

# 盘型激光焊金属蒸汽特征色调-色饱和度-亮度 分析法研究\*

高向东<sup>1)†</sup> 汪润林<sup>1)</sup> 龙观富<sup>1)</sup> Katayama Seiji<sup>2)</sup>

1) (广东工业大学机电工程学院, 广州 510006)

2) (日本大阪大学接合科学研究所, 大阪 567-0047)

(2011年9月10日收到; 2011年12月10日收到修改稿)

对于大功率盘型激光焊, 金属焊件表面在激光束辐射下强烈汽化并形成等离子体状的金属蒸汽羽状物. 该金属蒸汽羽状物可逆向激光束传输, 对激光有明显的屏蔽作用, 降低激光辐射至焊件的能量密度, 影响焊接效率和质量. 因此研究金属蒸汽特征变化规律及其与焊接质量之间的关联, 可实现由金属蒸汽特征实时监测激光焊接状态. 以 10 kW 大功率盘型连续激光焊接 304 不锈钢钢板为试验对象, 应用高速摄像机摄取金属蒸汽动态图像, 将其转换至色调-色饱和度-亮度空间, 提取金属蒸汽面积、激光束受影响路径长度等相关特征量, 以焊缝熔宽的变化作为衡量焊接状态稳定性的参数. 通过金属蒸汽特征值的均值统计和方差分析, 试验证明根据金属蒸汽面积和激光束受影响路径长度等金属蒸汽特征可有效地反映熔宽质量, 从而对焊接状况做出动态评估.

**关键词:** 大功率盘型激光焊, 金属蒸汽, 色调-色饱和度-亮度空间

**PACS:** 81.20.Vj, 95.75.Mn, 52.38.-r

## 1 引言

大功率盘型激光焊接具有功率密度高、焊接速度快、大深宽比和热影响区小等优点, 已成为一种重要的焊接技术<sup>[1-3]</sup>. 在大功率盘型激光深熔焊过程中, 金属焊件强烈气化, 在熔池上方的激光传输通道上形成弱等离子体状态的金属蒸汽. 这种激光致金属蒸汽将折射、散射及吸收激光能量, 影响焊接质量<sup>[4]</sup>. 因此金属蒸汽与焊接状态之间必然存在关联, 金属蒸汽的辐射必然蕴含着焊接质量信息. 利用光谱分析法对金属蒸汽进行研究, 发现金属蒸汽粒子密度可直接影响焊缝熔深<sup>[5]</sup>. 应用光电信号检测法分析钛合金激光焊接过程中的金属蒸汽, 证明金属蒸汽光电信号能较好地反映熔宽质量变化<sup>[6]</sup>. 根据协方差分析法对激光焊接过程中金属

蒸汽的光谱信号进行研究, 发现金属蒸汽温度与熔宽质量存在密切关系<sup>[7]</sup>. 以往金属蒸汽信号的采集易受到外界干扰, 为此提出在紫外与可见光谱段获取金属蒸汽动态图像并研究色调-色饱和度-亮度 (hue-saturation-intensity, HSI) 法分析其特征, 探索金属蒸汽特征参量与焊接质量间的关系, 为大功率盘型激光焊的实时监控提供理论和试验依据.

## 2 试验装置

试验采用大功率盘形激光焊接装置 TruDisk-10003, 激光功率为 10 kW, 激光光斑直径为 480  $\mu\text{m}$ , 激光波长为 1030 nm, 焊接速度分别为 4.5 m/min 和 3 m/min. 高速 NAC 像机的拍摄速度为 2000 f/s, 图像分辨率为 512 $\times$ 512. 摄像机采集波段为紫外光加可见光波段, 保护气体为氩气. 试件选用尺寸

\* 广东省自然科学基金 (批准号: 10251009001000001, 9151009001000020)、国家自然科学基金 (批准号: 51175095) 和高等学校博士学科点专项科研基金 (批准号: 20104420110001) 资助的课题.

