

激光深熔焊等离子体波动特征光电信号分析

邱文聪¹, 杨立军^{1,2}, 刘桐¹, 赵德金¹

¹天津大学材料科学与工程学院, 天津 300350;

²天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300350

摘要 利用无源电探针检测装置,对 A304 不锈钢 YAG 激光焊接过程中的等离子体电信号进行了检测,并且同步触发高速摄像装置,对等离子体的形态进行记录。对等离子体高速摄像图片与电信号进行了时域对比分析,发现电信号电压波动特征与等离子体形态波动特征吻合较好。对一定时间长度内的电信号进行功率谱密度(PSD)分析,发现电信号 PSD 图中特征峰值对应的频率与等离子体形态波动频率基本一致。结果表明,等离子体的形态波动、电信号的波动特征与小孔的行为具有很强的关联性。这种波动特征受到焊接参数的影响,波动频率随着激光热输入的增大而减小。

关键词 激光技术; 激光焊接; 电信号; 高速摄像; 等离子体; 功率谱密度

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201845.0402001

Optic-Electrical Signal Analysis of Plasma Fluctuation Characteristics in Laser Deep Penetration Welding

Qiu Wencong¹, Yang Lijun^{1,2}, Liu Tong¹, Zhao Dejin¹

¹School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China;

²Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University 300350, China

Abstract A passive electrical probe detection device is employed to detect the electrical signal of plasma in the process of YAG laser welding for A304 stainless steels, and a high-speed CCD camera device is synchronously triggered to record the plasma plume shape. The high-speed camera images of plasma and the electrical signal in time domain are compared and analyzed, and it is found that the fluctuation characteristic of electrical signal is basically consistent with that of the plasma plume shape. The electrical signal with a certain time length is analyzed via its power spectral density (PSD), and it is found that the frequency of the characteristic peak in the PSD plot has a good agreement with the fluctuation frequency of plasma plume shape. The results indicate that there exist strong correlations among the plasma plume shape fluctuation, the fluctuation characteristic of electrical signal and the behavior of keyhole. This kind of fluctuation characteristic is affected by welding parameters, and the fluctuation frequency decreases with the increase of laser heat input.

Key words laser technique; laser welding; electrical signal; high-speed camera; plasma; power spectral density

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3380

1 引 言

激光深熔焊过程中出现小孔和等离子体是最重要的物理现象,其对焊接质量有非常大的影响。在

小孔里面和外面有大量的等离子体,等离子体与激光相互作用,从而影响激光焊接过程。等离子体的波动特征是光致等离子体最重要的特征之一。

目前,很多学者通过各种方法直接或者间接研

收稿日期: 2017-09-22; 收到修改稿日期: 2017-11-08

基金项目: 国家自然科学基金(51175374)、天津自然科学基金(16JCZDJC38700)

作者简介: 邱文聪(1991—),男,硕士研究生,主要从事激光诱导等离子体电特性方面的研究。

E-mail: qwefighting@163.com

导师简介: 杨立军(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事焊接过程测控和等离子体物理方面的研究。

E-mail: yljabc@tju.edu.cn(通信联系人)

究了等离子体的形貌波动特征。Mrňr 等^[1]通过测量等离子体发射的光强度,研究了等离子体的波动特征,发现等离子体形态波动周期的大小与熔深成正比。Kim 等^[2]通过两台高速摄像机分别拍摄铝镁合金激光焊接过程中等离子体和小孔的形状,发现等离子体的形貌波动周期与小孔波动周期的耦合性很好。Pang 等^[3]通过数值模拟金属蒸气和小孔的动态行为,并高速摄像拍摄金属蒸气形貌,发现金属蒸气的波动频率与小孔深度的波动频率是同一数量级。Seto 等^[4]通过高速摄像和 X 射线观察二氧化碳(CO₂)激光焊接产生的等离子体和小孔的动态行为,发现焊接材料为 A5083、304 和碳钢时,等离子体的大小会发生周期性变化,小孔的深度和大小也会随之发生周期性变化。Honda 等^[5]还发现等离子体光发射系数与小孔深度的波动有关。Wang 等^[6]研究发现,光致等离子体的形态存在周期性波动。

综上所述,很多学者都指出了激光焊接过程中等离子体的形态波动具有周期性特征,并与小孔的波动有密切联系。在研究等离子体形态波动特征过程中,摄像及高速摄像等研究手段应用较多,但这些

研究手段对试验条件要求较高,需要在拍摄后进行图形辨识与分析,难以实现焊接过程中实时分析判断。杨瑞霞等^[7-8]研究发现,无源电探针探测的激光等离子体电信号具有非常好的实时性,该方法实质上是对等离子体温度的探测,探测的电信号中包含具有周期性特征的波动信息,但这与激光等离子体的波动是否存在联系还需进一步研究。本文同步进行激光等离子体的高速摄像和无源电探针检测,将高速摄像记录的等离子体的形态变化与无源探针检测的电信号变化进行对比分析,研究两者之间的关系,描述变化特征,为激光等离子体的研究提供了一种新的方法。

2 试验方法

图 1 所示为电信号检测和高速摄像拍摄系统示意图。电信号检测系统由无源电探针、调理电路、数据采集卡(DAQ)、计算机组成。高速摄像拍摄方向与焊接方向垂直,拍摄焊接过程中等离子体的图像。电信号采样频率为 100 kHz,高速摄像拍摄频率为 3 kHz,即拍摄周期或拍摄每一幅电荷耦合元件(CCD)图像的积分时间为 0.33 ms,二者同步进行。

