

文章编号: 0258-7025(2008)11-1778-05

激光焊接等离子体温度场测量及数据处理

陈根余 赵智 张屹 张均

(湖南大学汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 湖南 长沙 410082)

摘要 应用光谱分析法测量激光焊接光致等离子体的温度场是激光焊接光致等离子体测量技术中的难点。采用基于快速傅里叶变换(FFT)和汉克尔变换的阿贝尔逆变换数值方法,研究出一种等离子体二维温度场分布的数据处理方法,并进行了计算精度分析。利用该数据处理方法,在取样点为 41 个的时候,得到的标准误差 e 大约为 3.23×10^{-2} 。同时,进行了焊接试验,采用多通道光谱仪观测孔外光致等离子体,利用所提出的新方法实现了试验数据的处理,获得激光焊接孔外等离子体的温度场。计算得出的温度场呈相对于光束中心的四周低中间高的趋势。

关键词 激光加工; 激光焊接; 等离子体温度场测量; Abel 逆变换

中图分类号 TG115.31; TG441.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL20083511.1778

Data Process Method for Measurement of Plasma Plume Temperature Field in Deep Penetration Laser Welding

Chen Genyu Zhao Zhi Zhang Yi Zhang Jun

(State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacturing for Vehicle Body, Hunan University, Changsha, Hunan 410082, China)

Abstract The temperature field of laser-induced plasma in laser welding is hard to be obtained by the spectral analysis method. By using fast Fourier transform (FFT) and Hankel inversion algorithms, a data processing method based on Abel inversion for measuring temperature distribution of plasma is studied. Meanwhile the precision in the process of the data is analyzed. The standard error e was about 3.23×10^{-2} at the number of dispersed points N of 41. The results show that the data process method can be very useful in the observation of the temperature field of laser-induced plasma by using a multi-channel spectral analyzer. The temperature of plasma plume in the center area of laser beam appeared to be higher than the area near the laser beam.

Key words laser processing; laser welding; measuring temperature distribution of plasma; Abel inversion

1 引言

激光焊接的一个显著标志就是等离子体效应。由于激光束作用于加工工件表面产生的等离子体称作光致等离子体。本课题组^[1,2]采用“三明治”焊接新方法,利用单通道光谱仪对激光焊接光致等离子体的光谱进行了测量,得到了单点的温度值,并观测到小孔的形状。但是随着研究的深入,简单的单点等离子体温度的获得已经无法满足工艺研究的需要,获得温度的时间分布规律和温度场成为研究趋势和难点^[3]。采用多通道光谱分析的方法可以得出光致等离子体的丰富信息,但是对于柱状等离子体

从侧面获取的光谱强度都是积分值,不能直接获得等离子体的温度场。本文在多通道光谱仪观测试验基础上,采用 Abel 逆变换的方法对侧面获取的积分换算,从而得到该平面内的激光等离子体温度场,为等离子体温度场分析和测量提供一种新的方法。

2 激光光致等离子体二维温度场的测量方法和装置

试验的装置如图 1 所示,试验用激光为板条式 CO₂ 激光器,最大输出功率 2500W,输出模式为 TEM₀₀,输出能量近似高斯分布。多通道光谱测量系

收稿日期: 2008-09-23; 收到修改稿日期: 2008-10-13

基金项目: 国家 863 重点项目(2007AA042006)、国家自然科学基金(50575070)和教育部博士点基金新教师项目(20070532003)资助课题。

作者简介: 陈根余(1965—),男,教授,主要从事激光加工方面的研究。E-mail: hdgychen@163.com

统则主要包括多通道光谱仪、面阵 CCD 和自行设计的光纤测量组件。多通道光谱仪为 SpectraPro-2356 型光谱仪,面阵 CCD 采用的是 PIXIS:400F 型高性能 CCD。近似基模激光经过平面镜和聚焦镜之后照射到工件表面。工件被放置在 CNC (Computer numerical control) 工件台上。激光焊接形成等离子体云,被等离子体云旁侧的多个光纤捕捉。多个光纤传输光信号进入多通道光谱仪分光,分光照在面阵 CCD 上,信号输入计算机处理,测定出发射光源谱线强度。其中多个光纤是成水平直线排布的,故观测到的强度值是沿所观测方向的积分值。

