

文章编号:1006-2467(2015)03-0301-05

DOI: 10.16183/j.cnki.jsjtu.2015.03.003

钨极惰性气体保护焊熔池三维自由表面 特征参数的激光视觉测量

张 刚, 石 玦, 李春凯, 樊 丁, 黄健康

(兰州理工大学 省部共建有色金属先进加工与再利用国家重点实验室, 兰州 730050)

摘 要: 针对现有的钨极惰性气体保护焊熔池三维自由表面测量方法难以应用于强弧光、高温辐射、液态金属表面镜面反射等问题, 提出一种激光视觉测量法。利用小功率点或线阵模式结构激光照射覆盖整个熔池表面, 采用高速摄像机实时采集经熔池液态金属表面反射畸变的激光图像。设计图像处理算法提取成像激光点位置坐标, 建立与投射激光点位置坐标的空间转换数学模型, 离线获得熔池三维自由表面的几何特征参数值, 对比实测凝固熔池表面对应参数值发现, 所提取的几何特征参数值与实测值吻合较好, 熔宽、长度和凸度误差分别为 0.8%、0.6% 和 4.7%, 证明激光视觉法能够实现熔池自由表面三维信息的动态测量, 为采用几何特征参数调整熔池自由表面形貌变化控制焊缝成形及缺陷提供一种新方法。

关键词: 钨极惰性气体保护焊; 激光视觉; 熔池自由表面; 特征参数

中图分类号: TG 409 文献标志码: A

Measurement of Characteristic Parameters of Three Dimensional Weld Pool Surface in Tungsten Inert Gas Arc Welding Based on Laser-Vision

ZHANG Gang, SHI Yu, LI Chun-kai, FAN Ding, HUANG Jian-kang

(State Key Laboratory of Advanced Processing and Recycling of Nonferrous Metals,
Lanzhou University of Technology, Lanzhou 730050, China)

Abstract: Aimed at the problems in measuring the three dimensional weld pool surface in tungsten inert gas arc welding in existing methods, which are hardly applied in the strong arc light, high temperature radiations and specular refraction. A novel method named laser-vision was developed, and the measurement system was established. The experiments with laser dot matrix and parallel lines pattern were performed and the reflected laser distorted images were captured by a high speed camera. The reflected laser dot coordinate and its transfer model between projected laser dot coordinate were extracted and established, respectively. The geometric parameters of the weld pool surface were obtained offline. The comparison of the extracted and measured result shows that the proposed method can successfully measure the three dimensional information of the weld pool surface and the extracted results coincide with the actual measurement well. The error of width, length and convexity is 0.8%, 0.6% and 4.7%, respectively. This paper provides a new method for control of 3D weld pool surface in real-time.

收稿日期: 2014-07-03

基金项目: 国家重点基础研究发展规划(973)前期研究专项(2014CB660810), 国家自然科学基金项目(61365011), 国家自然科学基金国际合作与交流项目(51210105024), 兰州理工大学红柳杰出人才培养计划项目(J201201), 陇原创新性人才扶持计划项目资助

作者简介: 张 刚(1986-), 男, 甘肃省临夏县人, 博士生, 主要研究方向为焊接过程检测与智能控制。E-mail: berscheid@126.com.

石 玦(联系人), 男, 教授, 博士生导师, 电话(Tel.): 0931-2976682; E-mail: shiyu@lut.cn.

Key words: tungsten inert gas arc welding (TIG); laser vision; weld pool free surface; characteristic parameters

近年来,电弧与熔池相互耦合作用机理研究已成为焊接热物理领域的热点. 国内外学者采用数值模拟技术对此进行了相关研究,并取得了一定的成绩^[1],但弧焊熔池的形成、凝固是一动态、可变的瞬态过程,直接准确测量十分困难,且建立的耦合数学模型、模拟结果的准确性及方法的可行性等缺少必要的实验佐证. 通过有经验的熟练焊工施焊过程中观察熔池表面变化控制焊接质量获得启发:弧焊熔池表面形貌中包含着丰富的表征焊接过程稳定性、焊缝成形、熔透状态等信息^[2]. 因此,测量熔池自由表面三维形貌对验证数值模拟结果,控制焊接过程、提高焊接质量,实现自动化、智能化焊接有着十分重要的意义.

