

文章编号 1004-924X(2025)15-2468-10

基于三色三孔数字剪切散斑干涉的 高温三维变形测量

吴云飞¹, 吴思进^{1*}, 李 玄¹, 张 硕¹, 宋嘉正¹, 唐小军²,
辛 亮², 孙子杰², 牛海莎¹

(1. 北京信息科技大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 102206;

2. 中国空间技术研究院 北京卫星制造厂有限公司, 北京 100094)

摘要:三色数字剪切散斑干涉虽抗干扰并对刚体位移不敏感,但在高温下受自发辐射光干扰且只能测量位移梯度、无法直接得到三维变形信息。针对此问题,提出三色三孔数字剪切散斑干涉测量方法,用于实现高温环境下三维变形的测量。利用设计的三色三孔光阑结构,进行三通道独立的窄带滤波,抑制高温环境下物体的自发辐射光干扰。利用复合梯形积分方法重建位移场,得到被测物体的三维变形信息。结果表明,该方法的最小可检测位移为 30 nm,可以有效获取物体的高温三维变形信息,能够抑制被测物体的高温自发辐射光,实现三维变形的测量。

关键词:数字剪切散斑干涉;变形测量;热辐射干扰;复合梯形积分

中图分类号:TP394.1;O436.1 文献标识码:A

doi:10.37188/OPE.20253315.2468

CSTR:32169.14.OPE.20253315.2468

Tri-color tri-aperture digital shearography for high-temperature three-dimensional deformations measurement

WU Yunfei¹, WU Sijin^{1*}, LI Xuan¹, ZHANG Shuo¹, SONG Jiazheng¹, TANG Xiaojun², XIN Liang²,
SUN Zijie², NIU Haisha¹

(1. College of Instrumentation Science and Opto-electronic Engineering, Beijing Information Science and
Technology University, Beijing 102206, China;

2. Beijing Spacecrafts, China Academy of Space Technology, Beijing 100094, China)

* Corresponding author, E-mail: swu@bistu.edu.cn

Abstract: Although trichromatic digital shearography is resistant to disturbances and insensitive to rigid-body motion, its application in high-temperature environments is hindered by interference from self-emitted thermal radiation and by its inherent limitation to measuring displacement gradients rather than direct 3D deformation. To overcome these constraints, a tri-color, tri-aperture digital shearography method is proposed for 3D deformation measurement at elevated temperatures. A tri-color tri-aperture diaphragm enables independent narrow-band filtering of each optical channel, effectively suppressing interference from the object's spontaneous thermal emission. The displacement field is reconstructed using a composite trap-

收稿日期:2025-06-30;修订日期:2025-07-11.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 52075045)

ezoidal integration scheme, allowing direct recovery of the 3D deformation. Experimental results indicate a minimum measurable displacement of 30 nm, demonstrating effective acquisition of 3D deformations at high temperatures, successful suppression of thermal-radiation interference, and high-precision 3D measurement capability.

Key words: digital shearography; deformation measurement; thermal radiation interference; composite trapezoidal integration

1 引 言

航空航天领域对更高速度、更稳定飞行器的持续追求,导致服役环境日益严苛,不仅提高了飞行器材料需承受的温度,也使得热致变形问题更加显著,给材料的设计与制造提出了更大的挑战^[1-3]。高温三维变形是材料的重要指标,其精确测量是提升材料性能、延长使用寿命、保障结构安全不可或缺的关键环节。分析材料的高温全场三维变形,对材料设计、制造及可靠性验证具有重要的意义。

目前,高温全场变形测量方法主要采用光学方法,可以分为非干涉光学方法和光学干涉方法两类。非干涉方法主要包括视频引伸计^[4]、数字图像相关技术^[5]和激光散斑法^[6]。其中,视频引伸计在试样上做标记,用图像配准算法计算测量方向的平均应变,不能获得全局变形细节。数字图像相关技术能够实现三维动态变形测量,但它存在高温下散斑氧化脱落问题,导致测量精度明显下降^[7]。激光散斑法将激光散斑和数字图像相关技术结合,但仅能测量面内变形。干涉方法主要包括数字散斑干涉技术^[8]和莫尔干涉技术^[9]。莫尔干涉方法难以捕捉瞬态变形,而且测量灵敏度较低,有很大的局限性。常温环境下,数字散斑干涉技术能够实现三维变形的动态测量,同时具有高灵敏度、高精度的优势,但对环境扰动比较敏感。数字剪切散斑干涉技术在测量方法上与数字散斑干涉技术类似,同样具有高灵敏度和高精度的优势,而且由于共光路布局以及对刚体位移不敏感等特性,该技术具有较强的抗干扰能力^[10],但在高温三维全场变形动态测量中仍存在问题。

数字剪切散斑干涉技术根据相位提取方法的不同,可分为时间相移法和空间载波法^[11]。时间相移技术通过执行多步相移提取相位信息,适

用于静态和准静态测量。相比之下,空间载波法仅采集变形前后各一幅剪切散斑干涉图即可完成相位的求解,适用于动态测量。2013年,Xie等^[12]提出了基于空间载波技术的迈克尔逊型剪切散斑干涉测量系统,该系统可同时测得两个方向的应变,并使用4f系统扩大了测量范围。2018年,Barrera等^[13]提出了基于楔形棱镜的剪切装置,该装置通过三个楔形棱镜产生三幅不同方向的剪切散斑干涉图,实现了变形的多方向剪切测量。然而,楔形棱镜的倾角固定,因此测量系统的剪切量难以调整,只能使用唯一的灵敏度进行测量。2019年,Yan等^[14]提出一种基于可调孔径光阑的空间相移剪切干涉系统,使用三个透镜对物体多成像,并在各透镜前放置光阑,以独立调制剪切量和载波频率;但孔径光阑限制了进入相机的光强,导致相位图质量较差。2021年,本课题组^[15]提出了三色数字剪切三维位移梯度同时测量方法。该方法使用三种不同颜色的激光光源,通过迈克尔逊型剪切装置引入剪切,用彩色相机记录剪切散斑干涉图;对剪切干涉图进行三通道分离后,使用空间载波法分别进行相位提取,能实现全场三维位移梯度的动态测量,所得到的相位图质量高,具有优良的抗扰动能力。但该方法在进行高温三维变形测量时仍面临两个问题:一是无法克服高温环境下被测物体自发辐射光的干扰;二是该方法目前只可进行位移梯度的测量,并不能直接获得变形信息。

