

# 大功率盘形激光焊飞溅特征分析\*

高向东<sup>1)†</sup> 龙观富<sup>1)</sup> 汪润林<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7月3日收到; 2011年9月8日收到修改稿)

焊接过程的在线监控是保证激光焊接质量的关键, 为此, 首先要找到焊接过程传感特征量变化规律以及与焊缝质量间的关系. 飞溅是大功率盘型激光焊接过程中的一个重要现象, 其特征与焊接质量、焊接过程稳定性以及能量利用率等有着密切的联系. 以大功率盘形激光焊接 304 不锈钢为试验对象, 研究焊接过程中的飞溅特征. 在紫外波段和可见光波段应用高速摄像机摄取焊接过程中产生飞溅的瞬态特征, 通过计算机图像处理技术分析飞溅的数量、面积、行程和质心高度特征参量. 以焊件熔宽作为衡量焊接质量与焊接过程稳定性的因素, 对飞溅特征量进行线性和高次拟合, 研究飞溅特征参量的波动规律, 并与焊件熔宽的变化对比, 探索焊接过程的飞溅特征参量变化规律. 试验结果表明, 根据飞溅特征量变化规律能够对大功率盘形激光焊接 304 不锈钢板焊接质量做出动态评估, 为实现焊接质量的在线监控提供了试验依据.

**关键词:** 大功率盘形激光焊接, 飞溅, 图像识别

**PACS:** 81.20.Vj, 42.62.-b, 87.57.N-

## 1 引言

大功率盘形激光焊接是当前先进的激光焊接技术之一, 具有激光功率大、光束质量优良、大深宽比和极高的激光利用率等特性<sup>[1]</sup>. 在大功率盘形激光焊接过程中, 由于受到现场各种干扰因素的影响, 即使在焊接控制参数保持恒定的情况下仍然会出现焊接不稳定状态, 直接影响焊接质量. 而保证激光焊接质量的方法之一是实现焊接过程的在线监控, 为此, 首先就要找到焊接传感特征量变化规律以及与焊缝质量间的关系<sup>[2]</sup>. 飞溅是激光深熔焊过程中的一种现象, 当激光束辐射焊件使其局部熔化并形成熔池和匙孔后, 匙孔内充满金属蒸气和等离子体, 当金属蒸气量超过某个临界值<sup>[3]</sup>, 熔池底部的液态金属在冲力的作用下形成飞溅. 所以飞溅与焊接的稳定性和焊接质量有着密切的关系. 研究飞溅特征与焊接质量之间的关联是实现焊接过程在线控制的重要基础.

目前国内外对 CO<sub>2</sub> 激光焊研究较多, 在大功率激光焊接方面, 对熔池特征和等离子体特征进行光

谱和温度梯度研究<sup>[4,5]</sup>较深入. 对大功率激光焊接飞溅主要集中在飞溅金相组织、飞溅喷发状况与焊件污染关系、飞溅速度与路径的研究<sup>[6-8]</sup>, 以及通过改变大功率激光焊接条件来分析焊接质量<sup>[9]</sup>. 对大功率 (激光功率 10 kW 及以上) 盘形激光焊接的飞溅特征分析的研究较少.

激光焊接飞溅的特征量有很多, 如激光焊接飞溅在各个时刻的数量、面积、距离、速度、飞溅图像质心摆角和质心高度等. 这些特征参量在一定程度上反映了焊接质量状态. 针对大功率盘形激光焊接 304 不锈钢板, 为了更好地研究和分析飞溅特征, 应用高速摄像机摄取飞溅的瞬间变化信息. 利用图像灰度转换、维纳滤波和图像形态学等方法对飞溅图像进行处理, 并在离线情况下研究飞溅特征与焊接质量间的关联. 一旦建立了二者关联, 则为下一步焊接过程的在线监控奠定重要基础.

