

YAG 脉冲激光焊接的光致等离子体 机理研究

唐霞辉 朱海红 朱国富 李适民 李再光
(华中理工大学激光加工国家工程研究中心 武汉 430074)

提要 针对 YAG 脉冲激光焊接 Al 及 45# 钢时产生的光致等离子体, 采用空心圆电极探测等离子体电信号; 建立探测器内等离子体区域分析的理论模型, 并用试验加以验证。研究表明, 在负电压段, 等离子体电信号的电流随电压增加呈现饱和趋势; 理论与试验曲线比较证明, 等离子体温度高于被焊材料气化温度约 300 K。

关键词 YAG 脉冲激光焊接, 光致等离子体, 空心圆电极探测, 伏安特性曲线, 等离子体温度

1 引言

高功率激光焊接过程中, 金属表面强烈气化成金属蒸气, 并由于瞬时电子雪崩而产生强烈等离子体。为了弄清等离子体的形成机理, 必须对等离子体的温度、压力、电子密度等特征参数进行测量。在 YAG 脉冲激光焊接时, 等离子体出现的时间短(一般为 ms 级), 温度高, 其特征信号的测量非常困难, 用一般测量方法无法准确采集等离子体信号。本文采用空心圆电极包含等离子体的方法, 并建立相应的理论模型, 成功地对脉冲 YAG 激光焊接等离子体的电场分布、电流密度、动态电信号及直流 $I-V$ 特性曲线、等离子体温度等进行了研究。

2 理论模型

2.1 探测电极结构

整个探测系统由与等离子体羽接触的探测电极及工件两部分组成, 如图 1 所示。厚度为 1.5 mm, 上下两面镀有厚度为 0.2 mm 耐热绝缘层的钼(Mo)板作为一极, 工件作为另一极, 两极之间加直流电压以拾取等离子体电信号; Mo 板垂直方向钻有 $\phi 1.5$ mm 的直孔, 以便让激光通过, 并收集等离子体信号; 金属蒸气在产生的瞬间向上运动, 将孔洞内的空气排除, 避免空气电离的影响; 焊点高度在 Mo 电极下面的绝缘层高度范围内, 对等离子体的电特性不造成影响。采用这种电极结构的最大优点是排除外界干扰, 使许多边界条件简化, 理论分析中的许多方程的数值解及拉普拉斯方程之解变得容易。

2.2 等离子体区域理论分析及试验依据

如图 1 所示, 根据内部电特性的差异, 工件表面等离子体在探测器孔洞内可分成三个包围

区: 阳极区带负电性; 柱流区占大部分空间, 等离子体为同质、绝热、直向上运动; 阴极区富集电子和正离子。进入包围区的所有粒子不存在势阱而直接向电极两端运动。三个区间在外电场作用下分别形成三个电压降 V_a, V_p, V_c 。因外加电压小于 5 V, 故可不计外电场引起的场致电子密度^[1], 并在所采用的激光功率密度焊接时, 不产生明显的金属溅射, 故不计金属溅射对等离子体的影响; 此外, 下面的分析基于工件表面接外电源正极(阳极), 并设为零电位, 探测电极上表面接外电源负极(阴极)。

2.2.1 阳极区

阳极区电流密度 j_a 与阳极层的电压降 V_a 有关

$$j_a = -en(KT_i/2\pi m_i)^{1/2} + en(KT_e/2\pi m_e)^{1/2} \exp(eV_a/KT_e) \tag{1}$$

式中, e 为电子电荷绝对值, n 为带电粒子数密度, T 为温度, m 为质量, 下标 i, e 分别代表离子和电子。式中第一项代表自然离子扩散到阳极的电流, 称之为离子饱和电流密度 j_{is} ; 第二项为电子向阳极扩散电流, 从方程(1)中可以求得等离子体阳极区上边缘相对于工件表面的电势为

$$-V_a = (KT_e/e) \ln(T_e m_i / T_i m_e)^{1/2} - (KT_e/e) \ln(j_a / j_{is} + 1) \tag{2}$$