目前,针对高温热辐射光干扰,光学测量方法大多采用单色光照明和带通滤波结合的方法^[16]。BERKE等^[17]采用短波长带通光学滤光片有效抑制材料自身的高温辐射光谱,使相机传感器专注于捕捉短波光谱信号。在此条件下,配合短波照明光源,成像的辐射强度主要取决于光源照射,而非目标物的热辐射。然而,三色数字剪切散斑干涉技术不是单色光照明,其光路中,三

种不同颜色的激光混合在同一个通道里,因此,无法利用带通滤波片滤除高温辐射光,从而不能实现高温物体的测量。本文在研究光阑偏心对三色数字剪切散斑干涉测量影响的基础上,提出了一种三色三孔数字剪切散斑干涉测量方法,在保留三色数字剪切散斑干涉强抗干扰能力的同时,通过设计三色三孔光阑进行分通道窄带滤波,抑制热辐射光的干扰,实现高温环境下的测量。同时,利用复合梯形积分方法重建三维变形场,得到高温三维全场变形。该方法可以有效获取三维变形信息,并且具有良好的稳定性和抗干扰能力。

2 基本原理

2.1 三色三孔数字剪切散斑干涉测量系统及模型

任何温度高于绝对零度的物体均会自发地发射电磁辐射,此现象称为热辐射或黑体辐射。其辐射能谱的波长分布及峰值波长位置主要取决于物体的温度,并遵循维恩位移定律,即温度升高时,辐射能谱整体向短波长方向偏移,峰值波长亦规律性地向短波移动。在三色数字剪切散斑干涉测量中,激光经被测物漫反射后进入相机感光元件,形成记录光强信号,后续处理基于该信号求解干涉相位。然而,在高温环境下,物体自身的热辐射光会作为显著的背景噪声叠加到探测信号中。当热辐射强度足够大时,信号甚至会被完全淹没于噪声背景之下,导致该方法在高温条件下的应用失效。在使用光学方法进行高温测量时,单色光照明和带通滤波结合是解决热辐射光干扰的一种主要手段。同时,还可以提高激光光源照明光强来提高信噪比,更好地抑制高温辐射光的影响。

图1为三色三孔迈克尔逊型空间载波数字剪切散斑干涉系统。该系统采用三个不同波长的激光器作为光源,三个激光器的中心波长分别为457 nm(蓝光)、532 nm(绿光)、671 nm(红光)。三束激光扩束后以一定角度同时照射在被测物表面,其漫反射光依次经过设计的三色三孔光阑和成像透镜,进入到迈克尔逊剪切装置中。剪切装置由一块分光棱镜和两片平面反射镜组成,进入剪切装置的物光被分光棱镜分为两束,分别照

射在两片平面反射镜上,其中一片反射镜与分光棱镜平行;另一片反射镜则与分光棱镜存在一定的小角度,借此来引入空间载波和产生剪切量。最后,两束物光在相机的感光区域形成干涉图像并被记录。

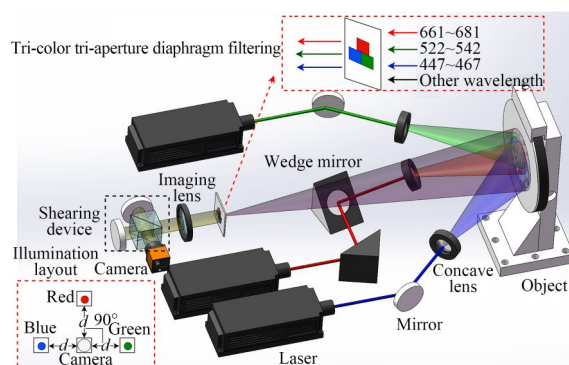


图1 三色三孔数字剪切散斑干涉系统

Fig.1 Optical setup of tri-color tri-aperture digital shearography

三色三孔光阑是测量系统中的关键元件,其主体是一个金属薄板,中心有品字形分布的三个矩形孔,每个矩形孔上覆盖有窄带滤波片(对应光源波长)。三色三孔光阑使三种不同颜色的激光分通道进行了滤波,从而能够滤除热辐射光,消除其对测量的影响。理论计算和实验结果都证明,当三色三孔的孔径和位置等物理参数在合适的范围内,数字剪切散斑干涉的相位图质量能够得到保障,测量精度也能够满足要求。图1中,上方虚框内是三色三孔光阑滤波的示意图,光阑上有三个通孔,分别覆盖三种不同的窄带滤光片,其透射光谱的中心波长分别与激光光源的三个中心波长一致,因此能够抑制其他光谱成分,使透射光仅携带被测物表面的变形信息进入相机。物体的热辐射光被滤除,因此,相机接收的信号具有足够高的信噪比,从而保证后续信号处理的质量。

