

文章编号: 0258-7025(2001)03-0284-05

激光焊接过程实时监测

曾 浩¹ 周祖德¹ 陈幼平¹ 骆 红² 胡席远² 胡伦骥²

(华中科技大学¹ 机械科学与工程学院² 材料科学与工程系 武汉 430074)

摘要 在利用小波变换对拾取的激光焊接等离子体的 AE(Acoustic Emission)信号进行分析的基础上,对小波分解后得到的细节信号作进一步处理。在此基础上提取的曲线很好地反映了激光焊接过程的状态变化,能够快速检测到焊接缺陷,这说明应用曲线实现激光焊接质量控制是可行的。

关键词 激光焊接 过程监测 小波分析

中图分类号 TG 456.7 文献标识码 A

Real-time In-process Monitoring of Laser Welding

ZENG Hao¹ ZHOU Zu-de¹ CHEN You-ping¹ LUO Hong² HU Xi-yuan² HU Lun-ji

(¹School of Mechanical Science and Engineering, ²Department of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract The AE(acoustic emission) signals emitting from laser welding were sensed with an electret condenser microphone and analyzed with wavelet analysis to characterize their time-frequency distributions. Based on the detail signals which were extracted from AE signals via wavelet analysis, a signal Intensity-Moving-Average(IMA) curve was defined in this paper. It was shown that the IMA curve of good-quality, full penetration welds was different from that of poor-quality welds, defined as either welds with misalignment problem or welds having a gap between the sheets being joined. According to the curve which shown to be capable of recognizing the transformation of welding states commendably, defects can be detected quickly and exactly. With the help of IMA curve, it's possible to realize the process control of laser welding.

Key words laser welding, monitoring, wavelet analysis

1 引言

激光焊接过程受到一系列工艺因素的影响,如激光功率、焊接速度、离焦量、保护气种类及流量以及工件表面状况等。在长时间的连续焊接过程中,某些参量势必要发生改变,从而造成焊接质量的不稳定。因此,在实际生产过程中需要对激光焊接质量进行实时检测和闭环控制,以保证焊接质量。等离子体与焊接过程的稳定性密切相关。对等离子体特征信号的检测和分析是进行激光焊接质量控制的基础。AE(Acoustic Emission)信号作为等离子体的一个主要特征信号,包含了大量相关信息。实践表明,将 AE 信号作为质量控制的检测量是比较适合的。

目前国内外 AE 信号的分析方法主要是采用快

速傅里叶变换(FFT)来研究信号的频谱特点^[1,2]。也有采用短时傅里叶变换对信号进行时频分析^[3,4]。实际研究表明,激光焊接过程中的 AE 信号是非平稳、时变的。而 FFT 主要是针对时不变信号的,这就使 FFT 的应用受到了一定的局限。如果要保证焊接质量的稳定,就必须对焊接过程进行控制。这就要求在焊接缺陷产生之前或者刚刚产生时,系统能够及时地对焊接工艺参数进行调整。因此,应该把研究的重点放在从稳定焊接向不稳定焊接转换的这一中间过程上。并以最终获得一个表征焊接状态变化的过程量为目的。为了能对激光焊接的过程进行实时监控,对拾取的信号先采用小波变换进行处理,在此基础上,对处理后的信号作进一步分析,从中提取了可以用来控制激光焊接过程的检测曲线。

2 实验方法及结果

实验中通过 CZ II -65 型驻极体式传声器采集激光焊接过程中的 AE 信号。实验装置如图 1 所示。实验条件如下 : 激光器采用快速轴流式 CO₂ 激光器 , 功率为 900 W , 焊接速度 $V = 2 \text{ m/min}$, 保护气为 Ar 气 , 气流量为 6 L/min , 采用焦距为 125 mm 的 ZnSe 聚焦透镜。实验材料为 0.75 mm 厚的镀锌板 , 焊接方式为拼焊。

