

文章编号 1004-924X(2021)04-0802-11

小幅面高温焊缝变形的数字图像相关测量

王立忠^{1,2}, 张 振^{1*}, 赵建博², 田锦华¹, 叶美图²

(1. 新疆大学 机械工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830046;

2. 西安交通大学 机械工程学院 机械制造系统工程国家重点实验室, 陕西 西安 710049)

摘要:针对电弧焊接下钢板焊缝区小幅面测量时的环境光干扰、散斑脱落等问题,本文提出了一种基于窄通滤波、改进的数字图像相关法和高斯低通滤波技术等原理的非接触式变形测量方法。此方法用数字图像光学测量方法解决了接触式测量设备不耐高温的弊端;用哑光灰色高温胶、黑色高温漆配合制成有效的耐高温散斑。为减小环境光的干扰,在硬件方面安装可滤黄光的窄通滤波片;在算法方面,在数字图像相关法匹配公式中引入两个光补偿系数;结合高斯低通滤波技术对强光区域进行高频去噪,通过增量插值测试得到最佳的滤波截止频率,并对滤波后的图像进行定位移对比实验,验证了高斯低通滤波能有效提高数字图像相关法的匹配精度。本文所提测量方法通过两组实验进行对比,首先与普通处理的实验测量结果对比,匹配过程稳定且云图质量较好。其次与已验证过精度的大幅面实验结果对比,所选两点的测量精度最低为 1%,具有较高的匹配精度。最终测出焊缝中心线的最大位移为 1.23 mm。从对比实验结果可知:本文测量方法能够有效对小幅面高温焊缝图像进行测量与匹配分析,且理论上精度更高。

关键词:数字图像相关法;高温散斑制备;小幅面焊缝应变测量;高斯低通滤波;匹配精度

中图分类号:TP394.1;TH74 文献标识码:A doi:10.37188/OPE.20212904.0802

Digital image correlation measurement of high temperature weld seam deformation with small format

WANG Li-zhong^{1,2}, ZHANG Zhen^{1*}, ZHAO Jian-bo², TIAN Jin-hua¹, YE Mei-tu²

(1. School of Mechanical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830046, China;

2. State Key Laboratory for Manufacturing Systems Engineering, School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

* Corresponding author, E-mail: sfgcs_zz@163.com

Abstract: This study aimed to solve the problems of ambient light interference and speckle loss during small-format measurement of the weld seam of the steel plate under arc welding. For this, a non-contact deformation measurement method is proposed based on the principles of yellow light narrow-pass filter, an improved digital image correlation method (DIC), and Gaussian low-pass filter technology. The method uses the DIC optical measurement method to address the limitations of the contact measurement equipment, that it cannot work under high temperatures. Thus, matte gray high temperature glue and black high temperature were used paint to ensure effective high temperature speckle resistance. To reduce the interference of ambient light, a narrow-pass filter was installed, which filtered out yellow light. Further,

收稿日期:2020-07-06;修订日期:2020-09-27.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 51865057)

two optical compensation coefficients were added to the DIC matching formula, and Gaussian low-pass filtering technology was used to denoise high frequencies in strong light areas. The incremental interpolation test was used to obtain the best filter cutoff frequency. A constant displacement comparison experiment of DIC was performed on the filtered image, and it was verified that Gaussian low-pass filtering can effectively improve the matching accuracy of DIC. The results of the proposed measurement method were compared by using two sets of experiments. First, they were compared with those of ordinary processing; the matching process was stable and had a better cloud image quality. Second, they were compared with those of large-format experiments with verified accuracy; the measurement accuracy of the selected two points was higher than 1%, which is a high matching accuracy. The maximum displacement of the center line of the weld was 1.23 mm. It can be concluded that the proposed method can effectively measure and match the high-temperature weld image with small format.

Key words: digital image correlation; high-temperature speckle preparation; small-format weld seam strain measurement; Gaussian low-pass filter; matching accuracy

1 引言

焊接工艺在绝大多数的工业领域中,是一种非常关键的材料加工工艺。金属薄板在焊接加工过程中会产生各式各样的变形,对于精度要求比较高的加工领域如果不了解其变形特点,将会对产品的外观和使用性能有不好的影响^[1]。薄板在焊接时会产生1 000 °C以上的高温,通常的应变片将不能附着在钢板上,非接触式的应变测量则能很好地解决此问题,比如云纹干涉法^[2]、激光干涉法^[3]和数字图像相关法(Digital image correlation)^[4-7]。前者有原理复杂、测量过程繁琐和受环境影响较大等缺点,因此DIC是相较其他方法来说更适合用来测量高温焊接钢板的应变。本文应用的是西安交通大学自主研制的基于数字图像相关法原理的XJTUDIC视觉应变测量系统。谈杰^[8]等人用大幅面视场用DIC系统对Q345钢和Q690钢进行焊接应变测量,得出Q690高强钢变形相对于Q345变形较小。Xiaobo Yang等人^[9]提出一种数字图像相关的用于热障涂层的实时表面变形检测方法,可测量900 °C高温环境下的变形。胡悦^[10]等人,根据在不同颜色的高温散斑制作下的数字图像匹配精度,普通光源800 °C以上失效,但紫外线能够在1 200 °C依然能够较好的采集图片。黑色和蓝色具有最佳的对比效果。潘兵^[11]等人提出了一种基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法。D. Gustafsson等人^[12]采

用数字图像相关法研究了铬镍铁合金过载条件下的疲劳裂纹扩展行为,实验最高温度为650 °C。

虽然很多人研究高温环境下的DIC测量,但是针对电弧焊高温环境下的近距离小幅面变形测量并未涉及。主要原因是测量小幅面焊缝变形时,焊光以及火花产生的环境光对测量有极大的干扰;焊接过程中的高温还会使普通散斑破坏掉落,会生成黑色底色干扰匹配,导致在小幅面(128 pixel×96 pixel)匹配时测量云图有大面积孔洞;在焊接过程中焊缝温度很高,电弧焊火花较大,对精密仪器的安全构成威胁。

