

非对称角根焊中焊枪偏移与熔透形态的关系

岳建锋, 许凯, 刘文吉, 沈振乾

(天津工业大学 天津市现代机电装备技术重点实验室, 天津 300087)

摘要: 中厚板单侧开 V 形坡口角焊缝由于两侧结构不对称, 根部焊接时散热差异大, 易产生未熔合缺陷。为保证根部打底焊良好熔透成形, 提出根据正面熔池形貌变化实时调整焊枪角度的策略, 提升焊接熔透质量。结果表明, 随着焊接角度变化, 焊枪相对熔池发生了有规律位置偏移。对采集到的正面熔池图像进行中值滤波等处理后获取焊枪中心的位置坐标, 并研究了不同角度焊接的内部熔透形态, 建立了熔池正面焊枪位置偏移量与内部熔透形态的定量关系, 为利用正面熔池特征信息预测控制焊接内部熔透形态提供了一种新的方法。

关键词: 非对称角焊缝; 焊枪角度; 熔透形态; 图像处理

中图分类号: TG 444 文献标识码: A doi: 10.12073/j.hjxb.2019400238

0 序 言

在桥梁、船舶、工程机械等承重箱梁构件或 T 形构件中存在许多由中厚板单侧 V 形坡口构成的不等厚非对称角焊缝, 这种焊缝的优势在于只需单侧加工, 生产成本低, 可快速实施自动化焊接。由于非对称焊缝结构呈现出一厚一薄, 导致散热差异较大, 根部熔透良好成形难以控制, 易形成未熔合缺陷^[1-3], 目前非对称角根打底焊中为保证焊接全熔透基本上都采用手工焊接。基于内部熔透检测相对困难, 而表面熔池特征信息的获取相对容易, 因此可根据熔池视觉特征信息变化调节焊接参数从而实现熔透的预测和控制^[4-6]。焊接中焊枪角度变化会直接影响到焊缝热输入和焊缝熔透成形, Parvez 等人^[7]对 304 不锈钢在焊枪角度为 70° 和 90° 条件下的焊缝成形进行研究, 表明焊枪角度的不同导致热流的热传导和热对流改变, 使得焊缝形态不同。蒋凡等人^[8]研究了焊枪行走角度对焊缝成形的影响, 其从能量传递的角度分析, 焊枪行走角的变化引起熔池能量密度和焊缝固定位置能量输入改变, 导致熔池熔宽变化, 从而影响焊缝成形。上述研究对象都集中于对称结构焊缝, 而对于单边 V 形坡口构成的非对称结构角焊缝则研究较少。

中厚板单侧开 V 形坡口的非对称角焊缝, 在进行打底焊时, 焊工为了保证熔透质量会密切观察正面熔池, 判断熔透形态, 实时调节焊枪倾角, 保证焊接质量。在试验过程中发现改变焊接角度, 焊枪在正面熔池图像中的位置发生了有规律偏移, 且角焊缝内部横截面熔透形态也相应发生了变化, 文中对此进行了系统的研究, 利用图像处理算法获取钨极在熔池图像中的位置坐标, 并建立了焊枪位置偏移与内部熔透形态的定量关系, 为非对称角焊缝熔透形态控制提供了新的检测方法。

1 试验系统及试验方案

1.1 视觉试验系统组成

视觉传感系统由加拿大 Xiris 生产的 XVC - G 型 CCD 摄像机、图像采集卡以及中心波长为 650 nm 的窄带滤光片构成(图 1)。CCD 相机固定在自动焊机器上并且相机与水平面的夹角为 60°。

1.2 试验条件

非对称角焊缝焊接试验使用时代 TDW4000 脉冲 TIG 焊焊机, 采用填丝 TIG 焊接方法, 材料为 Q235, 焊接电流工作频率设为 2 Hz, 焊接速度为 3 mm/s, 送丝速度为 6. 6 mm/s, 保护气体为 Ar。非对称角焊缝两侧板尺寸 170 mm × 50 mm × 10 mm, 其中一侧板开坡口, 坡口角度为 60° 且坡口厚度为 2 mm。焊枪角度 θ 为焊枪与角焊缝开坡口侧的实

