

# 基于多阈值与神经网络的旋转电弧图像飞溅分析

汤泉, 石志新, 毛志伟  
(南昌大学, 南昌, 330031)

**摘要:** 为探究旋转电弧飞溅产生原因及规律, 针对高速相机采集的旋转电弧平堆焊的焊接图像, 提出了一种基于掩膜的多阈值与 BP(back propagation) 神经网络组合方法识别焊接飞溅。多阈值法获取飞溅位置及其轮廓, 再通过建立 5 特征值的 BP 神经网络模型识别飞溅。结果表明, 对于具有灰度分布范围大、背景复杂的旋转电弧飞溅图像, 该组合方法的识别准确率可达 95.76%。同时, 通过飞溅与焊丝位置的相位分析, 飞溅最大数量相位均值为 241.4°, 即焊丝末端进入熔池后约 0.14 周期位置, 主要是由焊丝末端熔滴与熔池接触导致电流激增, 电流抑制不充分造成, 该研究结果为旋转电弧焊接飞溅控制提供了依据。

**创新点:** 提出了一种基于掩膜的多阈值与 BP 神经网络组合的旋转电弧焊接飞溅识别方法。

**关键词:** 旋转电弧; 焊接飞溅; 多阈值处理; BP 神经网络; 图像处理

中图分类号: TG 444<sup>+</sup>.3 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.20211219001

## 0 序言

焊接飞溅是影响焊接质量的重要指标之一, 能反映焊接过程的稳定性及能量利用率, 控制焊接飞溅对提高焊接质量<sup>[1]</sup> 有重要意义。此外, 旋转电弧传感器中, 焊接飞溅对电流信号有着较大影响, 探究旋转电弧飞溅产生原因及规律, 有利于提高旋转电弧传感电流信号特征提取精度及提高焊接质量。焊接飞溅的主要原因是焊接过程中的熔滴内部爆炸及液桥爆炸, 而产生爆炸的主要影响因素有: 焊丝成分<sup>[2]</sup>、焊接极性<sup>[3]</sup>、电弧电压和焊接电流<sup>[4-5]</sup> 等。在气体保护焊中, 气体溢出、电流激增及电弧力增大均可导致飞溅<sup>[6]</sup>。旋转电弧熔化极气体保护焊(gas metal arc welding, GMAW) 焊由于存在焊丝回搅、旋转产生的离心力等, 飞溅成因更为复杂。

采用高速图像记录和提取焊接飞溅是分析焊接飞溅最直接、最有效的方法。针对熔化极惰性气体保护焊(metal inert-gas welding, MIG 焊) 飞溅, Shareef 等人<sup>[7]</sup> 采用单阈值法分割出飞溅。针对激光焊飞溅, Haubold 等人<sup>[8]</sup> 采用 Otus 算法二值化图

像并分割出飞溅。Yang 等人<sup>[9]</sup> 采用双自适应阈值方式提取到了飞溅并消除了噪声、飞溅粘连以及飞溅遗漏造成的分割误差。Huang 等人<sup>[10]</sup> 采用一种自适应滤波模板对含烟尘的飞溅图像进行滤波并准确提取到了飞溅的位置轮廓等信息; Tan 等人<sup>[11]</sup> 提出并行卷积神经网络和阈值神经网络方法, 可提取出 80.84% 的飞溅点。针对飞溅点识别, Xia 等人<sup>[12]</sup> 采用二维傅里叶变换与椭圆高通滤波对低频信号进行滤波并提取到了焊接工件上的飞溅点。虽然国内外学者针对焊接飞溅研究各种提取方法, 但对于背景更复杂、干扰更强烈、成因更复杂的旋转电弧焊接飞溅, 这些方法均难以有效将飞溅分割。

针对旋转电弧焊接飞溅识别与提取, 研究一种基于掩膜的多阈值与 BP 神经网络组合的新方法, 并结合焊丝相位与焊接工艺参数, 分析其产生原因及规律, 为减少甚至消除焊接飞溅提供依据, 提高旋转电弧焊接质量奠定理论基础。