目前,学者们开展了钨极惰性气体保护焊(Tungsten Inert Gas Arc Welding, TIG)熔池三维自由表面测量的相关研究,绝大多数仅获得了熔池表面的二维信息^[3],因二维物理量缺乏与熔透间的直接对应关系,不能很好地反映熔透状态,且对熔池数值模拟结果在高度方向上的信息无法进行验证. 因此,文献^[4]中采用阴影恢复法重建了单幅熔池三维自由表面,获得了熔池自由表面的三维几何特征参数. 文献^[5]中采用双目立体视觉法重建熔池三维表面,但以上方法仍未克服强弧光、高温辐射对三维恢复过程的影响,获得结果与实测结果具有一定的误差. Saeed等^[6]首先采用大功率结构激光照射熔池表面,配合高速摄像机获得了熔池自由表面的三维形貌. 为降低大功率激光器高成本,在此基础上基于熔池表面的镜面反射采用小功率结构光,成功获取了熔池表面变化的反射图像,重建了熔池三维形貌,因三维重建系统的特殊性在实际应用中受到了一定限制.

本文基于熔池液态金属表面的镜面反射作用、弧光随距离的增加呈平方递减及激光的高亮度特性,提出激光视觉检测熔池自由表面方法,建立实验测量系统,并采用不同模式(点阵和线阵)结构激光照射熔池表面,获取熔池表面反射图像,设计相关图像处理算法提取反映熔池表面变化的特征信息,同时与实际测量结果进行了对比,分析了点阵模式下熔池表面测量结果精度,为后续实现实时测量控制熔池形态奠定基础.

1 激光视觉测量原理及实验系统

与焊枪成一定几何光学参数的点阵或线阵结构激光照射于熔池表面,焊枪另一侧放置一成像屏来截取熔池表面反射畸变的激光,采用高速摄像机实时记录变化的激光点阵或条纹图像. 由于反射激光点位置变化与熔池表面液态金属的三维形态变化具有严格的光学对应关系,因此,建立工件平面坐标系—成像屏坐标系—摄像机坐标系间的光学变换模型和三坐标系中的投影关系模型,计算投射激光点的位置坐标点和反射角度,再设计合理的拟合算法和误差评估、补偿算法重建熔池三维自由表面形貌. 测量原理如图1所示.

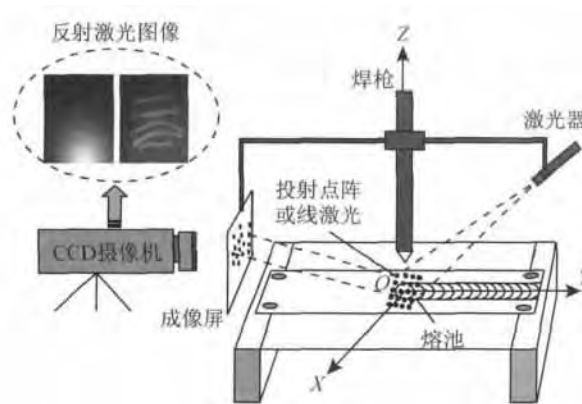


图1 激光视觉测量原理

Fig. 1 Measurement principle of laser vision

根据图1原理建立图2所示的实验测量系统. 在OYZ平面内距焊枪约75 mm,与工件成 $30^{\circ}\sim 35^{\circ}$ 的位置放置一小型结构光激光器,并将 19×19 点阵或5束平行激光投射、覆盖于整个熔池表面. OXZ面内距焊枪一定距离垂直或倾斜放置成像屏,用于截取被熔池表面反射的激光束. 为进一步增强成像屏上反射成像激光点与背景光的亮度衬度,在最大采样频率为30 Hz的CCD摄像机镜头前配备 (685 ± 10) nm的带通滤光片,在成像屏另一侧放置.

实验过程中,焊枪固定,工作台匀速行走. 图3为焊接过程中采集的典型反射激光点阵和条纹图像. 从图2和3可以看出,经熔池表面反射的激光点阵与条纹受到熔融液态金属流动作用,其形态明显产生畸变. 在相同焊接规范和光路几何参数下,所获得的激光点阵和条纹形态变化相似.