为解决以上问题,本文提出了一种小幅面的测量焊缝变形的测量方法:使用过滤黄光的窄通滤波片进行强光过滤;在变形子区与参考子区灰度值关系中引入了两个光补偿系数以减小光照灰度差;对过滤后的图像在频域上运用低通滤波进行去噪处理,并对比验证证明此滤波方法可以提高匹配精度。

在设备材料上,以灰白色高温胶为底色,黑色高温漆为散斑进行喷涂焊缝区域,生成有效的高温散斑。为防止火花溅到仪器上,本文采用立焊的焊接方式,并用防具进行火花阻挡,最后用非接触式的DIC光学测量方法进行小幅面测量。

最后通过两组对比试验验证,可以得出此测量方法稳定且精度较高,可以运用到小幅面测量电弧焊接位移场的测量中。

2 DIC 原理与降噪技术

2.1 数字图像相关法(DIC)

DIC 的原理是在变形后的图像(变形图像)中找到变形前(基准图像)的对应点。如图 1 所示,图左为参考图像,图右为经过变形后的变形图像。首先以基准点 $A(x_0, y_0)$ 为中心点取大小为 $(2M+1) \times (2M+1)$ 的参考子图像(参考子区),通过设定好的搜索方法,从变形图像中遍历所有点,并以每个点为中心取相同大小的变形子图像(变形子区),通过已定义的相关系数寻找与参考子图像相关性最大的变形子图像,此时变形子图像的中心点 $A'(x'_0, y'_0)$ 即为参考图像中 $A(x_0, y_0)$ 的对应点。

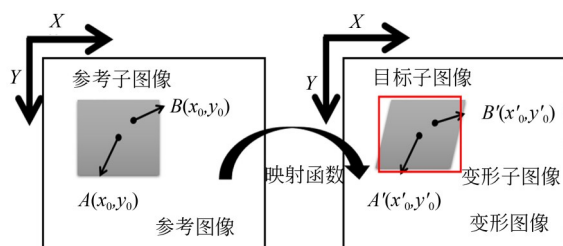


图 1 数字图像相关法原理图

Fig. 1 Schematic diagram of digital image correlation method

在进行 DIC 的相关性匹配时,需要对两幅图像设置一个映射函数,本文所用常见的一阶映射函数进行计算,此映射函数包括了旋转运动、平移运动、正应变和剪应变等分量。映射函数如式(1):

$$\begin{aligned} x'_i &= x_0 + \Delta x + u + u_x \Delta x + u_y \Delta y \\ y'_i &= y_0 + \Delta y + v + v_x \Delta x + v_y \Delta y \end{aligned} \quad (1)$$

其中: u, v 代表子区中心点的位移。 Δx 和 Δy 表示 A 点在 x/y 方向上的距离。A 点灰度值与 A' 点的灰度值关系如下式:

$$f(x_i, y_i) - e(x_i, y_i) = r_0 + r_1 \times g(x'_i, y'_i), \quad (2)$$

其中: $e(x_i, y_i)$ 是图像匹配中的噪声部分, $f(x_i, y_i)$ 表示 B 点灰度值, $g(x'_i, y'_i)$ 表示 B' 点灰度值。变量 r_0/r_1 用于补偿光照强度引起的灰度差^[4],一定程度上可以降低焊光等环境光带来的干扰。

2.2 焊接环境光降噪

2.2.1 滤光片

在焊接过程中,不可避免的会有火花的干扰,以及焊光的影响。本文将使用带通滤光片进行环境光的过滤,带通滤光片只能够通过某一波段信号,因为环境光的光信号较强,因此选用带通比较窄的滤光片进行滤波^[11]。本文所采用的滤光片的波长范围为 620~650 nm,可以有效减少入射光强,避免环境光的干扰,本文采用滤波片的参数如表 1。

表 1 窄通滤光片若干参数表

Tab. 1 Narrow-pass filter parameter

序号	波长/nm	透射率/%
1	620	33.120
2	632	20.422
3	640	90.211
4	642	64.433
5	650	20.456

单一功能的滤光片无法达到要求,因焊接火花大部分为黄色,因此本文选用具有滤黄光功能的窄通滤光片,如图 2。可以减小火花以及焊光带来的部分环境光影响。



图 2 滤黄光窄通滤光片

Fig. 2 Narrow-pass filter lens for yellow light filtering

2.2.2 强光降噪处理

滤光片可以一定程度上减少环境光的影响,但是拍出的图片还是有强光区域,为了能在环境

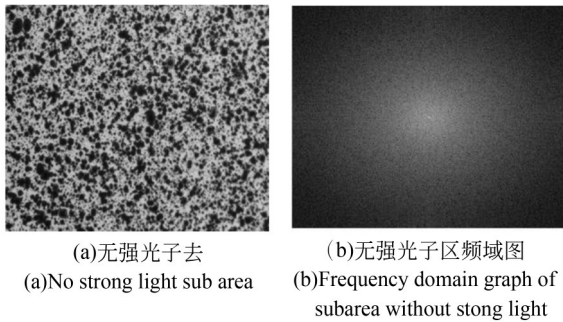
光干扰的条件下进行数字图像相关分析,必须对强光干扰进行消除。强光可以看作是一种高频的噪声,对采集的图片进行频域上的处理,将高频噪声去掉。

假设干扰区域为 $M \times N$,运用傅里叶变换将子区域中的灰度值 $f(x, y)$ 进行傅里叶变换,变换公式为:

$$F(u, v) = \frac{1}{N} \sum_{x=0}^{M-1} \sum_{y=0}^{N-1} f(x, y) \exp(-i2\pi(ux/M + vy/N)), \quad (3)$$

反变换公式为:

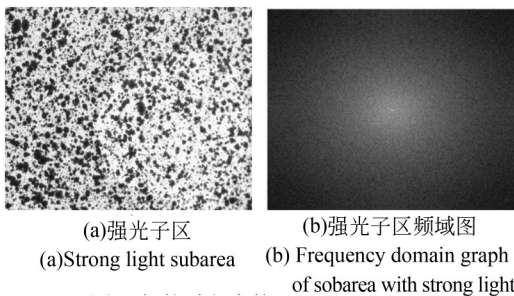
$$f(x, y) = \frac{1}{N} \sum_{u=0}^{M-1} \sum_{v=0}^{N-1} F(u, v) \exp(i2\pi(ux/M + vy/N)). \quad (4)$$



(a)无强光子去 (b)无强光子区频域图
(a)No strong light sub area (b)Frequency domain graph of subarea without strong light

图 3 焊接过程中的无强光区域以及频域图

Fig. 3 Welding area without strong light and frequency domain diagram



(a)强光子区 (b)强光子区频域图
(a)Strong light subarea (b)Frequency domain graph of subarea with strong light

图 4 焊接过程中的强光区域以及频域图

Fig. 4 Welding area with strong light and frequency domain diagram

由图可以看出,强光子区的频域图有大量的 高频噪声信息,必须对其中的强光噪声进行滤波(去噪),能够顺利提取图像真实的信息。

因为环境光的波长大多比较高,因此应选用

低通滤波器,本文运用的是高斯低通滤波器进行焊接试件的图像噪声的滤波,为验证精度,选用理想低通滤波器作为对比试验。以去噪后的图片峰值信噪比(PSNR)为标准来比较两种去噪方法的图像质量。

理想低通滤波的传递函数 $H(u, v)$ 表示为:

$$\begin{cases} H(u, v) = 1, D(u, v) \leq D_0 \\ H(u, v) = 0, D(u, v) > D_0 \end{cases}, \quad (5)$$

其中:1和0是滤波器的截止频率。 $D(u, v)$ 表示的是频域图的频域原点到 (u, v) 点的距离值。 D_0 为选定阈值。理想滤波器原理以及操作简单而且速度很快,但是在运算中会在 D_0 处会有不连续值,会造成图像的波纹模糊现象。

高斯滤波器的传递函数 $H(u, v)$ 可表示为:

$$H_G(u, v) = e^{-\frac{\ln \frac{1}{\sqrt{2}} [\frac{D(u, v)}{D_0}]^n}{n}}. \quad (6)$$

当 $D(u, v) = D_0, n = 1$ 时, $H_G(u, v) = 1/e$ 。高斯滤波器的过滤带比较平滑,理论上过滤后的图像质量较好。

用图片峰值信噪比(PSNR)数值比较去噪后的图像质量,PSNR值表示光信号受干扰程度,值越大受干扰程度越小。PSNR公式如下:

$$PSNR = 10 \times \lg \left(\frac{MAX^2}{MSE} \right), \quad (7)$$

$$MSE = \frac{1}{NM} \sum_{u=1}^N \sum_{v=1}^M (f_{uv} - f'_{uv}), \quad (8)$$

其中:MSE表示均方误差, f_{uv} 与 f'_{uv} 指的是点 (u, v) 在去噪前后的灰度值。MAX表示所选范围中灰度的最大值。 D_0 取150 mm,去噪结果如图5所示。

由图5可知,对于喷涂散斑的钢板来说,运用高斯低通滤波后的图像强光过滤效果比较好,根据PSNR值也可以对比出高斯低通滤波过后的图像质量也较好,受干扰的程度较低。

因此,在本文小幅面钢板测量方法中,打算对图像局部运用高斯低通滤波进行强光去噪。在此之前需要寻找最佳的截止频率 D_0 ,以及验证高斯低通滤波是否影响DIC匹配的精度。

2.2.3 去噪最优参数选定和精度验证

用实验中钢板图像来测定高斯低通滤波的

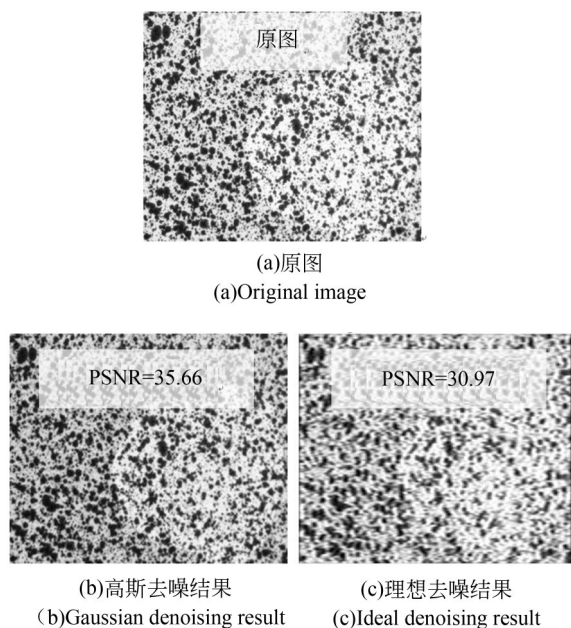


图 5 去噪结果
Fig. 5 Denoising result

最优参数。具体步骤:首先对所测钢板进行强光模拟,选用 10 到 100 之间的截止频率进行去噪计算,然后求每一幅去噪后图像的 PSNR 数据,数据画成曲线寻找去噪效果最好的截止频率。

模拟恒定的强光照射钢板,因为实验材料能隔绝部分焊光,剩余环境光最高可达到 60 lm,因此光源亮度模拟 60 lm 左右,光的照射位置固定。CCD 摄像机固定在滑道上垂直钢板拍摄,并将摄像机的曝光和光圈大小设置为正规实验数值。实验摆放场景如图 6 所示。

图 7 上图为模拟强光中的钢板图,右侧有明显的强光干扰,A 点在强光区,B 点在强光区外。选用初始截止频率为 10,增量为 5 带入公式(7)

