

# 激光等离子体无源电探针探测及光谱诊断的比较分析

刘桐<sup>1</sup>, 杨立军<sup>1,2\*</sup>, 王立君<sup>1,2</sup>, 王浪平<sup>3</sup>

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

3. 哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨 150001

**摘要** 提出一种利用无源电探针探测激光焊接光致等离子体的方法。采用光电同步采集系统对激光焊接光致等离子体进行研究, 利用无源电探针和光纤式光谱仪探测光致等离子体, 利用等离子鞘层理论分析电信号, 并运用相对光强法计算出光致等离子体的电子温度, 比较同步光电信号分析结果。将不涂覆表面物质以及表面分别涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub> 三种情况下的计算结果进行对比, 对影响结果准确性的因素进行分析。研究表明通过无源探针法计算等离子体温度与光谱信号计算结果基本吻合, 准确度受等离子体离子质量的影响。无源电探针法能够反映激光焊接光致等离子体内温度变化, 具有较好的实时性, 可以作为激光等离子体监测手段。

**关键词** 无源电探针; 光谱诊断; 光致等离子体; 电子温度

**中图分类号**: TG403 **文献标识码**: A **DOI**: 10.3964/j.issn.1000-0593(2014)02-0289-04

## 引言

激光等离子体是激光焊过程中重要的物理现象, 包含了温度、密度等大量有关焊接过程的物理信息, 这些信息直接或间接地反映出焊接过程的变化。Sebestova 等<sup>[1]</sup>认为等离子体温度可以反映焊接熔深的大小。肖荣诗等<sup>[2]</sup>也指出激光等离子体对激光能量的散射作用。可见, 研究激光等离子体是非常必要的。研究激光等离子体的方法有多种<sup>[3]</sup>, 其中光谱诊断法是较为成熟的方法, 为众多研究人员所采用<sup>[4-6]</sup>。

然而光谱诊断无论是宽频谱还是窄频谱都是频域检测, 而非时域检测; 即使进行连续光谱检测, 其连续检测的速度与时间精度也会受到光谱仪的扫描积分时间、检测精度, 尤其是光谱数据判读与处理时间的限制, 不利于实时监控。高精度高分辨率的光谱检测是全面认识等离子体热力学特征的基础, 也意味着仪器成本、光学装置匹配精度的高要求以及光谱谱图判读分析与数据处理时间的延长。

本工作将提出一种电探针探测方法, 以等离子体鞘层理论探测等离子体温度, 并与光谱诊断结果比较分析。使用电探针检测等离子体的方法以 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。在同时应用光、电检测手段方面, 有学者用于稳定等离子体的检测, 指出了两种信号分析结果互相对照的优越性<sup>[7]</sup>; 也有学者采用高时空分辨率的光电检测手段进行瞬态激光光致等离子体的研究<sup>[8]</sup>。本工作采用无源探针和所建立的光电同步检测系统<sup>[9]</sup>, 进行同步光电检测。利用无源电探针实时检测具有波动性的激光等离子体电信号, 依据等离子鞘层理论计算等离子体温度, 可以连续实时反映等离子体内温度的变化, 又可以为时间参照, 在此基础上研究空间光谱检测丰富的信息内容, 同步的光谱探测诊断结果也可以作为验证的依据。

## 1 实验部分

焊接光电同步采集系统如图 1 所示, 激光焊实验采用 JK2003SM 型 Nd:YAG 激光器, 激光波长 1.06 μm, 聚焦透镜焦距 300 mm。

光谱信息采集使用 AvaSpec-2048(USB1)型光纤光谱仪, 波长范围 200~800 nm, 光谱仪附有数字式 I/O 接口, 可以提供外触发功能, 此功能对实现多信号同步采集提供了方便。光谱仪外部触发采样的触发方式为 TTL 脉冲上升沿触

收稿日期: 2013-04-26, 修订日期: 2013-06-28

基金项目: 国家自然科学基金项目(51175374), 天津市应用基础及前沿技术研究计划项目(11JCYBJC06100)和哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室项目(AWPT-M12-08)资助

