

激光焊接缺陷声信号的小波分析

曾 浩¹ 周祖德¹ 骆 红² 胡伦骥² 胡席远²

(华中理工大学¹ 机械科学与工程学院,² 材料科学与工程系 武汉 430074)

提要 利用小波变换对拾取的激光焊接等离子体的 AE 信号进行分析,通过对比激光焊接的稳定过程及出现间隙、错边缺陷时的 AE 信号,发现信号的低频分量在缺陷发生时幅值较正常稳定焊接时有较明显的下降;AE 信号在 1562~ 6250 Hz 频段部分的能量也存在类似现象。利用小波分解技术能够将信号划分到不同的频带范围这一特性,可以实现 AE 信号的信息分离,从而能够提取 AE 信号的特征信息,进而实现对激光焊接的过程控制。

关键词 激光焊接, 监测, 小波分析

1 引 言

激光焊接是一种高速度、非接触、变形小的热加工方式,非常适合大量而连续的生产加工过程。与传统焊接方法相比有以下突出特点:能量密度高、焊接质量好、热影响区小、无污染。随着激光焊接在生产中日益广泛的应用,对其质量稳定性的研究也逐渐受到重视。激光焊接过程容易受到一系列因素的影响,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,所有这些都造成焊接质量的不稳定。这些问题的存在会严重影响激光焊接的实际应用。因此,在实际生产过程中急需有某种监控手段,以形成对激光焊接质量的实时检测和闭环控制,保证焊接质量的稳定。

激光焊接过程中产生了各种各样的信号,在这些信号中,等离子体成为研究的重点。等离子体与焊接过程的稳定性密切相关。等离子体总的特征信号可以归结为声音冲击波、强烈的光辐射、高温强热和非平衡电场等四种形式。各种特征信号在时间、频率和幅值上均密切相关。对等离子体特征信号的检测和分析是进行激光焊接过程控制的基础。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 信号作为过程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]。也有采用加窗傅里叶变换对信号进行时频分析^[2]。现有的研究表明,激光焊接过程中的声信号是非平稳的,是时变的。而 FFT 主要是针对时不变信号的。这就使得 FFT 在这里的应用受到了一定的局限。为了能对激光焊接的过程进行实时监控,有必要了解每一时刻 AE 信号的频率分布特点。因此,进行时频分析是非常必要的。为了解决这一问题,我们采用小波变换进行信号处理。

2 小波分析概述

小波 (Wavelet) 是指时域波形和频域都是有限的一类函数, 小波函数 $\psi(t) \in L^2(R)$ [$L^2(R)$ 是平方可积一维函数 $f(t)$ 的向量空间]。可以表示为

$$\psi_{ab}(t) = |a|^{-1/2} \psi\left[\frac{t-b}{a}\right] \quad (1)$$

式中, a 为伸缩因子, b 为平移因子, 变动 a, b 可以衍生出不同的小波函数。函数 $f(t)$ 的小波变换定义为

$$(W\psi f)(a, b) = |a|^{-1/2} \int_R f(t) \psi^* \left[\frac{t-b}{a} \right] dt \quad a, b \in R, a \neq 0, \psi^*(t) \text{ 为 } \psi(t) \text{ 的共轭} \quad (2)$$

若 $\psi(t)$ 满足“容许性条件”

$$C_\psi = \int_R \frac{|\hat{\psi}(\omega)|^2}{|\omega|} d\omega < \infty \quad (3)$$

式中 $\hat{\psi}(\omega)$ 表示的傅里叶变换, 则称 ψ 是一个容许小波, 或称基小波。其小波变换是可以反演的。在实际应用中, 广泛使用的是二进离散小波变换, 即取 $a = 2^{-j}, j \in Z$ 。与 $\psi(t)$ 对应的尺度函数 $\phi(t)$ 应满足

$$|\hat{\phi}(\omega)|^2 = \sum_{j=1}^{\infty} |\hat{\psi}(2^j \omega)|^2 \quad (4)$$