## 1 旋转电弧焊接系统及焊接工艺参数

为获取旋转电弧焊接飞溅图像, 建立的采集系统主要由具有焊接电流抑制功能的 YD-350GS 焊接电源及配套送丝机(YW-35DG)、旋转电弧焊枪、焊接工件、高速相机、图形工作站、三轴机器人及其

控制器等组成,如图 1 所示。

三轴机器人及控制器实现旋转电弧焊接运动及焊接启停控制,图形工作站与高速相机实现焊接过程图像采集,并通过控制器同步采集焊丝旋转位置、焊接电流及送丝速度等信息。高速相机采用 850 nm 高通滤波片<sup>[13]</sup>,拍摄帧率为 2 500 帧/s,曝光时间为 3  $\mu$ s。焊接方式为平堆焊;焊接母材为 Q235 钢,尺寸为 300 mm  $\times$  50 mm  $\times$  5 mm。具体焊接工艺参数如表 1 所示。焊丝旋转方向及焊接方向关系如图 2 所示,点 A 为旋转电弧传感器起始点。

表 1 焊接工艺参数  
Table 1 Welding process parameters

焊接电流 I/A	电弧电压 U/V	保护气体	气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$	焊丝直径 $d/mm$	焊丝伸出长度 $l/mm$	焊接速度 $v/(mm \cdot s^{-1})$	旋转频率 $f/Hz$
180	24	20%CO <sub>2</sub> + 80%Ar	12	1.2	15	5	20

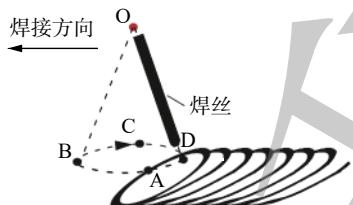


图 2 旋转电弧焊丝运动方式

Fig. 2 Movement mode of rotating arc welding wire

## 2 基于掩膜的多阈值飞溅提取

为探寻旋转电弧焊接飞溅提取的合适方法,首先需对旋转电弧焊接飞溅特征进行分析。图 3 为含有焊接飞溅的旋转电弧图像,由图 3 可知,旋转电弧焊接飞溅含有多个不同的灰度值,其背景有电弧、烟尘、焊接熔池等,基于该飞溅图像特征分析,提出了一种基于掩膜的多阈值飞溅区域提取方法。

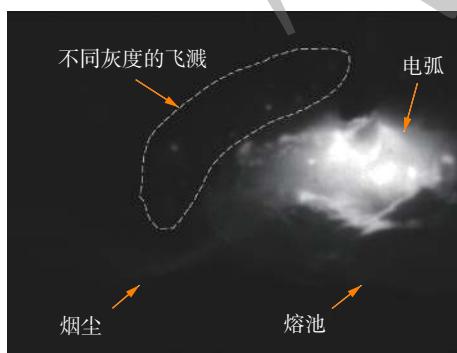


图 3 焊接飞溅的旋转电弧图像

Fig. 3 Rotating arc image of welding spatter

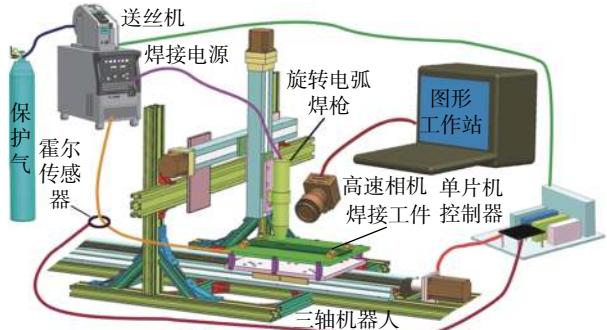


图 1 旋转电弧焊接图像采集系统

Fig. 1 Image acquisition system for rotating arc welding

首先对飞溅图像进行预处理,去除噪声;再采用多阈值处理,获取飞溅区域;最后,通过电弧与熔池掩模去除掉落于熔池内部的飞溅。

### 2.1 飞溅图像预处理

由于焊接过程中会有多种噪声干扰,主要来源于焊接过程中的大电流造成的强磁场,表现为椒盐噪声及高斯噪声。为避免在多阈值处理过程中造成干扰,采用中值滤波(图 4)与高斯滤波处理图像,高斯卷积核如式(1)所示。