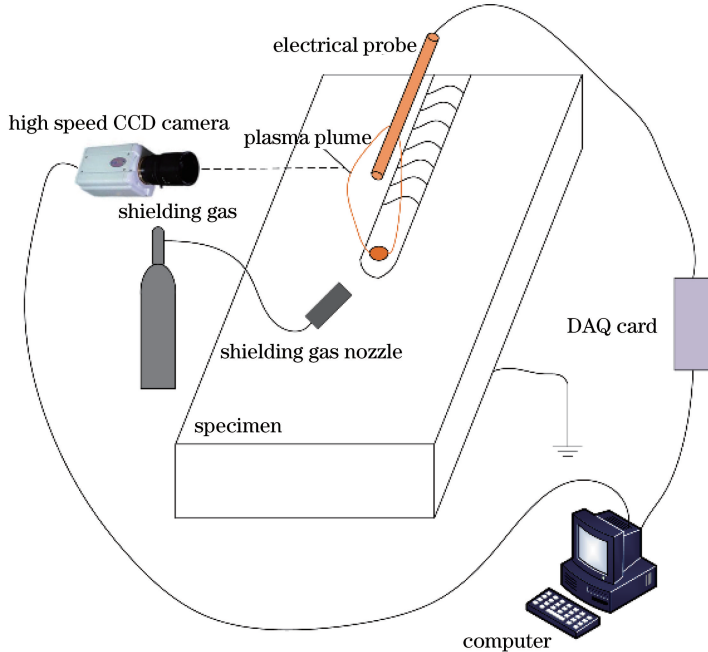


图 1 电信号检测和高速摄像系统示意图

Fig. 1 Schematic of electrical signal acquisition and high-speed CCD camera system

无源电探针检测的原理是基于等离子体鞘层效应,对于满足局部热力学平衡(LTE)条件的等离子体,检测得到的等离子体鞘层电压^[9]为

$$E_w = -\frac{kT}{4e} \ln \frac{m_i}{m_e}, \quad (1)$$

式中 k 为玻尔兹曼常数, e 为电子电量, T 为等离子

体温度, m_i 为电子质量, m_e 为离子质量。

虽然激光深熔焊小孔中喷发出的物质是以金属蒸气为主, 等离子体只占少部分, 但激光焊接过程的光致等离子体是满足 LTE 条件的^[10-11], 即(1)式具备适用条件。

试验采用英国 GSI 公司生产的 JK2003SM 型 Nd:YAG 激光器, 额定功率为 2 kW, 激光波长为 1064 nm, 聚焦透镜焦距为 160 mm, 光斑直径为 0.6 mm。选用的材料为 A304 不锈钢, 工件规格为 300 mm×80 mm×3 mm。激光焊接过程中, 使用的激光功率 P 为 1150~1350 W, 保护气为氩气, 保护气流量 q 为 30 L·min⁻¹, 焊接速度 v 为 8~16 mm·s⁻¹, 离焦量为 -1 mm。具体焊接参数见表 1。

表 1 焊接参数

Table 1 Welding parameters

Power P / W	Welding speed v / (mm·s ⁻¹)	Shielding gas flow q / (L·min ⁻¹)	Weld width b / mm	Weld depth h / mm
1250	16	30	0.94	1.50
1250	12	30	1.65	2.43
1250	8	30	1.98	3.00
1150	12	30	0.87	0.99
1350	12	30	2.10	3.00

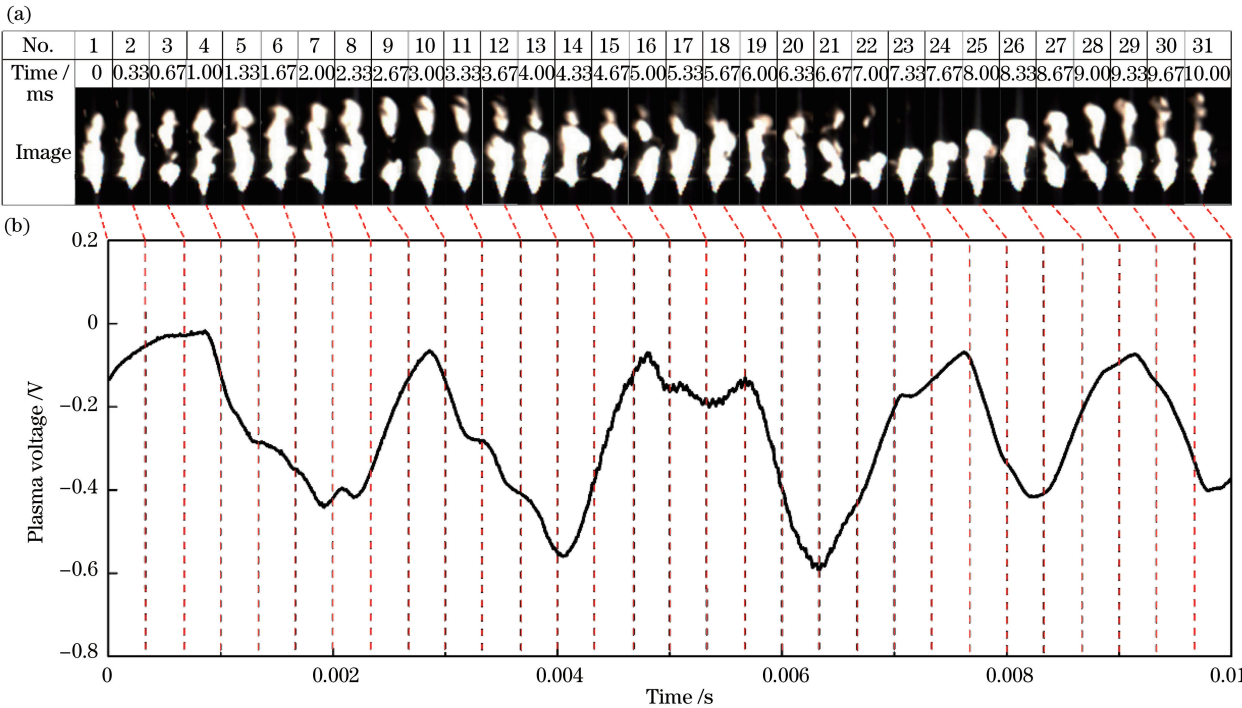


图 2 焊接功率为 1250 W, 焊接速度为 16 mm·s⁻¹ 时, 典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比

