

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

赵圣斌¹ 杨立军^{1,2} 刘 桐¹ 杨瑞霞¹ 潘家敬¹ 邱文聪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 提出一种无源电检测装置,对 A304 不锈钢 YAG 激光焊接过程中的等离子体电信号进行检测,并利用高速摄像机对等离子体的形态进行观察。结果表明,不同焊接模式下的等离子体电信号具有不同的时域特征。对不同焊接模式下的等离子体电信号特征进行理论与试验分析,发现等离子体电信号受等离子体效应和鞘层效应的共同影响;小孔的形成与否是造成不同焊接模式下等离子体电信号特征不同的决定性因素。

关键词 激光技术; 激光焊接; 激光等离子体; 电信号; 焊接模式

中图分类号 TG456.7

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1202005

Electrical Signal Characteristics of Plasma in YAG Laser Welding of A304 Stainless Steels Under Different Modes

Zhao Shengbin¹ Yang Lijun^{1,2} Liu Tong¹ Yang Ruixia¹ Pan Jiajing¹ Qiu Wencong¹

¹School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300350, China

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

Abstract A novel passively electrical device is proposed to detect the electrical signals of plasma in YAG laser welding of A304 stainless steels and a high-speed camera is used to observe the plasma shapes. The results indicate that the time-domain characteristics of signals are different in different welding modes. The theoretical and experimental analyses of the signal characteristics under different welding modes indicate that the plasma electrical signal is influenced by the combination of the plasma effect and sheath effect; the determinant factor resulting in different electrical signal characteristics under different welding modes is whether the keyholes are formed or not.

Key words laser technique; laser welding; laser induced plasma; electrical signal; welding mode

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3380

1 引 言

在激光焊接过程中,金属蒸气部分电离形成的激光等离子体是激光与物质相互作用的中心环节^[1]。等离子体对激光的吸收及折射作用会影响激光到达材料表面的功率密度^[2-5],进而影响焊接质量。等离子体包含了大量关于焊接过程的信息,通过监测等离子体状态可以对焊接过程进行监控,因此对激光等离子体的研究具有重要意义。

收稿日期: 2016-07-27; **收到修改稿日期:** 2016-09-09

基金项目: 国家自然科学基金(51175374)、先进焊接与连接国家重点实验室开放基金(AWJ-Z15-03)、天津市自然科学基金(16JCZDJC38700)

作者简介: 赵圣斌(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: chinazhao007@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)

国内外研究较多的是激光等离子体的光信号^[6]、声信号^[7]及光谱辐射信号^[8],而对等离子体本身的电信号特征研究较少。对等离子体电信号的研究通常是利用郎缪尔探针^[9]对等离子体中的电子温度与电子密度进行检测,但是由于激光等离子体本身较为稠密且波动剧烈,这一方法有一定的局限性。有学者采用其他方法对等离子体的电信号特征展开研究。Li等^[10]将焊接工件上方的等离子体与喷嘴作为一个整体进行研究,提出了用等离子体电荷传感器对激光焊接过程进行控制。Martin等^[11]利用一根直径为1.6 mm的钨棒作为探针检测等离子体电信号,研究正常焊接条件下的电信号频率特征。Ambrosy等^[12]利用间隙法得到了激光等离子体稳定形成后的某个短暂时间段的电信号,验证了等离子体中电流的存在。上述研究证明了利用电信号研究激光等离子体性质及状态的可行性,本文在以往研究的基础上,提出一种新的检测激光等离子体电信号的方法,可检测和分析不同焊接模式下的等离子体电信号的时域特征。

2 试验方法

2.1 激光等离子体无源电检测装置

激光焊接过程中产生的等离子体在径向和高度方向上存在电子温度梯度和电子密度梯度^[13],梯度的存在会导致电流的产生^[12]。Ambrosy等^[12]利用间隙法证明了等离子体中电流的存在,并提出了相关的物理模型,如图1(a)所示。电子流 j_e 从工件上方的等离子体中流入液态熔池,当熔池移动到间隙处时,如果在间隙两侧接有电阻, j_e 会流过电阻,检测电阻电压可得到等离子体电信号,然而此方法只有在等离子体位于间隙附近时才能检测到电信号。为了检测激光焊接全过程中的等离子体电信号,此处提出了一种新的无源电检测装置,如图1(b)所示。该检测装置由紫铜制作而成,呈圆形,中心有孔以通过激光。该装置置于工件上方,在装置底面涂有一层绝缘材料,其作用是切断工件上表面与等离子体之间的导电通路;当焊接过程中喷发的等离子体与电检测装置的内壁接触时,等离子体内部的电子流会通过电检测装置进入变阻器,通过测量变阻器两端的电压就可以得到等离子体中的电信号。电检测装置的内部设有水冷机构和侧吹保护气体通道,以保证装置温度稳定并保护焊缝。

