

填丝脉冲 GTAW 熔池形状定义和图像处理

赵冬斌<sup>1</sup>, 陈善本<sup>2</sup>, 吴 林<sup>3</sup>, 陈 强<sup>1</sup>

(1. 清华大学 机械工程系, 北京 100084; 2. 上海交通大学 焊接研究所, 上海 200030;  
3. 哈尔滨工业大学 现代焊接生产技术国家重点实验室, 哈尔滨 150001)

摘 要: 在填丝脉冲 GTAW 过程中, 从熔池图像上可以观察到熔池形状的变化, 如宽度、长度、后拖角和表面高度等。熟练焊工可以根据变化的情况实时地调整焊接规范, 保证焊缝成形稳定。利用获得的焊接熔池图像, 采用一定的熔池图像处理算法可以计算出熔池形状的特征参数, 以满足过程建模和实时控制的要求。本文针对填丝脉冲 GTAW 熔池形状变化的特点, 提出了统一的熔池形状非线性拟合公式和熔池形状参数。设计了快速图像处理算法, 满足在实际焊接过程中提取熔池形状参数的要求。试验结果证明, 熔池形状非线性拟合公式准确, 图像处理算法有效, 为进一步焊接过程的建模和控制奠定基础。

关键词: 填丝脉冲 GTAW; 熔池形状; 图像处理

中图分类号: TG402 文献标识码: A 文章编号: 0253-360X(2001)02-05-04



赵冬斌

0 序 言

在焊接过程熔透控制的研究中, 建立熔池形状参数同反面宽度之间的关系是关键问题。由于电弧力的作用, 使熔池表面下塌, 在由部分熔透转向全熔透时, 熔池表面下塌量产生很大变化。通过试验观察, 发现下塌量同反面熔宽有很好的线性对应关系。根据这个关系进一步建立了熔池反面宽度的单变量自适应控制系统<sup>[1]</sup>。在试验过程中发现, 对熔池形状信息获知得越丰富, 对焊接过程熔透控制的效果越理想。由于图像传感方法的引进, 使人们可以从熔池图像获得关于熔池形状更多的特征信息, 如熔池宽度、长度和面积, 利用这些信息建立同熔池反面宽度之间的关系, 也取得了很好的控制效果<sup>[2]</sup>。但熔池宽度、长度和面积并不能唯一确定熔池的几何形状, 引入熔池尾部后拖角<sup>[3]</sup>或尾部宽度<sup>[4]</sup>可以对熔池的形状进一步约束, 改善了对熔池反面宽度的预测精度。这种多参数定义熔池形状的方法由于神经网络技术的发展而在焊缝质量控制中得到应用<sup>[3~5]</sup>。为了以简单的参数准确定义熔池的形状,

文献[6]提出采用熔池长度、长度比例和相对宽度三个参数来描述 GTAW 熔池形状。

在填丝脉冲 GTAW 中, 填充焊丝引起熔池表面高度的变化, 也使熔池平面形状同不填丝的熔池形状有很大区别。因而需要采用简单而有效的熔池形状参数定义熔池形状, 并采用快速的图像处理算法实时提取出熔池形状参数。

1 熔池形状参数定义

1.1 填丝脉冲 GTAW 试验

在填丝脉冲 GTAW 中, 熔池形状在部分熔透和全熔透时差别很大, 熔池表面高度的变化也很大。利用试验获得熔池形状的典型变化, 试验中所采用的焊接峰值电流( $I_p$ )和送丝速度( $v_f$ )见图 1, 峰值电流逐渐增大, 送丝速度逐渐减小。基值电流为 30 A, 脉冲占空比为 45%, 焊接速度为 2.5 mm/s, 其它焊接试验规范见表 1。利用视觉传感系统<sup>[3]</sup>获得的熔池图像如图 1 所示。

表 1 填丝脉冲 GTAW 基本试验规范

Table 1 Basic experiment condition of pulsed GTAW with wire filler

Frequency	Base current	Diameter of electrode	Angle of electrode	Arc length	Flow of argon	Diameter of wire	Dimensions
$f/\text{Hz}$	$I_b/\text{A}$	$\phi/\text{mm}$	$\theta(^{\circ})$	$L_a/\text{mm}$	$q_v/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	$D/\text{mm}$	$(\text{mm}\times\text{mm}\times\text{mm})$
1	30	3.0	30	3.0	8.0	0.8	280×80×2