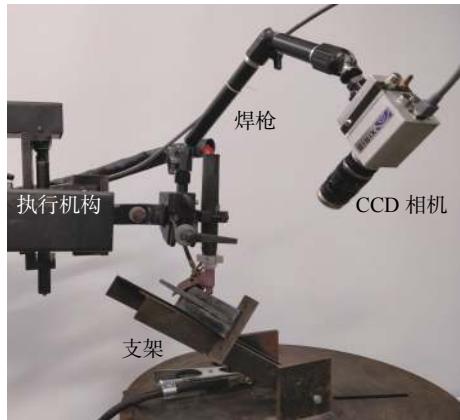


图 1 试验系统图
Fig. 1 Testing system diagram

际夹角, θ 取值 15° , 30° , 45° 进行试验, 焊接参数如表 1。取焊后焊接试件中段, 沿垂直于焊缝轴线方向截取试样, 切割、打磨、抛光后并用腐蚀剂进行腐蚀, 在金相显微镜下观察不同组角焊缝的熔透情况。

表 1 焊接参数
Table 1 Welding specification

焊枪角度 $\theta/(^\circ)$	基值电流 I_b/A	峰值电流 I_t/A	气体流量 $Q/(L \cdot min^{-1})$
15	50	160	10
30	50	160	10
45	50	160	10

1.3 试验方法

焊接前调整支架与水平面的夹角, 消除熔池流淌对于熔池形态的影响, 两侧板的放置方式如图 2 所示。焊接过程中非对称角根焊中电弧与两侧板存在有一定的角度, 输入的电弧热分解后作用于两侧板, 一定方向上电弧热输入热量 Q 可分为水平部分 Q_x 和竖直部分 Q_y , 分别作用于侧板和底板, 并影响其熔深。

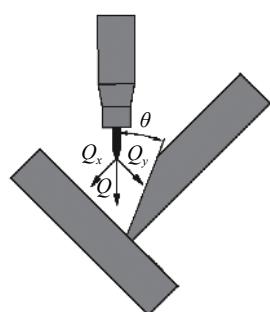


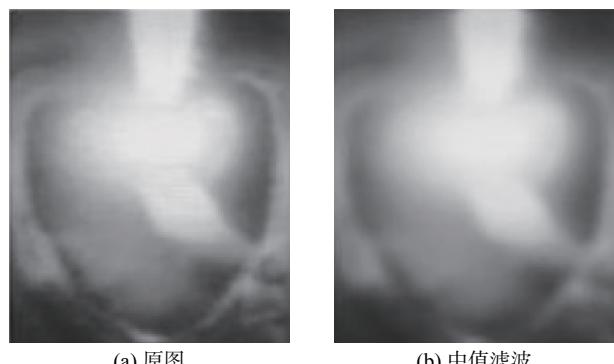
图 2 电弧能量分配
Fig. 2 Arc energy distribution

调节焊枪角度, 改变电弧热在角焊缝中的分布情况 (Q_x 和 Q_y 的大小), 研究热分布的改变与角焊缝熔透形态的变化和钨极在熔池中位置的偏移之间的关系。

2 熔池图像处理

2.1 空域滤波

TIG 焊焊接时弧光干扰较强, 选取脉冲焊焊接电源并在基值电流段获取熔池图像, 容易获得较为清晰的图像。熔池图像滤波处理如图 3 所示。图 3a 为焊枪角度为 30° 时 CCD 相机采集到的熔池图像。获取的熔池图像中有较多由于脉冲电流产生的噪声, 在图像的空域上使用 $7 \text{ pixel} \times 7 \text{ pixel}$ 模板的中值滤波对图像进行滤波, 图 3b 为中值器模板处理后的图像。



(a) 原图 (b) 中值滤波

图 3 熔池图像滤波处理
Fig. 3 Welding pool image filtering

2.2 巴特沃斯高通滤波

角焊缝焊接过程中, 由于其结构特殊导致两侧板上反射的弧光会干扰熔池边缘的灰度分布, 仅仅在空域上滤波, 无法取得较好的效果。利用傅里叶变换在图像频域上对图像进行处理, 可以去除较多的噪声及减弱反射弧光对熔池图像的干扰。

熔池图像边缘是图像灰度发生骤变处, 其对应于图像频谱中的高频部分, 利用高通滤波器衰减低频分量, 实现对图像的锐化从而突出边缘。常用的频域高通滤波器为巴特沃斯高通滤波器, n 阶截止频率为 D_0 的巴特沃斯低通滤波器的传递函数^[9] 为

$$H(u, v) = \frac{1}{1 + [D_0/D(u, v)]^{2n}} \quad (1)$$

$$D(u, v) = [(u - M/2)^2 + (v - N/2)^2]^{1/2} \quad (2)$$

式中: D 为指定的非负数; $D(u, v)$ 表示点 (u, v) 到滤波器中心的距离; u 和 v 表示像素水平和竖直方向坐标; M, N 表示频率矩形的长宽。