(-1, -1)	(-1, 0)	(-1, 1)
(0, -1)	(0, 0)	(0, 1)
(1, -1)	(1, 0)	(1, 1)

图 4 中值滤波模板

Fig. 4 Median filter template

$$H_{i,j} = \frac{1}{2\pi\sigma^2} e^{-\frac{(i+k-1)^2 + (j+k-1)^2}{2\sigma^2}} \quad (1)$$

式中:  $\sigma$  为高斯权值,取  $\sigma = 3$ ;  $i, j$  为卷积核内相对卷积核中心坐标位置;  $k$  为卷积核半径,高斯滤波核大小为  $5 \times 5$ ,取  $k = 2$ ;  $H_{i,j}$  为该卷积核在  $(i, j)$  位置的权值。处理结果如图 5 所示。从图 5 可以看出,该预处理基本去除了这两类噪声干扰,并保留了必要的细节。

### 2.2 多阈值处理

为实现多阈值处理,提出了式(2)处理方法。

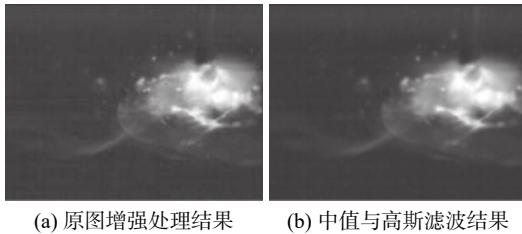


图 5 焊接图像预处理

Fig. 5 Welding image preprocessing. (a) original image enhancement processing results; (b) median and Gaussian filtering results

$$g(x, y) = \sum_{i=a}^b \{f_i(x, y) | (x, y) \notin D_i\} \quad (2)$$

式中:  $[a, b]$  包含飞溅灰度上下限的区域, 经过对飞溅图像人工分析, 飞溅的灰度值范围  $a = 20, b = 200$ ;  $(x, y)$  为像素坐标;  $f_i(x, y)$  为原图像在阈值为  $i$  的阈值处理之后在  $(x, y)$  处的值;  $D_i$  为在阈值为  $i$  时包含在最大连通域像素点的集合;  $g(x, y)$  为阈值叠加处理之后在  $(x, y)$  处的值, 处理结果如图 6 所示. 对于图 6a 中标记的飞溅点, 图 6b 处理结果包含了所有飞溅, 且包含了难分割的弱灰度值飞溅.

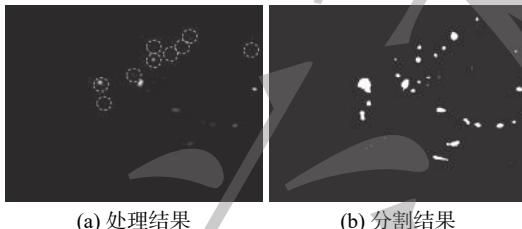


图 6 多阈值处理结果

Fig. 6 Multi-threshold processing results. (a) processing results; (b) segmentation result

### 2.3 掩膜处理

飞离熔池的飞溅会造成熔池的热量及质量减少, 因此以飞离熔池的飞溅为主要研究对象. 若经过多阈值之后有  $n$  个分割结果, 采用形态学表达式(3)去除熔池内飞溅.

$$C = \sum_{i=0}^n \{C_i | C_i \cap D \in \phi\} \quad (3)$$

$$D = M_a \cup M_b \quad (4)$$

式中:  $C$  为结果集;  $n$  为分割结果数;  $C_i$  为第  $i$  个连通域;  $D$  为熔池掩膜;  $\phi$  为空集;  $M_a$  为电弧区域掩膜;  $M_b$  为熔池掩膜. 掩膜处理后, 为进一步消除烟尘影响, 将阈值低于 2 的区域去除, 再以直径为 3 的圆形算子开操作, 结果如图 7 所示. 从图 7 可知, 该处理方法可去除熔池内部飞溅.

