

YAG 激光焊接等离子体电信号检测与焊接模式分析

焦 娇¹ 杨立军^{1,2} 刘 桐¹ 杜 笑¹ 王会超¹

(¹ 天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072
² 天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072)

摘要 激光等离子体中包含了反映激光焊接过程特征的信息。利用激光等离子体光电信号同步检测系统,检测激光等离子体的光电信号并进行光电信号的对比分析,阐明了电信号与等离子体温度之间的关系;对 A304 不锈钢、430 不锈钢、碳钢 Q235 等材料的激光表面自熔焊接过程的等离子体电信号进行了实时检测及概率密度分布分析,对深熔焊特征最明显的 A304 不锈钢进行了电信号概率密度分布的标准差分析。研究表明:利用激光等离子体电信号能够实时反映激光焊接等离子体的温度变化的特点,可以根据激光等离子体电信号概率密度分布来分析激光焊接模式的特点,进一步的标准差分析法可以判断 A304 不锈钢激光焊接的模式。

关键词 激光技术; 激光焊接; 激光等离子体; 电信号; 概率密度分布; 标准差

中图分类号 TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201441.0903005

Electrical Detection of the Plasma and Analysis of Welding Modes in YAG Laser Welding

Jiao Jiao¹ Yang Lijun^{1,2} Liu Tong¹ Du Xiao¹ Wang Huichao¹

(¹ School of Material Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China
² Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract A lot of information reflecting laser welding process are involved in laser-induced plasma. The electrical signal and spectral signal from laser-induced plasma are detected by a synchronous electrical and spectral information acquisition system and the signals are compared. And then the relationship between electrical signal and plasma temperature is illustrated. The electrical signals of the induced-plasma for stainless steel A304, stainless steel 430 and carbon steel Q235 in laser surface auto genous welding are detected in real-time and analyzed by the probability density distribution. The analysis of the standard deviation of probability density distribution of the electrical signal from the stainless steel A304 laser welding with the most obvious deep penetration characteristics is presented. The results indicate that the temperature variation of laser induced-plasma can be real-timely detected by the electrical signal, and laser welding mode can be identified by the probability density analysis of the electrical signal of the laser induced-plasma and the laser welding mode of stainless steel A304 can be determined by the standard deviation analysis.

Key words laser technique; laser welding; laser induced-plasma; electrical signal; probability density distribution; standard deviation

OCIS codes 140.3390; 140.3460; 140.3380

1 引 言

激光焊接以其热输入小、变形小等优点受到人们的关注^[1]。等离子体的产生是激光焊接过程中重

要的物理现象,其与激光的相互作用对焊接过程有直接影响,该等离子体也称激光等离子体,其中包含了大量反映激光焊接过程的信息,对激光等离子体

收稿日期: 2014-04-08; **收到修改稿日期**: 2014-04-24

基金项目: 国家自然科学基金(51175374)、天津市自然科学基金(11JCYBJC06100)

作者简介: 焦 娇(1989—),女,硕士研究生,主要从事激光焊接等离子体电信号检测方面的研究。

E-mail: 992269390@qq.com

导师简介: 杨立军(1966—),男,教授,主要从事焊接过程测控及等离子体物理等方面的研究。

E-mail: tdyljabc@163.com(通信联系人)

的研究具有重要的实际意义。

近年来,国内外研究人员对焊接过程中激光等离子体的声、光信号研究较多^[2-9],而对电信号的研究相对较少。在等离子体电信号检测的方法和手段中以 Langmuir 探针应用最广,这是一种有源探针,适合稳态等离子体的检测。但激光焊接等离子体具有较强的波动性,且波动频率较高,这就需要一种能够实时检测等离子体波动特征的检测方法。本文根据等离子体鞘层理论提出一种无源电探针检测方法,基于自主开发的激光焊接等离子体光电信号同步检测系统,实时采集焊接过程中激光等离子体的光电信号,并分析无源电探针检测的电信号概率密度和标准差,探索激光焊接过程的规律,为激光焊接质量检测提供一种新途径。