高频滤波后的图像,由于滤掉了频域中的低频成分,其背景的灰度级减小到接近黑色,丢失较多细节,但熔池边界得到较为明显的加强,如图 4 所示。



图 4 巴特沃斯高通滤波

Fig. 4 Butterworth high pass filtering

2.3 高频加强滤波

高通滤波器会偏离直流分量的 0 项,从而减少了图像中平均值为 0 的值,通过将高通滤波器加上一个偏移量并乘以一个大于 1 的常数进行补偿,即为高频加强滤波。高频加强滤波的传递函数为

$$H_s(u, v) = a + bH(u, v) \quad (3)$$

式中: a 是偏移量; b 是乘数; $H(u, v)$ 为高通滤波器的传递函数。乘数突出了高频部分,同时增加了低频部分的幅度,但当 a 和 b 取较小的值时图像的高频增强强于低频增强。

试验中 a 取 0.8 且 b 取 2 时,经高频加强滤波处理后的熔池图像如图 5。高频滤波后图像灰度动态范围被压缩,使图像细节丢失,图像整体较暗。通

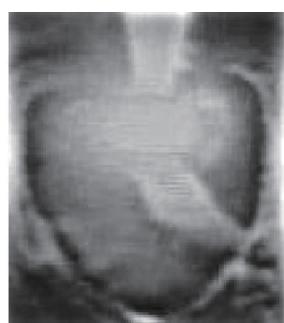


图 5 高频加强滤波

Fig. 5 High frequency enhanced filtering

过高频加强滤波突出了高频部分同时也增加了低频分量,得到了较好的滤波效果。

2.4 直方图均衡化

滤除高频后导致边缘模糊,需要提高熔池图像的对比度。直方图均衡化利用灰度变换自动调节扩大图像的动态范围,提高了对比度和灰度色调的变化,使图像更加清晰。直方图均衡化处理后的熔池图像边界会凸显出来如图 6 所示,便于后续处理。

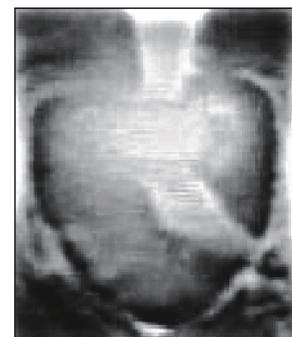


图 6 直方图均衡化

Fig. 6 Histogram averaging

2.5 图像的边缘提取和拟合

试验中对于预处理后的熔池图像直接使用 Canny 双阈值进行边缘检测^[10]。Canny 双阈值检测是指对 $F(x, y)$ 作用两个阈值 T_1 和 T_2 ,则 $F(x, y)$ 中像素大于高阈值 T_2 的点为边缘,小于低阈值 T_1 的不是边缘,介于两个阈值之间的,如果其邻接像素有大于高阈值的则为边缘,反之则不是。Canny 双阈值不仅可以检测出边缘也可以去除伪边缘。提取后的熔池图像边缘有断点,不利于后续提取熔池中心,利用多项式对熔池图像边缘进行分部拟合,得到较为完整的边缘,焊枪只需要进行简单的直线拟合,结果如图 7 所示。

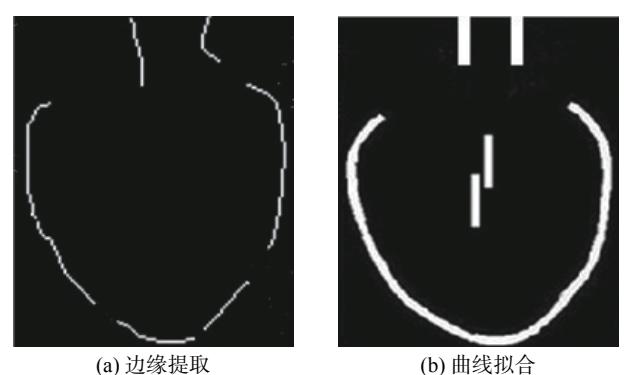


图 7 熔池图像的边缘提取和曲线拟合

Fig. 7 Edge extraction and curve fitting of weld pool image

3 熔池中心的偏差提取

正面熔池图像中心的提取和钨极中心的差值即为焊枪的相对偏差值, 而相对偏差值与焊枪角度有着某种关联, 提取相对偏差可为识别焊枪角度打下基础. 设钨极中心和正面熔池中心重合时相对偏移为 0, 钨极中心在其右侧为偏移为负, 左侧为正. 提取正面熔池图像边缘轮廓横坐标的最小值记为 P_{\min} 和最大值记为 P_{\max} . 熔池中心的横坐标为

