

文章编号: 1001-4888(2024)01-0065-10

基于激光散斑 DIC 技术的金属 热应变原位测量研究^{*}

张吴记¹, 黄刚¹, 潘志伟², 张大乐¹, 王俊松¹,
黄生洪², 汪卫华¹, 杨锦宏¹, 贺胜男¹

(1. 安徽大学 物质科学与信息技术研究院, 安徽合肥 230601; 2. 中国科学技术大学 近代力学系, 安徽合肥 230027)

摘要: 利用激光散斑数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术能够实现金属微应变的无接触、原位测量, 但激光散斑的像质如均匀性、灰度梯度、稳定性等对应变测量精度存在较大影响。为了提高激光散斑 DIC 技术测量金属应变的准确性和测量精度, 本文针对激光器选型、激光波长、扩束系统、成像系统等进行了详细的设计、改进和测试。通过定量分析光学系统改进前后的散斑大小、占空比等像质评价参数, 确定了激光散斑 DIC 技术的应变测量精度影响因素, 并通过优化激光功率、曝光时间、接圈长度、像距等光路参数, 获得了全视场范围分布更加均匀、像质更好的散斑图像, 从而提高了激光散斑 DIC 技术测量应变的准确度和测量精度。利用激光散斑 DIC 技术实施了金属铝在非真空环境下从室温加热到 360℃ 的热应变测量, 测量结果与理论值吻合较好, 而且随着温度的升高, 测量结果的相对误差不断降低, 证明了该方法在金属热应变检测中应用的可行性。

关键词: 激光散斑; 数字图像相关法; 原位测量; 热应变测量

中图分类号: TN247 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-23-024

0 引言

随着航空发动机、托卡马克等大装备、大科学装置的发展^[1-2], 越来越多的金属材料需要在极端高温环境下使用, 因此了解金属材料在高温负荷冲击下的力学行为变得越来越重要, 尤其是非接触、原位测量材料的高温形变^[3], 对工程应用具有重要意义。目前, 对于金属高温热应变的测量多采用高温应变计等传统接触式测量方法, 但由于高温应变计价格贵、寿命短, 并且安装复杂, 限制了它的大规模应用。此外, 应变计只能提供粘贴点的应变, 无法实现全场热应变测量。相比之下, 基于光学成像技术的非接触式测量可以有效克服上述局限性^[3-4], 目前已逐渐成为高温实验力学领域最有应用前景的测量方法。其中, 数字图像相关 (Digital Image Correlation, DIC) 技术以光学系统简单、稳定性好, 且具有更大的视场范围和更快的解析速度等优势而受到广泛关注。

DIC 技术^[5-7]的基本思想是通过采集金属材料表面的散斑纹理图像, 再匹配参考图和变形图中的相关特征点, 求解出全场位移与形变^[8-9]。应用 DIC 技术测量位移或变形时, 通常需要在被测试件表面制作散斑图案, 作为 DIC 计算的特征纹理, 因此在目前 DIC 技术的相关研究中, 大多是基于人工散斑展开的^[10]。REEDLUNN 等^[11]通过在样品表面喷涂油漆获得散斑图案, 使用 DIC 技术测量了形状记忆

^{*} 收稿日期: 2023-02-06; 修回日期: 2023-04-01

基金项目: 科技部重点研发计划资助项目 (2019YFE03080400); 国家自然科学基金项目 (11904007)

通信作者: 贺胜男 (1984-), 女, 博士, 副教授。主要研究领域: 光学诊断技术研究。Email: heshengnan@ahu.edu.cn

(SM)丝的应变场。JIAN 等^[12]通过喷涂人工散斑图案并结合 DIC 测量系统,采用图像平均的方法测量了 45 号钢试件的热变形场和热膨胀系数。人工散斑在高温负荷环境中,容易出现散斑变色、熔化、脱落等问题,使特征点识别度降低甚至消失,虽然有研究发展了耐高温人工散斑技术来应对上述问题^[13-15],但在某些特殊条件下的金属热应变原位测量中,人工散斑是不允许使用的。例如托卡马克装置第一壁禁止使用人工散斑材料,主要是因为人工散斑材料难以抵抗高能粒子溅射,并且脱落的杂质会对高参数等离子体运行造成影响。与人工散斑复杂的制斑过程相比,激光散斑采用长相干激光照射金属壁,经过壁表面微结构的散射和干涉作用,最终在感光耦合器件(Charge Coupled Device, CCD)上形成散斑图样。采用激光散斑作为 DIC 计算的特征纹理,其散斑特征不会随温度剧烈变化而脱落,也不需要提前预制散斑,能够真正实现原位检测,极大地扩展了 DIC 技术测量微应变的应用范围和适用环境。

基于激光散斑的 DIC 技术已有在力学测量领域应用的报道。SOONS 等^[16]将激光散斑干涉技术与三维 DIC 技术 2 种光学检测手段相结合进行了鸟喙在压力作用下的变形测量。ZHENG 等^[17]采用激光散斑结合 DIC 技术对不同材料进行单轴拉伸实验,验证了该方法的可行性,并在高温下实现了金属薄膜的拉伸应变测量。