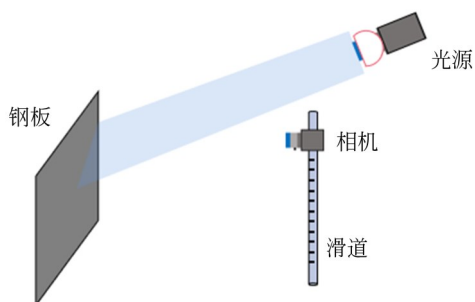


图 6 实验摆放场景
Fig. 6 Scene of experiment arrangement

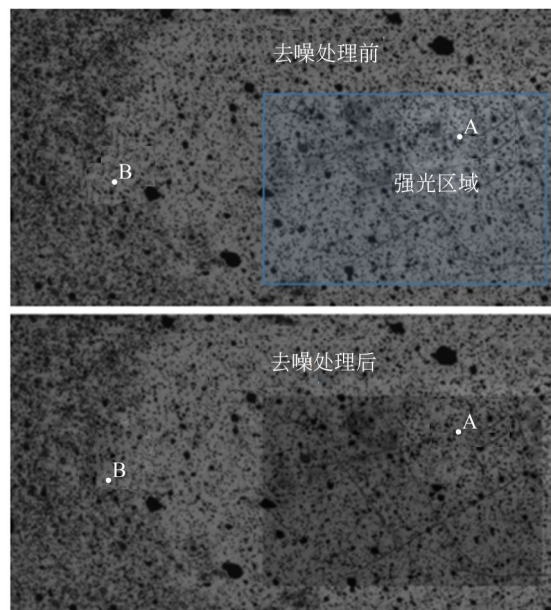


图 7 钢板处理图
Fig. 7 Steel plate processing image

中,求出 PSNR 曲线,如图 8 所示,图中最高的 PSNR 值为 33.854 dB,对应的截止频率为 35 mm。因此将 35 mm 作为本次实验的最优截止频率。

用数值为 35 的截止频率对钢板强光区进行高斯低通去噪,结果如图 7 下图所示。

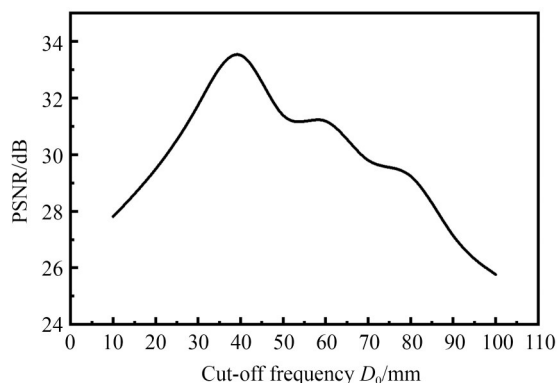


图 8 实验截止频率测试图
Fig. 8 Experimental cut-off frequency test image

为验证截止频率为 35 时去噪是否影响 DIC 的匹配精度,采用了一种定位移的 DIC 精度验证方法。验证方法如下:相机在滑道上相对钢板做刚体平动,强光照射位置不变,对降噪前后的图像都进行 DIC 位移匹配,测出的位移值与基准值

求误差。

每次相机移动 5 mm。以非强光区域的 B 点的位移数据为基准,比较 A 点降噪后和不降噪后的位移与基准的误差。表 2 为检测表。

表 2 位移测试表
Tab. 2 Test results

B 点位移 (基准)	A 点位移	
	未降噪位移	降噪位移
6.987 9	7.003 9	6.994 8
11.986 3	11.995 3	11.990 4
16.974 3	16.988 5	16.980 1
21.953 6	21.958 1	21.955 9
26.947 4	26.962 6	26.953 4
31.922 1	31.923 8	31.923 4
36.906 4	36.913	36.909 4
41.906 3	41.920 4	41.912 1
46.905 6	46.922 7	46.912 7
51.905 0	51.922 6	51.912 5

图 9 为表 1 的位移误差图。

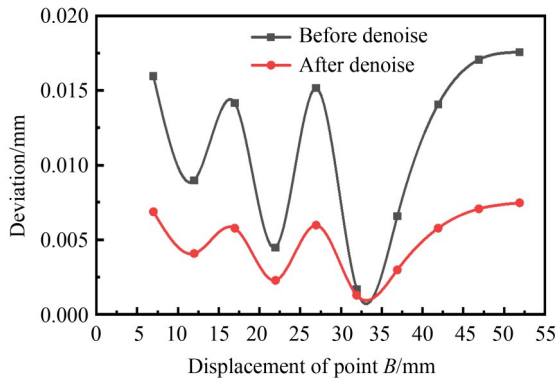


图 9 降噪前后位移误差图

Fig. 9 Displacement deviation before and after denoising

根据上图数据求出降噪后的平均误差为 0.004 95 mm,未降噪的平均误差为 0.011 57 mm,降噪后的误差要小。最终可以得出,在此次实验中运用截止频率数值为 35 的高斯低通滤波方法能够提高数字图像相关法测量的精度。因此可以应用到 DIC 测量焊接环境光的去噪中。

3 试验方案

3.1 实验流程

本文采用前方进行焊接,后方进行视觉动态测量的竖立焊接的焊接方式。钢板材料为 Q345B。

总体的实验流程主要是:在镜头安装滤黄光窄通滤光片;安置高温测量仪、DIC 测量仪器等;然后对实验设备进行小幅面(128 mm×96 mm)标定与图像采集;导出图像进行高斯低通滤波,将滤波后的图像转回设备进行位移计算。