作者简介: 刘桐, 1987年生, 天津大学材料科学与工程学院博士研究生 e-mail: liutong@tju.edu.cn

\* 通讯联系人 e-mail: yljabc@tju.edu.cn

发, 光谱仪每接收到一次外部触发信号即采集一幅光谱图。

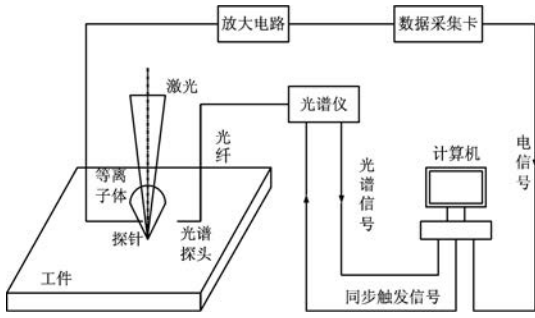


Fig. 1 Schematic representation of the experimental setup

电探针信号经过放大后输入到采集卡, 电信号采集选取 (ADVANTECH) PCI-171 型数据采集卡, 最高采样频率 250 kHz。探针选取直径为 2 mm 的钨棒, 尖端距离激光焦点 2 mm。计算机发出同步触发信号, 触发光谱仪采集光谱数据。以同步脉冲序列作为时间基准, 所采集的电信号和光谱信号被计算机存储用于结果分析。采集到的电信号经过降噪处理还原成光致等离子体的原始电信号。

焊接实验采用 3 mm 厚 Q235 钢, 保护气体选用 Ar 气, 气体流量  $30 \text{ L} \cdot \text{min}^{-1}$ , 焊接方式为表面堆焊, 激光输出模式采用连续波, 激光功率 1 700 W。为保证焊接试验数据可靠性, 采用相同的参数进行多次试验, 通过对试验结果的对比与分析, 得到可信的同步数据。

## 2 结果与讨论

### 2.1 电信号分析

采用电探针诊断等离子体的理论依据是等离子体鞘层理论。当把一个冷物体浸入到热的等离子体时, 在等离子体与物体表面接触处形成一个暗区, 即带负电的薄层区。这一区域的形成是由于等离子体中存在着大量剧烈运动的带电粒子, 当其碰撞到浸入其中的物体表面时, 不同电性的粒子会在物体表面复合成中性粒子后返回。但是, 如果浸入其中的物体是导体, 等离子体中的自由电子有可能进入到导体内部, 从而使物体表面形成负电荷。此薄层区厚度相当于 Debye 长度, 称之为等离子体鞘层。

在等离子体中, 将单位时间、单位面积上的带电粒子碰撞物体表面的粒子数称为粒子流密度<sup>[10]</sup>。一般情况下, 可以认为等离子体中带电粒子的温度相等, 质量较小的电子运动速度快, 自由电子流密度远远大于离子流密度。因此当有物体进入等离子体时, 与物体发生碰撞的电子数目远远超过离子数目, 使物体表面类聚了大量负电荷。由此产生的负电位将阻止电子继续向物体表面的运动, 这样, 电子流密度逐渐减小, 离子流密度逐渐增大。物体表面附近的负电位不断增加, 最后当正离子与电子流密度相等时, 物体表面的负电位数值将不再改变, 即形成了等离子体“鞘层”。等离子“鞘层”建立之后, 离子流密度与电子流密度相等。

根据以往的研究<sup>[9]</sup>, 物体表面的负电位可以表示为

$$E_w = -(kT/4e)\ln(m_i/m_e) \quad (1)$$

式中,  $E_w$  为电位,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为绝对温度,  $m_i$  为离子质量,  $m_e$  为电子质量。因此电信号可以用来计算等离子体内电子温度。

图 2 是在上述条件下电探针采集到的等离子体电信号。从图中可以看出, 探针采集到的电压信号均为负值, 鞘层电压最低值为  $-0.99 \text{ V}$ , 平均值约为  $-0.75$ 。电信号有明显波动。