## 2 试验装置

试验系统如图 1 所示, 主要包括: 日本 Mo-

\* 国家自然科学基金 (批准号: 51175095), 广东省自然科学基金 (批准号: 10251009001000001, 9151009001000020) 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: gaoxid@gdut.edu.cn

toman 六关节机器人、大功率盘形激光焊接设备 TruDisk-10003、高速 NAC 摄像机和焊接工作台等. 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, 焊接速度为 4.5 m/min, 高速 NAC 摄像机的拍摄速率为 2000 f/s, 图像分辨率为  $512 \times 512$ . 为了准确获取飞溅图像, 摄像机采用紫外光波段与可见光波段进行图像采集. 保护气体为氩气, 试验采用平板堆焊, 试件选用尺寸(长宽厚)为 150 mm  $\times$  100 mm  $\times$  10 mm 的 304 不锈钢板.



图1 激光焊接试验装置结构图

### 3 焊接飞溅图像特征提取

应用高速摄像机摄取 2427 帧连续的飞溅图像, 其对应的焊缝长度为 91 mm, 通过计算机图像处理

技术提取焊接飞溅的数量、面积、距离和图像质心高度特征参量.

#### 3.1 飞溅图像预处理方法

图 2 为激光焊接飞溅图像预处理示意图. 将飞溅彩色原图 2(a) 转换为灰度图像 2(b), 然后进行维纳滤波去除噪声, 得到阈值为 35 的二值化图像 2(c), 飞溅的形状和数量与原图的形状和数量符合, 满足分析飞溅特征量的要求. 为了准确地统计飞溅的数量, 去除焊接过程中产生的金属蒸气. 利用形态学图像处理中的开运算, 即先腐蚀再膨胀, 创建一个半径为 1 像素的圆盘形结构的开运算参数. 删除小于 300(像素)的飞溅点, 得到金属蒸气图像 2(d), 然后用开运算后的图像与去飞溅的图像 2(d) 作差运算, 得到飞溅的二值图像 2(e). 再用飞溅的二值图 2(e) 与灰度图 2(b) 进行点乘就可以得到飞溅的灰度图 2(f).

#### 3.2 飞溅数量统计

具有连接分量的像素点为一个飞溅, 统计图像中的连接分量可得到飞溅的数量. 连接分量根据路径来定义, 而路径的定义则取决于邻接<sup>[10]</sup>, 连接分量的性质取决于所选的邻接方式. 最常见的邻接方式为 4 邻接和 8 邻接, 如图 3 所示. 由于飞溅的距离比较大, 所以采取 8 邻接方式统计连接分量比较准确. 利用标记函数可以统计出每帧图像的飞溅数量.

