

文章编号: 1001-3806(2015)04-0437-06

## 冷轧带钢激光拼焊的焊缝在线检测研究

盛利民<sup>1</sup>, 唐霞辉<sup>1\*</sup>, 彭浩<sup>1</sup>, 潘吉兴<sup>1</sup>, 裴云<sup>2</sup>, 朱海云<sup>2</sup>

(1. 华中科技大学 光学与电子信息学院 激光加工国家工程研究中心, 武汉 430074; 2. 武汉钢铁股份有限公司, 武汉 430074)

**摘要:** 焊缝质量在线检测是冷轧带钢激光拼焊过程中的重要关键技术之一。为了解决武钢 TRUMPF12000 轴快流激光拼焊设备在焊接过程中出现的错边、拼缝、焊缝形态等问题, 采用3个传感器分别采集焊前间隙图像信息、焊接过程图像信息以及焊后焊缝图像信息, 利用 OTSU 自动计算图像阈值、运用投影矩阵的方法将图像坐标转换到工件坐标, 编写程序提取图像特征点的方式建立焊缝质量在线检测系统, 并以 5m/min 焊接速率对 3mm 厚冷轧板进行焊接实验, 测量焊接试样焊缝宽度相对误差在 4.42% 左右。结果表明, 焊缝质量检测系统可以计算出较为准确的焊缝宽度、焊缝错边量等信息。

**关键词:** 激光技术; 焊缝检测; 传感器; 图像处理; 投影几何

中图分类号: TN249; TP274

文献标志码: A

doi:10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.04.001

### Research of on-line inspection of laser welding seam quality of cold rolled strips

SHENG Limin<sup>1</sup>, TANG Xiahui<sup>1</sup>, PENG Hao<sup>1</sup>, PAN Jixing<sup>1</sup>, PEI Yun<sup>2</sup>, ZHU Haiyun<sup>2</sup>

(1. National Engineering Research Center for Laser Processing, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China; 2. Wuhan Iron and Steel Corporation, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** On-line inspection of seam quality is one of the most important key technologies in laser welding of cold rolled strips. In order to solve the welding problems of TRUMPF12000 fast-flow axial laser welding equipment used in WISCO, such as misalignment, seam and weld morphology, three sensors were adopted to acquire image information including gap images before welding, penetration images during welding, and seam images after welding and so on. OTSU operation was used to find the threshold automatically. Projective geometry was used to convert image coordinates to workspace coordinates. Codes were written to extract image features. On-line seam quality inspection system was founded. Experiments were performed to test the inspection accuracy of 3mm thickness cold steel at weld velocity of 5m/min. The relative error of seam width was about 4.42%. The results show that the seam inspection system can offer the accurate judgment comparatively.

**Key words:** laser technique; weld inspection; sensor; image processing; projective geometry

## 引 言

激光焊接设备是冷轧薄板生产线必不可少的拼焊设备。带钢在线行走不仅距离长, 而且还要经过多次“S”型弯曲变形, 并承受一定的运行张力, 因此, 对焊缝的性能和质量提出了较高的要求。激光焊接设备拼焊的焊缝质量如何, 由焊缝质量检测系统进行判断。

基金项目: 高等学校博士学科点专项科学研究基金资助项目(20110142110046)

作者简介: 盛利民(1990-), 女, 硕士研究生, 现主要从事激光拼焊焊缝质量检测方面的研究。

\* 通讯联系人。E-mail: txh1116@hust.edu.cn

收稿日期: 2014-06-03; 收到修改稿日期: 2014-07-03

德国 Miebach 公司联合 Falldorf 公司推出了激光焊接质量检测系统 (quality control date system, QCDS)<sup>[1]</sup>。加拿大 Servo-Robot 公司推出了具有焊缝跟踪、焊接质量检测以及激光焊接过控制功能的 DIGI-LAS 产品<sup>[2]</sup>。de GRAAF 编写了可以满足激光自动焊接精度要求的实时焊缝追踪算法, 该算法需要一个传感器计算激光焦点, 由于计算与焊接同步进行, 算法速率快<sup>[3]</sup>。

天津大学的学者研究了用于机器视觉的焊缝图像获取及图像处理, 以及基于 TOTA-400 II 型 CCD 摄像机、OK-C20 采集卡、640nm ~ 660nm 带通滤波片等的试验条件<sup>[4]</sup>。上海交通大学的学者研究了针对 CMOS 图像传感器的高效采集卡, 用于管道焊缝 X 射线无损

