

TIG 焊接熔池形状参数的视觉检测 *

高进强 武传松

(山东工业大学连接技术研究所, 济南 250061)

摘 要 在分析 TIG 焊接电弧光谱的基础上, 设计出复合滤光镜头, 与普通 CCD 摄像机组成视觉传感器, 从试件正面观测熔池图像。焊接过程中根据电流大小通过软件调整采集图像亮度, 得到了比较清晰的 TIG 焊接熔池图像, 利用自行开发的图像处理算法, 检测出了熔池正面的形状参数。该算法处理一幅图像用时不超过 70 ms, 满足实时检测的需要。

关键词 熔池几何参数, 视觉检测, 图像处理

中图分类号 TG444.74, TP317.4

文献标识码 A

文章编号 0412-1961(2000)12-1284-05

VISION-BASED MEASURING OF WELD POOL GEOMETRY IN TIG WELDING

GAO Jinqiang, WU Chuansong

Institute of Joining Technology, Shandong University of Technology, Jinan 250061

Correspondent: GAO Jinqiang, lecturer, Tel: (0531)2955081-2924, Fax: (0531)2955999,

E-mail: wucs@dms.sdut.edu.cn

Manuscript received 2000-05-23, in revised form 2000-08-30

ABSTRACT Based on the analysis of tungsten-inert-gas (TIG) welding arc spectrum, a composite filter len has been designed. This len and a normal CCD camera form a vision sensor which can observe the TIG weld pool from the front side of workpieces. During welding process the captured image brightness is adjusted according to the magnitude of welding current by means of software, and comparatively clear images of TIG weld pool are obtained. The weld pool geometry was measured through the image processing algorithm developed by the authors, which takes less than 70 ms to process a frame of image and meets the requirement of real-time measuring.

KEY WORDS weld pool geometry, vision-based measuring, image processing

近年来, 国内外科技人员在焊接熔池流场与热场数值模拟方面开展了大量的研究工作^[1-3]。但是, 数值模拟技术的发展有赖于验证计算结果的检测方法。由于焊接过程的复杂性, 实验测试十分困难, 实验验证数值模拟结果方面的研究工作开展得很少^[4]。从试件正面检测熔池形状参数, 可以在宏观质量条件下验证焊接过程的数值模拟结果, 具有重要的学术意义和实用价值。

检测试件正面熔池形状参数遇到的最大问题是电弧光的强烈干扰。利用激光频闪视觉检测仪可以拍摄到清晰的熔池图像^[5], 但该设备制造昂贵, 难以在实际中推广应用。脉冲焊时在基值电流作用期间可以检测出脉冲电流 TIG(tungsten-inert-gas) 焊接熔池的形状参数^[6,7]。但是, 恒流 TIG 焊接工艺在生产中应用更为广泛, 本项研

究通过在普通 CCD 摄像机上附加复合滤光镜头并在软件设计方面采取一定措施, 可以检测出恒流 TIG 焊接熔池的正面形状参数。

1 系统的总体结构

TIG 焊接熔池形状参数计算机视觉检测系统的总体框图见图 1。该系统由 PC 计算机、焊接控制单元、图像采集卡、CCD 摄像机及窄带复合滤光镜头、TIG 焊机、行走机构及调速器、监视器等部分组成。在该系统中 PC 主控微机的主频为 100 MHz。焊接控制单元根据主控微机的信息控制焊接速度和焊接电流。图像采集卡根据主控微机的指令进行图像采集。CCD 摄像机具有较高的分辨率 (600L), 8 种电子快门, 最快可达 10^{-4} s。本系统所用的 CA-MPE-1000 黑白图像采集卡, 其图像采集及转换速度为每秒 30 帧, 转换图像的灰度精度为 1/256, 该卡能够通过微机实时调整采集时的亮度和对比度。

熔池区图像经过窄带复合滤光镜头及 CCD 摄像机,

* 国家自然科学基金资助项目 59875053

收到初稿日期: 2000-05-23, 收到修改稿日期: 2000-08-30

作者简介: 高进强, 男, 1971 年生, 讲师, 博士生

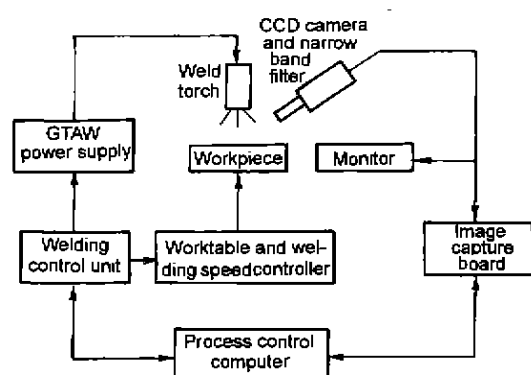


图 1 熔池视觉检测系统结构框图

Fig.1 Scheme of weld pool vision measuring system

图像采集卡进入计算机,经过图像处理,得到熔池的熔宽、熔池半长、熔池后部面积、熔池后拖角等形状参数。基于检测出的这些熔池形状参数,系统也可以通过焊接控制单元控制焊机和行走机构,从而对焊接过程实施控制。