† E-mail: gaofd@gdut.edu.cn

为 150 mm×100 mm×10 mm 的 304 不锈钢板, 大功率盘型激光焊接试验装置如图 1 所示.

试验采用不同的焊接速度, 通过高速 NAC 摄像机采集激光致金属蒸汽红 - 绿 - 蓝 (RGB) 图像, 分别为 2440 帧和 3600 帧, 每一帧图像对应相应的焊接瞬间状态, 图 2 为其中三帧激光致金属蒸汽的连续图像 (焊接速度 4.5 m/min). 为从金属蒸汽彩色图像中探索焊接质量信息, 应用 HSI 图像分析金属蒸汽图像特征与焊接质量之间内在关联.

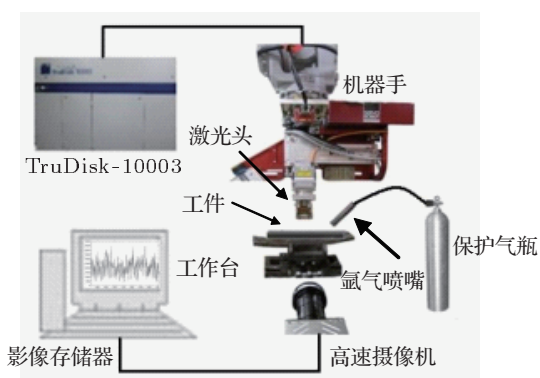


图 1 大功率盘型激光焊接试验装置示意图

### 3 HSI 空间描述

HSI 为彩色模型, 用色调 (hue)、色饱和度 (saturation 或 chroma) 和亮度 (intensity 或 brightness)

来描述色彩, 该模型将亮度分量与彩色图像中携带的彩色信息分开. 在景物认知方面, HSI 模型优于 RGB 颜色模型.

对于一帧 RGB 彩色格式的图像, 每一个 RGB 像素的  $H$  分量可用下方方程得出:

$$H = \begin{cases} \theta & \text{若 } B \leq G, \\ 360 - \theta & \text{若 } B > G, \end{cases} \quad (1)$$

其中,

$$\theta = \arccos \left\{ \frac{\frac{1}{2} [(R - G) + (R - B)]}{[(R - G)^2 + (R - B)(G - B)]^{1/2}} \right\}. \quad (2)$$

饱和度分量  $S$  由下式给出:

$$S = 1 - \frac{3}{(R + G + B)} [\min(R, G, B)]. \quad (3)$$

亮度  $I$  由下式给出:

$$I = \frac{1}{3} (R + G + B). \quad (4)$$

利用 (1)—(4) 式可得到常见颜色的色调、饱和度和强度值 [8], 式中  $R, G, B$  分别表示各个颜色空间中某像素点对应的灰度值. 在 HSI 彩色空间中, HSI 三个分量之间的相关性比 RGB 三个分量之间要小得多 [9], 另外彩色图像的每一个均匀性彩色区域都对应一个相对一致的色调, 能够用来进行独立彩色区域的分割.