目前,在力学测量领域中,基于激光散斑的 DIC 技术主要被用于机械拉伸的应变测量,而关于金属热应变的测量鲜有报道。主要原因是激光散斑容易受外界环境影响,导致图像稳定性不如人工散斑,尤其是在热应变测量应用中,试件表面附近的温度梯度变化会影响激光散斑图像的均匀性和稳定性。为了提高激光散斑 DIC 技术测量金属应变的准确性和测量精度,本文针对实验系统进行了改进和测试,通过定量分析光学系统改进前后的散斑图像质量评价参数,确定了激光散斑 DIC 技术的应变测量精度影响因素;通过优化光路参数,获得了全视场范围分布更加均匀、像质更好的散斑图像;并利用激光散斑 DIC 技术在非真空环境下测量金属铝的热应变,证明了该方法在金属热应变检测应用中的可行性。

1 原理

DIC 技术采用相机获取变形前后物体表面随机分布的散斑图像,并将变形前的散斑图像作为参考图像,变形后的散斑图像作为变形图像,对 2 幅图像进行相似度运算,通过匹配变形前后的感兴趣子集获得全场位移,利用位移结果进一步分析材料的力学性能。传统 DIC 技术依靠人工制斑获取随机分布的散斑图像,而基于激光散斑的 DIC 技术是利用激光良好的相干性经被照射表面散射并发生干涉,在像平面上获取亮暗随机分布的散斑图样(图 1)。



图 1 激光散斑图像

Fig. 1 Laser speckle image

激光散斑的形成需要 2 个条件:(1)入射光需要是相干性较好的激光,这样才能生成对比度较好的散斑图像。(2)被检测试件表面不能是镜面,同时表面微观结构的特征尺度不能比入射光波长大太多。当入射光照射至金属表面时被材料表面凹凸不平的微元结构散射,给出射光引入不同的附加相位差,根据表面粗糙度的不同,附加相位差可达 2π 的若干倍。这些具有固定相位差的相干光在空间某一观测点相遇即会发生干涉,形成光场亮暗分布的散斑图样^[18]。虽然激光散斑具有非接触、全场、原位测量等优点,但散斑的均匀性、对比度、稳定性等容易受光学系统参数和环境因素影响,如激光束均匀性、相机焦距、激光波长、激光功率、材料反射率、环境温度等,本文重点针对激光束均匀性和相机焦距对 DIC 计算准确度的影响进行实验研究并验证在非真空环境中测量热应变的有效性。

2 实验装置

2.1 激光器

激光波长会影响干涉光的相位差,因此不同波长的激光作为光源生成的图像,散斑颗粒大小和灰度

梯度将有所差别,而散斑大小和灰度梯度又影响 DIC 的计算精度。为了验证激光波长对激光散斑 DIC 技术测量精度的影响,本文利用波长可连续调节的光学参量振荡(OPO)脉冲激光器作为激光光源,将波长分别设置为 460nm、500nm、530nm、570nm 和 600nm 照射在同一试件表面并采集相应的激光散斑,不同波长激光生成的散斑如图 2 所示。对不同波长散斑图像的散斑占空比(散斑图像中特征散斑占整个图像面积的比例)、散斑颗粒大小、插值误差(DIC 计算中在亚像素搜索之前需要使用插值方法重建图像,获得变形图像亚像素灰度值,但插值不完美会导致系统误差,即为插值误差)和平均灰度梯度进行定量评价,其定量统计结果见表 1。

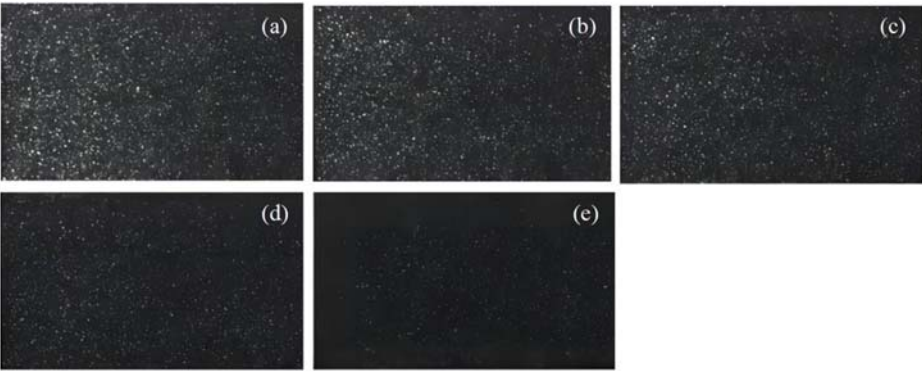


图 2 不同波长激光生成的激光散斑:(a)460nm; (b)500nm; (c)530nm; (d)570nm; (e)600nm

Fig. 2 Laser speckle generated by different wavelength laser:
(a)460nm; (b)500nm; (c)530nm; (d)570nm; (e)600nm

表 1 激光散斑图像质量的评价结果

Tab. 1 Evaluation results of the quality of laser speckle images

激光波长	散斑占空比	散斑颗粒大小	插值误差	平均灰度梯度
460nm	92.38%	5.87pixel	0.00204	1.73
500nm	93.24%	6.32pixel	0.00267	1.29
530nm	92.38%	6.38pixel	0.00304	1.07
570nm	87.91%	8.95pixel	0.00430	1.05
600nm	86.04%	8.86pixel	0.00828	0.65

表 1 中的散斑质量评价结果显示,激光波长越短,图像的散斑占空比和平均灰度梯度越大,散斑颗粒和插值偏差越小,这样越有利于图像的相关匹配和计算。但在实际成像光路的搭建中,波长并非选择激光器的唯一标准,还需考虑其相干特性、最大发射功率、稳定性、体积、CCD 的光电转换效率等。如果单纯地追求短波长,激光器的综合性能将有所下降,如 355nm 的 YAG 激光器功率较低、温度稳定性较差、CCD 的光电转换效率低;半导体激光器的光束质量较差、功率条件范围较小、相干性也劣于 YAG 激光器和气体激光器;而气体激光器的光电转换效率低、体积重量大,不便于安装。综合各类激光器的性能指标,并考虑激光散斑成像光路搭建的空间因素,我们在保证激光波长足够小的前提下,选择了相干性好、功率调节范围大、稳定性强、体积小、安装方便的 532nm YAG 全固态连续激光器作为光源。