小波函数 $\psi(t)$ 通常被看作为一个带通滤波器, 尺度函数 $\phi(t)$ 本质上是一个低通滤波器。小波函数 $\psi(t)$ 和尺度函数 $\phi(t)$ 的内积可获得正交镜像滤波器 $H(n)$ 和 $G(n)$

$$\begin{aligned} H(n) &= \left\langle \frac{1}{2} \phi\left[\frac{t}{2}\right], \phi(t-n) \right\rangle \\ G(n) &= \left\langle \frac{1}{2} \psi\left[\frac{t}{2}\right], \phi(t-n) \right\rangle \quad t \in R, n \in Z \end{aligned} \quad (5)$$

在实际的数值计算中, 只要求出了正交镜像滤波 $H(n)$ 和 $G(n)$, 不必再管 $\psi(t)$ 和 $\phi(t)$ 的值, 就可以进行信号的分解了。Mallat 提出的离散二进制小波变换的快速算法被称为塔式多分辨率分解与重构算法^[3]。设有信号 $f(t)$ 的离散采样序列 $f(n), n = 1, \dots, N$, 信号在尺度 $j = 0$ 时的近似值记为 $C_0(n) = C_j(n)|_{j=0} = f(n)$, 则离散二进小波变换由下式确定

$$\begin{aligned} C_{j+1}(n) &= \sum_{k \in Z} H(k-2n) C_j(k) \\ D_{j+1}(n) &= \sum_{k \in Z} G(k-2n) C_j(k) \end{aligned} \quad (6)$$

信号 $f(t)$ 的小波分解可以表示为

$$\begin{aligned} A_j f(t) &= A_{j+1} f(t) + D_{j+1} f(t) = \\ &= \sum_n C_j(n) \phi_n(t) + \sum_n D_j(n) \psi_n(t) \end{aligned} \quad (7)$$

设 V_j 为由 ϕ 张成的子空间, W_j 为由 ψ 张成的子空间, 则 $A_j f$ 是 $f(t)$ 在 V_j 上的投影, 称为逼近信号 (Approximate), 相当于一低通滤波器对 $f(t)$ 滤波的结果; $D_j f$ 是 $f(t)$ 在 W_j 上的投影, 称为细节信号 (Detail), 相当于一组带宽可变的带通滤波器对 $f(t)$ 滤波的结果。可见小波变换的实质是把原始信号中不同频段的信息抽取出来, 并将其显示在时间轴上, 这样

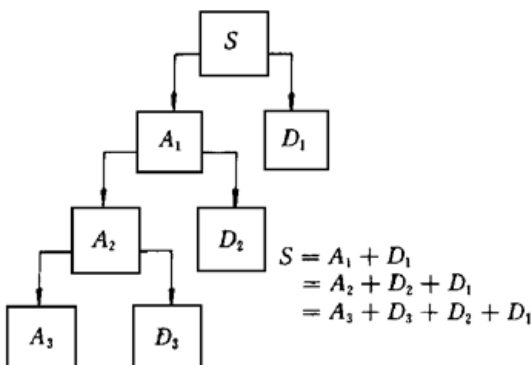


图 1 小波分解示意图

Fig. 1 Wavelet decomposition tree

既可以反映信号的时域特征也可以反映信号的频域特征。小尺度的变换包含信号的高频成分,大尺度则包含信号的低频部分。这样,就可以根据需要,选取不同尺度的变换来描述信号的特征。小波分解可以形象地表示为如图 1 所示。

3 实验方法及分析结果

实验中通过声电传感器采集激光焊接过程中的 AE 信号。从以往的研究中发现,16 kHz 的声音信号与焊接的状态有密切关系。因此,试验中主要拾取的是 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 $f_s = 50$ kHz。采用 CZ-65 型驻极体式传声器来接收声音信号。其频率响应平直,灵敏度高,响应速度快。

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,焊接速度为 2 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。

实验中,进行了正常焊接实验及几次有缺陷的焊接实验。在缺陷焊接过程中,有意识地安排了两种缺陷:间隙缺陷和错边缺陷。在间隙实验中,通过处理使待焊的镀锌板上产生了两个缺口,长度分别为 0.5 mm, 0.8 mm;对于错边实验,则将两块镀锌板稍稍上下错开,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。