照明布局直接影响测量系统的数学模型。为减少计算量和降低模型复杂度,选择直角对称式照明布局,控制三束激光的照明角度相同。如图1左下虚框所示(光轴方向为 z 方向,水平方向为 x 方向,竖直方向为 y 方向),两台激光器位于 xoz 平面,相机位于两激光器连线的中心,最后一台激光器位于相机正上方,三台激光器与相机的

距离相同,三束激光经过扩束照射在被测物体表面。当以该布局进行照明,迈克尔逊剪切装置以 r 方向为剪切方向时,三色三孔数字剪切散斑干涉系统的相位差可表示为:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = \frac{2\pi\delta r}{\lambda_1} \left[\frac{\partial w}{\partial r} (1 + \cos \alpha) + \frac{\partial u}{\partial r} \sin \alpha \right] \\ \Delta\varphi_2 = \frac{2\pi\delta r}{\lambda_2} \left[\frac{\partial w}{\partial r} (1 + \cos \alpha) + \frac{\partial v}{\partial r} \sin \alpha \right] \\ \Delta\varphi_3 = \frac{2\pi\delta r}{\lambda_3} \left[\frac{\partial w}{\partial r} (1 + \cos \alpha) - \frac{\partial u}{\partial r} \sin \alpha \right] \end{cases}, \quad (1)$$

式中: $\Delta\varphi_1, \Delta\varphi_2, \Delta\varphi_3$ 分别代表红、绿、蓝激光器各自波长对应的干涉相位差, δr 表示剪切量, $\lambda_1, \lambda_2, \lambda_3$ 分别表示红、绿、蓝激光器的波长, $\partial u/\partial r, \partial v/\partial r, \partial w/\partial r$ 表示 r 方向上的位移空间梯度, α 代表三束激光的照明角度。

求解式(1),得到位移空间梯度表达式:

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial r} = \frac{\lambda_1 \Delta\varphi_1 - \lambda_3 \Delta\varphi_3}{4\pi\delta r \sin \alpha} \\ \frac{\partial v}{\partial r} = \frac{-\lambda_1 \Delta\varphi_1 + 2\lambda_2 \Delta\varphi_2 - \lambda_3 \Delta\varphi_3}{4\pi\delta r \sin \alpha} \\ \frac{\partial w}{\partial r} = \frac{\lambda_1 \Delta\varphi_1 + \lambda_3 \Delta\varphi_3}{4\pi\delta r (1 + \cos \alpha)} \end{cases}. \quad (2)$$

由式(2)可知,通过求解相位差可以得到位移空间梯度。为了进一步得到三维变形,还须对位移空间梯度进行积分,才可得到被测物的三维全场变形信息。

2.2 三色三孔光阑设计

三色数字剪切散斑干涉光路中单孔光阑的作用在于限制物光的空间频率,但由于三路干涉光路在观察方向的光路是重叠的,无法在单一通道的光路中采用窄带滤光片,即无法在对热辐射光进行滤除的同时还保证三种不同波长的激光能进入成像系统。因此,三色数字剪切散斑干涉技术从根本上无法抑制物体热辐射光的干扰,不能实现高温环境下的测量。本文在研究光阑中心位置的影响^[18]的基础上,提出了三色三孔数字剪切散斑干涉技术,采用三色三孔光阑替代单孔光阑,从而在观察方向上将三路干涉光分开,在每个通道上使用各自独立的窄带滤光片,滤除热辐射光,同时不限制照明激光进入干涉系统,用于照明的激光光源中心波长分别为 457, 532, 671 nm,窄带滤光片的半带宽为 10 nm,采用各自对应的窄带滤光片,即可实现热辐射光的滤除。

三色三孔光阑的设计需满足一定的要求。设 f_0 为由剪切角引入的空间载波频率, $f_{\max}$ 为相机的最大空间采样频率, $4f_s$ 为频谱带宽,则有:

$$\begin{cases} f_s = \frac{D}{2.44\lambda f} \\ f_0 = \frac{\sin \beta}{\lambda} \\ f_{\max} = \frac{1}{2p} \end{cases}, \quad (3)$$

其中: D 为光阑尺寸, λ 为激光波长, f 为成像透镜的焦距, β 为剪切角, p 为相机的像素尺寸。为获得理想的空间频谱分布,使频谱既不发生混叠也不超出频谱的边界范围,需满足关系:

$$4f_s \leq f_0 \leq \frac{2f_{\max}}{3}. \quad (4)$$

由式(3)和式(4)联立可知,光阑中每个小孔的尺寸需满足:

$$D \leq \frac{1.22\lambda f}{6p}. \quad (5)$$

剪切角需满足:

$$\beta \leq \arcsin\left(\frac{\lambda}{3p}\right). \quad (6)$$

光阑尺寸和剪切角的关系如下:

$$D \leq 0.61f \sin \beta. \quad (7)$$

三色三孔光阑的小孔呈“品”字形分布。测量光路中使用三色三孔光阑后,每个小孔中心相对于光轴会有一定距离的偏移,这会影响干涉频谱。本实验室已研究了光阑中心偏离光轴的距离对数字散斑干涉空间频谱的影响^[18],光阑中心偏离光轴不会引起空间频谱搬移量的改变,也不改变剪切角度,但会导致干涉频谱的缺失。光阑中心偏离光轴的距离在 3 mm 内时,既可以保证频谱不会过分缺失,也可以保证较好的相位图质量。后续实验使用的相机的像素尺寸为 3.45 μm ,成像透镜焦距为 100 mm,根据式(5)计算得到光阑小孔的尺寸应不大于 2.69 mm。