在实验材料上运用了高温胶与高温漆混合喷涂的方式,增添防具防止火花飞溅。

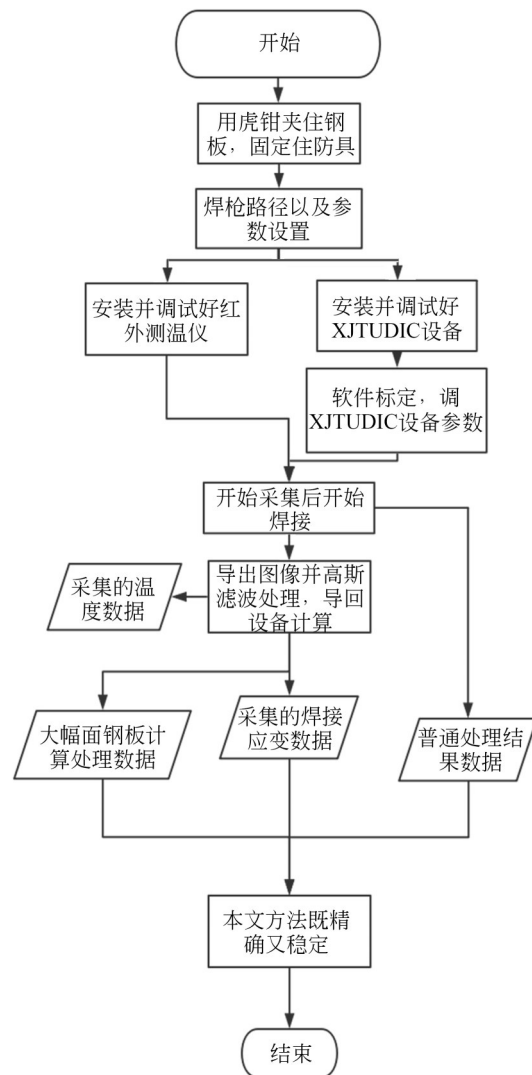


图 10 实验流程图

Fig. 10 Experimental overall flow chart

进行两组对比试验,第一组是对普通高温处理的钢板也进行小幅面测量,证明本文测量方法的稳定性。另外一组是用大幅面(400 mm×300 mm)测出的准确值与本文测量方法测出的值进行对比,证明本文测量方法的精度。图 10 为实验流程图。

3.2 钢板焊接应变测量系统

本文实验使用松下焊接机器人(型号为 TA-1800),高温红外热像仪系统(型号为 FLIR),小虎钳和铁皮防具。DIC 测量仪器为西安交通大学自主研制测量应变的 XJTUDIC 视觉测量系统,XJTUDIC 系统由一台同步控制箱、一台高性能电脑、相机三角架、两台高精度工业相机(Basler acA1920-40 μm)和 LED 光源组成。

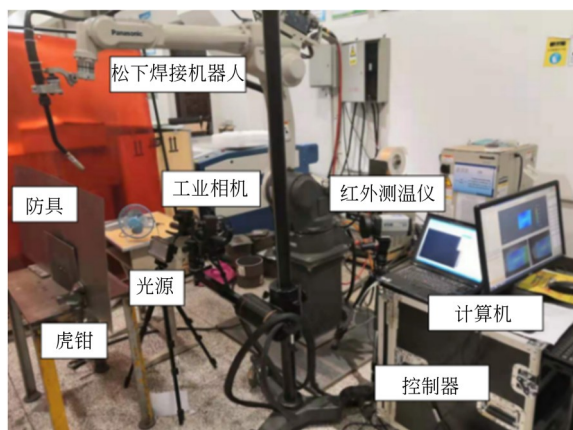


图 11 高温焊接应变测量系统图

Fig. 11 High-temperature welding strain measurement system

布置如上图所示,本文实验用的是弧焊机器人,火花、烟雾等干扰比较大,因此用铁皮防具防止火花损伤仪器。

此焊接试验是对钢板背面进行应变测量,钢板背面必须进行喷涂散斑处理以增加表面特征,首先将钢板进行喷砂处理,在焊缝区域用灰色高温胶当做底色,非焊缝区域用白色高温漆为底色,黑色高温漆为斑点进行喷涂。将高温胶上划上裂口防止高温起泡变形影响测量。

本文以普通处理实验作为对比实验,普通处理钢板全部以白漆为底黑漆为散斑,并且图像不经过滤光片,也不用高斯低通滤波进行去噪。图 12 为普通处理与本文方法处理后的钢板散斑图。

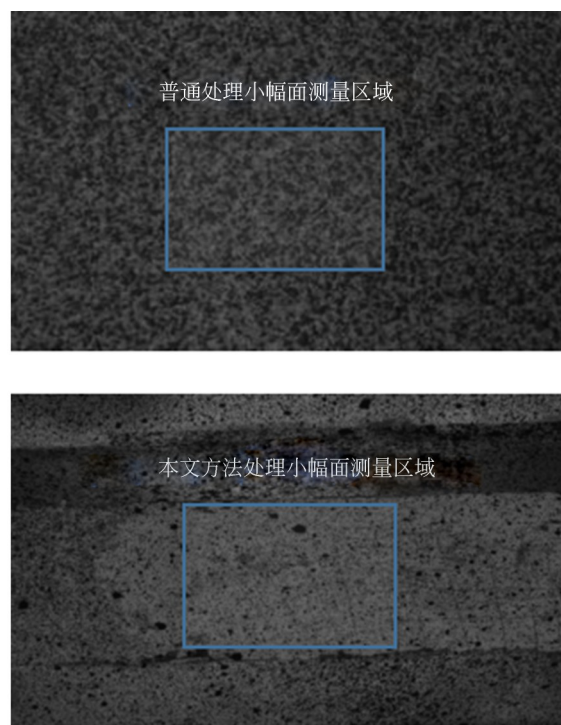


图 12 钢板喷涂散斑图

Fig. 12 Speckle pattern of steel plate spraying

本次试验测量的是图 12 钢板中的小幅面应变区域,钢板在进行试验时焊接时间比较短,要采集到焊接的全部过程,因此测温仪器和 XJTUDIC 要先进行图像的采集,后进行钢板的焊接。最后对 DIC 的测量精度进行检验。