Fig. 2 Comparison between electrical signal and high-speed CCD camera images of plasma plume during deep penetration welding at welding speed of 16 mm·s⁻¹ and welding power of 1250 W

3 试验结果

3.1 等离子体高速摄像图片与电信号对比分析

图 2~6 所示为不同焊接速度、不同焊接功率下的典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比。从图 2(a)、3(a)、4(a)、5(a)、6(a) 可以看出, 等离子体形态会发生扩张和收缩变化。当等离子体处在充分扩张状态时, 相对前后的图像等离子体形态较高或饱满, 如图 2(a) 中 No.7、No.13、No.26 所示等; 而当等离子体处在充分收缩状态时, 等离子体形态相对较小, 出现缩颈或分成多段, 如图 2(a) 中 No.3、No.9、No.15 所示等。从图 2(a) 可以发现, 等离子体形态波动存在从充分收缩状态到充分扩张状态再到充分收缩状态这一周期性变化。如图 2(a) 所示, 从等离子体充分收缩状态(No.3)到下一个充分收缩状态(No.9), 这一过程视为一个波动周期。在图 3(a)、图 4(a)、图 5(a)、图 6(a) 中也存在波动周期。

观察图 2 可以发现, 当电信号电压幅值达到波谷时, 对应等离子体扩张到充分状态, 典型代表为图 2(a) 中 No.7 所示; 当电信号电压幅值达到波峰时, 对应等离子体收缩到充分状态, 典型代表为图 2(a) 中 No.3 所示。另外, 当电信号电压幅值从波

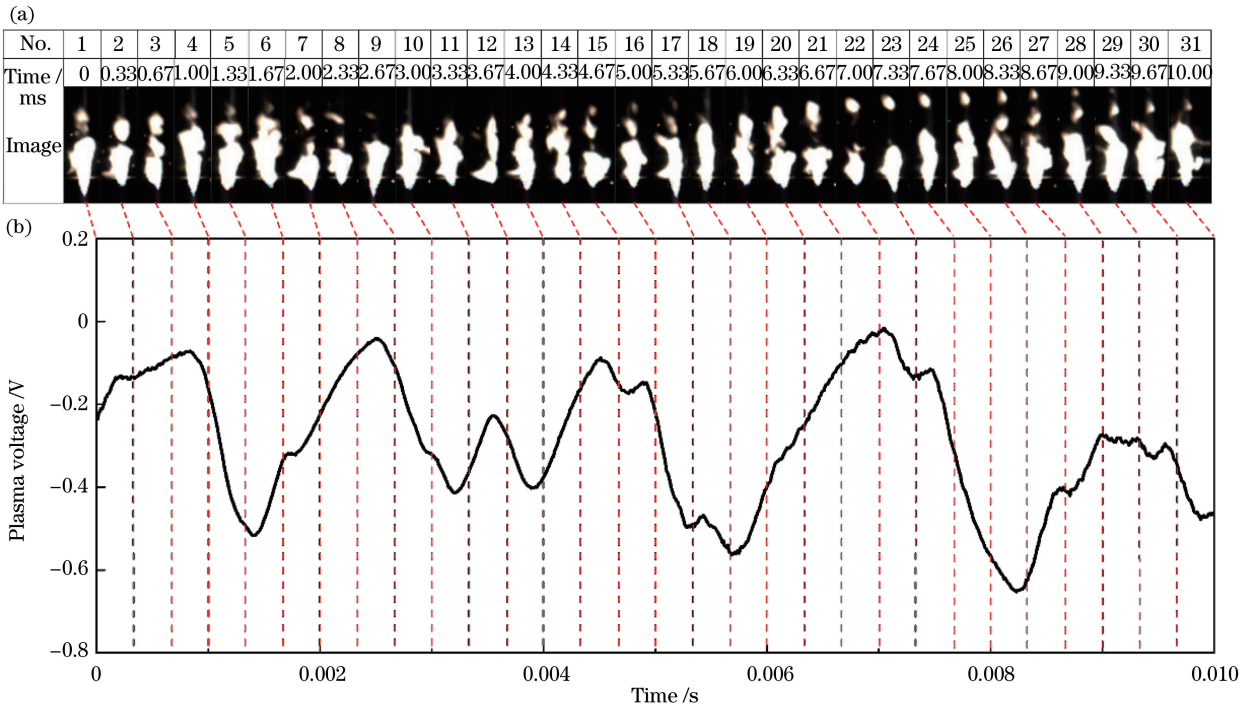


图 3 焊接功率为 1250 W,焊接速度为 $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比

Fig. 3 Comparison between electrical signal and high-speed CCD camera images of plasma plume during deep penetration welding at welding speed of $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and welding power of 1250 W