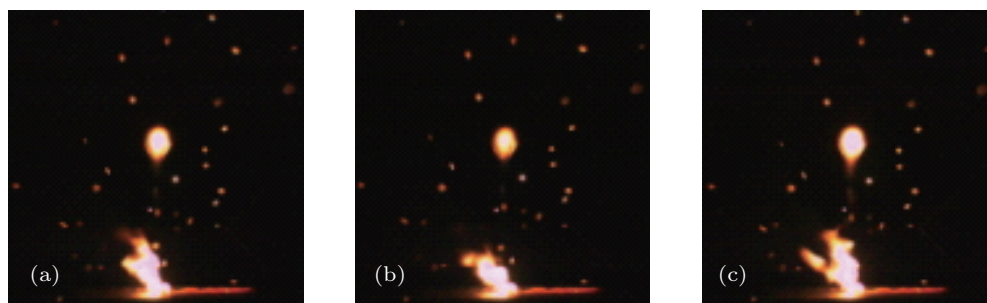


图 2 连续三帧激光致金属蒸汽图像 (a)  $t = 0$  ms; (b)  $t = 0.5$  ms; (c)  $t = 1.0$  ms

## 4 金属蒸汽图像处理与分析

### 4.1 金属蒸汽特征量的选择

金属蒸汽对激光的影响随温度和密度的增加而增加, 其温度高、密度大的区域对激光束的吸收

和散射占主要作用 [10,11], 金属蒸汽面积也反映了焊件对激光能量的吸收, 因此将金属蒸汽图像中亮度区域 (高温区域) 的面积作为特征参数之一. 由于折射作用, 激光束穿过金属蒸汽时发生畸变, 影响焊接质量. 因此, 将激光束经过金属蒸汽的路径长度也作为特征参数.



图3 金属蒸汽原始图

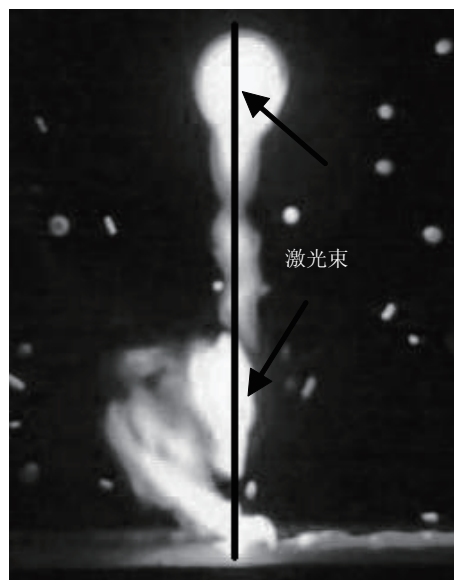


图5 激光束路径长度示意图

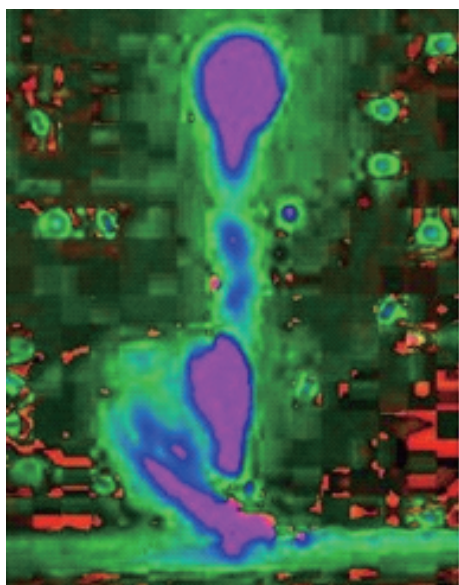


图4 金属蒸汽 HSI 图

为准确提取金属蒸汽特征参数, 将金属蒸汽图像转换到 HSI 彩色空间进行分析处理, 同时将金属蒸汽主要部分从原始图像中裁剪以减少图像处理计算量. 图3 为金属蒸汽原始图, 图4 为转换至 HSI 空间的图像. 从图3 中可以看出, 金属蒸汽中间的亮度明显高于边缘部分, 为温度和密度较高的区域, 对激光束有重要的影响作用. 该区域可在 HSI 空间图像(图4)中明显观察到. 图5 为激光束经过金属蒸汽的路径示意图, 该路径长度作为金属蒸汽特征参量.

#### 4.2 金属蒸汽图像处理

从图4 中可以清晰地分辨出金属蒸汽的高温部分, 在 HSI 彩色空间对金属蒸汽进行处理分析, 其图像处理过程如图6 所示.