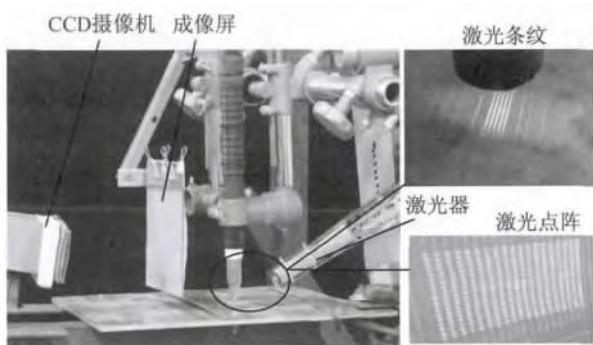
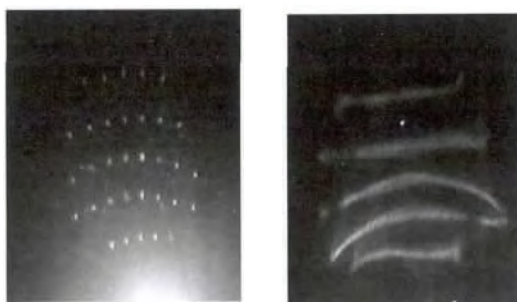


图 2 实验系统

Fig. 2 Experimental system



(a) 反射激光点阵 (b) 反射激光条纹

图 3 采集到点阵和条纹激光反射图像

Fig. 3 Typical dot and line-pattern laser image

2 投射激光点与反射激光点坐标变换

从图 1 理论分析可知,投射到熔池表面的激光点尺寸很小,但经熔池表面反射成像后,激光点畸变被光学放大,因此,为获得熔池实际几何尺寸,对成像激光点坐标与投射激光点坐标之间的转换进行了解析研究. 首先,定义两坐标系:成像屏坐标系 xoz 和工件坐标系 XYZ ,如图 4 所示.

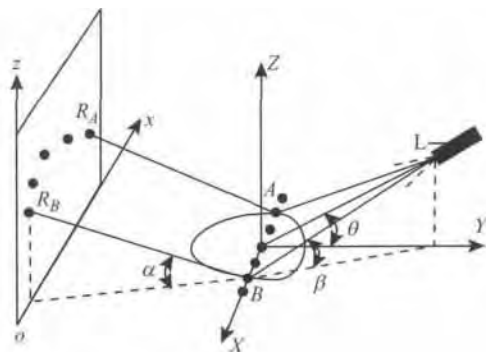


图 4 两坐标系几何转换示意图

Fig. 4 Transform illustration of two coordinate systems

研究投射激光点与反射成像激光点间的匹配模式^[9]可知,两者之间存在顺序、逆序和混序 3 种映射模式. 激光反射呈顺序模式时,假设熔池边界处熔池表面高度与工件平面基本一致. 选取投射激光点

阵中的一列来阐述成像屏激光点坐标到投射激光点坐标的转换过程.

假设熔池表面投射点 A 和 B 所对应的反射成像激光点分别记为 R_A 和 R_B ;激光器中心激光束与工件平面的夹角为 θ ;激光器 L 的空间坐标为 (X_L, Y_L, Z_L) ;投射激光点 $A(X_A, Y_A, Z_A), B(X_B, Y_B, Z_B)$;反射成像激光点 $R_A(x_{RA}, y_{RA}, z_{RA}), R_B(x_{RB}, y_{RB}, z_{RB})$;成像屏平行于 OXZ 平面放置,距工件表面高度为 H ,到 Z 轴水平距离为 d ,则可求解出过成像屏激光点 R_B 的直线方程式:

$$\left. \begin{aligned} z - z_{RB} - H &= \tan \alpha (x - x_{RB}) \\ y &= d \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

由光学反射定律可知, $R_B B$ 直线和 LB 直线与投射点 B 处水平切平面法线的夹角相等,因此, LB 直线方程采用下式表示:

$$\left. \begin{aligned} z - Z_L &= \tan \beta (x - X_L) \\ y &= \cot \alpha (z_{RB} + H) - d \\ \beta &= -\alpha \end{aligned} \right\} \quad (2)$$

通过联立求解方程(1)、(2),可得投射点 B 的空间坐标:

$$\left. \begin{aligned} X_B &= \frac{Z_L - z_{RB}}{2 \tan \alpha} + \frac{x_{RB} + X_L}{2} \\ Y_B &= \cot \alpha (z_{RB} + H) - d \\ Z_B &= 0 \\ \tan \alpha &= (z_A + H) / d \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

式中,激光器 L 空间位置坐标 d, H 值可通过实验测量获得,反射成像激光点 R_B 的坐标可采用图像处理提取获得^[7]. 采用相同方法可获得反射成像激光点所对应的投射激光点的空间位置坐标.