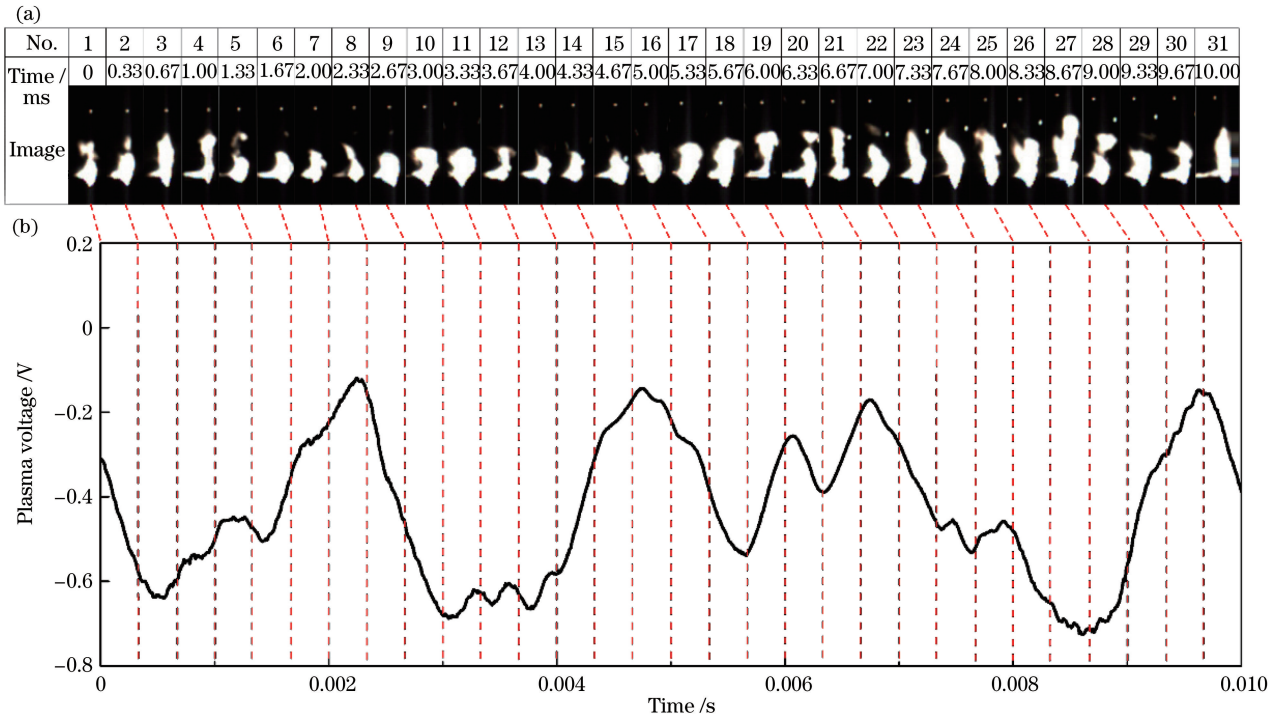


图 4 焊接功率为 1250 W,焊接速度为 $8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比

Fig. 4 Comparison between electrical signal and high-speed CCD camera images of plasma plume during deep penetration welding at welding speed of $8 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and welding power of 1250 W

谷到波峰时,等离子体的形态从扩张状态变为收缩状态或者存在这样趋势,如图 2(a)中 No.7~No.9

所示;而当电信号电压幅值从波峰到波谷时,等离子体形态的变化规律相反,如图 2(a)中 No.3~No.7

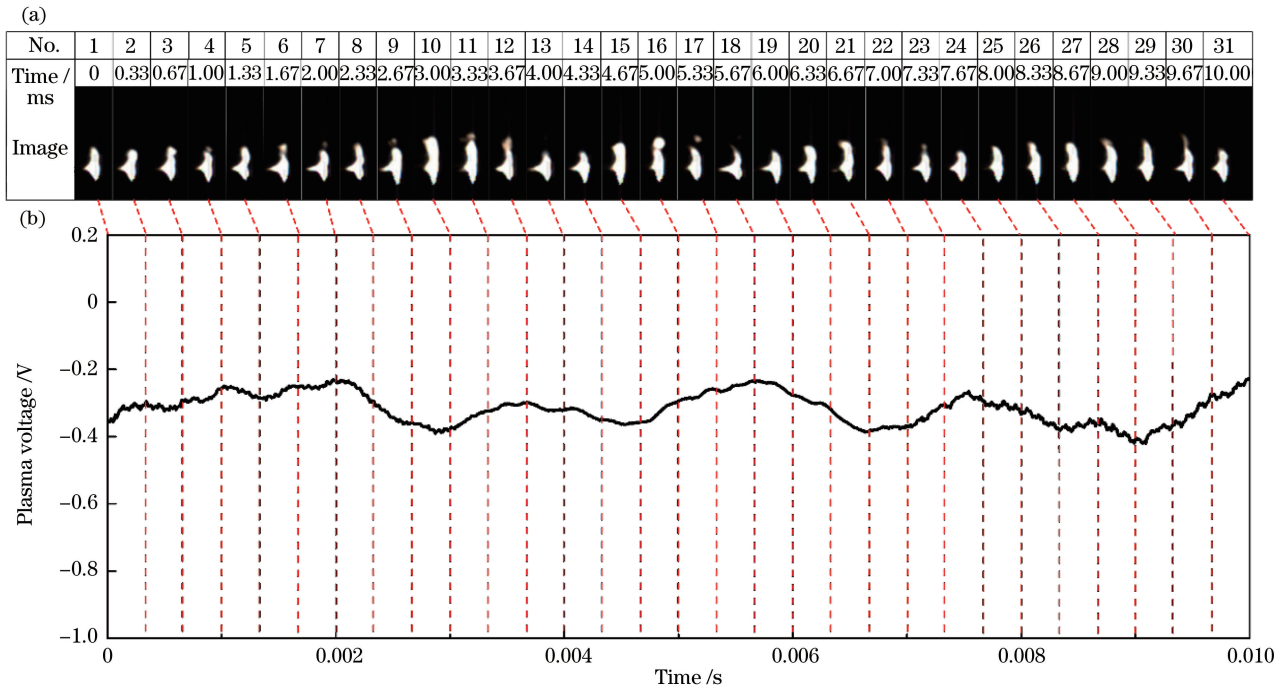


图 5 焊接功率为 1150 W,焊接速度为 $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比

Fig. 5 Comparison between electrical signal and high-speed CCD camera images of plasma plume during deep penetration welding at welding speed of $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and welding power of 1150 W