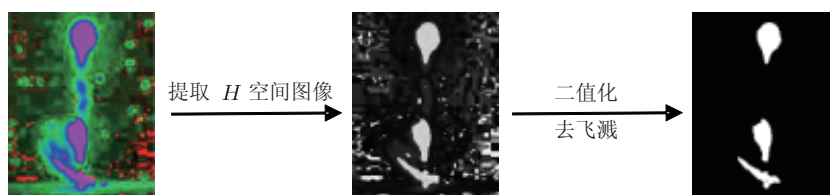


图6 金属蒸汽图像处理示意图

### 4.3 金属蒸汽图像数据分析

将所有采集到的金属蒸汽图像进行处理,得到金属蒸汽高温部分的二值图像以及各帧图像中金属蒸汽面积、激光路径长度数据.图7和图8分别为焊接速度 4.5 m/min 时的金属蒸汽面积与激光束路径长度变化曲线.图9和图10分别为焊接速度为 3 m/min 时的金属蒸汽面积与激光束路径长度变化曲线.

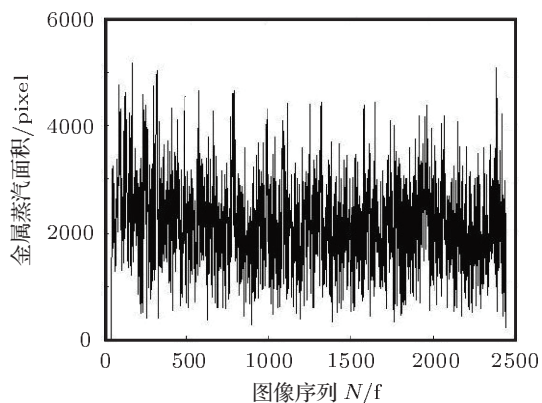


图7 金属蒸汽面积变化曲线

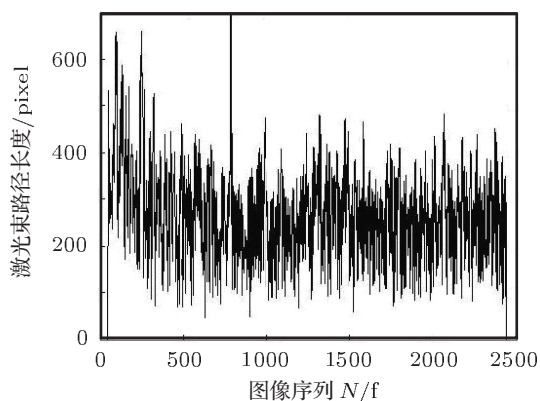


图8 激光束路径长度变化曲线

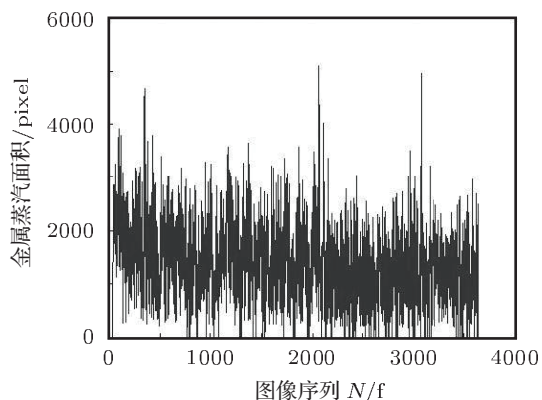


图9 金属蒸汽面积变化曲线

根据焊接效果,将焊件(对应焊接速度 4.5 m/min)定义 A, B, C 区,图像分别对应 481—1000 帧,1001—1520 帧,1521—2040 帧,其中 A 区焊接质量存在起伏,B 区焊接质量较差,C 区焊接质量稳定,如图 11 所示.图 12 为对应的熔宽值.