3.1 激光焊接 AE 信号的小波分析

激光与被焊材料之间的相互作用是一个复杂的动态过程。在激光焊接过程中,激光束不断地入射到工件表面,致使工件表面的温度升高,从而在熔池附近形成了一个温度梯度场,引发热振动。除了上述在数量上占有一定优势的中性原子热运动造成的寻常声波外,在等离子体中还存在离子声波。因此,即使在热传导焊的情况下,只要有金属的热运动而不必出现等离子体就会出现声信号。而在小孔焊接的情况下,随着等离子体产生,由于离子声波的加入,声信号会得到加强。使总声压表现为

$$P = P_0 + P_e \propto (T_0 N_0 + T_e N_e)$$

其中 P_0 为中性原子声波的声压, P_e 为离子声波的声压, T_0 为等离子体中原子的温度, T_e 为等离子体中电子的温度, N_0 为等离子体原子密度, N_e 为等离子体电子密度。

所有这些共同形成了激光焊接过程中的声发射波。从 AE 信号的产生机理中可以看到,激光焊接过程中的 AE 信号包含有大量关于焊接状态的信息^[4,5]。

在以往的研究中,我们采取的手段是快速傅里叶分析^[6]。通过将拾取到的 AE 信号人为地分段,再利用 FFT 对信号进行处理,从而获得所拾取的 AE 信号的频谱信息。通过对比正常焊接和焊接有缺陷时信号的频谱信息,从而找出与焊接质量相关的特征信号。经过大量的实验以及深入的研究,对于焊接缺陷的检测和识别已经取得了一定的成果。

但是,这种方法存在一定的局限性,其原因在于,FFT 要求处理的信号是平稳、随时间不变的。在 FFT 分析中,主要是对稳定状态进行研究,即对稳定的正常焊接状态和在一定程度上“稳定”的非正常焊接状态时采集的信号进行 FFT 分析。而对于过程控制来说,感兴趣的恰恰是从正常焊接状态向非正常焊接状态变化的过程。而这是一个非平稳、时变的过程。对于这样的信号,FFT 是无能为力的。这是因为对一般采样信号 $f(t)$ 的傅里叶分析的本质就是将其用

一组三角级数基来加以线性表达,这使得它难以使时、频同时局域化。如果在某一时刻信号有一个突变的话,由于它持续的时间较短,进行 FFT 分析后将无法检测到它的存在。在从正常焊接状态向非正常焊接(缺陷)状态的变化过程中,往往会有缺陷的征兆信息出现。只有尽早、尽快地发现征兆信息,才能在焊接缺陷产生之前进行控制,进而避免焊接缺陷的产生。因此,为了能够对生产过程进行控制,在对信号分析的同时,保留信号的时域信息是非常重要的。因此,我们引入了小波变换。

小波分析的应用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。小波变换能够把任何信号(平稳的或非平稳的)映射到由一个小波伸缩而成的一组基函数上,信息量完整无缺,在通频范围内得到分布在不同频段内的分解序列,具有对非平稳信号进行局部化分析的功能。因此,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。

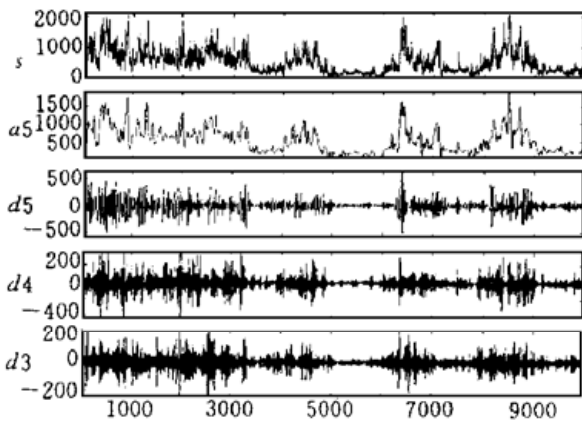


图2 间隙缺陷 AE 信号的小波分解, db5 level 5
Fig. 2 Wavelet decomposition of AE signal with gap problem, db5, level 5