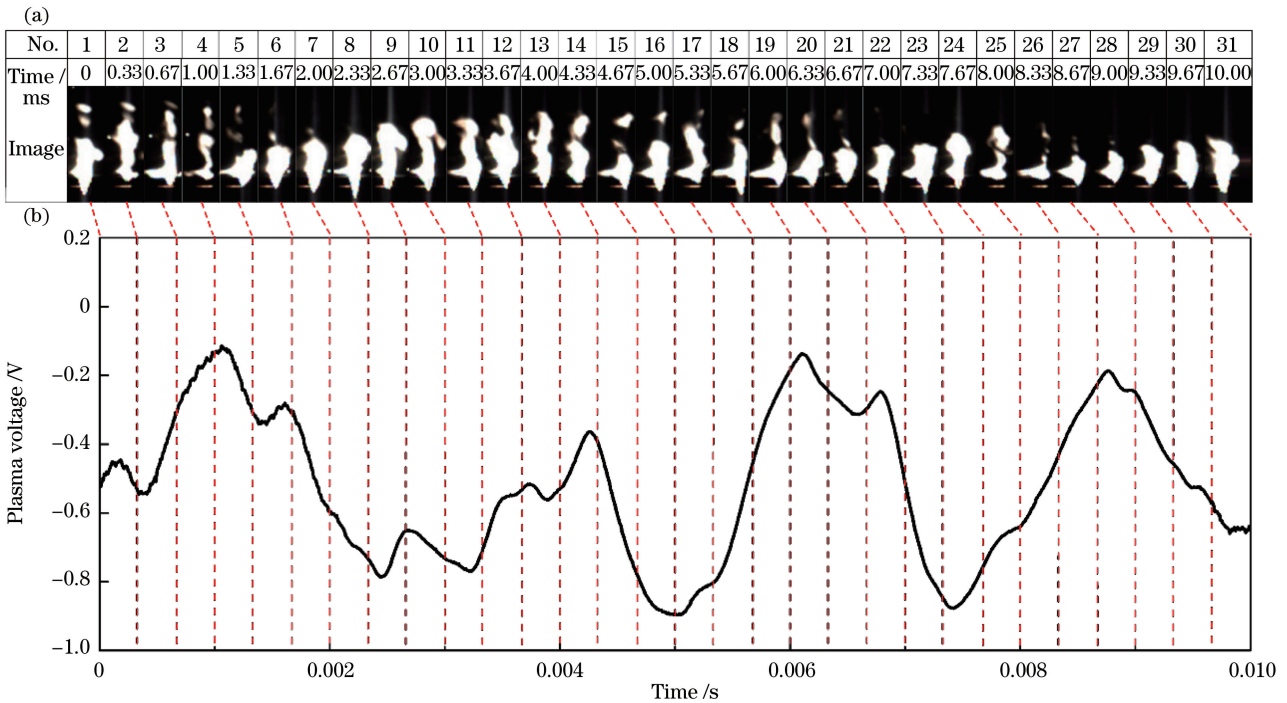


图 6 焊接功率为 1350 W,焊接速度为 $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ 时,典型深熔焊电信号与等离子体高速摄像图片对比

Fig. 6 Comparison between electrical signal and high-speed CCD camera images of plasma plume during deep penetration welding at welding speed of $12 \text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$ and welding power of 1350 W

所示。如图 3~6 所示,等离子体高速摄像图片和电信号也有良好的对应关系。因此,分析电信号的波动特征可以分析等离子体形态的波动特征。

根据(1)式可知,探针探测的等离子体温度的大小会影响等离子体电信号电压幅值的大小,这也意味着当检测的等离子体温度较高时,等离子体电信

号电压幅值绝对值为较大值。而等离子体扩张和收缩形态影响着等离子体温度的分布,最终影响检测的电信号幅值的大小。

分析上述信号,从光电信号与焊接工艺参数关系角度来看,在本试验条件下,无论激光焊工艺参数如何变化,等离子体形态变化与无源电探针测得的电信号波动变化均具有良好的对应特征。但焊接工艺参数对电信号的幅度有一定影响,也就是对等离子体的温度有一定影响。随着焊接速度的减小或激光功率的增大,等离子体电信号电压幅值总体上呈现变大的趋势,这意味着探针接触的等离子体温度增加了,如图 2(b)、3(b)、4(b)、5(b)、6(b)所示,其中激光功率的影响更为明显。在对信号波动性影响方面,随着焊接速度的减小或激光功率的增大,激光等离子体形态的波动周期和电信号波动周期也增大,下文将对该变化进行更具体分析。

3.2 电信号功率谱密度(PSD)分析

等离子体电信号特征比较复杂,对其进行频谱分析是一种比较好的分析方法,其中 PSD 分析原理如下:长度为 N 的信号向量 $\mathbf{x}(n)$,经快速傅里叶变换(FFT),变为长度相等的频域信号向量 \mathbf{X} ,其表示为

$$\mathbf{X}[\exp(j\omega)] = \sum_{n=0}^{N-1} \mathbf{x}(n) \times \exp(j\omega n), \quad (2)$$

式中 ω 为频率, n 为信号向量的编号。PSD 计算公式为

$$S[\exp(j\omega)] = \frac{1}{N} |\mathbf{X}[\exp(j\omega)]|^2, \quad (3)$$

式中 S 为功率谱密度。将各组焊接试验采集的电信号进行数学处理,每次取时间长度为 25 ms 的电信号分析 PSD。图 7 所示为其中一组焊接试验后采集的电信号 PSD 分析结果,连续取 9 段时间长度为 25 ms 的电信号分别进行处理,得到每一段的 PSD 图;在每一个 PSD 图中,都会出现一个非常明显的

