

# 激光焊接钛合金薄板时的功率控制

张 健 杨 锐

(天津职业技术师范大学电子工程学院, 天津 300222)

**摘要** 用 Nd:YAG 脉冲激光器对 0.5 mm 厚 TC4 钛合金薄板进行了焊接实验。设计了与光路同轴的机器视觉系统,并利用高速电荷耦合器件(CCD)实时获取焊斑图像。通过采用辅助照明光源有效提高了焊斑成像质量。采用基于细胞神经网络的算法进行焊斑边缘提取。通过对焊斑图像的分析可以获得薄板穿孔或熔深不足的信息,以此作为反馈控制信号对脉冲激光功率进行实时调整。实验证明,该方法可有效减少薄板穿孔和熔深不足缺陷的发生,提高 TC4 钛合金薄板激光焊接的质量。

**关键词** 激光技术;激光焊接;机器视觉;细胞神经网络;闭环控制

**中图分类号** TG456.7; TN249 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/CJL201239.0103003

## Control of Laser Power During Titanium Alloy Thin Plate Welding

Zhang Jian Yang Rui

(Institute of Electronic Engineering, Tianjin University of Technology and Education, Tianjin 300222, China)

**Abstract** TC4 titanium alloy thin plates with the thickness of 1.5 mm are welded by Nd:YAG pulsed laser. A coaxial machine vision system that used high speed charge coupled device (CCD) is designed to acquire welded spot pictures. The welded spot pictures quality is significantly improved with the help of auxiliary illuminant. The welded spot edges are extracted by means of cellular neural network algorithm. The information of thin plate fenestration or insufficient depth of fusion can be acquired by analysis of welded spot pictures, and it is used as an input signal for closed-loop control. Experimental results demonstrat that this method can efficiently reduce thin plate fenestration or insufficient depth of fusion improve the welding quality.

**Key words** laser technique; laser welding; machine vision; cellular neural network; closed-loop control

**OCIS codes** 140.3390; 150.5495; 140.3580

## 1 引 言

钛合金因其密度小、强度高和耐腐蚀等优点而被广泛应用于航空航天领域。钛合金焊接性能良好,钨极氩弧焊和熔化极气体保护焊是焊接钛合金的常用工艺。但在焊接钛合金薄板时,上述焊接方式由于热影响区较大常造成穿孔和变形等缺陷。激光焊接具有能量集中、焊件变形小和生产效率高等优势,非常适合钛合金材料的焊接。激光焊接工艺参数对焊接质量的影响已有报道<sup>[1~4]</sup>。近年来,利用机器视觉技术直接观测焊斑,建立焊接过程的实时传感与控制系统,已成为重要的研究方向<sup>[5~8]</sup>。细胞神经网络(CNN)由 Chua 等<sup>[9,10]</sup>在 1988 年提出,已成为神经网络和电路与系统两个方向的研究

热点,涵盖大规模并行计算、图像处理、可视化大规模集成电路芯片和机器视觉等多个领域<sup>[11,12]</sup>。

本文设计了与光路同轴的机器视觉系统,利用高速电荷耦合器件(CCD)实时获取焊斑图像。通过采用辅助照明光源提高焊斑成像质量。利用基于 CNN 的边缘提取算法对焊斑图像进行分析可获得薄板穿孔或熔深不足的信息,以此作为反馈控制信号对脉冲激光功率进行实时调整。实验证明该方法可有效减少薄板穿孔或熔深不足的发生,提高钛合金薄板的焊接质量。

## 2 边缘提取算法

目前用于边缘检测的算子主要分为两种:1)以

收稿日期: 2011-08-19; 收到修改稿日期: 2011-09-15

基金项目: 天津市高校科技发展基金(20070809)资助课题。

作者简介: 张 健(1976—),男,博士,副教授,主要从事固体激光器及其应用方面的研究。E-mail: tjuzjj@sina.com.cn

一阶导数为基础的边缘检测算子,通过计算图像的梯度值来检测图像边缘,如 Roberts 算子、Sobel 算子和 Prewitt 算子;2)以二阶导数为基础的边缘检测算子,通过寻求二阶导数中的过零点来检测边缘,如拉普拉斯算子、LOG 算子和 Canny 算子。其中 Roberts 算子边缘定位精度较高,但易丢失一部分边缘,同时由于没经过图像平滑计算,因此不能抑制噪声。Sobel 算子对噪声具有平滑作用,受噪声影响较小,但同时也会检测出许多伪边缘,定位精度不高。Prewitt 算子和 Sobel 算子使用方法一样,都是对图像进行差分和滤波运算,差别只在于使用的模板不一样。拉普拉斯算子加倍加强了噪声,常产生双像素宽的边缘,所以拉普拉斯算子很少直接用于边缘检测。LOG 算子根据图像的信噪比求出检测边缘的最优滤波器,但计算量较大不适于闭环控制系统。Canny 算子是边缘检测中的较好方法,并且对于单个边缘点仅有一个响应,但是 Canny 算子的参数在处理图像时是预先设定的,缺乏自适应性。相对于上述算子,CNN 具有确定的二值输出,对噪声不敏感,自适应性强,边缘检测效率高,收敛速度快,可并行计算,便于硬件实现且不会发生振荡或是变为混沌,非常适于闭环控制系统。

