

# 激光焊接出现未焊透时等离子体 光、声信号的傅里叶分析

骆红 胡伦骥 胡席远 刘建华 黄小平

(华中理工大学材料系 武汉 430074)

**提要** 利用快速傅里叶分析手段对激光焊接稳定过程及出现未焊透缺陷时等离子体的光声信号进行频域分析,发现在焊接过程稳定时,信号的频谱中存在明显线谱,以 300 Hz 处为最强。在出现未焊透缺陷时,光声信号的频谱为连续谱,无明显线谱。这为提高缺陷监测精度提供了一条新途径。

**关键词** 激光焊接, 等离子体, 光声信号, 频域分析

众所周知,激光诱导的等离子体在焊缝形成过程中起到重要的作用。各种质量监测技术如光辐射法<sup>[1]</sup>、声压法<sup>[2]</sup>、电场法<sup>[3]</sup>等都与等离子体相关。目前对激光焊接中出现缺陷时等离子体信号的特征还缺乏细致的分析,影响了其质量实时监测系统的完善性和准确性。本文将分析未焊透时等离子体发出的光、声信号的频域特征,以找出与焊接质量紧密相关的特征信号。

## 1 实验方法及结果

在以前的研究工作中已发现激光焊接碳钢过程中等离子体有蓝紫光辐射并发出声响。其中最强光辐射处于蓝紫光,波长约为 400~ 440 nm;等离子体最强声信号频率约为 16 kHz。因此实验中分别提取上述等离子体发出的特征光信号的光强和特征声信号的声压,通过信号预处理、采样保持、A/D 转换送给计算机以进行分析和处理。

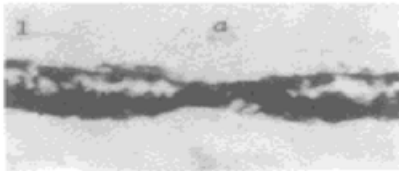


图1 焊缝外观(40×)  
Fig. 1 Weld bead (40×)

实验条件如下:约束放电型激光器,功率为 900 W,焊接速度为 1 m/min,保护气流量为 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。

在上述实验过程中,获得一条出现未焊透缺陷的焊缝,如图 1 所示。对应的等离子体光声信号的典型波形如图 2 所示(由于采样频率较高,数据很多,因此只选取与焊缝相对应的每一段信号中的典型波形)。图中纵坐标分别为光、声信号强度。图 1 中 a 点处出现未焊透缺陷,从焊缝背面看,此处未熔化,从焊缝纵截面看此处熔深小于板厚。在焊缝的其它地方,完全焊透。

由于光信号是等离子体中激发态和电离态的粒子发出的,在未焊透时,等离子体不能产

生, 光信号降为零。而声信号除了与等离子体有关外, 还与熔池的行为相关。在未焊透处, 声信号明显降低, 但仍有一定的强度。在焊接过程稳定时, 等离子体光、声信号强度维持在相对稳定的较高的范围内。所以从强度上可以大概分辨出不同的焊接过程。

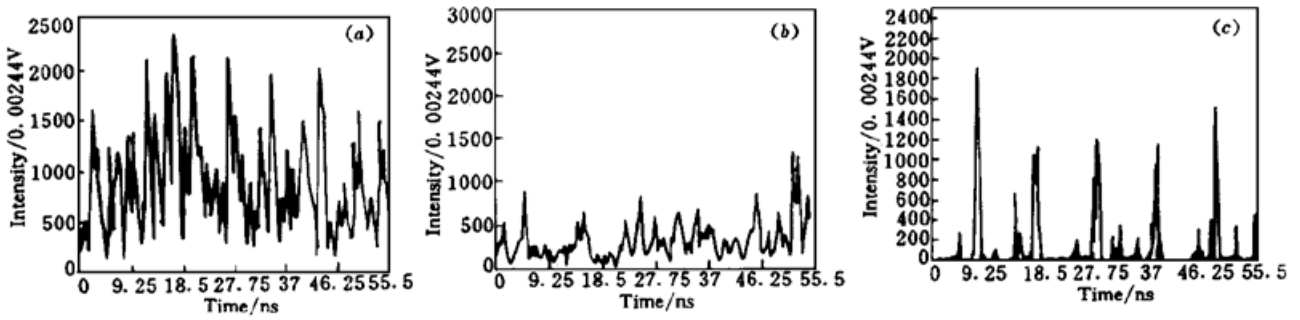


图 2 焊接过程稳定和出现未焊透时的等离子体光、声信号

(a) 图 1 1a 段的声信号; (b) 图 1 a 处的声信号; (c) 图 1 1a 段的光信号

Fig. 2 Optical and acoustic signals in 1a segment and at a

(a) acoustic signal in 1a segment; (b) acoustic signal at a; (c) optical signal in 1a segment