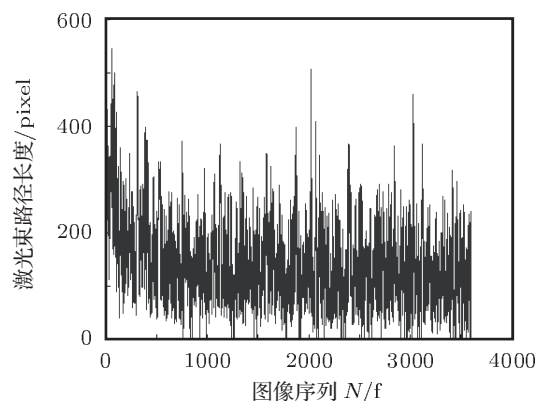


图10 激光束路径长度变化曲线



图11 A, B, C 区域对比图(焊接速度 4.5 m/min)

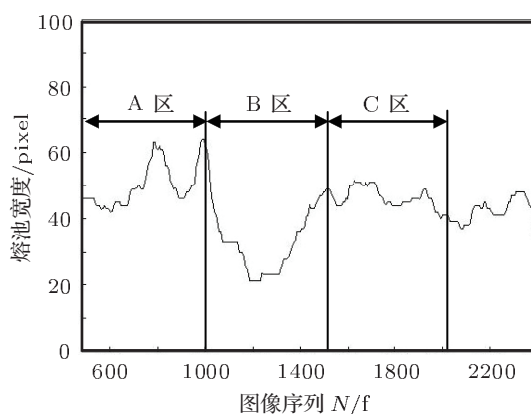


图12 熔宽变化曲线(焊接速度 4.5 m/min)

对所提取的试验数据  $x$  进行统计分析,分别用  $\bar{x}$  表示数据平均值,  $\hat{S}_x^2$  表示方差,  $S_x^2$  表示无偏差(标准差),对于  $n$  个试验数据,则  $\bar{x}$  为

$$\bar{x} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i, \quad (5)$$

方差  $\hat{S}_x^2$  为

$$\hat{S}_x^2 = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2, \quad (6)$$

无偏方差  $S_x^2$  为

$$S_x^2 = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}. \quad (7)$$

金属蒸汽面积数据统计分析如表 1 所示.

表 1 金属蒸汽面积统计分析表 (焊接速度 4.5 m/min)

	金属蒸汽面积/pixel		
	区域 A	区域 B	区域 C
平均值	2112	2073	2185
方差	186340	149990	125870
标准差	431.67	387.28	354.77

从表 1 中可以看出, C 区的金属蒸汽面积平均值明显高于 A, B 两区域, 其方差、标准差则小于 A, B 两区. 试验数据表明, C 区焊接过程中金属蒸汽面积大, 变化波动小, 证明激光能量利用率高, 焊接质量好; B 区平均值最小, 且方差和标准差较大, 焊接质量较差; A 区虽然平均值大, 但标准差亦大, 对应熔宽仍有较大波动. 激光束路径长度数据统计分析如表 2.

表 2 激光束路径长度统计分析表 (焊接速度 4.5 m/min)

	激光束路径长度/pixel		
	区域 A	区域 B	区域 C
平均值	261.94	248.83	245.27
方差	8763	7091	5771
标准差	93.61	84.21	75.97

表 2 数据显示, C 区域内激光束通过金属蒸汽的路径长度比 A, B 区均要小, 其方差、标准差亦小于 A, B 两区. 试验数据表明, 路径长度短的区域激光受折射和散射的影响小, 焊缝质量较为稳定. 经过统计分析表明, 金属蒸汽面积、激光束路径长度可有效地反映焊接质量. 为进一步观察研究结果, 对焊接速度为 3 m/min 的试验数据同样进行分段统计分析.

图 13 为焊接速度为 3 m/min 时的焊接实物图, 图 14 为对应的熔宽值. 由两图可看出, 熔宽变化不大, 焊接状况良好. 为观察金属蒸汽面积、激光束路径长度与熔宽的关系, 同样将焊件分为 A, B, C 区. A 区熔宽平均值为 75.32, B 区为 76.64, C 区为 75.45, B 区熔宽平均值稍大于其他两区. 三个区域的图像分别对应 501—1500 帧, 1501—2500 帧,

2501—3500 帧. 金属蒸汽面积、激光束路径长度统计量分析分别见表 3 和表 4. 观察表 3, 虽然标准差和方差存在一定的差异, 但是各区域金属面积平均值几乎相等, 且 B 区平均面积值稍大. 试验数据表明, 金属蒸汽面积越大, 激光能量利用率越高, 熔宽越大.