在出现间隙缺陷时对应的声信号的典型波形如图 2 中 s 所示。 a_5, d_5, d_4, d_3 为小波分析的结果。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幅值。在原始信号 s 中,3300 点至 6100 点处为一个间隙缺陷,从 9000 点开始是另一个间隙缺陷。小波分析采用 db5(Daubechies, order 5)小波,对信号 s 分解到第五层。 a_5 为第五层逼近信号, d_5, d_4, d_3 则分别是第五,第四,第三层细节信号。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 $\left[0, \frac{1}{2}f_s 2^{-l}\right]$, $\left[\frac{1}{2}f_s 2^{-l}, \frac{1}{2}f_s 2^{-(l-1)}\right]$ 。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,我们可以通过计算得出, a_5, d_5, d_4, d_3 的频率范围分别为 $[0, 781 \text{ Hz}]$, $[781 \text{ Hz}, 1562 \text{ Hz}]$, $[1562 \text{ Hz}, 3125 \text{ Hz}]$, $[3125 \text{ Hz}, 6250 \text{ Hz}]$ 。因此,对信号 s 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。

3.2 小波分析的特点及解释

从图 2 可以看到, a_5 基本可以被看作为信号经过滤波后的信号,在滤掉了高频成分后,可以清楚地看到, a_5 的信号幅值在间隙缺陷处有一个比较明显的下降。而在焊接正常时,如 0~3000 点处,信号幅值基本维持在 450 以上。这一点,可以被看作判断是否出现焊接间隙缺陷的一个基本特征。通过对 a_5 的信号幅值求取平均值,以平滑误差,然后对此值设定一个阈值,一旦小于此阈值,即可认为出现焊接缺陷。 d_4, d_3 是从信号 s 中分离出来的信号,频率范围分别为 $[1562 \text{ Hz}, 3125 \text{ Hz}]$, $[3125 \text{ Hz}, 6250 \text{ Hz}]$, 属于信号的较高频部分。从中可以清楚地看到,在出现缺陷时,信号的振动幅度明显降低。同正常焊接时的振动幅度相比,约为前者的 20% 左右。因此,在有间隙焊接缺陷时,信号在 $[1562 \text{ Hz}, 6250 \text{ Hz}]$ 频段的能量急剧下降,这同样可以作为判断间隙缺陷的基本特征。通过设定阈值,可以在某种程度上判断是否出现间隙缺陷,与前者相比,将能量的变化作为判据具有更强的抗干扰性,能够部分消除实际工作条件下的干扰。

对于这一实验现象,可以这样加以解释。在正常焊接时,由于激光和工件的相互作用,形成

激光深穿透焊, 在热振动、等离子体以及小孔效应的共同作用下, 发射出比较稳定的 AE 信号。从拾取的信号来看, 其特点表现为有一定的强度并且同时叠加有高频振荡成分。当工件突然出现间隙时, 首先被破坏的就是小孔效应, 紧接着产生等离子体的条件被破坏, 从而使离子声波受到大大削弱。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则成为这种情况下 AE 信号产生的主要原因, 同正常焊接时相比, 其强度必然会有所下降。

图 3, 图 4 分别为正常焊接时 AE 信号的小波分解和错边时 AE 信号的小波分解。同样, 通过计算, a_5, d_5, d_4 的频率范围分别为 $[0, 781 \text{ Hz}]$, $[781 \text{ Hz}, 1562 \text{ Hz}]$, $[1562 \text{ Hz}, 3125 \text{ Hz}]$ 。从整个测量原始信号来看, 信号幅值呈现出持续降低的特点。到了如图 4 所示的焊接区域, a_5 的信号幅值与正常时相比已经有了显著的降低, 约为前者的 50% 左右。将错边信号的 d_5, d_4 分量同正常焊接时的相比, 同样发现了能量降低的现象。只是没有间隙缺陷实验时下降得厉害, 约为正常焊接情况下的 30~ 50%。这是因为, 同间隙缺陷相比, 错边时工件与激光相互作用的面积要大, 工件吸收到的能量也相应的要多, 从而使产生的热振荡也较前者强。从试验的结果来看, 随着错边程度的加大, 幅值和能量的降低程度也逐渐加大。