2 激光等离子体光电同步检测

2.1 系统组成

如图 1 所示,激光等离子体光电同步检测系统由额定功率为 2 kW 的 Nd:YAG 激光器、无源电探针、光谱仪、数据采集卡(DAQ card)及计算机等组成。

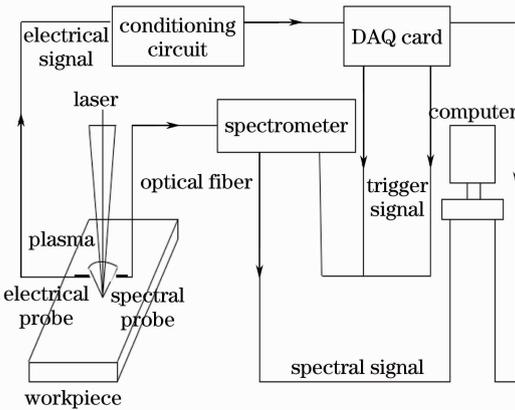


图 1 光电同步采集系统示意图

Fig. 1 Spectral and electrical signal acquisition system diagram

电探针选取直径为 2 mm 的钨棒。光谱仪采用 AvaSpec-2048 型光纤光谱仪,考虑到光谱仪光谱图的存储及传输速度,光谱采样频率选择为 4 Hz,测量波长范围为 200~800 nm。需要指出的是,光谱仪具备数字 I/O 接口,可接受外部触发,此功能是光电同步采集的基础。选用的采集卡最高采样频率可达 250 kHz。

采集到的电信号通过采集卡接入计算机进行存储,采集卡可提供外部触发脉冲给光谱仪,光谱仪外部触发采样的触发方式为晶体管-晶体管逻辑电平

(TTL)脉冲上升沿触发,光谱仪每接收到一次外部触发信号即采集一幅光谱图,采集到的光谱信号也传递到计算机存储。为了避免采集过程外界对系统的干扰,这里通过调理电路对电信号进行放大和滤波。

2.2 电信号检测原理及计算温度方法

本文应用无源电探针实时检测激光等离子体波动特性,该方法的理论基础是等离子体鞘层理论^[10]。等离子体中存在大量高速运动的带电粒子,根据热力学规律,质量较小的电子运动速度远大于离子运动速度,因此,当一个冷金属浸入到热的等离子体时,与金属发生碰撞的电子数目远远大于离子数目,最终导致金属表面聚集大量负电荷。由此产生的负电位将阻碍电子向金属表面运动,同时促使正离子向金属表面运动。当正离子流密度和电子流密度相等时,金属表面负电位将不再改变,即形成等离子体“鞘层”。

根据以往的研究^[11],金属表面的电位 E_w 为

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

式中 k 为玻尔兹曼常数, T 为等离子体温度, m_i 为离子质量, m_e 为电子质量, e 为电子电量。根据检测到的等离子体电压,便可知道 E_w 的值,由此计算出等离子体温度 T 。

2.3 光谱诊断计算温度的方法

光谱诊断中,有多种计算等离子体温度的方法,本文采用相对光强法:

$$T = \frac{0.6247(E_1 - E_2)}{\lg[g_1 A_1 / (g_2 A_2)] - \lg(\lambda_1 / \lambda_2) - \lg(I_1 / I_2)}, \quad (2)$$

式中 g_1, g_2 为两能态的统计权重, A_1, A_2 为两能态的跃迁几率, λ_1, λ_2 为波长, E_1, E_2 为激发电位, I_1, I_2 为光强,由此可计算出等离子体温度。

3 试验结果与分析

3.1 光电信号的对比分析

选用 3 mm 厚 Q235 碳钢板进行激光表面自熔试验,激光器采用 JK2003SM 型 Nd:YAG 激光器,波长为 1.06 μm ,光斑直径为 0.6 mm,聚焦透镜焦距为 300 mm,同步触发脉冲序列频率为 4 Hz。

焊后对光电信号进行对比分析,图 2 为焊接过程中采集到的等离子电信号图,应用(1)式可计算得到等离子体电信号温度。光信号温度应用相对光强法计算,图 3 为光谱特征谱段标定图的一个示例,其采集同步时间对应图 2 的 3.2 s,计算时选择