$$P_w = P_{\min} + \frac{P_{\max} - P_{\min}}{2} \quad (4)$$

钨极位于图像的顶端, 只需要从顶部搜索获取同行的两个点记为 C_{\min} 和 C_{\max} , 钨极中心的横坐标为

$$C_w = C_{\min} + (C_{\max} - C_{\min})/2 \quad (5)$$

如图 8, 熔池图像中两条细线分别表示钨极中心(图 8 中上部分实线)和熔池图像中心(图 8 中下部分实线), 得到熔池图像中心坐标 P_w 、焊枪中心坐标 C_w 和相对偏差量 Δ_w , 具体偏差如表 2 所示.

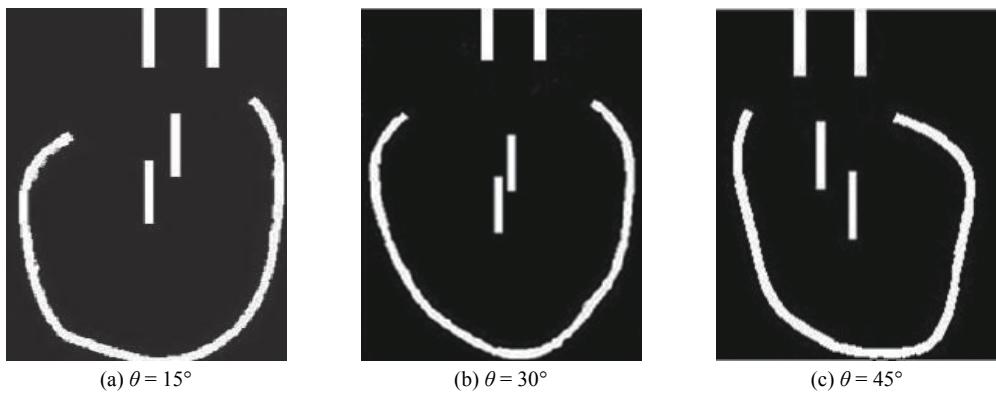


图 8 熔池偏差示意

Fig. 8 Molten pool deviation

表 2 偏差提取结果

Table 2 Deviation extraction result

焊枪角度 $\theta/(\text{°})$	熔池中心坐标 $P_w(\text{pixel})$	焊枪中心坐标 $C_w(\text{pixel})$	偏差值 $\Delta_w(\text{pixel})$
15	104	121	-17
30	98	106	-8
45	103	82	21

4 试验结果及讨论

图 9 中开坡口侧板位于图像的右侧, 未开坡口

侧在图像的左侧. 可以看出随着焊枪角度的增加, 焊枪在熔池中的位置由右侧向左侧移动.

图 9a 中焊枪与厚板成 15°, 即焊枪与图中右侧板 15°夹角, 由图可知焊枪偏向右侧即开坡口侧. 由于开坡口侧热输入较少, 母材熔化较少, 而未开坡口侧热输入变大, 熔化更多的金属. 未开坡口侧的熔池会变大, 开坡口侧处的熔池则会减小, 反映在熔池图像中就是本应在熔池中心的焊枪向厚板开坡口侧靠近, 偏向熔池图像的右侧.