3 三维熔池表面特征参数定义及提取

激光点阵测量法仅获得熔池表面有限点空间位置几何信息,不能直接描述熔池表面三维几何特征. 因此,基于已测量的点或条纹信息定义计算熔池表面三维特征参数. 各参数几何示意如图 5 所示.

采用文献[8]中的公式来描述熔池边界.

$$Y = \pm aX^b(1 - X), a > 0; 1 \geq b > 0 \quad (4)$$

式中: a 和 b 是模型参数; (X, Y) 是熔池边界上投射激光点的空间位置坐标.

由于熔池边界模型参数 a 和 b 与熔宽 w 和长度 l 满足以下公式所示关系,通过求解模型参数和熔宽可获得熔池的长度尺寸.

$$\frac{w}{l} = 2a \left[\frac{b}{1+b} \right]^b \frac{1}{1+b} \quad (5)$$

通过成像激光点坐标提取及空间坐标转换,采

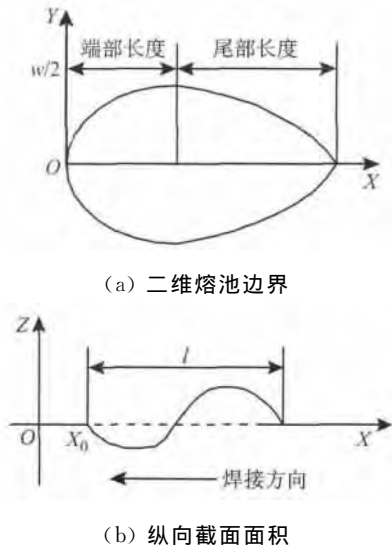


图 5 熔池边界及特征参数

Fig. 5 Weld pool boundary and characteristic parameters

用下式可计算出熔池最大宽度

$$w_{max} = \sqrt{(X_A - X_B)^2 + (Y_A - Y_B)^2} \quad (6)$$

熔宽和长度仅表征了熔池二维平面特征信息,因此,定义特征参数凸度 c 来表征沿着焊接方向熔池表面高度平均变化,并通过公式进行计算:

$$c = S/l \quad (7)$$

$$S = \int_{X_0}^{l+X_0} [Z(X) - Z_0]dX \quad (8)$$

式中: S 表示焊缝横截面面积; Z_0 表示工件表面的纵坐标; X_0 代表熔池最前端边界点 X 坐标.

在规格为 125 mm×100 mm×3 mm 的 304 不锈钢板上进行了 TIG 平板点焊工艺实验,采集了表征熔池自由表面形态变化的激光点阵视频图像.摄像机采样频率设定为 24 Hz,选取熄弧前 0.25 s 内的连续帧激光点阵图像,如图 6 所示.实验过程中采用富氩气保护,气流量为 8 L/min.焊接规范为:电流 60 A,弧长 4 mm.激光光路参数为:激光器功率 50 mW,激光器到工件间的夹角 30°,成像屏到熔池中心水平距离、工件高度分别为 50、10 mm.

采用三维恢复算法^[7]对图 6c 所对应的瞬态熔池表面三维形貌进行了恢复.为了从采集反射激光点阵视频图像中提取更准确的三维恢复所需熔池几何参数数据和消除或减小弧光及视频信号传输过程中外界随机信号的干扰,将反射激光点阵原始图像进行增强、滤波、二值化和形态学操作预处理,其结果如图 7 所示.其次,采用文中投射激光点与反射激光点之间的转换数学模型、熔池边缘拟合方程、插值拟合算法重建了熔池三维自由表面形貌,结果见图 8;图 9 所示为点焊熔池形貌作横截面.