综合考虑光阑孔径尺寸、光阑中心位置偏移距离、相位图质量等因素,最终实验系统使用的三色三孔光阑如图 2 所示。整个金属板的尺寸为 100 mm $\times$ 100 mm $\times$ 1 mm,每个小孔为边长 1.6 mm 的正方形,三个光阑相邻边缘之间的距离为 1 mm,三个小孔上覆盖的正方形窄带滤光片边长均为 4 mm。

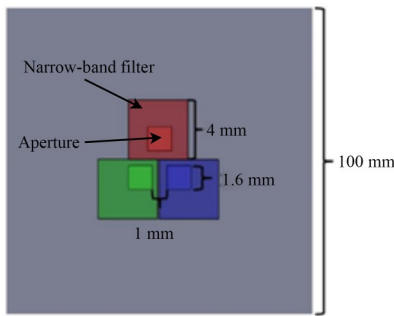


图2 三色三孔光阑设计

Fig. 2 Design of tri-color tri-aperture diaphragm

2.3 位移场重建

在已知全场位移梯度后,可以使用复合梯形积分方法求解位移场。复合梯形积分是一种近似计算定积分的数值积分方法,其基本思路是将积分区间均匀分割为若干个子区间,在每个子区间应用梯形法则,再将结果累加。具体地,假设 $f(x)$ 表示位移梯度函数,闭区间 $[a, b]$ 是要计算的变形区域,将该区间分为 n 个区间长度为 dx 的小区间,第 i 个小区间可表示为 $[x_i, x_{i+1}]$ 。根据定积分的性质,原定积分可以看作每个子区间的定积分之和,即:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=1}^n \int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx. \quad (8)$$

若 n 足够大,对任意的子区间,求解其定积分可近似为求解梯形面积。进而,原积分的求解可转化为计算若干个子区间的梯形面积和:

$$\int_a^b f(x) dx = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{h}{2} [f(x_i) + f(x_{i+1})] = \frac{h}{2} \left[f(a) + 2 \sum_{i=1}^{n-1} f(x_i) + f(b) \right], \quad (9)$$

其中 $h=(b-a)/n$,表示步长。在积分前,还需要已知积分起点及对应的位移值,以四周被固定的矩形被测试件为例(如图3所示),水平或垂直

边界均可作为积分起点,起点处的位移值为0,积分路径沿着剪切方向。

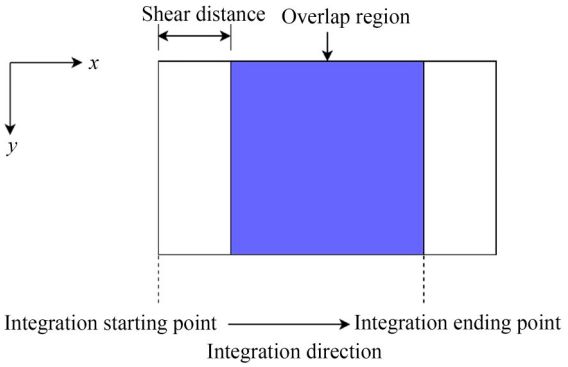


图3 积分

Fig. 3 Integration

以 x 方向为剪切方向,位移梯度场为 $\partial u/\partial x$, x 方向的位移求解公式如下:

$$u(i, j) = u(i, 0) + \frac{\Delta x}{2} \left[2 \sum_{k=1}^{j-1} \frac{\partial u}{\partial x}(i, k) + \frac{\partial u}{\partial x}(i, j) \right], \quad (10)$$

其中: Δx 取像素的物理尺寸, $(i, 0)$ 为积分边界点,因此 $u(i, 0)=0$ 。对每一行进行复合梯形积分,即可得到全场变形信息。

3 实验

3.1 实验系统设计

根据图1所示光路搭建三色三孔数字剪切散斑干涉系统,测量系统的主要器件见表1。照明布局采用直角对称布局,被测物垂直放置于光路光轴上,测量工作距离约为700 mm。调节迈克尔逊剪切装置在 x 方向产生14 mm的剪切量,物光依次通过三色三孔光阑、成像透镜和剪切装置,最终由相机采集。为验证三色三孔数字剪切

表1 三色三孔数字剪切散斑干涉测量系统的主要器件

Tab. 1 Key components of tri-color tri-aperture digital shearographic measurement system

器 件	厂 家	型 号	关键参数
蓝光激光器	长春新产业	MLL-FN-457-300mW	波长:457 nm
绿光激光器	长春新产业	MLL-U-532-400mW	波长:532 nm
红光激光器	长春新产业	MSL-F-671-1W	波长:671 nm
彩色相机	北京凯视佳	MU3S500C	像素尺寸:3.45 μm
成像透镜	Thorlabs	LA1050-A	焦距:100 mm

散斑干涉方法可以获取全场三维变形,分别开展常温变形测量实验和高温变形测量实验。

常温变形测量实验采用中心加载方式。加载装置的核心由一个金属圆盘和一个精密千分尺测微头构成。待测的金属圆片表面涂覆白色哑光涂料以增强照明激光的漫反射,通过沿圆周均布的 8 个 M5 螺钉刚性固定于圆盘的前端面。千分尺测微头通过螺纹刚性连接在圆盘后端面的中心位置。通过精确旋转千分尺测微头的微分筒,可驱动测微螺杆对圆盘中心施加垂直于圆片平面的集中载荷。为有效约束加载装置在测量过程中的刚体位移,整个加载装置的基座通过 6 个 M6 螺钉固定在光学平台上。

在高温变形测量实验中,采用高温炉对一块尺寸为 $100\text{ mm} \times 100\text{ mm}$ 的矩形碳/碳复合材料板进行加热。高温炉以硅钼棒为加热元件,最高工作温度可达 $1\ 600\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。由于高温炉内为有氧环境,温度过高会导致试样表面发生氧化烧蚀,引起剧烈的非微小变形。为避免烧蚀并确保试样仅发生微小变形,实验中将最高加热温度设定为 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。实验过程包括从 $60\text{ }^{\circ}\text{C}$ 升温至 $1\ 000\text{ }^{\circ}\text{C}$,随后降温至 $130\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。变形图像的采集频率为 1 Hz 。

