

数字图像相关方法中数字散斑场的制作与应用研究

钱伟, 蒋明

引用本文:

钱伟, 蒋明. 数字图像相关方法中数字散斑场的制作与应用研究[J]. 液晶与显示, 2020, 35(8): 861–869.

QIAN Wei, JIANG Ming. Design and application of digital speckle patterns in digital image correlation method[J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2020, 35(8): 861–869.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.37188/YJYXS20203508.0861>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

高均匀性小孔径激光照明系统

High uniformity laser illumination system with small aperture

液晶与显示. 2018, 33(7): 548–554 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20183307.0548>

转动随机微透镜阵列对激光显示中散斑的抑制

Speckle reduction using rotating random micro-lens array in laser display

液晶与显示. 2015(2): 359–364 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20153002.0359>

同态非局部滤波在激光主动成像散斑抑制中的应用研究

Application of homomorphic non-local filters in speckle noise suppression for laser active imaging

液晶与显示. 2016, 31(2): 193–200 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20163102.0193>

GPU加速电子剪切散斑干涉图像处理

GPU accelerated image processing for electronic speckle pattern shearing interferometry

液晶与显示. 2019, 34(10): 1021–1029 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193410.1021>

基于FPGA的多路Cameralink数字图像光纤传输系统

Optical fiber transmission for multi-channel Cameralink digital image based on FPGA

液晶与显示. 2019, 34(8): 787–792 <https://doi.org/10.3788/YJYXS20193408.0787>

文章编号:1007-2780(2020)08-0861-09

数字图像相关方法中数字散斑场的制作与应用研究

钱 伟¹, 蒋 明^{2*}

(1.苏州科技大学 数理学院,江苏 苏州 215009;

2.苏州科技大学 土木学院,江苏 苏州 215009)

摘要:针对数字图像相关(DIC)实验中,普通喷漆散斑无法满足超高温环境需求,研究了数字散斑场(DSPs)的制作和转移方法。数字散斑场的设计通过矩阵转换确定每个散斑点的圆心坐标,然后给每个圆心坐标施加一个随机度,并由MATLAB软件编程实现。用激光打标技术将其转移到试件表面,通过圆度和面积比分析了散斑的精度,并通过平均灰度梯度法将喷漆散斑和数字散斑场进行对比分析。研究表明,运用激光打标技术转移的数字散斑场精度高于普通喷漆散斑且质量稳定。将数字散斑场运用于拉伸和高温焊接实验,实验中散斑随着试件一起变形,没有出现脱落及遇高温融化等现象。

关 键 词:三维数字图像相关;数字散斑场;激光打标;精度分析;激光焊接实验

中图分类号:TP391.4 **文献标识码:**A **doi:**10.37188/YJYXS20203508.0861

Design and application of digital speckle patterns in digital image correlation method

QIAN Wei¹, JIANG Ming^{2*}

(1.School of Mathematics and Physics, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215009, China;

2.School of Civil Engineering, Suzhou University of Science and Technology,
Suzhou 215009, China)

Abstract: Aiming at the digital image correlation (DIC) experiment, ordinary paint speckle can not meet the requirement of ultra-high temperature environment, the method of designing and transferring the digital speckle patterns (DSPs) is studied. The design of the digital speckle patterns determine the circle center coordinates of each speckle by matrix transformation, and then a random degree is applied to each circle center coordinate, and it is programmed by Matlab. The laser marking technology is used to transfer it to the surface of the test piece. The accuracy of speckles are analyzed

收稿日期:2020-01-12;**修订日期:**2020-03-02.

基金项目:国家自然科学基金(No.11172193);江苏省十三五重点学科(No.20168765)

Supported by National Natural Science Foundation of China (No.11172193); Jiangsu Key Disciplines of the Thirteenth Five-Year Plan (No.20168765)

* 通信联系人, E-mail:jiangming@mail.usts.edu.cn

by roundness and area ratio, and the paint speckles and DSPs are compared and analyzed by the average speckle gradient method. The results show that the accuracy of DSPs transferred by laser marking technology is higher than that of ordinary spray paint speckle, and the quality is stable. The DSPs is used in the high-temperature welding test. In the test, the speckle is deformed along with the test piece, and no phenomena such as shedding and melting under high-temperature occurred.