因为是逆电场故为负值。

2.2.2 柱流区

柱流区的等离子体可以假定电子和粒子温度几乎相等。此区域内等离子体电导率^[2] $\sigma = ne^2(1/m_e \nu_e + 1/m_i \nu_i)$, 式中 ν 为碰撞频率。采用中性气体中带电粒子扩散系数关系式: $D = KT/m\nu$, 及 $\beta = D_i/D_e = (m_e/m_i)^{1/2}$ 。用离子的扩散系数表示电导率

$$\sigma = (ne^2 D_i / KT) (1/\beta + 1) \tag{3}$$

对于恒定的电导率, (3) 式的拉普拉斯方程之解将得出柱流区的势场分布, 根据势场的梯度即可求得电流密度, 电极上电流密度的积分可得探测电流。(2) 式之解即可求得(3) 式拉普拉斯方程解的边界条件。

2.2.3 阴极区

阴极区自然离子扩散电流密度与阳极层类似, 即如(1) 式右边第一项所示, 具有离子饱和电流密度的特性。对于大气压下 Al 焊接, 蒸气区温度约为 3000 K, 带电粒子数密度 $n = 1.8 \times 10^{20}/m^3$ ^[3], 一个 Al 离子质量 $m_i = 4.5 \times 10^{-26}$ kg, 根据(1) 式类推, 离子饱和电流密度 $j_{is} = 1.1 \times 10^4$ A/m², 电子饱和电流密度 $j_{es} = (m_i/m_e)^{1/2} \times j_{is} = 222j_{is} = 2.45 \times 10^6$ A/m²。

如上所述, 设温度为 3000 K, 大气条件下电子平均自由程为 5.6×10^{-6} m, 与 Al 蒸气中为一个数量级^[3], 其 Debye 长度为 $69(T/n)^{1/2} = 2.8 \times 10^{-7}$ m, 电子平均自由程大于 Debye 长度, 空间电荷电流密度^[4]: $j_{sd} = 2.33 \times 10^{-6} \times V_c^{3/2}/d^2$, d 为总的阴极层厚度, 约为 30~ 50 Debye 长度, 设 $d = 50$ Debye 长度, 则 $j_{sd} = 1.2 \times 10^4 V_c^{3/2}$ 。总的阴极层电流密度为 $j_c = j_{is} - j_{es} \exp(-eV_c/KT_e) + j_{sd}$, 换算成 V_c 表达式, 并考虑等离子体悬浮电势^[5] $V_F = (KT_e/e) \ln(T_e m_i / T_i m_e)^{1/2} = (KT_e/e) \ln(222)$, 则有

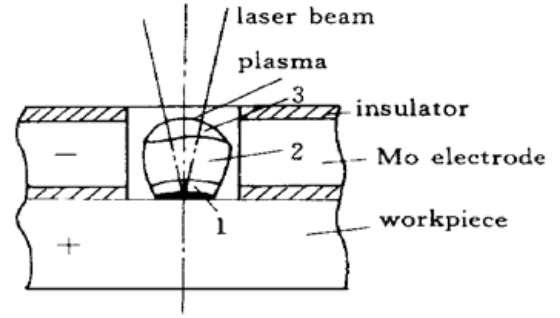


图 1 圆电极内的等离子体区域
1: 阳极区; 2: 柱流区; 3: 阴极区
Fig. 1 A sketch of plasma region in cylindrical electrode
1: anode region; 2: core flow region; 3: cathode region

$$V_c = V_F - (KT/e) \ln(1 - j_c/j_{is} + j_{sd}/j_{is}) = (KT/e) [\ln(222) - \ln(1 - j_c/j_{is} + j_{sd}/j_{is})] \quad (4)$$