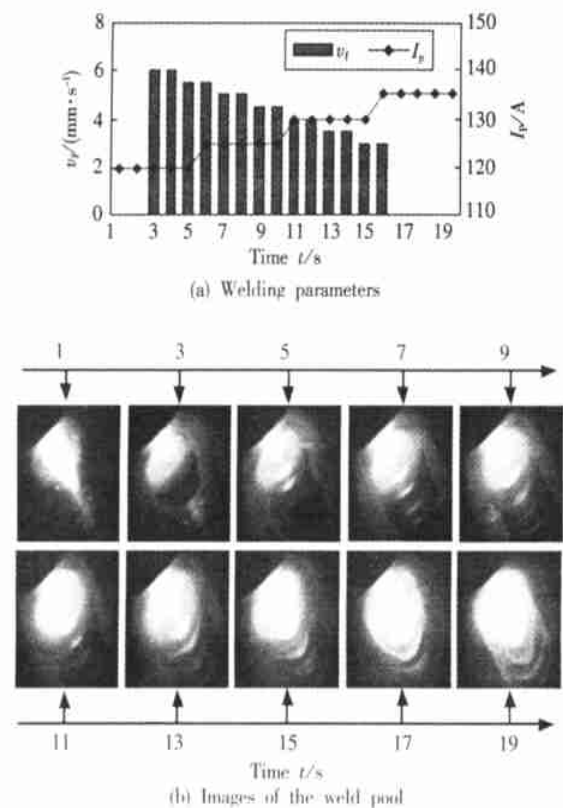


图 1 填丝脉冲 GTAW 熔池形状的变化

Fig. 1 Shape variation of weld pool during pulsed GTAW with wire filler

在焊接过程观察熔池变化, 熔池表面高度逐渐减小, 并在第 13 个脉冲时熔池表面下塌, 熔透状态为全熔透。从相应的熔池图像观察熔池形状变化: 在部分熔透时, 熔池形状呈近似椭圆形; 而在全熔透时, 熔池尾部的后拖角变得突出, 熔池形状近似为桃子形。熔池形状的变化体现在熔池长度和熔池尾部形状上最明显。对熔池形状参数定义的要求: 既能突出不同形状时的差别, 又能准确描述出不同类型时的熔池形状。

1.2 熔池形状参数定义

熔池形状假设为以焊接方向为轴对称, 文献[ 7] 根据下塌熔池形状的特点, 建立了一种熔池形状的非线性拟合函数

$y_r = \pm ax_r^b(1 - x_r)$ ,  $x_r = x/L$ ,  $y_r = y/L$ , (1)  
 式中: 定义以熔池顶点为原点的直角坐标系, 沿焊接方向反方向为  $x$  轴正方向, 与焊接方向垂直的方向为  $y$  轴方向。对熔池的边缘点坐标  $(x, y)$  以熔池长度  $L$  进行归一化为  $(x_r, y_r)$ ;  $a$  和  $b$  为拟合参数,  $a > 0$ ;  $0 < b \leq 1$ 。

因而, 仅仅利用熔池长度  $L$ 、参数  $a$  和  $b$  三个熔池形状参数, 就可以准确描述出熔池的具体形状。对于表面下塌的熔池, 上述特征参数定义熔池形状简单准确。然而在部分熔透时, 熔池表面凸出, 熔池

形状近似呈椭圆形, 熔池后拖角并不明显, 用上述公式和参数  $L$ 、 $a$  和  $b$  来定义熔池形状会产生很大误差。本文提出一种改进的熔池形状参数定义方法

$$y_r = \pm ax_r^b(1 - x_r)^c, \quad a = W/L, \\
x_r = x/L, \quad y_r = y/L, \quad (2)$$

式中:  $0 < b \leq 1$ ;  $0 < c \leq 1$ 。

当  $b = c = 1/2$  时, 由定义得到的熔池形状为圆形, 这种形状对应着起焊时或部分熔透时的熔池形状。当  $b = c \neq 1/2$  时, 熔池呈椭圆形, 这种形状对应着起焊时或部分熔透时沿某一方向散热条件变化剧烈的熔池形状。当  $c = 1.0$  时, 式(2)又可以简化为式(1)。参数  $b$  和  $c$  的变化对熔池形状的影响如图 2 所示, 可以看出, 参数  $c$  的大小决定了熔池尾部的形状, 随着  $c$  增大, 尾部后拖角变得尖锐。而参数  $b$  更主要影响熔池前端的形状, 随着  $b$  减小, 熔池前面的形状更平滑。由于参数  $a$  表示熔池的宽长比,  $b$  和  $c$  分别代表熔池头部和尾部的形状, 因而熔池形状可以由熔池长度  $L$  和描述熔池形状的形状因子  $a$ 、 $b$  和  $c$  确定, 可以将这些参数定义为熔池形状参数。

