

# 激光焊接等离子体光谱辐射传输模型

王念<sup>1,2</sup>, 沈华<sup>1,2\*</sup>, 朱日宏<sup>1,2</sup>

1. 南京理工大学电子工程与光电技术学院, 江苏 南京 210094

2. 南京理工大学先进固体激光工业和信息化部重点实验室, 江苏 南京 210094

**摘要** 了解激光焊接光致等离子体在多个波长下的光谱辐射场三维分布能够帮助研究人员获取等离子体的温度场分布、电子密度分布以及其他一些物理量的三维分布,对于改进激光焊接工艺有着重要的意义。了解等离子体光谱辐射能量传输到探测器靶面这一物理过程是重建激光焊接等离子体光谱辐射场的前提。提出一种基于光学成像的等离子体光谱辐射能量传输模型:基于辐射度量学,研究等离子体光谱辐射发出到被探测器镜头接收这一过程,推导等离子体中某一点被镜头接收到的光谱辐射通量占其向周围空间所发出总光谱辐射通量的比例系数 $\omega_1$ ,建立起光谱辐射传递模型;基于光学成像原理,研究光谱辐射由等离子体发出通过镜头到达探测器靶面这一成像过程,推导等离子体中某一点被像素所接收到的光谱辐射通量占其被镜头所接收到的辐射通量的比例系数 $\omega_2$ ,建立起光学成像模型。利用比例系数 $\omega_1$ 和 $\omega_2$ 得到等离子体中某一点被探测器某像素接收到的光谱辐射比例系数 $\omega=\omega_1\omega_2$ ,从而建立起等离子体光谱辐射传输模型。通过仿真实验,考察利用所提模型对处在1000~3000℃之间呈对称温度分布与非对称温度分布的激光焊接等离子体的光谱辐射场重建效果。结果表明,对于温度呈对称分布的等离子体在400,500,600和700nm四个波长下的光谱辐射场,利用该模型进行反演的重建精度分别为5.39%,6.5%,7.25%和6.11%;对于非对称温度分布等离子体的光谱辐射场,进行反演的重建精度分别为9.34%,10.07%,10.68%和9.72%。仿真实验结果表明,利用该模型能够对激光焊接等离子体在400~700nm之间各波长下的光谱辐射场进行较好的重建。与其他模型对比,该模型具有较好的重建精度,能够满足工业应用领域的需求。

**关键词** 激光焊接技术;等离子体辐射场分布;光谱辐射传输模型

**中图分类号:** O536 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)05-1362-05

## 引言

近年来,激光焊接以其形变小、熔深大、效率高的优点<sup>[1]</sup>,已经逐步取代传统焊接技术,在造船、车辆制造、航空航天等领域得到广泛应用<sup>[2-5]</sup>,激光焊接工艺的好坏,对这些行业的发展有着重要的影响。激光焊接过程往往伴随着光致等离子体的产生,了解等离子体在多个波长下的光谱辐射场三维分布,能够帮助研究人员获取等离子体的温度场分布、电子密度场分布以及其他一些物理量的三维分布,对于改进激光焊接工艺具有重要的意义。

当利用CCD等探测器从某个方向对等离子体进行探测时,其靶面上所接收到的光谱辐射强度,是沿着其观测方向上等离子体辐射的累积效应。通过探测器各像素上的积分值

去反演观测路径上的辐射强度变化,以得到整个等离子体光谱辐射场的三维分布是研究人员着重研究的方向,该问题可归结为由投影重建图像的问题。要解决这一问题,首先要弄清楚等离子体的辐射传输过程,掌握辐射叠加到探测器表面这一物理过程,并进行相应的建模。目前常用的辐射传输模型有平行投影模型与中心投影模型。平行投影模型<sup>[6]</sup>是基于医学CT应用场合下的模型,其光源为平行光源,探测器各像素所获得的光谱辐射来自于平行于光轴的投影线上的等离子体各发光点,且各像素的投影线互相平行。然而在利用CCD进行探测时,在光学镜头的成像作用下,对各像素表面的辐射产生贡献的发光点不再是平行于光轴的投影线上的发光点,此时利用平行投影模型就会产生较大的误差。上海交通大学孙大为等<sup>[7-8]</sup>在前者的基础上,提出了更为准确的中心投影模型。该模型将CCD镜头看作针孔,以针孔为中心,