2.3 等离子体区域理论分析结果

综合上述对等离子体三个区域的电流密度及电势的计算表达式, 以及如下边界条件: (1) 区域之外无等离子体电流, 在上边界有 $\partial V/\partial z = 0$ (z 为高度方向); (2) 电场分布在圆电极内以轴对称 $\partial V/\partial r = 0$ (r 为半径方向)。从而可以求柱流区拉普拉斯方程之解; 在外加电压为 1 V 时, 先设 Al 金属蒸气等离子体温度为 3000 K (试验将会加以验证), 将有关数据代入等离子体各区域有关表达式, 计算得探测器半圆内高度方向的等势线分布如图 2 所示; 在此势场下计算的电流密度分布曲线如图 3 所示, 可以看出, 探测器底部的焊点表面电流密度最大, 在等离子体柱流区, 电流密度基本均匀分布; 在后面的比较试验中将可以看到不同温度下得出的 $I-V$ 理论曲线。

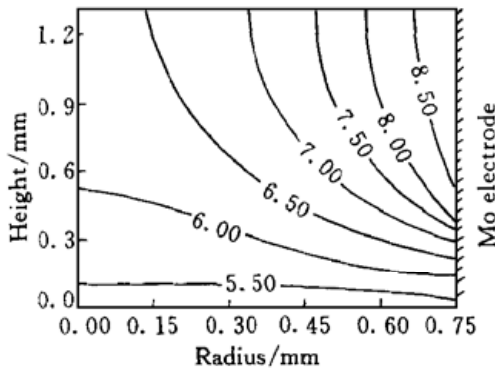


图 2 圆电极半圆内理论计算的等势线

Fig. 2 Theoretically calculated equipotential lines in half-cylinder

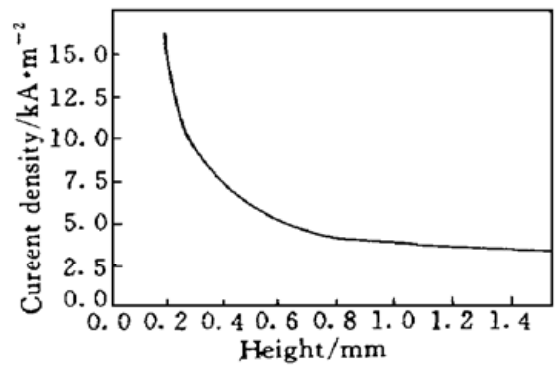


图 3 圆电极高度方向的电流密度分布

Fig. 3 Distribution of current density along axial direction in cylindrical electrode

3 试验条件

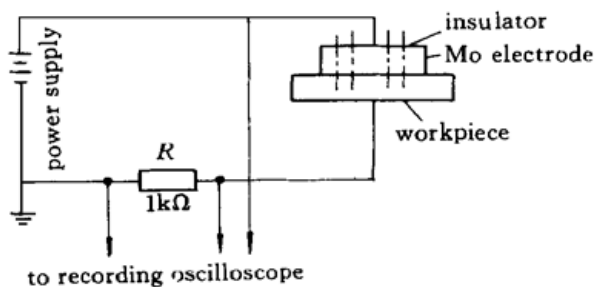


图 4 试验装置示意图

Fig. 4 Experimental setup

用空心圆电极包含等离子体, 以获得准确的电信号, 整个检测系统及电路如图 4 所示, 探测电极整体为一厚 1.5 mm, 长 70 mm, 宽 20 mm 的耐热 Mo 板, 上下两面镀 0.2 mm 的耐热绝缘层, Mo 板上钻若干直径为 1.5 mm 的小孔, 焊点直径约为 1.2 mm, 不破坏绝缘层, 每次试验点占一个小孔; 串接电阻 R 便于测量回路电流波形及幅值, 电极两端电压 $V_E = V_P - V_R = V_P - I_E R$, 电源电压 $V_P = +5\text{ V} \sim -5\text{ V}$, 负电压表示工件