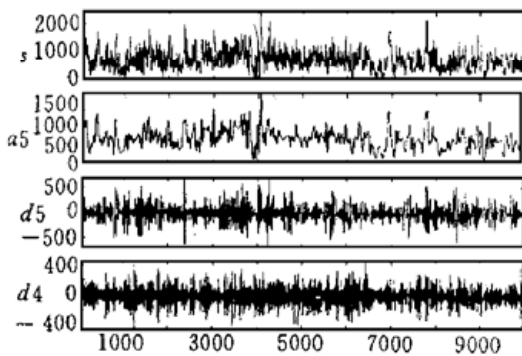


图 3 正常焊接 AE 信号的小波分解, db5 level 5

Fig. 3 Wavelet decomposition of AE signal in normal welding mode

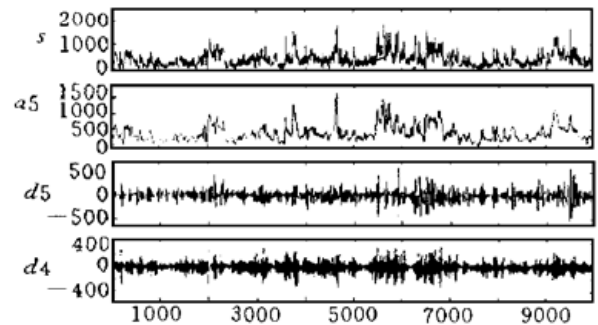


图 4 错边 AE 信号的小波分解, db5 level 5

Fig. 4 Wavelet decomposition of AE signal with Misalignment problem

4 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。造成 AE 信号的原因有: 焊接过程中熔池附近的温度梯度场带来的热振动、小孔效应以及等离子体所产生的声波。

可以将小波变换看作是由一系列的带宽滤波器对信号的作用。在其作用下, 所拾取 AE 信号的低频分量(低于 781 Hz)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程度的下降; 同时, 信号在 $[1562 \text{ Hz}, 6250 \text{ Hz}]$ 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。可以将信号的低频分量的幅值和信号在 $[1562 \text{ Hz}, 6250 \text{ Hz}]$ 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, 其值逐渐减小。因此, 可以将其作为过程控制的参考变量, 通过设定阈值, 在进行激光焊接过程控制时用于判断实时焊接状态。这对于研究激光焊接

从稳定态向不稳定态转变的过程有很大的帮助。

从上面的分析中可以看到小波分析方法具有良好的时频定位特性,与快速傅里叶变换相比,它不但能够对信号按照频率进行分解,同时,分解后的信号仍然包含了大量的时域信息,从而能够从复杂的信号中识别出特征信号的位置。利用小波分解技术能够将信号划分到不同的频带范围这一特性,可以实现对 AE 信号进行信息分离,从而能够对信号的各个频段分别进行研究,提取特征信息,进而实现对激光焊接的过程控制。

参 考 文 献

- 1 Y. L. Mao, G. Kinsman, W. W. Duley. Real-time fast Fourier transform analysis of acoustic emission during CO₂ laser welding of materials. *Journal of Laser Application*, 1993, **5**(2&3): 17~ 22
- 2 E. Nava-rudiger, M. Houlot. Integration of real time quality control systems in a welding process. *Journal of Laser Application*, 1997, **9**(2): 95~ 102
- 3 S. Mallat. A theory for multi-resolution signal decomposition: The wavelet representation. *IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence*, 1989, **11**(7): 674~ 693
- 4 Hongping Gu, W. W. Duley. A statistical approach to acoustic monitoring of laser welding. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 1996, **29**(3): 556~ 560
- 5 Gunnar Bruggemann, Thomas Benziger Magdeburg. Process-control in laser beam welding using acoustic emission analysis. *Welding & Cutting*, 1997, **49**(5): E73~ E76
- 6 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)

Wavelet Analysis of Acoustic Emission Signals with Welding Defect in Laser Welding

Zeng Hao¹ Zhou Zude¹ Luo Hong² Hu Lunji² Hu Xiyuan²

(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 of plasma during laser welding were studied using wavelet analysis. Comparing AE signals in welding process with and without joint gap or misalignment problem, the significant differences in AE signals can be observed. The amplitude of low-frequency component of AE signals is fallen down remarkably when the welding defects occur. The same phenomena are also observed in the energy in the frequency band from 1562 Hz to 6250 Hz. Considering that wavelet analysis can decompose the AE signals into several frequency bands, the characteristic information can be extracted, which can be used to implement process-control of laser welding.

Key words laser welding, monitoring, wavelet analysis