

# 脉冲激光焊接钛合金薄板的熔池深度预测

张健 杨锐

(天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津市现场总线控制技术工程中心, 天津 300222)

**摘要** 激光焊接过程产生的焊斑熔深直接影响焊接质量。激光焊接过程复杂, 影响因素众多, 许多参数难以量化。以 TC4 钛合金薄板为实验样品进行脉冲激光焊接实验。通过声波频谱减法对采样的声频信号进行降噪处理, 并分析了声频信号的时域和频域特征, 找到了声频信号和焊斑熔深的关系。采用径向基函数神经网络对钛合金薄板焊接过程的焊斑熔深进行预测。神经网络以声压强偏差、频带功率、激光功率和焊接速度作为输入。实验证明, 在不同激光功率下该方法可准确预测焊斑熔深。

**关键词** 激光技术; 激光焊接; 径向基函数神经网络; 声频信号; 焊接熔深

**中图分类号** TG456.7 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0303001

## Weld Penetration Depth Prediction of Pulsed Laser Welding Titanium Alloy Thin Plate

Zhang Jian Yang Rui

(Tianjin Engineering Center for Fieldbus Control Technology, Institute of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract** Depth of weld penetration is very important to laser welding quality. Laser welding is a complicated process, and quantitative analysis of this process is quite difficult. A set of TC4 titanium alloy thin plate specimens are used as laboratory samples. The acoustic signals are first preprocessed by the spectral subtraction noise reduction method and analyzed in both time and frequency domains, and a valid relationship between the acoustic signals and the weld penetration depth is deduced. Radial basis function neural network (RBFNN) models are developed to predict the weld penetration depth. Sound pressure deviation, band power, laser power and welding speed are used as input variables of RBFNN. The results show that the acoustic signal can characterize and predict the depth of weld penetration well under different laser welding parameters.

**Key words** laser technique; laser welding; radial basis function neural network; acoustic signal; weld penetration depth

**OCIS codes** 000.4430; 140.3390; 140.3580

## 1 引言

钛合金以其密度小、强度高、耐腐蚀等优点被广泛应用于航空航天领域。激光焊接具有能量集中、焊件变形小、生产效率高等优势, 非常适合钛合金材料的焊接。激光焊接钛合金薄板时的焊接熔深直接影响着焊接质量。激光焊接工艺参数对焊接质量的影响已有报道<sup>[1~4]</sup>。利用机器视觉技术可以直接观测焊斑, 并建立焊接过程的实时传感与控制系

统<sup>[5,6]</sup>, 然而利用机器视觉技术只能观测焊接时的熔池或焊接后的焊斑, 并不能提供焊接熔深的直接信息。

Cayo 等<sup>[7]</sup>研究了熔化极气体保护电弧焊 (GMAW) 过程中的声光信号和焊接参数的关系, 并研制了基于声信号的闭环焊接控制系统<sup>[8]</sup>。他们通过声信号实时监测了熔化极气体保护电弧焊的焊缝质量<sup>[9]</sup>。但对于激光焊接过程中声学信号的研究鲜

收稿日期: 2011-10-14; 收到修改稿日期: 2011-11-14

基金项目: 天津市高校科技发展基金(20070809)资助课题。

作者简介: 张健(1976—), 男, 博士, 副教授, 主要从事固体激光器及其应用等方面的研究。

E-mail: tjuzzjj@sina.com.cn

有报道。

本文以 1.5 mm 厚的 TC4 钛合金薄板为实验对象,采集了焊接过程中的声频信号。分析了声频信号的时域和频域特征,并利用径向基函数神经网络(RBFNN)对焊接熔深进行了预测。实验证明,该方法可有效预测钛合金薄板的焊斑熔深。

表 1 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %)

Composition	Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
Content	5.5~6.8	3.5~4.5	≤0.30	≤0.08	≤0.05	≤0.015	≤0.2	Rem.