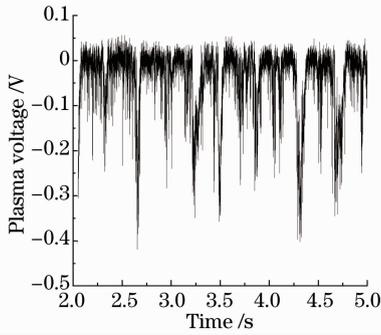


图 2 等离子体电信号图

Fig. 2 Plasma electrical signal diagram

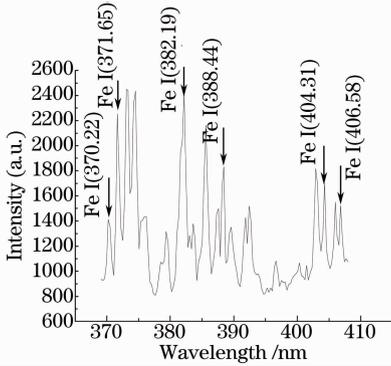


图 3 Q235 激光焊接特征谱段标定图

Fig. 3 Calibration chart of spectrum about laser welding of Q235

382.19 nm和 406.85 nm 两条 Fe 原子谱线。图 4 为电信号温度和光谱温度计算结果比较图的一个示例，可以看出光谱计算等离子温度的拟合结果与电

表 1 试验工艺参数(概率密度分析)

Table 1 Experimental processing parameters (analysis of probability density)

Number	Material	Power /W	Welding speed /(mm/s)	Depth-to-width ratio
1	304	1700	4	1.38
2	430	1700	4	1.44
3	Q235	1700	4	0.83
4	304	1600	4	0.55
5	430	1400	4	0.60
6	Q235	1700	10	0.57

焊接过程中采集到的电信号及概率密度分析结果如图 6 所示。从 1、2、3 组试验所对应的概率密度分布图看出其电位分布相对集中，分别在 -0.8、-0.4、-0.5 V 处出现峰值。然而从 4、5、6 组试验所对应的概率密度分布图看出其电位在相对较大范围内波动，在某一负值出现不明显的峰值，且均在 0 附近出现峰值。分析认为，1、2、3 组焊缝截面具有明显的深熔焊特征，这从试验参数和焊缝横截面金相图都可以得到验证。从以往的研究可以知道，在深熔焊过程中存在小孔效应及等离子体的剧烈喷发，Kawahito 等^[13]指出孔内等离子体的喷发具有一定

周期性，这是在已存在孔外等离子体的基础上，孔内等离子体向孔外的喷发^[14]，并且这种周期性喷发是一个动态稳定的过程，此时电探针能够持续探测到等离子体。这种持续探测到的等离子体应包含较为稳定存在的孔外等离子体以及周期性喷发的孔内等离子体，相应的电信号概率密度分布图在一定范围内波动并在某一负值处出现较为明显的峰值。而 4、5、6 组试验热输入相对较小，焊缝横截面形貌具有热导焊特征，焊接过程电离产生的等离子体不强烈，更不存在小孔及孔内等离子体的强烈喷发，等离子体只是以一定的波动性存在于工件表面上方，电探

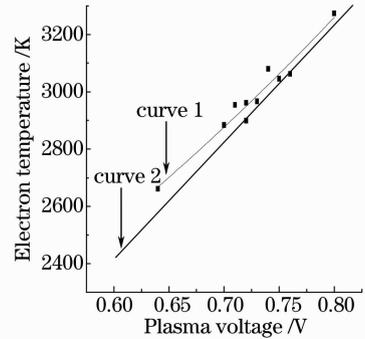


图 4 电信号计算结果与光谱诊断结果比较图

Fig. 4 Comparison diagram of the results between spectrum diagnosis and the calculation of electric signal

3.2 电信号概率密度分析

为了更深入研究激光焊接过程电信号的特点，本文利用概率密度统计分析方法对其展开研究。实验选用 3 mm 厚 304 不锈钢、430 不锈钢和碳钢 Q235 进行激光表面自熔焊接试验，焊接过程中实时采集等离子体电信号。实验所用保护气为 Ar 气，气流量为 15 L/min，离焦量为 -1 mm，所选焊接参数如表 1 所示。焊后取焊缝横截面进行金相分析，图 5 给出了焊缝横截面金相图，表 1 给出了焊缝深宽比。

周期性的喷发，这是在已存在孔外等离子体的基础上，孔内等离子体向孔外的喷发^[14]，并且这种周期性喷发是一个动态稳定的过程，此时电探针能够持续探测到等离子体。这种持续探测到的等离子体应包含较为稳定存在的孔外等离子体以及周期性喷发的孔内等离子体，相应的电信号概率密度分布图在一定范围内波动并在某一负值处出现较为明显的峰值。而 4、5、6 组试验热输入相对较小，焊缝横截面形貌具有热导焊特征，焊接过程电离产生的等离子体不强烈，更不存在小孔及孔内等离子体的强烈喷发，等离子体只是以一定的波动性存在于工件表面上方，电探

