

# 铝合金焊接图像焊缝位置和间隙提取

樊重建, 沈鸿源, 林 涛, 陈善本  
(上海交通大学 材料科学与工程学院, 上海 200240)



樊重建

摘 要: 基于自行设计的 CCD 被动视觉传感系统, 在仅依靠电弧光照明的情况下, 实现了钨极氩弧焊过程中实时提取清晰的熔池正前方图像。通过分析退化恢复、平滑后的图像间隙处灰度值特点, 采取了特定区域自动域值分割、空穴检出法统计各 8- 连通域面积、基于 8- 邻域面积阈值去噪、面积统计转换等步骤可以求得间隙值, 进一步进行间隙细化, 最后采用 Hough 变换对细化后的间隙点进行拟合, 检测出焊缝位置。

关键词: 钨极氩弧焊; 被动视觉; 间隙; 焊缝跟踪

中图分类号: TG409 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2008)08-0061-04

## 0 序 言

航天工业中, 铝合金钨极氩弧焊 (GTAW) 占据非常重要的位置。在实际焊接过程中, 一方面铝合金的热敏性非常强, 另一方面由于装配误差导致的焊缝间隙和焊缝位置动态变化不能准确在线检测, 严重影响焊接过程的稳定性, 制约了焊接过程自动化水平提高, 因此, 有必要进行熔池前端信息传感的研究<sup>[1,2]</sup>。CCD 被动视觉传感可以模拟焊工视觉行为, 在提取的信息量上有其它方式无法比拟的优势, 但是因为焊接过程中强弧光的存在, 使得基于被动视觉的实时焊缝跟踪等研究进展缓慢, 因此, 有必要进一步研究基于视觉的间隙提取和焊缝跟踪传感方式和信息提取这一关键技术<sup>[3]</sup>。

## 1 典型图像获取

为获取清晰的熔池图像, 针对开坡口铝合金填充脉冲交流 GTAW, 设计了三光路同时同幅视觉传感器, 该传感器可以同时从熔池正前方、斜后方、斜下方对熔池进行观测<sup>[4]</sup>。为了避免电弧光影响取像, 采用两个措施解决: (1) 在电流峰值转向基值后 50 ms 取像, 经试验观察, 此时电弧电流最弱, 且熔池形状处于稳定状态。(2) 对不同的光路设计不同滤光系统, 保证各光路均取得特征明显的信息。