Key words: 3D digital image correlation; digital speckle patterns; laser marking; precision analysis; laser welding experiment

1 引言

数字图像相关 (Digital image correlation, DIC) 测量技术是通过试件表面的图案或者纹理变化获得其位移和应变等信息。DIC 实验需要在试样的表面生成具有随机灰度分布的散斑图案, 即散斑场, 在不影响试件本身力学行为的基础上散斑场能够随着试件表面的变形而产生相应的变化。散斑场通常采用人工喷漆方法进行制备, 由于不同的人喷涂的手法和周围环境的不同, 从而导致喷漆散斑质量参差不齐。

在 DIC 高温环境的测量中, 许多学者对相关问题进行了系统的研究和探索。时金娜^[1]等人在混凝土表面喷涂油漆, 利用 DIC 技术, 对经历 20, 200, 400, 600 °C 后的混凝土在单轴受压过程中的全场位移进行采集, 分析了混凝土在不同温度下、不同受力阶段应变云图的变化特征和变形参数的变化规律; 吴大方^[2]等人将白色的 Al_2O_3 陶瓷板表面制备成黑色, 之后将白色的 Al_2O_3 粉末加入高温陶瓷粘接剂中搅拌均匀, 通过溅射方式制备出散斑场, 实现了 1 200 °C 高温氧化环境下部件受热前表面的应变测量; 胡悦^[3]等人利用不同颜色的高温漆制斑, 在不同的温度节点外加不同光源及相应的滤波片, 采集并观察图像是否具有良好的对比度, 实验结果表明: 采用紫外光照明可以实现 DIC 在高温环境下的测量, 同时利用黑色或者蓝色散斑直接喷涂在试件上有着最佳的对比度。这些采用高温粘接剂和高温油漆等方法制作的散斑场, 不仅成本高, 散斑场质量不稳定, 且耐受温度有限; 张平等人^[4]利用激光打标的方法在 PBT 材料上标刻了不同的图案, 并且在 750 °C 的高温下标刻图案的质量均表现为优, 说明了激光打标图案能够适应高温环境。

运用软件制作的数字散斑场 (Digital Speckle

Patterns, DSPs) 能够有效解决制斑差异大、质量不稳定等问题。采用光纤激光打标技术进行数字散斑场的转移。将数字散斑场运用于高温焊接实验, 在焊接的瞬间, 试件表面温度迅速升高, 散斑随着试件一起变形, 且散斑场质量稳定, 没有出现高温融化现象。

2 数字散斑场的制作及转移

2.1 数字散斑场的制作

DIC 通过识别附着在物体表面随机分布的散斑来获取物体的变形信息, 达到测量全场变形的目的。因此, 散斑作为变形信息的载体, 其质量直接影响到 DIC 的变形测量精度和效率。

一般来说, 形成散斑场的散斑点形状可以是任意的, 如三角形、正方形、多边形和圆, 但是考虑到散斑的各向同性, 选择的散斑点的形状为圆形, 采用圆点设计散斑场主要考虑 3 个要素: 占空比 ρ (一幅散斑场中散斑点的面积与整幅图像面积的比值)、散斑直径 d 和随机度 r ^[5-10]。本文设计的散斑场的散斑直径相同, 通过控制散斑点随机出现的范围来控制数字散斑场的随机度。如图 1, 在白色背景上规则地放置固定直径的黑色圆点, 形成规则分布的散斑点阵列 (图 1(a)); 将该散斑点阵列中的第 i 个点添加一个随机的扰动, 使得该点在指定范围内并且只能在该范围内移动, 如图 1(a) 中的红色方框; 遍历所有散斑点, 就可以得到随机分布的数字散斑场 (图 1(b))。

数字散斑场是通过控制斑点数量、圆心坐标和圆的半径来设计制作。数字散斑场由下面 4 个公式生成:

$$\begin{cases} X_i = 2 \times i \times x_i, i \in [1, n] \\ Y_i = 2 \times i \times y_i, i \in [1, n] \end{cases}, \quad (1)$$

$$\begin{cases} X'_i = X_i + 0.5 \times f(r) \times a \\ Y'_i = Y_i + 0.5 \times f(r) \times a \end{cases}, \quad (2)$$