2.2 相机镜头

相机镜头是影响激光散斑成像质量的关键器件之一,由于激光散斑相比于人工制斑图像更细密,因此对成像系统要求更高。CCD 直接采集的图像中散斑颗粒像素过小,计算时欠采样会导致计算精度低,因而 CCD 前需要增加成像系统对图像进行放大。短焦显微镜头虽然能使散斑图像的清晰度更好、计算精度更高,但这样会大大降低有效视场范围,并且不适合远距离成像。为了平衡视场范围和计算精度,本实验的成像系统选择 5 倍变焦的尼康 AF-S80-400mm 远摄镜头。

2.3 扩束系统

传统的激光散斑一般采用开普勒扩束系统将激光束扩束成平行光再照射到试件上产生干涉^[19],扩

束倍数约为 10 倍。扩束后的光束能量集中在视场中心区域,导致视场中心亮度较高,而视场边缘光斑暗弱,对比度低。光强分布不均匀导致生成的激光散斑图像的亮度均匀性也较差,容易出现图像匹配失败,造成有效计算区域的大面积缺失。本文在开普勒扩束系统后安装凸透镜,通过调整凸透镜和扩束镜之间的位置和距离,使入射光变换为球面光,从而验证了球面光照射试样表面生成高质量激光散斑的可行性。利用凸透镜生成的球面光波不仅扩大了有效视场范围,使得视场中心区域激光散斑图像的整体亮度(对比度)变得更加均匀,并且通过调节试件和透镜的距离可以动态调整成像的视场范围,实验装置光路如图 3(a)所示。

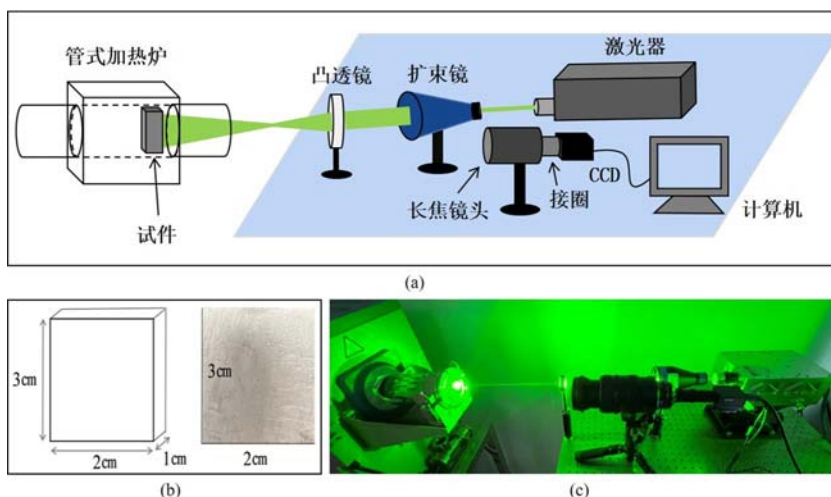


图 3 (a)激光散斑形成的光路图; (b)铝试件; (c)实验装置实物图

Fig. 3 (a)optical path diagram for generating laser speckle; (b)aluminum specimen; (c)physical diagram of experimental device

2.4 接圈

接圈是连接 CCD 和长焦镜头的必要元件,但是增加接圈会改变像距,从而改变成像的放大倍率。根据成像系统的横向放大率公式 $V = -S/S'$ (S 为物距, S' 为像距) 可知,当使用接圈时,实际上是增加了像距,而物距并没有改变,图像的放大倍率会增加,因此接圈越长,图像放大倍率越大,散斑颗粒像素越大,图像越清晰。但是增加接圈会使像平面的图像亮度减弱,因此,在使用长焦镜头采集激光散斑时,需要增加合适长度的接圈,同时也需要相应地优化激光功率。

2.5 实验装置

激光束首先通过开普勒式扩束镜和凸透镜变换成球面光照射在金属试件表面,表面散射光通过成像系统最终在 CCD 像平面发生干涉生成亮暗相间的激光散斑,如图 3(a)所示。因为铝合金具有较大的线性热胀系数,便于获得较大的热应变,因此应变检测实验选用铝合金作为试件。铝试件尺寸为 $3\text{cm} \times 2\text{cm} \times 1\text{cm}$,如图 3(b)所示,将其放置于真空管式加热炉中升温,管式炉前端加有玻璃窗口,用于激光的入射以及散斑图像的采集,后方连接真空泵维持真空环境,避免由空气热流扰动带来的实验误差。利用 CCD(Flir 公司 GS3-PGE-60S6M 相机)采集温度变化过程中的激光散斑图像。CCD 前配有长焦镜头(尼康 AF-S80-400mm),镜头前端装有口径为 $M77 \times 0.75\text{mm}$ 的 532nm 窄带带通滤光片,用来过滤除激光波长外的杂散光,实验装置实物图如图 3(c)所示。散斑图像的 DIC 计算软件采用 PMLAB 3D-DIC^[20-22],在软件中选择合适的计算模板对图像进行处理。模板的选择不同于人工散斑计算中以初始图像作为固定参考图,而是不停地动态调整和更新参考图。基于 DIC 软件的激光散斑图像处理结果表明,隔一定频率重新设定参考图像得到的计算结果会优于不更新参考图像的计算结果,这样的计算方法同时可避免环境振动的影响,但间隔频率不能太大,8~10 张图片最好。选取合适的间隔频率设置参考图后,经过图像匹配和计算可以获得试件由于温度变化而产生的热应变。