## 2.2 实验装置

实验采用灯抽运 Nd:YAG 脉冲激光器,输出波长 1064 nm,最大平均功率 400 W。实验时其他参数:激光脉冲宽度 5 ms,重复频率 8 Hz;聚焦透镜焦距 60 mm,离焦量 -2.0 mm;焊接速度 100 mm/min;保护气体采用氩气,流量 4.5 L/min;实验采用两块薄板搭边焊接的方式,搭边宽度 10 mm。采用与焊接板材成 45° 的麦克风采集声频信号,麦克风距焊点 120 mm,采集的声频信号频率范围为 20 Hz~20 kHz。通过高速数据采集系统采样焊接过程中产生的声压强,数据采集系统采样频率 1 MHz。实验装置如图 1 所示。

## 2.3 实验结果

响应面法是通过响应面等值线的分析寻求最

表 2 实验参数设置

Table 2 Welding parameters in different experiments

No.	Laser power /W	Welding speed / (mm/s)	No.	Laser power /W	Welding speed / (mm/s)	No.	Laser power /W	Welding speed / (mm/s)	No.	Laser power /W	Welding speed / (mm/s)
1	250	3	8	250	4	15	250	5	22	250	6
2	275	3	9	275	4	16	275	5	23	275	6
3	300	3	10	300	4	17	300	5	24	300	6
4	325	3	11	325	4	18	325	5	25	325	6
5	350	3	12	350	4	19	350	5	26	350	6
6	375	3	13	375	4	20	375	5	27	375	6
7	400	3	14	400	4	21	400	5	28	400	6

## 3 声频信号

### 3.1 时域内的声频信号降噪

保护气体的流动产生的背景噪声对声频信号的采集有较大影响,关闭激光焊机只打开保护气体产生的背景噪声如图 3 所示。

由于图 3 中保护气体流动产生的背景噪声较稳定,可采用实测声频信号减去背景噪声的办法进行降噪<sup>[10]</sup>。图 4 为实验 1 中采集到的单脉冲声频信

## 2 实 验

### 2.1 实验样品

以表面平整的 TC4 钛合金薄板作为焊接实验板材,试件尺寸 50 mm×50 mm×1.5 mm(长×宽×厚),板材化学成分见表 1。

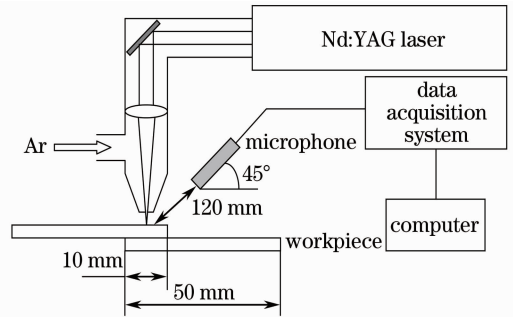


图 1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental setup  
 优工艺参数,采用多元二次回归方程来拟合因素与响应值之间函数关系的一种统计方法。采用 Minitab 软件依据响应面法设计了 28 组实验参数,如表 2 所示。焊斑截面见图 2,图中比例条为 0.5 mm。

号和降噪后的声频信号。

### 3.2 频域内的声频信号分析

实验 20 和实验 23 的功率谱密度(PSD)如图 5 所示,测量方式参见文献[10]。由图 5 可见两组实验的功率谱密度相差较大,这是由于实验 20 中熔池深度穿透了两层实验板材,而实验 23 中熔池只穿透了一层板材,两组实验表现出的声频信号的功率谱密度差异对于搭边穿透焊接的焊接方式具有一定意义。

