

doi:10.3788/gzxb20184701.0109001

彩色数字全息测量杨氏模量

宋庆和, 刘志强, 杨文明, 楼宇丽, 桂进斌

(昆明理工大学 理学院 物理系, 昆明 650500)

摘 要:利用彩色数字全息系统获得哑铃形试件表面的三维形变场,通过试件线性区域的三维形变场计算得到的 TC4 钛合金材料的杨氏模量为 90.79 GPa,同时,使用应变仪测量出该材料杨氏模量为 99.05 GPa.实验结果与传统应变仪检测结果接近,表明彩色数字全息测量材料杨氏模量的方法有效可行.该方法具有实时记录、全视场、非接触等特点,可以适应高温环境下材料服役过程中的实时检测.

关键词:彩色数字全息;三维形变场;杨氏模量;高温环境;信息光学

中图分类号:O438.1

文献标识码:A

文章编号:1004-4213(2018)01-0109001-7

Investigation of Measuring the Young's Modulus with Color Digital Holography

SONG Qing-he, LIU Zhi-qiang, YANG Wen-ming, LOU Yu-li, GUI Jin-bin

(Department of Physics, Faculty of Science, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Three dimensional deformation field of the dumbbell shaped specimen surface is obtained by color digital holographic system. The young's modulus of TC4 titanium alloy is calculated by the three dimensional deformation field in the linear zone of the specimen, which is 90.79 GPa. Moreover, the young's modulus of the material is measured as 99.05 GPa by the strain measuring instrument. The experimental results is approximate to the results of traditional strain measuring instrument. It indicates that the method of measuring Young's modulus by color digital holography is feasible and effective. The method has the characteristics of real-time recording, full-field, non-contact and so on. It can adapt to the real-time detection in the process of material service under high temperature environment.

Key words: Color digital holography; 3D deformation field; Young's modulus; High temperature environment; Information optics

OCIS Codes: 090.1705; 090.1995; 120.5050; 160.3900; 070.2025

0 引言

全息干涉技术作为一种全视场、非接触的高精度测量方法,已被广泛地应用到如形变场测量^[1-5]、显微全息^[6-11]、流体力学或光测力学^[12-17]、以及振动测量^[18-21]等领域中.目前,相位成像获得目标信息是一种常用的技术手段,通过解调相位分布与目标信息之间的定量关系,可以实现对生物信息^[6-9]、纳米结构^[10-11]、三维形貌^[22-23]、以及形变场^[5,24]等有关物理量的检测.在材料的力学性能检测过程中,通常需要先测出物体表面的三维形变场,然后再根据材料的相关特性计算出相应的参数.目前三维微形变场的测量方法很多,主要有机械法、电测法和光测法.但前两种的测量精度较低,一般不满足微小形变场测量的要求,因此,在微小形变场的测量应用中,主要使用光测法进行测量.光测法主要有云纹干涉法、散斑干涉法和数字全息法等^[25-26],但基本都只能获得一个或两个矢量的信息.对于三维形变场的检测,至少需要物体表面任意点三个不共面的位移矢量.近年来,随着实际检测需要的扩展,彩色数字全息方法被提出^[1].使用彼此不相干的三种波长激光同时

基金项目:国家自然科学基金(Nos.61540075,61465005,61565011)和云南省自然科学基金(Nos.2013FB025,2014FB132)资助

第一作者:宋庆和(1980—),男,讲师,博士,主要研究方向为光学信息获取与处理、彩色数字全息、衍射成像等. Email: songqinghe@126.com

收稿日期:2017-07-10; **录用日期:**2017-09-11

<http://www.photon.ac.cn>

照明的彩色数字全息检测系统可以获得三个不共面的位移矢量,从而可以实现三维形变信息的检测。

杨氏模量是一种用于表征固体材料抵抗形变能力的基本力学参数,也是机械零件设计时材料选择与工程技术设计的一个重要依据.因而,杨氏模量的测定对研究各种材料的力学性质有着重要意义.特别是随着各种新型材料和新型微结构器件的产生,材料的力学性能和使用寿命受到了社会各行业的广泛关注.目前,测量杨氏模量的方法有很多,除传统的拉伸测量法和弯曲测量法^[27-28]之外,还有在薄膜材料和微机械设计领域使用的纳米压痕法^[29]、萃取法^[30]、悬挂耦合弯曲共振法^[31]、利用标准倒置荧光显微镜测量法等^[32],以及利用传感器、莫尔条纹和波动传递技术(微波或超声波)等实验技术和方法测量杨氏模量.但普遍很难适应材料服役过程中的检测,尤其是无法应用在高温条件下的材料检测。