2.6 实验方案

(1)定量分析光路扩束系统增加凸透镜前后生成激光散斑图像的特征参数对 DIC 计算精度的影

响。铝试件在真空管式加热炉中由室温加热至 300°C ，分别利用扩束改进前后的光路系统，设置相同的参数采集升温过程的激光散斑图像，并以相同的 DIC 计算模板进行相关性计算，对比利用透镜改善散斑均匀性前后获得的热应变测量结果。

(2) 研究不同接圈长度对生成激光散斑图像以及热应变计算精度的影响。铝试件在真空管式加热炉中由室温加热至 450°C ，将长度为 4cm、6cm、8cm、10cm 的接圈分别接入 CCD 和长焦镜头中间，依次采集升温过程中的散斑图像，并对图像的散斑特征进行统计处理获得定量参数，以相同的 DIC 计算模板和参数对这 4 组实验图像序列进行相关性计算，并对比不同接圈长度时热应变的测量精度。

(3) 验证经过优化后的激光散斑 DIC 实验光路在非真空环境中测量金属热应变的有效性。将真空管式加热炉替换成热台，对铝试件由室温加热至 360°C ，在升温过程中 CCD 以 0.5fps 的帧频采集相应的散斑图，并用热电偶记录下加热过程的试件温度。将 DIC 软件计算得出的热应变与由试件温度根据金属热膨胀系数关系计算出的理论值进行对比分析。

3 实验结果与分析

3.1 改进扩束光路对测量的影响

将扩束光路改进前后采集的激光散斑图像(图 4)分别进行统计处理，得到处理后的灰度分布高程图，可以更加直观地表征散斑灰度分布的均匀性。高程图中每一个像素点 (x, y) 的高度都是原图像上以 (x, y) 为中心的 $(2M+1) \times (2M+1)$ 方阵的平均灰度值，如图 5 所示(两图中存在的较为突出的尖峰是由 CCD 上的坏点造成，对实验分析并无影响，可直接忽略)。图 5(a)中散斑平均灰度值分布参差不齐，存在很多尖峰，而且视场中心大于边缘区域。而图 5(b)的散斑平均灰度值分布相对更加均匀，并且在主要计算区域几乎无明显尖峰，散斑特征更适合 DIC 软件的识别与计算。通过改进前后散斑分布高程图的对比，结果说明，加入透镜后将平行光束变换成球面光，不仅能显著提升激光散斑灰度分布的均匀性，同时通过调节透镜位置和激光功率，还可以动态调整激光束照射试件的视场范围，扩大 DIC 计算的有效区域。

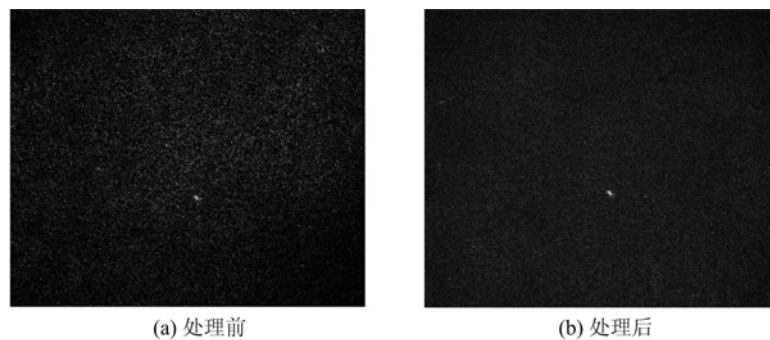


图 4 光路改进前后采集的散斑图

Fig. 4 Speckle images acquired before and after optical path refinement

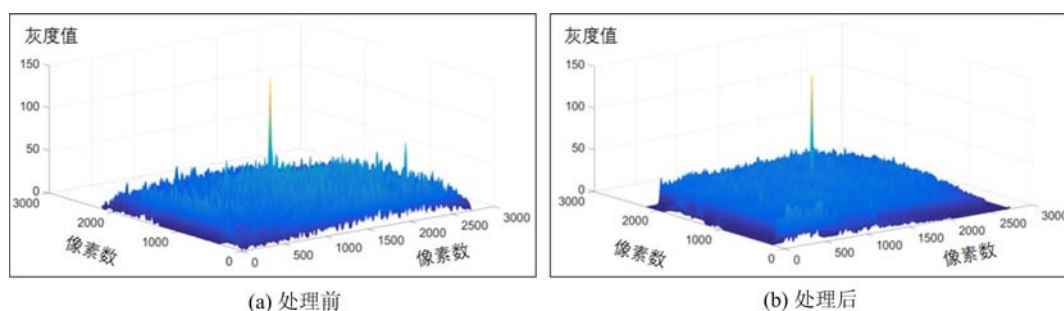


图 5 光路改进前后散斑灰度分布高程图

Fig. 5 Elevation maps of speckle grayscale distribution before and after optical path improvement