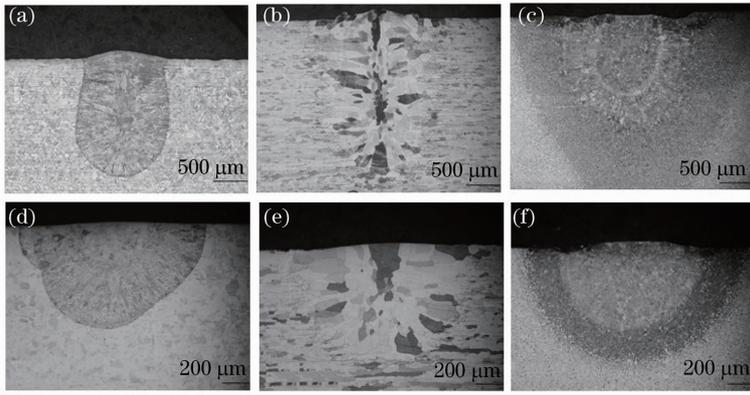


图 5 各组参数焊缝横截面金相图。(a) 第 1 组；(b) 第 2 组；(c) 第 3 组；(d) 第 4 组；(e) 第 5 组；(f) 第 6 组
Fig. 5 Transverse sections of the welds of different parameters. (a) Number 1; (b) number 2; (c) number 3; (d) number 4; (e) number 5; (f) number 6

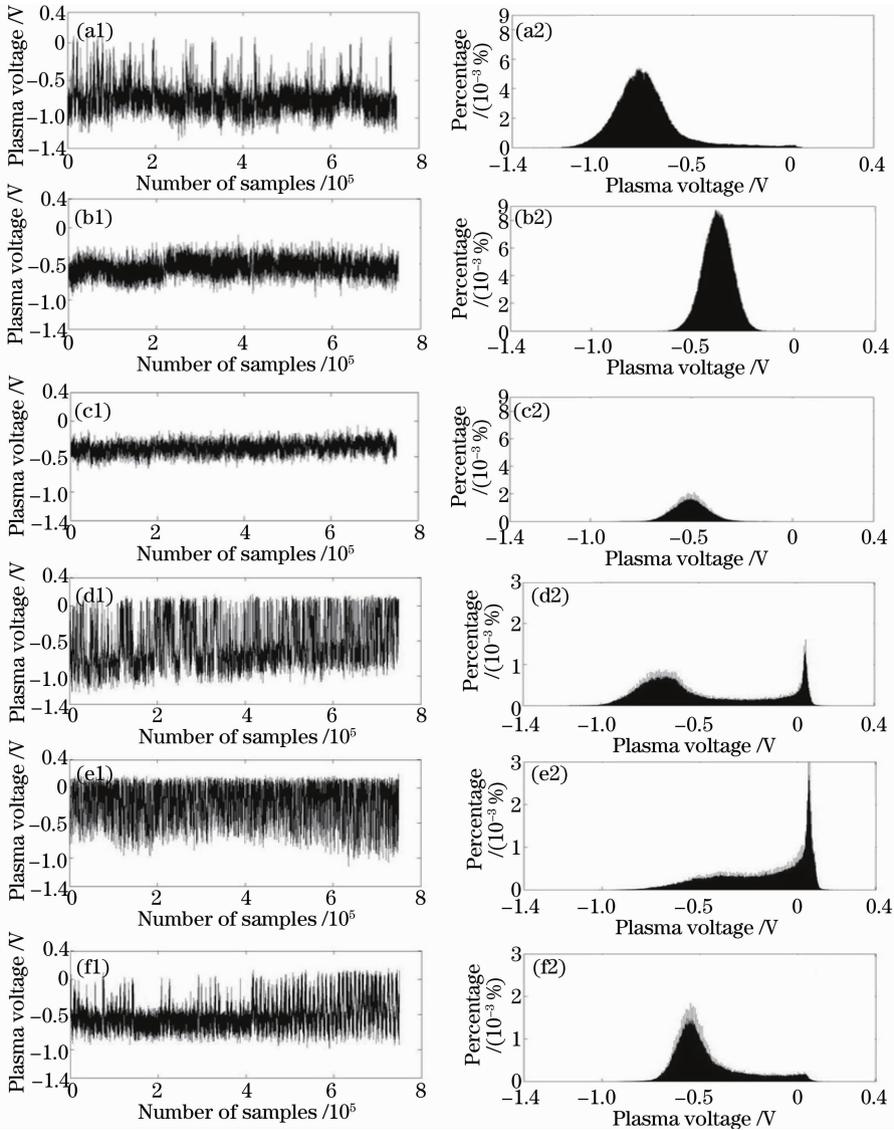


图 6 概率密度分布图。(a1), (a2) 第 1 组；(b1), (b2) 第 2 组；(c1), (c2) 第 3 组；(d1), (d2) 第 4 组；
(e1), (e2) 第 5 组；(f1), (f2) 第 6 组