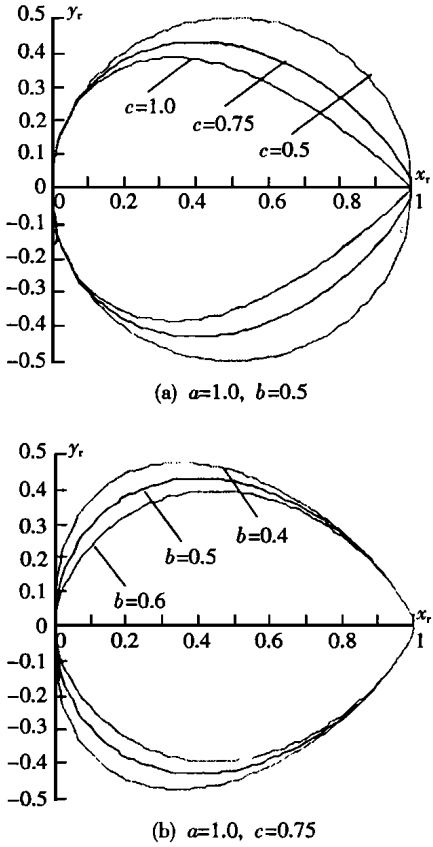


图 2 不同参数时熔池形状的模拟  
Fig. 2 Shape simulation of weld pool at different parameters

对熔池形状公式进行进一步分析发现, 可以对定义的参数进行简化。计算式(2)的导数可以得到

熔池宽度  $W_t$  所在  $x$  轴上的位置

$$x_r = \frac{b}{b+c} \quad (3)$$

则熔池宽度  $W_t$  可以表示为

$$W_t = W_r \times L_t = 2a \left( \frac{b}{b+c} \right)^b \left( \frac{c}{b+c} \right)^c \times L_t = 2W_t \left( \frac{b}{b+c} \right)^b \left( \frac{c}{b+c} \right)^c$$

可以推出

$$2 \left( \frac{b}{b+c} \right)^b \left( \frac{c}{b+c} \right)^c = 1 \quad (4)$$

定义熔池半长比  $R_{hl}$  为

$$R_{hl} = \frac{c}{b+c} \quad (5)$$

则若已知熔池半长比  $R_{hl}$ , 则由式(3)和式(4)可确定出参数  $b$  和  $c$  的值。因而, 熔池形状参数的定义可以简化为三个参数: 熔池长度  $L_t$ 、宽度  $W_t$  和半长比  $R_{hl}$ 。设熔池长度由熔池头部长度  $L_{th}$  和尾部长度  $L_{tt}$  组成, 头部长度为熔池头部顶点距最大宽度位置的距离, 则熔池半长比可以表示为

$$R_{hl} = L_{tt} / L_t, \quad L_t = L_{th} + L_{tt} \quad (6)$$

熔池形状参数的定义见图 3。

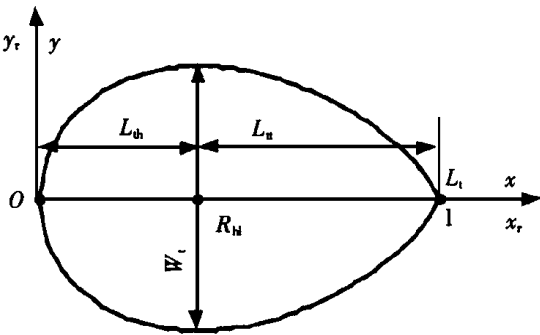


图 3 熔池形状参数定义

Fig. 3 Shape parameters definition of weld pool

## 2 熔池图像处理

熔池图像处理的目的是要由熔池图像计算出熔池形状参数。首先要对视觉传感系统进行标定, 确定出图像平面中的像素距离与工件坐标系中的实际物体尺寸之间的关系, 然后采用各种图像处理算法计算出熔池形状参数。下面主要介绍图像处理部分。

焊接熔池表面高度的不同使熔池图像的灰度分布有很大区别, 部分熔透时熔池图像属于典型的目标图像, 适于采用阈值分割的方法; 全熔透时熔池图像属于细节图像, 适于采用边缘检测算子提取熔池