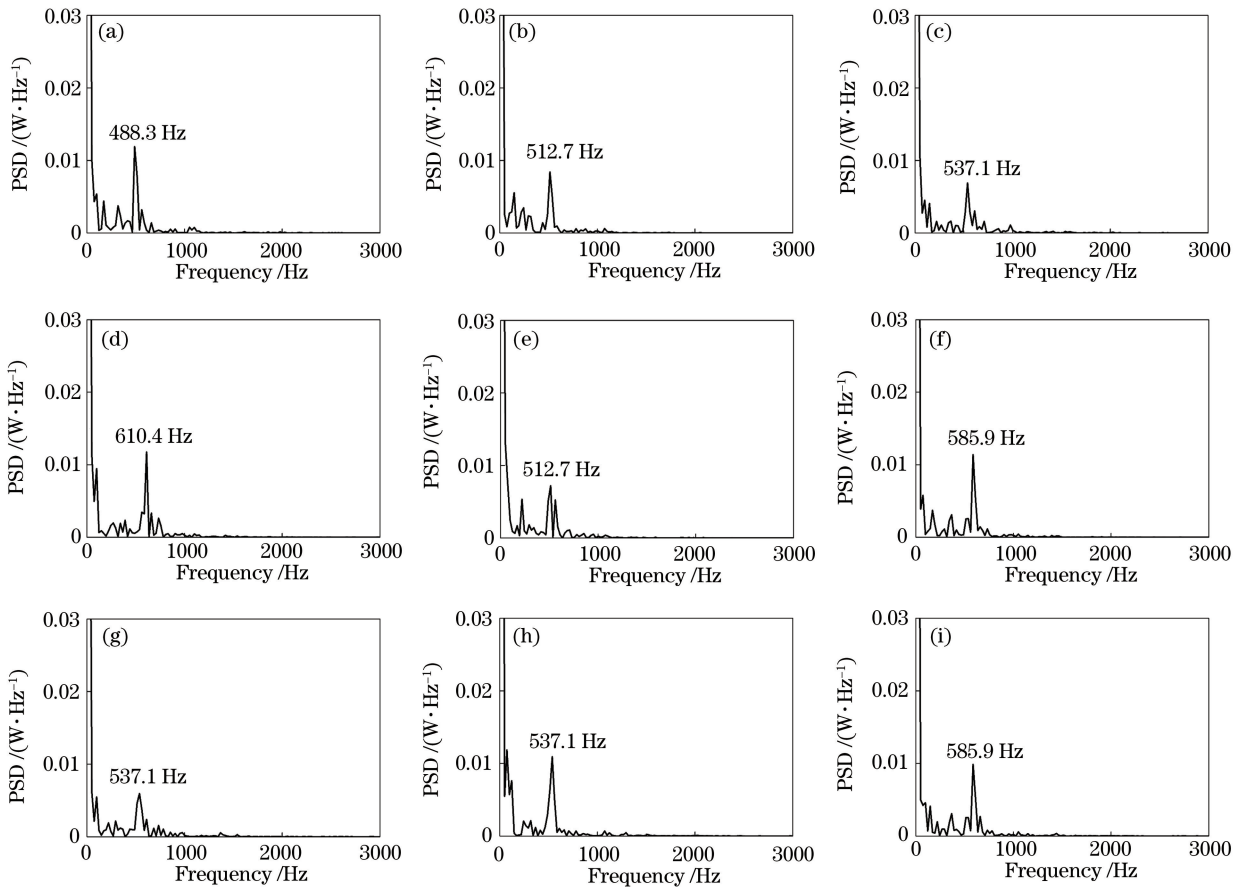


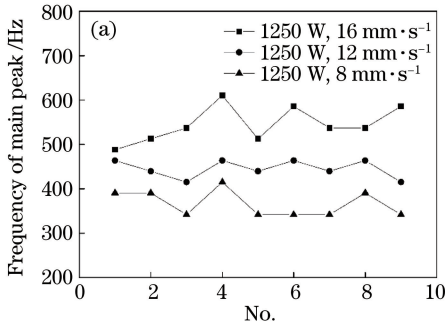
图 7 焊接功率为 1250 W,焊接速度为 16 mm·s⁻¹时的电信号 PSD 图。(a)第 1 段;(b)第 2 段;
(c)第 3 段;(d)第 4 段;(e)第 5 段;(f)第 6 段;(g)第 7 段;(h)第 8 段;(i)第 9 段

Fig. 7 PSD plot of electrical signal at welding speed of 16 mm·s⁻¹ and welding power of 1250 W.

(a) First segment; (b) second segment; (c) third segment; (d) fourth segment; (e) fifth segment; (f) sixth segment;
(g) seventh segment; (h) eighth segment; (i) ninth segment

特征峰,该特征峰对应的频率即为该时间段内电信号波动的主频率。

对每一组焊接试验采集的电信号都选择其中的连续 9 段分别进行 PSD 处理,得到各个波动主频率,



如图 8 所示。可以看出,总体频率范围为 300~620 Hz,当焊接功率增大或者焊接速度减小时,电信号的波动频率减小。由此推测:当热输入增大时,熔化量增加,小孔深度增大,等离子体波动频率减小。

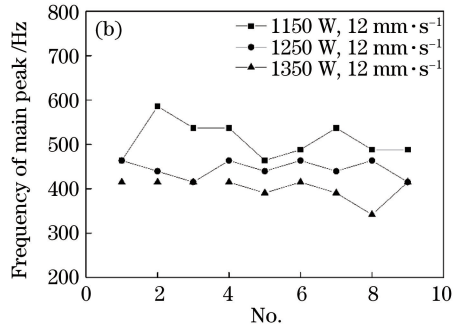


图 8 不同条件下电信号的波动频率。(a)不同焊接速度;(b)不同焊接功率

Fig. 8 Fluctuation frequency of electrical signal under different conditions.

