

高功率激光焊接光致等离子体的检测

唐霞辉 朱海红 朱国富 李家容

(华中理工大学激光加工国家工程研究中心, 武汉, 430074)

摘要: 系统地归纳了高功率激光焊接过程中光致等离子体的声、光、电、热等四种特征信号, 综述了国外在等离子体信号检测方面的试验方法及研究进展, 分析了未来的发展趋势。

关键词: 激光焊接 等离子体 信号检测 国外动态

Detection of laser-induced plasma for high-power laser beam welding

Tang Xiahui, Zhu Haihong, Zhu Guofu, Li Jiarong

(National Engineering Research Center for Laser Processing, HUST)

Abstract: The paper systematically summarizes the four kinds of characteristic signals as acoustics, light, electricity, heat etc., for laser-induced plasma in high-power laser beam welding, also summarizes the overseas experimental methods and research status on detection of plasma signals, at last, analyses the future development in this respect.

Key words: laser welding plasma signal detection overseas status

一、引言

在激光深穿透焊接过程中, 金属材料在高功率密度激光辐照下不仅产生熔化, 而且产生强烈汽化而形成蒸气, 处于激光辐照区内金属蒸气中有一定的起始自由电子, 通过反韧致辐射吸收激光能量而被加速, 直至有足够的能量来碰撞电离材料和周围气体, 电子密度从而雪崩式地增长, 形成等离子体。

参 考 文 献

- 1 Veldkamp W B. Proc SPIE, 1991; 1544: 287~ 299
- 2 Salin A. Optical/ Laser Microlithography ③. SPIE, 1989; 1088: 527
- 3 Swanson G J, Veldkamp W B. Opt Engng, 1989; 28(6): 105
- 4 Leger J R, Mohar M G, Gaybrd T K. Appl Opt, 1995; 34(14): 2399
- 5 周 进, 高文琦, 韩良凯 *et al.* 光学学报, 1995; 15(12): 1726
- 6 Hecht E, Jzac A. Optics. London: Addison-Wsley Publishing Company, 1974: 369

* * *
作者简介: 谈苏庆(附照片), 女, 1955年11月出生。讲师。现从事物理教学及科研工作。
周 进, 男, 1959年5月出生。副教授。现从事教学及二元光学方面的研究。
高文琦, 女, 1934年3月出生。教授。现从事教学及计算全息等方面的研究。

收稿日期: 1996-02-12



等离子体总的特征信号可以归结为声音冲击波、强烈蓝光辐射、高温强热、非平衡电场等四种形式。各种特征信号在时间上、频率上和幅值上均密切相关,而等离子体振荡贯穿于所有特征信号之中。等离子体检测实际上是对特征信号的检测,它是分析和了解等离子体产生机理及其控制过程的主要前提和基础。

我国在薄板激光焊接的声光检测方面已做了一定的试验研究工作,且正在深入。国外从 80 年代初期开始,在光致等离子体信号检测及定量分析方面已作过大量的研究工作。本文在对等离子体特征信号进行分析归纳的基础上,系统地介绍了国外在这方面的试验方法及研究进展,分析了未来的发展方向。对于促进我国高功率激光焊接技术的发展具有较大的理论意义和实用价值。

二、等离子体声音信号检测

激光与材料相互作用时,当激光功率密度超过一定阈值后,材料表面即开始产生稳定而稀薄的等离子体,称之为激光维持的燃烧波,其直观的特征信号为浅蓝光及高频滋滋声。当激光功率密度继续增加到某程度时,等离子体发出强烈蓝光和声音冲击波,称之为激光维持的爆发波。其检测方法是采用各种声音传感器。

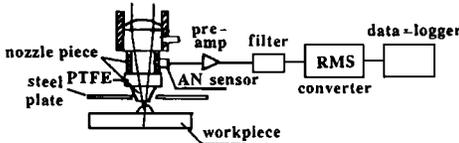


Fig. 1 Process arrangement for the acoustic nozzle(AN)

防止热传导,但可以传递声音。喷咀上装有一保护罩以防止非等离子体反射波,压电探头输出的信号直接与等离子体的冲击波有关。

Lewis G. K. 等采用声光检测等离子体信号^[2],如图 2 所示,采用频响范围为 200Hz~ 20kHz 的高灵敏度和强指向性的话筒,距离焦点 12.5mm,用于检测等离子体声音冲击波信号。图中的光电倍增器用于检测等离子体蓝光。激光器尾部探测器用于检测激光脉冲波形。三路信号经整形后,采用四通道数字存储示波器观察和记录波形。