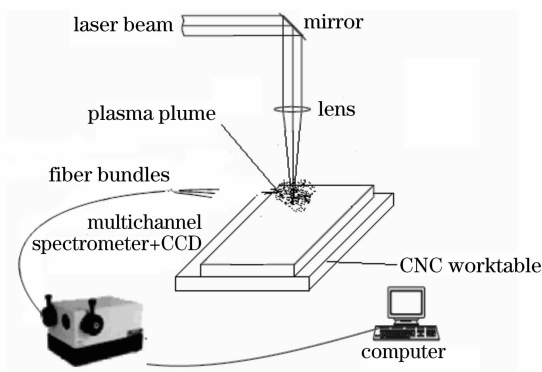


图 1 试验装置示意图

Fig. 1 Diagram of experimental setup

等离子体各部分温度相差很大,所测得的积分温度和真实的等离子体温度空间分布相差也较大。为了能够得到等离子体在二维平面内的温度分布,引入了一种数学变换,称为 Abel 变换,可以把强度的横向分布转换为径向分布。

3 数据测量和处理过程

采用多通道光谱仪采集数据,不能直接显示出温度场,必须进行数据的处理。利用光谱仪和面阵 CCD 采集到的数据传输到电脑中的图像为灰度图,其灰度值代表 CCD 传感器感光元件感受到光强值的大小。结合 CCD 灵敏度曲线,将灰度值数值和响应曲线的响应作算术运算得到真实的相对光强,也就是发射系数。要求解空间某点的温度,必然要确定该点的发射系数值。利用侧面直线排布的光纤同时测量得到的是空间某条线上的发射系数的积分值。在此积分值的基础上,利用 Abel 逆变化才可以得到空间某点的发射系数值。焊接的对象多为金属粒子,故采用谱线相对强度法计算电子温度。因为谱线相对强度法不需要严格测量出谱线的绝对值,只需要获得某几个波长的发射系数的比值就可以计算出等离子体的温度,

所以利用该方法求出的结果精度较高。整个数据处理过程可用图 2 的流程图表示。

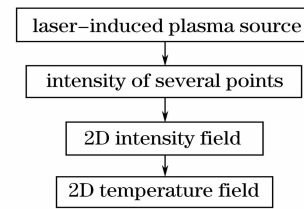


图 2 数据处理流程

Fig. 2 Flow scheme of data processing

4 Abel 逆变换的 Hankel-Fourier 方法

在光谱分析方法中,通过探测器测量出空间离散点的光谱强度。由于等离子体团的尺寸相对较小,并且光纤的排布受到光纤数值孔径的影响不可能排布得很密,所以离散点的个数必然不可能很多。这种情况下 Abel 逆变换的应用只能通过数值计算的方法,必要时还需要进行插值^[4,5]。

在等离子体温度测量过程中,假设 $a(r)$ 为轴对称的(发射系数)分布函数, $I(y)$ 为沿 x 方向测量得到的(光谱强度)的投影(如图 3)

$$I(y) = 2 \int_0^x a(r) dx, \quad (1)$$

该积分中, y 取值范围 $[-R, R]$, $I(R) = I(-R) = 0$, $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, 并利用对称性的性质,有

$$I(y) = 2 \int_y^R \frac{a(r)rdr}{\sqrt{r^2 - y^2}}. \quad (2)$$

(2) 式是 Abel 积分方程,即 Abel 变换。 $I(y)$ 可由设备测量而得,它是 $a(r)$ 的积分值, $I(y)$ 的求解为 Abel 逆变换

$$a(r) = -\frac{1}{\pi} \int_r^R \frac{dI(y)}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy. \quad (3)$$