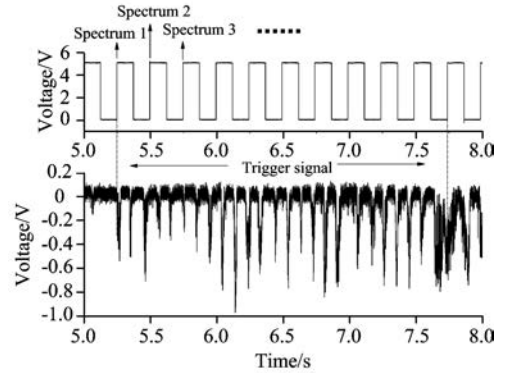


Fig. 2 Electrical signal and the mode of spectroscopic instrument working synchronously

### 2.2 电信号与光谱信号的对比分析

为验证由电探针探测电信号的计算结果, 通过同步光谱信号计算电子温度与电信号计算结果进行比较。

在光谱诊断中利用相对光强法计算等离子体温度。选取两条相同元素的不同谱线, 可得两条谱线的强度比为<sup>[11]</sup>

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{g_1 A_1 \lambda}{g_2 A_2 \lambda} \exp\left(-\frac{E_1 - E_2}{kT}\right) \quad (2)$$

其中,  $g_1$  和  $g_2$  为两能态的统计权重,  $A_1$  和  $A_2$  分别为两能态的跃迁几率,  $\lambda$  和  $\lambda$  为波长,  $E_1$  和  $E_2$  为激发电位,  $k$  为 Boltzmann 常数,  $T$  为绝对温度。

对式 (2) 两边取对数并整理可得到相对光强法计算公式

$$T = \frac{0.6247(E_1 - E_2)}{\lg(g_1 A_1 / g_2 A_2) - \lg(\lambda / \lambda) - \lg(I_1 / I_2)} \quad (3)$$

图 3 为光致等离子体在波长范围 420~435 nm 的谱线强度-波长图, 对不同波长的谱线进行了标定。选择两条 Fe I 谱线 (429.09 nm, 430.49 nm) 进行计算, 计算所采用的光谱

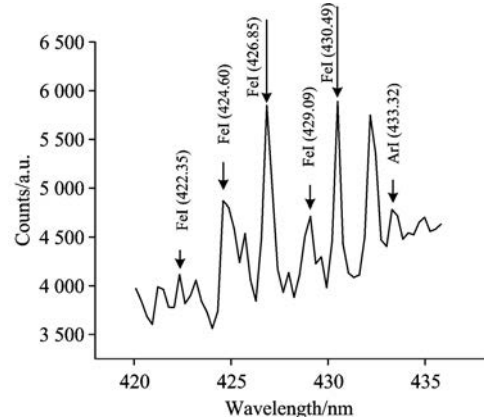


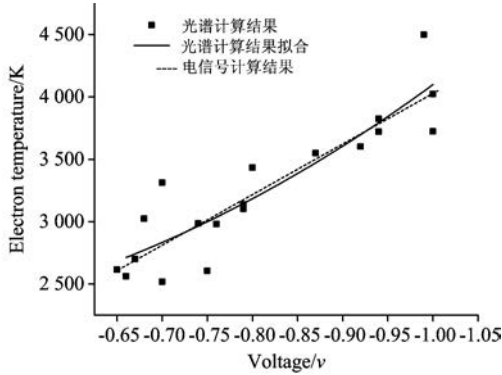
Fig. 3 Spectrum about laser welding of Q235

学参数如表 1<sup>[12]</sup>所示。

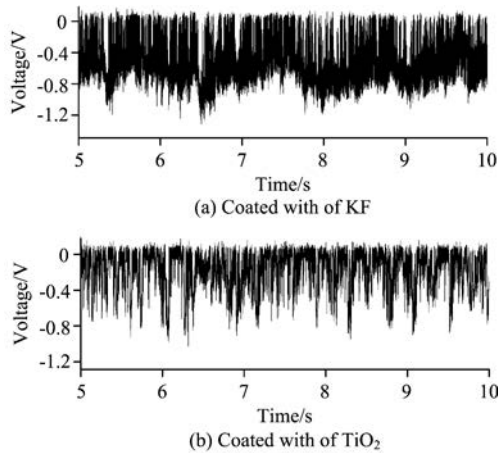
**Table 1** Relevent parameters of chosen Fe I