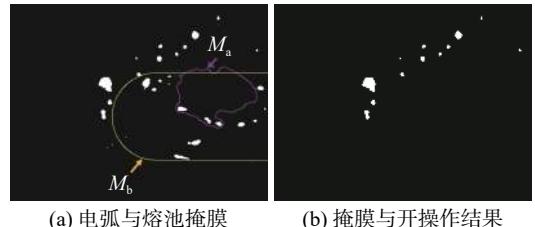


图 7 掩膜处理

Fig. 7 Mask processing. (a) arc and molten pool mask; (b) mask and open operation results

### 2.4 飞溅轮廓提取

飞溅与误检测飞溅的区别主要在于该连通域的轮廓特征及其周边环境. 因各飞溅灰度值变化较大, 采用飞溅连通域外接矩形的 ROI 内灰度值计算该飞溅分割阈值  $T$ , 即

$$T = \frac{1.5}{mn} \cdot \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n f(i, j) \quad (5)$$

式中:  $(i, j)$  为像素坐标;  $f(i, j)$  为原图  $(i, j)$  处像素值;  $m, n$  分别为该 ROI 的高宽. 处理结果如图 8 所示. 从图 8 可知, 灰度值较低的飞溅可提取出, 得出多阈值方法是可行的, 但有些并非飞溅的点也被提取, 如图 8b 中的 6, 11 号为烟尘.

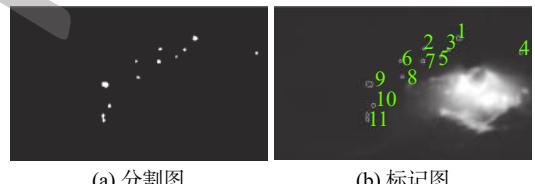


图 8 飞溅分割和标记图

Fig. 8 Segmentation and mark sheet of spatter. (a) segmentation; (b) mark sheet

## 3 基于多层 BP 神经网络飞溅识别

多阈值处理后仍有一些因熔池反光、熔滴光斑及烟尘烟雾光斑产生的误检测, 如图 9 所示.

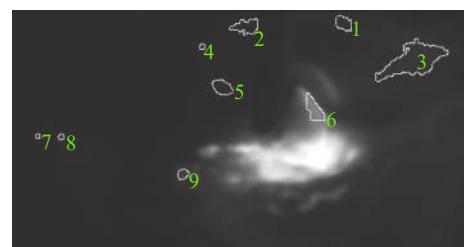


图 9 飞溅误检测

Fig. 9 Spatter misdetection

为将误检测飞溅去除, 提出基于 BP 神经网络的飞溅识别方法。BP 神经网络是一种包含了多个隐含层的网络, 广泛用于解决分类识别、压缩、回归等问题<sup>[14]</sup>。该方法的特征选取、神经网络训练及飞溅识别过程如下。

### 3.1 飞溅特征选取及神经网络训练

将连通域的轮廓特征及周边灰度特征作为主要的神经网络训练及检测特征。

设计 3 层 BP 神经网络, 以飞溅面积、圆度、外接矩形归一化图像均值、外接环形带内归一化均值、与图像边界的最小距离等 5 个特征值为输入层, 判断结果为输出层, 建立神经网络模型如图 10 所示。