收稿日期:2019-04-08,修订日期:2019-08-14

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB1104400)资助

作者简介:王念,1988年生,南京理工大学电子工程与光电技术学院博士研究生 e-mail:461720598@qq.com

\* 通讯联系人 e-mail:edward\_bayun@163.com

以像素与针孔的连接线作为投影线,认为对像素灰度产生贡献的是该投影线上的各等离子体发光点。该模型采用针孔模型作为 CCD 镜头的成像模型,在镜头口径较小时是适用的。然而在实际应用时,若要满足更高的光谱辐射场反演的空间分辨率要求,则要采用较大的镜头口径,此时针孔模型与实际的成像模型之间存在较大的差异,这将导致辐射传输模型精度下降,并最终影响激光焊接三维光谱辐射场的重建。针对以上模型存在的缺陷,本文基于辐射度量学与光学成像的原理,针对大口径观测设备的需求提出了一种新的等离子体光谱辐射传输模型,为提高激光焊接等离子体光谱辐射场的反演精度奠定模型基础。

## 1 光谱辐射传输模型

若将等离子体离散的划分为  $j = m \times n \times l$  个正方体的网格,则各网格的光谱辐射叠加到 CCD 靶面上某一像素的过程可表示为式(1)

$$P_i = \sum_m \sum_n \sum_l \omega_{i,m,n,l} f(m,n,l) \quad (1)$$

式(1)中,  $P_i$  为像素  $i$  所接收到的光谱辐射值;  $\omega_{i,m,n,l}$  为辐射比例系数,其定义为像素  $i$  所接收到来自网格  $(m,n,l)$  的辐射通量占其总辐射通量的比例,  $f(m,n,l)$  表示网格  $(m,n,l)$  的光谱辐射通量。若遍历 CCD 靶面各像素对应的辐射接收过程,则式(1)可用矩阵表示为

$$\mathbf{I} = \mathbf{W}\mathbf{X} \quad (2)$$

式(2)中,  $\mathbf{I}$  表示二维投影,即 CCD 靶面各像素所接收到的光谱辐射通量值;  $\mathbf{W}$  是辐射比例系数矩阵,由辐射比例系数  $\omega_{i,m,n,l}$  组成;  $\mathbf{X}$  代表各等离子体网格的待重建光谱辐射值。

本文所建辐射传输模型,即是要将  $\mathbf{W}$  准确的表达出来:将网格  $(m,n,l)$  被探测器镜头所接收到的光谱辐射通量占其向周围空间发出的总光谱辐射通量的比例定义为辐射比例系数  $\omega_1$ ,将网格  $(m,n,l)$  被像素  $i$  所接收到的光谱辐射通量占其被探测器接收到的光谱辐射通量的比例定义为辐射比例系数  $\omega_2$ 。各网格的光谱辐射比例系数  $\omega$  可由两个部分相乘所得,即  $\omega = \omega_1 \omega_2$ 。

### 1.1 辐射传递模型 $\omega_1$ 的建立

将等离子体中的任一点看作点光源,以球面波的形式向外发出辐射。CCD 所接收到的辐射通量占点光源所发出的总辐射通量的比例  $\omega_1$ ,应为被 CCD 镜头占据的球冠所对应的立体角与整个球面立体角之比,即该部分球冠覆盖的球面面积  $S_g$  与整个辐射球面面积  $S$  之比。

#### 1.1.1 轴上点模型

当点光源位于光轴上时,镜头所占据的是正上方的球冠,即整球冠。设透镜半径为  $R$ ,点光源与镜头表面之间的轴向距离为  $L$ ,辐射球面半径为  $r$ ,则位于探测器镜头轴上等离子体任一点的比例系数  $\omega_1$  为

$$\omega_1 = \frac{S_g}{S} = \frac{2\pi R H}{4\pi r^2} = \frac{R(r-L)}{2r^2} \quad (3)$$