实时检测系统<sup>[5]</sup>。目前国内对激光焊接焊缝质量检测的研究多数为离线检测,即焊接后对焊缝质量进行检测,这类系统无法预计焊缝质量,并无法在焊接前调整带钢间隙以避免焊接错误。

本文中针对武钢冷轧总厂使用的德国 Miebach 公司生产的激光拼焊设备,其焊接厚度在 0.3mm ~ 8mm 之间,最大焊缝长度可达 2m(根据生产线配置),焊接速率为 1m/min ~ 8m/min<sup>[6]</sup>。激光拼焊由于激光束的光斑直径较小,如果板材之间的加工间隙过大,激光束将从间隙中漏过,无法形成焊缝,因此板边的预加工质量非常重要,特别是对于薄板而言,剪切质量、对缝精度、焊接工艺三要素是保证焊缝质量的前提条件。

## 1 检测系统结构

### 1.1 整体结构

图 1 为冷轧带钢拼焊设备整机图,其中图 1a 为焊机结构示意图,激光焊机主要包括激光器、焊接小车、机械底座、双切剪、激光焊接头、诊断及操作设备等几部分。诊断及操作设备包含生产模块、输出模块、监测模块以及维护模块<sup>[7]</sup>。焊接整体过程为准备工作,如图 1b 所示的送料图,前卷带钢末端到达精剪位置,钢板对中之后由大压板压紧带钢,后卷带钢头端抵达精剪位置,同样对中控制之后由大压板压紧后带钢,同时剪切前后两钢带端部。高精剪退出,小压板及支撑系统进入工作位置,驱动小压板分别压住两钢带,驱动后钢带夹紧机构前进,完成对缝。图 1c 为焊接系统工作图,同时电阻加热滚轮使未拼缝移动进行退火处理(根据需要)。退出激光头,同时冲工艺孔,松开夹紧机构。抬起入口、出口托辊以使得钢带向前运动,钢带

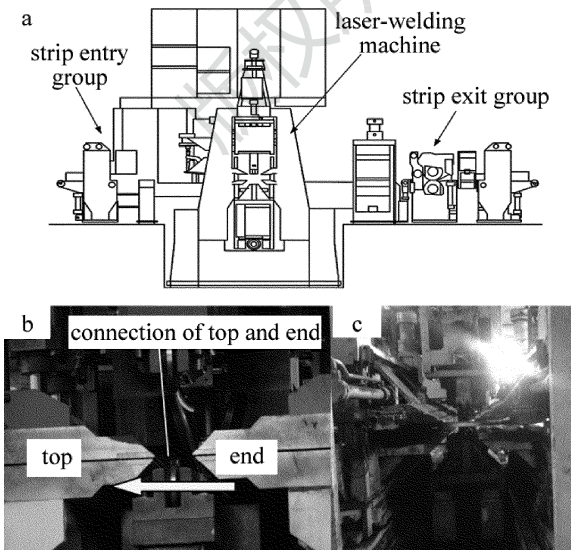


Fig. 1 Cold-rolled strip welding equipment

a—equipment structure diagram b—picture of feeding c—picture of operation

定位,月牙剪剪边。高精剪及焊接系统退回原位<sup>[8]</sup>。

### 1.2 检测结构

如图 2 所示,激光拼焊焊缝质量检测系统主要由传感器、模数转换模块、信号处理模块、控制模块、计算机组成。其中图 2a 为检测系统元器件连接示意图。传感器有间隙传感器、穿透传感器以及焊缝传感器,其主要作用是采集图像信号。拼焊系统在线检测流程如图 2b 所示。焊接速率、激光焦距、激光功率、带钢材质以及前后带钢厚度偏差都会影响拼焊检测系统的判定。因此,在系统开启后要进行系统参量设定。本文中基于 Miebach 激光焊机焊接条件要求,前后带钢厚度应满足条件:  $|D_2 - D_1|/D_2 \leq 0.3$ ,  $|D_2 - D_1| \leq 0.8\text{mm}$ ,其中  $D_1$  和  $D_2$  为前后带钢厚度<sup>[1,6,9]</sup>。