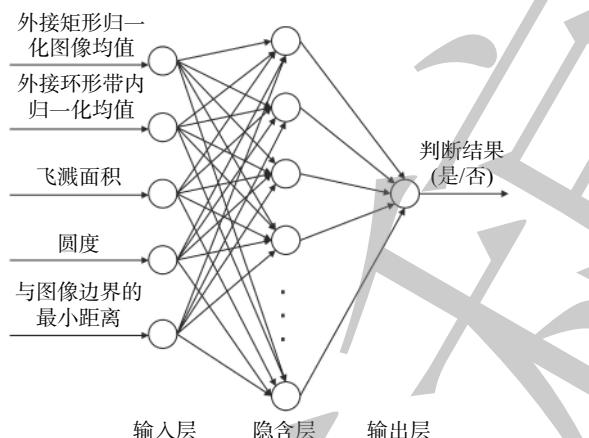


图 10 神经网络模型  
Fig. 10 Neural network model

为将训练得到的结果达到较高的准确率, 测试隐含层数的数量从 1 到 100, 且每个隐含层数训练次数为 10 000 次, 将 `tansig()` 函数作为隐含层的传递函数, 采用拟牛顿法收敛训练结果, 得到判断准确率  $\eta$  与隐含层数  $I_0$  的关系如图 11 所示。从图 11 可以看出, 局部准确率虽有波动, 但总体随着隐含层数是逐步上升, 且上升斜率逐渐放缓。取准确率

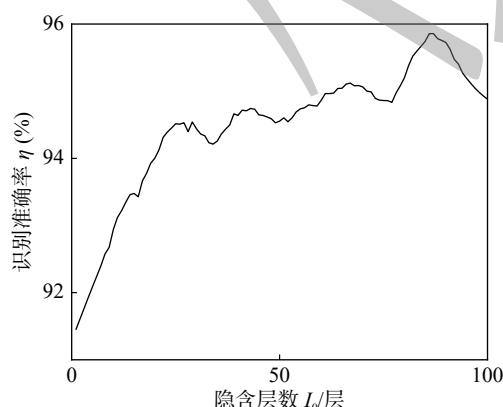


图 11 隐含层数-准确率关系

Fig. 11 Hidden layer number-accuracy rate relationship

最高值对应层数, 即准确率为 95.76% 对应的隐含层数 86 作为最终结果。

### 3.2 飞溅特征的神经网络识别

为检测上述神经网络识别效果, 建立了如图 12 的神经网络识别算法, 并对旋转电弧试验图像进行测试。图 12 中  $D_i$  为输入的判定特征值,  $i_w$  为输入层到隐含层的权值,  $l_w$  为隐含层到输出层的权值,  $b_1$  为输入层到隐含层的偏置矩阵,  $b_2$  为隐含层到输出层的偏置,  $M_r$  为归一化矩阵。图 8b 及包含复杂背景的图 9 的神经网络识别结果如图 13 所示。由图 13 可知, BP 神经网络识别的方法可识别出环境复杂的飞溅, 鲁棒性较强。

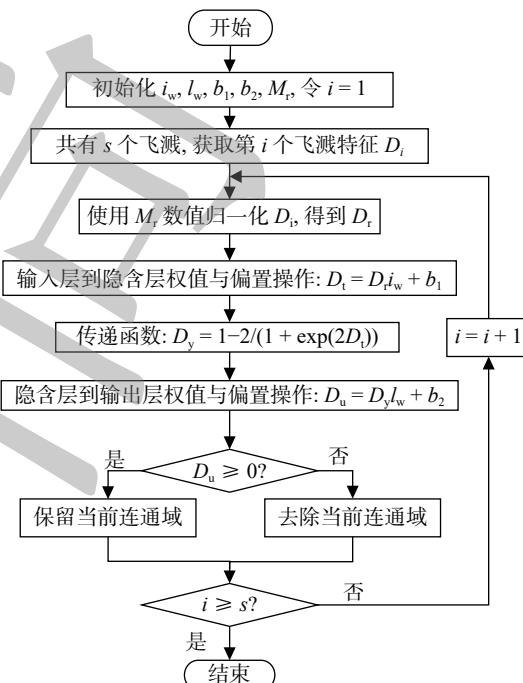
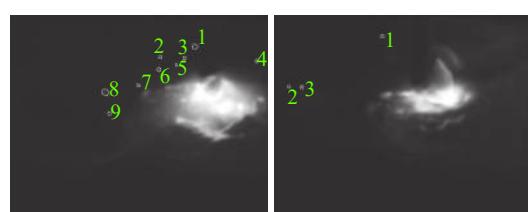