#### 1.1.2 轴外点模型

对于等离子体中那些位于光轴之外的点而言,其占据的

是部分球冠。则位于探测器镜头轴外等离子体任一点的比例系数  $\omega_1$  的表达式为

$$\omega_1 = \frac{S_g}{S} = \frac{1}{4\pi} \int_{\theta_1}^{\theta_2} \int_{\varphi_1}^{\varphi_2} \sin\varphi d\varphi d\theta \quad (4)$$

由于部分球冠是由镜头投影所得,因此其积分区域的边界由镜头边缘确定,设透镜半径为  $R$ ,则有:  $\theta_1 = \arctan \frac{L}{R}$ ,

$\theta_2 = \pi - \arctan \frac{L}{R}$ 。 $\varphi$  的积分限应为  $\theta$  的函数:

$$\varphi_1 = \arctan\left(\frac{L \csc\theta}{\sqrt{R^2 - L^2 \cot^2\theta - d}}\right),$$

$$\varphi_2 = \pi - \arctan\left(\frac{-L \csc\theta}{\sqrt{R^2 - L^2 \cot^2\theta - d}}\right)$$

### 1.2 光学成像模型 $\omega_2$ 的建立

等离子体被划分为网格后,各网格经 CCD 镜头成像,于靶面上形成光斑,其发出的辐射能量均匀的分布在光斑上。网格  $(m,n,l)$  的辐射比例系数  $\omega_2$ ,应为网格在 CCD 靶面上的光斑与像素  $i$  的重叠面积  $S_C$  和光斑总面积  $S_B$  之比。利用 CCD 观察等离子体时,由于网格边长远小于网格与镜头之间的轴向距离,因此可以将网格看作一个没有厚度的正方形薄片来代替其成像情况。

#### 1.2.1 网格在最佳物面上的成像模型

设镜头焦距为  $f'$ , CCD 靶面到镜头的距离为  $L'$ 。当网格  $(m,n,l)$  位于距离镜头  $L$  的最佳物面(即靶面关于镜头的共轭物面)上时,在靶面上所形成的光斑为薄片经镜头所成的像。如图 1 所示,光斑的位置以及轮廓,可由薄片的四个顶点的像点  $A', B', C'$  和  $D'$  确定。设 CCD 靶面与最佳物面之间的垂轴放大率为  $\beta$ ,由高斯公式和垂轴放大率公式,可得  $A', B', C'$  和  $D'$  的坐标,以及光斑的面积

$$S_B = (x'_B - x'_A)^2 = [\beta(x_B - x_A)]^2$$

$$= (x_B - x_A)^2 \left(1 - \frac{L'}{f'}\right)^2 \quad (5)$$

如图 2(a)所示,比较光斑与任一像素 pixel  $i$  的相对位置与轮廓,便可得到二者的重叠面积  $S_C$ 。设像素  $i$  的中心坐标为  $(x'_i, y'_i)$ ,像素边长为  $2b$ ,则重叠面积

$$S_C = 2b(x'_B - (x'_i - b)) = 2b\left(x_B - x'_i + b - \frac{x_B L'}{f'}\right) \quad (6)$$

因此,当网格位于最佳物面时,其辐射比例系数  $\omega_2$  的表达式为

$$\omega_2 = \frac{S_C}{S_B} = \frac{2b\left(x_B - x'_i + b - \frac{x_B L'}{f'}\right)}{(x_B - x_A)^2 \left(1 - \frac{L'}{f'}\right)^2} \quad (7)$$

#### 1.2.2 网格不在最佳物面上的成像模型

当网格不在最佳物面上时,正方形薄片上任一点的空间像不在 CCD 靶面上,因此其在靶面上的平面像为一弥散斑。设 CCD 镜头口径为  $D$ ,若用  $L_1$  表示此类点到镜头的物距,则其弥散斑直径  $D'_1$  为

$$D'_1 = D \left| \beta \left( \frac{L_1 - L}{L_1} \right) \right| = D \left| 1 - \frac{L'}{L_1} - \frac{L'}{f'} \right| \quad (8)$$

