

文章编号: 1001-3806 (2008) 02-0137-03

## 等离子体温度分布测量方法的研究

陈根余, 张 均, 张 屹, 赵 智

(湖南大学 汽车车身先进设计制造国家重点实验室, 长沙 410082)

**摘要:** 测量激光深熔焊接小孔的温度分布是研究小孔形成机理的重要手段之一。为了获得非对称情况下的等离子体温度的二维分布, 通过变量分离方法将光谱测量的一维信息分离为对称和非对称两部分, 在阿贝尔变换的基础上, 利用数值方法计算出对称部分的平面二维分布, 从而获得非对称情况下的平面二维分布。通过假想的非对称分布函数进行了模拟计算和误差分析, 结果证明算法的整体误差小, 对研究激光焊接形成小孔的机理具有十分重要的意义。

**关键词:** 激光技术; 温度分布; 阿贝尔逆变换; 焊接小孔

**中图分类号:** TG456.7 **文献标识码:** A

### Study on method of measuring temperature distribution of plasma

CHEN Gen-yu, ZHANG Jun, ZHANG Yi, ZHAO Zhi

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

**Abstract:** Measuring temperature distribution of laser penetration welding keyhole is one of the important ways to study the foundational theory of keyhole. The object is to get the 2-D temperature distribution of plasma in non-symmetry case, dividing one dimension spectrum information into symmetry and non-symmetry part by variable separation approach, computing plane 2-D distribution of antimer by numerical method based on Abel transform, the plane 2-D distribution in non symmetry case can be obtained. A hypothetical function is calculated with this method, error analysis proves that it describes real distribution for small global error accurately. It is important for the study of the foundational theory of the laser penetration welding keyhole.

**Key words:** laser technique; temperature distribution; Abel transform; weld keyhole

## 引 言

小孔效应是激光深熔焊接的本质特征<sup>[1]</sup>, 也是激光深熔焊接研究的热点和难点。由于小孔内部机理复杂, 温度高且变化快, 应用普通的方法很难进行观测, 目前针对小孔的温度研究主要还是集中在孔外, 主要的探测方法包括光谱分析法、干涉衍射法、直接成像法等<sup>[2]</sup>; 而对于小孔内部的研究相对甚少, 主要采用光谱分析法。本课题组采用“三明治”原理的光谱测量方法, 利用单通道光谱仪对激光焊接小孔等离子体进行了测量, 获得了单点的温度和电子密度<sup>[3]</sup>。由于激光焊接所产生的小孔内部密布着等离子体, 小孔内部等离子体的温度分布可以反映焊接过程中孔内的温度情况, 所以测量小孔内部等离子体的温度分布对于研究激光焊接形成小孔的机理具有十分重要的意义。

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (50575070)

作者简介: 陈根余 (1965-), 男, 教授, 主要从事激光加工新技术研究。

E-mail: hdgychen@163.com

收稿日期: 2007-01-23; 收到修改稿日期: 2007-03-31

## 1 测量原理

### 1.1 温度测量原理

激光焊接小孔孔内等离子体温度的分布情况很难直接获得。Abel变换原理被应用到等离子体的观测, 为获得孔内等离子体温度的分布情况提供了一条可行途径。首先利用光谱仪获得小孔一维方向上的光谱信息, 再通过 Abel 逆变换得到其在平面的分布, 进而获得空间的分布。

如图 1 所示, 设测量区域为柱对称的,  $R$  为半径,

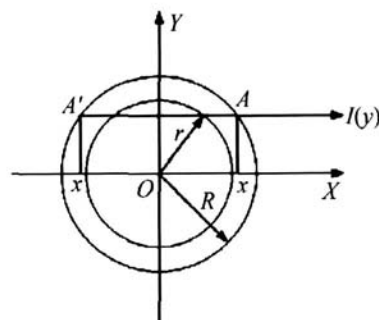


Fig 1 Abel transform

$a(r)$  为发射系数径向分布函数,  $I(y)$  为  $a(r)$  在  $AA'$  上的积分量, 可以通过光谱仪测得, 即:

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

由于  $I(R) = 0, r = \sqrt{x^2 + y^2}$ , 上式其逆变换可写为:

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

实验证明激光焊接所产生的光致等离子体是光学薄的等离子体,处于局部热力学平衡状态,满足如下方程<sup>[31]</sup>:

$$\begin{aligned} a_{\nu_1}(r) &= \nu_1 A_1 g_1 \exp\left(-\frac{E_{u_1} - E_{u_2}}{kT}\right) \\ a_{\nu_2}(r) &= \nu_2 A_2 g_2 \end{aligned} \quad (3)$$

$a_{\nu_1}(r), a_{\nu_2}(r)$  为同一粒子两条不同谱线的发射系数;  $\nu_1, \nu_2$  为谱线对应光子的发射频率;  $A_1, A_2$  为对应光子的跃迁几率;  $g_1, g_2$  为对应光子的统计权重;  $u_1, u_2$  为对应的能级,  $E_{u_1}, E_{u_2}$  为对应能级的能量,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T$  为等离子体温度。综上所述,得到发射系数的分布就可以获得等离子体温度的分布。

### 1.2 非对称情况下的 Abel 逆变换

考虑到实际的激光焊接小孔内部等离子体的温度分布可能存在非严格的中心对称。如果采用几何对称的 Abel 逆变换方法来处理非对称的情况,则必然带来较大的误差,因此,人们发展了非对称情况下的 Abel 逆变换方法。在保持等离子体区域圆形的前提下,主要有 Gottardi 方法、Yasutomo 方法和 Park<sup>[41]</sup> 3 种方法,其中以 YASUTOMO 的变量分离法<sup>[51]</sup>应用最多,其主要原理如下。

YASUTOMO 认为,等离子体的测量数据  $I(y)$  可看作对称部分  $I_0(y)$  和非对称部分  $I_1(y)$  的叠加,  $I_0(y)$  由偶函数  $a_0(r)$  决定,而  $a_1(r, y)$  决定了非对称部分  $I_1(y)$ , 可假设存在权函数  $g(y)$ , 使得  $a_1(r, y)$  满足关系:

$$a_1(r, y) = g(y) a_0(r) \quad (4)$$

这样,问题就变成计算权函数  $g(y)$ 。由于:

$$I_1(y) = 2 \int_0^x f_1(r, y) dx = g(y) I_0(y) \quad (5)$$

通过  $I(y)$  构造  $I_1(y)$  和  $I_0(y)$  就可以得到权函数  $g(y)$ , 从而得到径向分布函数:

$$a(r, y) = [1 + g(y)] a_0(r) \quad (6)$$

如前所述,由于  $I_0(y)$  为对称部分,所以  $a_0(r)$  可通过 Abel 逆变换求得。

## 2 计算结果及分析

作者应用了 YASUTOMO 的假想分布函数<sup>[6]</sup>进行模拟计算,并采用了归一化的处理。

通过直接求导的方法处理这个假想函数的时候,由于原函数的获得存在很大的困难,所以,采用解析方法很难获得此假想函数的分布函数,考虑到 Barr<sup>[7]</sup>方法对于输入数据的随机误差很不敏感<sup>[8]</sup>,总的说来优

于 Bockasten<sup>[9]</sup>方法,于是本文中采用 Barr 数值方法计算对称部分的 Abel 逆变换。

Barr 算法实际上是通过数值的方法来求解 Abel 逆变换的方法,Abel 逆变换可变换其形式为:

$$a(r) = -\frac{1}{2\pi r} \left[ 2 \int_r^R \frac{f(y) y}{\sqrt{y^2 - r^2}} dy \right] \quad (7)$$