图 12 神经网络识别流程  
Fig. 12 Neural network recognition flow



(a) 图 8b 检测结果  
(b) 图 9 检测结果

图 13 神经网络识别飞溅误检测结果  
Fig. 13 Neural network recognition spatter misdetection results. (a) detection result of Fig. 8b; (b) detection result of Fig. 9

## 4 飞溅数量及旋转相位分析

为获得旋转电弧的相位上的飞溅数量及电流

关系, 采用上述方法处理并统计旋转电弧飞溅数量。处理图像并统计焊接稳定状态的时间  $t$  内飞溅数量  $n$ , 与采集到的电流  $I$  对比并划分周期, 统计周期内最大飞溅数量所在相位  $\varphi$ , 可得飞溅数量、电流与周期相位的统计如图 14 所示。

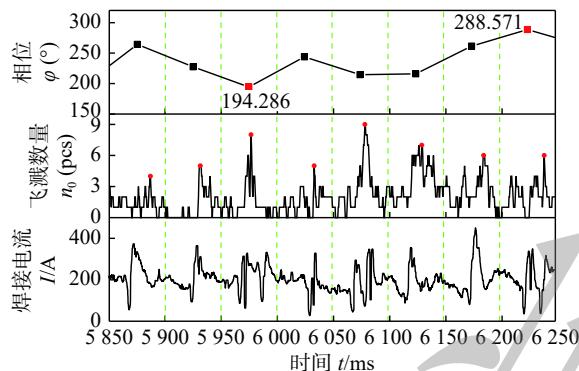


图 14 飞溅数量、焊接电流与极值相位统计

Fig. 14 Statistics of the number of spatter, welding current and extreme value phase

从图 14 的相位图可知, 最大飞溅数量所在相位大致在  $194.286^\circ \sim 288.571^\circ$  之间, 规律较为稳定, 相位均值为  $241.4^\circ$ (约为焊丝末端进入熔池之后约 0.14 周期位置), 大致位置为图 2 中的  $D$  点, 此位置为焊丝沿熔池堆高爬坡接近末端点位置。各个周期的最大飞溅数量对应飞溅图如图 15 所示。

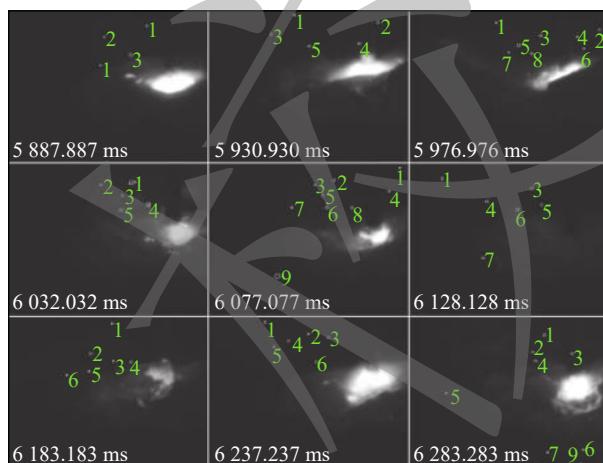


图 15 最大飞溅数量对应图像

Fig. 15 Corresponding picture of maximum spatter quantity

由图 2 可知, 焊丝在旋转过程中, CD 段是爬坡过程, 电流会急剧增大; DA 段是下坡过程, 电流逐渐下降; ABC 段既无爬坡也无下坡, 故电流较稳定; 图 15 中电流图基本符合该规律, 但由于焊接电源对电流剧增的抑制及熔池液面的振荡, 导致各周期中出现电流剧增的多次出现。