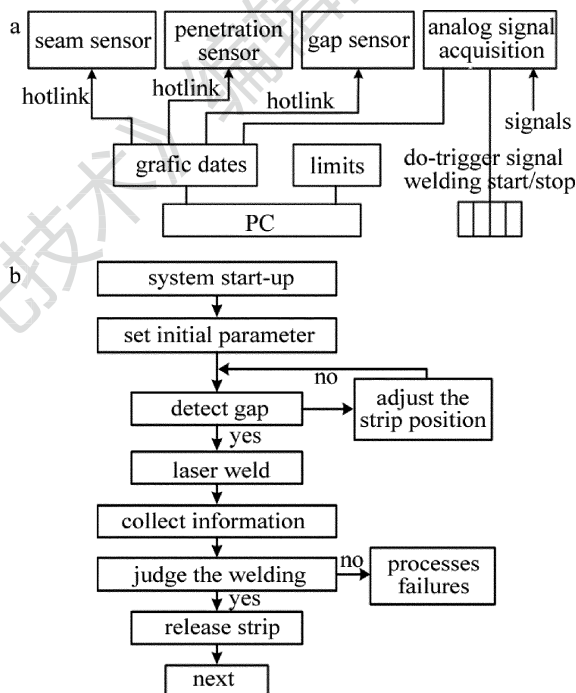


Fig. 2 Detection system

a—diagram of components connection b—flow chart of on-line detection system

## 2 拼缝及激光焊接过程检测机理

激光拼焊检测机理主要是图像采集、信息提取、数据反馈及阈值判断。其中图像采集方式以及信息提取对判断结果有重要的影响。系统采用视觉检测对焊接过程进行监控。视觉检测技术是建立在计算机视觉研究的基础上。利用图像检测器件采集图像,通过计算机从图像或图像序列中获取信息。

### 2.1 图像采集

图像采集由传感器实现,传感器采用 CCD 摄像头。3 个传感器相应位置如图 3 所示,带钢上面的两个传感器分别检测焊接前焊缝的宽度和焊接后焊缝的

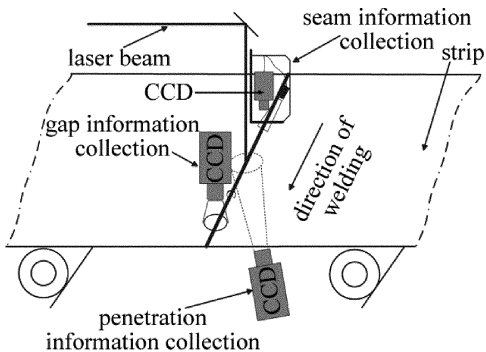


Fig. 3 Diagram of laser welding inspection system

表面缺陷,而带钢下面的摄像机用来检测激光焊接时的熔池状态,通过检测信号强度来判断焊缝是否焊透<sup>[1-2]</sup>。

图 4 为采集焊缝图像的装置示意图。焊缝传感器通过对焊缝图像处理获得焊缝填充性以及焊缝错边量等焊缝形态信息。考虑到在焊接过程中,大量的飞溅,弧光干扰采集到的图像,不利于特征量的提取,但是在 (602 ~ 697) nm 区域内弧光特征较少。且基本是强度较弱的连续谱,装置如图采用波长为 650nm 激光二极管,并在传感器窗口加上可透过波长为 (640 ~ 660) nm 光的窄带滤波片<sup>[10]</sup>。

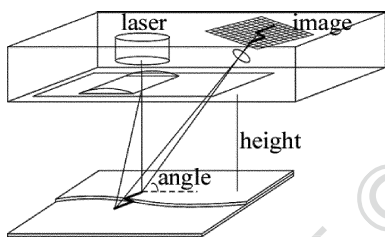


Fig. 4 Acquisition of weld seam image

2.2 焊接信号提取

对采集到的图像信号进行处理,从中获得所需数据。首先对图像进行开窗以减少运算量。然后对图像进行二值化,获取边缘,计算中心线,查找特征值,计算相关量。本文中运用 MATLAB 进行图像处理。