图 13 焊接实物图 (焊接速度 3 m/min)

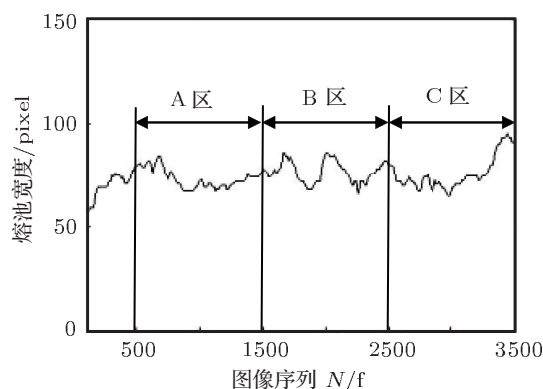


图 14 熔宽变化曲线 (焊接速度 3 m/min)

表 3 金属蒸汽面积统计分析表 (焊接速度 3 m/min)

	金属蒸汽面积 area/pixel		
	区域 A	区域 B	区域 C
平均值	1384	1398	1381
方差	476310	516410	416270
标准差	690.15	718.61	645.18

表 4 激光束路径长度统计分析表 (焊接速度 3 m/min)

	激光束路径长度/pixel		
	区域 A	区域 B	区域 C
平均值	135.23	130.23	136.58
方差	5424.32	5291.1	6021.8
标准差	73.65	72.74	77.60

观察表 4, 发现 B 区激光束路径长度平均值最小, A, C 两区相近. 试验数据表明, 激光束路径长度越短, 激光受折射、吸收和散射的影响越小, 能量传递率越高, 熔宽越大.

为进一步研究特征量与焊接质量间的关系, 分别求出两组焊接试验数据 A, B, C 三个区域的自相关函数曲线进行对比. 设  $x(t)$  为提取到的样

本记录, 则  $x(t + \tau)$  为  $x(t)$  移动  $\tau$  后的样本, 在任何  $x = x_i$  时刻, 从两个样本可分别得到两个量值  $x(t_i + \tau)$  和  $x(t_i)$ , 且  $x(t + \tau)$  和  $x(t)$  具有相同的均值和标准差. 定义自相关函数:

$$R_x(\tau) = \rho_x(\tau)\sigma_x^2 + \mu_x^2, \quad (8)$$

式中  $\rho_x(\tau)$  为

$$\rho_x(\tau) = \frac{\lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T [x(t) - \mu_x][x(t + \tau) - \mu_x] dt}{\sigma_x^2}, \quad (9)$$

其中  $\mu_x$  为样本  $x$  的均值,  $\sigma_x^2$  为样本  $x$  的方差,  $T$  为样本采样时间 [12].