2 窄带复合滤光镜头的设计

电弧光谱主要是由连续光谱和特征光谱组成。对于 TIG 气体保护焊,由于工件上液态金属的蒸发,弧柱区与近熔池表面分布的原子和离子的种类和数量不同,产生的特征光谱也不同。电弧特征光谱的空间分布不仅与保护气体、焊接材料有关,还与焊接电流、电弧弧长有关^[8]。因此难以选取带有一定特征谱线的窗口,使之在不同电流、不同电弧长度下,均能获得较清晰的焊接熔池区图像。

图 2 是 GTAW(钨极气体保护焊)焊接低碳钢电弧光谱分布^[9],可见在 600—660 nm 波段上基本无特征谱

线,主要是连续光谱。因为温度越高,连续光谱辐射密度越高,所以弧光核心的辐射强度最强,而周围辐射强度较弱。若将采集窗口开在 600—660 nm 这一波段,可以通过采取一定的减光措施,滤除周围弧光,只保留钨极核心明亮的辐射,利用弧光核心对熔池的照明来获取图像。同时该波段属于可见光波段,CCD 摄像机对这一波段的响应灵敏度较高。

根据以上分析,本系统所用的窄带复合滤光镜头主要包括 1 片中心波长为 610 nm,带宽为 20 nm 的窄带滤光片以及 2 片透过率为 10% 的中性减光片。图 3 是窄带滤光片的频谱响应曲线。

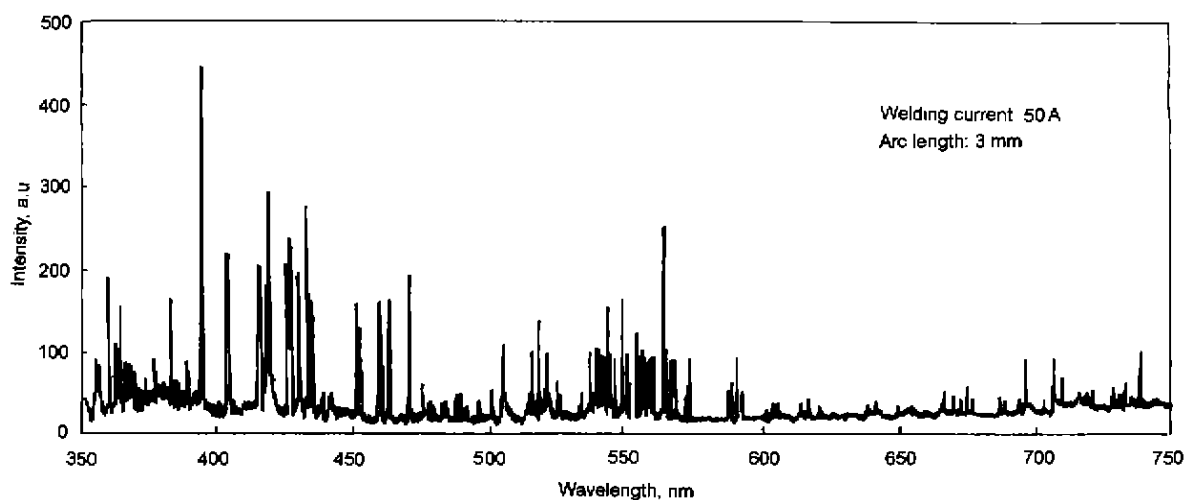
3 实验方法

实验采用恒流 TIG 焊接,不填充焊丝。实验条件如下:材料选用 Q235 钢,尺寸为 200 mm×60 mm×3 mm,进行打磨去锈。选用钨钨极,直径 3.2 mm,角度 90°,通 Ar 气保护,流量 15 L/min。焊接工艺参数为:弧长 4 mm,焊接电流 85—105 A,焊接速度 70 mm/min。

