

基于 Stark 展宽的 TIG 焊接电弧三维电子密度测量研究

张 旺^{1,2}, 华学明^{1,2*}, 潘成刚^{1,2}, 李 芳^{1,2}, 王 敏^{1,2}

1. 上海交通大学材料科学与工程学院焊接工程技术研究所, 上海 200240

2. 上海市激光制造与材料改性重点实验室, 上海 200240

摘 要 焊接电弧三维电子密度的测量对于焊接质量控制具有重要意义, 通过光谱仪采集电弧弦方向特征谱线轮廓, 利用多项式拟合对径向采集数据进行降噪及平滑处理, 通过 Abel 逆变换法重新构建径向光谱发射系数谱线轮廓, 采用傅里叶变换从重建光谱轮廓中分离出 Lorentz 线形, 获得 Stark 展宽, 最终计算了 TIG 焊电弧等离子体电子密度的三维空间分布。

关键词 焊接电弧; 电子密度; Abel 逆变换; Stark 展宽

中图分类号: TG403 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2012)10-2601-04

引 言

焊接电弧是一种近似柱对称的非均匀等离子体, 可以用一些参数, 如电子温度和密度, 气体的温度和激发态离子密度^[1]等描述。其径向物理参数梯度大, 因此, 获取电弧等离子体参数的径向信息, 对充分了解电弧深层次的机理非常重要。

目前对电弧等离子体电子密度测量的方法主要有汤姆逊散射实验^[2]和发射光谱测量法^[3,4]。汤姆逊散射实验测量方法的优势是它可以准确的获取空间三维中具体某一点的信息, 但此种测量的成本高, 装置繁杂, 难度大。光谱法测量电子密度主要有 Saha^[3]方程法和 Stark 展宽法^[5-9]。在使用 Saha 方程时必须确认等离子体处于局部热力学平衡状态 (LTE), 同时必须先获取等离子体的准确温度分布, 但是事实上, 实验室的等离子体很难完全满足 LTE^[10]。Stark 展宽法虽不受 LTE 状态限制, 但与汤姆逊散射相比, 测量发射光谱时不能直接获取具体某一点当前位置的发射系数 (发射光谱测量得到的强度为弦方向强度的积分), 所以直接测量得到的特征谱线轮廓计算只能得到等离子体的二维电子密度分布。

本工作利用多项式拟合对径向采集数据进行降噪及平滑处理, 通过 Abel 逆变换法重新构建径向光谱发射系数谱线轮廓, 采用傅里叶变换从重建光谱轮廓中分离出 Lorentz 线形, 获得 Stark 展宽, 最终计算了 TIG 焊电弧等离子体电子

密度的三维空间分布。

1 电弧三维电子密度测量原理

测量得到的光谱轮廓为多种展宽机理的综合结果。对于低温等离子体, 其温度大约在 20 000 K 左右, 主要的展宽机理为 Stark 效应。测量得到的谱线轮廓可以近似为 Lorentzian 函数, 但是在具体实验环境中其他的一些展宽效应需要被考虑。特别是 Doppler 效应展宽和仪器展宽。Doppler 展宽和仪器展宽符合 Gaussian 函数分布, 实际光谱测量得到谱线轮廓为 Gaussian 函数和 Lorentzian 函数的卷积, 该谱线轮廓可以表示为 Voigt 函数^[11, 12]

$$V(\lambda) = \int_{-\infty}^{+\infty} G(\lambda - \lambda') L(\lambda') d\lambda' \quad (1)$$

经傅里叶变换计算可得^[13, 14]

$$\widetilde{V}(\lambda) = \sqrt{\frac{\pi^2}{g}} L_m G_m W_G \exp\left(-W_L \pi |k| - \frac{\pi^2 k^2 W_G^2}{2}\right) \quad (2)$$

对式(2)两边取对数可得

$$\ln \widetilde{V}(\lambda) = a - W_L \pi |k| - \frac{\pi^2 k^2 W_G^2}{2} \quad (3)$$

式中, a 是常数, 等式左右两端都是波数 k 的函数, 经过最小二乘拟合便可以得到常数 a , W_L , W_G ; W_G , W_L 分别为 Gauss 线形和 Lorentz 线形的半高全宽 (FWHM)。