由于 $r = \sqrt{x^2 + y^2}$, (2) 式可写成

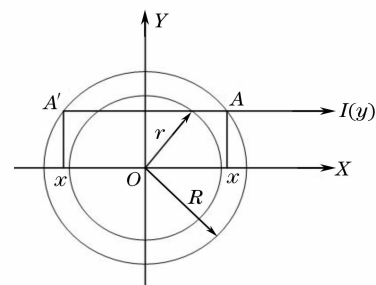


图 3 Abel 变换

Fig. 3 Abel transform

$$I(y) = \int_{-\infty}^{\infty} a(\sqrt{x^2 + y^2}) dx, \quad (4)$$

取(5)式的一维傅里叶变换

$$\mathcal{F}[I(y)] = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} a(\sqrt{x^2 + y^2}) \exp(-2\pi k y i) dx dy, \quad (5)$$

将直角坐标系转变成极坐标,则(5)式成为

$$\mathcal{F}[I(y)] = 2\pi \int_0^{\infty} r a(r) J_0(2\pi k r) dr, \quad (6)$$

式中 $J_0(2\pi k r)$ 为第一类零阶贝塞尔(Bessel)函数,(6)式中的积分为 $a(r)$ 的汉克耳变换。因此,有(6)式取 $\mathcal{F}[I(y)]$ 的汉克耳逆变换,又因为汉克耳变换和逆变换的形式一样,就可以得到轴对称分布的 $a(r)$ 的值为

$$a(r) = 2\pi \int_0^{\infty} k J_0(2\pi k r) \int_{-\infty}^{+\infty} I(y) \exp(-i2\pi k x) dx dy = \mathcal{H}\{\mathcal{F}[I(y)]\}, \quad (7)$$

式中 $\mathcal{H}\{\}$ 代表汉克耳变换, $\mathcal{F}[\]$ 表示傅里叶变换。由(7)式可以看出, $a(r)$ 的求解可以通过两次积分变换求得。分别是对 $I(y)$ 进行傅里叶变换得到 $\mathcal{F}[I(y)]$, 然后进行汉克耳变换得 $\mathcal{H}\{\mathcal{F}[I(x)]\}$, 这就是求解 Abel 逆变换的 Hankel-Fourier 法^[6]。在此基础上,利用数值算法中的快速傅里叶变换

(FFT)和快速汉克耳变换(FHT)进行数值计算,就可以处理实验数据。

文献[7]介绍的快速汉克耳变换算法不仅避免了插值运算,而且能计算零点,精度较高。另一方面等离子体温度分布测量中对温度的精度要求相对于光学研究中的精度要求来说较低,但是能够计算零点这在等离子体温度测量中尤其重要。因为实际测量中温度和光谱强度都不可能是零,为了满足 Abel 的计算要求,除了要对所测量的区域作归一化处理之外,还必须在所测量的数据中强行加入零点。

汉克耳变化的表达式为

$$g(k) = 2\pi \int r a(r) J_0(2\pi r k) dr. \quad (8)$$

将 $[0, 1]$ 划分为 N 个小区间,区间端点可确定为

$$r_0 = 0, \quad r_n = r_1 \exp[\alpha(n-1)]. \quad (9)$$

$$r_N = r_1 \exp[\alpha(N-1)] = 1,$$

$$k_0 = 0,$$

$$k_n = k_1 \exp[\alpha(n-1)], \quad (10)$$

$$k_N = k_1 \exp[\alpha(N-1)] = 1,$$

其中 r_1, k_1 和 α 为常数, n 取 $0, 1, 2, \dots, N$ 。

该算法可以简单表示为

$$g(k_m) = \text{FFT}[\text{FFT}(f_m) \text{IFFT}(j_m)], \quad (11)$$

式中 $f_m, j_m, g(k_m)$ 均为 $2N-1$ 维向量。

$$f_n = \begin{cases} \frac{\pi}{4} r_1^2 [f(r_0) + f(r_1)], & (n = 0) \\ \frac{\pi}{4} r_1^2 \exp(2\alpha n) [1 - \exp(-2\alpha)] [f(r_n) + f(r_{n+1})], & (n = 1, 2, \dots, N-1) \\ 0, & (n = N, N+1, \dots, 2N-1) \end{cases} \quad (12)$$

$$j_n = \begin{cases} 1 + J_0(2\pi r_1 k_1), & (n = 0) \\ J_0\{2\pi r_1 k_1 \exp[\alpha(n-1)]\} + J_0[2\pi r_1 k_1 \exp(\alpha n)], & (n = 1, 2, \dots, 2N-1), \end{cases} \quad (13)$$