在本系统中将摄像机与焊炬的距离固定为 300 mm 左右,摄像机与水平面的角度约为 24°。焊接过程中焊接电流由小到大,再由大到小呈阶跃变化,其它参数保持不变。

焊接电流越大,电弧温度越高,连续光谱的辐射密度越高,基于此,在焊接过程中根据焊接电流的大小适当调节采集时的亮度,以避免电弧光和熔池反光完全遮盖熔池。

在其它参数不变的条件下,通过调节采集时的亮度,在不同的焊接电流下,即在不固定采集图像时的电流的情况下,拍摄到清晰的图像。图 4 为该系系统拍摄的熔池区图像。从图中可以看出图像比较清晰。

图 2 GTAW 低碳钢阳极弧光谱^[9]Fig.2 Arc spectrum of mild steel anode during GTAW^[9]

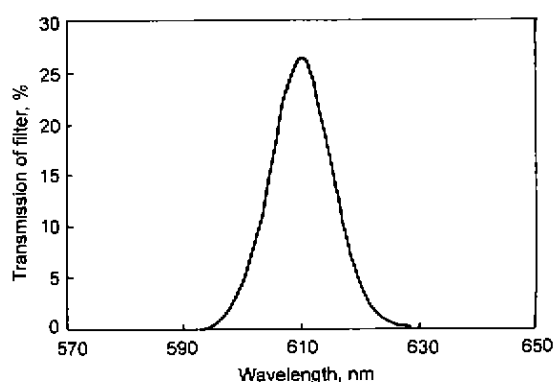


图3 窄带滤光片的频谱响应曲线

Fig.3 Spectral response of narrow band filter

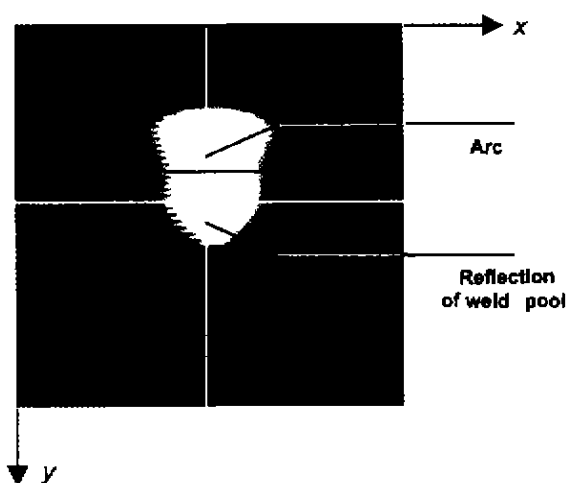


图4 熔池区图像

Fig.4 Weld pool image

4 图像特征分析

图5为熔池形状参数示意图。其中 W 为熔池宽度， L 为熔池半长， α 为后拖角。图6与7分别是图4中沿 x 方向和 y 方向的原始的及经本工作开发的图像增强方法增强后的灰度分布曲线。在本系统拍摄的图像中，由于电弧光在熔池表面是镜面反射，而在母材上是漫反射，所以在熔池中出现亮区。又由于邻域亮度的相互影响，所以熔池边缘位于图6与7中的谷底和顶峰之间。对于顶峰与谷底之间灰度变化剧烈的图像来说，采用谷底或顶峰作为熔池边缘误差均不大。在本文中，将熔池边缘定义为顶峰与谷底之间灰度变化最剧烈的地方。