图 1 是基于三光路传感器所获得多方向熔池图像, 图 2 为其正前方部分。

文中重点处理熔池前方图像中间隙大小和焊缝位置信息。

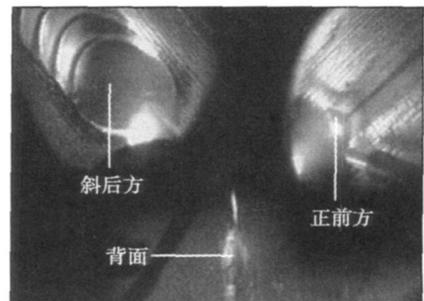


图 1 多方向熔池图像

Fig. 1 Multi-direction weld pool image

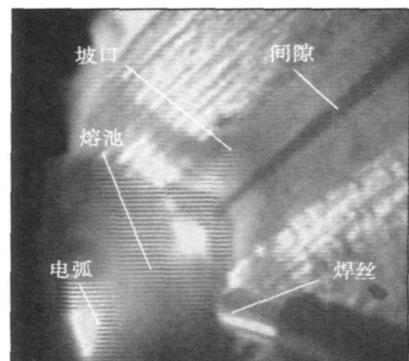


图 2 熔池正前方图像

Fig 2 Image in front of weld pool

## 2 正前方熔池图像处理及熔池特征参数提取

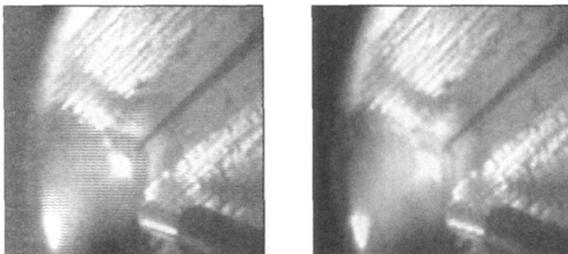
### 2.1 正前方熔池图像特征分析

从图 2 可以清晰的看到熔池、电弧、正面间隙、坡口和送丝情况。

$$d = \frac{\sum_{i=0}^{(m-1)/4} \sum_{k=0}^{(n-1)/2} g(x \pm 2i, y \pm k)}{n(m+1)l}$$

式中： $i$  和  $j$  分别为当前行数和列数。 $n$  和  $m$  分别为区域  $D$  的宽度和高度，且  $n$  和  $m$  都是奇数，且  $m = 4p + 1$ ， $p$  为自然数。如果  $d$  的值超出设定范围，则认为当前点存在场干扰。如果当前点存在场干扰，则相邻行像素是非干扰点。利用相邻行像素的统计灰度代替当前点灰度则可实现对理想图像的一种估计逼近。恢复后的当前点像素灰度值是

$$f(x, y) = \frac{\sum_{j=1}^{(m-1)/4} \sum_{k=0}^{(n-1)/2} f[x \pm (2j-1), y \pm k]}{n(m-1)l} \quad (2)$$



(a) 原始图像 (b) 平滑图像

图 3 去噪前后图像对比

Fig. 3 Images before and after noise removing

由于焊接过程的复杂性，图像中还存在肉眼不易观察到的点状干扰，这种干扰可以采用  $3 \times 3$  平均模板去除，处理结果如图 3b。

### 2.3 间隙特征分析

工件表面世界坐标系  $xOy$  定义为：前一时刻焊缝位置与  $y$  轴重合，与其垂直的方向为  $x$  轴，钨极尖在工件上的投影点为原点。正前方图像中，内容比较复杂，有熔池、焊丝等，为避免这些干扰，根据上一时刻的位置和方向，可以直接截取其间隙的大概所在。具体在图 3b 中，保留如图 4a 部分。

为了进一步分析该部分图像特点，过点  $(100, 100)$  作一平行于  $x$  轴的直线，分析该直线所经过的像素点灰度变化情况，如图 4b。其特点如下。

### 2.2 退化恢复

在试验过程中，由于焊接过程中交变电流对图像采集系统中电子元器件的干扰，会影响所取得的图像。具体表现在图 3a 中为条纹状场干扰或点状干扰，首先要对其进行剔除干扰噪声过程<sup>[5]</sup>。

对条纹状干扰，在区域  $D$  内，若隔行灰度差  $d$  是：

$$\sum_{j=1}^{(m-1)/4} \sum_{k=0}^{(n-1)/2} g[x \pm (2j-1), y \pm k] \quad (1)$$

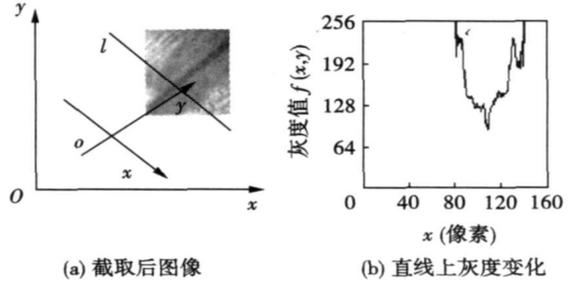


图 4 间隙图像灰度分布特征

Fig. 4 Gray value variation in image

- (1) 像素点灰度值最低处在工件间隙内。
- (2) 间隙处像素点灰度值较其附近区域灰度值小。

### 2.4 阈值分割

在以前的工作中，通常做法是对上图进行边缘提取，提取到的两组边缘点分别对应于间隙的两边缘，对两边缘分别进行直线拟合，利用拟合后的结果确定下一时刻的焊缝位置和间隙，且位置和间隙的计算被捆绑在一起<sup>[3]</sup>。该方法要求边缘提取、直线拟合准确，而焊接过程的复杂性决定这一条件无法完全满足，而一旦直线拟合失败，位置和间隙都无法计算。

