图。假设小孔底部为半椭圆面，短轴直径为提取出的小孔内边缘的宽，长轴直径为提取出的小孔内边缘的长，且小孔最深处的水平位置与小孔内边缘中心的水平位置重合。在 t_d 时间内，小孔前壁的材料从工件表面加深至小孔的最深处，其深度方向上位移为小孔深度 h_k ，而

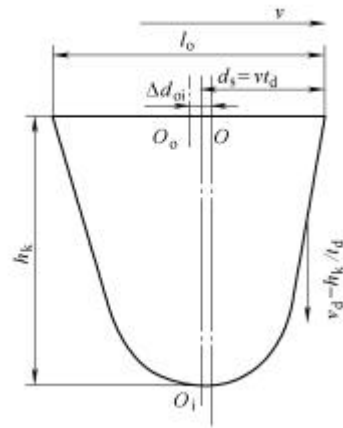


图 2 小孔纵断面示意图

激光束在焊接方向上对工件的扫描距离为 d_s ，则有

$$\begin{cases} v_d = \frac{h_k}{t_d} \\ d_s = vt_d = \frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi} \end{cases} \quad (5)$$

式中 h_k ——小孔深度

l_o ——提取出的小孔外边缘的长度

Δd_{oi} ——提取出的小孔内外边缘之间中心距

v ——焊接速度

则从式(5)可得小孔前壁的平均加深速度为

$$v_d = \frac{h_k}{t_d} = \frac{h_k}{\frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi}} v \quad (6)$$

2.2 小孔深度求解方程的建立

将式(6)代入到式(4)，整理可得小孔深度为

$$h_k = \frac{A}{1 + e} \frac{P}{\rho R^2 v} \frac{\frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi}}{r E} \quad (7)$$

将 Nd : YAG 激光光斑半径 R 随离焦距 z 变化的拟合关系式 $R = 11.56(z - \Delta f)^2 + R_0$ (R_0 为激光束焦点半径)代入式(7)^[4]，并考虑焊接过程中激光束焦点位置的偏移 f ，可得到小孔深度的求解方程

$$h_k = \frac{A}{1 + e} \frac{P}{\rho \left[11.56(\Delta z - \Delta f)^2 + R_0 \right]^2 v} \frac{\frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi}}{r E} \quad (8)$$

式中 f ——激光束焦点位置的偏移量

式(8)即为在一定激光功率 P 、焊接速度 v 、离焦距 z 条件下小孔深度的求解方程。从式(8)中可以看出，小孔深度由激光功率、焊接速度、离焦距等焊接参数及材料的热物理参数决定。此外，激光束焦点大小对小孔的深度也有一定的影响。

在激光深熔焊接过程中，小孔处在液态金属的包围中，小孔的前壁是具有一定厚度的液态金属层。因此，小孔前壁下降是从液态金属表面开始的，则

单位质量的液态材料气化所需要的能量 E 为

$$E = L_v + c(T_v - T_m) \quad (9)$$

式中 L_v ——材料的汽化热

T_m ——材料的熔点

2.3 小孔深度的求解

小孔前壁是倾斜的，因而在小孔深度的求解中，激光功率密度不能按照辐照在工件表面的激光功率密度处理。小孔前壁加深速度为一平均值，因此小孔深度求解方程中的激光功率密度按小孔半深处的激光功率密度作为辐照在小孔前壁的平均激光功率密度处理。将小孔深度求解方程修正为

$$h_k = \frac{A}{1+e} \frac{P}{p \left[11.56 \left(\Delta z - \Delta f - \frac{h_k}{2} \right)^2 + R_0 \right]^2} \frac{\frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi}}{r E} \quad (10)$$

这样小孔深度求解方程变成一个5阶非线性方程，其根不能用根式或解析式表示^[6]，式(10)需要用数值法求解。

对式(10)分析可以看出，右边可分为三项：第一项为系数项；最后一项与由同轴视觉传感监测提取出的小孔的二维径向特征参数和材料的热物理参数有关；第二项是与焊接参数有关的项，物理意义为单位面积上的焊接线能量(或单位时间内激光功率密度)，它被定义为焊接体能量。