5 图像处理

图像处理算法主要包括以下几步：

(1) 图像预处理。在普通的梯度增强算法上做了一些改进，将图像增强与去噪结合起来，使其能够降低噪声

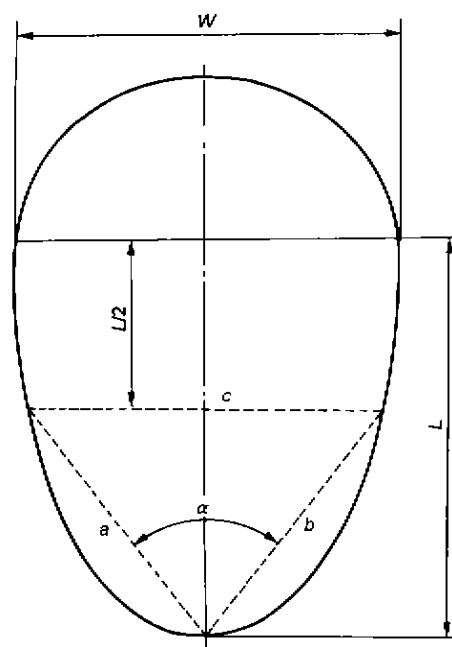


图5 熔池形状参数示意图

Fig.5 Scheme of weld pool shape parameters

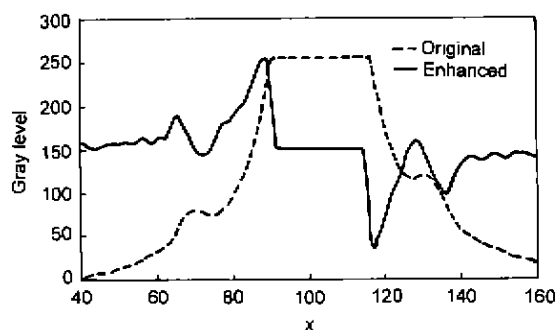


图6 x轴方向灰度分布

Fig.6 Gray level along x direction

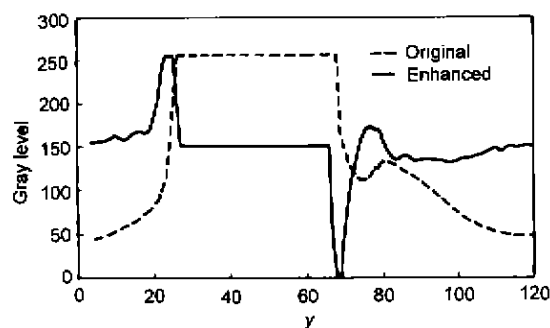


图7 y轴方向灰度分布

Fig.7 Gray level along y direction

干扰, 突出原始曲线的顶峰和谷底之间变化最剧烈的地方, 具体算法如下

$$g_1(i) = 150 + 5[g_0(i+2) + g_0(i+1) - g_0(i) - g_0(i-1)]/4 \quad (1)$$

其中, $g_1(i)$ 、 $g_0(i)$ 分别是处理后的和原始的图像某一行或某一列上的点 i 处的灰度值。

从图 6 和 7 中可以看出, 增强后的曲线左侧的谷底与右侧的顶峰比较明显, 起到了增强的目的, 下一步只需检测出这些顶峰和谷底即可得出熔池边缘。

(2) 图像边缘提取。图像边缘提取算法中充分利用了熔池边缘的连续性特点, 共分四步进行。首先寻找起始点, 即以顶峰和谷底特征都比较明显的行的顶峰和谷底作为起始点, 其次沿该行向上搜索直至特征不明显位置; 接着从起始点向下搜索至特征不明显位置; 最后, 以最后一行的边缘点为起始点, 沿 y 轴方向搜索尾部边缘点。

图 8 为不同焊接电流下的原始图像 (左侧) 和经该算法处理后的图像 (右侧)。

(3) 熔池形状参数的提取。在前面的检测中将图像中 j 行边缘点的横坐标存入数组 $edgel[j]$ 和 $edger[j]$ 之中, 因此计算熔池形状参数仅对该数组进行。

熔池最大宽度

$$W = \max\{edger[j] - edgel[j] + 1\} \quad (2)$$

熔池半长

$$L = j_{\max} - j_{\min} + 1 \quad (3)$$

其中 $j_{\min}$ 为熔池最大宽度处的 j , $j_{\max}$ 为熔池尾部 $edgel[j]=edger[j]$ 时的 j 。

熔池面积

$$S = \int_{j_{\min}}^{j_{\max}} (edger[j] - edgel[j] + 1) \quad (4)$$

熔池后拖角

$$\alpha = \arccos((a^2 + b^2 - c^2)/2ab) \quad (5)$$

其中

$$a = ((edgel[j_{\max}] - edgel[(j_{\max} + j_{\min} + 1)/2] + 1)^2 + ((j_{\max} - j_{\min} + 1)/2)^2)^{1/2}$$