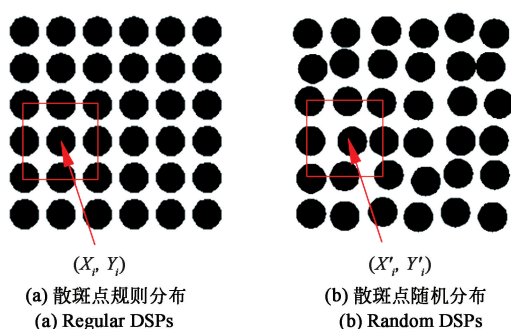


图1 软件生成的散斑场

Fig.1 Software generated DSPs

$$a = \frac{d}{2} \sqrt{\frac{\pi}{\rho}}, \quad (3)$$

$$n = \rho A / (0.25 \cdot \pi d^2), \quad (4)$$

式中, (X_1, Y_1) 为第一个散斑点的圆心坐标, (X_i, Y_i) 和 (X'_i, Y'_i) 分别是规则分布的散斑场和随机分布的散斑场中散斑点的圆心坐标; a 为规则分布的散斑场中两个散斑点的圆心距离; ρ 为占空比; 数字散斑场的散斑点个数 n 与相机的分辨率 A 有关, 由公式(4)决定; $f(r)$ 表示的是区间为 $(-r, r)$ 的伪随机函数, r 是范围区间在 $(0, 1]$ 的随机度因子。一般来说, 如果已知相机的分辨率, 确定了散斑直径、随机度和占空比之后, 就可以根据式(2)设计出一幅随机分布的矢量图形式的数字散斑场。

2.2 数字散斑场的转移

目前常用的散斑场转移方法(如水转印^[11]、丝网印刷等)制作出的散斑场不能满足超高温环境的测量需求。采用光纤激光打标机转移散斑场, 选择的光纤激光打标机的激光波长为 1 064 nm, 功率为 100 W, 标刻深度为 0.01~1.6 mm, 重复定位精度为 ± 0.002 mm, 图 2 为实验中用到的光纤激光打标机的装置图。激光打标机转移散



图2 光纤激光打标机

Fig.2 Fiber optic laser marking machine

斑场是通过高能量密度的激光烧蚀试件表面, 在试件表面形成图案, 并且不改变试件的原有材质。为了不改变试件的力学性质, 在标刻时选择的标刻深度为 0.01 mm, 远小于试件的厚度 2 mm, 所以将散斑场标刻在试件表面不会改变试件本身的力学性质, 耐受温度与试件一致。图 3 为标刻完成的散斑场。

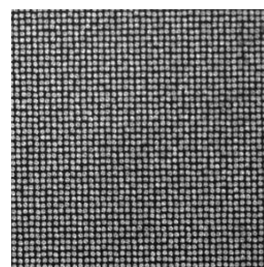


图3 转移的散斑场图

Fig.3 Enlarged image of transferred DSPs

3 数字散斑场精度分析

3.1 数字散斑场打印精度分析

激光打标技术转移数字散斑场就是将制作好的散斑图导入打标软件中, 然后调整好激光的功率和标刻的视场, 通过激光烧蚀试件表面, 获得散斑场。激光打标技术理论的最小打标点为原点, 但是在实际应用中, 由于温度和周围环境的影响, 可能会对散斑的大小和形状造成影响。激光打标的精度可以从散斑的圆度和面积比两个方面来进行分析。

3.1.1 圆度

圆度体现了散斑点的再现状态, 也体现了散斑点的保真度, 圆度的表示公式如下所示:

$$RD = \frac{P^2}{4\pi A}, \quad (5)$$

式中, A 为散斑点面积, P 为散斑点周长。当散斑点的圆度为 1 时, 散斑点处于理想状态。散斑点圆度越接近于 1, 其毛细现象、羽化现象、渗透现象就越少, 图像质量就越高。首先通过 Matlab 软件读入拍摄的散斑图(图 3)并进行二值化处理, 将灰度值高于阈值大小的变为 1, 低于阈值大小的变为 0, 求解所有散斑点的周长和面积并求取圆度值, 然后求出圆度的平均值。

导入的散斑场中共有 1 845 个散斑点, 软件识别到 1 789 个散斑点, 识别率为 96.96%, 通过

分析得到制作的散斑图的平均圆度为 0.978 2。

3.1.2 面积比

在实际应用中,散斑点的打印面积由激光打标机的精度决定,散斑点的指定面积是指一个方形像素在实际打印中的理论面积,它的边长为分辨率的倒数。散斑点的理想面积指的是像素矩形外接圆的面积。散斑点的面积比如式(6)所示:

面积比=独立散斑理论面积 / 独立散斑打印面积

=理论散斑占空比 / 打印散斑黑点 / 图像整体大小 · (6)

选取上述散斑图,统计二值化之后散斑图的所有白色点的面积,求取白色面积和整幅图像面积的比值。最后分析得到黑色部分面积/全部面积=0.526 7,面积比=0.5/0.626 7=0.949 3。