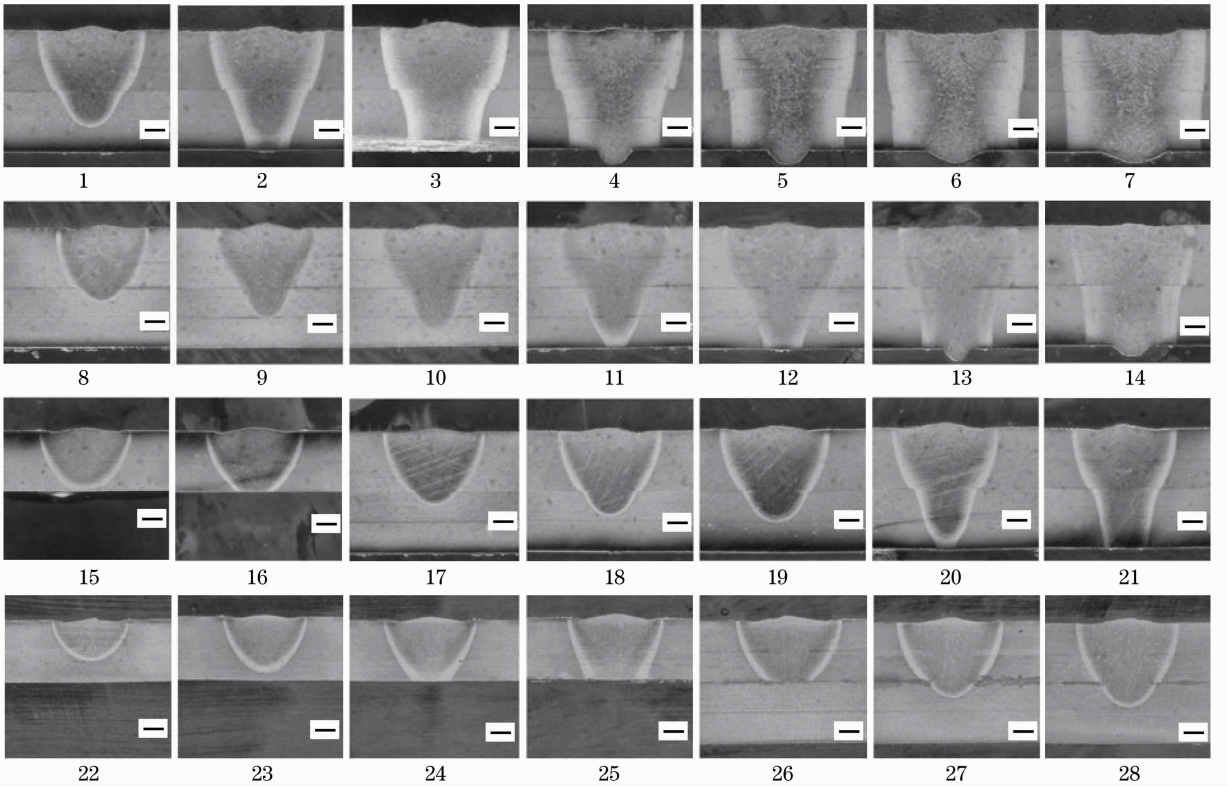


图 2 焊斑截面

Fig. 2 Cross-sectional views of the weld spots

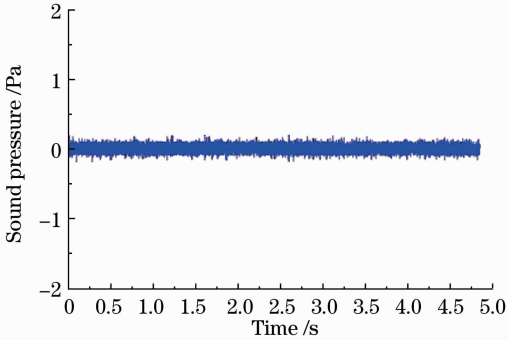


图 3 背景噪声

Fig. 3 Background noise signal

### 3.3 声频信号的特征提取

激光焊接过程产生的声频信号可用时域内的声压强偏差 (SPD,  $\Delta_{SPD}$ ) 和频域内的频带功率 [BP,  $P_B(f)$ ] 表征<sup>[11]</sup>。在第  $i$  个脉冲作用周期内, 声压强平均值为<sup>[10]</sup>

$$\bar{S}_i = \frac{1}{T} \int_0^T S_i(t) dt, \quad (1)$$

式中  $T$  为激光脉冲宽度,  $S_i(t)$  为  $t$  时刻的声压强。设某次焊接实验共有  $k$  个脉冲, 则该次实验的声压强偏差为<sup>[10]</sup>

$$\Delta_{SPD} = \frac{1}{k} \sum_{i=1}^k \bar{S}_i. \quad (2)$$

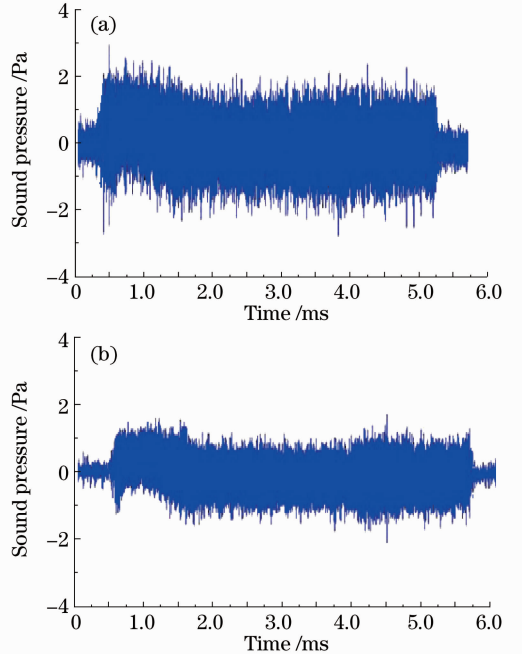


图 4 声频信号降噪。(a) 包含背景噪声的声频信号; (b) 降噪后的声频信号

Fig. 4 Acoustic signal noise reduction. (a) Acoustic signal with background noise; (b) denoised acoustic signal  
设第  $i$  个脉冲作用周期内频带功率为  $P_{Bi}(f)$ , 则频带功率为<sup>[11]</sup>