采用文献[9]提出的 CNN 算法提取图像边缘。该算法将图像输入作为一个神经网络,将每个像素

点作为一个神经元,通过动态方程引导神经元的状态向神经网络所定义的最低能量方向变化,来实现边缘提取。采用 Matlab 软件实现的流程如图 1 所示。为减小连续焊接时前一焊斑对当前焊斑边缘提取过程的影响,算法中加入了图像降噪和边缘锐化过程。

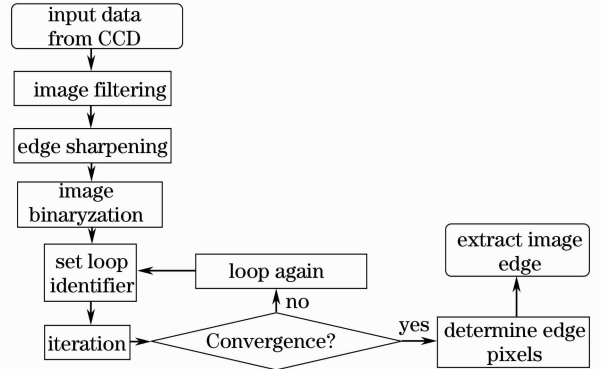


图 1 算法流程图

Fig. 1 Flow chart of algorithm

### 3 实 验

#### 3.1 实验样品

以表面平整的 TC4 薄板作为焊接实验板材,试件尺寸为 50 mm×20 mm×1.5 mm,板材化学成分如表 1 所示。

表 1 化学成分(质量分数,%)

Table 1 Chemical composition (mass fraction, %)

Al	V	Fe	C	N	H	O	Ti
5.5~6.8	3.5~4.5	≤ 0.30	≤ 0.08	≤ 0.05	≤ 0.015	≤ 0.2	Blance

#### 3.2 实验装置

实验采用灯抽运 Nd:YAG 脉冲激光器,输出波长为 1064 nm,最大平均功率为 400 W。实验时光脉冲宽度为 1.5 ms,重复频率为 10 Hz,平均功率为 110 W;聚焦镜焦距为 60 mm,离焦量为-2.0 mm;焊接速度为 100 mm/min;保护气体采用氩气,流量为 4.5 L/min。实验时光脉冲重复频率较低,为避免拍摄到熔池熔化时的图像,采取光脉冲停止后延时 10 ms 再触发图像采集系统的工作方式。为获得焊斑正向视图,避免侧向视图的图像变形,设计了同轴图像采集光路。系统采用 AOS Technologies 公司生产的 S-PRI F1 高速图像采集系统,图像分辨率为 256 pixel×256 pixel。为减小焊接过程产生的等离子体对成像质量的影响,采用对等离子体有较强透射能力的波长为 830 nm 的半导体激光器(LD)作为辅助光源,对焊斑进行照射,并在光路中加入了

波长 830 nm 的反射镜,如图 2 所示。不采用辅助光源照明的焊斑照片如图 3 所示,采用辅助光源照明的焊斑照片如图 4 所示。对比图 3 和图 4 可见,辅助光源照明系统减小了等离子体的影响,提高了焊斑成像质量。