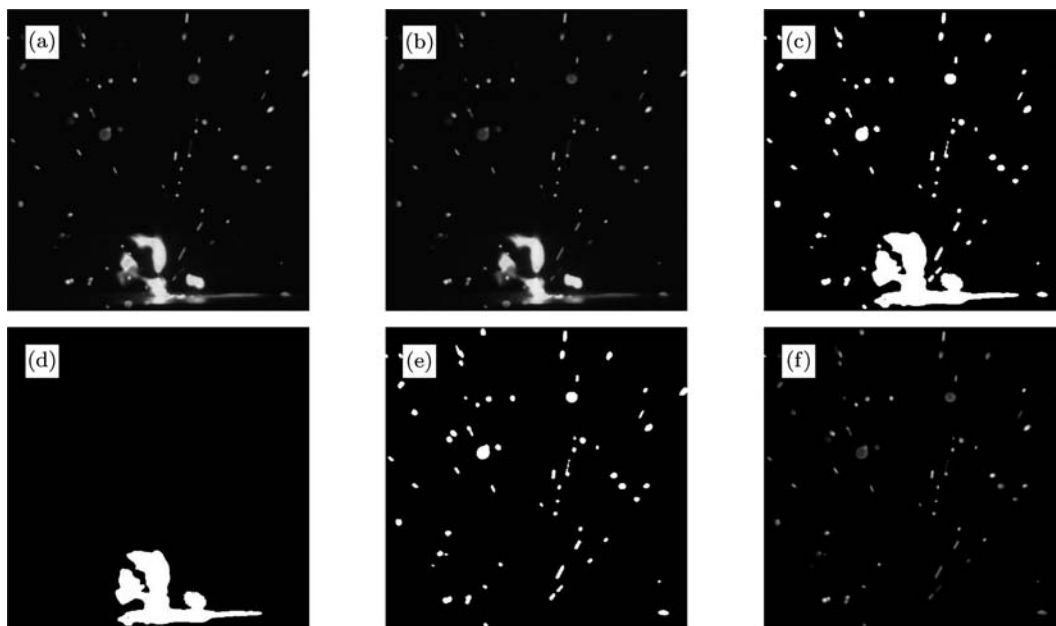
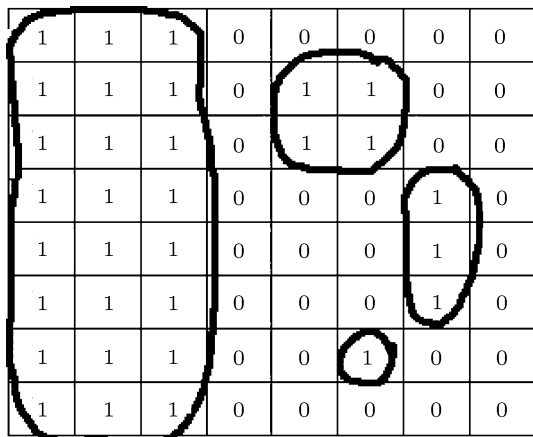
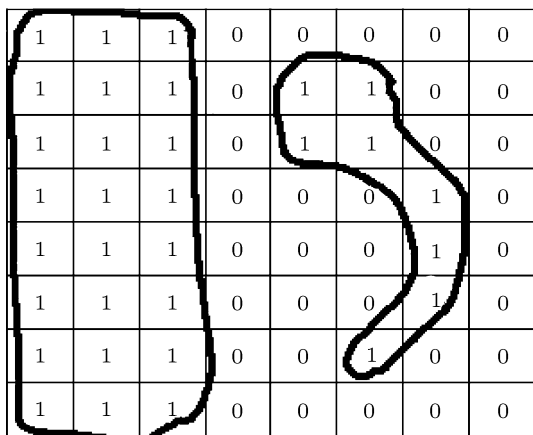


图2 激光焊接飞溅的图像处理 (a) 原始图; (b) 灰度图; (c) 二值化图; (d) 去飞溅图; (e) 飞溅二值图; (f) 飞溅灰度图



(a)



(b)

图3 连接分量图 (a) 四个 4 连接分量; (b) 两个 8 连接分量

### 3.3 飞溅面积、距离和图像质心高度的计算

通过计算飞溅二值图像的像素点数量可以得到单帧图像飞溅的面积。飞溅图像质心高度和飞溅距离定义如图 4 所示。

图像质心是指图像的灰度分布的中心，焊接飞溅的图像质心计算公式为

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times i}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \\ \frac{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j) \times j}{\sum_{j=1}^n \sum_{i=1}^m g(i, j)} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

式中  $i$  和  $j$  为图像的横和列坐标,  $g(i, j)$  为图像  $(i, j)$  处灰度值,  $m$  和  $n$  分别为一行和一列中像素的数量,  $x$  和  $y$  为质心坐标。

计算图像质心高度时首先算出质心的坐标点, 则质心高度为焊接点纵坐标与质心纵坐标之差。每个飞溅的几何中心到焊接点的距离即为飞溅距离, 飞溅距离总和为全部飞溅点到焊接点距离之和。经过处理后的飞溅二值化图像质心即为图像几何中心。飞溅距离计算公式为

$$D = \sqrt{(x - x_0)^2 + (y - y_0)^2}, \quad (2)$$

式中,  $x$  和  $y$  为焊接飞溅几何中心的坐标,  $x_0$  和  $y_0$  为焊接点的坐标,  $D$  为飞溅距离, 焊接点的坐标在焊接试验中为确定量。