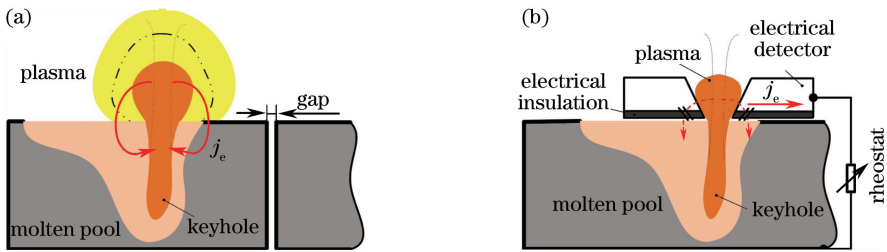


图 1 (a)激光等离子体中的电子流模型^[12]; (b)无源电检测装置的检测原理

Fig. 1 (a) Model of electron current in laser induced plasma^[12]; (b) testing principle of passively electrical detectors

2.2 激光等离子体电信号同步检测试验

设计了两路电信号同步采集系统进行对比试验,检测原理如图2(a)所示,其中DAQ-card为数据采集卡。在电信号采集电路1中,利用Ambrosy等^[12]提出的间隙法对等离子体电信号进行检测。将两块规格相同的工件相距1 mm放置,并保证两个工件之间绝缘,变阻器1的两端分别接在这两块工件上。焊接方向从左到右,当激光束趋近间隙时,等离子体会与右端工件接触,此时电路1闭合,等离子体中的电子流会从右侧工件进入变阻器1,通过测量变阻器1两端的电压可获得等离子体中的电信号。

在信号采集电路2中,利用此处提出的电检测装置进行检测,通过测量变阻器2两端的电压可获得等离子体中的电信号。作为激光等离子体电信号分析的一个辅助手段,采用高速摄像机对间隙两端的等离子体形态进行拍摄,试验装置如图2(b)所示,摄像头与焊接方向垂直,拍摄频率为1000 Hz。

3 试验结果

3.1 激光等离子体电信号同步检测结果分析

采用额定功率为2 kW的Nd:YAG激光器(JK2003SM,GSI公司,英国),激光波长为1064 nm,光斑直

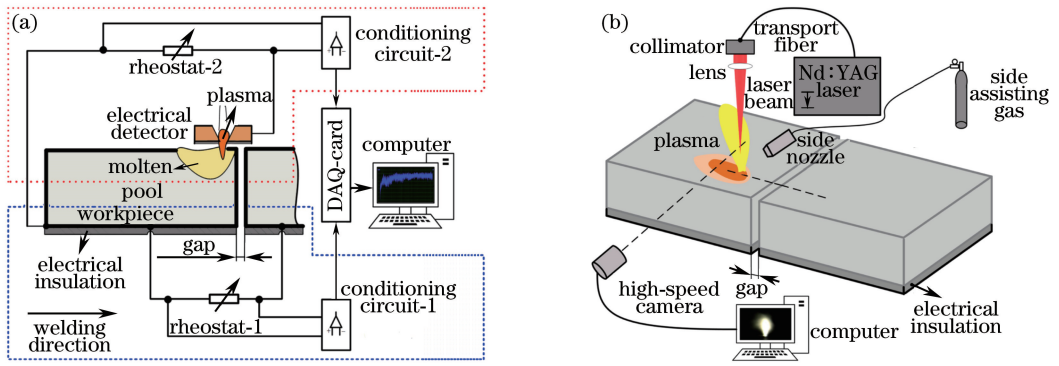


图 2 (a)激光等离子体电信号同步检测原理图;(b)高速摄像装置示意图

Fig. 2 (a) Schematic diagram of synchronous measurement of electrical signal of laser induced plasma; (b) schematic diagram of high-speed camera

径为 0.6 mm, 聚焦透镜焦距为 160 mm。在对比试验中, 两路电信号采集频率均为 10 kHz, 变阻器 1 和 2 的阻值均设置为 5 kΩ, 采用氩气作为保护气, 选用材料为 A304 不锈钢, 工件规格为 300 mm × 80 mm × 3 mm, 焊接参数见表 1。

表 1 对比试验参数

Table 1 Comparison among experimental parameters

No.	Power /W	Welding speed /(mm/s)	Gas flow rate /(L/min)	Defocusing amount /mm
1	1200	6	20	-1
2	800	6	20	-1