3.3 焊接变形测量参数

本文所选用的是电弧焊,焊丝材料型号为 er50-6,采用松下机器人自配的混合气焊接,焊接长度为 7 cm。保护气体为 99.9% 的氩气。表 3 是焊接机器人以及实验材料的试验参数。

表 3 焊接机器人试验参数

Tab. 3 Test parameters of welding robot

参数属性	参数大小
试板材料	Q345B
试板尺寸/mm	270×180×3
焊接电流 I/A	100
焊接电压 U/V	20.4
焊接速度 $V/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$	0.5
氩气流量 $/(\text{L}\cdot\text{min}^{-1})$	15
高温胶	含有陶瓷、C-SiC 等等
高温漆	VHT

红外测温仪的精度在 0.15 °C 以内,由软件和硬件两部分组成,表 4 是红外测温仪在焊接时的测量参数。

表 4 红外测温仪试验参数

Tab. 4 Infrared thermometer test parameters

测温区间/°C	测头与钢板 距离/m	采集速度/ (张/秒)
300~1 200	1.5	10

XJTUDIC 系统中工业相机标定运用的是自带的标定法,焊接前后采用不同的采集速度进行采集,相机距离钢板 53 cm 水平放置,表 5 是系统测量时的数据。

表 5 XJTUDIC 试验参数

Tab. 5 XJTUDIC test parameters

参数属性	参数大小
相机分辨率/(pixel×pixel)	1 600×1 200
相机幅面/(pixel×pixel)	128×96
匹配子区大小/(pixel×pixel)	15
采集速度/(张/秒)	焊接前 50 焊接后 2
光源情况	常亮

4 试验结果分析

4.1 焊接变形测量分析

焊接过程分为焊接阶段和自然冷却阶段,焊接阶段经历时间为 7 s,自然冷却阶段为 300 s,在焊接过程中温度从小于 300 °C 快速升到 1 116 °C,焊接结束后逐步降温降到 300 °C 以下。过程中散斑无脱落和变色。表 6 为温度测试结果。

表 6 高温测温仪测试结果

Fig. 6 Results of the pyrometer

最低温度	最高温度
<300 °C	1 116 °C

图 13 是 3 组普通处理与本文方法测量的匹配效果对比图,当用普通处理的钢板和方法进行焊接测量时,测量结果会产生大面积孔洞,而本

文测量方法在全程无云图孔洞产生,云图变化均匀。3 组实验本文方法都较为稳定,因此可以得出结论:针对高温焊缝变形的测量本文方法比普通处理的测量方法更加稳定。

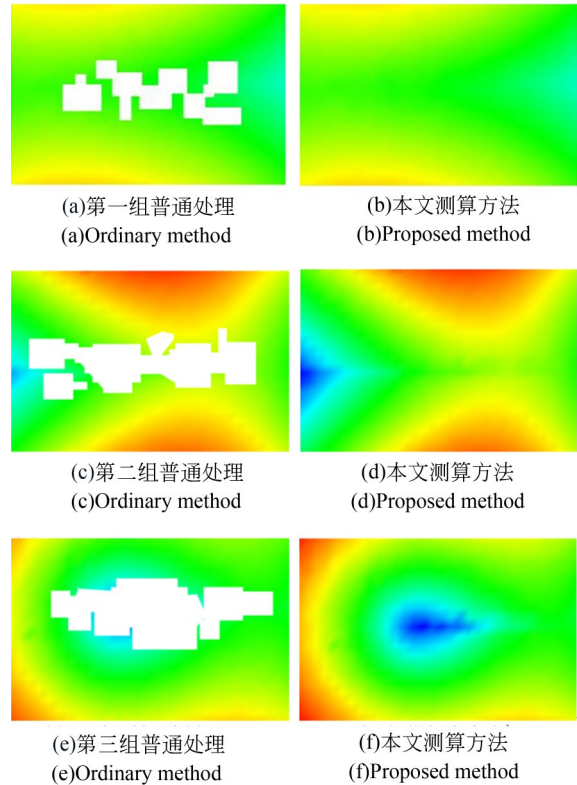


图 13 两种方法测量效果对比图

Fig. 13 Comparison image

图 14 是第一组实验本文测量方法的结果,以起始阶段时刻、开始焊接时刻、焊接中间时刻、焊接结束时刻和冷却 300 s 后时刻进行形变位移测量的研究。从图中可以看出,焊枪是从右向左进行焊接,在焊接部分变形比较大其余非焊接区域变形较小。

开始焊接时选定区域的最大位移为 2.802 mm,焊接结束时刻测试区域的最大位移为 4.482 mm,冷却 300 s 时的钢板焊缝区域位移在缓慢增大,最大为 5.129 mm,变形增幅为 10%。集中变形区域为焊缝周边 3~5 cm,其余区域变形较小。变形后钢板为反马鞍状,中间焊接区域凹陷。

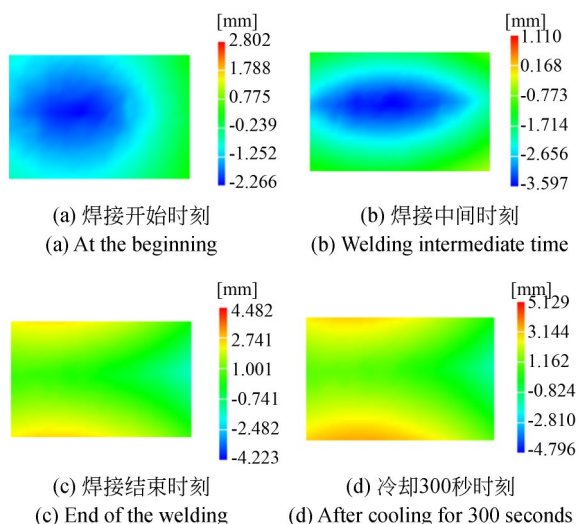


图 14 XJTUDIC 测试结果图

Fig. 14 XJTUDIC test results

4.2 本文方法与大幅面准确位移对比验证

本文用大幅面散斑处理的DIC匹配作为上述实验的第二组对比实验,其测量方法的精度在文献[8],文献[4]和文献[15]中已经被求证,其精度与接触式引伸计相当。图 15 为测量点和焊缝区位置。大幅面测量过程中,将标定幅面换成 400 mm×300 mm,钢板是以喷砂处理表面为底,高温胶作为散斑进行喷涂。其余实验过程不变。