焊接体能量 q_v 的定义为^[4]

$$q_v = \frac{P}{p \left[11.56 (\Delta z)^2 + R_0 \right]^2} \quad (11)$$

则式(10)又可表示为

$$\begin{cases} q_v = \frac{P}{p \left[11.56 \left(\Delta z - \Delta f - \frac{h_k}{2} \right)^2 + R_0 \right]^2} \\ h_k = \frac{A q_v}{1+e} \frac{\frac{l_o}{2} - \Delta d_{oi}}{r E} \end{cases} \quad (12)$$

从式(12)可以看出，在激光深熔焊接过程中，小孔深度的变化将会引起辐照在小孔前壁的焊接体能量的变化；反之，焊接体能量的变化又将导致小孔深度的变化，两者相互影响。因此，以式(12)为基础通过迭代可求得小孔深度。

3 试验方法

试验用激光器是额定功率为2 kW的Nd:YAG固体激光器，输出波长为1.06 μm的连续波激光，

激光束由内直径为0.6 mm的光纤传输，经焦距为200 mm的透镜聚焦后的激光束焦点直径为0.6 mm；工件为250 mm×100 mm×1.8 mm的Q235钢板，同轴保护气为Ar。

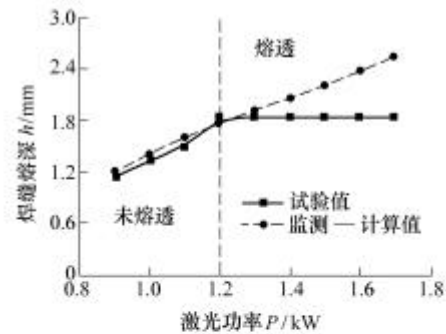
试验方法为平板堆焊，激光功率 P 、焊接速度 v 、离焦量 $?z$ 以及同轴保护气流量 q_v 等焊接规范参数离散变化，并分别测量每个焊接规范下的焊缝熔深作为激光深熔焊缝熔深的试验测量值。

4 基于小孔深度的焊缝熔深监测

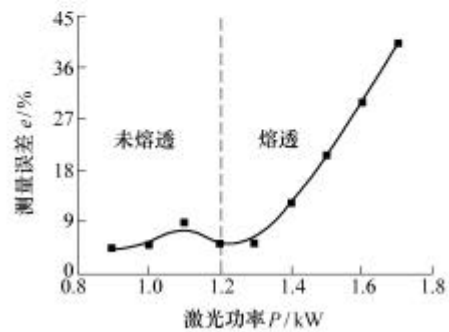
由于孔底液态金属层的厚度很薄，对焊缝熔深的影响可以忽略不计^[4-5]，因此以小孔深度作为焊缝熔深来处理，则分别测量不同焊接规范参数下，焊缝熔深验证由同轴视觉传感监测计算出的焊缝熔深。

4.1 焊缝熔深监测 - 计算值的验证

图3~6分别为焊缝熔深的监测—计算值和试验测量值，随激光功率、焊接速度、离焦量及同轴保护气流量变化的曲线及其监测误差曲线。



(a) 焊缝熔深监测—计算值和试验测量值的比较



(b) 监测误差

图3 不同激光功率下焊缝熔深的监测及其误差

($v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $?z = 0 \text{ mm}$, $q_v = 20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

从图3中可以看出，在工件未焊透时，焊缝熔深的监测—计算值与试验测量值具有较好的一致性，其监测误差最大不超过12%，最大误差为11.76%，而且是在不太常用的大离焦量下所监测到的；而在常用的小离焦量下，焊接规范参数的变化