从图 15 中的飞溅数量及对应电流图可知, 最大飞溅基本都出现在电流急剧增大后, 但最大飞溅位置并非即刻出面在电流剧增结束位置, 而是大多数呈现一定的滞后(如图 15 中 1, 3, 5, 7, 8 等周期)。飞溅峰值滞后主要原因是飞溅产生后需先从熔池内飞行至熔池外才进行统计, 且由于掩膜的各向异性, 造成飞溅沿不同方向飞出熔池时间不同, 带来的滞后性的变化。飞溅飞行方向的差异还造成飞溅在相机视角内出现时间不同, 如图 15 中飞溅数量图的第 6 周期中, 飞溅在相机视角内飞行时间较长, 导致连续帧中均统计到相同飞溅, 如图 16 所示。

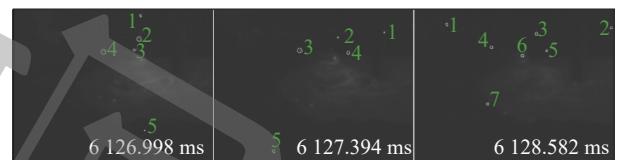


图 16 长时间飞行飞溅的图像

Fig. 16 Image of long flight spatter

对最大飞溅数量滞后性影响因素还有试验所选焊接电源带有电流剧增时电流抑制功能, 虽然该抑制策略是针对非旋转电弧焊, 但显然影响液桥爆炸程度, 典型的如图 15 中飞溅数量图中第 5, 8 周期, 焊接电源虽然对电流剧增反复抑制, 但仍有飞溅产生, 且抑制后再次电流剧增所产生的飞溅数量更多。此外, 图 15 中的飞溅数量图第 7 个周期内最大飞溅数量位置前一峰值并无焊接电流的剧增, 经过对飞溅图像分析, 主要原因为统计了落在工件上的飞溅点及前一周期中由于飞行角度在熔池内部被遮挡, 导致部分飞溅在后一周期出现, 如图 17 所示。

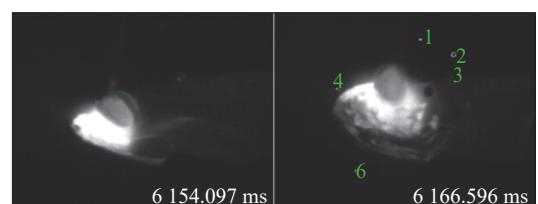


图 17 统计中断的 4 号飞溅

Fig. 17 Statistically interrupted spatter number 4

从上述分析可知, 虽然飞溅飞行角度、电源对电流剧增抑制、落于工件上的飞溅点对飞溅最大数量及位置造成了干扰, 但飞溅的主要成因为旋转电弧爬坡过程中液桥迅速减小, 电流激增, 而电流抑制不充分, 造成从而造成液桥爆炸产生飞溅。

## 5 结论

(1) 采用基于掩膜的多阈值方法可无遗漏的分离出所有飞溅位置, 提取到飞溅轮廓; 采用 BP 神经网络对飞溅特征参数进行判断, 获得了 95.76% 的识别率, 也为其它焊接飞溅识别提供了一种新方法。