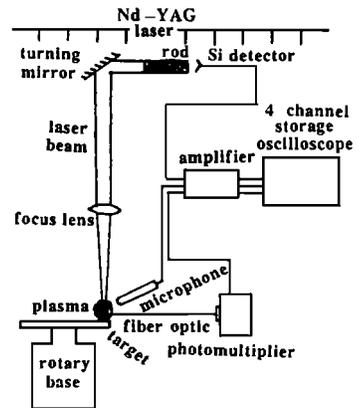


Fig. 2 Laser plasma diagnostics experimental set up

检测结果表明,等离子体声音信号为连续振荡波,其波谷及上升沿表明等离子体再生波起始点及增强过程;波峰和相应的下降部分表明等离子体的衰减过程。幅频特性曲线表明,等离子体声音信号在 1kHz 左右的频段内具有最大幅值。

三、等离子体光信号检测

光致等离子体由高温的中性原子、离子和致密电子所组成,它产生的辐射形式有热电子辐射、反韧致辐射和光电子辐射。其中前两者产生连续光谱,后者产生线光谱,主要分布在可见蓝光范围内,通过测量光谱强度和频谱分布来检测等离子体状态。

在图2的声光检测装置中,采用光纤将等离子体光信号耦合到光电倍增器。其中,光纤的导光头距激光焦点12.5mm,并与水平面成30°夹角,它对4000~5000Å左右的光谱最敏感,而对激光波长不敏感。

文献[3]采用光电二极管检测连续激光焊接等离子体在控制和未控制情况下的动态行为。将两个光电二极管分别置于等离子体的上方和水平侧面,并用高速摄影机记录连续激光焊接过程中等离子体、小孔、熔池之间的作用关系。

检测结果表明,脉冲激光焊接时,等离子体声光信号在多峰值出现的时间上具有一致性,特别是在等离子体出现的起始点。但光信号相对声音信号具有滞后效应。光电信号波形每个转折点和倾斜变化曲线代表等离子体的着火和形成^[4]。连续激光焊接过程中,等离子体未加控制时,波形起伏小、较平滑,且平均幅值较大;等离子体控制最佳时,除了起焊点瞬间外,光强幅值减小。并且上方信号起伏较小,而侧面信号起伏较大。这是由于等离子体未加控制时,主要出现于焊缝表面,且比较稳定而强烈。控制最佳时,等离子体较稀薄且主要集中于小孔内,故出现上述波形^[3]。根据波形可以判断等离子体的控制效果和焊缝穿透情况和焊接质量。

四、等离子体温度测量

激光焊接时,等离子体对激光的吸收和屏蔽作用与等离子体温度和电子密度有关。而等离子体体积小、温度极高,一般方法无法直接测量,目前主要采用光谱分析法来间接测量。

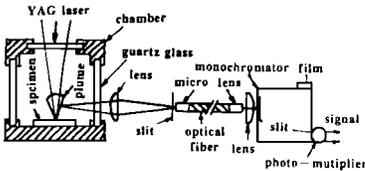


Fig. 3 Design for measuring plasma temperature

图3为国外采用的一种典型的测温装置示意图,测得的光谱强度波形表明,不同激光功率密度下,等离子体谱线强度有着本质不同。低功率密度下,原子谱线强度幅值较小且较平坦,辐射光连续较长时间,然后衰减到某一值;高功率密度下,金属蒸发后,谱线强度急剧增加到最大,然后,即使金属蒸气仍然存在,但谱线强度迅速衰减。

在测得不同波长的谱线相对强度之后,等离子体温度由下式决定:

$$\ln[I_{nm}\lambda_{nm}/(g_n A_{nm})] = -E_n/(kT) + \ln(N_o hc/Z(T)) \quad (1)$$

式中, N_o 为原子密度, E_n 为 n 能级的激发能, λ_{nm} 为 n 能级跃迁至 m 能级的辐射光波长, I_{nm} 为谱线强度, A_{nm} 为 $n \rightarrow m$ 能级的跃迁几率, g_n 为 n 能级粒子的统计质量, $Z(T)$ 为温度 T 时的原子部分函数, k 为玻尔兹曼常数, h 为普朗克常数, c 为光速。采用最小回归分析法,将试验测得的有关数据代入函数关系 $\ln[I_{nm}\lambda_{nm}/(g_n A_{nm})] \sim E_n$ 所得的曲线称为玻尔兹曼曲线,从曲线的斜率即可求得等离子体温度。