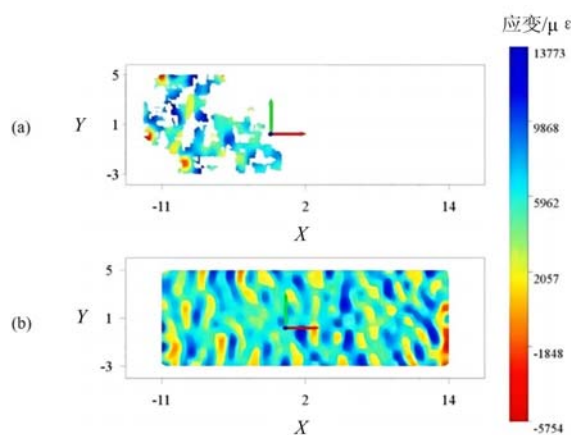


图 6 光路改进前后激光散斑的应变云图

Fig. 6 Strain cloud images of laser speckle before and after optical path improvement

在 DIC 软件中,将扩束改进前后获得的激光散斑图像分别以相同的模板进行匹配,计算得到试件的应变云图,如图 6 所示。图 6(a)是由扩束光路改进前采集的散斑图经过 DIC 相关性计算后得到的应变云图,由于散斑分布和亮度均匀性较差,导致图像匹配过程中部分区域出现欠采样或过曝光问题,有效计算区域减小,最终得到的试件二维平面热应变云图不完整,存在较多缺失而失去参考价值。图 6(b)则是扩束光路改进后采集的散斑图经过 DIC 相关性计算得到的应变云图,与图 6(a)相比没有大面积缺失,最终获得的应变云图完整性较好。DIC 技术是一种基于激光散斑图案变化的整体应变云图计算方法,其计算结果并不代表物

体表面的真实应变。图 6(b)中的应变分布是由于插值偏差与激光散斑的不均匀变形引起的,实际测量数据为区域内的平均应变。

图 7(a)、(b)分别是扩束光路改进前后的全场平均热应变曲线,图中曲线分别表示试件横向 ϵ_{xx} 和纵向 ϵ_{yy} 的二维热应变。由于试件在升温过程中是自由状态,没有施加边界限制,因此二维平面上的热应变应该是各向同性的,理论上 X 和 Y 方向上的热应变曲线应该重合。由图 7(a)可以看出,扩束光路改进前全场平均横向应变 ϵ_{xx} 和全场平均纵向应变 ϵ_{yy} 曲线无法吻合,并且应变曲线存在较大的波动,测量结果的标准偏差较大。由图 7(b)可知,不仅 ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 曲线的吻合性较好,能够符合试件热应变的各向同性特征,而且测量曲线平滑,测量值的标准偏差较小,测量精度有很大改善。通过对比验证可知,在扩束镜后方增加凸透镜使激光束变换成均匀性更好的球面光,能够获得均匀性更好的激光散斑和更大的视场范围,进而使 DIC 的计算结果准确性更高。

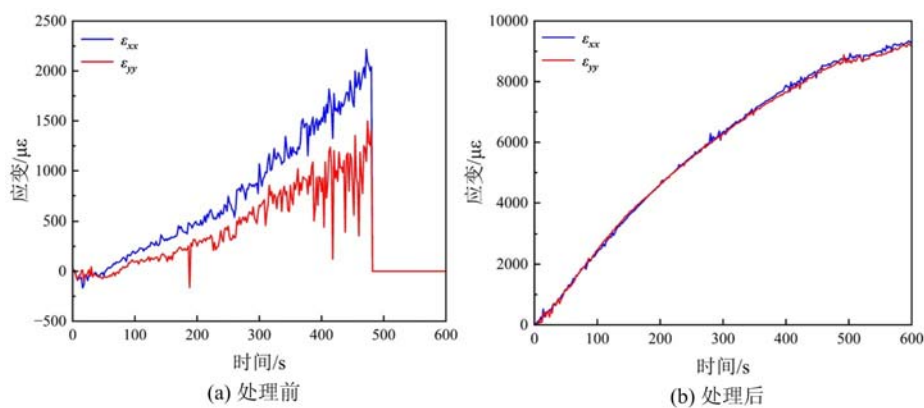


图 7 光路改进前和改进后获得的应变曲线

Fig. 7 Strain curves obtained before and after the improvement of the optical path

3.2 接圈长度对热应变测量的影响

分别选取 4cm、6cm、8cm、10cm 长度的接圈连接 CCD 和长焦镜头,并采集每种接圈相应升温过程的激光散斑图像。在进行 DIC 计算之前,采用统计方法对不同接圈的激光散斑特征值进行定量评估,在每种接圈生成的激光散斑图上分别截取相同坐标位置的计算区域,将截取区域划分为 9×9 的 81 个子区,如图 8 所示,定量统计结果见表 2。表中第 2 列数据为每个子区内散斑点的个数,表征散斑密度,从中能看出随着接圈长度的增加,各子区平均散斑个数在不断减少。第 3 列数据为每个子区按灰度值

取二值化后的散斑占据整个图像的比例,具体计算方法为散斑的像素个数除以子区总像素数,将第 3 列数据乘上子区总像素数再除以散斑个数即为子区内平均每个散斑的像素数。从表 2 中第 3 列数据可以看出,接圈越长,各子区平均散斑占比越大。第 4 列为各子区散斑大小标准差的平均值,其结果也随接圈长度的增加而增大。