3.1.1 激光深熔焊模式下的等离子体电信号特征分析

在表 1 中第一组焊接参数下获得的典型电信号与焊缝横截面图如图 3 所示, 其中 u_d 是用电检测装置获得的电信号, u_g 是用间隙法获得的电信号。焊缝横截面图表明焊接过程是典型的深熔焊过程。图中所示的几个阶段分别如下。

$t_0 \sim t_1$, 即焊接初始阶段。焊接开始后, u_d 的绝对值 $|u_d|$ 呈近似线性增大, 并在 t_1 时刻达到峰值, 这一阶段的时间范围很小, 在本试验条件下约在 5 ms 内。

$t_1 \sim t_2$, 即焊接过渡阶段(约为 0.5 s)。 $|u_d|$ 逐渐变小, 并在 t_2 时刻后逐步趋于稳定。

$t_2 \sim t_3$, $|u_d|$ 变化幅度较小, 表明焊接过程趋于稳定。电信号这种振荡特性反映了焊接过程的某种频域特性, 此处主要关注电信号的时域特征。

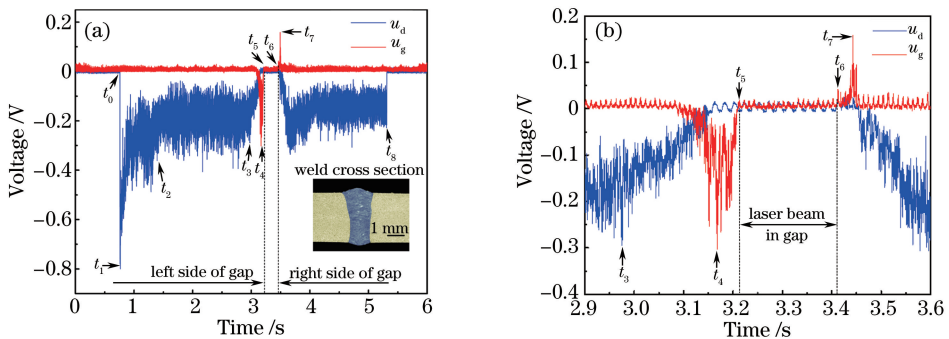


图 3 激光深熔焊模式下等离子体电信号。(a)全过程;(b)间隙两端

Fig. 3 Electrical signal of plasma under laser deep-penetration welding mode. (a) In the whole process; (b) at both sides of gap

用同样的焊接参数在 A304 不锈钢上进行自熔焊接, 由高速摄像得到的等离子体形态演变如图 4 所示。结合图 3、4 可知:

在 $t_0 \sim t_3$ 阶段, 激光束位于间隙左侧, 等离子体未与右侧工件接触, 电路 1 断开, 故 $u_g = 0$ V;

在 $t_3 \sim t_4$ 阶段, 等离子体向间隙右侧偏转, 随着等离子体偏转角度的增大, 等离子体逐渐脱离电检测装置, 开始与右端工件接触, 故在 t_3 时刻后 $|u_d|$ 逐渐变小 [图 3(b)], 而 $|u_g|$ 逐渐增大, 并在 t_4 时刻达到峰值;

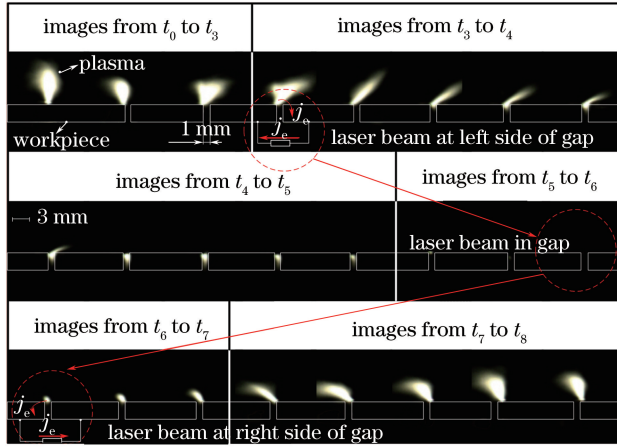


图 4 激光深熔焊模式下间隙两端等离子体形态演变

Fig. 4 Plasma shape evolution at both sides of gap under laser deep-penetration welding mode

在 $t_4 \sim t_5$ 阶段, 随着激光束继续移动, 等离子体逐渐消失, $|u_g|$ 逐渐减小;

在 $t_5 \sim t_6$ 阶段, 激光束完全进入间隙, 等离子体湮灭, u_g 与 u_d 均为 0 V;