通过圆度和面积比的分析,激光打标方法转移数字散斑场的精度高,满足实验要求,而且转移方法安全环保。

3.2 平均灰度梯度法

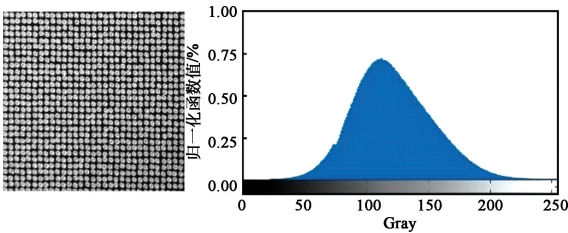
根据潘兵^[12]等人的理论与实验研究,平均灰度梯度可以有效评价一副散斑图的质量,而且平均灰度梯度越大,散斑图的质量越高,该参数的定义如下:

$$\delta_f = \frac{\sum_{i=1}^W \sum_{j=1}^H |\nabla f(x_{ij})|}{W \times H}, \quad (7)$$

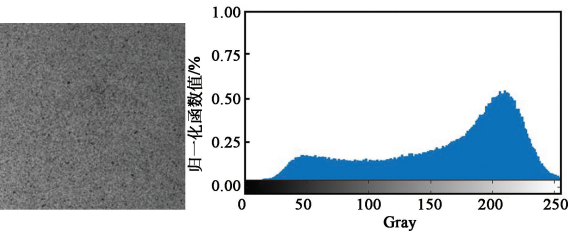
式中,W 和 H(以像素为单位)是图像的高度和宽度; $|\nabla f(x_{ij})| = \sqrt{f_x^2(x_{ij}) + f_y^2(x_{ij})}$ 是每个像素点灰度梯度矢量的模;其中 $f_x(x_{ij})$, $f_y(x_{ij})$ 为像素点 x_{ij} 在 x-和 y-方向的灰度导数,可利用常用的梯度算子计算确定^[13]。

首先对采集到的散斑图进行亚像素平移,每一幅散斑图连续精确平移 20 次,相邻两幅散斑图之间的平移量为 0.05 个像素,最大平移量为 1 个像素。图 4 为不同的散斑图以及相对应的平均灰度梯度曲线,其中图 4(a)选用的是激光打标在试件上的散斑图,图中的激光打标散斑场的散斑直径为 0.3 mm,占空比为 0.5,随机度为 0.35。图 4(b)选取的是平时实验中质量较好的一张喷漆散斑图。表 1 为不同散斑进行数值模拟之后的平均灰度梯度值。由表格数据和平均灰度曲线图可以看出,在相同的计算模板下数字散斑场的质量高于喷漆

散斑。



(a)激光打标散斑图及相对应的平均灰度梯度曲线
(a) Laser marking speckle patterns and the corresponding average gray gradient curve



(b)人工散斑图及相对应的平均灰度梯度曲线
(b) Speckle patterns drawn by spray painting and the corresponding average gray gradient curve

图 4 不同散斑图以及对应的平均灰度梯度曲线
Fig.4 Different speckle patterns and corresponding average gray gradient curves

表 1 两幅不同散斑图的平均灰度梯度

Tab.1 Average gray gradient of two different DSPs

散斑图	平均灰度梯度
a	73.985 0
b	65.214 3

4 数字散斑的可靠性实验

4.1 拉伸实验

拉伸实验选择的试件为 6061T6 铝板,尺寸如图 5 所示,设计板厚 2 mm。数字散斑场散斑物理直径为 0.3 mm,随机度为 0.35,占空比为 0.5。实验采用 3 种散斑场形式:①试件全部是激

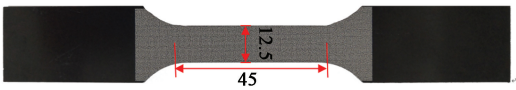
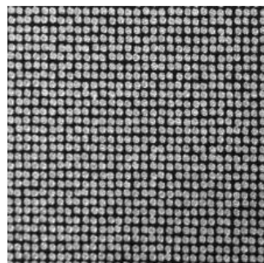


图 5 试件实际尺寸

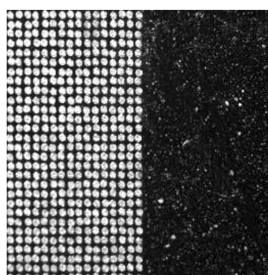
Fig.5 Actual size of test piece

光打标的数字散斑场;②试件一半采用激光打标数字散斑场,一半采用人工喷涂散斑场;③试件全部为人工喷涂散斑场,具体散斑场如图 6 所示。



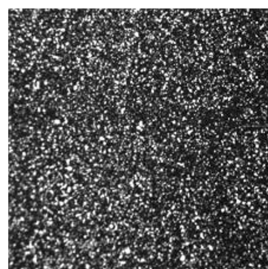
(a) 激光打标散斑图

(a) Laser marking DSPs



(b) 一半激光打标,一半喷漆散斑图。

(b) Half laser marking, half spray paint speckle patterns.