运用大津法阈值原理将图像二值化<sup>[11]</sup>。运用查找的方法获得阈值使背景与目标的类间方差最大,对  $m \times n$  图像  $I(i, j)$ , 分割阈值  $T$ , 设背景像素数 ( $I(i, j) < T$ ) 为  $n_0$ , 占整幅图比例为  $\omega_0$ , 灰度均值  $\mu_0$ , 目标像素数 ( $I(i, j) > T$ ) 为  $n_1$ , 占整幅图比例为  $\omega_1$ , 灰度均值  $\mu_1$ 。整幅图像灰度均值  $\mu$ , 类间方差  $\sigma$ 。则可得关系式:

$$\sigma = \omega_0 \omega_1 (\mu_0 - \mu_1)^2 \quad (1)$$

运用 MATLAB 通过查找的方法提取光条纹边缘信息。分别查找二值图像光条纹上下边缘,为了避免噪点对查找边缘影响,将当前边缘值与前一列边缘值对比,若行坐标变化过大,则在保留变化趋势的前提下

减小当前边缘行坐标值变化量<sup>[10]</sup>。记录每列上下边缘行坐标  $x_1, x_2$ , 计算光条纹中心线有关系式:

$$x = \frac{x_1 + x_2}{2} \quad (2)$$

若要获得焊缝的各项数据,还需要查找光条纹特征点。由于获得的光条纹中心线不是严格直线段,因此不能用求斜率的方法找特征点。本文中根据光条纹照在焊缝上,条纹形变灰阶值发生变化的特点,求灰度变化最快的点,再对比光条纹边缘形状判断特征点,进而计算相应量<sup>[10,12]</sup>。运用数值微分公式计算灰度变化最快的点<sup>[13]</sup>。对图  $I(i, j)$  在点  $(i, j)$  处灰度值变化程度  $K$  有:

$$K(i, j) = \frac{I(i, j - 2) - 8I(i, j - 1) + 8I(i, j + 1) - I(i, j + 2)}{12} \quad (3)$$

传感器采集的 2 维平面图像失去了一些 3 维信息,因此从 2 维图像中获取信息如拼缝宽度、焊缝错边量、焊缝宽度等需经过一系列计算。采用投影几何的原理从平面 2 维图像获得焊缝 3 维信息。

图 5 所示为图像信息及坐标标定<sup>[12,14]</sup>。其中图 5a 为像坐标到空间坐标转换原理图,如图空间一点  $M$  投射到像平面上  $m$  点。在像平面  $R$  建立正交坐标系,中心为  $c$ ; 相机坐标  $(x, y, z)$ , 中心为  $C$ 。其中  $x, y$  与像坐标方向一致,  $z$  坐标平行于光轴。像平面  $R$  与  $C$  点的距离为焦距。设焦距作为单位长度,并相应地改变像平面坐标。 $M$  坐标  $(x, y, z)^T$  与  $m$  坐标  $(u, v)$  之间的关系由泰利斯定理可得:

$$u = \frac{x}{z}, v = \frac{y}{z} \quad (4)$$

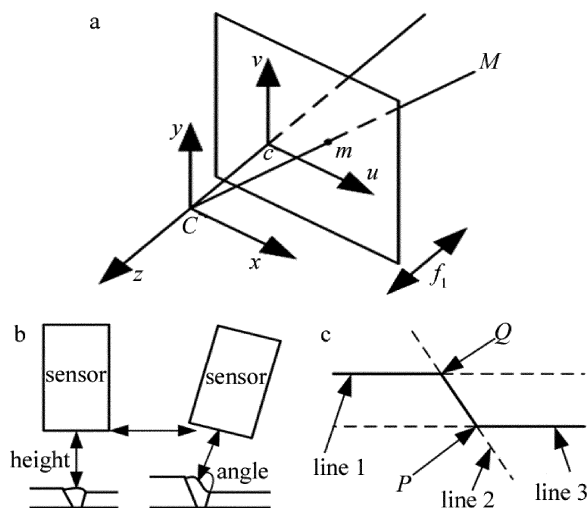


Fig. 5 Welded image information & coordinates calibration  
a—coordinate conversion b—sensor adjustment c—image information acquisition

由(4)式可知,任意比例 $(\lambda_x, \lambda_y, \lambda_z)^T$ 代表一条光线。光线上的任意一点都会落在像平面 $m$ 上。为确定点 $M$ 空间位置,需要对传感器进行标定,标定即确定传感器相对于焊缝的位置,如图5b所示,对传感器进行调整,调整过程中记录高度以及角度信息。通过图像处理可以获得如图5c所示的信息,直线1为带钢左边缘,直线2为带钢右边缘, $P$ 和 $Q$ 为特征点。通过计算可得焊缝宽度等在图像坐标下的值,通过传感器标定,进而获取空间坐标值<sup>[1,14]</sup>。