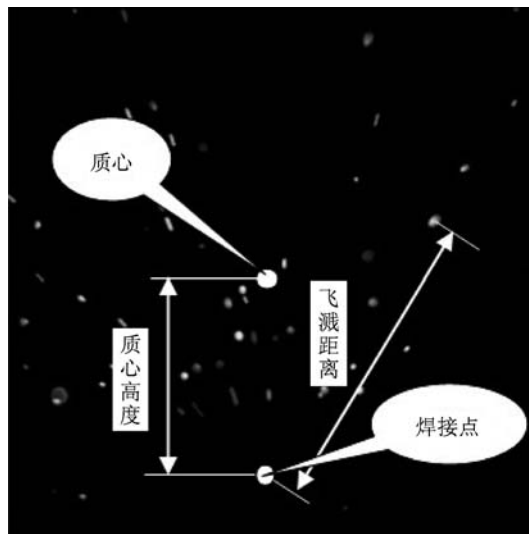


图4 飞溅质心高度和飞溅距离示意图

### 3.4 焊接飞溅图像特征分析

以熔宽作为衡量焊接质量与焊接过程稳定性的因素, 图 5 为焊接试件与熔宽对应关系图 (上部分为焊接试件, 下部分为对应的熔宽变化图)。可以清楚地看到区域 A (对应图像序列为 1066-1333) 的熔宽明显要小于其他区域的熔宽, 所以区域 A 焊接状况不稳定, 焊接质量较差。

通过分析焊接飞溅特征量的变化规律, 探索对应焊缝不同区域的特征。为此, 对飞溅特征量进行线性拟合和高次 (10 次) 拟合, 并对拟合处理的数据进行分析。设一组 (二维) 数据  $(x_i, y_i)$ ,  $i = 0, 1, \dots, m$ ,  $x_i$  互不相同, 寻求函数 (曲线)  $y_i = f(x_i)$  ( $i = 0, 1, \dots, m$ ), 使  $f(x)$  在某种准则下与所有数据进行拟合, 这里运用最小二乘拟合法 [11]。对于通用的  $n$  次 ( $n < m$ ) 多项式

$$p_n(x) = a_0 + a_1x + \dots + a_nx^n. \quad (3)$$

寻求系数  $a_0, a_1, \dots, a_n$  使得  $p_n(x)$  逼近函数  $f(x)$ 。

根据最小二乘法, 选择  $a_0, a_1, \dots, a_n$ , 使平方和值

$$S(a_0, a_1, \dots, a_n) = \sum_{i=0}^m (f(x_i) - p_n(x_i))^2 \quad (4)$$

取最小. 注意到  $S$  非负, 且是  $a_0, a_1, \dots, a_n$  的二次多项式, 则必有最小值. 为此求  $S$  对  $a_0, a_1, \dots, a_n$  的偏导数, 并令其等于零, 即

$$\sum_{i=0}^m (y_i - a_0 - a_1 x_i - \dots - a_n x_i^n) x_i^k = 0, \quad (k = 0, 1, \dots, n). \quad (5)$$

求解 (5) 式可得到相应的拟合曲线.

利用最小二乘法拟合法可以得到飞溅特征量的拟合曲线, 图 6 是飞溅数量、面积、距离和图像质心高度的曲线拟合图,  $y_i$  分别对应飞溅的数量、飞溅的面积、飞溅距离总和、飞溅图像质心高度,

$x_i$  为对应的图像序列.