受限于高温炉视窗布局,如图 4 所示,三色三孔数字剪切散斑干涉测量系统的光路无法完整部署以实现三维变形测量。因此,实验中仅测量了试样在离面方向的变形。试样平行于左侧视窗放置,激光束经扩束后从底部视窗入射,照射

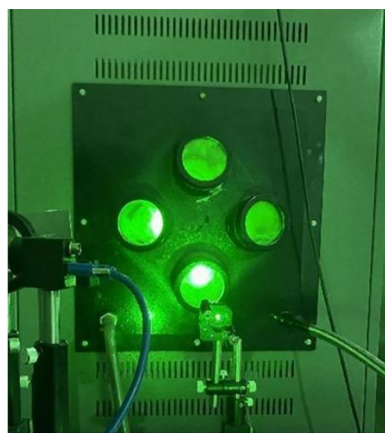


图 4 高温炉视窗布局

Fig. 4 Layout of viewing ports in high-temperature furnaces

在试样表面发生漫反射,反射光经迈克尔逊型剪切装置后由相机接收。本文提出的测量方法在成功获取高温一维变形的基础上,只需改变视窗的位置,消除对入射光路的物理限制,即可实现高温三维变形的同步测量。

3.2 常温变形测量实验结果

常温变形测量实验中,使用彩色相机在加载前后各采集一幅剪切散斑干涉图,如图 5 所示。

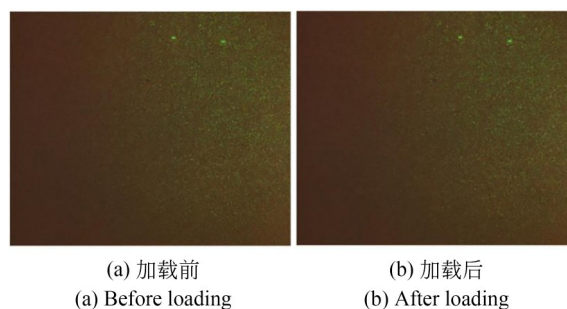


图 5 剪切散斑干涉图

Fig. 5 Interferograms of digital shearography

将加载前与加载后的剪切散斑干涉图相减,分离图像的 R,G,B 三通道数据后分别进行傅里叶变换,得到三幅频谱图,如图 6 所示。

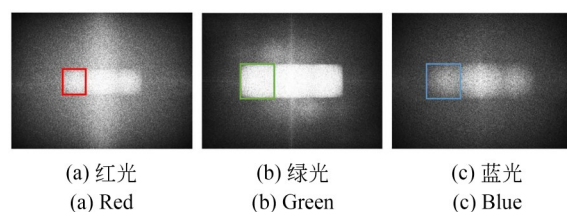


图 6 三通道分离后的频谱图

Fig. 6 Spectra after three channel separation

选取三幅频谱图的高频区域,分别对其进行傅里叶逆变换,得到红、绿、蓝光对应的相位差图,如图 7 所示。

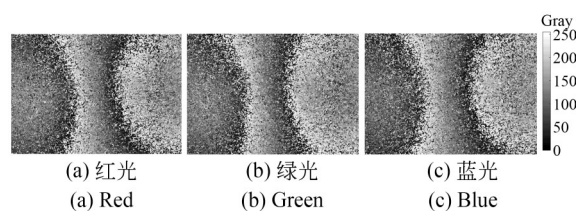


图 7 相位差图

Fig. 7 Phase maps

再分别对三幅相位差图进行滤波处理,结果如图 8 所示。

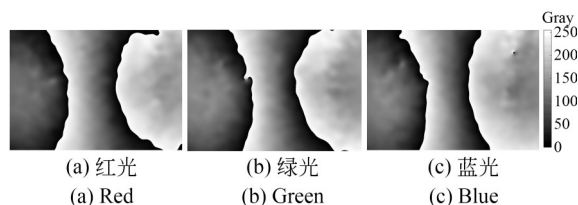


图 8 滤波后的包裹相位差图

Fig. 8 Wrapped phase maps after filtering

对滤波后的包裹相位差图进行解包裹,结果如图 9 所示。图 10(a)和 10(b)分别表示平面内 x, y 方向的位移梯度,图 10(c)表示平面外 z 方向

的位移梯度。对被测物进行中心加载,被测物体在平面外的位移梯度会沿剪切方向呈反 S 形分布,实验结果与理论值一致。对图 10 中的离面位移空间梯度进行基于复合梯形积分的位移场重建,可得其离面变形图如图 11 所示。由于实验过程中加载位置在被测物体的中心,所以会产生中心凸起的离面变形。