在 $t_6 \sim t_7$ 阶段, 激光束重新作用于右侧工件, 等离子体重新产生并与左侧工件接触, 电路 1 再次闭合, u_g 在 t_7 时刻达到第二个峰值, 但其电压变为正值, 其原因是电路中的电子流向发生了变化;

在 $t_7 \sim t_8$ 阶段, 等离子体偏转角度逐渐减小, 等离子体与左侧工件逐渐脱离, 并与电检测装置接触, 故 $|u_g|$ 减小为 0, 而 $|u_d|$ 逐渐增大直至稳定, 在 t_8 时刻焊接停止。

通过对比两种检测方法得到的激光深熔焊模式下的等离子体电信号, 发现焊接稳定阶段内间隙法获得的信号幅值与电检测装置获得的信号幅值基本一致, 但是电检测装置可以获得激光焊接全过程中的等离子体电信号。

3.1.2 激光热导焊模式下的等离子体电信号特征分析

用表 1 中第二组焊接参数进行焊接, 得到的典型电信号如图 5 所示, 焊缝横截面呈现典型的浅滩状样貌, 说明焊接过程为热导焊过程。对应的电信号与深熔焊模式下的电信号有明显不同。用同样的焊接参数在相同规格的 A304 不锈钢上进行焊接, 高速摄像得到的等离子体形态演变如图 6 所示。

焊接开始后, $|u_d|$ 迅速增大, 并在 t_1 时刻后趋于稳定。

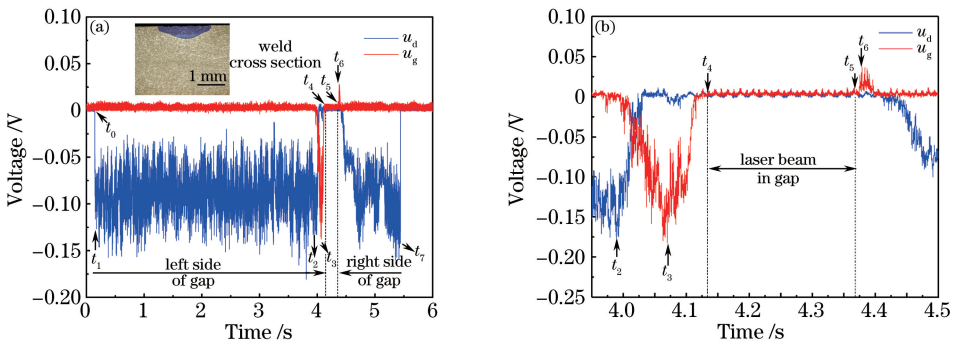


图 5 激光热导焊模式下等离子体电信号。(a) 全过程; (b) 间隙两端

Fig. 5 Electrical signal of plasma under laser heat-conduction welding mode. (a) In the whole process;

(b) at both sides of gap

在 $t_0 \sim t_2$ 阶段, 等离子体未与右侧工件接触, 电路 1 为断路状态, $|u_g|$ 为 0 V。

在 $t_2 \sim t_3$ 阶段, 激光束逐渐接近间隙, 等离子体开始偏转并与右侧工件接触, 随着偏转角度的增加, 电检测装置逐渐脱离等离子体。故对应的电信号 $|u_d|$ 开始逐渐变小, 而 $|u_g|$ 逐渐增大并在 t_3 时刻达到峰值。

在 $t_3 \sim t_4$ 阶段,随着激光束继续移动,等离子体逐渐消失, $|u_g|$ 逐渐减小。

在 $t_4 \sim t_5$ 阶段,激光完全进入间隙,等离子体湮灭, u_g 与 u_d 均为 0 V [图 5(b)]。

在 $t_5 \sim t_6$ 阶段,等离子体重新产生并与左侧的工件相互接触,电路 1 重新闭合, u_g 在 t_6 时刻达到第二个峰值。

在 $t_6 \sim t_7$ 阶段,随着等离子体偏转角度逐渐减小,电检测装置与等离子体接触,而左侧工件逐渐脱离等离子体, $|u_d|$ 逐渐增大直至稳定,而 $|u_g|$ 逐渐减小为 0 V。