边缘。本文开发了提取熔池形状参数的图像处理算法, 由以下三个步骤组成: 图像类型区别、熔池边缘点提取和熔池边缘点拟合。

### 2.1 图像类型区别

部分熔透时焊接熔池比较小, 大致成椭圆形, 图像中熔池前方可以看见清晰的电弧, 熔池尾部形状比较圆滑。全熔透时熔池比较大, 大致成桃子形, 熔池前方容易被钨极遮挡住, 熔池尾部形状比较尖锐。本文采用区分熔池尾部形状的方法判断出熔池图像的类型。

首先采用高斯滤波器滤除图像噪声, 由图像中的灰度值极值点确定出图像的中心点  $C$ 。如图 4 所示, 在  $fkv$  方向上, 在  $C$  点的左右各确定出 10 个等间距的起始扫描点。由这些起始扫描点沿  $fkw$  方向扫描到熔池尾部, 若遇到图像灰度的突升点或陡降点则作为熔池边缘点, 分别作为熔池尾部左侧边缘点  $\{E_i, i = 1, 2 \dots 10\}$ , 右侧边缘点  $\{E'_i, i = 1, 2 \dots 10\}$ 。熔池尾部左右两侧边缘点大致各成一条直线, 由于边缘点检测的误差, 使个别边缘点偏离边缘线, 若采用最小二乘法进行直线拟合会产生很大误差, 本文采用图像处理中的 Hough 变换方法确定出这两条边缘线。若两条边缘线所夹锐角小于  $30^\circ$ , 则认为熔池图像对应部分熔透情况, 否则为全熔透情况。

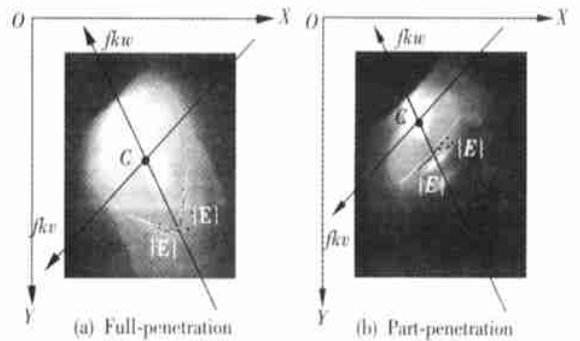


图 4 熔池图像类型区分

Fig. 4 Type identification of weld pool image

### 2.2 熔池边缘点提取

对于部分熔透时的熔池图像, 图像直方图统计结果表明图像灰度具有典型的双峰特性, 通过寻找双峰中的谷点确定出二值化的阈值, 得到二值图像如图 5a 所示。可以采用边缘跟踪的方法准确地提取出熔池的边缘点, 如图 5b 所示, 熔池的边缘连接选用 8 邻域的方式。

对于下塌型图像, 灰度直方图统计也有明显的双峰特性, 但阈值化的结果使熔池尾部边缘容易产生误分割。采用二维边缘检测因子使图像处理时间大大增加, 无法满足实时要求。本文采用一维边缘

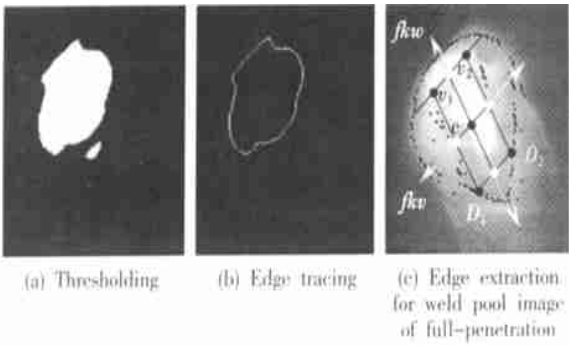


图 5 熔池图像边缘点提取

Fig. 5 Extracting edge points of weld pool image

检测因子沿  $fkw$  方向检测出熔池的边缘点,同时确定出沿  $fkv$  方向扫描的起始点  $D_1$ 、 $D_2$ 、 $U_1$ 和  $U_2$ ,检测出的边缘点用“+”表示,如图 5c 所示,箭头方向为扫描方向。

2.3 熔池边缘点拟合

将图像平面中的熔池边缘点的坐标  $Edge[i]$  ( $X, Y$ )转换为工件坐标系中的值  $Edge[i](x, y)$ 。根据工件坐标系下的值可以计算出熔池的长度  $L_t$ ,利用所有点采用最小二乘法可以计算出熔池形状拟合公式中的参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ 。