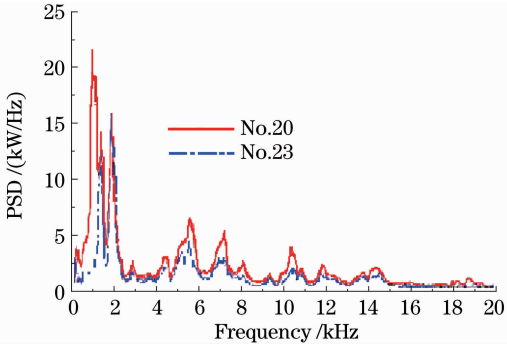


图 5 功率谱密度对比

Fig. 5 Comparison of power spectrum density

$$P_{Bi}(f) = \int_{F_{lower}}^{F_{upper}} D_{PSi}(f) df, \quad (3)$$

式中  $F_{upper}$  和  $F_{lower}$  分别为声频信号的上限和下限,  $D_{PSi}(f)$  为第  $i$  个脉冲作用周期内的功率谱密度。表 2 中第 28 组实验的 SPD 值见图 6, BP 值见图 7。

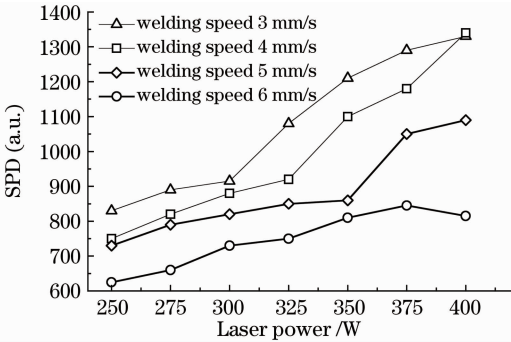


图 6 声压强偏差

Fig. 6 Sound pressure deviation

对比图 2、图 6 和图 7 可以发现,当焊斑熔深穿透两层钛合金薄板前 SPD 值和 BP 值随激光功率近似线性增加;焊斑熔深穿透两层薄板后的 SPD 和 BP 明显高于穿透前。

## 4 神经网络的建立

径向基函数神经网络是一类常用的三层前馈网

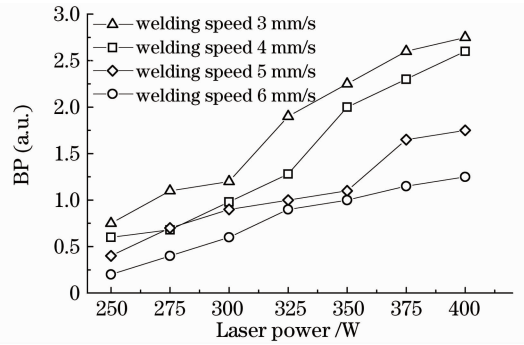


图 7 频带功率

Fig. 7 Band power

络(包括输入层,隐含层和输出层)。基函数神经网络不仅有生理学基础,而且结构简洁,学习速度快。基函数神经网络特别适于多变量非线性函数的逼近、模式识别、自适应滤波等领域<sup>[12]</sup>。

实验所采用基函数神经网络有声压强偏差、频带功率、激光功率、焊接速度四个输入节点,焊斑熔深为神经网络的输出节点。隐含层节点数选取了 5、10、15、20 四种情况。神经网络采用 sigmoid 型激活函数。采用 Matlab 软件进行网络计算,神经网络结构如图 8 所示,神经网络的实现参见文献[13]。