针对这种情况，首先，文中尽量将位置和间隙分开计算，并首先保证间隙计算正确，结合图 4 分析，图像中间隙部分在某领域中的灰度上总表现出较小的情况，因此可以考虑直接采用自动阈值分割法求解间隙。

参考前一时刻的焊缝位置，在熔池前方一定范围内进行自动阈值分割，可得如图 5a。

### 2.5 去噪及间隙面积计算

阈值分割后的图像中，不可避免存在噪声，相对间隙，它们呈现小面积，分散的特点，采用连通域面积阈值法可去除。其中计算连通域面积的方法采用空穴检出法，空穴是由白色背景区域包围起来的一个黑区域，也就是一个整个联通域。具体算法思想

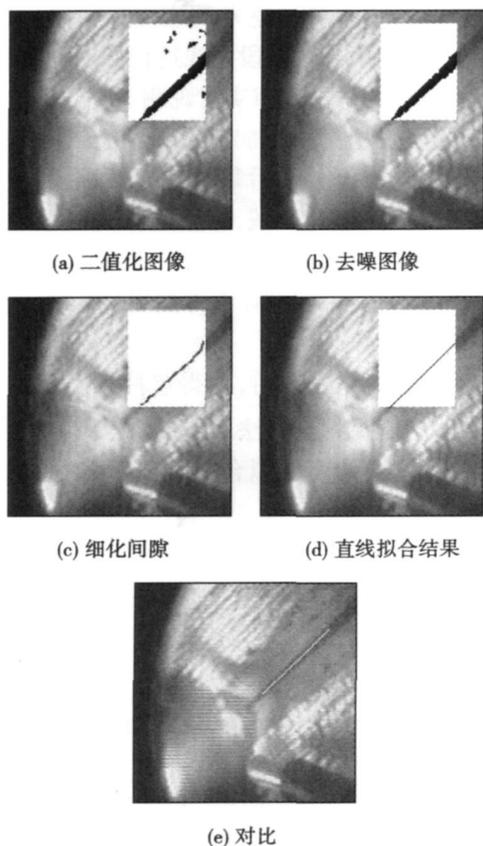


图 5 图像处理流程

Fig. 5 Processing flow of whole image

如下<sup>[6,7]</sup>：

(1) 将所有的白色像素(背景)赋 0, 所有黑色像素(空穴所在)赋 -1, 空穴数置 0。

(2) 寻找一个空穴的开始像素(值为 -1), 并将其值改为当前空穴数, 存储, 空穴数增加 1。

(3) 所有像素的正向搜索。找到值为 -1 的像素(表示没被搜索过), 正向搜索其周围有没有值为当前空穴数的像素。如果有, 将当前像素赋以空穴数的值。

(4) 所有像素的反向搜索。找到值为 -1 的像素(表示没有被搜索过), 反向搜索其周围有没有值为当前空穴数的像素。如果有, 将当前像素值赋以空穴数的值。

(5) 如果正向和反向都没有像素, 表示当前空穴所有像素已被遍历, 转(2)。

(6) 如果(2)中没有寻找到开始像素, 表示所有的空穴已被遍历。

(7) 若空穴面积小于给定面积域值, 则将该空穴中像素点灰度值赋 0, 否则, 认为其是间隙点。去除结果见图 5b。

经去噪处理后, 图像中选取特定矩形区域中, 灰

度值为 0 的像素点(黑色)所代表的区域可近似为间隙区域。可认为灰度值为 0 的像素点个数之和近似等于图像中间隙面积。经过统计, 在图像坐标系中, 图 5b 中间隙面积所占像素点面积为  $S$ , 工件坐标系中间隙平均值计算将在下文中给出。