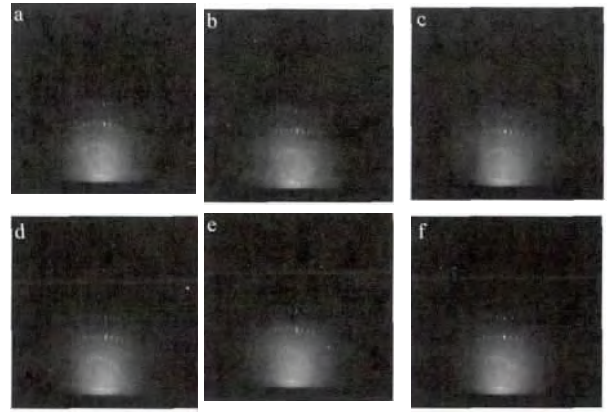


图 6 熔池表面反射激光点形态变化
Fig. 6 Typical reflected laser dot image

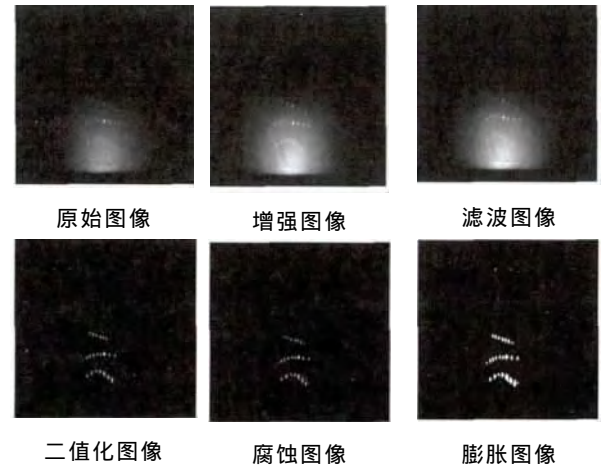


图 7 反射激光点阵图像预处理结果

Fig. 7 Preprocessed results of reflected laser dot image

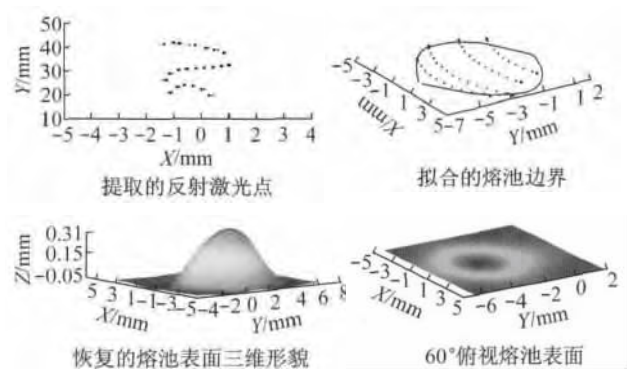


图 8 熔池自由表面三维恢复形貌

Fig. 8 Reconstructed 3D weld pool surface

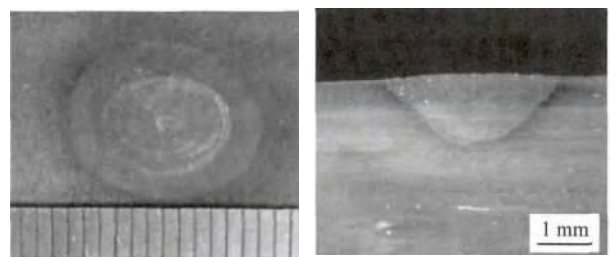


图 9 点焊熔池形貌和横截面

Fig. 9 Stationary weld pool shape and cross-section

对比图8与图9可以看出,熔池表面恢复形貌与实际点焊熔池表面形貌基本一致,在小电流下熔池表面呈凸形,从恢复结果与实际熔池横截面图可以得到验证.而且定性地证明文中提出的熔池边界拟合和恢复方法具有一定的准确性.利用已转换的投射激光点阵坐标计算了熔池宽度约为7.10 mm,长度约为7.30 mm,凸度约为0.21 mm.

4 实验验证与结果分析

为进一步验证激光视觉测量熔池表面几何特征参数的准确性和所采用的三维重建算法的合理性,将图6a、b、d~f进行了三维重建,并提取其特征参数值.同时,对凝固的熔池表面熔宽、长度和高度进行多次测量求取了平均值,结果如表1所示.