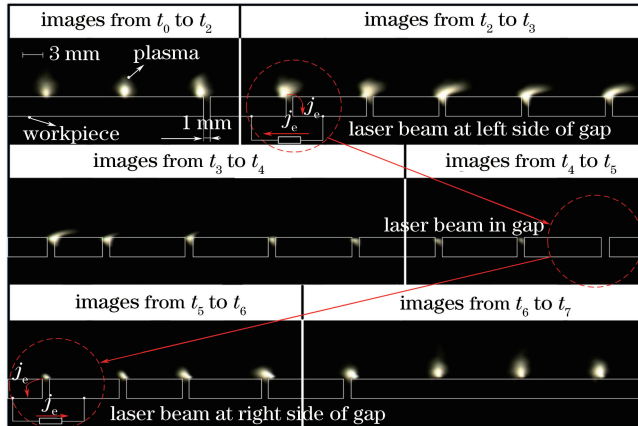


图 6 激光热导焊模式下间隙两端等离子体形态演变

Fig. 6 Plasma shape evolution at both sides of gap under laser heat-conduction welding mode

经过以上分析,在热导焊模式下两种检测方法得到的等离子体电信号幅值基本一致,且电检测装置可得到焊接全过程中的等离子体电信号。

3.2 不同激光功率下的激光等离子体电信号特征分析

通过对比试验可以发现,在不同的焊接模式下,电检测装置得到的等离子体电信号特征不同。为了进一步研究不同焊接模式下电检测装置得到的电信号变化特征,此处进行了不同激光功率下的等离子体电信号检测试验。在焊接速度为 6 mm/s、侧吹气体为氩气、气流量为 20 L/min、离焦量为 -1 mm 的情况下,通过改变激光功率,在规格为 300 mm×80 mm×3 mm 的 A304 不锈钢表面进行焊接,得到的等离子体电信号如图 7 所示,不同激光功率下的焊缝横截面金相图如图 8 所示。

当激光功率为 800 W 和 900 W 时,由于激光能量不足以形成小孔,焊缝横截面为典型的热导焊形貌,对

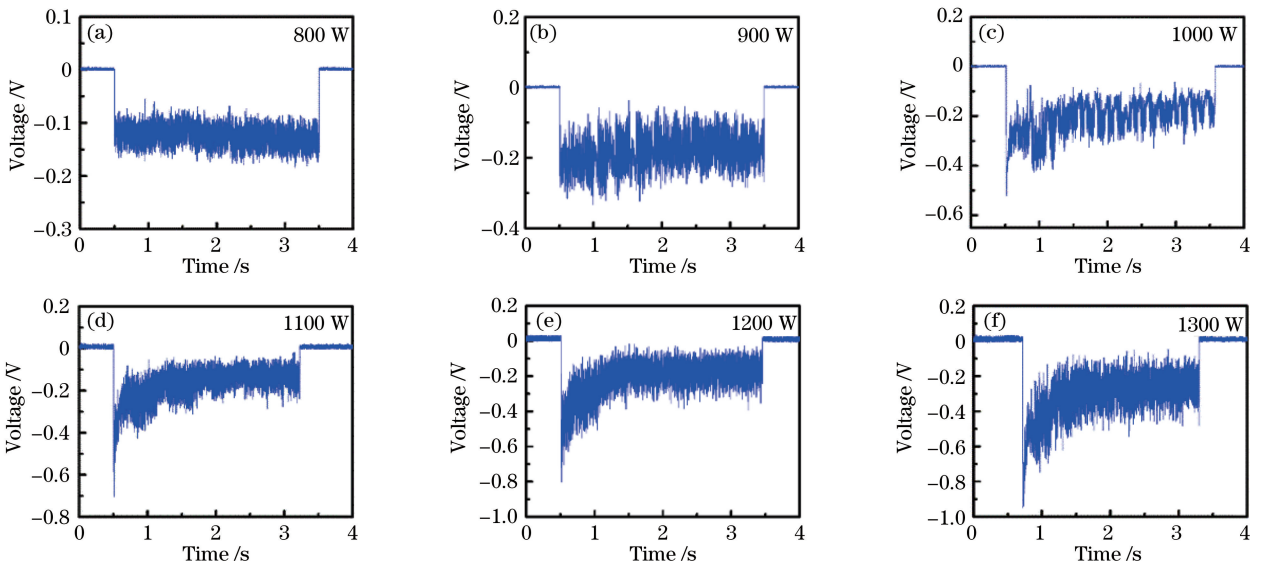


图 7 不同激光功率下电检测装置得到的激光焊等离子体电信号

Fig. 7 Electrical signals of plasma under laser welding mode detected by electrical detectors with different laser powers

应的电信号在整个焊接过程中保持相对稳定的状态。当激光功率增加到 1000 W 时,在焊接初始阶段出现了峰值电压,虽然比较小,但其变化特征与图 3(a)类似。在电信号稳定阶段出现了不连续的峰族,对应的焊缝横截面如图 8(c)所示,呈现钉形形貌。