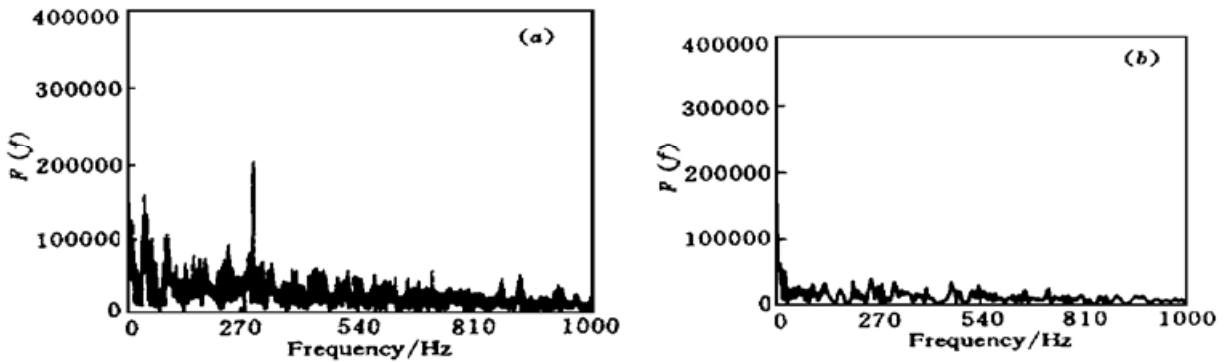


图 3 声信号的频谱分布图

(a) 图 1 1a 段的声信号频谱图; (b) 图 1 a 处的声信号频谱图

Fig. 3 FFT spectra of acoustic emission. (a) in 1a segment; (b) at a

## 2 频谱分析

频谱特性是动态信号的基本特征之一。按照傅里叶分析法, 动态信号可以分为许多谐波分量。对其进行快速傅里叶分析会得到信号的频谱分布情况, 使对信号的分析更有效和直观。

利用快速傅里叶变换对图 1 1a, a 处的光、声信号数据进行频谱分析。得到信号幅值强度随频率的分布情况。分析结果如图 3 和图 4 所示。图中纵坐标为原始信号强度经傅里叶变换后的幅值, 代表信号在各频率上的相对强度。用  $F(f)$  表示。

在图 1 1a 段, 光、声信号的频谱中存在明显的线谱, 而且由于光信号与等离子体的关系更密切, 光信号的频谱中线谱的强度更高。声信号除了与等离子

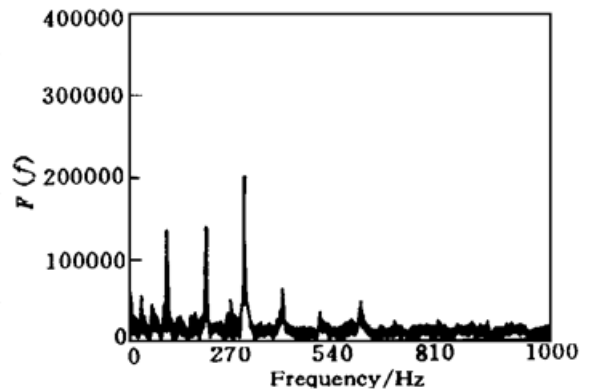


图 4 图 1 1a 段的光信号频谱图

Fig. 4 FFT spectra of optical emission in 1a segment

体中的压力波有关外,还与熔池及小孔中的压力变化有关,它的频谱中除有较明显的线谱外,还有一定强度的连续谱。在图 1 a 点,由于未产生等离子体,所采样的光、声信号来自于熔池热辐射和熔池压力波动、金属蒸气云热辐射和压力波,因此其频谱是以低频为主的连续谱。

很明显,可以从频谱分布上分辨出在焊接过程中是否出现等离子体,焊缝是否焊透。

### 3 结果讨论

研究表明<sup>[2]</sup>,激光焊接过程的稳定性和加工质量在很大程度上取决于等离子体的行为,已知等离子体辐射光强与等离子体长度、被加工材料的蒸发量成正比。等离子体的粒子声波声压与等离子体中的粒子密度和声波的波速的平方成正比。因此等离子体光强与声压均能反映激光与材料的相互作用状态。从光、声传感信号的强度变化上可以分辨不同的焊接状态。另一方面,等离子体在整个焊接过程中是周期性出现的,这主要是由于等离子体对激光的吸收率  $A$  与等离子体中的电子密度  $N_e$  和温度  $T_e$  的关系所致

$$A \propto N_e^2 / T_e^{3/2}$$

随着等离子体的形成,  $N_e$  提高  $A$  也相应提高,  $A$  的提高一方面导致  $T_e$  的提高,另一方面工件对激光的吸收率减少,金属的蒸发和电离受到限制,  $N_e$  会逐渐下降,反过来又降低了  $A$ , 等离子体逐渐熄灭。这时工件又能吸收较多的激光能量,金属再次强烈蒸发、电离,等离子体再次被点燃。因此等离子体强度变化中带有很强的周期性,反映到等离子体光、声信号中必然存在着与之对应的某一频率的正旋波。这正是频谱分析中得到的 300 Hz 的主频信号。

### 参 考 文 献

- 1 H. B. Chen, L. Li, W. M. Steen *et al.*. Multi-frequency fibre optic sensors for in-process laser welding quality monitoring. *J. Non-destruct. Test. Eval.*, 1994, **26**(2) : 67~ 73
- 2 Hu Lunji, Luo Hong, Luo Jinhua *et al.*. Optic-acoustic real-time monitoring for laser-welded tinplates. *J. of Huazhong University of Science and Technology* (华中理工大学学报), 1993, **21**(4) : 95~ 101 (in Chinese)
- 3 L. Li, N. Qi, D. J. Brookfield *et al.* In-process laser weld quality monitoring and fault diagnosis. *Proceedings of International Congress on Laser Systems Application in Industry*, Italy : Publ. by ATA, 1990, 166~ 178

## Fast Fourier Analysis of Optical and Acoustic Signals at Poor Penetration in Laser Welding

Luo Hong Hu Lunji Hu Xiyuan Liu Jianhua Huang Xiaopin  
(Department of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

**Abstract** The spectra of the optical and acoustic signals emitted by a plasma during laser welding were studied through fast Fourier transformation. It was found that when the laser welding process was stable there existed obvious line spectra in both optical and acoustic signals at 300 Hz. When poor penetration appeared, the spectra of them were dominantly continuous. These results provided a new way to increase the defect-monitoring accuracy.

**Key words** laser welding, plasma, optical and acoustic signals, spectral analysis