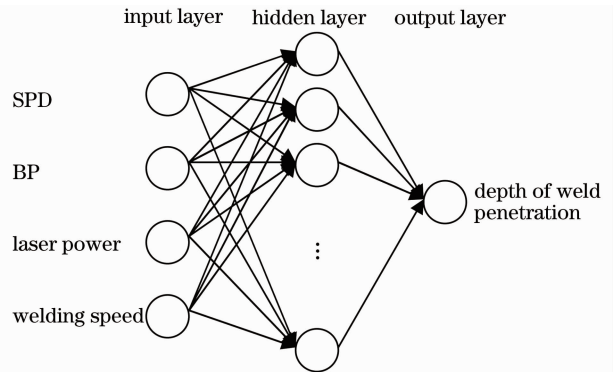


图 8 径向基函数神经网络结构

Fig. 8 Structure of RBFNN

径向基函数神经网络的输入参数需要进行归一化处理,归一化后的输入参数见表 3。

表 3 归一化后的输入参数

Table 3 Normalized input data

No.	Normalized SPD	Normalized BP	Normalized laser power	Normalized welding speed	Normalized depth of weld penetration
1	0.2922	0.2565	0	0	0.6092
2	0.3887	0.3475	0.1667	0	0.7213
3	0.4125	0.3969	0.3333	0	0.8431
4	0.5657	0.5107	0.5000	0	0.9477
5	0.7797	0.7403	0.6667	0	0.9544
6	0.8650	0.8684	0.8333	0	0.9360
7	0.9216	0.9318	1.0000	0	0.9322

No.	Normalized SPD	Normalized BP	Normalized laser power	Normalized welding speed	Normalized depth of weld penetration
8	0.1961	0.2005	0	0.3333	0.4245
9	0.2776	0.2381	0.1667	0.3333	0.5651
10	0.3893	0.3412	0.3333	0.3333	0.6586
11	0.4466	0.4458	0.5000	0.3333	0.7368
12	0.5743	0.5437	0.6667	0.3333	0.8202
13	0.6770	0.6540	0.8333	0.3333	0.9462
14	0.9126	0.9022	1.0000	0.3333	0.9171
15	0.1446	0.1066	0	0.6667	0.2483
16	0.2939	0.2467	0.1667	0.6667	0.3164
17	0.3202	0.3467	0.3333	0.6667	0.4055
18	0.3246	0.3693	0.5000	0.6667	0.5097
19	0.3516	0.3872	0.6667	0.6667	0.5717
20	0.5557	0.5434	0.8333	0.6667	0.7592
21	0.6207	0.6029	1.0000	0.6667	0.8204
22	0.0338	0.0389	0	1.0000	0.1601
23	0.0600	0.0725	0.1667	1.0000	0.2600
24	0.2964	0.2526	0.3333	1.0000	0.3748
25	0.3248	0.3488	0.5000	1.0000	0.3952
26	0.2449	0.3432	0.6667	1.0000	0.3965
27	0.3114	0.3790	0.8333	1.0000	0.5155
28	0.2529	0.4001	1.0000	1.0000	0.5482

以预测值的相对误差率[ER,  $R_E(i)$ ]评价神经网络性能,第  $i$  组实验预测值的相对误差率定义为

$$R_E(i) = \frac{|d_1(i) - d_p(i)|}{d_1(i)} \times 100\%, \quad (4)$$

式中  $d_1(i)$  与  $d_p(i)$  分别为第  $i$  组实验实测与预测熔池深度,为保证神经网络输入数据的完备性,以第 1,3,5,7,9,11,13,15,17,19,21,23,25,27 组实验数据对神经网络进行训练,以其余 14 组实验数据评价神经网络对焊斑熔深的预测性能。

隐含层节点数分别为 5,10,15,20 时,图 8 所示径向基函数神经网络对焊斑熔深预测的平均相对误差率如表 4 所示。

表 4 预测结果

Table 4 Prediction results

No.	Number of hidden layer joints	Mean of ER / %
1	5	8.50
2	10	10.56
3	15	7.85
4	20	5.56

以表 4 中预测效果最好的第 4 种径向基函数神经网络对第 2,4,6,8,10,12,14,16,18,20,22,24,26,28 组实验数据进行预测,结果如图 9 所示。