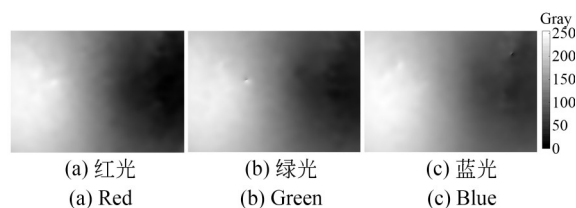


图 9 解包裹后的相位差图

Fig. 9 Unwrapped phase maps

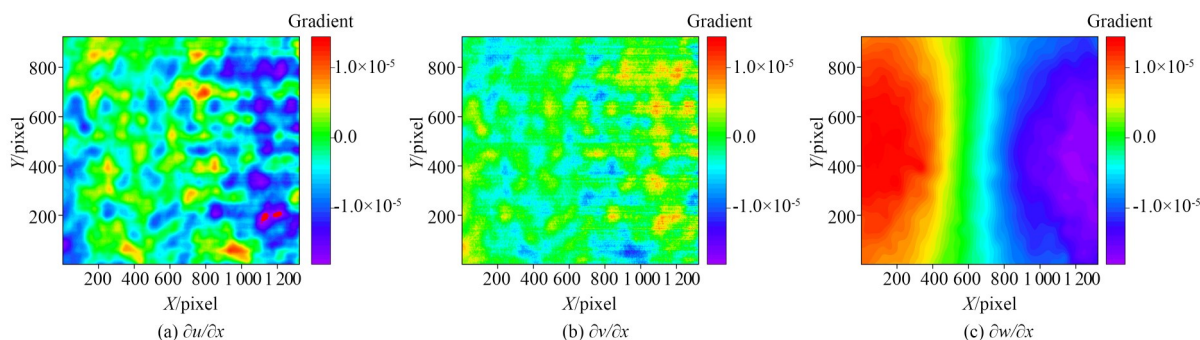


图 10 三维位移梯度

Fig. 10 Displacement gradients in three dimensions

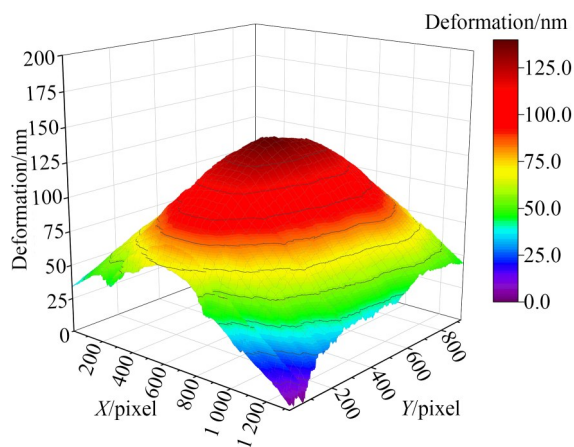


图 11 离面变形三维图

Fig. 11 Three-dimensional image of out-of-plane deformation

分别使用三色数字剪切散斑干涉装置和三色三孔数字剪切散斑干涉装置测量被测物,比较测量结果,其中两台实验装置的光路和器件都一致,仅仅是将单孔光阑更换成三孔光阑。通过精密控制加载量,使被测物中心重复产生 $10\text{ }\mu\text{m}$ 左右的变形量,分别用上述两种装置各测量 10 次,其中心点最大值的测量结果如表 2 所示。

由常温实验的结果可知,本文方法与三色数字剪切散斑干涉方法都能精确测量物体的变形。根据数学模型可知,变形的分辨力主要受相位分辨力和剪切量的影响,相位分辨力一般为 $\pi/10$,当剪切量为 14 mm 时,理论变形分辨力为 16.8 nm 。但由于噪声等原因,实际测量分辨力要弱于理论测量分辨力,一般为 30 nm ,即本方法的最小可检测位移为 30 nm 。

表 2 两种测量方法的对比结果		
Tab. 2 Comparative performance of two methods(μm)		
测量次数	三色方法	三色三孔方法
1	10.22	10.38
2	10.10	9.96
3	10.34	10.24
4	9.87	9.62
5	10.30	9.83
6	10.41	9.37
7	9.91	10.10
8	9.66	10.14
9	10.03	9.48
10	10.11	10.39

3.3 高温变形测量实验结果

分别使用三色数字剪切散斑干涉方法和三色三孔数字散斑干涉方法在高温环境下测量变形,图 12 是二者剪切散斑干涉图相减、傅里叶变换后得到的频谱图。前者由于热辐射光的干扰,无法得到频谱信息;而本文方法可以有效抑制热辐射光,得到清晰的频谱信息,说明本文方法可以在高温下实现测量。

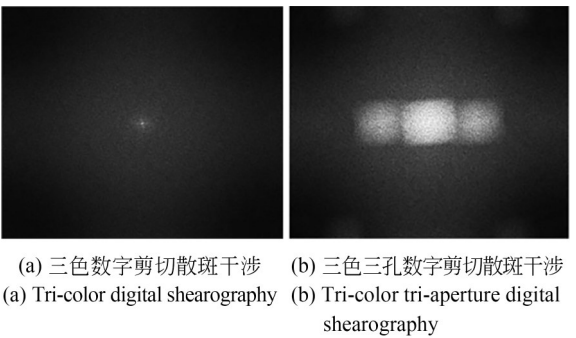


图 12 高温下干涉频谱对比
Fig. 12 Comparison of interference spectrums under high temperature

高温实验共采集剪切散斑干涉图 12 309 幅。升温过程的频谱图与相位图分别如图 13 与图 14 所示。图中展示了六个不同时刻的处理结果。具体地,图 13 与图 14 分别由以下连续图像对相减获得:(a)第 449 与 450 幅,(b)第 483 与 484 幅,(c)第 1016 与 1017 幅,(d)第 1503 与 1504 幅,(e)第 2605 与 2606 幅,(f)第 2797 与 2798 幅。

以升温过程中的第 8082 和 8083 张干涉图像

为例,两张剪切散斑图相减后,经过傅里叶变换得到频谱图,如图 15(a)所示。提取频谱图的高频部分进行傅里叶逆变换,得到含有变形信息的相位差图,如图 15(b)所示。滤波后得到图 15(c),截取感兴趣的区域并进行解包裹,得到解包裹后的相位差图如图 15(d)所示。将解包裹后的相位差代入数学模型并积分得到位移场,如图 15(e)所示,其三维云图如图 15(f)所示。