Kosuge 等人利用 CO₂ 激光辐照 Fe 表面,通过光谱分析,等离子体温度高达 $(1.8 \sim 2.2) \times 10^4$ K。Peeble 等人采用 YAG 激光冲击 Al 表面的等离子体温度为 3.4×10^3 K。Heriger 等报道了 Fe 表面光致等离子体的能量为 1eV 时,相当于平衡状态下等离子体温度为 1.3×10^4 K^[5]。

五、等离子体电信号检测

等离子体是由于金属蒸气电离而形成,包含中性原子、离子和电子,具有复杂的电特性。

本文就其电子密度计算、动态电特性、静态电特性分别讨论。

1. 电子密度测量

在测定等离子体温度之后,进一步通过光谱分析来确定电子密度。等离子体原子光谱强度 I_a 和离子光谱强度 I_i 分别表示为:

$$I_a = N_a (g_a/z_a) A_{ah} \nu_a \exp - E_a/(kT)$$

$$I_i = N_i (g_i/z_i) A_{ih} \nu_i \exp - E_i/(kT)$$

式中, ν 为谱线频率 ($\nu = c/\lambda$), 将上述方程和 Saha 方程^[6] 组合, 可得电子密度为:

$$N_e = I_a g_i A_i \nu / (I_i g_a A_a \nu_a) \times 2(2\pi m_e kT)^{1/2} / h^3 \exp[(E_a - E_i - V)/(kT)]$$

式中, 符号和(1)式相同, 只是下标 a 表示原子, i 表示离子。

日本大坂大学焊接研究所的 Akira Matsunwa 等采用峰值功率密度 $1.2 \times 10^9 \text{ W/cm}^2$ 、脉宽 3ms 的 YAG 激光辐照纯 Ti 表面, 利用上述方法计算出等离子体电子密度为 $5.9 \times 10^{23} \text{ 个/m}^3$ 。

2. 动态电信号检测

等离子体中运动粒子的速度 $v_p = (2kT_p)/m$, 式中, k 为玻尔兹曼常数, T_p 为等离子体温度, m 为粒子质量, 由于电子质量比离子小得多, 从而, 电子运动速度大, 平均自由程比离子大得多, 导致空间电子向等离子体表面层运动, 使等离子体出现局部非平衡电荷而产生电场, 电子由于热运动和电场的相互作用而产生振荡。

原则上只要能拾取高频电信号的装置就可以检测等离子体的动态电信号, 而文献[2]介绍的“等离子体电荷传感器(PCS)”最为可靠而实用, 尤其适合于在线检测和控制。它是与镜座绝缘的金属喷咀为一极, 工件接地为另一极来检测等离子体空间电荷, 而喷咀不必与等离子体直接接触。其原始信号为负极性, 经反相放大、整形后, 可以用示波器清晰地观察到波形。其信号灵敏度随电极间距离增大而有所下降, 有效的最大喷咀距离可达 10mm, 并与喷咀形状、温度、焊接方向和速度几乎无关。在喷咀上施加偏置电压并连接成三极管偏置电路的形式, 有利于提高信号灵敏度。

文献[1]及本文作者试验结果表明, 等离子体电信号波形与光信号波形几乎相似, 其振荡频率根据激光功率密度和金属材料不同约在数百千赫兹范围内。

3. 静态特性曲线的测量

等离子体具有独特的电特性, 在外加电压作用下, 可以测得其电流-电压静态特性曲线, 文献[5]将等离子体近似理想地分为三个区: 靠近工件(等离子体底部)为阳极包围区, 主要带负电性; 中间为核心区, 占等离子体的绝大部分; 最外层为阴极包围区, 主要富集电子和正离子。三个区域的长度和电流密度各不相同, 其电压降分别为 V_a, V_p, V_c , 总电压降 $V = V_a + V_p + V_c$ 。