$\lambda/\text{nm}$	$A/s^{-1}$	$E/\text{cm}^{-1}$	$g$	Ref
429.09	383 000	46 137.10	7	NIST
430.49	306 000	47 008.37	11	NIST

将表 1 中数据与同步检测的相应光强值带入式 (3), 可求得不同时刻的电子温度。以同步脉冲序列为时间参照, 将对应时刻由光谱诊断得到的电子温度与式 (1) 计算值进行比较, 结果如图 4 所示。



**Fig. 4** Electron temperatures from the probe voltage and the corresponding spectrum

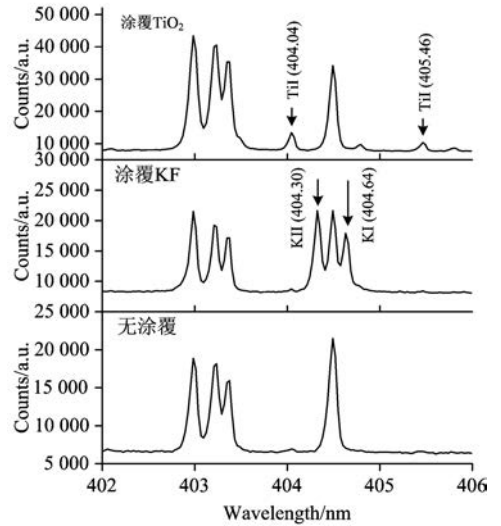


**Fig. 5** Electrical signal of coating with a layer of KF and TiO<sub>2</sub>

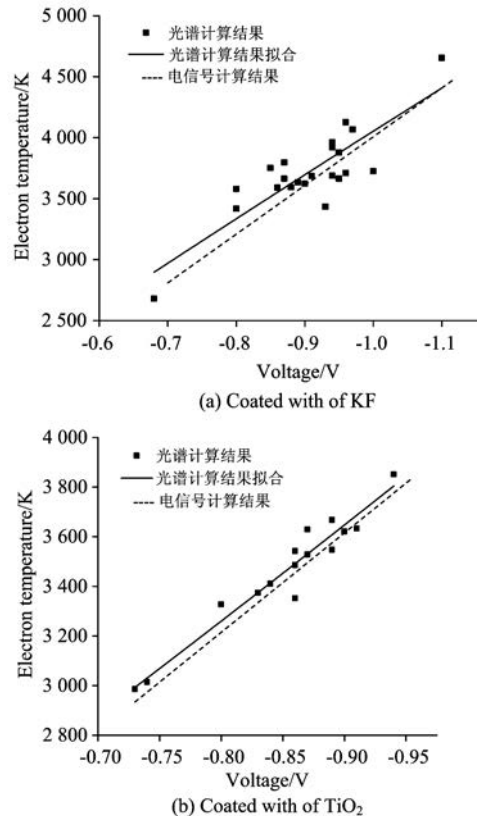
式 (1) 所反映的电子温度与电位的关系如图 4 虚线所示。由式 (1) 可知  $k, e, m_e$  均为常数, 当测量值  $E_w$  一定时电子温度  $T$  的计算结果只与离子质量  $m$  有关。Q235 激光焊等离子体测量点处正离子以 Fe 离子为主, 一方面是因为 Ar 的电离能较高, 不易电离, 另一方面电探针探测位置靠近等离子体根部, 铁蒸汽蒸发较为剧烈, 即使等离子体中存在 Ar 离子也很难进入这一区域。所以电探针所在位置等离子体正离子几乎全部为 Fe 离子, 即可以认为  $m = m_{Fe}$ ,  $m_{Fe}$  为 Fe 离子质量。将光谱计算得到的电子温度进行拟合得到图 4 所示实线, 可以看出拟合结果几乎与电信号计算结果重合, 在所测温度范围内误差不超过 1.5%, 说明上述计算方法是可行的。