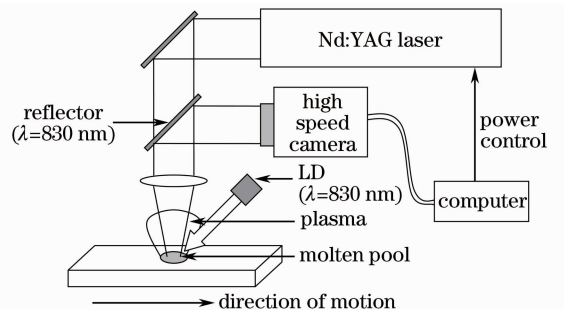


图 2 实验装置

Fig. 2 Experimental setup

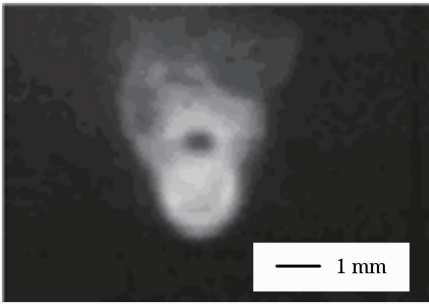


图3 不采用辅助光源照明的焊斑照片

Fig. 3 Picture of welded spot without auxiliary illuminant

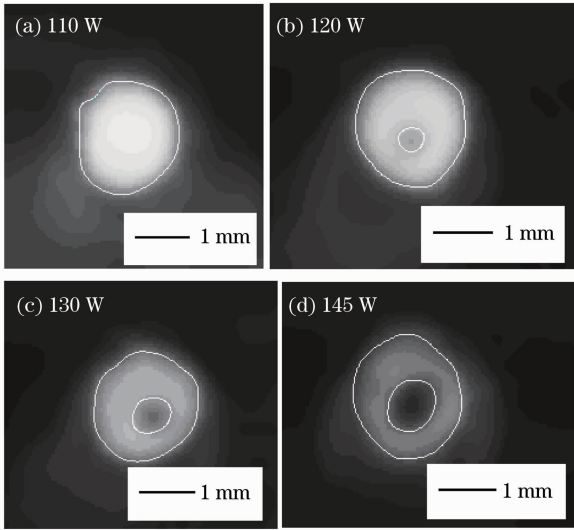


图4 不同激光功率下焊斑边缘提取

Fig. 4 Edge extraction of welded spot with different laser power

### 3.3 闭环控制

图4中单纯提高抽运光源电压,其余参数不变,激光器平均功率相应地由110 W提高至145 W。随着激光功率的提高,焊斑出现了明显的穿孔现象。由于激光功率较低,未形成“小孔效应”,且实验过程中离焦量保持不变,所以焊斑尺寸可反映激光功率波动造成的熔深变化。激光功率降低时焊斑尺寸会相应减小,造成熔深不足。上述两种情况都会造成焊缝强度降低,为此对激光功率可做闭环控制:1)焊斑图像提取的封闭路径数量大于1,且路径嵌套,判定为焊斑出现穿孔现象,减小抽运光源电压;2)焊斑图像提取的封闭路径数量不大于1,且该路径包含像素数目减少时(在本实验所选用的成像系统下,经实验发现,闭合路径包含1000~1500 pixel时焊斑效果最佳),说明焊斑面积减小,判定为熔深不足,提高抽运光源电压。

### 3.4 焊接效果对比

为验证上述闭环控制系统的有效性,进行了焊接效果对比实验。图5为采用上述闭环控制系统的焊缝正面图片。为获得完整的熔池图像,采用厚度2.5 mm的同材料薄板进行焊接实验,图6为截面形貌,可见其焊斑尺寸和熔池深度十分均匀。图7为激光功率110 W时,采用开环和闭环控制系统的焊斑尺寸对比。图8为焊缝背面的照片,图8(a)由于采用了上述闭环控制系统,所以焊缝均匀。另两幅图由于未采用闭环控制系统,所以焊缝质量较差,其中图8(c)圆圈标记处出现了穿孔现象。

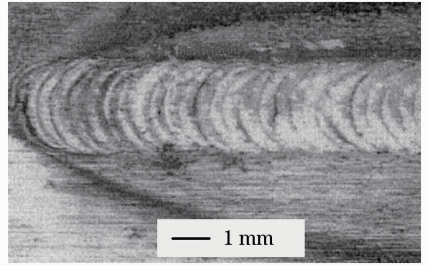


图5 焊缝正面形貌

Fig. 5 Right side shape of welded seam

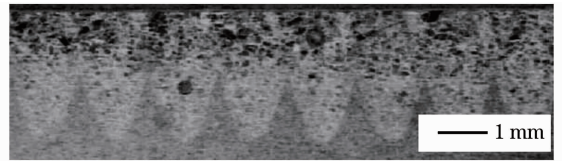


图6 焊缝截面形貌

Fig. 6 Cross section of welded seam

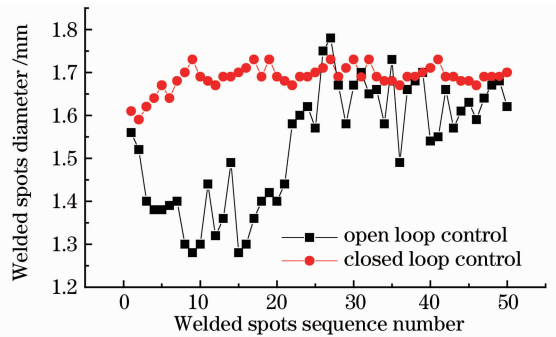


图7 采用开环和闭环控制的焊斑尺寸

Fig. 7 Welded spots diameter under open or closed loop control

## 4 结 论

利用基于CNN的边缘提取技术建立了Nd:YAG脉冲激光焊接过程的闭环控制系统。设计了同轴图像采集光路,可获得焊斑正向视图。通过采用辅助照明光源提高了焊斑成像质量。实验证明,通