由图 9 可见,预测结果与实测结果保持了较高的一致性(预测误差见表 5),证明了上述方法对于

预测脉冲激光焊接 TC4 钛合金薄板焊斑熔深的有效性。

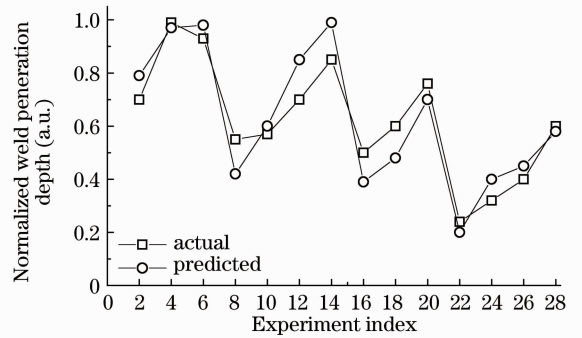


图 9 预测和实测结果对比

Fig. 9 Comparison between predicted and actual results

表 5 预测误差

Table 5 Prediction error

No.	Error / mm	No.	Error / mm	No.	Error / mm
2	0.118	12	0.140	22	0.110
4	0.010	14	0.132	24	0.122
6	0.122	16	0.118	26	0.108
8	0.130	18	0.120	28	0.007
10	0.012	20	0.090		

## 5 结 论

本文以 1.5 mm 厚 TC4 钛合金薄板为实验对

象,采用搭边焊接的焊接方式,进行了焊接实验。分析了脉冲激光焊接过程中产生的声频信号的时域和频域特征。利用径向基函数神经网络对焊接熔深进行了预测。结果证明该方法可以较有效地预测脉冲激光焊接 TC4 钛合金薄板的熔池深度。

## 参 考 文 献

- 1 Wang Wenxian, Zhang Ya'nan, Cui Zeqin *et al.*. Study on microstructure and properties of double ultra-thin stainless steel clad plate by laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503002  
王文先, 张亚楠, 崔泽琴 等. 双面超薄不锈钢复合板激光焊接接头组织性能研究[J]. 中国激光, 2011, **38**(5): 0503002
- 2 Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong *et al.*. Weld joint forming of thin hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603014  
马广义, 吴东江, 王占宏 等. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603014
- 3 Gong Weihui, Chen Yuhua, Lü Zhen *et al.*. Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding [J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603008  
龚伟怀, 陈玉华, 吕 榛 等. 0.2 mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. 中国激光, 2011, **38**(6): 0603008
- 4 Liu Huixia, Xiang Baozhen, Xu Zhenkai *et al.*. Process parameters optimization of Nd:YAG pulsed laser welding based on Taguchi method [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(S1): 350~357  
刘会霞, 向宝珍, 许贞凯 等. 基于田口方法的 Nd:YAG 脉冲激光焊接工艺参数优化[J]. 中国激光, 2010, **37**(S1): 350~357
- 5 Wang Baoguang, He Zhonghai, Liao Yibai *et al.*. Study on calibration methods of structured light sensor [J]. *Chinese J. Lasers B*, 2002, **11**(3): 198~204
- 6 Chaoyang Han, Jianxun Li, Xiao Chen *et al.*. Real-time restoration of rotational blurred image using gradient-loading[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 334~337
- 7 E. Huanca Cayo, S. C. Absi Alfaro. Relationship between geometric welding parameters and optical-acoustic emissions from electric arc in GMAW-S process[J]. *Journal of Achievements in Materials and Manufacturing Engineering*, 2011, **46**(5): 79~87
- 8 Eber Huanca Cayo, Sadek Crisostomo Absi Alfaro. A non-intrusive GMA welding process quality monitoring system using acoustic sensing[J]. *Sensors*, 2009, **9**(9): 7150~7166
- 9 E. H. Cayo, S. C. Absi Alfaro. Welding quality measurement based on acoustic sensing [C]. ABCM Symposium Series in Mechatronics, 2008, 571~579
- 10 E. Saad, H. Wang, R. Kovacevic. Classification of molten pool modes in variable polarity plasma arc welding based on acoustic signatures [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2006, **174**(5): 127~136
- 11 D. G. Manolakis, V. K. Ingle, S. M. Kogon. Statistical and Adaptive Signal Processing [M]. Boston: McGraw-Hill, 1999. 227~232
- 12 Dean Deng, Wei Liang, Hidekazu Murakawa. Determination of welding deformation in fillet-welded joint by means of numerical simulation and comparison with experimental measurements [J]. *Journal of Materials Processing Technology*, 2007, **183**(3): 219~225
- 13 Zhang Jian, Yang Rui. Prediction on light intensity distribution of laser welding melt pool based on radial basis function neural network [J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(7): 1856~1860  
张 健, 杨 锐. 基于径向基函数神经网络的激光焊接熔池光强分布预测 [J]. 中国激光, 2010, **37**(7): 1856~1860

栏目编辑: 宋梅梅