可将  $y$  和  $r$  进行  $\Delta$  等距划分处理,有:

$$y_n = n\Delta, r_k = k\Delta, R = N\Delta \quad (8)$$

式中,  $n, k$  为  $0 \sim N$  的整数,所以:

$$f_k = \frac{1}{\pi \Delta} \sum_{n=k+2}^N \beta_{kn} I_n, (k > 2) \quad (9)$$

$$f_k = \frac{1}{\pi \Delta} \sum_{n=0}^N \beta_{kn} I_n, (k \leq 2) \quad (10)$$

文献 [7] 中给出了  $N = 20$  的对应系数  $\beta_{kn}$ , 对于 YASUTOMO 的假想分布函数,采用 Barr 算法对对称部分进行计算,根据 YASUTOMO 的分离变量方法,可写成:

$$I(y) = I_0(y) + I_1(y) \quad (11)$$

式中,  $I_0(y)$  为对称部分,  $I_1(y)$  为非对称部分。

由于对称部分  $I_0(y)$  是偶函数,可以利用 Barr 算法直接进行 Abel 逆变换,结果见图 2。

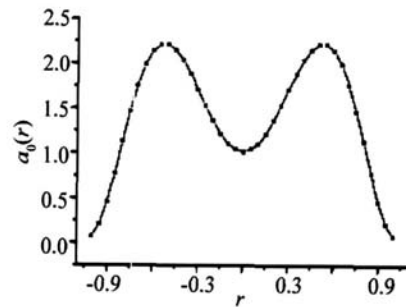


Fig 2 Transform result of antimer

根据 Barr 算法计算出的结果为径向分布,即中心对称分布,区域上任何一个点都可以通过其径向距离得到对称部分的值,再结合变量分离法就可以得到整个区域上的二维分布:

$$\begin{aligned} a(r, y) &= [1 + g(y)] a_0(r) = \\ &= (1 + 0.5 \sin \pi y) a_0(r) \end{aligned} \quad (12)$$