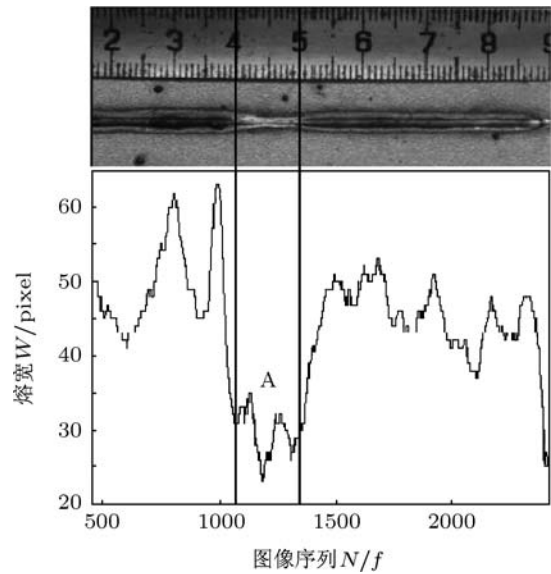


图 5 焊接试件与熔宽对应关系图

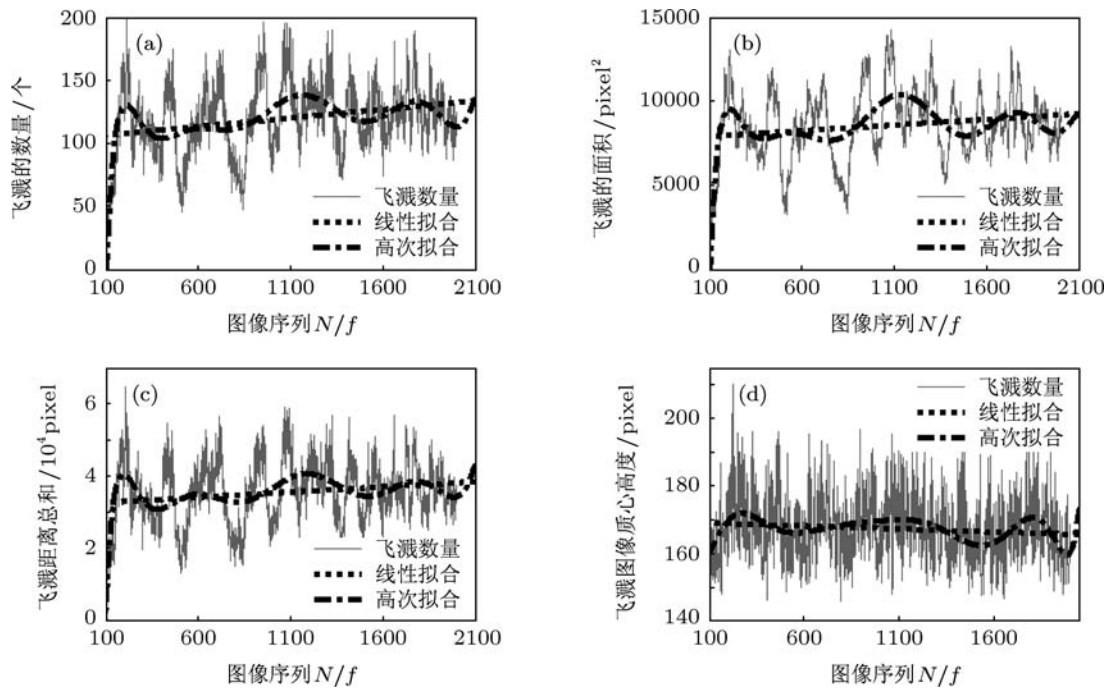


图 6 飞溅特征量拟合曲线 (a) 飞溅数量曲线拟合图; (b) 飞溅面积曲线拟合图; (c) 飞溅距离曲线拟合图; (d) 飞溅图像质心高度曲线拟合图

由图 6 可知高次拟合曲线围绕线性拟合直线周期性波动. 设相邻的两个交点为一个跨度, 跨度的距离用  $L$  表示; 每个峰值到直线的距离为偏距, 用  $D$  表示. 分别计算每个特征量拟合值的跨距和偏距的平均值和相对误差. 相对误差的计算公式为

$$\gamma_j = \left( y_j - \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q y_i \right) / \left( \frac{1}{q} \sum_{i=1}^q y_i \right), \quad i, j = 1, 2, \dots, q, \quad (6)$$

式中,  $\gamma_j$  表示相对误差,  $y_i$  分别为飞溅的数量、飞溅的面积、飞溅距离总和及飞溅图像质心高度的跨度  $L$  和偏距  $D$ ,  $i$  为数据序号,  $q$  为数据个数. 在飞溅数量和面积图中的第二与第三个峰值之间没有与直线相交, 但是都有相交的趋势, 将与直线最近的点近似作为交点进行计算. 表 1、表 2、表 3 和表 4 分别给出了飞溅数量、飞溅面积、飞溅距离和图像质心高度的数据分析结果.

表 1 激光焊接飞溅数量数据分析

No.	1	2	3	4	5	6	7	平均值
$L$	171.7154	273.8250	300.0280	476.0430	294.0272	172.0154	253.0228	277.2395
$\gamma_L$	-0.3806	-0.0123	0.0822	0.7171	0.0606	-0.3795	-0.0873	—
$D$	22.1583	6.7406	4.6983	17.3342	8.2723	4.3145	18.9713	11.7842
$\gamma_D$	0.8803	-0.4280	-0.6013	0.4710	-0.2980	-0.6339	0.6099	—

飞溅数量拟合曲线跨距  $L$ , 跨距相对误差  $\gamma_L$ , 飞溅数量拟合曲线偏距  $D$ , 偏距相对误差  $\gamma_D$ .