当激光功率增加到 1100 W 时,等离子体电信号表现出图 3(a)中 u_d 的变化特征,在初始阶段出现了明显的峰值电压,随后信号绝对幅值逐渐趋于稳定,对应的焊缝形貌如图 8(d)所示,为典型深熔焊模式下的焊缝形貌。当激光功率继续增加至 1200 W 和 1300 W 时,焊缝完全熔透,对应的等离子体电信号同样表现出图 3(a)中 u_d 的变化特征。

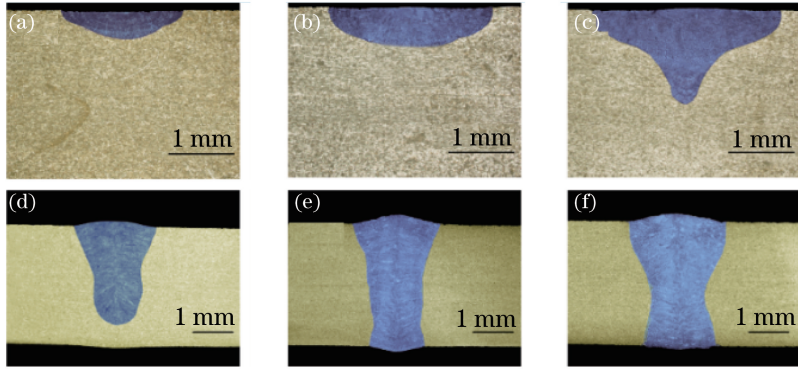


图 8 不同激光功率下的焊缝横截面金相图。(a) 800 W; (b) 900 W; (c) 1000 W; (d) 1100 W; (e) 1200 W; (f) 1300 W

Fig. 8 Metallographic graphs of weld cross sections under different laser powers. (a) 800 W; (b) 900 W; (c) 1000 W; (d) 1100 W; (e) 1200 W; (f) 1300 W

无论是热导焊还是深熔焊,在相对稳定阶段,电信号基本在 -0.2 V 左右振荡,热导焊的电信号绝对幅值略微小一些,这可能与等离子体的热力学状态有关。两种焊接模式下的等离子体电信号在焊接初始阶段有明显区别,深熔焊的电信号有明显的峰值出现,且随激光功率的增加,此峰值的绝对值有增大的趋势。这种电信号特征为在焊接初始阶段激光焊模式的辨识提供了新的途径。

4 分析与讨论

由广义欧姆定律^[12]可知,电子温度梯度和密度梯度是激光等离子体中电流产生的驱动力,结合广义欧姆定律并考虑热效应^[14]对等离子体中电流的影响,可得出等离子体的空间电位^[15]

$$\Phi_p = \frac{1.71k}{e}(T_{eB} - T_{eA}) + \frac{k}{e} \int_{T_{eA}}^{T_{eB}} \left(\frac{T_e}{n_e} \cdot \frac{dn_e}{dT_e} \right) dT_e, \quad (1)$$

式中 Φ_p 为等离子体的空间电位, k 为玻尔兹曼常数, e 为电子常量, n_e 为电子数密度, T_e 为电子温度, T_{eA} 为电检测装置与等离子体接触处的电子温度, T_{eB} 为等离子体内部的电子温度。

另外,相对于高温等离子体,无论是电检测装置还是与等离子体相接触的工件均为冷体,需要考虑鞘层效应对等离子体电信号的影响,电检测装置的电位 Φ_d 为^[16]

$$\Phi_d = \Phi_p - \frac{kT_{eA}}{e} \ln \sqrt{m_i \frac{1}{4\pi m_e}}, \quad (2)$$

式中 m_i 与 m_e 分别为离子与电子质量。由(2)式可知, Φ_d 大小由等离子体效应[(2)式等号右端第一项]和鞘层效应[(2)式等号右端第二项]共同决定。

激光深熔焊过程中,在焊接初始阶段^[17-18],小孔刚开始形成,其内外等离子体温度差较小,故在这一阶段等离子体效应对 Φ_d 影响较小,而鞘层效应对 Φ_d 影响显著,因此在焊接初始阶段主要考虑鞘层效应的影响。根据相关研究^[19],与试验焊接条件基本相同的等离子体的外层温度约为 2700 K,且由光谱分析可知,等离子体主要为铁原子的一次电离。将铁离子质量 $m_i = 9.302 \times 10^{-26}$ kg 和电子质量 $m_e = 9.1 \times 10^{-31}$ kg 代入(2)式,可得 Φ_d 约为 -1.045 V。试验发现,当外接电阻值为 20 k Ω 以上时,测得的等离子体电压绝对值达到