### 3 实验分析

#### 3.1 焊前拼缝信号检测

间隙传感器获得拼缝的位置以及间隙宽度等信号如图6所示。其中图6a为间隙传感器所获取图像信息,对其进行图像处理,通过标定得到拼缝宽度信息。图6b是开启背景照明使得间隙处亮度增大。同样通过灰度分析即可获得间隙宽度信息和间隙位置<sup>[1,12]</sup>。

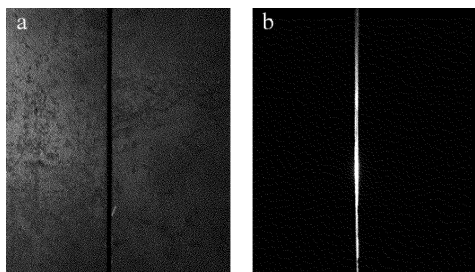


Fig. 6 Gap detection  
a—gap width b—gap position

#### 3.2 焊接过程检测

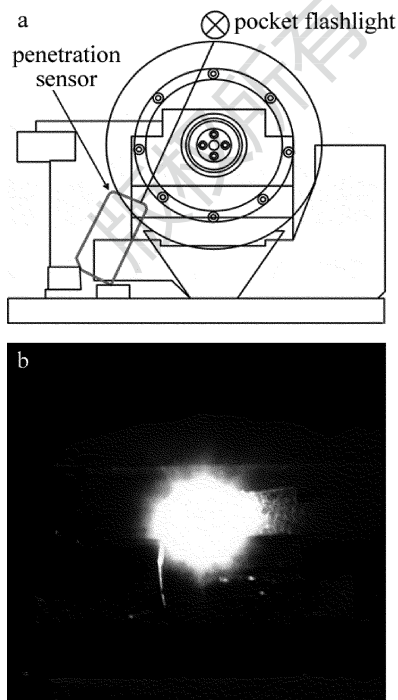


Fig. 7 Penetration detection  
a—sensor position b—penetration image

穿透传感器检测焊接过程中焊机是否将带钢下表面完全熔化,如图7所示。带钢焊透与否影响焊缝内部受力分布,因此焊接过程中的熔透信号采集是评定焊缝质量的关键。为避免光束下方焊渣污染传感器窗口,穿透传感器位置如图7a所示在激光束的斜下方。图7b为传感器获得的图像信号,对图像信号进行灰阶分析,得到直方图,并对其进行均衡化。这样可以获得较精确的灰度统计信息。将计算结果与所设置的阈值作对比,超出(低于或高于)阈值范围的取样均不合格。穿透传感器所得的穿透值是以200Hz为取样频率的平均值<sup>[1]</sup>。

#### 3.3 焊后质量检测

图8为焊缝传感器获得的不同焊缝形态图像及图像处理信息。其中图8a为焊缝传感器采集焊缝试样1、试样2、试样3、试样4的原图像。由图中可以粗略的看到光条纹发生不同程度的形变,通过分析光条纹形变情况判断焊缝形态。图8b为焊缝图像加窗。加窗后图片像素大小为500×200。图8c运用大津法确定阈值,对加窗后的图像进行二值化。对图8c进一步