表1 熔池表面几何特征参数计算和实测结果

Tab.1 Calculated and measured geometric parameters of 3D weld pool surface mm

实验编号	几何特征参数			
	熔宽 w	长度 l	凸度 c	
a	7.16	7.18	0.18	
三 维 恢 复 结 果	b	7.20	7.22	0.20
c	7.10	7.30	0.21	
d	7.22	7.30	0.23	
e	7.22	7.28	0.21	
f	7.20	7.30	0.21	
平均值	7.18	7.26	0.20	
实测(平均)值	7.12	7.21	0.21	
误差/%	0.8	0.6	4.7	

分析表1可知,TIG点焊熄弧前0.25 s内选取的反射激光点阵图像重建结果能较好地反映熔池表面的动态变化.熔池宽度平均值为7.18 mm,长度平均值为7.26 mm,而实测熔池表面宽度、长度平均值分别为7.12 mm,7.21 mm,各自误差为0.8%和0.6%,均在误差接受范围内,此误差主要是通过人工测量引起,因此,提取的三维恢复熔池表面二维几何信息能够很好地表征度量瞬时的熔池表面二维几何尺寸不变化.但是,三维恢复熔池表面凸度与实测结果间的误差相对较大,讨论认为主要是因为反射激光点阵中不一定包含着实际熔池表面顶部液态金属所反射的激光点,而且,文中所采用的三维重建算法中假设熔池表面是一理想光滑的水平面,但是实际工件表面具有一定的粗糙度或加工、焊接过程中存在较小的变形,并不是一理想水平面,因此,利用图像处理获得的激光点阵位置坐标和理想工件

表面所计算的熔池表面凸度出现较大误差.提高精确度需对三维恢复算法作进一步优化.

5 结论

(1) 提出激光视觉测量熔池表面三维形貌的新方法,通过反射成像激光点与投射激光点间的坐标转换模型,获得较准确的熔池表面实际高度信息.

(2) 三维恢复熔池表面特征参数熔宽、长度和凸度的计算值,与熔池表面实测值间的误差分别为0.8%、0.6%和4.7%.

(3) 所提取的熔池表面三维形貌几何特征参数,能够表征度量瞬时动态变化的实际熔池表面信息,为采用几何特征参数调整熔池自由表面形貌变化来控制焊缝成形及缺陷提供一种新方法.

参考文献:

- [1] Yosuke O, Yoshinori H, Junichi K, *et al.* Numerical analysis of arc plasma and weld pool formation by a tandem TIG arc [J]. *Welding in the World*, 2013, 57(3): 411-422.
- [2] Zhang Y M, Li L, Kovacevic R. Dynamic estimation of full penetration using geometry of adjacent weld pools [J]. *Journal of Manufacturing Science and Engineering*, 1997(119): 631-643.
- [3] Lucas W, Bertaso D, Melton G, *et al.* Real-time vision-based control of weld pool size [J]. *Welding International*, 2012, 26(4): 243-250.
- [4] 赵冬斌, 陈强, 陈善本, 等. 由单幅图像恢复物体三维形状的应用研究[J]. *光学技术*, 2001(4): 367-369. ZHAO Dong-bin, CHEN Qiang, CHEN Shan-ben, *et al.* Research on the application of the 3D shape from a single image [J]. *Optical Technology*, 2001(4): 367-369.
- [5] Mnich C, Al-Bayat F, Debrunner C, *et al.* In situ weld pool measurement using Stereovision [C]// *Proceedings of 2004 Japan-USA Symposium on Flexible Automation*. Denver: ASME, 2004: 19-21.
- [6] Saeed G, Zhang Y M. Mathematical formulation and simulation of specular reflection: principle and analysis [J]. *Journal of Engineering Manufacture Part B*, 1996, 210: 553-564.
- [7] Song H S, Zhang Y M. Error analysis of a three dimensional GTA weld pool surface measurement system [J]. *Welding Journal*, 2009, 88(7): 141-148.
- [8] Zhang W J, Liu X K, Wang X. Characterization of three dimensional weld pool surface in GTAW [J]. *Welding Journal*, 2012, 91(7): 195-203.