图 9b 中焊枪角度与厚板为 30°, 焊枪和角焊

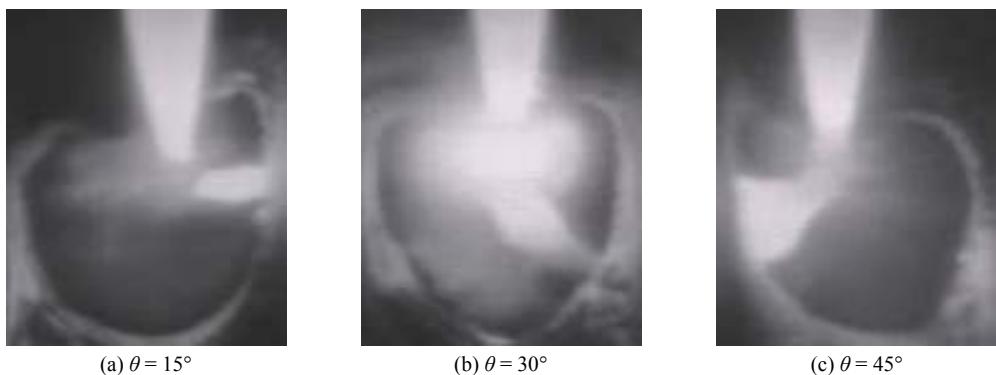


图 9 不同焊枪角度熔池图像

Fig. 9 Weld pool image with different welding torch angles

缝两侧板的夹角相等,角焊缝两侧热输入 Q_x 和 Q_y 相等,由单侧 V 形坡口构成的非对称角焊缝,由于坡口的存在,角焊缝处两侧厚度不相同,导致角焊缝两侧散热能力不同,焊枪中心与熔池中心并不完全重合,但偏移较小。

图 9c 中焊枪与开坡口侧成 45° ,开坡口侧处有较多的热输入,开坡口侧母材熔化多,焊枪向左侧

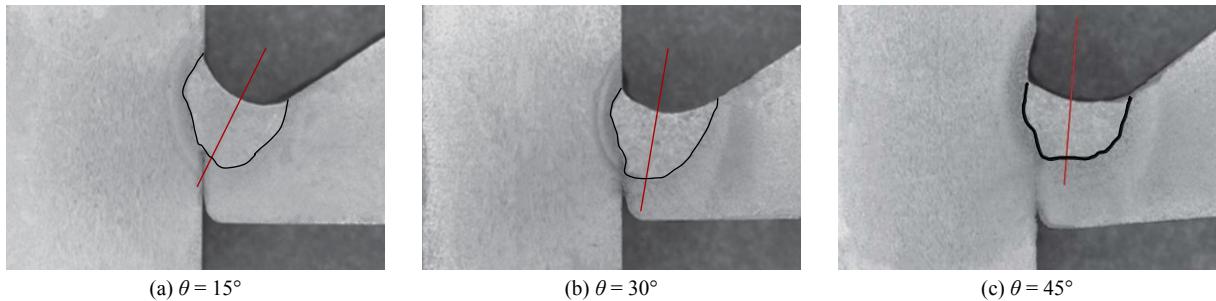


图 10 不同焊枪角度下熔透

Fig. 10 Penetration of different weld torch angles

熔透中心线偏转角度是熔透中心线与水平线之间的夹角,表征熔透中心偏转程度的量,各组偏转角度如表 3 所示,通过 Matlab 进行多项式拟合得到熔透中心偏移角度与钨极偏差值的关系为

$$\beta = -0.031\Delta_w^2 + 0.61\Delta_w + 81.16 \quad (6)$$

表 3 熔透中心线偏转角度

Table 3 Deflection angle of penetration Center

焊枪角度 $\theta/^\circ$	钨极偏差值 Δ_w (pixel)	熔透中心线偏转角度 $\beta/^\circ$
15	-17	61.8
30	-8	74.3
45	21	80.1

钨极(焊枪)偏移量与角焊缝熔透中心线的变化,源于焊枪角度发生改变,改变了角焊缝两侧热输入比例,影响了角焊缝处不同方向上母材熔化量不同,使钨极(焊枪)中心与角焊缝熔透中心线不一致。而正面熔池图像中焊枪的偏移量与熔透中心线存在一定对应关系,可以作为检测内部熔透形态的特征信息。通过 CCD 相机检测正面熔池中的钨极位置(偏移量),调节焊枪角度,改变角焊缝两侧的热输入,可调节熔透中心处于合适的位置,进而获得非对称角焊缝良好焊接质量。

5 结 论

(1) 通过 CCD 相机采集获得非对称角根焊正

偏移。

焊接过程中焊枪角度的变化不仅影响钨极的相对偏差量,同时焊件的熔透形态(熔透中心线)也由于热分布的改变而发生变化。角焊缝的熔透中心线变化如图 10 所示,随着焊枪角度的增加(焊枪逆时针转动),熔透中心线随之也发生了逆时针转动。