然而,熔池长度  $L_t$ 的计算容易受到熔池头部的影响,也同样影响到参数  $a$ 、 $b$  和  $c$  的精度。对于部分熔透时的熔池图像,由于边缘点中包括了电弧的形状,因而计算的熔池长度偏大。对于全熔透时的熔池图像,由于熔池头部被钨极端头所遮挡,因而计算的熔池长度偏小。同样可以采用 Hough 曲线变换的方法计算出合适的熔池长度  $L_t$ 、参数  $a$ 、 $b$  和  $c$ 。图 6 给出了利用最小二乘法对熔池边缘点拟合的结果,同时也给出了进一步采用 Hough 变换方法的拟合结果。最小二乘的拟合结果容易受到熔池头部干扰点的影响,而 Hough 变换的结果则很好地反映了大多数边缘点的属性,对熔池的长度和拟合系数进行了修正。

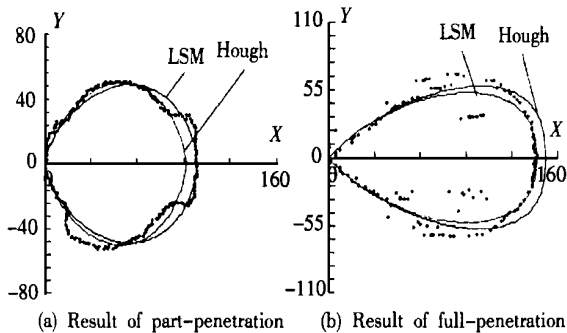


图 6 熔池边缘点拟合结果

Fig. 6 Results of edges regression for weld pool

利用计算出的熔池长度  $L_t$ 、参数  $a$ 、 $b$  和  $c$  可以进一步计算出熔池形状参数,即熔池长度  $L_t$ 、宽度  $W_t$ 和半长比  $R_{hl}$ 。

整个熔池图像的处理算法在 PC-486 主频 100 MHz 的计算机上运行不超过 50 ms,对于脉冲频率 1 Hz 的脉冲 GTAW 过程,完全能够满足实时控制的要求。

3 结 论

(1) 利用熔池形状参数准确描述熔池形状信息对熔透控制具有重要意义。针对部分熔透和全熔透不同的熔池形状,提出了统一的熔池形状非线性拟合公式,同时定义了熔池形状参数:熔池长度  $L_t$ 、宽度  $W_t$ 和半长比  $R_{hl}$ 。

(2) 开发了提取熔池形状参数的图像处理算法,由以下三个步骤组成:图像类型区别算法、熔池边缘点提取算法、熔池边缘点拟合算法。熔池图像处理算法在 PC-486 计算机上耗时不超过 50 ms,满足焊接过程实时控制的要求。

参考文献:

[ 1 ] Zhang Y M, Kovacevic R. Real-time sensing of sag geometry during GTA welding [ J ]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering 1997, 119(5): 151~160.  
[ 2 ] Chen S B, Wu L, Wang Q L, et al. Self-learning fuzzy neural network and computer vision for control of pulsed GTAW [ J ]. Welding Journal, 1997, 76(5): 201s~209s.  
[ 3 ] Kovacevic R, Zhang Y M, Li L. Monitoring of weld penetration based on weld pool geometrical appearance [ J ]. Welding Journal, 1996, 75(10): 317s~328s.  
[ 4 ] Chen S B, Zhao D B, Wu L, et al. Intelligent methodology for sensing modeling and control of pulsed GTAW. Part II Butt Welding [ J ]. Welding Journal, 2000, 79(6): 164s~174s.  
[ 5 ] Chen S B, Lou Y J, Wu L, et al. Intelligent methodology for sensing, modeling and control of pulsed GTAW. Part I Bead-on-plate Welding [ J ]. Welding Journal, 2000, 79(6): 151s~163s.  
[ 6 ] Zhang Y M, Li L, Kovacevic R. Dynamic estimation of full penetration using geometry of adjacent weld pools [ J ]. ASME Journal of Manufacturing Science and Engineering, 1997, 119(4): 631~643.

作者简介: 赵冬斌,男,1972 年出生,清华大学博士后。现主要研究方向为焊接过程视觉传感和智能控制、机器人,参加过国家自然科学基金重点项目、国防科工委基金项目等,获国防科学技术二等奖 1 项。在国内外发表论文 10 余篇。

(编辑:董卫国)