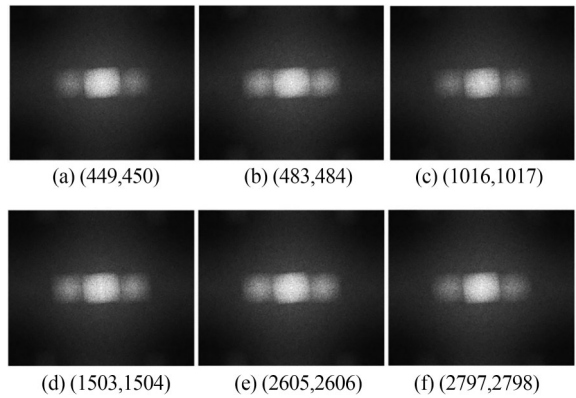


图 13 升温过程频谱图
Fig. 13 Spectra during temperature rising

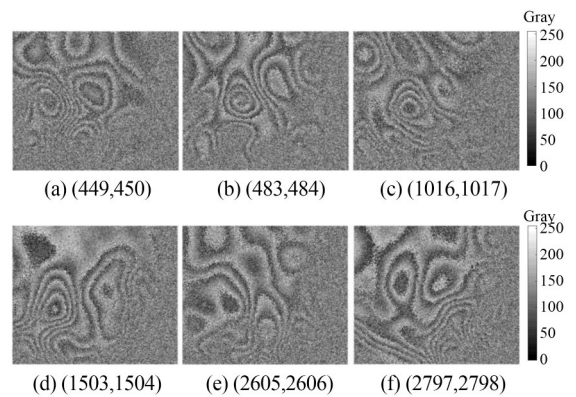


图 14 升温过程相位差图
Fig. 14 Phase maps during temperature rising

从实验结果看,三色三孔数字剪切散斑干涉方法在常温环境和高温环境下都可得到质量较好的频谱图和相位图,验证了三色三孔数字剪切散斑干涉系统可以有效地抑制热辐射光干扰,并能从位移梯度场重建位移场。实验过程中可以稳定产生良好的干涉条纹,并进行有效解算。实验结果证明,三色三孔数字剪切散斑干涉方法可以有效获取材料的高温三维变形。

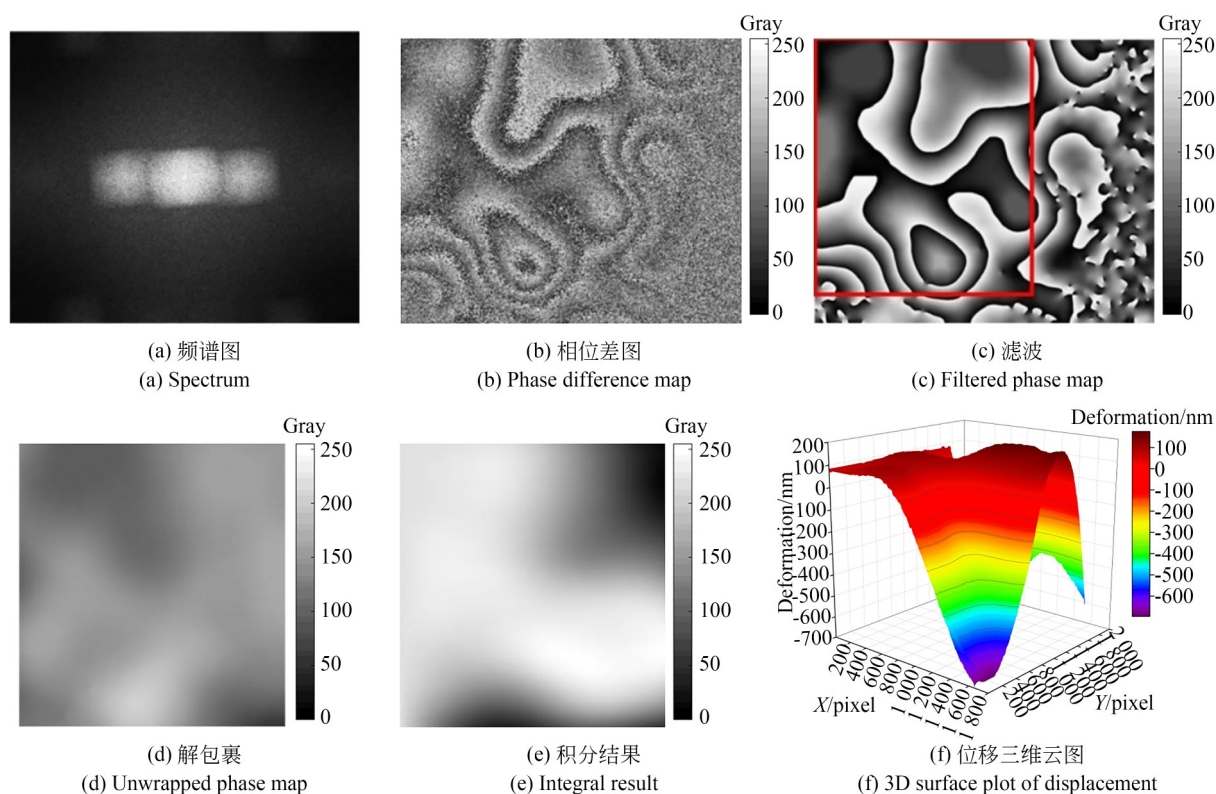


图 15 高温下剪切散斑干涉图处理过程

Fig. 15 Process for digital shearography measurement under high temperature

4 结 论

本文针对三色数字剪切散斑干涉方法在高温环境下因热辐射光干扰而无法获取三维变形的问题,提出三色三孔数字剪切散斑干涉方法,利用三色三孔光阑对观察方向的干涉光路进行分离,从而可以采用窄带滤光片来抑制热辐射光的干扰。同时,利用积分重建三维变形场,得到高温三维全场变形。分别开展了常温与高温变形测量实验,常温实验使用中心加载装置进行加载,变形结果与理论一致;高温实验验证了该方法能够有效抑制高温热辐射光,得到的频谱图和相位图质量较好,能够有效解算,最小可检测位