表 2 激光焊接飞溅面积数据分析

No.	1	2	3	4	5	6	7	平均值
$L$	205.6581	251.2867	434.3374	552.4898	378.8667	194.4274	325.6133	334.6685
$\gamma_L$	-0.3855	-0.2491	0.2978	0.6509	0.1321	-0.4190	-0.0271	—
$D$	1305.2	272.9960	553.2107	1470.4	748.1784	261.1341	895.8594	786.7112
$\gamma_D$	0.6591	-0.6530	-0.2968	0.8690	-0.0490	-0.6681	0.1387	—

飞溅面积拟合曲线跨距  $L$ , 跨距相对误差  $\gamma_L$ , 飞溅面积拟合曲线偏距  $D$ , 偏距相对误差  $\gamma_D$ .

表 3 激光焊接飞溅距离数据分析

No.	1	2	3	4	5	6	7	8	平均值
$L$	486.9662	665.7087	476.5686	866.8108	1332.6	908.8652	496.4877	666.6513	737.5823
$\gamma_L$	-0.3398	-0.0974	-0.3539	0.1752	0.8067	0.2322	-0.3269	-0.0962	—
$D$	2473.9	880.6031	262.2126	626.4987	1564.5	785.7599	338.8528	1318.9	10314
$\gamma_D$	1.3986	-0.1462	-0.7458	-0.3926	0.5169	-0.2382	-0.6715	0.2787	—

飞溅距离拟合曲线跨距  $L$ , 跨距相对误差  $\gamma_L$ , 飞溅距离拟合曲线偏距  $D$ , 偏距相对误差  $\gamma_D$ .

表 4 激光焊接飞溅图像质心高度数据分析

No.	1	2	3	4	5	6	平均值
$L$	219.5004	340.6005	583.9010	343.0005	224.0004	127.0002	306.3338
$\gamma_L$	-0.2835	0.1119	0.9061	0.1197	-0.2688	-0.5854	—
$D$	3.1913	2.2357	2.8272	4.1978	4.6035	6.0953	3.8585
$\gamma_D$	-0.1729	-0.4206	-0.2673	0.0879	0.1931	0.5797	—

飞溅质心高度拟合曲线跨距  $L$ , 跨距相对误差  $\gamma_L$ , 飞溅质心高度拟合曲线偏距  $D$ , 偏距相对误差  $\gamma_D$ .

由图 6 和表 1 至表 4 可知, 区域 A(对应图像序列为 1066—1333) 对应飞溅的数量、面积、距离和图像质心高度数据分析表的序号分别为 4, 4, 5 和 3, 对应的跨距相对误差均为最大, 分别为 0.7171, 0.6509, 0.8067 和 0.9061. 区域 A 对应的偏距相对误差分别为 0.4710, 0.8690, 0.5169 和 -0.2673. 区域 A 对应的飞溅数量、面积和距离的偏距相对误差都是正值, 相对较大, 只有图像质心偏距相对误差为负值. 结合飞溅特征量的拟合曲线也可明显看出, 质量最差的区域 A 对应的跨度最大, 而且偏距相对也较大. 激光焊接过程中的干扰因素影响激光到达焊件的能量, 从而影响熔池、匙孔的状态以及液态金属的流动状况, 导致区域 A 飞溅的喷发状况发生剧烈变化.

## 4 结论

在大功率 (10 kW) 盘形激光焊接过程中, 应用高速影像系统摄取焊接飞溅图像, 获取焊接飞溅的瞬间变化和焊接稳定性信息. 应用图像灰度转换、维纳滤波、图像二值化、开运算和图像点乘等图像处理方法对焊接飞溅图像进行处理, 准确计算出焊接飞溅的数量、面积、距离和图像质心高度, 并将其作为飞溅特征量. 通过曲线拟合方法对飞溅特征量进行分析, 试验结果表明, 飞溅特征量的高次拟合曲线围绕线性拟合直线周期性波动, 焊接质量较差部分的跨距相对误差最大, 而且偏距也相对较大. 利用跨距和偏距相对误差可以有效地评估激光焊接的质量和稳定性. 建立了飞溅特征量与焊接质

量间的关联, 得到动态判别焊接质量的方法, 为实现焊接质量在线监控提供了研究基础. 下一阶段工

作则研究用于在线监控, 此时可以利用较低速率采集图像, 减少图像处理量, 满足在线监控的实时性.