本文用大幅面方法求出的 A 点与 B 点匹配结果与上小节实验得到的匹配结果进行对比, A

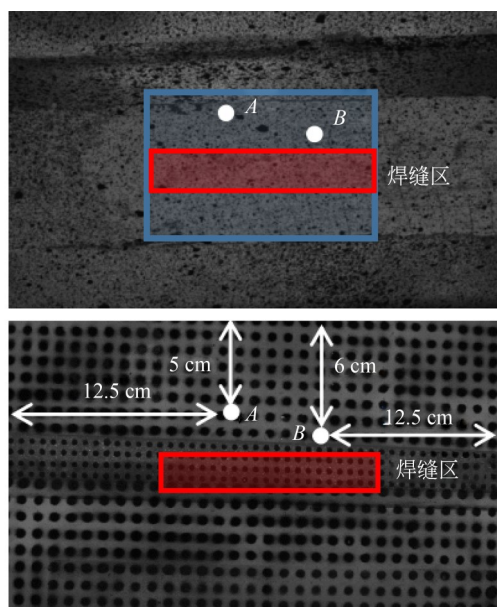
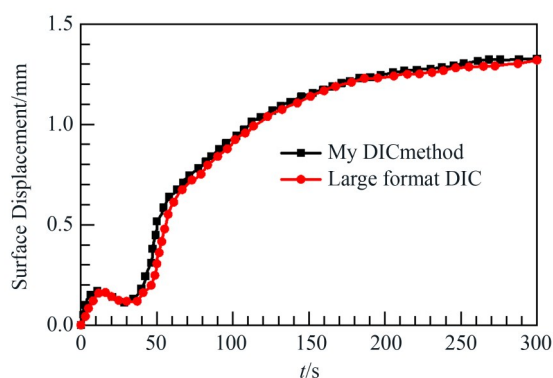


图 15 与大幅面对比试验

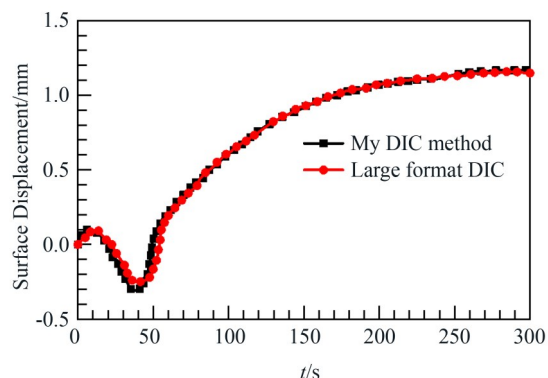
Fig. 15 Compare test with large format

和 B 点位置如图 15 所示。对比实验测试 3 组,以下数据全都是基于 3 组结果的平均值。

图 16 是位移对比图,以大幅面测量数据为基准, A 点和 B 点最低误差为 0.023 mm 和 0.027 mm,平均误差为 0.030 mm 和 0.037 mm。在原论文中测出精度公差为 0.5%,因此加上大幅面测量方法的精度公差,本文方法 A 点和 B 点的平均误差最高在 0.054 mm 和 0.059 mm。可得出误差在 1% 以下,精度符合标准。



(a) Q345B 板材 A 点
(a) Point A of Q345B steel plate



(b) Q345B 板材 B 点
(b) POINT B of Q345B steel plate

图 16 位移对比图

Fig. 16 Compare images of displacement

根据图 17 所示,最终本文方法测出的焊缝中心线的最大的位移为 1.23 mm。此方法的焊缝中心线匹配结果与大幅面焊缝中心线的匹配结果进行比较,趋势相似,平均误差为 0.045 mm,加上大幅面测量方法公差后平均误差最高 0.069 mm,符合精度条件。说明本文方法求出焊缝区域的位移较准确。

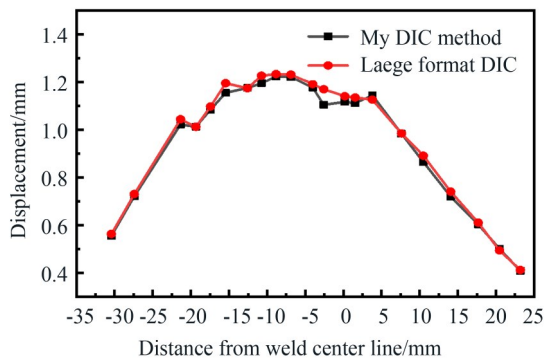


图17 焊缝区域位移对比图

Fig. 17 Displacement map of weld zone

由于是小幅面DIC测量,在相机标定以及像素计算方面都比大幅面的要更加精确,因为对于本次实验用的相机来说,像元尺寸为 $3.45\ \mu\text{m}/\text{pixel}$,幅面越小距离被测物体越近,每个像素的被测物体的信息越细致,计算结果越精确。

最终可得结论:本文提出的小幅面焊接变形测量方法测出数据与已验证的精确值对比,误差很小,精确度较高,因此本文测量方法可以测量小幅面钢板的焊缝变形。并且在理论上精度更高。