### 2.6 间隙边缘提取

计算当前时刻的焊缝位置, 主要是给实时焊缝跟踪提供信息。一般方法为, 先拟合间隙部分两边缘, 两边缘点可以分别通过从  $x$  轴的正负向扫描获得, 然后根据间隙部分两边缘拟合直线估计当前运动方向<sup>[3]</sup>, 但该方法需拟合两次, 易受干扰; 文中直接对间隙部分图像进行细化, 然后对细化图像进行直线拟合, 即为当前运动方向。

### 2.7 细化

图像细化是为了提取图像几何特征及拓扑性质, 能直观的突出目标的形状特点。细化要满足两个条件: (1) 目标的连通性质保持不变; (2) 目标图像应该有规律的缩小。以下为图像细化算法。

对于一个  $3 \times 3$  像素点区域, 对各点标记名称  $P_1, P_2, P_3 \dots, P_9$ , 其中  $P_1$  位于中心, 见图 6。

$P_2$	$P_9$	$P_8$
$P_3$	$P_1$	$P_7$
$P_4$	$P_5$	$P_6$

图 6 8-邻域图

Fig. 6 Figure of 8-neighbourhoods

先描述两个定义,  $NZ(P_1)$  表示  $\sum_{i=2}^9$   $ZO(P_i)$  表示 8-邻域形成的一个环的顺时针方向上, 当前点为 0(白点), 且下一点为 1(黑点)的情况的个数。

若  $P_1=1$ , 下面四个条件如果同时满足, 则删除  $P_1(P_1=0)$ 。

- (1)  $2 \leq NZ(P_1) \leq 6$ ;
- (2)  $ZO(P_1)=1$ ;
- (3)  $P_2 \times P_4 \times P_8=0$  或者  $ZO(P_2) \neq 1$ ;
- (4)  $P_2 \times P_4 \times P_6=0$  或者  $ZO(P_4) \neq 1$ 。

对图像中每个点重复这一步骤, 直到所有的点都不可删除为止<sup>[6]</sup>。图 5c 为细化结果。

### 2.8 拟合

对于图中细化后的间隙“骨架”, 可以采用直线

进行拟合, 拟合出来的直线处在方框范围内的部分就是所求的焊接路径。

直线拟合的方法很多, 文中采用 Hough 变换进行拟合, Hough 变换的最大优点是抗噪声能力强, 能够在信噪比较低的条件下, 检测出待拟合直线<sup>[9]</sup>。它将图像平面中的二值图映射到 Hough 参数  $(\rho, \theta)$  计算空间。平面上任意直线可以用参数计算空间中两个参数  $\rho$  和  $\theta$  完全确定下来, 其函数关系可以表示为

$$f[(\rho, \theta), (x, y)] = \rho - x \cos \theta - y \sin \theta = 0 \quad (3)$$

式中:  $\rho$  为该直线到原点的距离;  $\theta$  为该直线的方位。

由式(3)看出, 图像中的每个点  $(x_i, y_i)$  映射到 Hough 空间中的一组累加器  $A(\rho_i, \theta_i)$ ,  $A(\rho_i, \theta_i)$  被图像中黑色像素点映射到一次, 则  $A(\rho_i, \theta_i)$  的值加 1。如果图像中包含一条直线, 则对应  $A(\rho_i, \theta_i)$  的会出现局部最大值; 通过检测 Hough 空间中  $A(\rho_i, \theta_i)$  的局部最大值, 可以确定于该条直线对应的一对参数  $(\rho, \theta)$ , 从而把该直线检测出来<sup>[6]</sup>。

拟合结果如图 5d, 图 5e 是与原图进行比较结果。

## 2.9 参数计算

根据上节拟合结果, 可以计算出拟合直线在白色矩形区域中的长度  $l$ , 则图像中间隙大小可近似为  $S/l$  (像素), 工件上实际间隙大小应为

$$g = \alpha S / l \quad (4)$$

式中:  $\alpha$  为图像中  $x$  方向上单位像素点表示的工件坐标系中实际距离, 单位为: mm/像素。焊缝位置信息用直线方程表示为

$$y = kx + b \quad (5)$$

式中:  $k = -\cot \theta$ ;  $b = \rho / \sin \theta$ , 其中  $\theta, \rho$  由上节 Hough 变换结果确定。