接正极; 用 40 MHz 双踪示波器同时观察激光波形及电极上的电流波形。

用 Nd:YAG 脉冲激光器, 脉宽为 10 ms, 单脉冲能量为 20 J, 透镜焦距 $f = 100\text{ mm}$, 每次试验点为单脉冲。焊接材料为 Al 和 45# 钢, 表面进行均匀抛光, 探测电极和试样位于 $x-y$ 数控工作台上, 使激光束容易对准探测孔的中心。

4 试验结果及分析

图 5 为示波器观察到的典型等离子体电流波形,它与激光脉冲波形相似,并随金属蒸气的形成和消失而变化,脉冲波形的振荡过程体现等离子体的电离、振荡及温度变化^[5],脉冲后半部振荡尖峰的中心水平线代表此点的电流幅值。设温度分别为 2700 K, 3000 K, 3300 K, 通过理论分析所得蒸气等离子体的电流 (I) - 电压 (V) 特性曲线及试验曲线如图 6 所示,与试验曲线比较,可见两者在 3000 K 附近具有一致性,并且所有的试验结果均落在 2700~ 3300 K 之间,而纯 Al 在大气压下的气化温度为 2700K^[6],故试验结果说明等离子体温度高于材料气化温度约 300 K。同样,设温度分别为 3200 K, 3500 K, 3700 K, 理论分析得 45# 钢的 I - V 特性曲线及试验曲线如图 7 所示,试验曲线与 3500 K 曲线较相符,而 45# 钢在大气压下的气化温度为 3200 K^[6],故再一次证明,等离子体温度高于材料的气化温度。另一个理论分析与试验一致的结果是,等离子体的 I - V 特性曲线在负电压区电流随电压增加而呈现一种饱和趋势。此外,在曲线第二象限电流过零而电压滞后过零,可以推测为,由于等离子体的强烈电离而存在悬浮电势,相对工件为正电场^[7]。