5 计算结果和分析

采用多通道光谱仪测量得出的是一组等离子体发射系数的数据,按照空间位置从 $-Y$ 方向往 $+Y$ 方向排列成一个一维数组。在假设等离子体轴对称的情况下,根据该一维数组就可以计算得出发射系数的径向分布,它是半径 r 的函数。取阿贝耳变换对为

$$I(y) = 1000(1 - y^2), \quad (14)$$

$$a(r) = \frac{2000}{\pi} \sqrt{1 - r^2}, \quad (15)$$

利用(14)式,代入一组 y 值,得出一组 I 值,模拟试验测出数据。利用该数组进行数值计算,得出一组 $a(r)$ 值,和(15)式的 $a(r)$ 相比较。图 4 为(15)式的空间分布曲线。图 5(a)为利用本方法画出的曲面和理论曲面在 $x=0$ 截面内的曲线比较图,“o”表示理论值,“Δ”表示数值计算结果。图 5(b)是数值解的三维曲线图。总体上说数值计算结果和理论值吻合的很好,但是也可以看出在边界附近存在相对中心位置较大的误差。把图 5(b)和图 4 对比也可以看出这一点。

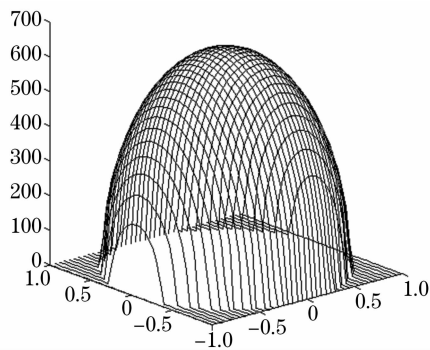


图 4 原函数空间分布曲面

Fig. 4 Spatial curved surface of primitive function

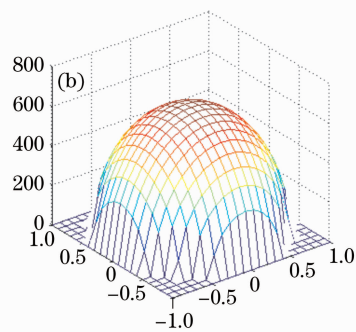
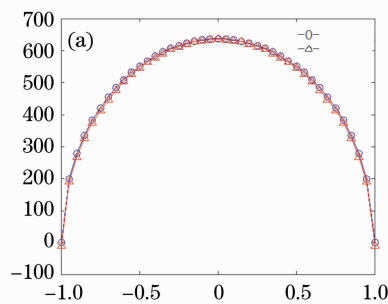


图 5 计算结果比较

Fig. 5 Results contrast

计算精度由标准误差 e 来衡量

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N [a_0(r_i) - a(r_i)]^2}{N}}, \quad (16)$$

式中 $a(r_i)$ 表示计算结果, N 为取样点个数。利用以上计算方法, 在 $N = 41$ 时, 得出精度 $e = 3.23 \times 10^{-2}$, 满足温度测量的精度要求。

在此基础上, 试验中采用激光功率为 1000 W, 焊接速度 1 m/min, 离焦量 0.5 mm, Ar 气保护气体, 流量 0.5 m³/h(同轴吹气)。被焊材料为高强度镀锌钢板(DOGAL 800DP), 利用该数据处理过程得到的距离工件表面上方 8 mm 处的等离子体的光谱图, 如图 6 所示, 该图是三通道同时采集的光谱。图 7 是根据本文介绍方法得到的孔外等离子体温度场, 从图中可以看出等离子体温度分布呈现中间区域温度高, 四周区域温度低的趋势。在本实验条件下得到的中间的最高温度为 6468.2 K。