(a) Different welding speeds; (b) different welding powers

对光、电信号的时域特征进行了对比分析,如图 2~6 所示,为进一步验证电信号频率特征与等离子体形态波动特征的一致性,对光、电信号的频域特征进行对比分析。在每个焊接试验中取一段时间的电信号进行 PSD 处理,得到基于电信号分析的等离子体形态波动频率 F ;将该时间段对应的等离子体高

速摄像图片进行统计分析,得到基于高速摄像图片分析的等离子体形态波动频率 f ;将二者进行比较,计算出它们之间的相对差别 e ,具体值见表 2。 e 的计算公式为

$$e = \frac{|F - f|}{F} \times 100\% \quad (4)$$

表 2 不同焊接参数下 F 与 f 的差别及对应焊缝界面

Table 2 Difference between F and f at different welding parameters and their corresponding weld interfaces

Power P/W	Welding speeding $v/(mm \cdot s^{-1})$	F/Hz	f/Hz	$e/\%$	Image of weld cross section
1250	16	488.30	511.71	4.79	
1250	12	463.90	475.23	2.44	
1250	8	390.60	422.68	8.21	
1150	12	463.90	488.60	5.32	
1350	12	415.00	431.65	4.01	

分析发现,高速摄像图片分析出的等离子体形态波动频率 f 和电信号分析出的等离子体形态波

动频率 F 之间的差别最大为 8.21%,最小为 2.44%,考虑到仪器精度和测量误差的影响,这样的差别实

际是非常小的,可以认为电信号波动与等离子体的波动之间有很好的 consistency。

4 等离子体波动特征与小孔的关系分析

在激光深熔焊过程中,小孔内部大量的高温金属蒸气和等离子体不断向外喷出。已有研究证明了光致等离子体的行为与小孔行为密切相关,等离子体形态的波动是由小孔的波动造成的。Honda等^[5]通过X射线透射和高速摄像同步拍摄小孔形状图片和等离子体形状图片,发现当小孔口即将关闭时,等离子体形状较大;当小孔口逐渐打开时,等离子体形状逐渐减小,等离子体行为与小孔行为具有密切的联系。Seto等^[4]也使用X射线透射和高速摄像同步拍摄,研究发现等离子体形态波动与小孔行为具有一致性和周期性特征。Kim等^[2-3]利用两台高速摄像机及特殊的光学系统,采用数值模拟结合高速摄像等研究手段,发现等离子体和小孔两者之间的波动行为具有相关性。结合本文的研究分析,可以认为小孔行为、等离子体的形态波动、电信号波动三者之间具有密切关联和很好的一致性,这就意味着电信号波动特征对分析等离子体与小孔的波动特征具有重要意义。

等离子体形态的动态行为与小孔的不稳定性有非常密切的关系^[2],小孔的稳定性取决于小孔内部的力平衡关系,根据文献[12-13]推导出小孔所受合力 Δp 为

$$\Delta p = p_r + p_{\text{gas}} - p_y - p_{\text{hy}} = p_r \left[1 + \frac{1}{3} \left(\frac{Z}{R} \right)^2 \right] - \frac{\gamma}{R} - \rho g Z, \quad (5)$$

式中 p_r 为蒸气反作用力; p_{gas} 为气体流动所产生的流体动压力; p_r 为液态金属的表面张力; p_{hy} 为重力引起的液体静压力; Z 为小孔深度; R 为小孔半径; γ 为表面张力系数; ρ 为液态材料的密度; g 为重力加速度。

Lancaster^[14]指出,当工件不移动时,假设产生了圆柱形小孔,随着小孔深度的增大, p_r 和 p_{gas} 减小,则 Δp 小于 0,小孔发生崩塌,激光束又重新作用在工件上,产生小孔。而当工件移动时,产生的小孔将为非圆柱型孔,小孔所受的合力更不易达到平衡,小孔的波动成为必然。在小孔波动过程中,小孔周期性崩塌与重新产生,或者是周期性张开与闭合,喷出的光致等离子体强度也发生周期性增强与减弱。对于激光焊过程中小孔是否完全闭合尚无明确结论,但比较有共识的是:在此期间,激光作用于小

孔内部或工件表面时,会产生或加大小孔,小孔内重新积聚能量,内部压力增大达到一定程度后,小孔张开,金属蒸气及等离子体喷发增强,其温度也相对较高^[1]。因此,等离子体的波动与小孔的波动也具有很强的关联和一致性,等离子体波动状态的电信号检测结果也间接反映了小孔的波动行为。

小孔波动行为与 Δp 密切相关,可用 Δp 定义回复压力常数 B ^[15],即

$$B = \frac{\partial \Delta p}{\partial R} \Big|_{R=\alpha}, \quad (6)$$

式中 α 为小孔等效半径。根据 Lagrangian 机制^[16],小孔波动频率 ω_0 满足

$$\omega_0^2 = \frac{B}{\rho' \alpha \ln C}, \quad (7)$$

式中 C 为熔池和小孔半径的比值; ρ' 为液相平均质量密度。

由(5)~(7)式可知,小孔的波动频率会受到焊接参数的影响,故等离子体的波动也会受到焊接参数的影响。

根据(7)式可以对小孔波动频率进行估算,并与试验结果进行对比。在不同焊接参数条件下,焊缝熔宽 b 在 0.87~2.10 mm 之间,激光光斑直径为 0.6 mm,故假设小孔直径波动范围为 $0.6-b$,小孔等效半径 α 取小孔波动最大值与最小值的中值 $(0.6+b)/4$ 。另外,根据文献[12-13]推算, Δp 的波动大体在 200~1000 Pa 范围内。由于可以认为熔池直径等于熔宽 b ,故 C 取值为 $b/0.6$ 。由此根据(6)~(7)式可得,小孔波动频率最大的范围是 210~2800 Hz。从图 8 可以看出,由电信号分析得出的等离子体形态波动频率处于上述计算值的范围内,但位于偏小的一边,这可能是试验条件的差异所导致的。