(c) 喷漆散斑图

(c) Spray paint speckle patterns

图 6 试件及表面散斑制备

Fig.6 Specimen and surface speckle preparation

图 7 为实验环境图,实验设备主要包括拉伸实验机、ARAMIS 数字图像相关系统、两个工业 CCD(2 048 pixels×2 048 pixels)、两个 50 mm 镜头等。实验中先将两个相机进行双目立体视觉标定^[14],然后采用 PCIE8620 数据采集卡同步控制实验机力传感器,实现 CCD 图像与力值数据的同步采集^[15]。加载方案参照《GB/T228.1-2010 金属材料拉伸实验第一部分:室温实验方法》,拉伸

时控制应变速率 $\epsilon_e=0.00\ 025/s$ 。CCD 的采样频率为 1 帧/s,每采集一组图像记为一个 stage,记录的第一组图像记为 stage 0,每个 stage 对应一个力值数据^[16-17]。记录的荷载时间曲线见图 8。开始拉伸的同时进行散斑图的采集,当试件被拉断之后,结束图像采集。拉断之后的断裂处的局部放大图像如图 9 所示。可以看到,断裂的过成中激光打标的数字散斑场随着试件一起变形,由原来的圆形变成了椭圆形,而在喷漆的试件的断口处出现了喷漆散斑局部剥落以及变模糊的现象。后处理的相关计算由德国 GOM 公司的 3D DIC 商业软件 ARAMIS 完成。



图 7 实验环境

Fig.7 Lab environment

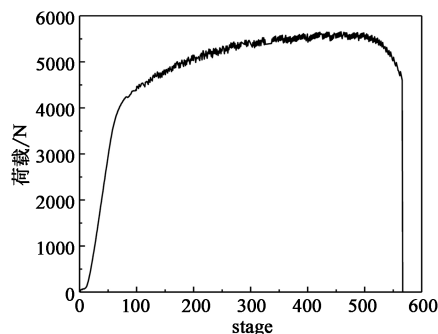


图 8 荷载时间(stage)曲线

Fig.8 Load time (stage) curve



图 9 断裂处散斑图

Fig.9 Speckle patterns at break

图 10 为计算软件计算的左右相机拍摄的拉断处的应力云图,通过应力云图不难发现,由于断裂处喷漆的掉落导致相机无法识别,应力云图有残缺,但是激光打标的数字散斑却表现良好。为了避免由于试件、实验、操作等差异造成的显著性差异,对测试的 3 个试件选取了在局部颈缩阶段时中间部位的竖直线,对于第二个试件则选取了两条平行线;图 11 比较了激光打标数字散斑场和传统喷漆散斑场的差异性。在

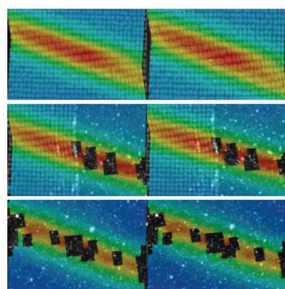
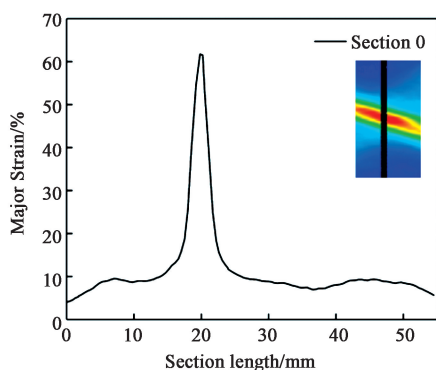