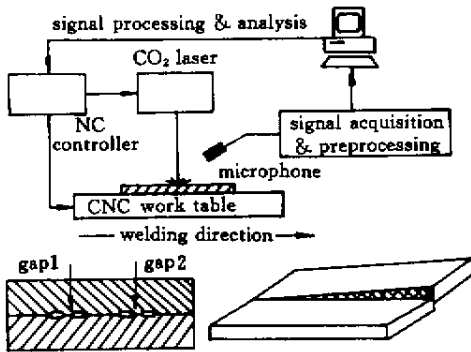


图 1 实验装置及试样

Fig.1 Block diagram of the experimental setup and test samples

研究发现 , 深熔焊时声谱在高频带(10 ~ 20 kHz) 与未产生小孔焊时声谱相差较大^[5]。因此 , 试验的研究对象被设定为 16 kHz 附近的声音信号。通过信号预处理 , 采样保持 , A/D 转换后 , 进入计算机进行分析和处理。信号的采样频率 $f_s = 50 \text{ kHz}$ 。

实验中 , 进行了正常焊接实验及几次有焊接缺陷的焊接实验。在缺陷焊接中 , 有意识地安排了两种缺陷 : 间隙缺陷和错边缺陷 , 如图 1 所示。在间隙实验中 , 在对接试样上用磨床加工出 0.08 mm 和 0.12 mm 的对接间隙 , 分别对应于 Gap1 和 Gap2。其长度约为 1.35 mm , 使得在此实验条件下间隙处的采样信号有 2048 个点 , 以便于计算机进行数据处理 ($l = 2048 \div f_s \times V = 2048 \div 50 \text{ kHz} \times 2 \text{ m/min} = 1.365 \text{ mm}$)。对于错边实验 , 则将两块镀锌板的一端上下错开 0.4 mm , 这样 , 在开始阶段的焊接基本可以看作是正常的 , 随后 , 由于错边逐渐加大 , 导致焊接错边缺陷的产生。

2.1 激光焊接 AE 信号的小波分析

在出现间隙缺陷和错边缺陷时对应的 AE 信号 Sig 的典型波形如图 2 所示。图中 , 横坐标为信号采样的点数 , 纵坐标为原始信号经过处理后的信号采样幅值。通过对比实验后的焊接试样与采集的信号 , 找到间隙的对应位置。在间隙缺陷实验中 , 第一

个间隙约位于 57200 ~ 59247 , 61850 ~ 63897 ; 第二个间隙约位于 : 96100 ~ 98147 , 105453 ~ 107500。对于错边缺陷实验 , 从 95197 开始可以较为明显地看到错边缺陷的出现 , 此时试样上下错边约为 0.1 mm。

应用小波分析的目的在于从时频分析的角度来分析激光焊接过程中缺陷的产生过程。小波分析采用 db5 (Daubechies , order 5) 小波 , 对信号 Sig 分解到第 6 层。 d_6 , d_5 分别表示第 6 , 第 5 层细节信号。根据小波分解各分量的频率结构关系 , 第 l 层分解的逼近信号及细节信号的频率范围分别为 $[0, \frac{1}{2}f_s 2^{-l}]$, $[\frac{1}{2}f_s 2^{-l}, \frac{1}{2}f_s 2^{-(l-1)}]$ 。即 , 小波分解的每一层都是对上一层信号的等带宽分解 , 将低频部分作为逼近信号 , 而把高频部分作为细节信号。据此 , 可以通过计算得出 , a_6 , d_6 , d_5 的频率范围分别为 $[0, 390 \text{ Hz}]$, $[390 \text{ Hz}, 781 \text{ Hz}]$, $[781 \text{ Hz}, 1562 \text{ Hz}]$ 。因此 , 对信号 Sig 进行小波分解后 , 得到的结果就是分别属于不同频段的分解信号。可以根据研究的目的选取包含所需信息的频段序列 , 进行深层次信息处理。