图 9(a)~(d)分别是接圈长度为 4cm、6cm、8cm、10cm 时试件横向应变 ϵ_{xx} 和纵向应变 ϵ_{yy} 的测量曲线与理论曲线。理论曲线是根据热电偶监测的试件温度数据,按照材料的线性热膨胀系数关系(如式(1)^[23])计算出的试件在不同温度下相对室温所发生的热应变值 ϵ 。

$$\epsilon = \frac{L_t - L_0}{L_0} = \alpha_l(t - t_0) \tag{1}$$

表 2 散斑特征统计数据

Tab. 2 Statistics on speckle characteristics

接圈长度	各子区平均散斑个数	各子区平均散斑占比	各子区平均散斑大小标准差
4cm	19.12	0.28	88.66
6cm	15.22	0.30	94.97
8cm	12.42	0.39	194.12
10cm	9.58	0.44	264.70

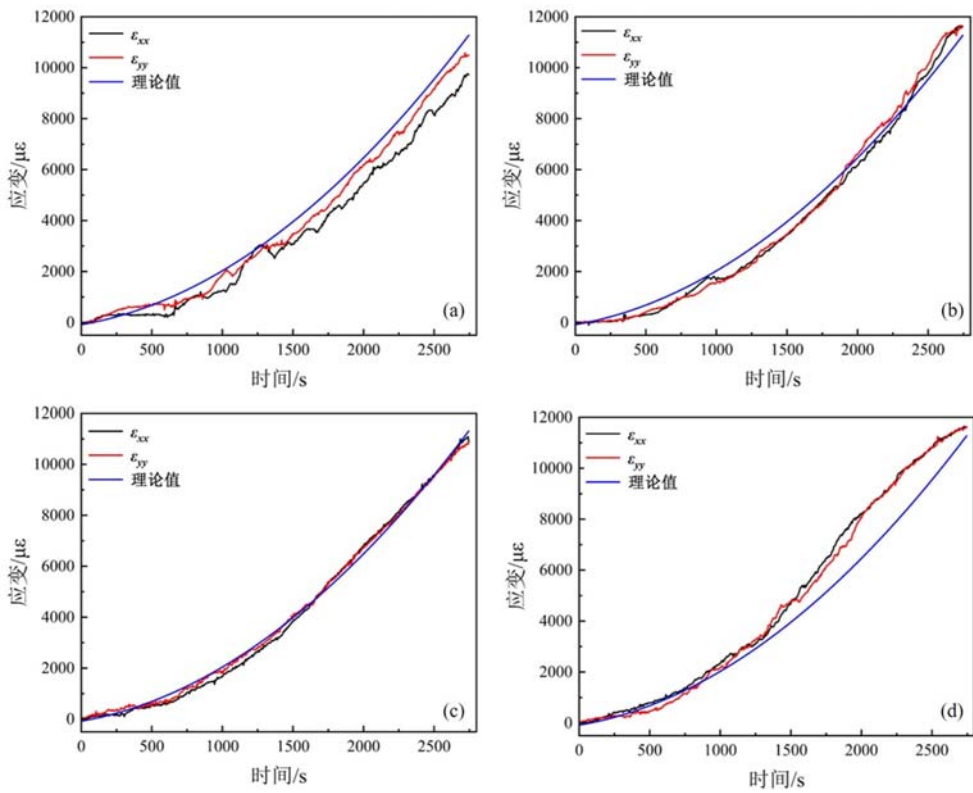


图 9 利用不同长度接圈测量的热应变:(a)4cm; (b)6cm; (c)8cm; (d)10cm

Fig. 9 Thermal strain measured by using different length of loops: (a)4cm; (b)6cm; (c)8cm; (d)10cm

式中: t_0 、 t 分别为试件的初温和末温,单位是 $^{\circ}\text{C}$; α_l 为材料线性热膨胀系数; L_0 和 L_t 分别为材料在 t_0 、 t 温度时的长度; ϵ 为温度 t 时发生热应变的理论值,单位为 $\mu\epsilon$ 。

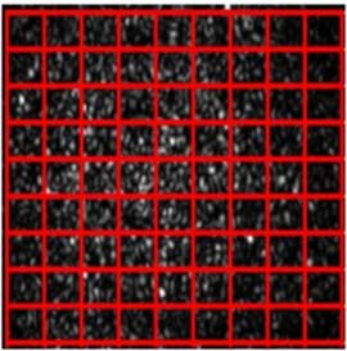


图 8 散斑图像子区的划分

Fig. 8 Devision of subregions in speckle images

图 9 的实验结果显示,虽然 4 种长度接圈的测量结果趋势大致相同,但只有 6cm 和 8cm 接圈的测量结果与理论曲线能较好吻合,4cm 和 10cm 接圈的测量结果与理论值偏差较大。这是因为当接圈较短时,散斑的成像放大倍率较小,在图像匹配计算时容易欠采样造成较大的测量误差,所以 4cm 接圈的测量曲线不但存在明显的波动,而且与理论值偏差较大。随着接圈长度的增加,测量曲线的波动越来越小,与理论值的偏差也越来越小,当接圈长度取 8cm 时,热应变的测量值与理论值偏差小于 5%,测量精确度最高。但并不是接圈长度越长越好,图 9(d)的实验结果显示,当接圈长度取 10cm 时,测量曲线与理论值的偏差再次增大,这是因为接圈过长将造成镜头内的光衰减增大,从而降低了散斑图像的亮度和散斑灰度梯度。当接圈变长,图像放大倍数变大时,环境造成图像抖动的影响也将放大,因此,在激光散斑成像系统中,需要根据生成的散斑特征选择合适的接圈。