Fig. 6 Probability density distributions. (a1), (a2) Number 1; (b1), (b2) number 2; (c1), (c2) number 3; (d1), (d2) number 4; (e1), (e2) number 5; (f1), (f2) number 6

针探测到的等离子体较弱,有时甚至探测不到等离子体从而出现零幅值,因此相应的概率密度分布图在某一负值出现峰值,并且均在 0 附近出现了峰值或具有一定的相对值。从以上研究可以发现,激光深熔焊和热导焊电信号概率密度分布图存在较为明显的差异,应用电信号概率密度分布图能够定性地区分焊接模式,这对于焊接过程实时质量检测具有一定的指导意义。

3.3 电信号标准差分析

为能够定量分析电信号差异反映的激光焊接不

表 2 试验工艺参数(标准差分析)

Table 2 Experimental processing parameters (analysis of standard deviation)

Number	Power /W	Welding speed / (mm/s)	Depth-to-width ratio	Standard deviation
1	1700	2	1.89	0.10
2	1700	4	1.38	0.17
3	1700	6	0.92	0.13
4	1700	8	0.37	0.26
5	1700	10	0.29	0.25
6	1600	4	0.55	0.31
7	1500	4	0.24	0.20
8	1400	4	0.22	0.25

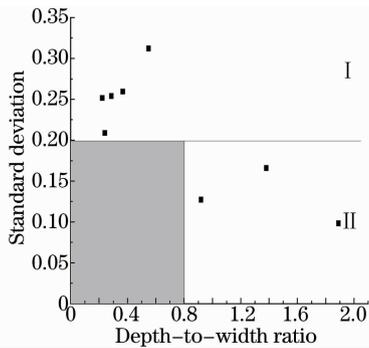


图 7 焊缝深宽比与电信号标准差关系图

Fig. 7 Corresponding relationship between depth-to-width ratio and standard deviation

从图 7 可以看出在所选焊接参数下,电信号的标准差随深宽比增大呈下降趋势,即电信号波动剧烈程度随深宽比增大而减小。当热输入较小时,焊缝截面深宽比较小,计算得到的标准差较大,探测到的电信号波动比较大且比较弱,说明等离子体产生过程是不强烈的;当热输入增大到出现深熔焊过程时,电信号标准差减小,其信号特征与前述深熔焊过程相符,说明这是一个稳定而强烈产生等离子体的过程。

通过标准差分析可以发现,焊接模式可以在图 7 中进行明显的区分。在深宽比小于 0.8、标准差小于 0.2 的区域没有点分布,并且该区域上方试样截

面的焊接模式,本文引入标准差分析方法。标准差(或方差)是衡量一组数据离散程度的指标。其值大,说明数据离散程度大;其值小,说明数据比较集中。

试验材料选用在本试验条件下深熔焊特征最明显的 304 不锈钢,所选焊接参数见表 2。焊后取焊缝横截面制备金相试样,通过测量可得到焊缝深宽比,并计算相应电信号的标准差,所得结果如表 2 所示。以每一参数下焊缝深宽比为横坐标,相应电信号的标准差为纵坐标绘制关系曲线,结果如图 7 所示。

面具有热导焊特征,右侧具有深熔焊特征,因此可将深宽比-标准差关系图分为二个区域,如图 7 所示, I、标准差大于 0.2,热导焊特征阶段; II、标准差小于 0.2,深熔焊特征阶段。借助标准差统计分析方法,可实现对 304 不锈钢激光焊接过程焊接模式的判读。

4 结 论

1) 利用激光等离子体电信号概率密度分析法,可初步实现激光焊接模式的判定:深熔焊模式时,其概率密度分布图在一定范围内波动并且在某一负值处出现较为明显的峰值;热导焊模式时,概率密度分布图在相对较大范围内波动,在某一负值出现峰值,并且均在 0 附近出现峰值或较大值。