6 结 论

1) 应用等离子体的光谱诊断方法进行激光焊接中光致等离子体的温度测量, 采用光谱诊断方法中的谱线相对强度法, 可由某点的发射系数计算出该点的等离子体电子温度。

2) 结合 Abel 逆变换和相应的数值算法, 提出一种激光焊接等离子体温度测量的试验数据处理新方法。在多通道光谱仪观测试验的基础上, 采用该算法获得了激光焊接光致等离子体在工件表面上方 8 mm 处的二维温度场。

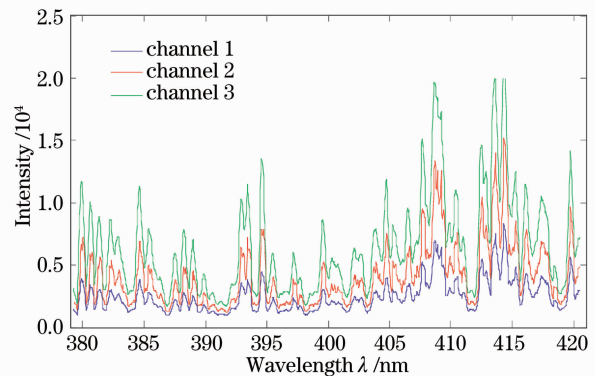


图 6 孔外等离子体的光谱图

Fig. 6 Spectrums of the plasma plume

3) 通过假想函数的模拟研究, 验证该数据处理方法的精度, 得到该方法精度为 $e = 3.23 \times 10^{-2}$, 能满足工艺研究的精度要求。

参 考 文 献

- 1 Yi Zhang, Genyu Chen, Haiying Wei *et al.*. A novel "sandwich" method for observation of the keyhole in deep penetration laser welding[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, **46**: 133~139
- 2 Wu Qiang, Chen Genyu, Wang Gui *et al.*. CO₂ laser welding of Zinc coated high strength steel[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 伍强, 陈根余, 王贵等. 高强度镀锌钢的 CO₂ 激光焊接[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1133~1138
- 3 Jiang Ping, Chen Wuzhu, Xiahou Lipeng *et al.*. Mechanism and

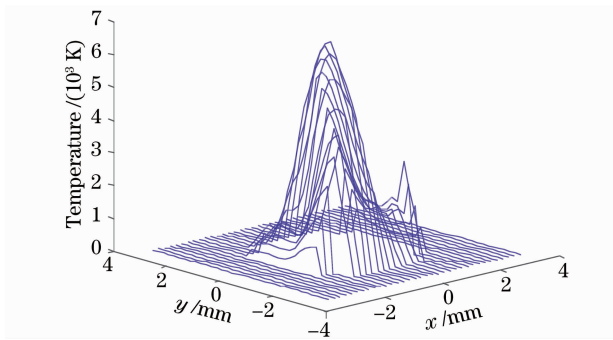


图 7 等离子体温度分布

Fig.7 Temperature field of plasma plume

mathematical model of the laser-induced plasma current in laser welding[J]. *Chin. J. Lasers*, 2002, **A29**(5): 471~474

姜平,陈武柱,夏侯荔鹏等. 激光焊接时等离子体电流的产生机制及其数学模型[J]. *中国激光*, 2002, **A29**(5): 471~474

4 R Alvarez. An Abel inversion method for radially resolved measurements in the axial injection torch[J]. *Spectrochimica Acta Part B*, 2002, **57**: 1665~1680

5 Vittorio Magni. High-accuracy fast Hankel transform for optical beam propagation[J]. *Optical Society of America*, 1992, **9**(11): 2031~2033

6 William L. Barr. Method for computing the radial distribution of emitters in a cylindrical source [J]. *J. Optical Society of America*, 1962, **52**(8): 885~888

7 Shao Hua, Zhu Danping, Wu Yixiong. Numerical methods of Abel inversion [J]. *J. Shanghai Jiaotong University*, 2005, **39**(8): 1375~1388

邵华,朱丹平,吴毅雄. Abel 逆变换的数值算法[J]. *上海交通大学学报*, 2005, **39**(8): 1375~1388