移为 30 nm。总的来说,三色三孔数字剪切散斑干涉方法是一种可以用于高温三维变形测量的有效方法。

作者贡献声明:

吴云飞:论文构思和初稿撰写,数据整理和分析;

吴思进:方法提出,实验指导,稿件修改;

李玄:测量实验设计及数据整理与分析;

张硕、宋嘉正:实验数据采集;

唐小军、辛亮、孙子杰:技术讨论,高温实验设计、执行与指导;

牛海莎:实验系统设计,技术与实验指导。

参考文献:

- [1] LI S P, ZUO G Q, ZHANG C L, *et al.* Recent progress in thermal structures: materials, structures, and analyses [J]. *Composite Structures*, 2025, 359: 119037.
- [2] ZAABA N F, ISMAIL H, SAEED A M. A re-

view: metal filled thermoset composites [J]. *Polymer-Plastics Technology and Materials*, 2022, 61 (1): 13-26.

- [3] HAMZAT A K, MURAD M S, ADEDIRAN I A, *et al.* Fiber-reinforced composites for aerospace, energy, and marine applications: an insight into failure mechanisms under chemical, thermal, oxida-

- tive, and mechanical load conditions[J]. *Advanced Composites and Hybrid Materials*, 2025, 8 (1): 152.
- [4] VÖLKL R, FISCHER B. Mechanical testing of ultra-high temperature alloys[J]. *Experimental Mechanics*, 2004, 44(2): 121-127.
- [5] YU L, PAN B. Overview of high-temperature deformation measurement using digital image correlation[J]. *Experimental Mechanics*, 2021, 61(7): 1121-1142.
- [6] ANWANDER M, ZAGAR B G, WEISS B, *et al.* Noncontacting strain measurements at high temperatures by the digital laser speckle technique[J]. *Experimental Mechanics*, 2000, 40(1): 98-105.
- [7] GRANT B, STONE H J, WITHERS P J, *et al.* High-temperature strain field measurement using digital image correlation[J]. *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*, 2010, 44: 263-271.
- [8] 王永红, 包凤卿, 张肖, 等. 数字散斑干涉三维变形测量技术研究进展[J]. *应用光学*, 2020, 41(4): 681.
- WANG Y H, BAO F Q, ZHANG X, *et al.* Three-dimensional deformation measurement based on digital speckle pattern interferometry[J]. *Journal of Applied Optics*, 2020, 41(4): 681. (in Chinese)
- [9] POST D, WOOD J D. Determination of thermal strains by moiré interferometry[J]. *Experimental Mechanics*, 1989, 29(3): 318-322.
- [10] ZHAO Q H, DAN X Z, SUN F Y, *et al.* Digital shearography for NDT: phase measurement technique and recent developments[J]. *Applied Sciences*, 2018, 8(12): 2662.
- [11] 王永红, 吕有斌, 高新亚, 等. 剪切散斑干涉技术及应用研究进展[J]. *中国光学*, 2017, 10(3): 300.
- WANG Y H, LYU Y B, GAO X Y, *et al.* Research progress in shearography and its applications[J]. *Chinese Optics*, 2017, 10(3): 300. (in Chinese)
- [12] XIE X, YANG L X, XU N, *et al.* Michelson interferometer based spatial phase shift shearography[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(17): 4063-4071.
- [13] BARRERA E S, FANTIN A V, WILLEMANN D P, *et al.* Multiple-aperture one-shot shearography for simultaneous measurements in three shearing directions[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2018, 111: 86-92.
- [14] YAN P Z, SUN F Y, DAN X Z, *et al.* Spatial phase-shift digital shearography for simultaneous measurements in three shearing directions based on adjustable aperture multiplexing[J]. *Optical Engineering*, 2019, 58(5): 1.
- [15] WANG H Y, LIU C Y, WU S J, *et al.* Simultaneous measurement of three-dimensional displacement gradients using tri-color digital shearography[J]. *Instruments and Experimental Techniques*, 2021, 64(1): 165-171.
- [16] HU Y, BAO S Y, DAN X Z, *et al.* Improvement of high-temperature deformation measurement accuracy based on image restoration method[J]. *Measurement Science and Technology*, 2018, 29(9): 094003.
- [17] BERKE R B, LAMBROS J. Ultraviolet digital image correlation (UV-DIC) for high temperature applications[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2014, 85(4): 045121.
- [18] 李玄, 牛海莎, 吴思进, 等. 光阑偏心对数字散斑干涉空间频谱的影响研究[J]. *激光与红外*, 2023, 53(12): 1903-1907.
- LI X, NIU H S, WU S J, *et al.* Influence of aperture eccentricity on spatial spectrum of digital speckle pattern interferometry[J]. *Laser & Infrared*, 2023, 53(12): 1903-1907. (in Chinese)

作者简介:



吴云飞(1998—),男,内蒙古赤峰人,硕士研究生,主要从事数字散斑干涉测量方面的研究。E-mail: 2023020216@bistu.edu.cn

通讯作者:



吴思进(1979—),男,浙江乐清人,博士,教授,主要从事全场光学测量技术的研究。E-mail: swu@bistu.edu.cn