最大值,此时测得的初始阶段的电信号如图 9(a)所示。在初始阶段($t_0 \sim t_1$),电信号电压绝对值快速增大, t_1 时刻达到峰值约为 1.06 V,与计算结果基本一致。

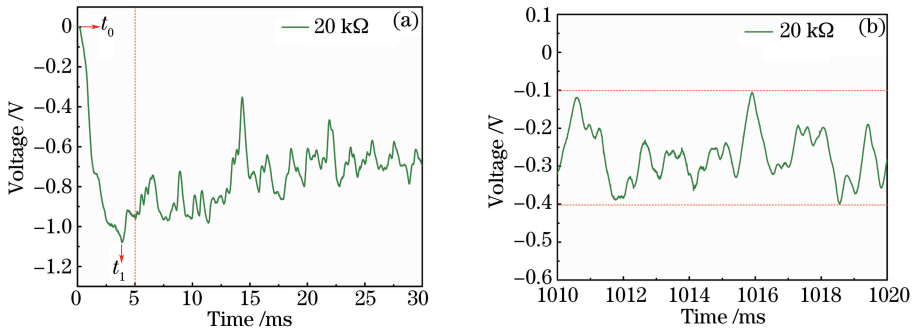


图 9 等离子体电信号。(a)初始阶段内的;(b)稳定阶段内的

Fig. 9 Electrical signals of plasma. (a) In the initial stage; (b) in the stable stage

随着小孔深度的逐渐增加,由于小孔内部的逆韧致吸收效应和非涅耳吸收效应,小孔内的等离子体温度急剧增加^[20]。而在 YAG 激光焊接过程中,工件上方的等离子体对激光的吸收作用有限^[3],故在焊接过渡阶段小孔内外的等离子体温度差变大,等离子体效应对 Φ_d 的影响逐渐显著,如图 9(a)所示,在 t_1 时刻后,电信号电压绝对幅值开始减小,但是由于等离子体剧烈的波动性质,采集到的电信号在 t_1 时刻后(过渡阶段)呈现剧烈振荡状态。

焊接过程进入稳定阶段后,在等离子体效应和鞘层效应的共同作用下,等离子体电信号在一定范围内稳定波动,其典型电信号如图 9(b)所示,等离子体电信号基本在 $-0.1 \sim -0.4$ V 范围内波动。由于等离子体剧烈波动的特点,等离子体中电子密度的变化较难确定,暂时只考虑等离子体电子温度对电信号的影响。利用图 9(b)测得的数据并结合(2)式可以推算出, Φ_p 在 $0.96 \sim 0.66$ V 之间波动;再结合(1)式推算得出,小孔内外等离子体电子温度差在 $4479 \sim 6515$ K 范围内波动。如果孔外等离子体温度仍按 2700 K 考虑,则孔内等离子体电子温度在 $7179 \sim 9215$ K 范围内波动;考虑到电子密度的影响,实际值应更小一些,这与 Finkle^[21]利用理论计算得出的结果相符。

在激光热导焊过程中,由于没有小孔的产生,其等离子体电信号不会出现过渡过程,焊接开始后等离子体电信号在等离子体效应和鞘层效应的共同作用下保持稳定,且鞘层效应的影响占主导地位。但作用的激光功率较低,等离子体温度相对较低,导致电信号绝对幅值相比深熔焊偏小。

随着激光功率的增加,焊接模式由热导焊转变为深熔焊,出现了一种过渡模式,其电信号中出现了不连续的峰族[图 7(c)],焊缝横截面呈钉形形貌[图 8(c)]。针对这种现象可以推测,激光功率 1000 W 应该在形成小孔的临界功率附近,小孔处于不稳定的状态,影响了等离子体的形成与喷发,导致了等离子体电信号的不稳定振荡。

5 结 论

提出了一种新的激光等离子体电信号的检测方法,采集了不同焊接模式下的等离子体电信号并进行了分析,得出以下结论。

1) 利用提出的无源电检测装置可以采集激光焊接全过程中的等离子体电信号。在不同激光焊接模式下,采集到的等离子体电信号特征不同,深熔焊的激光等离子体电信号在初始阶段会出现一个明显的峰值,随后振荡减小并逐步达到稳定振荡状态;热导焊等离子体电信号在初始阶段没有明显的峰值,在焊接全过程中保持稳定振荡状态。该研究结果为激光焊初始阶段焊接模式的辨识提供了一个新的途径。