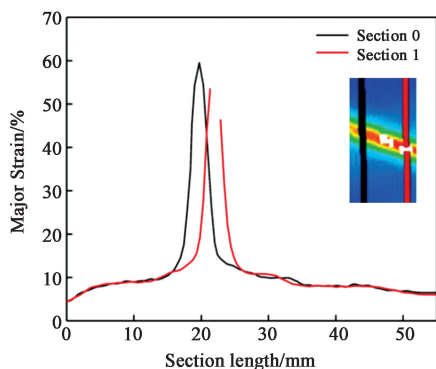
图 10 应力云图

Fig.10 Stress cloud



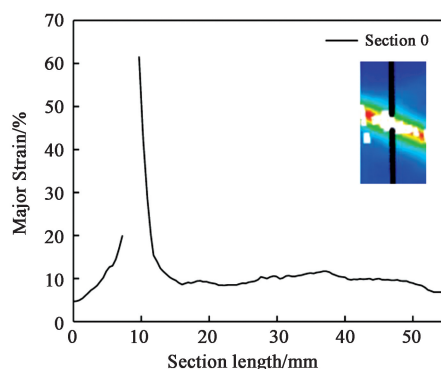
(a) 试件 1 局部颈缩阶段应变曲线

(a) Strain curve in the local necking stage for sample 1



(b) 试件 2 局部颈缩阶段应变曲线

(b) Strain curve in the local necking stage for sample 2



(c) 试件 3 局部颈缩阶段应变曲线

(c) Strain curve in the local necking stage for sample 3

图 11 局部颈缩阶段的应变曲线

Fig.11 Strain curve in the local necking stage

颈缩阶段,由于受到人工散斑喷漆剥落的影响,第二个试件的右半部分和第三个试件的颈缩部位变形数据缺失,第一个试件和第二个试件的左半部分激光打标数字散斑场表现较好,由此可以看出激光打标数字散斑场更加适合用作金属试件的大变形测试。

4.2 激光焊接实验

激光焊接技术是采用偏光镜反射激光产生的光束使其集中在聚焦装置中产生巨大能量的光束,通过脉冲瞬间发出的激光焦点达到上千摄氏度,在几毫秒内将金属材料融化。

将两块 304 不锈钢板采用激光焊接的技术进行 T 形焊接,T 型焊接筋板尺寸为 $80\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,腹板尺寸为 $50\text{ mm} \times 50\text{ mm} \times 2\text{ mm}$,预制数字散斑场范围为 $50\text{ mm} \times 60\text{ mm}$,其表面激光转移散斑场的散斑物理直径为 0.3 mm ,随机度为 0.35,占空比为 0.5,如图 12 所示,激光打标之后试件表面依旧非常平滑,没有出现凹凸不平的现象。焊接前使用丙酮除去表面油污及杂质,并且在试件周围布置了遮光板,排除了光强对

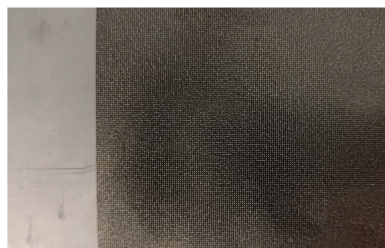


图 12 焊接试件散斑图

Fig.12 Speckle patterns of welding specimen

实验结果的影响。焊接时所选焊接功率为 1 500 W,速度 30 mm/s^[18],采用氩气进行保护,保护气流量为 15 L/min,焊接后自然冷却至室温。采用 DIC 系统进行测量,CCD 靶面与试件表面平行,焊接方向从右向左焊,焊接开始时 CCD 也开始同步采集图片,焊接过程中相机的采集频率为 40 帧/s,焊接过程中共采集 67 组图像;冷却过程的采样帧率为 5 帧/s,冷却 8 min 共采集 2 400 组图像。实验环境如图 13 所示。



图 13 实验环境

Fig.13 Lab environment

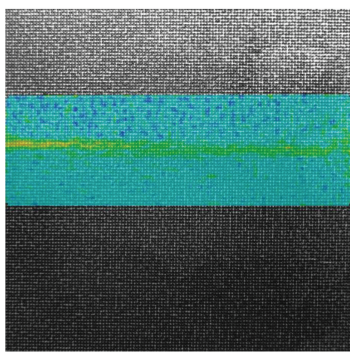


图 14 焊接之后应变云图

Fig.14 Strain cloud after welding

在试件正中间垂直于焊缝处画一条 2 cm 的计算直线。图 14 为焊接完冷却 8 min 后 CCD 采集到的焊接图片,中间淡蓝色部分为应变计算区域。图 15(a)~(c)为激光焊接不同阶段的应变云图以及计算直线处的应变曲线。图 15(a)为刚开始焊接时,此时还没有焊接到试件的正中间,所以画线处的应力趋于 0;图 15(b)为焊接到红色计算曲线时的应变曲线,此时由于焊缝处温度的上升,局部应力增大,远离焊缝区域未受影响,焊缝处应