Kim等^[2-6]研究发现,等离子体形态波动频率为 2 kHz 左右;段爱琴等^[17]研究发现,等离子体形态波动频率为 1~3 kHz;而 Kroos等^[18]计算得到小孔波动频率为 450~600 Hz,李妍坤等^[19]研究指出等离子体形态波动频率为 530 Hz 左右。总体上等离子体形态波动频率在数百至数千赫兹之间。本试验条件下得出的等离子体形态波动也处于数百赫兹范围内,验证了所提的检测方法具有一定的适用性,且该方法实时性好,易于操作。

5 结 论

研究了等离子体电信号的波动特征与等离子体形态波动间的关系,对比了不同焊接参数下采集的

等离子体电信号与同步拍摄的等离子体的高速摄像图片,并进行了理论和试验分析,发现等离子体电信号、等离子体行为和小孔行为之间有密切的联系,得到以下结论。

1) 等离子体高速摄像图片和所探测的电信号有良好的对应关系,通过分析电信号的波动特征可以分析等离子体的波动特征。

2) 电信号 PSD 图中特征峰值对应的频率与等离子体形态波动频率基本一致,且随着激光热输入的增大,等离子体形态波动频率逐渐减小。

3) 小孔行为与等离子体行为之间有关联,小孔波动频率与等离子体形态的波动频率具有一致性,这也就意味着电信号波动特征的分析可以在一定程度上反映小孔的波动行为特征。

参 考 文 献

[1] Mrňa L, Šarbort M. Plasma bursts in deep penetration laser welding[J]. *Physics Procedia*, 2014, 56: 1261-1267.

[2] Kim J D, Kim Y H, Oh J S. Diagnostics of laser-induced plasma in welding of aluminum alloy[J]. *Key Engineering Materials*, 2004, 261/263: 1671-1676.

[3] Pang S Y, Chen X, Shao X Y, *et al.* Dynamics of vapor plume in transient keyhole during laser welding of stainless steel: Local evaporation, plume swing and gas entrapment into porosity [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2016, 82: 28-40.

[4] Seto N, Katayama S, Matsunawa A. High-speed simultaneous observation of plasma and keyhole behavior during high power CO₂ laser welding: Effect of shielding gas on porosity formation[J]. *Journal of Laser Applications*, 2000, 12(6): 245-250.

[5] Honda H, Tsukamoto S, Kawaguchi I, *et al.* Keyhole behavior in deep penetration CO₂ laser welding [J]. *Journal of Laser Applications*, 2010, 22(2): 43-47.

[6] Wang J, Wang C M, Meng X X, *et al.* Study on the periodic oscillation of plasma/vapour induced during high power fibre laser penetration welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 67-70.

[7] Yang R X, Yang L J, Liu T, *et al.* Spectral analysis of laser induced plasma electrical signals from Nd:YAG laser welding of A304 stainless steels [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(8): 0802008. 杨瑞霞, 杨立军, 刘桐, 等. A304 不锈钢 Nd:YAG 激光焊光致等离子体电信号频谱分析 [J]. *中国激光*, 2016, 43(8): 0802008.

[8] Zhao S B, Yang L J, Liu T, *et al.* Electrical signal characteristics of plasma in YAG laser welding of

A304 stainless steels under different modes [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, 43(12): 1202005. 赵圣斌, 杨立军, 刘桐, 等. 不同焊接模式下的 A304 不锈钢 YAG 激光焊等离子体的电信号特征 [J]. *中国激光*, 2016, 43(12): 1202005.

[9] Bi C, Yang L J, Xu W H, *et al.* An electrical detection of the fluctuating plasma of laser welding with a passive probe [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(38): 385202-385207.

[10] Zhang X D, Chen W Z, Ashida E, *et al.* Relationship between weld quality and optical emissions in underwater Nd:YAG laser welding [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2004, 41(5): 717-730.

[11] Mrna L, Sarbort M, Rerucha S, *et al.* Autocorrelation analysis of plasma plume light emissions in deep penetration laser welding of steel [J]. *Journal of Laser Applications*, 2017, 29(1): 012009.

[12] Tenner F, Brock C, Klämpfl F, *et al.* Analysis of the correlation between plasma plume and keyhole behavior in laser metal welding for the modeling of the keyhole geometry [J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2015, 64: 32-41.

[13] Klein T, Vicanek M, Simon G. Forced oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1996, 29(2): 322-332.

[14] Lancaster J F. *The physics of welding* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1985: 272-274.

[15] Klein T, Vicanek M, Kroos J, *et al.* Oscillations of the keyhole in penetration laser beam welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1994, 27(10): 2023-2030.

[16] Landau L D, Lifshitz E M. *Course of theoretical physics* [M]. Oxford: Pergamon Press, 1960.

[17] Duan A Q, Chen L, Wang Y J, *et al.* Dynamic behavior of plasma in CO₂ laser welding of stainless steel [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2005, 26(11): 17-20. 段爱琴, 陈俐, 王亚军, 等. CO₂ 激光焊接不锈钢光致等离子体动态特性分析 [J]. *焊接学报*, 2005, 26(11): 17-20.

[18] Kroos J, Gratzke U, Vicanek M, *et al.* Dynamic behaviour of the keyhole in laser welding [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1993, 26(3): 481.

[19] Li Y K, Zou J L, Niu J Q, *et al.* Experimental study on plasma characteristics in CO₂ laser welding of stainless steel [J]. *Applied Laser*, 2012, 32(3): 180-183. 李妍坤, 邹江林, 牛建强, 等. 不锈钢 CO₂ 激光焊接等离子体行为特性实验研究 [J]. *应用激光*, 2012, 32(3): 180-183.