过程中未焊透时焊缝熔深的监测误差都不超过 10%。较小的监测误差说明，工件未焊透时对焊缝熔深的监测是比较准确的。

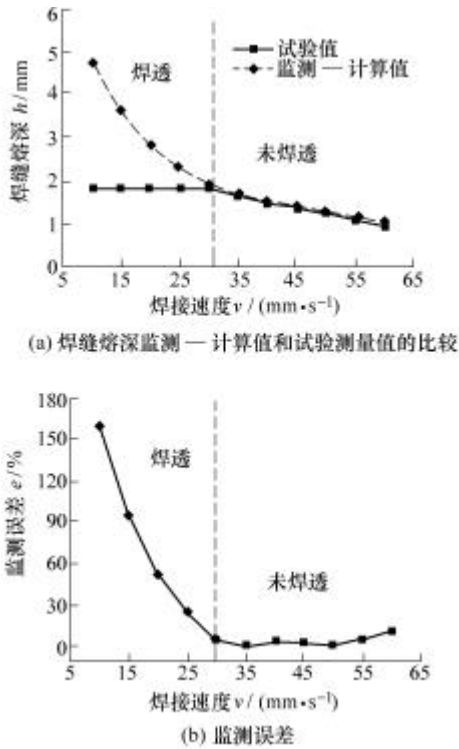


图 4 不同焊接速度下焊缝熔深的监测及其误差

($P = 1.25 \text{ kW}$, $z = 0 \text{ mm}$, $q_v = 20 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

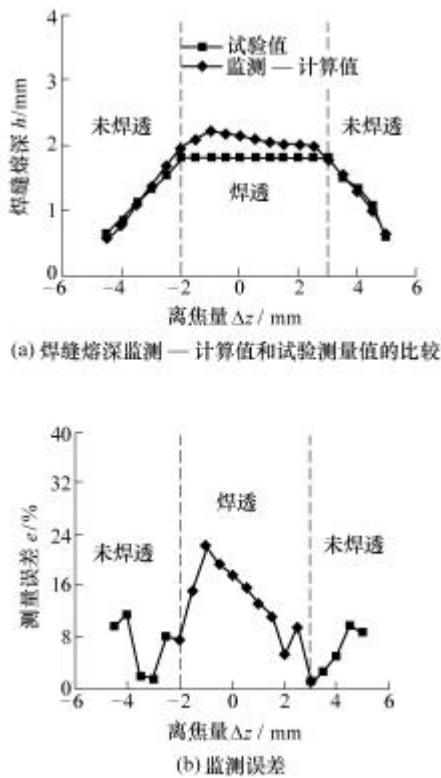


图 5 不同离焦量下焊缝熔深的监测及其误差

($P = 1.5 \text{ kW}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $q_v = 25 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$)

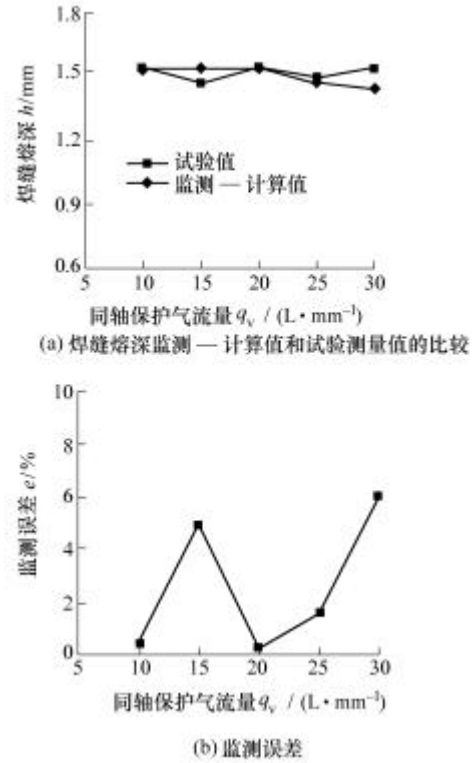


图 6 不同同轴保护气流量下焊缝熔深的监测及其误差

($P = 1.1 \text{ kW}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 0 \text{ mm}$)





在工件焊透时，焊缝熔深的监测—计算值明显大于工件厚度，具有很大的监测误差。这主要是由于在工件焊透时，有一部分激光束能量透过孔底液态金属薄层而损耗在工件之外，但在熔深监测过程中并没有考虑这部分能量损耗而造成的误差。另外，随着焊接体能量的增大，透过孔底液态金属层损耗的激光能量也就越多，造成的监测误差也就越大。

4.2 工件焊透的判断

由于工件焊透后焊缝熔深的监测—计算值明显大于工件厚度，因此可以直接利用焊缝熔深的监测—计算值和工件厚度比较来判断工件是否被焊透。

在试验过程中发现，当工件刚刚焊透时的焊缝背面成形并不是连续的，而是断断续续的，而这些不连续的焊点在对接的情况下将会成为裂纹起始点和应力集中点而造成焊接缺陷。不同焊接规范参数下完全焊透和刚刚焊透时的焊缝背面成形比较见表。因此将这种情况列为未焊透的状态，为了避免在监测过程中对这种情况出现误判，在焊透判断过程中预设一定的判断余量。根据试验情况取工件厚度的 8%，即焊缝熔深的监测—计算值不小于工件厚度的 1.08 倍时，认为工件完全焊透，否则认为工件未焊透。