- 
- [1] Cheolhee Kim, Junghak Kim, Hyunsik Lim, Jeonghan Kim 2008 *Journal of Materials Processing Technology* **201** 521
- [2] Gao X D, Mo L, Zhong X G, You D Y, Katayama Seiji 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 088105 (in Chinese) [高向东, 莫玲, 仲训杲, 游德勇, Katayama Seiji 2011 物理学报 **60** 088105]
- [3] Xia Z L, Guo P T, Xue Y Y, Huang C H, Li Z W 2010 *Acta Phys. Sin.* **59** 3523 (in Chinese) [夏志林, 郭培涛, 薛亦渝, 黄才华, 李展望 2010 物理学报 **59** 3523]
- [4] Lu H L, Wang S J 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 354 (in Chinese) [陆赫林, 王顺金 2009 物理学报 **58** 354]
- [5] Huang Q J 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 2314 (in Chinese) [黄庆举 2008 物理学报 **57** 2314]
- [6] Gunther Schwab, Tyrone L. Vincent, John Steele P. H. September 3-5, 2008 *17th IEEE International Conference on Control Applications Part of 2008 IEEE Multi-conference on Systems and Control* San Antonio, Texas, USA
- [7] Xu Z Y, Natesan K, Reed C B, Smith D L 2000 *Refractory Metals & Hard Materials* **18** 231
- [8] Kang S K, Na S J 2005 *Welding Journal* **84** 188
- [9] Khan M M A, Romoli L, Fiaschi M, Dini G, Sarri F 2011 *Optics & Laser Technology* **43** 158
- [10] Gonzalez R C, Woods R E, Eddins S L 2005 *Digital image processing using MATLAB* (Beijing: Publishing House of Electronics Industry) p252
- [11] Wang R H 2002 *Numerical approximation* (Beijing: Higher Education Press) p89 [王仁宏 2002 数值逼近 (北京: 高等教育出版社) 第 89 页]

# Analysis of characteristics of spatters during high-power disk laser welding\*

Gao Xiang-Dong<sup>1)†</sup> Long Guan-Fu<sup>1)</sup> Wang Run-Lin<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 3 July 2011; revised manuscript received 8 September 2011)

## Abstract

Real-time monitoring and control of welding process is important for laser welding quality. Therefore, the variation rule of sensing characteristics of welding process and their relations to weld quality should be known. Spatter is one of the most important phenomena in high-power laser welding process. The characteristics of spatters are related to the quality and stability of welding and the utilization of the laser power. An approach to analyze the characteristics of spatters is investigated during high-power disk laser bead-on-plate welding of Type 304 austenitic stainless steel plates at a continuous wave laser power of 10 kW. An ultraviolet and visible sensitive high-speed video camera is used to capture the dynamic images of the laser welding spatters. The number, area, and ejecting distance of spatters and the centroid height of spatter images are calculated as the characteristic parameters of spatters by using the image processing technology. The weld bead width is considered as a parameter reflecting the quality and stability of welding process. The linear and the higher order polynomial curve fitting for the data of the characteristic parameters are used to study the variation rule of the characteristic parameters of spatters. In comparison of the fluctuation of the weld bead width, the correlation between the spatter characteristics and the quality and stability of welding is studied. The experimental results of actual laser welding show that the quality and stability of a high-power disk laser welding of Type 304 austenitic stainless steel plates could be monitored and estimated by analyzing the characteristic parameters of spatters, which is the foundation for monitoring and control of welding quality in real time.

**Keywords:** high-power disk laser welding, welding spatters, image recognition

**PACS:** 81.20.Vj, 42.62.-b, 87.57.N-

---

\* 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