对于非氢类原子如 Ar, Stark 展宽与电子密度关系如下式^[15]

收稿日期: 2012-04-18, 修订日期: 2012-07-05

基金项目: 国家自然科学基金重点项目 (51035004) 资助

作者简介: 张 旺, 1980 年生, 上海交通大学材料科学与工程学院焊接工程技术研究所博士研究生 e-mail: zhangwang@sjtu.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: xmhua@sjtu.edu.cn

$$\Delta\lambda_s = 2[1 + 1.75\alpha(1 - c_0r)]\omega \quad (4)$$

其中, $\omega = (N_e/N_e^0)\omega_n(T)$; $r \approx 9 \times 10^{-3} N_e^{1/6} / \sqrt{T}$; $\alpha = (N_e/N_e^0)^{1/4} \alpha_n(T)$; $N_e^0 = 10^{22} \text{ m}^{-3}$; $c_0 = 0.75$ 。

对于离子谱线 $c_0 = 1.2$ 。1.75 $\alpha(1 - c_0r)$ 这项是由离子碰撞造成的展宽, 相对于电子碰撞可以忽略。式中 $\omega_n(T)$ 和 α 参考文献[15]中已经给出。

发射光谱测量得到的强度为弦方向强度的积分, 如果直接利用式(4)计算电子密度, 所得到的只是二维信息, Abel 逆变换是一种从二维弦积分数据重构三维数据分布的方法, 根据 Abel 逆变换在半径 r 处的发射系数 $\epsilon(r)$ 可以表示为^[16]

$$\epsilon(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{\frac{d}{dy} I(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \quad (5)$$

根据式(5), 如果已知电弧等离子体弦方向每一位置某一特定波长的强度, 就可以通过 Abel 变换法获取半径 r 处该波长的发射系数, 依此原理作者提出了通过 Abel 逆变换法重新构建径向光谱发射系数谱线轮廓法求解电弧空间电子密度方法, 原理如下:

(1) 对于弦方向测量得到的强度通过 Abel 逆变换过程转换为径向方向的发射系数, 对采集得到的构成谱线轮廓各波长数据点[本文采用 $(772.4 \pm 0.8) \text{ nm}$]强度经过 Abel 逆变换转换为径向每一测量点位置的发射系数分布^[3, 4]。Abel 逆变换有多种数值解析方法, 如 Pearce^[17], Nestor-Olsen 方法, Fourier-Hankel 方法^[18], Barr 方法 Bockasten 方法, 本工作采用 Pearce 和 Cho^[16] 提出的几何关系解决方法。

(2) 对于经过 Abel 逆变换获取得到的谱线轮廓每一径向

位置点的发射系数, 以波长数据点为横轴[本文采用 $(772.4 \pm 0.8) \text{ nm}$], 发射系数为纵轴对发射系数在每一径向位置点进行谱线轮廓重建。

(3) 对于重建后的谱线进行快速傅里叶变换, 对变换后的幅频求对数后根据式(3)进行拟合, 求出参数 W_L , W_G , W_L 即为空间对应某一径向具体位置点的 Stark 展宽 $\Delta\lambda_s$, 然后根据式(4)即可获得电子密度空间分布。

2 实验条件和光谱采集系统

2.1 TIG 焊工艺参数

TIG 焊工艺参数见表 1。

Table 1 TIG welding parameters

焊接电流 /A	弧长 /mm	氩气流量 /(L · min ⁻¹)	钨极直径 /mm	钨极角度 /(°)	焊材
200	5	10	2.4	60	水冷铜板

2.2 光谱采集系统

实验采用单透镜系统如图 1 所示, 焊接电弧通过透镜在光屏上成二倍的像。Ocean Optics 公司的 HR4000 光谱仪, 测量范围为 700~880 nm, 分辨率 0.05 nm。在直流 TIG 电弧稳定后, Y 和 Z 向电机带动光纤在 YZ 二维平面运动, 在每一运动停止时刻, 运动控制板卡发出触发信号, 光谱仪进行光谱信号采集, 逐点扫描采集得到光谱数据送入 PC 存储。