## 3 结 论

(1) 针对开坡口填丝脉冲铝合金焊接, 设计了

专门的视觉传感系统和滤光系统, 在只有电弧光光源的情况下, 利用有效波段光线进行照明, 实现了焊接过程中清晰的焊缝间隙实时观测。

(2) 经过退化恢复, 特定区域阈值分割, 采用空穴检出法统计阈值分割后每个连通域面积, 去除面积值小于面积阈值的区域, 保留下来的连通域均可认为是间隙内的点, 统计得出下一时刻间隙值。相比较一般方法, 文中间隙计算方法更稳定, 抗干扰性更强。

(3) 经过细化处理后, 获得单像素宽度的间隙图像, 在分析常见拟合方法后, 选取抗干扰性更强的基于 Hough 变换的直线拟合等算法, 可以直接获得焊缝位置。

## 参考文献:

- [1] Kuo Hsingchia, Wu Lijen. An image tracking system for welded seams using fuzzy logic[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 169-185.
- [2] Bae K Y, Lee T H, Ahn K C. An optical sensing system for seam tracking and weld pool control in gas metal arc welding of steel pipe[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2002, 120: 458-465.
- [3] 张广军. 视觉传感的变间隙填丝脉冲 GTAW 对接焊缝成形智能控制[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2002.
- [4] 樊重建, 王建军, 陈善本. 铝合金 GTAW 熔池被动视觉传感[J]. 上海交通大学学报, 2008, 42(1): 42-45.
- [5] 王建军. 铝合金脉冲 TIG 焊熔池动态特征的视觉信息获取与自适应控制[D]. 上海: 上海交通大学, 2003.
- [6] 何 斌. 数字图像处理[M]. 2 版. 北京: 人民邮电出版社, 2002.
- [7] Ramesh Jain, Rangachar Kasturi, Brian G Schunck. Machine vision[M]. USA: Mc Graw Hill & China Machine Press, 2003.

作者简介: 樊重建, 男, 1978 年出生, 博士生。研究方向为焊接过程传感与控制, 机器人自动化焊接。已发表论文 7 篇。

Email: chj\_fan@sjtu.edu.cn

observed in the grains of the copper matrix, whose amount increased with the increasing of the explosive ratio. There were a certain amount of molten zones in the interface and fine columnar grains existed in this molten zone. EDS analyses indicated that diffusion did not take place between bonding interfaces; however, diffusion was observed after annealing. The shearing fracture did not take place in the bond interface but in the copper plates.

**Key words:** Monel alloy/copper; explosive cladding; interface; microstructure; mechanical properties

#### Image processing and features extraction of molten pool for pipe welding

LI Yuan<sup>1,2</sup>, WANG Qinglin<sup>1</sup>, XU De<sup>2</sup>, TAN Min<sup>2</sup> (1. Information Science and Technology Institute, Beijing Institute of Technology, Beijing 100030, China; 2. Key Laboratory of Complex Systems and Intelligence Sciences, Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China). p57–60

**Abstract:** A pool imaging system is designed for pipe welding, which can capture clear images of molten pool in grooves and reduce the disturbances of arc light. Robust statistics method was adopted for pool images preprocessing, and the splash in images was inhibited. After segmentation and edge detection, intensity distribution of pool images and welding groove figures are selected as image features and extracted. Then the deviation of the pool and groove is detected, and the vibration amplitude and frequency of molten pool are calculated. Experiments of welding with image processing and features extraction are conducted to verify the effectiveness of the imaging system and the proposed method.