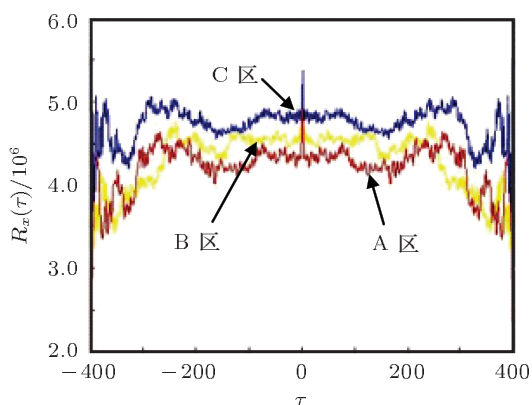


图 15 金属蒸汽面积自相关函数曲线

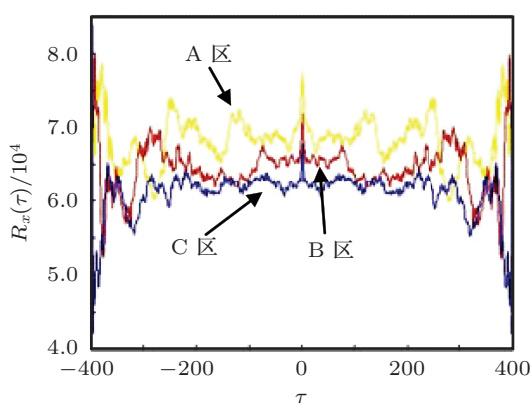


图 16 激光束路径自相关函数曲线

焊接速度 4.5 m/min 时的金属蒸汽面积自相关函数和激光束路径长度自相关函数分别如图 15 和图 16 所示. A, B, C 三个区域的特征参量经过自相关变换后, 可以清晰地看图 15 和图 16 中区分开. C 区焊接质量好, 该区域的金属面积自相关函数曲线在 A, B 之上, 激光束路径自相关函数曲线在 A, B 之下. 焊接速度 3 m/min 时的金属蒸汽面积自相关

函数和激光束路径长度自相关函数分别如图 17 和图 18 所示. 由于焊接质量比较稳定, 所以各区域的自相关函数曲线相差不大.

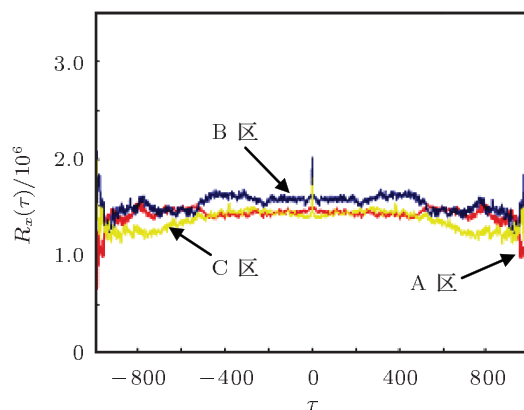


图 17 金属蒸汽面积自相关函数曲线

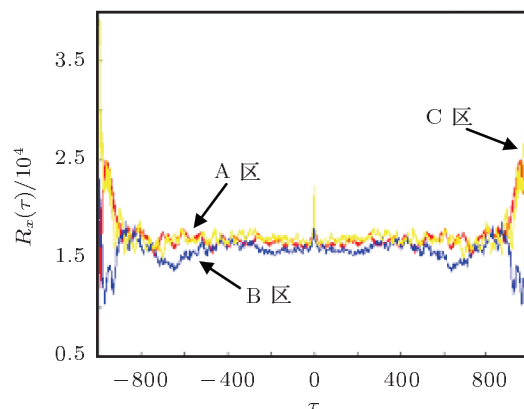


图 18 激光束路径自相关函数曲线

## 5 结论

1) 大功率 10 kW 盘型激光焊的焊接质量与金属蒸汽面积以及激光束经过金属蒸汽的路径长度有着密不可分的关系, 选取金属蒸汽面积、激光束经金属蒸汽的路径长度两个特征向量可以有效地反映焊接质量变化.

2) 当金属蒸汽面积均值较高及变化波动较小时, 表明激光束传送至焊接表面的能量稳定, 焊接质量较好; 当激光束经金属蒸汽内部的路径长度均值较短及起伏较小时, 激光束受金属蒸汽吸收、折射、散射效果的减少, 焊接质量稳定. 反之, 焊接质量较差.

3) 对不同焊接区域的特征参量进行自相关变换, 可通过其自相关变换函数曲线判断焊接质量.