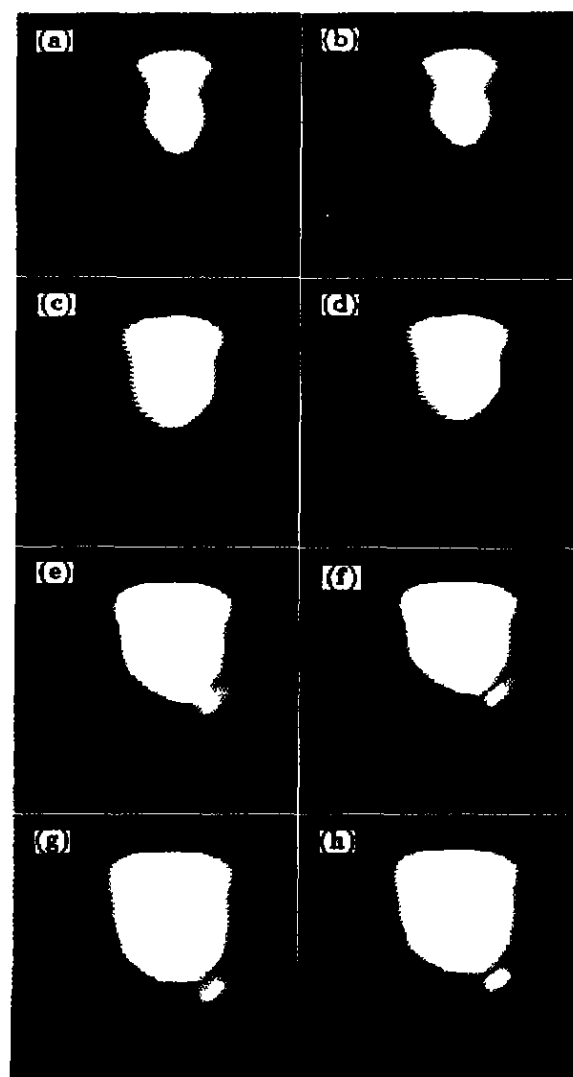


图 8 不同电流下熔池区原始图像及处理后的图像

Fig.8 Raw images captured at varies weld currents (left side) and processed images by the program presented by authors (right side)

(a), (b) $I=91$ A (c), (d) $I=97$ A
(e), (f) $I=103$ A (g), (h) $I=112$ A

$$b = ((edger[j_{\max} + j_{\min} + 1]/2] - edger[j_{\max}] + 1)^2 + ((j_{\max} - j_{\min} + 1)/2)^2)^{1/2}$$

$$c = edger[(j_{\max} + j_{\min} + 1)/2] - edgel[(j_{\max} + j_{\min} + 1)/2] + 1$$

表 1 是通过该系统检测计算的熔池形状参数。

该程序在主频为 100 MHz 的 PC 主控微机上处理一幅图像的时间不超过 70 ms。

表 1 不同焊接工艺参数下熔池的正面形状参数
Table 1 The detected data of weld pool shape at different welding parameters

Welding current A	Welding speed mm/min	Weld pool geometrical parameter			
		Maximum width mm	Half length mm	Rear area mm ²	Rear angle rad
91	70	6.4	7.0	24.2	1.64
97	70	6.6	7.5	29.2	1.74
103	70	6.8	8.0	34.6	1.82
112	70	7.6	8.5	42.3	1.96

6 结论

(1) 利用普通 CCD 摄像机, 附加窄带复合滤光镜头, 并根据焊接电流调节图像采集亮度, 能够检测到清晰的恒流 TIG 焊接熔池区图像。

(2) 所设计的图像处理程序能够检测到熔池的最大宽度、熔池半长、后部面积以及后拖角等主要的 TIG 焊接熔池形状参数。

(3) 所设计的图像处理程序在该系统主控微机中处理一幅图像用时小于 70 ms, 完全满足实时检测的需要, 为实现恒流焊闭环自动控制打下了良好的基础。

参考文献

- [1] Knmar S, Bhaaduri S C. *Metall Trans*, 1994; 25B: 435
- [2] Wu C S, Zheng W. *Int J Mater*, 1997; 9: 166
- [3] Wn C S, Dorn L. *Acta Metall Sm*, 1997, 33: 774
(武传松, Dorn L. 金属学报, 1997; 33: 774)
- [4] Pan J L. *News Letter CMES*, 2000; 1: 8
(潘际銮, 中国机械工程学会会讯, 2000; 1: 8)
- [5] Kovacevic R, Zhang Y M, Li L. *Weld J*, 1996; 75: 317s
- [6] Wu C, Gao J, Li J. *Int J Joining Mater*, 1999; 11: 18
- [7] Gao J Q, Li K H, Wu C S. *Weld Technol*, 1999; 4: 3
(高进强, 李克海, 武传松. 焊接技术, 1999; 4: 3)
- [8] Song Y L. *Ph D Thesis*, Tianjin University, 1990
(宋永伦. 天津大学博士学位论文, 1990)
- [9] Li P J. *Ph D Thesis*, Harbin Institute of Technology, 1997
(李朋九. 哈尔滨工业大学博士学位论文, 1997)