为了进一步验证光电信息的相关性, 以及  $m$  对电信号计算结果的影响, 本研究借鉴了活性激光焊的方法, 在试件表面分别涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub>, 并在相同条件下进行激光焊光电同步采集实验。

图 5 为表面涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub> 之后电探针采集到的电信号。与图 2 相比表面涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub> 之后电信号均有降低 (绝对值增大), 波动频率上升, 其中涂覆 KF 一组波动频率大幅度上升。



**Fig. 6** Spectrum of coating with a layer of KF and TiO<sub>2</sub>



**Fig. 7** Electron temperatures from the probe voltage and the corresponding spectrum when coated with a layer of KF and TiO<sub>2</sub>

图 6 为涂覆表面活性剂后,与未涂覆表面活性剂光谱在 402~406 nm 之间的对比。

从图 6 中可以看出,涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub> 后,在相应的激发谱线中,分别监测到了少量 K I 谱线和 Ti I 谱线,说明探测点处混有除 Fe 离子之外的其他正离子。式(1)仍采用  $m_{Fe}$  进行计算,得到结果见图 7。

从图 7 中可以看到,表面涂覆 KF 和 TiO<sub>2</sub> 后,电子温度较之前明显提高,而且图 7(a)中,电子温度较为集中,尤其在 3 400~3 800 K 温度区间分布密集,这与图 5 电信号反映出的规律一致。但是由电信号计算得到的等离子体温度与光谱计算结果产生了一定偏差,一致性下降。其中表面涂覆 KF 后电信号计算结果在测量温度范围内最大误差约为 5.3%,涂覆 TiO<sub>2</sub> 后电信号计算结果在测量温度范围内最大误差约为 2.5%。

产生这种误差的主要原因可能是等离子体中混入的 Ti

离子和 K 离子质量均小于 Fe 离子质量,导致等离子体内离子平均质量减小,偏离了采用  $m_{Fe}$  计算的值,但由于 Fe 离子的相对数量很大,所以这种偏差仍然较小。这一点从图 7 中光谱信号计算结果的拟合曲线中也可以看出。

### 3 结 论

(1)所建立的光电同步采集系统实现了激光焊等离子体光电同步采集,通过等离子鞘层理论的无源电探针信号分析与光谱诊断结果的比较分析,说明利用无源电探针探测激光焊等离子体的方法是可行的。

(2)通过无源探针法计算等离子体温度与光谱信号计算结果基本吻合,准确度受等离子体离子质量的影响。测量点处混入少量其他离子,导致按  $m = m_{Fe}$  的电信号计算结果与光谱诊断结果产生一定偏差,但偏差不超过 5.5%。

### References

- [1] Sebestova H, Chmelickova H, Nozka L. *Journal of Materials Engineering and Performance*, 2012, 21(5): 764.
- [2] XIAO Shi-rong, CHEN Kai, CHEN Ji-min(肖诗荣,陈凯,陈继民). *Laser Technology (激光技术)*, 2001, 25(3): 238.
- [3] LOU Hong, HU Lun-ji, HUANG Shu-huai(骆红,胡伦骥,黄树槐). *Optics & Laser Technology (激光与光电子学进展)*, 1997, 373: 1.
- [4] Liu Liming, Huang Ruisheng, Song Gang. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2008, 36(4): 1937.
- [5] Sibillano T, Rizzi D, Ancona A. *Journal of Materials Processing Technology*, 2012, 1(212): 910.
- [6] Konuk A R, Aarts R G K M, Huis A J in't Veld. *Physics Procedia*, 2011, (12): 744.
- [7] Ling Y M. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2006, 39(15): 3305.
- [8] Ursu C, Gurlui S, Focsa C. *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B*, 2009, (267): 446.
- [9] Bi Chao, Yang Lijun, Xu Wenhao. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, (45): 385202.
- [10] Bittencourt J A. *Fundamentals of Plasma Physics*. New York: Pergamon Press, 1986.
- [11] Mirapeix J, Cobo A, Conde O M. *NDT & E International*, 2006, (39): 356.
- [12] NIST Atomic Spectra Database. <http://physics.nist.gov/PhysRefData/ASD/index.Html>.