2) 在本试验条件下通过电信号标准差分析,可实现对 304 不锈钢激光焊接过程焊接模式的定量分析,当标准差大于 0.2 时,焊接模式可判定为热导焊;当标准差小于 0.2 时,焊接模式可判定为深熔焊。

参 考 文 献

- Xu Bin. Analysis and research of laser welding technology[J]. Technology Innovation and Application, 2013, (3): 41.
徐 彬. 对激光焊接技术的分析研究[J]. 科技创新与应用, 2013, (3): 41.
- Genyu Chen, Mingjun Zhang, Zhi Zhao, *et al.*. Measurements of laser-induced plasma temperature field in deep penetration laser

- welding [J]. *Optics & Laser Technology*, 2013, (45): 551–557.
- 3 Zhang Jian, Yang Rui. Control of laser power during titanium alloy thin plate welding[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(1): 0103003.
张 健, 杨 锐. 激光焊接钛合金薄板时的功率控制[J]. *中国激光*, 2012, 39(1): 0103003.
- 4 Zhang Jian, Yang Rui. Weld penetration depth prediction of pulsed laser welding titanium alloy thin plate[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(3): 0303001.
张 建, 杨 锐. 脉冲激光焊接钛合金薄板的熔池深度预测[J]. *中国激光*, 2012, 39(3): 0303001.
- 5 Zhang Yi, Duan Linyong, Zhou Dianwu, *et al.*. Monitoring mechanism of plasma generated by laser welding galvanized steel with powder feeding [J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(5): 0503005.
张 屹, 段林勇, 周惦武, 等. 镀锌钢激光添粉焊接的等离子体监测机理[J]. *中国激光*, 2012, 39(5): 0503005.
- 6 Liu Jinglei, Chen Yanbin, Xu Qinghong. The correlation of acoustic signal and penetration laser welding[J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2006, 27(1): 72–80.
刘京雷, 陈彦宾, 徐庆鸿. 激光焊接声信号与熔深的相关性[J]. *焊接学报*, 2006, 27(1): 72–80.
- 7 Jiang Ping, Chen Wuzhu, Guo Jing, *et al.*. The FFT analyse of the acoustic signal on plasma in laser welding[J]. *Laser Journal*, 2001, 22(5): 62–63.
姜 平, 陈武柱, 国 静, 等. 激光焊接等离子体声信号的傅里叶分析[J]. *激光杂志*, 2001, 22(5): 62–63.
- 8 Wang Chunming, Hu Lunji, Hu Xiyuan, *et al.*. Plasma optical signal detection and analysis in the process of titanium alloy laser welding [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2004, 25(11): 83–90.
王春明, 胡伦骥, 胡席远, 等. 钛合金激光焊接过程种等离子体光信号的检测与分析[J]. *焊接学报*, 2004, 25(11): 83–90.
- 9 Wang Chunming, Wu Songping, Hu Lunji, *et al.*. Identification of different laser welding penetration states based on multi-sensor fusion[J]. *Chinses J Lasers*, 2007, 34(4): 538–544.
王春明, 吴松坪, 胡伦骥, 等. 基于多传感器融合的激光焊接熔透状态的识别[J]. *中国激光*, 2007, 34(4): 538–544.
- 10 Cherring B E. The use of electrostatic probes for plasma diagnostics-a review[J]. *Plasma Process*, 1982, 2(2): 113–139.
- 11 Bi Chao, Yang Lijun, Xu Wenhao. 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.
- 12 Liu Tong, Yang Lijun, Wang Lijun, *et al.*. A comparative analysis of the pas-sive electric probe detection and spectrum diagnosis of laser-induced plasma[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2014, 34(2): 289–292.
刘 桐, 杨立军, 王立君, 等. 激光等离子体无源电探针探测及光谱诊断的比较分析[J]. *光谱学与光谱分析*, 2014, 34(2): 289–292.
- 13 Y Kawahito, N Matsumoto, M Mizutani, *et al.*. Characterisation of plasma induced during high power fibre laser welding of stainless steel[J]. *Science and Technology of Welding and Joining*, 2008, 13(8): 744–748.
- 14 Jun Wang, Chunming Wang, Xuanxuan Meng, *et al.*. Study on the periodic oscillation of plasma vapor induced during high power fibre laser penetration welding[J]. *Optics & Laser Technology*, 2012, 44(1): 67–70.

栏目编辑: 史 敏