应该指出的是 , 由于小波分解时 , 分解信号采取了向下采样 (Down Sampling) , 在每一次分解后 , 剔除分解信号中的奇数点 , 使得分解后的逼近信号和细节信号的采样点数减半。因此 , 若设待分析信号 Sig 的长度为 L , 则 n 次分解后的逼近信号 a_n 和细节信号 d_n 的数据长度均减少为 $2^{-n}L$ 。这一点对于后面的缺陷定位是非常重要的。

前期的研究工作表明^[6] , 如果将小波变换看作是由一系列的带宽滤波器对信号的作用 , 在此作用下 , 低频分量 (逼近信号) 的幅值在间隙缺陷产生时 , 同正常焊接条件下的低频分量幅值相比有较大幅度的下降 , 所拾取 AE 信号在 d_6 , d_5 频段部分的能量在间隙缺陷产生时 , 也比正常时来得小。这一现象 , 在错边缺陷中同样可以看到。因此 , 考虑将信号的低频分量的幅值和信号在 d_6 , d_5 频段部分的能量作为激光焊接的缺陷特征信息。两者在激光焊接过程中从正常焊接状态向缺陷状态变化时 , 其值都呈现出逐渐减小的特征。

2.2 检测曲线的提取

过程检测变量的选择 , 应该以运算简单、快速 , 能够反应系统状态变迁为基本要求。在此原则

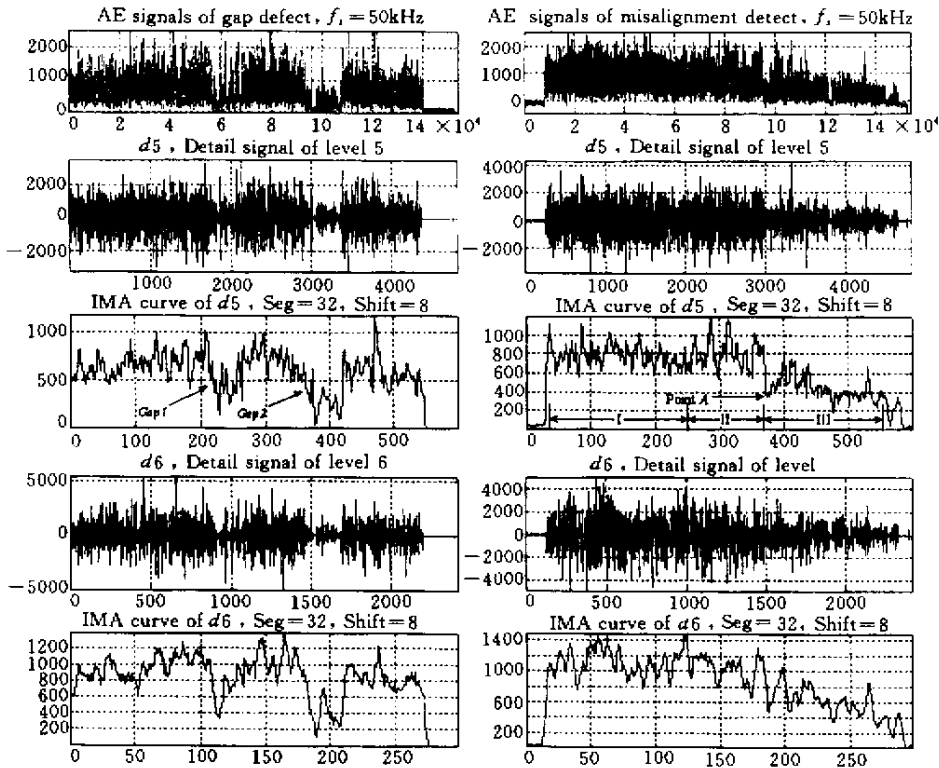


图2 间隙和错边 AE 信号小波分解 level5、6 细节信号及其检测曲线

Fig.2 Level 5、6 detail signals of AE signals with defects and the relevant IMA curves