5 结 论

本文提出了一种可以准确对电弧焊接下的

钢板焊缝区进行小幅面的位移测量的视觉测量方法,并运用对比试验进行验证,结果可知此方法测量精确而且稳定。

(1)本文运用无接触的数字图像相关法(DIC)进行钢板的测量。具有精度高、操作以及原理简单等优点。

(2)并针对焊接试验图像的环境光干扰,在变形子区与参考子区的关系中引入了两个光补偿系数;硬件方面在相机前加装了一种过滤黄光的窄通滤波片。

(3)在图像频域层面,运用一种高斯低通滤波器对高频噪声去噪,与理想低通滤波器相比,去噪后的图像质量更高,且更加清楚。经过增量差值测试,测出本次试验钢板的高斯低通滤波的最佳截止频率为 $35\ \text{mm}$,并用定位移的DIC对比实验进行精度验证,得出去噪后DIC匹配测量误差更小、精度更高。并在最终实验中也通过了精度验证。

(4)在实验设备与材料准备上,为能够稳定安全的采集与计算图像,本文用灰白色高温胶为底色,黑色高温漆为散斑喷涂钢板的焊缝区域,用立焊的焊接方式加防具进行火花阻挡。

从对比验证的结果可知,此测量方法的匹配过程稳定且精确度较高,精度高于 1% 。能够有效对小幅面高温焊缝图像进行测量与匹配分析。

参考文献:

- [1] MACKERLE J. Finite element analysis and simulation of machining: An addendum a bibliography (1996-2002) [J]. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, 43(1):103-114.
- [2] 周鹏,张少钦,李禾. 云纹干涉法运用于高温材料断裂韧性测试的研究[J]. 科技资讯, 2012(23): 250-25
- [3] ZHOU P, ZHANG SH Q, LI H. Research on moire interferometry applied to fracture toughness test of high temperature materials [J]. *Science & Technology Information*, 2012 (23): 250-25. (in Chinese)

- [4] 唐正宗,梁晋,肖振中,等. 用于三维变形测量的数字图像相关系统[J]. 光学精密工程, 2010, 18(10):2244-2253.
- [5] TANG ZH Z, LIANG J, XIAO ZH ZH, et al. Digital image correlation system for 3D deformation measurement [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(10):2244-2253. (in Chinese)
- [6] 王立忠,汪耀,梁晋,等. 高速三维数字图像法测量手机跌落全场应变[J]. 光学精密工程, 2018, 26(9): 2174-2180.
- [7] WANG L ZH, WANG Y, LIANG J, et al. Measurement of full-field strain in cell phone dropping test by high-speed 3D digital image correlation method [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2018, 26(9): 2174-2180. (in Chinese)
- [8] 胡慧然,但西佐,赵琪涵,等. 数字图像相关中的

- 散斑区域自动提取研究[J]. 中国光学, 2019, 12(6): 1329-1337.
- HU H R, DAN X Z, ZHAO Q H, *et al.* Automatic extraction of speckle are a in digital image correlation [J]. *Editorial Committee of Chinese Optics*, 2019, 12(6): 1329-1337. (in Chinese)
- [7] 戴美玲, 徐向阳, 杨福俊, 等. 薄壁球壳受刚性平面压缩的连续变形测量[J]. 光学精密工程, 2016, 24(5): 993-1000.
- DAI M L, XU X Y, YANG F J, *et al.* Measurement of continuous deformation of thin-walled spheres com pressed by a rigid plate[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2016, 24(5):993-1000. (in Chinese)
- [8] 谈杰, 王立忠, 梁晋, 等. 低合金高强钢薄板的三维全场焊接变形研究[J]. 中国测试, 2019, 45(2): 30-35.
- TAN J, WANG L ZH, LIANG J, *et al.* Three-dimensional full-field welding deformation of low-alloy high-strength steel sheet [J]. *China Test*, 2019, 45(2): 30-35. (in Chinese)
- [9] YANG X B, LIU ZH W, XIE H M. A real time deformation evaluation method for surface and interface of thermal barrier coatings during 1 100 °C thermal shock [J]. *Measurement Science and Technology*, 2012, 23(10): 105604.
- [10] 胡悦, 王永红, 鲍思源, 等. 高温下数字图像相关散斑最优成像探究[J]. 中国光学, 2018, 11(5): 728-735.
- HU Y, WANG Y H, BAO S Y, *et al.* Optimal imaging of digital image correlation speckle under high temperature [J]. *Editorial Committee of Chinese Optics*, 2018, 11(5): 728-735. (in Chinese)
- [11] 潘兵, 吴大方. 基于带通滤波成像的高温数字图像相关方法[J]. 光学学报, 2011, 31(2): 59-66.
- PAN B, WU D F. High-temperature digital image correlation method based on bandpass filter imaging [J]. *Acta Optics Sinica*, 2011, 31(2): 59-66. (in Chinese)
- [12] GUSTAFSSON D, LUNDSTRÖM E. High temperature fatigue crack growth behaviour of Inconel 718 under hold time and overload conditions [J]. *International Journal of Fatigue*, 2013, 48(12): 178-186.
- [13] 张旭涛. 基于高斯-椒盐噪声的滤波算法[J]. 计算机科学, 2019, 46(z1): 263-265.
- ZHANG X T. Filtering algorithm based on Gaussian-pepper noise [J]. *Computer Science*, 2019, 46(z1): 263-265. (in Chinese)
- [14] PAN B, XIE H, WANG Z, *et al.* Study on subset size selection in digital image correlation for speckle patterns [J]. *Optics Express*, 2008, 16(10): 7037-7048.
- [15] 王晓光, 梁晋, 郭楠, 等. 基于数字图像相关法的薄板焊接变形研究[J]. 中国测试, 2017, 43(1): 8-12.
- WANG X G, LIANG J, GUO N, *et al.* Study on welding deformation of thin plate based on digital image correlation method [J]. *China Measurement & Test*, 2017, 43(1): 8-12. (in Chinese)

作者简介:



王立忠(1968—),男,山东梁山人,博士,教授,博士生导师,2004年于西安交通大学获得博士学位,主要从事三维光学测量技术的研究。E-mail: wangglz@mail.xjtu.edu.cn

通讯作者:



张振(1995—),男,山东临沂人,硕士研究生,2013年于山东建筑大学获得学士学位,主要从事三维光学测量方面的研究。E-mail: sfges_zz@163.com