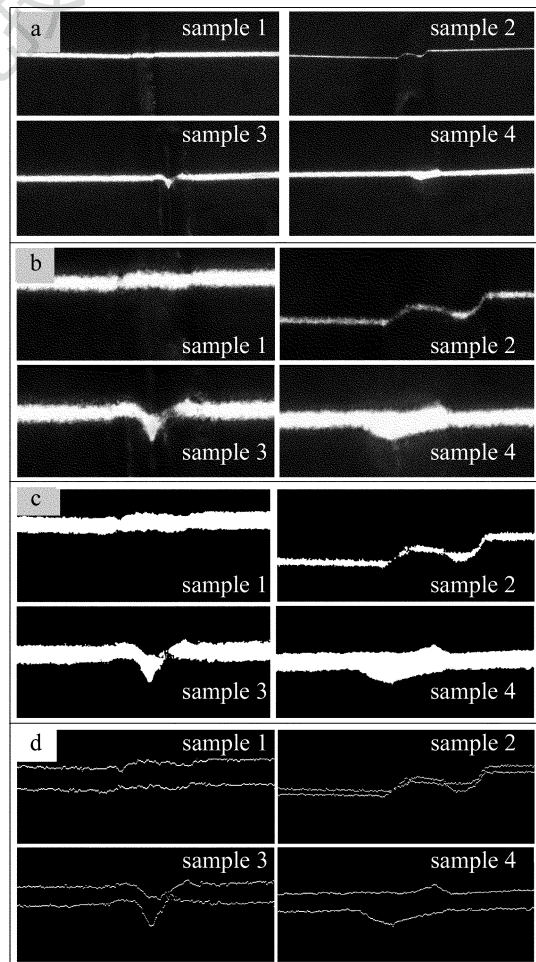


Fig. 8 Image process of welding samples  
a—original image b—windowed image c—image binaryzation d—extraction of seam edge

处理,通过查找法获得边缘图像如图 8d 所示。提取边缘后的焊缝图片可以更清晰看到光条纹的变形,为了得到量化的形变量,需要对边缘提取中心线。

图 9 为焊缝试样图像信息提取。通过前面处理后的图像中获取焊缝信息,首先提取光条纹中心线及特征点。然后查找特征点,本文中查找了 6 个特征点 ( $P_1, P_2, \dots, P_6$ ),按坐标排序。计算两列坐标差值即可得到焊缝宽度信息。计算行坐标差值可以获得焊缝错边量。在计算行坐标前,需要先对特征点  $P_1$  之前中心线行坐标求平均值,特征点  $P_6$  之后的值进行同样处理。这样获得更加精确的焊缝错边量。图 9 中以试样 2 为例计算焊缝数据。由图中可以看出,焊缝试样 2 的错边及增强高量比较大。从特征点  $P_1$  与特征点  $P_5$  的列坐标之差可以获得焊缝宽度信息,特征点  $P_1$  与特征点  $P_6$  的行坐标之差可得焊缝错边量信息。通过传感器标定,标定系数与像素点数相乘即可获得实际数值。

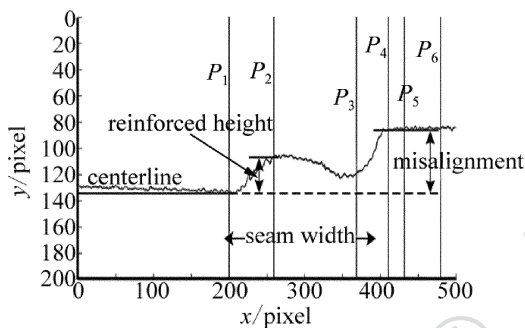


Fig. 9 Extraction of welded image information of sample 2

本实验中通过标定获得水平方向及竖直方向标定系数均为 0.018mm/pixel。从而得到 4 种焊缝试样的焊缝宽度、焊缝错边量以及焊缝增强高量,见表 1。由于错边量相对较小,实验条件无法测出实际错边量。经过计算得到实验测量焊缝宽度相对于手工测量值误差均值为 4.42%。误差原因有几种情况:在特征点提取时,由于一些噪点,有的特征点并未准确位于焊缝端点处,造成计算误差;由于个人原因,手工测量值较真实值存在一定误差;传感器标定后,出现抖动等都会影响最终测量值<sup>[10]</sup>。

Table 1 Experimental data

welded samples	seam width of manual measurement	seam width of system measurement	misalignment
sample 1	4.52mm	4.482mm	0.162mm
sample 2	4.32mm	4.176mm	0.882mm
sample 3	4.20mm	3.636mm	0.090mm
sample 4	4.82mm	4.824mm	0.063mm

图 10 中检验了拼焊试样的焊缝质量。焊接完成后对拼焊钢板进行焊缝冲压实验以检验焊接质量,冲

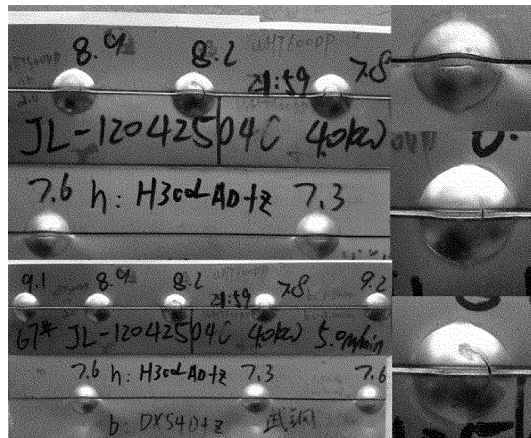


Fig. 10 Welded sample test

压试验中通过观察拼焊板是否开裂判断焊缝合格与否。冲压试验中,若拼焊板完好,则焊缝合格;若拼焊板在除焊缝外的其它位置开裂,则焊缝合格;若拼焊板在焊缝处开裂且开裂方向与焊缝方向相同,则焊缝不合格。