文献[5]采用电子探针法, 如图 4 所示, 采用金属材料 Mo 作成圆柱形、内钻 $\phi 1\text{mm}$ 小孔作为一个电极, 内孔正好让激光束通过并将等离子体包围起来, 工件作为另一个电极, 两电极之间为绝缘层, 内孔喷有刚玉以耐高温, 其余部分镀有一层绝缘膜以防杂散干扰信号。外加电压为 + 15V ~ - 25V 连续可调, 电流取样电阻

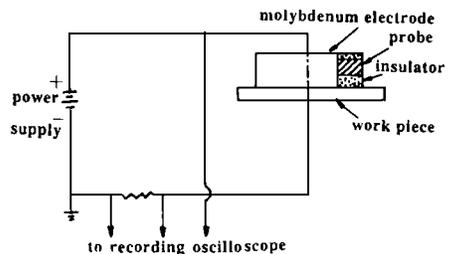


Fig.4 Circuit diagram for probe circuit measurements

外加电压为 + 15V ~ - 25V 连续可调, 电流取样电阻

在负电压时为 $1k\ \Omega$, 正电压时为 $1M\ \Omega$ 。采用双踪示波器观察电流、电压波形及其幅值。

采用脉宽为 $1ms$, 频率为 $10Hz$ 的 Nd: YAG 激光照射 Al 材料表面, 通过上述测量装置测得电流-电压曲线如图 5 所示。可见, 正电压时, 电流电压几乎成正比例关系; 负电压时, 随着外加电压的增加, 电流-电压曲线存在饱和现象, 大部分外加电压降在等离子体阳极区很薄的带电层上。在零电流处的电流-电压曲线的斜率与电子温度有关。

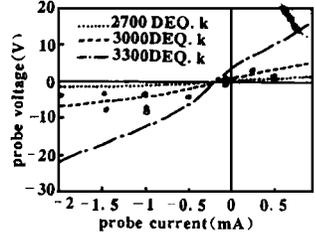


Fig. 5 Probe current/voltage characteristics for aluminum 1100. Circles are measured data

六、光致等离子体信号检测技术展望

光致等离子体信号检测是关系到探索等离子体机理、实现等离子体控制、保证焊缝质量、实现焊接工艺理想化和焊接过程自动化的根本前提。今后的发展趋势是朝着更加实用化、量化、高精度和可重复的方向发展。根据国外大量文献表明, 以下为今后发展的主要内容:

- (1) 研究内容由相对简单的声光信号检测发展到对等离子体的温度场分布、电场分布、温度及电子密度的定量计算等方面的研究。
- (2) 在上述基础上, 将重点研究等离子体对入射激光能量损失(主要包括等离子体对激光的反韧致辐射吸收和 Rayleigh 散射)的动态过程及相关精确计算。
- (3) 所研究的等离子体模型将由理想试验模型向实际条件、复杂因素影响下的等离子体检测方向发展, 以实现实用化。
- (4) 切实可靠、经久耐用的等离子体在线检测与诊断系统将在实际生产中得到推广应用, 如等离子体光电检测系统与计算机控制相结合可以实现焊接过程及焊接质量的最佳控制。

参 考 文 献

- 1 Lewis G K, Dixon R D. *Welding Journal*, 1985; (2): 49~ 54
- 2 Steen W M, LI L, Brookfield D J *et al.* Some novel in-process sensors for laser material processing. *Proceedings of the conference on the laser and the electron beam in welding, cutting and surface treatment*. New Jersey, U S A, 1991. Published by Bakish Materials Corporation, New Jersey, USA, 1991: 25~ 37
- 3 M igamoto I, Maruo H, Arata Y. The role of assist gas in CO₂ laser welding. *International congress on applications of laser & electro-optics '83*. *Proceedings of the materials processing symposium*, Boston, U S A, 1983. Published by laser institute of America, Boston, U S A, 1984; 44: 68~ 75
- 4 Dixon R D, Lewis G K. *Welding Journal*, 1985; (3): 71~ 75.
- 5 Russo A J, Akau R L, Keicher D M. *Welding Journal*, 1989; (6): 230~ 235
- 6 [美] G 贝克来等著, 庄国良, 褚成译. *激光等离子体原理*. 上海: 上海科学技术出版社, 1981; 339~ 340

* * *

作者简介: 唐霞辉, 男, 1963年11月出生。硕士, 讲师。目前主要从事高功率 CO₂ 激光焊接工艺、光致等离子体机理、检测、控制等方面的研究工作。

收稿日期: 1995-07-21 收到修改稿日期: 1995-11-23