通过计算得到了整个平面上的分布情况,计算解和精确解分别见图 3 和图 4。

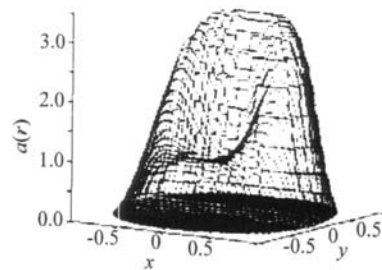


Fig 3 Computational solutions

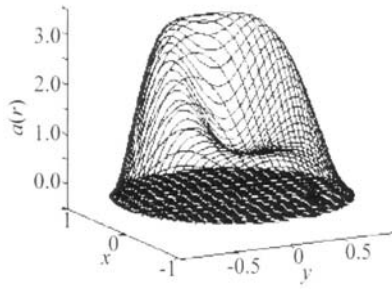


Fig 4 Exact solutions

对比  $y=0$ 轴上计算解和精确解,见图 5,发现整体吻合得很好,但在边缘区域计算解偏大,在双峰处偏小。

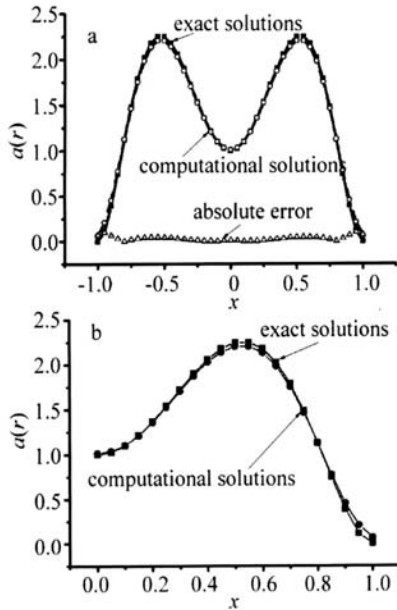


Fig 5 Distribution at  $y=0$

比较不同位置的计算误差情况,如图 6 所示,距离

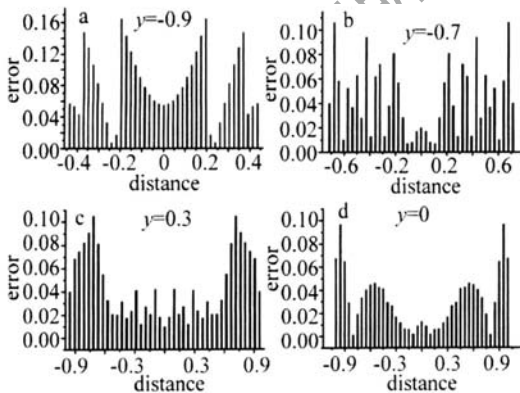


Fig 6 Error of calculations

对称中心远的轴上分布整体误差大于近处,这是因为远离对称中心的区域出现阶梯分布,导致出现较大的误差,特别是在临近边缘的区域失真最为严重,再进行非对称处理,即乘以权函数后更加恶化了;对于同一轴

向上的误差分布情况,中心区域优于远处,但存在起伏,远离中心的轴向上起伏更加明显,这是因为数值方法处理时产生的阶梯失真使得同一轴上不同径向距离的点存在着不同的误差,由于其径向距离的对称性质,所以同一轴向上的误差也呈现对称分布。误差分析结果表明该算法整体误差小,所得结果能准确地反映真实地分布情况。

### 3 结 论

结合激光深熔焊接小孔等离子体的非柱对称分布,在 Abel 变换的基础上,利用 YASUTOMO 的变量分离法进行了非对称处理,并通过 Barr 算法进行了数值计算,得到了非柱对称情况下的面分布。利用 YASUTOMO 提出的假想函数进行的误差分析显示出结果很好的反映了真实的分布情况。对于现在研究很多的激光深熔焊接小孔来说,利用多通道光谱仪可获得多点一维方向上的光强积分值,然后通过此方法可获得面上的发射系数分布状况,进一步计算出小孔等离子体的温度分布,在此基础上可以更加全面地研究激光深熔焊接小孔的机理,通过建模和仿真,可以系统地优化实际的激光焊接应用。

### 参 考 文 献

- [1] ZHENG Q G, GU J H, WANG T. Investigation on melting pool behavior and defects of laser welding [J]. Laser Technology, 2000, 24 (2): 90-94 (in Chinese).
- [2] ZHANG G. Experimental research on temperature measurement of laser deep penetration welding plasma [D]. Changsha: Hunan University, 2004: 6-7 (in Chinese).
- [3] ZHANG Y. The simulation research on the keyhole effect of deep penetration laser welding based on a novel "sandwich" method [D]. Changsha: Hunan University, 2005: 70-74 (in Chinese).
- [4] SU Y D. Spectrographic analysis of laser induced plasma in the process of high power laser welding [J]. China Mechanical Engineering, 2000, 11 (12): 1389-1390 (in Chinese).
- [5] DENG H Ch, SHIM L. Asymmetrical Abel inversion study and application to plasma radiation power analysis [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 1992, 12 (2): 111-115 (in Chinese).
- [6] RUAN H L. Dealing with Abel inversion by using lengedre expansions [J]. Acta Physica Sinica, 2001, 50 (12): 2393-2397 (in Chinese).
- [7] W LL IAM B. Method for computing the radial distribution of emitters in a cylindrical source [J]. J O S A, 1962, 52 (8): 885-888.
- [8] ZHU Sh Y. Abel inversion in plasma diagnosis [J]. Nuclear Fusion and Plasma Physics, 1987, 7 (2): 102-107 (in Chinese).
- [9] SHAO H, ZHU D P, WU Y X. Numerical methods for the Abel inversion of temperature field in an arc plasma [J]. Chinese Journal of Computational Physics, 2005, 22 (5): 431-436 (in Chinese).