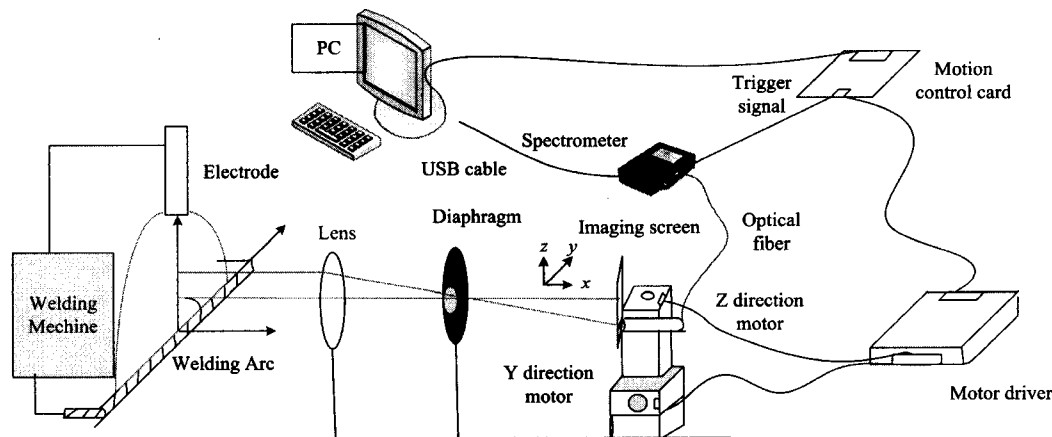


Fig. 1 Spectrum acquisition system

3 数据处理结果

为了可靠地诊断等离子体, 选取了与相邻谱峰相互独立且强度突出的 772.4 nm 谱线, 图 2 为原始测量得到的钨极下方 3 mm 处 $r=0$ 位置中心波长 772.4 nm 的谱线轮廓, 由于热等离子体的原子和离子的碰撞会造成谱线轮廓的微小非对称, 本方法对这种微小的非对称忽略不计。对采集得到的构成谱线轮廓弦方向各波长数据点 $[(772.4 \pm 0.8) \text{ nm}]$ 强度

经过 Abel 逆变换转换为径向每一测量点位置的发射系数分布, 由于 Abel 变换对径向的噪声很敏感, 在进行 Abel 逆变换前对弦方向强度实验数据进行了多项式拟合平滑处理^[19, 20], 如图 3 所示。

图 4 为谱线轮廓中心波长 772.4 nm 经过 Abel 逆变换后发射系数对 3.5 mm 最大值处归一化后径向分布, 从图中可以看出在距离钨极小于 2.5 mm 的范围内均存在离轴最大的特点, 但是在距离钨极大于 2.5 mm 时会出现轴心最大, 这与 Haddad^[21] 研究结果相同。

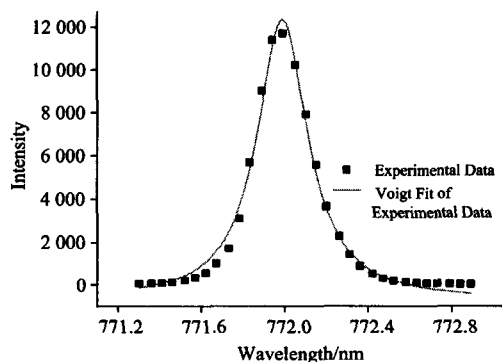


Fig. 2 The central wavelength of the spectral line at 772.4 nm

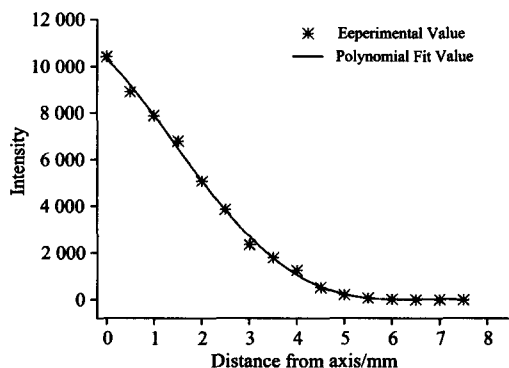


Fig. 3 Polynomial fit for experimental data at the position 3 mm below W electrode