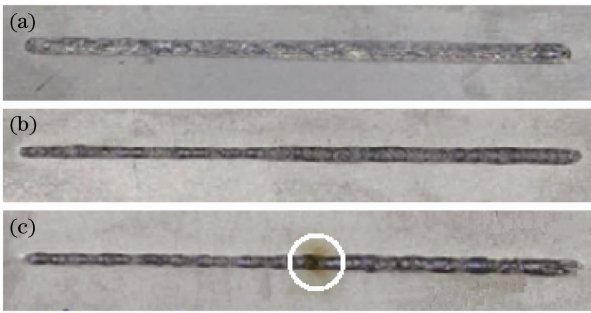


图 8 焊缝背面照片。(a)焊缝均匀;(b)焊缝不均匀;  
(c)焊缝穿孔

Fig. 8 Back side shape of welded seams. (a) Uniform;  
(b) non-uniform; (c) perforated seam

通过对激光功率的闭环控制可有效提高钛合金薄板的焊接质量。

### 参 考 文 献

- 1 Wang Wenxian, Zhang Ya'nan, Cui Zeqin *et al.*. Study on microstructure and properties of double ultra-thin stainless steel clad plate by laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(5): 0503002  
王文先, 张亚楠, 崔泽琴等. 双面超薄不锈钢复合板激光焊接接头组织性能研究[J]. *中国激光*, 2011, **38**(5): 0503002
- 2 Ma Guangyi, Wu Dongjiang, Wang Zhanhong *et al.*. Weld joint forming of thin Hastelloy C-276 sheet of pulsed laser welding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603014  
马广义, 吴东江, 王占宏等. 脉冲激光焊接对超薄 Hastelloy C-276 焊缝成形的影响[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603014
- 3 Gong Weihui, Chen Yuhua, Lü Zhen *et al.*. Microstructure and properties of 0.2 mm thick sheet GH4169 by laser microwelding[J]. *Chinese J. Lasers*, 2011, **38**(6): 0603008  
龚伟怀, 陈玉华, 吕榛等. 0.2 mm 厚 GH4169 薄片激光微焊接接头的组织性能[J]. *中国激光*, 2011, **38**(6): 0603008

- 4 Liu Huixia, Xiang Baozhen, Xu Zhenkai *et al.*. Process parameters optimization of Nd:YAG pulsed laser welding based on taguchi method[J]. *Chinese J. Lasers*, 2010, **37**(s1): 350~357  
刘会霞, 向宝珍, 许贞凯等. 基于田口方法的 Nd:YAG 脉冲激光焊接工艺参数优化[J]. *中国激光*, 2010, **37**(s1): 350~357
- 5 Wang Baoguang, He Zhonghai, Liao Yibai *et al.*. Study on calibration methods of structured light sensor[J]. *Chinese J. Lasers B*, 2002, **11**(3): 198~204
- 6 Chaoyang Han, Jianxun Li, Xiao Chen *et al.*. Real-time restoration of rotational blurred image using gradient-loading[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2008, **6**(5): 334~337
- 7 R. Olsson, I. Eriksson, J. Powell *et al.*. Challenges to the interpretation of the electromagnetic feedback from laser welding[J]. *Opt. and Lasers in Engng.*, 2011, **49**(2): 188~194
- 8 Luis M. Torres-Trevi, Felipe A. Reyes-Valdes, Victor Lopez *et al.*. Multi-objective optimization of a welding process by the estimation of the Pareto optimal set[J]. *Expert Systems with Applications*, 2011, **38**(6): 8045~8053
- 9 L. O. Chua, L. Yang. Cellular neural networks; theory[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(10): 1257~1272
- 10 L. O. Chua, L. Yang. Cellular neural networks; applications[J]. *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, 1988, **35**(10): 1273~1290
- 11 Alper Basturk, Enis Gunay. Efficient edge detection in digital images using a cellular neural network optimized by differential evolution algorithm[J]. *Expert Systems with Applications*, 2009, **36**(3): 2645~2650
- 12 Huaqing Li, Xiaofeng Liao, Chuandong Li *et al.*. Edge detection of noisy images based on cellular neural networks[J]. *Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation*, 2011, **16**(9): 3746~3759

栏目编辑:宋梅梅