(2) 通过旋转电弧飞溅的数量与旋转相位分析, 得出了飞溅最大数量的相位均值为 241.4°, 即焊丝末端进入熔池之后约 0.14 周期位置。

(3) 分析了旋转电弧焊接飞溅产生原因及规律, 主要是由焊接过程中电流激增而抑制不充分造成。

## 参考文献

- [1] You D, Gao X, Katayama S. Monitoring of high-power laser welding using high-speed photographing and image processing[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2014, 49(1/2): 39 – 52.
- [2] 刘西洋, 徐锴, 杨森森, 等. 基于表面张力的氧化物组分及含量对焊接飞溅的影响 [J]. 焊接, 2020(8): 22 – 25.  
Liu Xiyang, Xu Kai, Yang Miaosen, et al. Effect of component and content of oxide based on surface tension on welding spatter[J]. Welding & Joining, 2020(8): 22 – 25.
- [3] 张恒铭, 石玗, 李春凯, 等. 极性对细直径自保护药芯焊丝 CMT 下熔滴过渡及焊缝成形的影响 [J]. 焊接学报, 2021, 42(8): 75 – 81.  
Zhang Hengming, Shi Yu, Li Chunkai, et al. Effect of polarity on droplet transfer and weld formation of fine diameter self shielded flux cored wire under CMT[J]. Transactions of the China Welding Institution, 2021, 42(8): 75 – 81.
- [4] Lü Xiaoqing, Cao Biao, Zeng Min, et al. Effects of current waveform parameters during droplet transfer on spatter in high speed waveform controlled Short-circuiting GMAW[J]. China Welding, 2005, 14(2): 121 – 124.
- [5] Kang S, Kang M, Jang Y H, et al. Droplet transfer and spatter generation in DC-AC pulse tandem gas metal arc welding[J]. Science and Technology of Welding and Joining, 2020, 25(7): 589 – 599.
- [6] 孔海旺, 李科, 王金波, 等. CO<sub>2</sub>气体保护焊熔滴过渡与飞溅的研究 [J]. 热加工工艺, 2017, 46(11): 235 – 237.  
Kong Haiwang, Li Ke, Wang Jinbo, et al. Study on droplet transfer and spatter in CO<sub>2</sub> gas shielded arc welding[J]. Hot Working Technology, 2017, 46(11): 235 – 237.
- [7] Shareef I, Martin C. Effect of process parameters on weld spatter in robotic welding[C]//Procedia Manufacturing. 48th SME North American Manufacturing Research Conference. Cincinnati, Ohio, USA, 2020, 48: 358 – 371.
- [8] Haubold M W, Zäh M F. Real-time spatter detection in laser welding with beam oscillation[C]//Procedia CIRP. 12th CIRP Conference on Intelligent Computation in Manufacturing Engineering. Gulf of Naples, Italy, 2019, 79: 159 – 164.
- [9] Yang D, Li H, Liu S, et al. In situ capture of spatter signature of SLM process using maximum entropy double threshold image processing method based on genetic algorithm[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 131(6): 106371.
- [10] Huang Y, Hua X, Li F, et al. Spatter feature analysis in laser welding based on motion tracking method[J]. Journal of Manufacturing Processes, 2020, 55(4): 220 – 229.
- [11] Tan Z, Fang Q, Li H, et al. Neural network based image segmentation for spatter extraction during laser-based powder bed fusion processing[J]. Optics & Laser Technology, 2020, 130(3): 106347.
- [12] Xia X, Jiang Z, Xu P. A detection algorithm of spatter on welding plate surface based on machine vision[J]. Optoelectronics Letters, 2019, 15(1): 52 – 56.
- [13] Zhao Z, Deng L, Bai L, et al. Optimal imaging band selection mechanism of weld pool vision based on spectrum analysis[J]. Optics & Laser Technology, 2019, 110(9): 145 – 151.
- [14] 陈明. MATLAB 神经网络原理与实例精解 [M]. 北京: 清华大学出版社, 2013.  
Chen Ming. The principle of MATLAB neural network and the detailed explanation of examples[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2013.

第一作者: 汤泉, 硕士研究生; 主要方向为旋转电弧焊与图像处理研究; Email: t\_ocean17@163.com.

通信作者: 毛志伟, 博士, 副教授; Email: ndmao@163.com.

(编辑: 温宇航)