此时网格在 CCD 靶面上所形成的光斑轮廓如图 2(b) 所示: 由正方形  $A'B'C'D'$  轮廓上各点以其弥散斑向外拓展所

得。由光斑面积  $S_B$ 、光斑与像素  $i$  的重叠面积  $S_C$ , 可得当网格  $(m, n, l)$  不在最佳物面时, 辐射比例系数  $\omega_2$  的表达式为

$$\omega_2 = \frac{S_C}{S_B} = \frac{2b \left( x_B - x'_i + b - \frac{x_B L'}{f'} + D \left| 1 - \frac{L'}{L_1} - \frac{L'}{f'} \right| \right)}{(x_B - x_A)^2 \left( 1 - \frac{L'}{f'} \right)^2 + \frac{\pi D^2}{4} \left( 1 - \frac{L'}{L_1} - \frac{L'}{f'} \right)^2 + 2D \left| 1 - \frac{L'}{L_1} - \frac{L'}{f'} \right| (x_B - x_A) \left( 1 - \frac{L'}{f'} \right)} \quad (9)$$

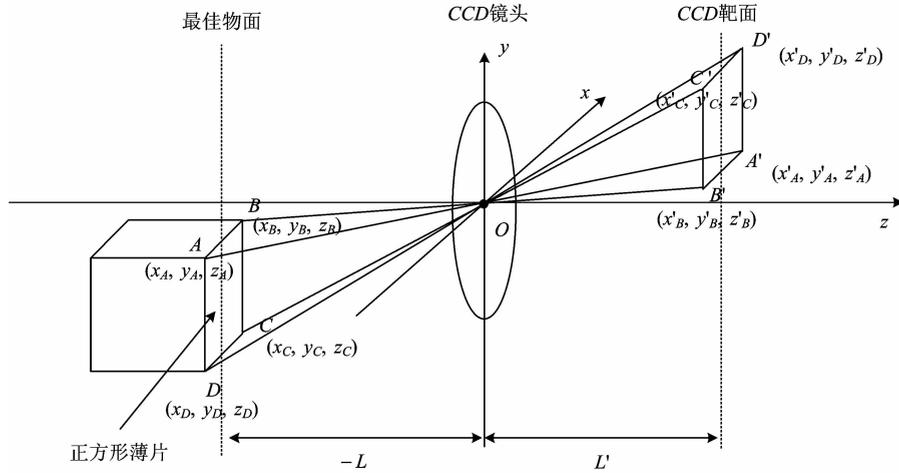


图 1 等离子体中位于最佳物面上的网格成像示意图

Fig. 1 Imaging of cubes on the optimum surface

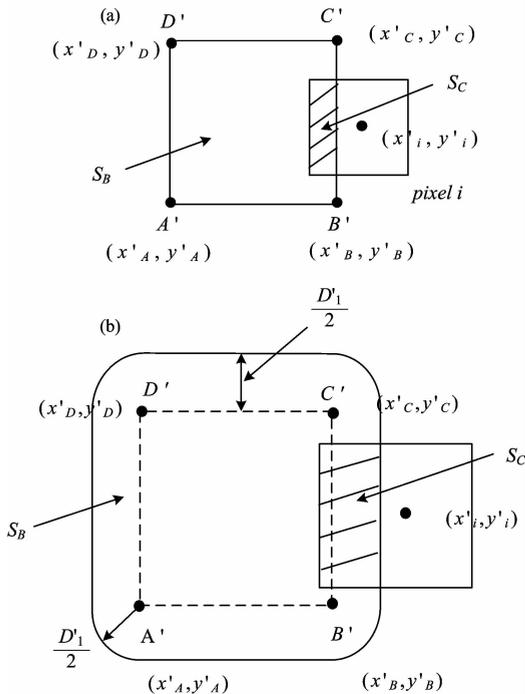


图 2 光斑与像素重叠情况示意图

(a): 网格位于最佳物面上时; (b): 网格不在最佳物面上时

Fig. 2 Overlapping of spot and pixel

(a): When the cube is on the optimum surface;