表 工件刚刚焊透与完全焊透时焊缝背面成形比较

焊接参数	焊缝背面成形
$P = 1.2 \text{ kW}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 0 \text{ mm}$; 刚刚焊透	
$P = 1.3 \text{ kW}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 0 \text{ mm}$; 完全焊透	
$P = 1.5 \text{ kW}$, $v = 30 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 3 \text{ mm}$; 刚刚焊透	
$P = 1.5 \text{ kW}$, $v = 25 \text{ mm} \cdot \text{s}^{-1}$, $z = 2 \text{ mm}$; 完全焊透	

试验结果证明，在工件焊透状况判断过程中考虑一定的判断余量可提高判断的准确性和可靠性。

5 结论

(1) 在由同轴视觉传感监测提取出的小孔径向尺寸和小孔前壁满足的能量平衡的基础上推导建立了小孔深度提取迭代方程。基于在同轴视觉传感监测中所提取计算出的小孔深度实现了 Nd : YAG 激光深熔焊接过程中焊缝熔深的直接监测和工件焊透的判断。

(2) 焊缝熔深监测—计算值和试验测量值的比较表明，工件未焊透时，焊缝熔深的监测—计算值和试验测量值具有较好的一致性，其监测误差一般不超过 12%；而工件完全焊透后，焊缝熔深的监测—计算值明显大于工件厚度。

(3) 在工件是否焊透的判断中，预设工件厚度的 8% 作为判断余量可提高判断结果的可靠性和准确性，避免在工件刚刚焊透对焊缝背面不连续成形出现误判。

参 考 文 献

- [1] OGMEN M. Self-adapting neural/fuzzy networks for the real time process control of laser welding[C]/Laser Materials Processing Conference, Orlando, USA. 1998, section C : 188-197.
- [2] ABELS P, KAIERLE S, KRATZSCH C. Universal coaxial process control system for laser material processing[C]// Laser Materials Processing Conference, San Diego, USA. 1999, section E : 99-108.

[3] BEERSIEK J. A CMOS camera as a tool for process analysis not only for laser beam welding[C]/Laser Materials Processing Conference, Orlando, USA. 2001, section F : 206-215.

[4] 秦国梁. Nd : YAG 激光薄钢板深熔焊接小孔特征及同轴视觉传感[D]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学, 2004.

[5] ALLMEN M V. Laser-beam interaction with materials [M]. New York : Springer-Verlag Publishing House, 1987.

[6] 吴勃英. 数值分析[M]. 哈尔滨 : 哈尔滨工业大学出版社, 1998.

WELD PENETRATION MONITORING IN Nd : YAG LASER DEEP PENETRATION WELDING BASED ON COAXIAL VISUAL SENSING TECHNOLOGY

QIN Guoliang LIN Shangyang
(Harbin Welding Institute, Harbin 150080)

Abstract : The iterative equation to extract the keyhole depth is founded according to the energy balance met by evaporation of the keyhole front wall and the extracted radial keyhole dimension in coaxial visual monitoring, and the weld penetration is monitored in the Nd : YAG laser deep penetration welding process based on the extracted keyhole depth. The studied results show that the monitored weld penetration accords well with that of experiment and the monitored error is less than 12% for partial penetration. While for full penetration, the monitored weld penetration is much greater than the thickness of the workpiece, which is used to judge whether the workpiece is fully penetrated or not. The experimental results indicate that it is effective to monitor weld penetration in laser deep penetration welding based on the energy balance model of keyhole front wall by using coaxial visual sensing system.

Key words : Nd : YAG laser deep penetration welding

Keyhole Energy balance

Weld penetration Coaxial visual sensing

作者简介：秦国梁，男，1975 年出生，博士。主要从事激光加工、复合热源焊接技术及焊接过程监测技术的研究。

E-mail : laserpro@sohu.com