- [1] Li F M, Chen G Y, Jin X Z 2009 *Opt. Laser Eng.* **47** 1117
- [2] Miranda R M, Lopes G, Quintino L 2008 *Mater. Design.* **29** 2072
- [3] Gao X D, Mo L, Zhong X G, You D Y, Seiji K 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 088105 [高向东, 莫玲, 仲训杲, 游德勇, Katayama Seiji 2011 物理学报 **60** 088105]
- [4] Cho Y T, Cho W I, Na S J 2011 *Opt. Laser Technol.* **43** 711
- [5] Su Y D 2000 *China Mech. Eng.* **12** 1389 (in Chinese) [苏彦东 2000 中国机械工程 **12** 1389]
- [6] Wang C M, Hu L J, Hu X Y, Du H B 2004 *Transactions of the China Welding Institution* **25** 83 (in Chinese) [王春明, 胡伦骥, 胡席远, 杜汉斌 2004 焊接学报 **25** 83]
- [7] Sibillano T, Ancona A, Berardi V, Lugara P M 2005 *Opt. Commun.* **139** 148
- [8] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L 2004 *Digital Image Us-*  
*ing MATLAB* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p211
- [9] Fu X J, Wang A Q 2009 *Forestry Labour Safety* **22** 17 (in Chinese) [付雪婧, 王阿川 2009 林业劳动安全 **22** 17]
- [10] Xiang J, Zheng C Y, Liu Z J 2009 *Acta Phys. Sin.* **59** 8717 (in Chinese) [项江, 郑春阳, 刘占军 2009 物理学报 **59** 8817]
- [11] Zhu B, Gu Y Q, Wang Y X, Liu H J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 1100 (in Chinese) [朱斌, 谷渝秋, 王玉晓, 刘红杰 2008 物理学报 **58** 1100]
- [12] Huang C Y, Yan P Q 2001 *Testing Technology of Mechanical Engineering* (Beijing: China Machine Press) p135 (in Chinese) [黄长艺, 严普强 2001 机械工程测试技术基础 (北京: 机械工业出版社) 第 135 页]

# Study of characteristics of plume based on hue-saturation-intensity during high-power disk laser welding\*

Gao Xiang-Dong<sup>1)†</sup> Wang Run-Lin<sup>1)</sup> Long Guan-Fu<sup>1)</sup> Katayama Seiji<sup>2)</sup>

1) (*Faculty of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China*)

2) (*Joining and Welding Research Institute, Osaka University, Osaka 567-0047, Japan*)

(Received 10 September 2011; revised manuscript received 10 December 2011)

## Abstract

During high-power disk laser welding, the surface of the weldment is gasified strongly by the laser irradiation. Meanwhile, the metal vapor plume is generated and changed into the plasma state. This plume can transmit through the laser beam reversely and has a significant shielding effect on the laser beam. Therefore, the laser power which should be transferred inside the weldment is decreased, the welding efficiency and welding quality are seriously affected. By studying and exploring the relation between the characteristics and variation rules of plume and the welding quality, the state of laser welding can be monitored in real-time by the plume characteristics. In the high-power disk laser bead on plate welding of a type 304 austenitic stainless steel plate at a continuous laser power of 10 kW, an extraviolet and visible sensitive high speed color camera is used to capture the metal vapor plume dynamic images. These digital images are transferred to the hue-saturation-intensity color spaces from the red-green-blue color spaces. Also, the area of metal vapor plume and the path length which the laser beam runs through the metal vapor plume are segmented and defined as the plume eigenvalues. The fluctuation of weld bead width is used to evaluate the stability of welding quality. By analyzing the statistics of the variance and mean values of plume eigenvalues, the experimental results confirm that the stability of the welding could be evaluated by the plume characteristics dynamically.

**Keywords:** high-power disk laser welding, metal vapor plume, hue-saturation-intensity color spaces

**PACS:** 81.20.Vj, 95.75.Mn, 52.38.-r

---

\* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 51175095), the Natural Science Foundation of Guangdong Province, China (Grant Nos. 10251009001000001, 9151009001000020) and the Specialized Research Fund for the Doctoral Program of Higher Education of China (Grant No. 20104420110001).

† E-mail: gaofd@gdut.edu.cn