面熔池图像,经过图像算法处理后,提取熔池图像的边界、熔池图像的中心和钨极中心,获得不同焊枪角度下的钨极左右位置偏差。

(2) 将电弧热输入分成两部分作用于角焊缝,不同焊枪角度会改变两部分热量分配比例,导致角焊缝不同方向上母材熔化程度不同,角焊缝的熔透形态相应发生改变。

(3) 利用熔透中心线偏转角描述不同焊枪角度条件下非对称角焊缝的熔透状态的变化规律,并得到钨极位置偏差值与熔透中心线偏转角之间的定量关系,将焊枪角度、正面熔池图像中钨极位置偏差与角焊缝熔透形态有机关联到一起,为利用正面熔池特征信息控制内部熔透形态提供了一种新的方法。

参考文献:

- [1] 赵淑珍. 提高管壳式换热器换热管与管板角接接头的焊接质量 [J]. 中国特种设备安全, 2012, 28(1): 40–42.
Zhao Shuzhen. Enhancement of the welding quality of heat exchanger tube and tube plate angle joint[J]. China Special Equipment Safety, 2012, 28(1): 40–42.
- [2] 董 庆. 铝合金城轨车辆 T 型接头焊接缺陷分析及其超声波探测方法研究 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2014, 37(3): 78–80.
Dong Qing. Analysis of welding defects of T joint of aluminum alloy city track vehicle and Research on detection method of

- bounce wave[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37(3): 78 – 80.
- [3] Nakamura T, Hiraoka K, Takahashi M, *et al*. GMA welding process with periodically controlling shielding gas composition - Development of ultra-narrow gap GMA welding process[J]. Yosetsu Gakkai Ronbunshu, 2013, 20(2): 237 – 245.
- [4] 张裕明, 吴林, 李林, 等. TIG 焊熔透正面监测量的确定 [J]. 焊接学报, 1991, 12(1): 39 – 45.
Zhang Yuming, Wu Lin, Li Lin, *et al*. Determination of top super-vision parameters for state of full penetration in TIG welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 1991, 12(1): 39 – 45.
- [5] 赵衍华, 王溶溶, 张芹梅, 等. 基于 CCD 视觉传感的铝合金熔透自动控制技术及其在航天贮存箱中的应用 [J]. 航天制造技术, 2015(3): 1 – 7.
Zhao Yanhua, Wang Rongrong, Zhang Qinmei, *et al*. Full penetration automatic control of al alloy based on CCD sensing system and its application in aerospace tank[J]. Aerospace Manufacturing Technology, 2015(3): 1 – 7.
- [6] Baskoro AS, Kabutomori M, Suga Y. Automatic welding system of aluminum pipe by monitoring backside image of molten pool using vision sensor[J]. Journal of Solid Mechanics and Materials Engineering, 2008, 2(5): 582 – 592.
- [7] Parvez S, Abid M, Nash D H, *et al*. Effect of torch angle on arc properties and weld pool shape in stationary GTAW[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2013, 139(9): 1268 – 1277.
- [8] 蒋凡, 陈树君, 王龙, 等. 焊枪行走角变化对等离子弧穿孔立焊焊缝成形的影响规律 [J]. 焊接学报, 2013, 34(2): 22 – 26.
Jiang Fan, Chen Shujun, Wang Long, *et al*. Influence of welding torch walking angle variation on welding seam formation in plasma arc piercing vertical welding[J]. Transaction of the China Welding Institution, 2013, 34(2): 22 – 26.
- [9] 杨嘉佳, 王克鸿, 吴统立, 等. 铝合金双丝脉冲 MIG 焊双向熔池同步视觉传感及图像处理 [J]. 机械工程学报, 2014, 50(12): 44 – 50.
Yang Jiajia, Wang Kehong, Wu Tongli, *et al*. Two-directional synchronous visual sensing and image processing of weld pool in aluminum alloy twin arc pulsed MIG welding[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(12): 44 – 50.
- [10] Zhang G, Fan D, Xue C, *et al*. PCNN based image processing and feature extraction of dual-bypass gas metal arc weld pool[J]. China Welding, 2013, 22(4): 1 – 7.

第一作者简介:岳建峰, 男, 1973 年出生博士, 教授. 主要从事焊接自动化的科研工作. 发表论文 30 余篇. Email: billyue@163.com

通信作者简介:沈振乾, 男, 副教授. Email: shenzhenqian@tjpu.edu.cn