下,在 AE 信号小波分解得到的细节信号 d_n 的基础上,定义一个信号强度移动平均量 IMA 如下

$$\text{IMA}_{\text{seg}, \text{shift}}(i) = \frac{1}{\text{seg}} \sum_{m=1+i \times \text{shift}}^{\text{seg}+i \times \text{shift}} |d_n(m)| \quad (1)$$

$i = 0, 1, 2, 3, \dots$

上式表明,对信号 d_n 取绝对值后,设定一个数据处理区间,其长度为 seg 个点,并求取其平均值,作为 IMA 的一个点;再将此数据处理区间向后移动 shift 个点,求取 IMA 的下一个点,以此类推,从而获得移动平均线——IMA 曲线。式中 seg 为计算一次平均值的数据处理区间的长度。它的大小反映了对信号的光滑程度,其值越大,则所得 IMA 曲线越光滑,同时也使实时性降低。 shift 为求得一次平均值后,将数据处理区间向后移动的长度,其取值范围为 $[1, \text{seg}]$,其取值越小,则运算量越大,反映的信号细节也越多,适当的取值,可以在保证信号细节信息的前提下,降低计算量。 i 的取值则应保证上式中求和上限应该小于信号 d_n 的长度,即 $\text{seg} + i \times \text{shift} \leq \text{length}(d_n)$,因此,IMA 的数据点长度为

$$\text{length}(\text{IMA}) = \text{round}\left(\frac{\text{length}(d_n) - \text{seg}}{\text{shift}}\right) + 1 \quad (2)$$

细节信号 d_n 的 IMA 曲线中每一点 i 同 AE 信号 Sig 中点 k 的对应关系如下所示

$$\text{IMA } i = \text{round}\left(\frac{2^{-n}k - \text{seg}}{\text{shift}}\right) + 1 \leftrightarrow \text{Sig} : k \quad (3)$$

激光焊接是一个快速的焊接过程,焊速往往可以达到 2 m/min 或以上。为了保证焊接质量,要求能够识别的焊接缺陷应该限制在 1 mm 以内,这就要求系统的反应速度应小于 30 ms,也就是要求系统在每 30 ms (或小于 30 ms) 就应该对采样数据进行一次处理,并对处理结果进行判断和分析。同时,由于在进行小波变换时,对分解信号作向下采样,使得每一次分解后,信号的数据量减半。如果对 d_5 分量进行研究的话,数据量会减少到只有原来的 $2^{-5} = 1/32$ 。为了保证计算机对信号进行处理时有足够的数量,只有提高采样率。在实际过程中,采样率 $f_s = 50$ kHz。这样,每当采集到 L 个数据后 ($L = 1024$ 约为 20 ms) 对数据进行一次小波分解。此时,小波分解后得到的 d_5 分量的数据量为 32 个数据点。因此,

根据采样频率及实时性要求,将 seg 值取为 32。在不影响实时性的前提下, $shift$ 可根据具体情况取值,目前取为 8。

2.3 实例

激光焊接产生间隙及错边缺陷时测得的 AE 信号的总采样长度均为 154000。当采集到 1024 个点后,采用 db5 小波对采样信号进行分解,得到 $d5$ 分量,其数据量为 $2^{-5} \times 1024 = 32$,计算 $d5$ 分量的 IMA;当采集到下一个 1024 个点后,同上,对信号进行小波分解,又得到 32 个点,将此 32 个点拼接到已得到的 $d5$ 分量后,再计算相应的 IMA;以此类推,直至停止信号采样。间隙及错边缺陷时测得的 AE 信号, $d5$ 分量及其 IMA 检测曲线如图 2 所示。