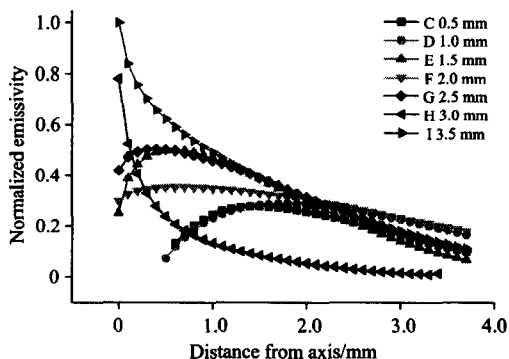


Fig. 4 Radial distribution of emission coefficient

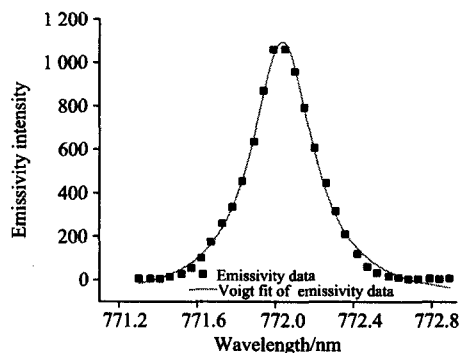


Fig. 5 Reconstruction profile at the position of 3 mm below electrode and $r=0$

按照 Abel 逆变方法及式获取的谱线轮廓每一径向位置点的发射系数,以波长数据点为横轴[采用 (772.4 ± 0.8) nm],发射系数为纵轴对发射系数在每一径向位置点进行谱线轮廓重建,图 5 为钨极下方 3 mm 层 $r=0$ 位置的发射系数谱线轮廓重建后结果,构成轮廓的发射系数数据点与 Voigt 函数很好拟合。

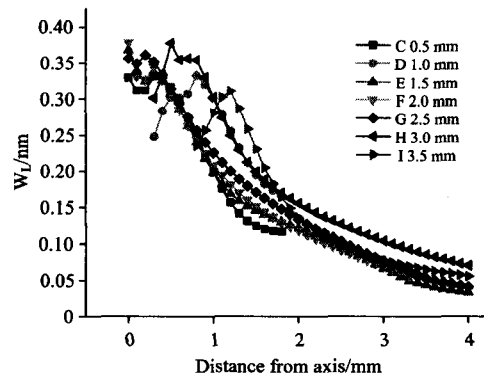


Fig. 6 Stark width of TIG welding arc

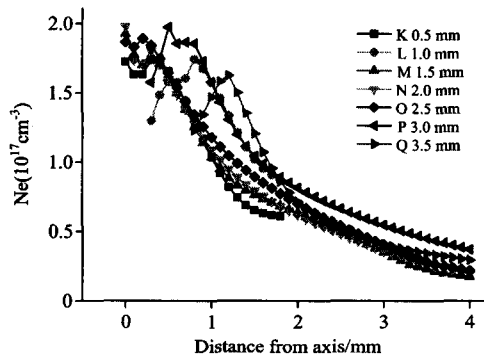


Fig. 7 Electron density of TIG welding arc

对每一径向位置重建后的谱线性进行快速傅里叶变换,可以求出参数 W_L 和 W_G 。图 6 为整个 TIG 焊电弧的 Stark 展宽分布,然后根据式(4)就可以求出 TIG 焊电弧电子密度的分布,如图 7。从图可以看出 TIG 焊电弧从钨极往下 0.5~3.5 mm 内电子密度 Ne 在 $158 \times 10^{17} \sim 1.97 \times 10^{17} \text{ cm}^{-3}$ 间。在径向,随着离轴距离的增大电子密度逐渐降低,一直到电弧边缘处电子密度接近于 0,这与 Pellerin^[3] 通过 Larentz-Fowler-Milne 方法获取温度然后采用 Saha 方程推导得到的电子密度在径向 0~2 mm 结果在电子密度分布趋势及数值范围相似,但是本工作最终得到了整个电弧 2 mm 以外的电子密度分布趋势,显示电子密度的最大值并不是在轴线上,与计算得到的发射系数相似,具有离轴最大的特性。测量误差主要来自 Abel 逆变化算法误差^[17];系统测量的误差(由于本测量将电弧假设为静态电弧逐点扫描,所采集得到的不是同一时刻的光谱信息,但是对于自由燃烧的电弧随时间会有一定的微小波动);径向采集数据的点数及拟合误差。