(b): The cube is not on the optimum surface

## 2 仿真实验

将等离子体辐射场尺寸设定为  $L_x \times L_y \times L_z = 6 \text{ mm} \times 6$

$\text{mm} \times 6 \text{ mm}$ , 划分为  $30 \times 30 \times 30$  个网格。为模拟真实辐射场分布, 将等离子体温度设定在  $1\,000 \sim 3\,000 \text{ }^\circ\text{C}$  之间。根据普朗克辐射定律, 利用发射率函数基形式不变法<sup>[9]</sup>, 由各网格的表面积计算其光谱辐射通量, 得到等离子体在波长为  $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ ,  $\lambda_2 = 500 \text{ nm}$ ,  $\lambda_3 = 600 \text{ nm}$ ,  $\lambda_4 = 700 \text{ nm}$  的设定光谱辐射场。分别在等离子体正上、正面、侧面距离  $120 \text{ mm}$  处放置 CCD, 镜头焦距为  $50 \text{ mm}$ , 通光口径  $D$  为  $100 \text{ mm}$ 。根据辐射度量学原理, 模拟 CCD 靶面探测到的光谱辐射分布。利用不同的辐射传输模型计算辐射比例系数, 由式(2)建立各自的方程组, 通过代数重建法<sup>[10]</sup> (algebra reconstruction technique, ART) 反解, 重建光谱辐射场分布, 重建误差采用均方根误差, 即

$$e = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^N (X^* - X)^2}{\sum_{j=1}^N X^2}} \quad (10)$$

式(10)中:  $X$  为等离子体辐射场设定值,  $X^*$  为反演值。

### 2.1 对称场

设定对称等离子体辐射场的温度分布表达式为

$$T = 3\,000 \left( 1 - \frac{h^2}{180} \right) \left( 1 - \frac{(x^2 + y^2)}{30} \right) \quad (11)$$

式(11)中,  $h$  为距离工件表面的长度,  $x$  和  $y$  为以焊接激光光轴为  $z$  轴下的平面直角坐标。分别利用本文所提模型、中心投影模型重建等离子体光谱辐射通量分布场, 并与原设定场比较, 结果如表 1 所示。由表 1 可以看出, 利用本文模型进行重建的相对误差在  $8\%$  以下, 中心投影模型的相对误差在  $9\%$  左右。说明在对称场下, 本文模型具有较好的重建精确度。本文模型反演所得到的  $400 \text{ nm}$  波长下的光谱辐射场, 在某一截面的分布与设定场的分布对比, 如图 3 所示。由图 3 可见反演分布与设定分布呈现很好的一致性。

表 1 单峰对称等离子体辐射场重建精度对比

Table 1 Comparison of reconstruction accuracy of single-peak symmetrical radiation field

模型	迭代 步进	迭代 次数	波长 $\lambda_1$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_2$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_3$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_4$ 下 的误差 e/%
本文	0.9	10	5.39	6.5	7.25	6.11
中心投影	0.9	10	8.52	9.02	9.49	8.82

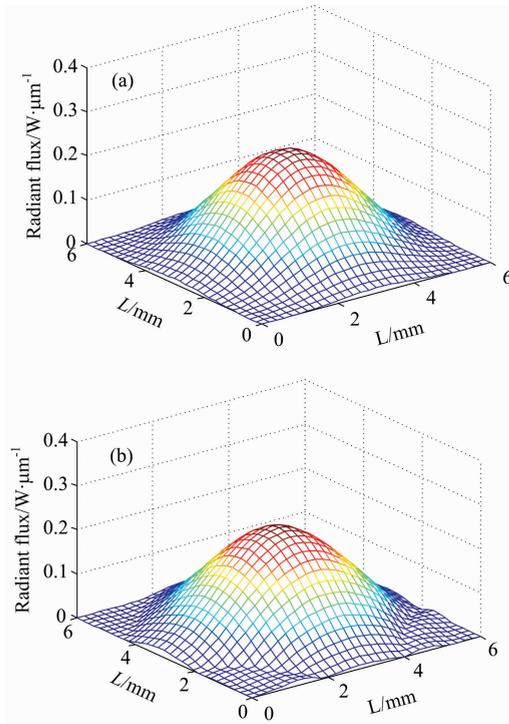


图 3 本文模型反演结果与对称设定场对比 ( $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ )

(a): 设定辐射场; (b): 反演结果

Fig. 3 Comparison between the reconstruction result with the model presented in this paper and the set symmetrical radiation field ( $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ )

(a): The set field; (b): The reconstruction result

2.2 非对称场

设定非对称等离子体辐射场的温度分布表达式为

$$T = 3\,000 \left\{ \sum_{i=1}^4 a_i \exp \left[ -\frac{4 \ln 2}{0.2^2} (x - x_i)^2 - \frac{4 \ln 2}{0.2^2} (y - y_i)^2 \right] \right\} \left( 1 - \frac{h^2}{180} \right) \quad (12)$$

式(12)中,  $x_1 = 0.6, y_1 = 0.6; x_2 = 0.6, y_2 = -0.6; x_3 = -0.6, y_3 = 0.6; x_4 = -0.6, y_4 = -0.6$ 。等离子体某一截面上的温度分布如图 4 所示。

分别利用本文模型、中心投影模型重建光谱辐射场,结果如表 2 所示。由表 2 可以看出,本文模型重建相对误差在 11% 以下,中心投影模型在 27% 左右。说明在非对称场下,本文模型具有较好的重建精确度。本文模型反演所得到的 400 nm 波长光谱辐射场,在某一截面与设定场对比,如图 5 所示。由图 5 可见二者呈现很好的一致性。

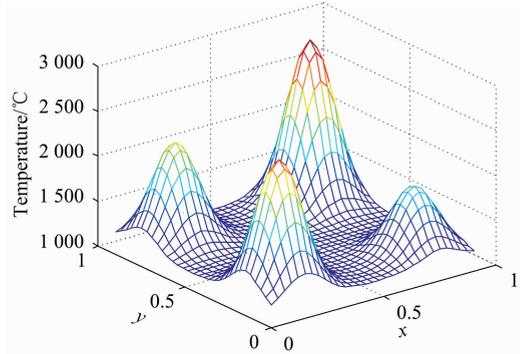


图 4 非对称辐射场某一截面的温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of a section of an asymmetrical radiation field

表 2 四峰非对称等离子体辐射场重建精度对比

Table 2 Comparison of reconstruction accuracy of four-peak asymmetrical radiation field

模型	迭代 步进	迭代 次数	波长 $\lambda_1$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_2$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_3$ 下 的误差 e/%	波长 $\lambda_4$ 下 的误差 e/%
本文	1.94	50	9.34	10.07	10.68	9.72
中心投影	1.99	50	26.69	27.46	27.93	27.24

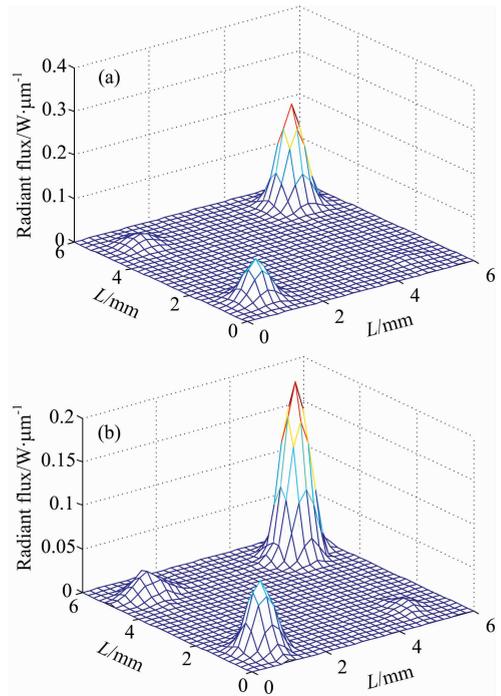


图 5 本文模型反演结果与非对称设定场对比 ( $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ )

(a): 设定辐射场; (b): 反演结果

Fig. 5 Comparison between the reconstruction result with the model presented in this paper and the set asymmetrical radiation field ( $\lambda_1 = 400 \text{ nm}$ )

(a): The set field; (b): The reconstruction result

### 3 结 论

针对激光焊接等离子体光谱辐射场重建领域大口径观测设备的需求,分别基于辐射度量学与光学成像原理,对光谱

辐射从等离子体发出到被观测镜头收集的过程与辐射进入镜头后到达探测器靶面的过程进行研究,提出了一种基于光学成像的光谱辐射传输模型。与现有模型相比,该模型具有较好的反演精度,能够为精确的解算激光焊接等离子体辐射场提供模型基础。