3.3 非真空加热环境铝试件热应变的实验验证

在对扩束系统和成像系统分别进行优化和改进后,我们利用改进后的实验系统对非真空加热环境下的金属热应变进行了测量。铝试件被放置在加热平台上由室温加热至 360℃,采集升温过程的散斑图像,并代入 DIC 计算软件,分别获得铝试件横向热应变 ϵ_{xx} 和纵向热应变 ϵ_{yy} 随温度变化的测量曲线;加热过程中利用热电偶监测铝试件的温度,并将温度数据代入式(1)计算出试件的热应变理论曲线,测量曲线与理论曲线如图 10 所示。

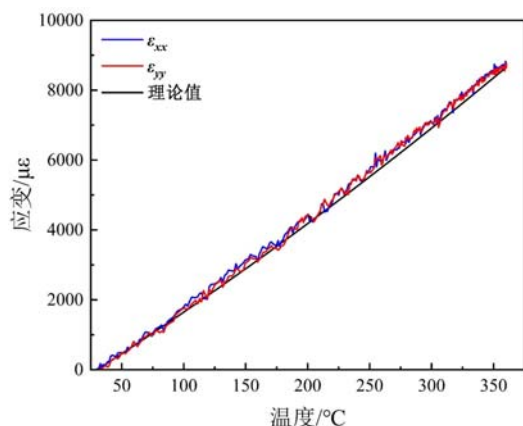


图 10 光路改进后的铝试件热应变

Fig. 10 Thermal strain of aluminum specimen after optical path improvement

图 10 中的 2 条曲线分别是铝试件横向热应变 ϵ_{xx} 和纵向热应变 ϵ_{yy} 的 DIC 测量结果,直线为应变理论值。由图 10 可以看出,在非真空的热台加热环境下,铝试件的二维 DIC 测量曲线 ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 能够很好地吻合,这恰好能说明铝试件在 X 和 Y 方向上产生的热应变是各向同性的。与真空管式加热炉的测量结果相比,虽然热台加热的测量曲线不如真空加热的平滑,但曲线的毛刺已经大大减小,标准偏差小于 5%,并且与理论值也能非常好地吻合。表 3 是试件在不同温度下横向热应变 ϵ_{xx} 和纵向热应变 ϵ_{yy} 测量值与理论值的绝对误差和相对误差。根据表中 2 种误差结果的对比可知,随着温度的升高,试件热应变测量值与理论值的绝对误差逐渐增大,但两者的相对误差却在不断降低。当温度达到 360℃时,相对误差百分比降低到 4% 以内,并且 2 条测量曲线与理论值之间的吻合度较好。上述分析表明,光路改进后的热应变测量结果验证了基于激光散斑的 DIC 技术也可以用于非真空加热金属试件的热应变测量。

表 3 热应变 ϵ_{xx} 和 ϵ_{yy} 的误差

Tab. 3 Error of thermal strain ϵ_{xx} and ϵ_{yy}

温度/℃	ϵ_{xx} 绝对误差/ $\mu\epsilon$	ϵ_{xx} 相对误差/%	ϵ_{yy} 绝对误差/ $\mu\epsilon$	ϵ_{yy} 相对误差/%
50	39.25	8.62	37.26	8.19
100	122.46	7.43	110.82	6.73
150	188.02	6.53	173.55	6.03
200	236.56	5.64	215.56	5.15
250	261.58	4.74	247.97	4.45
300	281.21	4.06	263.28	3.81
360	302.58	3.49	286.99	3.31

4 总结

本文建立了激光散斑光学成像系统,并利用成像系统结合 DIC 技术研究了激光散斑特征对金属材料全场热应变测量精度的影响;通过改进扩束系统获得了强度更加均匀的散斑图像,从而扩大了该技术的有效视场范围,并且在 DIC 处理中提高了金属热应变的测量精度。通过研究不同长度接圈生成激光散斑图像的特征参数变化,确定了接圈长度对激光散斑 DIC 技术测量精度的影响。由不同长度接圈获得的散斑分析结果表明,接圈长度较大时,散斑颗粒的像素数较大,适合 DIC 的匹配计算,当接圈长度为 8cm 时,热应变测量结果准确度最高。利用改进后的实验系统在非真空环境中测量了铝试件从室温升至 360℃ 过程的热应变,随着温度的升高,测量值与理论值的相对误差在不断降低;当温度达到 360℃ 时,相对误差百分比降低到 4% 以内,从而验证了激光散斑 DIC 技术测量金属热应变的可行性。

参考文献:

- [1] GUNN J P, CARPENTIER-CHOUCHANA S, ESCOURBIAC F, et al. Surface heat loads on the ITER divertor vertical targets[J]. Nuclear Fusion, 2017, 57(4):046025.
- [2] PINEAU A, ANTOLOVICH S D. High temperature fatigue of nickel-base superalloys—A review with special emphasis on deformation modes and oxidation [J]. Engineering Failure Analysis, 2009, 16(8):2668—2697.
- [3] ORTEU J-J. 3-D computer vision in experimental mechanics [J]. Optics and Lasers in Engineering, 2009, 47:282—291.
- [4] QIAN X Y, PENG X B, WANG L, et al. Evaluation of performance for the EAST upgraded divertor targets during type I ELMy H-mode[J]. Nuclear Fusion, 2016, 56(2):026010.
- [5] SUTTON M A, HILD F. Recent advances and perspectives in digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(1):1—8.
- [6] WU R, KONG C, LI K, et al. Real-time digital image correlation for dynamic strain measurement [J]. Experimental Mechanics, 2016, 56(5):833—843.
- [7] YU L, PAN B. Overview of high-temperature deformation measurement using digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2021, 61(7):1121—1142.
- [8] SONG J, YANG J, LIU F, et al. Ultra-high temperature mechanical property test of C/C composites by a digital image correlation method based on an active laser illumination and background radiation suppressing method with multi-step filtering [J]. Applied Optics, 2019, 58(24):6569—6580.
- [9] WU D, LIN L, REN H, et al. High-temperature deformation measurement of the heated front surface of hypersonic aircraft component at 1200℃ using digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2019, 122:184—194.
- [10] 田文煜, 杜伟, 左宏, 等. 基于数字图像相关的金属材料低温裂尖张开位移试验测量方法 [J]. 实验力学, 2020, 35(6):1014—1022 (TIAN Wenyu, DU Wei, ZUO Hong, et al. Experimental measurement method of low temperature crack tip opening displacement of metallic materials based on digital image correlation [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2020, 35(6):1014—1022 (in Chinese))
- [11] REEDLUNN B, DALY S, HECTOR L, et al. Tips and tricks for characterizing shape memory wire part 5: full-field strain measurement by digital image correlation[J]. Experimental Techniques, 2013, 37(3):62—78.
- [12] JIAN Z, DONG Z, ZHE Z. A non-contact varying temperature strain measuring system based on digital image correlation [J]. Experimental Techniques, 2016, 40(1):101—110.
- [13] MEYER P, WAAS A M. Measurement of in situ-full-field strain maps on ceramic matrix composites at elevated temperature using digital image correlation [J]. Experimental Mechanics, 2015, 55(5):795—802.
- [14] PAN Z, HUANG S, SU Y, et al. Strain field measurements over 3000℃ using 3D-Digital image correlation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2020, 127:105942.
- [15] QU Z, FANG X, HOU G, et al. Ceramic-based speckles and enhanced feature-detecting algorithm for deformation measurement at high temperature [J]. Experimental Mechanics, 2017, 57(3):377—386.
- [16] SOONS J, LAVA P, DEBRUYNE D, et al. Full-field optical deformation measurement in biomechanics: digital

- speckle pattern interferometry and 3D digital image correlation applied to bird beaks[J]. *Journal of the Mechanical Behavior of Biomedical Materials*, 2012, 14:186–191.
- [17] ZHENG Q, MASHIWA N, FURUSHIMA T. Evaluation of large plastic deformation for metals by a non-contacting technique using digital image correlation with laser speckles[J]. *Materials & Design*, 2020, 191: 108626.
- [18] BRIERS D, DUNCAN D D, HIRST E, et al. Laser speckle contrast imaging: theoretical and practical limitations [J]. *Journal of Biomedical Optics*, 2013, 18(6):066018.
- [19] 赵志刚, 高海燕. 激光散斑照相术的无损检测 [J]. 新乡师范高等专科学校学报, 2006(2):20–22 (ZHAO Zhigang, GAO Haiyan. Non-destructive testing of the laser speckle photography[J]. *Journal of Xinxiang Teachers College*, 2006(2):20–22 (in Chinese))
- [20] SU Y, ZHANG Q, GAO Z, et al. Fourier-based interpolation bias prediction in digital image correlation [J]. *Optics Express*, 2015, 23(15):19242–19260.
- [21] SU Y, ZHANG Q, XU X, et al. Quality assessment of speckle patterns for DIC by consideration of both systematic errors and random errors[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016, 86:132–142.
- [22] GAO Z, ZHANG Q, SU Y, et al. Accuracy evaluation of optical distortion calibration by digital image correlation [J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2017, 98:143–152.
- [23] 闻邦椿. 机械设计手册[M]. 5 版. 北京: 机械工业出版社, 2010:21 (WEN Bangchun. *Mechanical design manual* [M]. 5th edition. Beijing: China Machine Press, 2010:21 (in Chinese))

In-situ measurement of metal thermal strain based on laser speckle DIC technology

ZHANG Wuji¹, HUANG Gang¹, PAN Zhiwei², ZHANG Dale¹, WANG Junsong¹,
HUANG Shenghong², WANG Weihua¹, YANG Jinhong¹, HE Shengnan¹

(1. Institutes of Physical Science and Information Technology, Anhui University, Hefei 230601, Anhui, China;

2. Department of Modern Mechanics, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, Anhui, China)

Abstract: The digital image correlation method of laser speckle can be used to realize the non-contact and in-situ measurement of metal micro-strain, but the image quality of laser speckle, such as uniformity, gray gradient, stability and so on, has a great influence on the strain measurement accuracy. In order to improve the accuracy and precision of the DIC method of laser speckle for the measurement of metal strain, the laser selection, laser wavelength, beam expansion system and imaging system are designed, improved and tested in detail in this paper. Through the quantitative analysis of the image quality evaluation parameters such as speckle size and duty cycle before and after the improvement of the optical system, the factors affecting the strain measurement accuracy of laser speckle DIC method are determined. And by optimizing the parameters of the optical path such as laser power, exposure time, junction length, and image distance, the speckle images with more uniform distribution and better quality in full field were obtained, which improved the accuracy and precision of strain measurement by the laser speckle DIC method. Finally, the DIC method of laser speckle is used to measure the thermal strain of metal aluminum heated from room temperature to 360°C in non-vacuum environment. The measured results are in good agreement with the theoretical values, and the relative error decreases with the increase of temperature, which proves the feasibility of this method in metal thermal strain measurement.

Keywords: laser speckle; digital image correlation method; in-situ measurement; thermal strain measurement