## A Comparative Analysis of the Passive Electric Probe Detection and Spectrum Diagnosis of Laser-Induced Plasma

LIU Tong<sup>1</sup>, YANG Li-jun<sup>1,2\*</sup>, WANG Li-jun<sup>1,2</sup>, WANG Lang-ping<sup>3</sup>

1. School of Materials Science and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China

2. Tianjin Key Laboratory of Advanced Joining Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China

3. State Key Laboratory of Advanced Welding and Joining, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China

**Abstract** An approach to detecting laser-induced plasma using passive probe was brought up. The plasma of laser welding was studied by using a synchronous electric and spectral information acquisition system, the laser-induced plasma was detected by a passive electric probe and fiber spectrometer, the electrical signal was analyzed on the basis of the theory of plasma sheath, and the temperature of laser-induced plasma was calculated by using the method of relative spectral intensity. The analysis results from electrical signal and spectral one were compared. Calculation results of three kinds of surface circumstances, which were respectively coated by KF, TiO<sub>2</sub> and without coating, were compared. The factors affecting the detection accuracy were studied. The results indicated that the results calculated by passive probe matched that by spectral signal basically, and the accuracy was affected by ions mass of the plasma. The designed passive electric probe can be used to reflect the continuous fluctuation of electron temperature of the generated plasma, and monitor the laser-induced plasma.

**Keywords** Passive probe; Spectrum diagnosis; Laser-induced plasma; Electron temperature

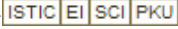
\* Corresponding author

(Received Apr. 26, 2013; accepted Jun. 28, 2013)

# 激光等离子体无源电探针探测及光谱诊断的比较分析

作者: [刘桐](#), [杨立军](#), [王立君](#), [王浪平](#), [LIU Tong](#), [YANG Li-jun](#), [WANG Li-jun](#), [WANG Lang-ping](#)

作者单位: [刘桐, LIU Tong \(天津大学材料科学与工程学院, 天津, 300072\)](#), [杨立军, 王立君, YANG Li-jun, WANG Li-jun \(天津大学材料科学与工程学院, 天津 300072; 天津大学天津市现代连接技术重点实验室, 天津 300072\)](#), [王浪平, WANG Lang-ping \(哈尔滨工业大学先进焊接与连接国家重点实验室, 黑龙江 哈尔滨, 150001\)](#)

刊名: [光谱学与光谱分析](#) 

英文刊名: [Spectroscopy and Spectral Analysis](#)

年, 卷(期): 2014(2)

## 参考文献(12条)

1. [Sebestova H;Chmelickova H;Nozka L 查看详情](#) 2012(5)
2. [肖诗荣;陈凯;陈继民 查看详情](#) 2001(3)
3. [骆红;胡伦骥;黄树槐 查看详情](#) 1997
4. [Liu Liming;Huang Ruisheng;Song Gang 查看详情](#) 2008(4)
5. [Sibillano T;Rizzi D;Ancona A 查看详情](#) 2012(212)
6. [Konuk A R;Aarts R G K M;Huis A J in' t Veld 查看详情](#) 2011(12)
7. [Ling Y M 查看详情](#) 2006(15)
8. [Ursu C;Gurlui S;Focsa C 查看详情](#) 2009(267)
9. [Bi Chao;Yang Lijun;Xu Wenhao 查看详情](#) 2012(45)
10. [Bittencourt J A Fundamentals of Plasma Physics](#) 1986
11. [Mirapeix J;Cobo A;Conde O M 查看详情](#) 2006(39)
12. [NIST Atomic Spectra Database](#)

本文链接: [http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical\\_gpxygpfx201402001.aspx](http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_gpxygpfx201402001.aspx)