### References

- [ 1 ] WANG Hao, WEI Xin, LIN Ben-hong, et al(王 豪, 魏 昕, 林本宏, 等). Applied Laser(应用激光), 2018, 38(1): 123.
- [ 2 ] WANG Kai, ZHU Jia-lei, JIAO Xiang-dong, et al(王 凯, 朱加雷, 焦向东, 等). Electric Welding Machine(电焊机), 2017, 47(2): 58.
- [ 3 ] Baqer Y M, Ramesh S, Yusof F, et al. Int. J. Adv. Manuf. Tech., 2018, 95: 4353.
- [ 4 ] HAN Xiao-hui, ZHANG Zhi-yi, LI Gang-qing(韩晓辉, 张志毅, 李刚卿). Electric Welding Machine(电焊机), 2018, 48(3): 1.
- [ 5 ] Hagqvist P, Christiansson A K, Heralic A. Proceedings of the IEEE Conference on Automation Science and Engineering, 2015. 900.
- [ 6 ] CAI Gui-ying, YIN Ai-han(蔡桂英, 殷爱菡). Acta Photonica Sinica(光子学报), 2006, 35(1): 52.
- [ 7 ] Sun Dawei, Cai Yan, Wang Yonggui, et al. Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(8): 1253.
- [ 8 ] HENG Hao-kun, CAI Yan, SHENG Jie, et al(衡昊坤, 蔡 艳, 盛 洁, 等). Journal of Shanghai Jiaotong University(上海交通大学学报), 2017, 51(5): 526.
- [ 9 ] ZHU Ze-zhong, SHEN Hua, WANG Nian, et al(朱泽忠, 沈 华, 王 念, 等). Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析), 2017, 37(3): 685.
- [10] Goden R, Bender R. Journal of Theoretical Biology, 1970, 29(3): 471.

## Spectral Radiation Transmission Model of Plasma in Laser Welding

WANG Nian<sup>1, 2</sup>, SHEN Hua<sup>1, 2\*</sup>, ZHU Ri-hong<sup>1, 2</sup>

1. School of Electronic Engineering and Photoelectric Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China
2. Key Laboratory of Advanced Solid-State Laser Technology, Ministry of Industry and Information Technology, Nanjing University of Science & Technology, Nanjing 210094, China

**Abstract** Understanding the distribution of the spectral radiation field of laser-induced plasma at multiple wavelengths will be helpful to acquire the distribution of the temperature field, electron density and other physical quantities of the plasma, which is significant for improving the laser welding process. Making clear the physical process of how spectral radiation transfers to detector target is the premise of reconstructing spectral radiation field of plasma. In this paper, a spectral radiation transmission model of plasma in laser welding based on optical imaging is proposed; By studying the process that plasma spectral radiation emitting to the lens of the detector based on radiometry, the coefficient  $\omega_1$  that the spectral radiation received by the lens taking up that emitting to the surrounding space of a point in the plasma is deduced so that the spectral radiation transfer model is established; by studying the imaging process that spectral radiation emits from plasma through the lens to the detector target based on the principle of optical imaging, the coefficient  $\omega_2$  that the spectral radiation received by a pixel taking up that received by the lens is deduced so that an optical imaging model is established. Then the spectral radiation ratio coefficient  $\omega$  is obtained with  $\omega_1$  and  $\omega_2$ , thus the spectral radiation transmission model is established. Through simulation experiments, the effect of spectral radiation field reconstruction of laser welding plasma with symmetrical and asymmetrical temperature distribution between 1 000 and 3 000 °C was investigated. The results showed that the reconstruction accuracy with the model presented is 5.39%, 6.5%, 7.25% and 6.11% for the plasma with symmetrical temperature distribution at 400, 500, 600 and 700 nm respectively, and 9.34%, 10.07%, 10.68% and 9.72% for that with asymmetrical temperature distribution, which means the proposed model can be used for reconstructing the spectral radiation field of laser welding plasma at 400~700 nm well. Compared with other models, this model has better reconstruction accuracy and can meet the needs of industrial applications.

**Keywords** Laser welding technology; Plasma radiation field distribution; Spectral radiation transmission model

\* Corresponding author

(Received Apr. 8, 2019; accepted Aug. 14, 2019)