**Key words:** pipe welding; pool image processing; features extraction; seam tracking

#### Welding direction and gap image processing in aluminum alloy

GTAW FAN Chongjian, SHEN Hongyuan, LIN Tao, CHEN Shanben (School of Materials Science and Engineering, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200240, China). p61–64

**Abstract:** For welding process information sensing, the visual information of weld pool in aluminum alloy tungsten arc welding was investigated. By CCD optical sensor designed independently, the weld pool image was observed under arc light. After recovering and smoothing the original degraded image, the recovered image shows more characters for next processing steps. Series of algorithm including automatic threshold segmentation, noise removing based on 8-neighbourhoods area threshold, total points statistics were performed to calculate gap area in the image coordinate system. After thinning, Hough transformation was used to fit the gap points. The fitted line direction is the welding direction. With the gap area and the calibration result before welding, the gap size can be obtained.

**Key words:** GTAW; passive vision; gap; seam tracking

#### Feasibility of controlling welding residual stress and distortion with tailing electromagnetic force

XU Wei, LIU Xuesong, FANG Hongyuan, XU Wenli, YANG Jianguo (State Key Laboratory of Advanced Welding Production Technology, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China). p65–68

**Abstract:** New idea to control welding residual stress and distortion with trailing impactive electromagnetic force was given. Its feasibility was discussed by simulation with the finite element analysis software ANSYS in the case of using flat spiral coil. The idea is the following: the inductor is located near the welding torch over the weldment and moved with the welding torch during welding. There is the rapidly changing current with high peak value in the inductor. And then there is the changing magnetic flux and the erratic current in the weldment. The electromagnetic force is generated between the inductor and the weldment. The welding residual stress and distortion will be controlled if the high temperature weld and the metal near the weld can be extended by the electromagnetic force. The simulation results show that the weldment is repelled by the coil owing to the axial electromagnetic force of flat spiral coil. And high temperature metal is able to be extended by electromagnetic force. Therefore, the welding residual stress and strain could be controlled based on electromagnetic force.

**Key words:** electromagnetic force; residual stress; trailing; distortion

#### Investigation of in-situ formed Ti(C, N) particle reinforced Fe-based alloy composite coatings on adamite by laser cladding

QI Yongtian, ZOU Zengda, WANG Xinhong, SHI Handao (School of Materials Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China). p69–72

**Abstract:** A new method is realized to produce Fe-based alloy composite coating reinforced by Ti(C, N) particle on the substrate named Adamite steel through laser cladding technology. The microstructure of laser cladding layer is analyzed by means of optical microscopy (OM), X-ray diffraction (XRD), scanning electron microscopy (SEM), energy dispersive spectrometer (EDS) and electron probe microanalysis (EPMA). The microhardness of laser cladding layer is measured by microhardness meter. The results show that Ti(C, N) particle is introduced by an *in-situ* metallurgical reaction of TiN particle and graphite powder during laser cladding process. At the beginning of laser cladding process, TiN particle is decomposed by high laser heat energy,  $TiN \rightarrow [Ti] + [N]$ . At the same time, the new particle named  $Ti(C_{0.3}N_{0.7})$  and  $Ti(C_{0.2}N_{0.8})$  comes into being by the following chemical combination reactions:  $[Ti] + [C] \rightarrow TiC$ ,  $[Ti] + [N] \rightarrow TiN$ ,  $xTiC + (1-x)TiN \rightarrow Ti(C_xN_{1-x})$ . The fine Ti(C, N) particle is dispersed evenly in the matrix. Size of the Ti(C, N) particle is within 0.1–5 μm. The shape of some Ti(C, N) particle is similar to roundness, and the other is irregular shape. The microhardness of laser cladding layer is distributed within  $HV_{0.2} 800–900$ .

**Key words:** Ti(C, N); TiN; in-situ formation; laser cladding; Adamite roller

#### Finite element analysis on the soldered joint reliability of FCB-GA device

GAO Lili, XUE Songbai, ZHANG Liang, SHENG Zhong (College of Materials Science and Technology, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China; ).