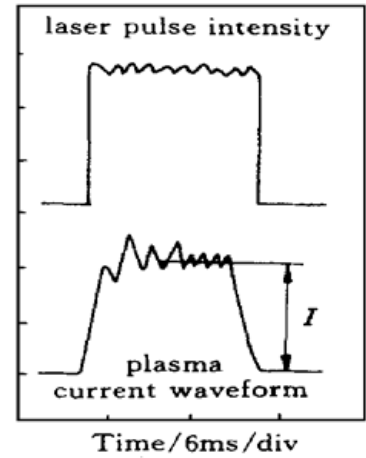


图 5 光致等离子体电流波形

Fig. 5 An oscillogram of plasma current

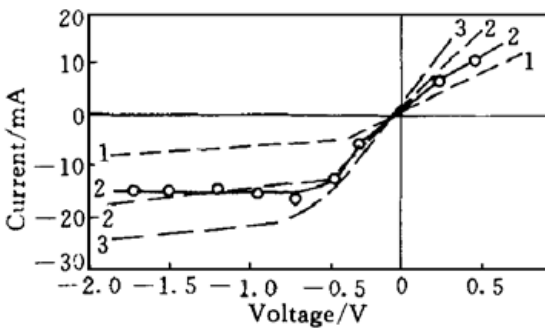


图 6 Al 等离子体电流-电压特性曲线

Fig. 6 Current-voltage characteristic curves for Al plasma

1: 2700 K; 2: 3000 K; 2': experimental curve; 3: 3300 K

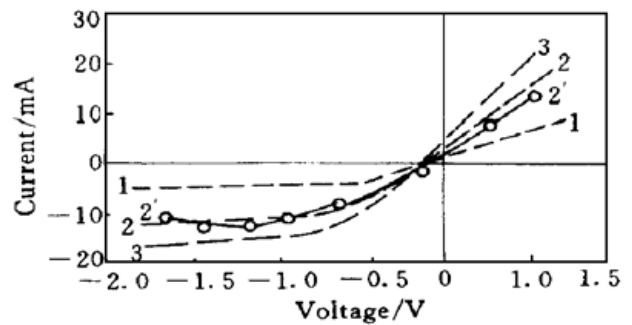


图 7 45# 钢等离子体电流-电压特性曲线

Fig. 7 Current-voltage characteristic curves for 45# steel plasma

1: 3200 K; 2: 3500 K; 2': experimental curve; 3: 3700 K

参 考 文 献

- 1 R. S. Arnot, C. E. Albright. Plasma plume effects in pulsed carbon dioxide laser soft welding. *L. I. A.*, 1983, **38**: ICALEO, 51~ 58
- 2 Y. Arata, N. Abe, T. Oda. Fundamental Phenomena in high power CO₂ laser welding (report 7) — atmospheric laser welding. *Transaction of JWRI*, 1985, **14**(1): 2~ 8
- 3 W. Sokolowski, G. Herziger, E. Beyer. Spectroscopic study of laser-induced plasma in the welding process of steel and aluminium. *SPIE*, 1989, **1132**: 288~ 295
- 4 T. Ishide, S. Shono, T. Ohmae *et al.*. Fundamental study of laser plasma reduction method in high power CO₂ laser welding. *International Congress on Lasers & Electro-Optics '87, Proceedings of the Material Processing Symposium*. Boston, USA, 1987. Published by Laser Institute of America, 1987. 187~ 191

- 5 S. Marcus, J. E. Lowder, D. L. Mooney. Large-spot thermal coupling of CO₂ laser radiation to metallic surfaces. *J. Appl. Phys.*, 1976, **47**(7): 2966~ 2968
- 6 Song Weisi. Metallurgy. Metallurgical Industry Press, 1990. 150~ 160 (in Chinese)
- 7 J. A. McKay, R. D. Bleach, D. J. Nagel *et al.*. Pulsed-CO₂-laser interaction with aluminum in air: Thermal response and plasma characteristics. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50**(5): 3231~ 3240

Study on Mechanism of Laser-induced Plasma during YAG-pulse Laser Welding

Tang Xiahui Zhu Haihong Zhu Guofu Li Shimin Li Zaiguang
(National Engineering Research Center for Laser Processing, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074)

Abstract A hollow cylindrical electrode was employed to detect the electrical signal of laser-induced plasma during YAG-pulse laser welding of Al and 45[#] steel. The theoretical model has been established for analysis of the plasma region and compared with the experiments. The research results show that the current exhibit a saturation effect in the $I-V$ curves of plasma signal with increasing voltage in the negative voltage region, and the plasma temperature is higher than the vaporization temperature of welded materials.

Key words YAG-pulse laser welding, laser-induced plasma, detecting with hollow cylindrical electrode, $I-V$ characteristic curve, plasma temperature

第二届亚太激光讨论会征稿简则

第二届亚太激光讨论会(The Second Asian Pacific Laser Symposium)定于2000年8月21日~24日在上海浦东召开。

本次会议由 中国光学学会、日本激光学会和韩国光学学会联合发起,由上海交通大学、中国科学院上海光机所和上海市激光学会共同组织。会议议题主要包括:

1. 激光器和激光系统;
2. 非线性光学和激光光谱学;
3. 激光与物质相互作用;
4. 激光在工业、测量和生物医学等方面的应用;
5. 其他。

2000年国际激光与光电子技术展览会(LOTECH2000)将于同期在上海国际会议中心举行。

欢迎广大激光科技工作者踊跃投寄论文,参加会议交流讨论,欢迎单位选送优质产品参加LOTECH2000展出。

稿件请寄:上海市南昌路47号上海市激光学会邵兰星收,邮编:200020,电话:(021)53822040-3107,传真:(021)53825108。

论文要求:200字以内的英文摘要(一般不必有图表)。务请注明题目、作者、单位和详细通信地址(包括传真,电话或e-mail)。

截稿期:2000年5月31日(可适当延迟)。