2) 通过对等离子体内部电流产生机制的理论分析和等离子体电信号的试验分析发现,激光等离子体电信号的变化特点由等离子体效应和鞘层效应共同决定,而小孔的形成与否是造成不同焊接模式下等离子体电信号特征不同的决定性因素。

参 考 文 献

- 1 Steen W M, Mazumder J. Laser material processing (4th edition)[M]. London: Springer, 2010: 203-209.
- 2 Kim K R, Farson D F. CO₂ laser-plume interaction in materials processing[J]. Journal of Applied Physics, 2001, 89(1): 681-688.
- 3 Katayama S, Kawahito Y, Mizutani M. Elucidation of laser welding phenomenon and factors affecting weld penetration and welding defects[J]. Physics Procedia, 2010, 5: 9-17.
- 4 Zou Jianglin, Li Fei, Niu Jianqiang, *et al.* Effect of laser-induced plume on welding process during high power fiber laser welding[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(6): 0603005.
邹江林, 李 飞, 牛建强, 等. 高功率光纤激光焊接羽辉对焊接过程的影响[J]. 中国激光, 2014, 41(6): 0603005.
- 5 Xiao Rongshi, Chen Kai, Chen Jimin, *et al.* Experimental research of the plasma shielding mechanism in the process of CO₂ laser welding[J]. Laser Technology, 2001, 25(3): 238-241.
肖荣诗, 陈 凯, 陈继民, 等. CO₂ 激光焊接光致等离子体屏蔽机制的实验研究[J]. 激光技术, 2001, 25(3): 238-241.
- 6 Hong Lei, Hu Zhaowei, Ma Baoliang. Monitoring plasma light in laser cladding and melting[J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(2): 0203006.
洪 蕾, 胡肇伟, 马宝亮. 激光熔覆熔凝过程等离子体光信号的监测[J]. 中国激光, 2011, 38(2): 0203006.
- 7 Gu H P, Duley W W. Acoustic emission from modulated laser beam welding of materials [J]. Journal of Laser Applications, 1996, 8: 205-210.
- 8 Li Junyan, Lu Jidong, Li Jun, *et al.* Laser-induced plasma spectra of heating surface materials with different hardnesses [J]. Chinese J Lasers, 2011, 38(8): 0815002.
李俊彦, 陆继东, 李 军, 等. 不同硬度受热面材料的激光诱导等离子体光谱特性分析[J]. 中国激光, 2011, 38(8): 0815002.
- 9 Billik N, Anthony R, Merritt B A, *et al.* Langmuir probe measurements of electron energy probability functions in dusty plasmas[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2015, 48(10): 105204.
- 10 Li L, Brookfield D J, Steen W M. Plasma charge sensor for in-process, non-contact monitoring of the laser welding process[J]. Measurement Science and Technology, 1996, 7(4): 615-626.
- 11 Bruno M, Alexandre L, Michel P, *et al.* Characterisation of cw Nd:YAG laser keyhole dynamics[J]. Optics & Laser Technology, 2001, 33(4): 201-207.
- 12 Ambrosy G, Avilov V, Berger P, *et al.* Laser induced plasma as a source for an intensive current to produce electromagnetic forces in the weld pool[C]. SPIE, 2006, 6346: 63461Q.
- 13 Chen Wuzhu. Quality control of laser welding and cutting[M]. Beijing: Mechanical industry press, 2010, 14-31.
陈武柱. 激光焊接与切割质量控制[M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 14-31.
- 14 Braginskii S I. Transport processes in a plasma[M]. Los Angeles: Consultants Bureau Press, 1965: 213-271.
- 15 Zohm H, Ambrosy G, Lackner K. Electrical potential difference during laser welding[J]. Journal of Plasma Physics, 2015, 81(1): 905810109.
- 16 Paul B. Fundamentals of plasma physics[M]. London: Cambridge University Press, 2008: 53-57.
- 17 Zhao H Y, Niu W C, Zhang B, *et al.* Modelling of keyhole dynamics and porosity formation considering the adaptive keyhole shape and three-phase coupling during deep-penetration laser welding[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2011, 44(48): 485302.
- 18 Pang S Y, Chen W D, Zhou J X, *et al.* Self-consistent modeling of keyhole and weld pool dynamics in tandem dual beam laser welding of aluminum alloy[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2015, 217: 131-143.
- 19 Chao B, 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.
- 20 Shigeki F, Hiro T, Toru N, *et al.* Direct observation of keyhole behavior during pulse modulated high-power Nd:YAG laser irradiation[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2000, 33(5): 492-497.
- 21 Finke B R, Kapadia P D, Dowden J M. A fundamental plasma based model for energy transfer in laser material processing [J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1990, 23(6): 643-654.