4 结 论

给出了一种光谱实验法重建空间电子密度的方法, 通过利用多项式拟合对径向采集数据进行降噪及平滑处理, 用几何关系 Abel 逆变换法重新构建径向每一位置点光谱发射系数谱线轮廓, 用傅里叶变换从重建光谱轮廓中分离出

Lorentz 线形, 获得 Stark 展宽, 最终计算了 TIG 焊电弧等离子体电子密度的空间分布, 结果与采用 Saha 方程法求得的结果接近。通过本方法获得了电弧等离子体电子密度参数的径向描述信息, 为充分了解电弧深层次的机理信息, 解决等离子体的不均匀性造成的参数梯度, 定量光谱测量提供了一种方法。

References

- [1] Alvarez R, Roderio A, Quintero M. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2002, 57(11): 1665.
- [2] Dzierżęga K, Zawadzki W, Pokrzywka B, et al. *Physical Review E*, 2006, 74(2): 026404.
- [3] Pellerin S, Musiol K, Pokrzywka B, et al. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1994, 27: 522.
- [4] Pellerin S, Musiol K, Pokrzywka B, et al. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 1996, 29: 3911.
- [5] Zielińska S, Musiol K, Dzierżęga K, et al. *Plasma Sources Science and Technology*, 2007, 16: 832.
- [6] Ribic B, Burgardt P, DebRoy T. *Journal of Applied Physics*, 2011, 109: 083301.
- [7] Vervisch P, Cheron B, Lhuissier J. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1990, 23: 1058.
- [8] Liu L, Huang R, Song G, et al. *Plasma Science, IEEE Transactions on*, 2008, 36(4): 1937.
- [9] Gao H, Ma S, Xu C, et al. *The European Physical Journal D-Atomic, Molecular, Optical and Plasma Physics*, 2008, 47(2): 191.
- [10] Christova M, Castanos-Martinez E, Calzada M, et al. *Applied Spectroscopy*, 2004, 58(9): 1032.
- [11] Vogman G V, Shumlak U, Golingo R P, et al. *APS-DPP Meeting Atlanta, GA Nov. 2-6, 2009*. 11.
- [12] Vogman G, Shumlak U. *Review of Scientific Instruments*, 2011, 82: 103504.
- [13] He J, Zhang C. *Journal of Optics A: Pure and Applied Optics*, 2005, 7: 613.
- [14] Letchworth K L, Benner D C. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2007, 107(1): 173.
- [15] Griem H R. *Plasma Spectroscopy*. New York: McGraw-Hill, 1964. 1.
- [16] Cho Y T, Na S J. *Measurement Science and Technology*, 2005, 16(3): 878.
- [17] Pearce W J. *Optical Spectrometric Measurements of High Temperature*. University Press, Chicago, 1961.
- [18] Ma S, Gao H, Wu L. *Applied Optics*, 2008, 47(9): 1350.
- [19] Chan G C Y, Hieftje G M. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 2006, 61(1): 31.
- [20] Nakamura S. *Spectrochimica Acta Part B: Atomic Spectroscopy*, 1999, 54(13): 1899.
- [21] Haddad G, Farmer A. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 1984, 17: 1189.

The Reconstruction of Welding Arc 3D Electron Density Distribution Based on Stark Broadening

ZHANG Wang^{1,2}, HUA Xue-ming^{1,2*}, PAN Cheng-gang^{1,2}, LI Fang^{1,2}, WANG Min^{1,2}

1. Welding Engineering Institute of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China
2. Shanghai Key Laboratory of Materials Laser Processing and Modification, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China

Abstract The three-dimensional electron density is very important for welding arc quality control. In the present paper, Side-on characteristic line profile was collected by a spectrometer, and the lateral experimental data were approximated by a polynomial fitting. By applying an Abel inversion technique, the authors obtained the radial intensity distribution at each wavelength and thus constructed a profile for the radial positions. The Fourier transform was used to separate the Lorentz linear from the spectrum reconstructed, thus got the accurate Stark width. And we calculated the electronic density three-dimensional distribution of the TIG welding arc plasma.

Keywords Weld arc; Electron density; Abel inversion; Stark broadening

* Corresponding author

(Received Apr. 18, 2012; accepted Jul. 5, 2012)