在间隙缺陷试验中,第一个间隙(Gap1)约处于 AE 信号采样点 57200 ~ 63897 范围内;第二个间隙(Gap2)约处于 AE 信号采样点 96100 ~ 107500 范围内。从图中可以看到,当焊接状态正常时,IMA 曲线基本处于 500 以上,虽然曲线的振荡比较剧烈,但其曲线的下沿很少越过 500 一线,即使有时下探到 500 以下,也很快就返回到 500 一线的上方。当间隙出现时,IMA 曲线迅速下降,从 500 降到 200 ~ 300 之间,最低可至 100 左右。图 3 是 IMA 曲线在间隙处的局部放大图。从图中可以看到,IMA 曲线较为明显地下降是从点 220 开始的。从间隙缺陷的实验情况来看,在间隙出现时,工件与激光仍然发生了相互作用,在工件上有焊接材料熔化现象。因此,熔池的行为和工件表面受热所产生的温度梯度场带来的热运动是存在间隙情况下 AE 信号产生的主要原因。每一处间隙都是由两个小孔组成的,这一点也反映在图中。可以看到,在两个极小值之间,IMA 曲线有一个跃起,表明当激光焦点通过间隙后,焊接状态趋向正常,但由于间隙的影响,以及 IMA 曲线是一个由平均量组成的曲线,使得此时 IMA 曲线值同焊接正常时值相比较,其值偏低。从试验中间隙的安排来看,Gap1 处的间隙宽度为 0.08 mm,Gap2 处的间隙宽度为 0.12 mm。从 AE 信号中可以很清楚地看到,Gap2 比 Gap1 更为明显。在 IMA 曲线中,间隙较大的 Gap2 比间隙较小的 Gap1 的值更低;与此相对应,Gap1 的振荡却比 Gap2 要剧烈得多。由此看来,间隙的大小在 IMA 曲线中得到了一定的反映。在大间隙情况下,IMA 曲线表现为幅值更低,曲线更为平滑;而在较小间隙的情况下,IMA 曲线的幅值相对较高,而且振荡也更为剧烈。

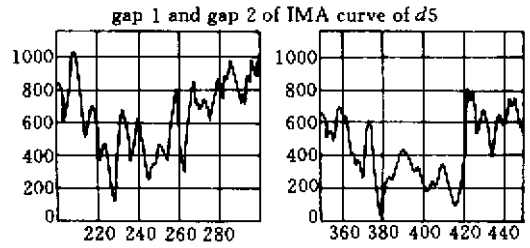


图 3 间隙 1 2 的局部放大

Fig.2 Zooming out of gap 1 and 2

作为对比,对 $d6$ 信号也作出其 IMA 曲线。同 $d5$ 相比,由于信号长度减小,IMA 曲线显得较为平滑,有一些细节信息显现不出。但两者 IMA 曲线的总体形态是一致的。

在图 2 右侧的是错边缺陷实验。从图中可以看到,根据错边量的大小,信号被分为三个阶段。在信号的开始阶段(阶段 I),即焊接状态正常时,虽然曲线的振荡比较剧烈,但 IMA 曲线基本上处于 600 以上。在阶段 II,随着焊接的进行,错边量开始逐渐增加,但此时的 IMA 曲线仍然维持在正常范围以内,即 600 以上;同时,曲线的振荡较阶段 I 还要剧烈一些。此时若仅仅从 IMA 曲线上观察,无法发现已经有错边产生。如果进一步观察图中的错边 AE 信号,可以发现,在错边量较小的情况下,AE 信号的变化也不大。分析其原因,是因为沿光轴方向上 ± 0.5 mm 以内的变化仍处于透镜的焦深以内,这使得被焊材料的蒸发量变化不大;同时,由于错边量较小,焊接工件表面状况的变化还不足以使熔池及小孔的形态发生较大变化。因此,同阶段 I 相比,此时的 AE 信号的变化不大。在阶段 III,随着错边量的增加,激光入射到两块工件上的能量差开始变大,由错边引起的熔池和小孔的形态变化也加剧,从图中可以看到,在 A 点,IMA 曲线有一个急剧的下降。由于错边量的增加是一个线性的、渐进的过程,造成 AE 信号的强度随错边量的提高而呈直线下降趋势。从图中 IMA 曲线上可以清楚地看到这一点。

根据上述实验研究结果以及 IMA 曲线的特点,确定激光焊接间隙及错边缺陷监测的方案步骤如下:

- 1) 学习阶段:对待加工工件进行试焊,同时计算机采集信号,并进行处理分析。
- 2) 确定阈值:根据试焊得到的 IMA 检测曲线,确定检测阈值。
- 3) 实际检测阶段:将检测阈值作为主要的判断

指标,同时结合实际加工过程中 IMA 检测曲线的振荡情况作为参考,对缺陷进行实时检测。

方案的关键在实际检测阶段,特别在判断是否出现缺陷这一步。缺陷检测流程图如图 4 所示。在实际中,缺陷特征的识别结合 IMA 曲线的两个特点来进行判断。为了避免误报,特别当曲线低于阈值,但差值较小时,系统在观察下一个数据后,再作判断,从而避免了在曲线偶尔低于阈值时,系统错误地报警。

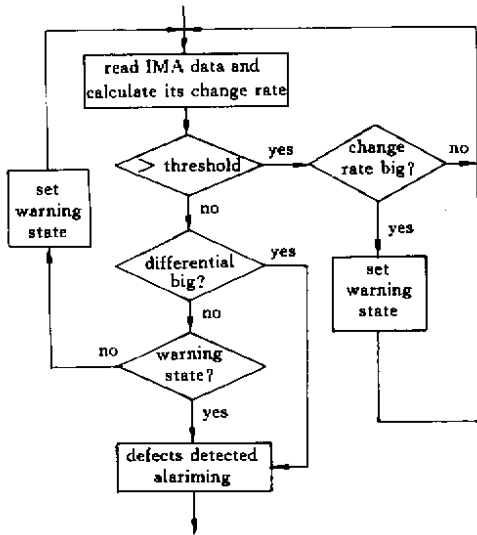


图 4 缺陷检测流程图

Fig.4 Flowchart of defects detecting

运用上述算法,实现了对激光焊接过程间隙及错边缺陷的检测。系统能够实时监测焊接过程,及时地判断出焊接过程是否出现缺陷或进入不稳定状态,并提前报警,从而保证了焊接质量。对系统的进一步改进包括提高信号采样率,增加传感器,以获取更多信息,提高检测的可靠性,运用神经网络对

IMA 曲线进行处理。

3 结 论

从实际研究来看,AE 信号作为过程控制的检测量是比较适合的,因为它有较高的信噪比,响应速度快以及具有非接触测量的特点。对于激光焊接的间隙缺陷和错边缺陷,在 AE 信号基础上提取的 IMA 曲线可以很好地反映激光焊接过程的状态变化,从而能够快速检测到焊接缺陷的产生,进而实现焊接质量控制。对于间隙缺陷,间隙的大小在曲线中得到了了一定的反映。因此,应用 IMA 曲线实现激光焊接质量控制是可行的。

参 考 文 献

- 1 Luo Hong, Hu Lunji, Hu Xiyuan *et al.*. Fast Fourier analysis of optical and acoustic signals at poor penetration in laser welding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 1998, **A25**(6):570 ~ 572 (in Chinese)
- 2 Y. L. Mao, G. Kinsman, W. W. Duley. Real-time fast Fourier transform analysis of acoustic emission during CO₂ laser welding of materials. *J. Laser Applications*, 1993, **5**(2&3):17 ~ 22
- 3 D. Farson, K. Hillsley, J. Sames *et al.*. Frequency-time characteristics of air-borne signals from laser welds. *J. Laser Applications*, 1996, **8**(1):33 ~ 42
- 4 E. Nava-rudiger, M. Houlot. Integration of real time quality control systems in a welding process. *J. Laser Applications*, 1997, **9**(2):95 ~ 102
- 5 Luo Hong. The Principles and Technologies of Defect Diagnosis in Laser Welding of Thin Sheets. [Ph. D. Dissertation]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 1998 (in Chinese)
- 6 Zeng Hao, Zhou Zude, Luo Hong *et al.*. Wavelet analysis of acoustic emission signals with welding defect in laser welding. *Chinese J. Lasers* (中国激光), 2000, **A27**(5):471 ~ 476 (in Chinese)