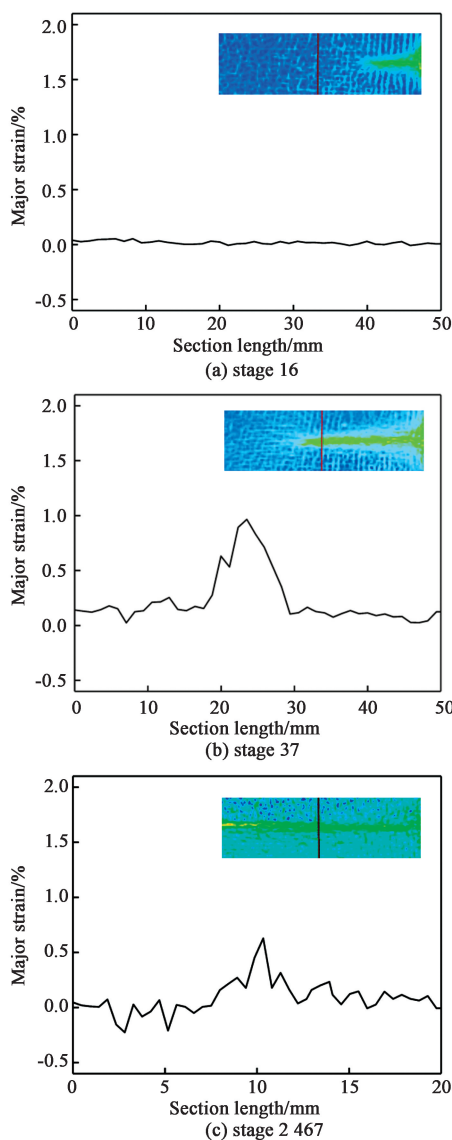


图 15 不同焊接时刻的应变曲线

Fig.15 Strain curves at different welding moments

力出现峰值,为 208 MPa;图 15(c) 为冷却 8 min 之后的应变曲线,此时测出试件中间焊缝处的残余应力为 103 MPa。

5 结 论

本文提出了一种应用于高温环境的数字散斑场,并且利用激光打标机将其标刻到试件的表面;然后通过圆度和面积比分析了转移的数字散斑场,可以看出激光打标转移的数字散斑场圆度和面积比分别为 0.978 2 和 0.949 3,标刻精度高;通过分析数字散斑场和普通喷漆散斑场的平均灰度梯度值可以看出数字散斑场的质量比较高。

将数字散斑场运用到拉伸和高温焊接实验,实验结果表明,激光打标机转移的数字散斑场能够随着试件一起变形,并且在 2 000 °C 的环境中

没有出现融化的现象,并且测出实验中的不锈钢试件的残余应力为 103 MPa。

参 考 文 献:

- [1] 时金娜,赵燕茹,郝松,等.基于 DIC 技术的高温后混凝土变形性能[J].建筑材料学报,2019,22(4):584-591.
SHI J N, ZHAO Y R, HAO S, *et al.* Deformation behavior of concrete under uniaxial compression after high temperature by DIC technology [J]. *Journal of Building Materials*, 2019, 22(4): 584-591. (in Chinese)
- [2] 吴大方,王怀涛,朱芳卉.1 200 °C 高温环境下部件受热前表面应变的光学测量[J].应用数学和力学,2018,39(6): 631-644.
WU D F, WANG H T, ZHU F H. Optical measurement of heated-front-surface strains for components in high temperature environments up to 1 200 °C [J]. *Applied Mathematics and Mechanics*, 2018, 39(6): 631-644. (in Chinese)
- [3] 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]. *Chinese Optics*, 2018, 11(5): 728-735. (in Chinese)
- [4] 张平,林远开,张钊鹏.一种优异激光打标效果的 750 °C 灼热丝环保阻燃增强改性 PBT 的研究[J].广东化工,2018, 45(18):59-61.
ZHANG P, LIN Y K, ZHANG Z P. Study on 750 °C glow wire environmentally friendly flame retardant modified PBT with excellent laser marking effect [J]. *Guangdong Chemical Industry*, 2018, 45(18): 59-61. (in Chinese)
- [5] 陈振宁.数字散斑场优化及其应用研究[D].南京:东南大学,2018.
CHEN Z N. Optimizations and applications of digital speckle patterns [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [6] SHAO X X, DAI X J, CHEN Z N, *et al.* Calibration of stereo-digital image correlation for deformation measurement of large engineering components [J]. *Measurement Science and Technology*, 2016, 27(12): 125010.
- [7] 徐向阳.数字散斑场的优化设计及误差分析[D].南京:东南大学,2018.
XU X Y. The optimized design and error analysis of digital speckle patterns [D]. Nanjing: Southeast University, 2018. (in Chinese)
- [8] XING H Z, ZHANG Q B, RUAN D, *et al.* Full-field measurement and fracture characterisations of rocks under dynamic loads using high-speed three-dimensional digital image correlation [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2018, 113: 61-72.
- [9] SUN Y F, PANG J H L. Study of optimal subset size in digital image correlation of speckle pattern images [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2007, 45(9): 967-974.
- [10] CHEN Z N, SHAO X X, XU X Y, *et al.* Optimized digital speckle patterns for digital image correlation by consideration of both accuracy and efficiency [J]. *Applied Optics*, 2018, 57(4): 884-893.
- [11] 陈振宁,邵新星,吴家林,等.水转印数字散斑场用于人体颈动脉全场测量[J].光学学报,2017,37(3):0312004.
CHEN Z N, SHAO X X, WU J L, *et al.* Full-field deformation measurement of human carotid artery based on water transfer printing speckle patterns [J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, 37(3): 0312004. (in Chinese)
- [12] 潘兵,吴大方,夏勇.数字图像相关方法中散斑图的质量评价研究[J].实验力学,2010,25(2):120-129.
PAN B, WU D F, XIA Y. Study of speckle pattern quality assessment used in digital image correlation [J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(2): 120-129. (in Chinese)
- [13] 俞海,刘云鹏,郭荣鑫,等.数字图像相关法散斑图质量评价方法[J/OL].激光技术.[2020-04-10].<http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20190626.0921.002.html>.
YU H, LIU Y P, GUO R X, *et al.* Digital image correlation method speckle patterns quality evaluation method [J/OL]. *Laser Technology*. [2020-04-10]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/51.1125.TN.20190626.0921.002.html>. (in Chinese)

- [14] 赵亚凤,胡峻峰.一种双正交消隐点的双目相机标定方法[J].液晶与显示,2016,31(10):958-966.
ZHAO Y F, HU J F. Binocular self calibration using two pairs of orthogonal vanishing points [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(10): 958-966. (in Chinese)
- [15] 蒋粉玲,蒋明.基于 Labview 的图像与力值同步采集系统[J].苏州科技学院学报:自然科学版,2015,32(4):24-29.
JIANG F L, JIANG M. Synchronous acquisition system of images and force value based on Labview [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology: Natural Science*, 2015, 32(4): 24-29. (in Chinese)
- [16] 米红林,何小元.基于数字散斑相关法的金属材料力学性能的测试[J].机械设计与制造,2011(6):146-148.
MI H L, HE X Y. Application of digital speckle correlation method(DSCM-2D)in testing metal materials mechanical property [J]. *Machinery Design & Manufacture*, 2011(6): 146-148. (in Chinese)
- [17] 杨文凯,蒋明.基于三维图像相关的铝合金板真实应力应变曲线研究[J].苏州科技学院学报:工程技术版,2016,29(2):8-13.
YANG W K, JIANG M. The study of true the stress-strain curve for aluminum alloy plates based on 3D-DIC [J]. *Journal of Suzhou University of Science and Technology: Engineering and Technology*, 2016, 29(2): 8-13. (in Chinese)
- [18] 许海亮,郭星晔,雷永平,等.316 不锈钢超薄板脉冲激光焊残余应力及变形[J].焊接学报,2019,40(8):50-54.
XU H L, GUO X Y, LEI Y P, *et al.* Residual stress and deformation of ultra-thin 316 stainless steel plate using pulsed laser welding process [J]. *Transactions of the China Welding Institution*, 2019, 40(8): 50-54. (in Chinese)

作者简介:



钱 伟(1993—),男,江苏南通人,硕士研究生,2017 年于苏州大学文正学院获得学士学位,主要从事光学仪器与检测、数字图像处理方面的研究。E-mail:qiancmail@163.com



蒋 明(1961—),女,江苏苏州人,博士,教授,2009 年于东南大学获得博士学位,主要从事光测力学和图像处理技术方面的研究。E-mail:jiangming@mail.usts.edu.cn