#### 4 结论

本文中对激光拼焊机焊缝质量检测系统进行了细致研究,探究了其工作原理,并通过焊接实验试样,对几种焊接缺陷进行了分析。

(1) 采用 3 个传感器分别采集焊接前拼缝图像信息,焊接过程中带钢熔透信息,焊后焊缝形态图片信息。用投影矩阵的方法对传感器进行标定可以有效从 2 维图像上提取准确的信息。

(2) 通过大律法计算图像阈值,将采集图像二值化,采用逐列搜索的方法找到边缘位置,求条纹中心线,通过最小二乘法得到带钢母材位置。求出焊缝宽度,错边量等与阈值进行比较,判断焊缝是否合格。

(3) 本文中以 4 个焊接试样为例,计算得焊缝宽度相对误差为 4.42%。并得到 4 个试样的错边量。实验证明,焊缝检测系统可以有效地预测故障,对焊接过程以及焊缝特性进行分析、判断,并通过统计给出拼焊是否合格的信息。

#### 参 考 文 献

[1] FALLDORF SENSOR GMBH. Device for regulating the seam position during laser welding of butt joints carries out the regulation depending on the detected misalignment of molten bath to joint; DE 200810047140[P]. 2010-03-25.

[2] GAO S Y, WU R M, CHEN W D, et al. Development status of laser welding process monitor and seam quality detection[J]. World Iron & Steel, 2010,10(3): 51-54 (in Chinese).

[3] de GRAAF M, AARTS R, JONKER B, et al. Real-time seam tracking for robotic laser welding using trajectory-based control[J]. Control Engineering Practice, 2010, 18(8): 944-953.

[4] LIU Y, WANG G, WANG G D, et al. For machine vision image ac-

- quisition and image processing of weld[J]. Computer Engineering and Applications, 2014, 50(3):135-140 (in Chinese).
- [5] HUO D, LU C X. X-ray imaging system for pipeline girth weld inspection based on CMOS video capture card[J]. Instrument Technique and Sensor, 2013(12): 160-162 (in Chinese).
- [6] HUGO MIEBACH GMBH. Laser beam welding of sheet, comprises arranging butt joint edges of sheet to be welded, which are adjacent to each other, in impact distance, and fusing by focused laser beam, which produces uniform weld seam without height offset; DE 201110002023[P]. 2012-10-18.
- [7] THYSSENKRUPP STEEL AG. Laser beam welding EAD; CA2638007A[P]. 2010-06-22.
- [8] SUN H X, MA Z H, CHEN H Y, *et al.* High-precision centering control system design of laser welder[J]. Electric Welding Machine, 2013, 43(6): 16-21 (in Chinese).
- [9] VELARDE G, BINROTH C. Advances in data mining [M]. Berlin, Germany: Springer, 2010: 350-361.
- [10] ZHANG W J, XU M. Research on structured light visual inspection system for weld of tailored blanks laser welding[J]. Machinery Design & Manufacture, 2011, 241(3): 156-158 (in Chinese).
- [11] WU B, QIN Z Y. New approaches for the automatic selection of the optimal threshold in image binarization[J]. Journal of Institute of Surveying and Mapping, 2001, 18(4): 283-286 (in Chinese).
- [12] GRAAF M W. Sensor-guided robotic laser welding [M]. Amersfoort, Netherlands; University of Twente, 2007: 11-95.
- [13] GAUTSCHI W. Numerical analysis [M]. New York, USA; Springer, 2011: 159-232.
- [14] FAUGERAS O, LUONG Q T. The geometry of multiple images; the laws that govern the formation of multiple images of a scene and some of their applications [M]. Cambridge MA, USA; MIT Press, 2004: 1-61.

《激光技术》编辑部

版权所有 ©