本文采用彩色数字全息方法获得哑铃形标准试件表面的三维形变场,通过三维形变场计算出了材料的杨氏模量,并将该方法的实验结果与传统的应变仪检测结果进行了对比。

1 彩色数字全息的记录与重建

1.1 彩色数字全息的实时记录

彩色数字全息的记录采用传统的离轴全息记录方式.实验装置如图 1,三种颜色激光束分别经过一个半波片 HWP,对水平和垂直两个偏振方向上的光波强度比进行调整.每种颜色激光经偏振分光棱镜 PBS 分成偏振方向互相垂直的两束光,一束光经过扩束后,照明被测物体,物体的散射光场直接投射到 CCD 上;另一束光经过扩束后作为参考光,并将三种颜色的参考光合为一束.参考光波经过消偏振半反半透镜 BS 反射后与 z 轴形成一个微小夹角,再与物光场叠加,形成离轴彩色数字全息^[1].彩色数字全息图由一个彩色 CCD 同时记录 RGB 三种颜色的全息图,使系统具有实时性,能够适应被测物体的动态检测.由于三种波长不同,因此三种颜色的全息图相互独立,每个全息图均可独立分析.到达 CCD 平面一个波长的物光和参考光可分别表为

$$O(x, y) = A_o(x, y) \exp[j\varphi_o(x, y)] \quad (1)$$

$$R(x, y) = A_r(x, y) \exp[jk(\theta_x x + \theta_y y)] \quad (2)$$

式中, $j = \sqrt{-1}$, $k = 2\pi/\lambda$, λ 是光波长, θ_x 和 θ_y 分别是参考光的波矢量在 xz 、 yz 平面的投影与 z 轴的夹角。

CCD 探测的光波场强度即记录的数字全息图为

$$I = |R|^2 + |O|^2 + R^* O + RO^* \quad (3)$$

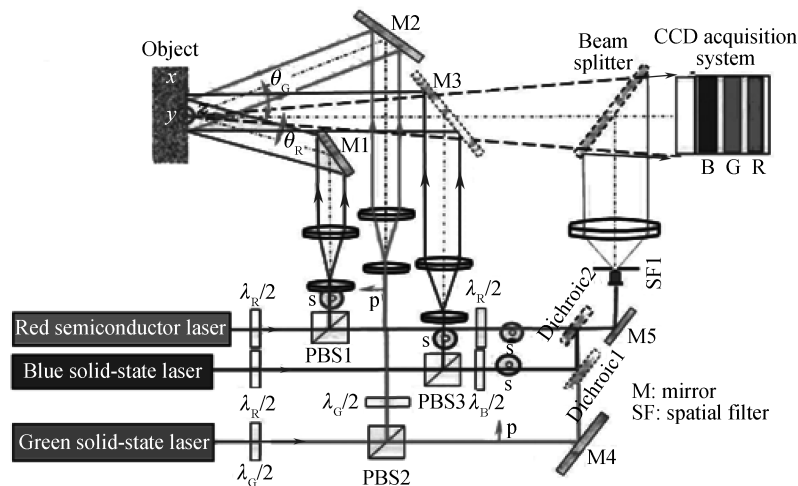


图 1 彩色数字全息记录光路

Fig.1 Optical setup of color digital holography

1.2 彩色数字全息的重建

彩色数字全息需要同时使用三种波长的激光进行照明,若使用菲涅耳衍射积分的一次快速傅里叶变换计算分别进行三个全息图波面重建,不同色光重建场尺寸不一致,无法综合波面重建信息.使用菲涅耳衍射积分的卷积算法时,重建场的尺寸虽然与波长无关,但只适用于物体投影尺寸与 CCD 面阵相差不大的情况,

否则由于 CCD 面阵太小,物光场高频角谱将大量损失,从而使被测对象的尺寸受到很大限制.因此重建使用球面波作为重建波,结合像面滤波技术实现可变放大率波前重建,让三种色光的重建像具有相同尺寸及在同一位置精确叠加,同时,又能充分利用重建平面,满足彩色数字全息检测的需要^[33-35].

全息图的重建场复振幅为 $U_r(x, y) = u_r(x, y) \exp[j\varphi_r(x, y)]$, 则重建场振幅和相位分别为

$$u_r(x, y) = |U_r(x, y)| \quad (4)$$

$$\varphi_r(x, y) = \arctan \frac{\text{Im}[U_r(x, y)]}{\text{Re}[U_r(x, y)]} \bmod 2\pi \quad (5)$$

相位分布是检测的关键.当物体发生形变或运动时,物体表面各点到达 CCD 的光程将随之改变,光程改变引入的相位差 $\Delta\varphi$ 与三维形变向量 $\mathbf{U} = (u_x, u_y, u_z)$ 的关系可记为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{U} \cdot (\mathbf{K}_e - \mathbf{K}_o) \quad (6)$$

式中, \mathbf{K}_e 是照明矢量,为物体的照明方向, \mathbf{K}_o 是观察矢量,沿光轴方向朝向记录平面,则感应矢量 $\mathbf{S} = \mathbf{K}_e - \mathbf{K}_o$, 为形变的方向^[24].

2 彩色数字全息检测三维位移场的基本原理

物体上任意点因形变而产生的位移可表示为

$$\mathbf{U} = u_x \mathbf{i} + u_y \mathbf{j} + u_z \mathbf{k} \quad (7)$$

式中, u_x, u_y, u_z 分别为 x, y, z 方向上位移的振幅, $\mathbf{i}, \mathbf{j}, \mathbf{k}$ 为位移的方向矢量.

首先考虑由一束波长 λ 的光照明物体,入射角为 θ . 矢量示意图如图 2.

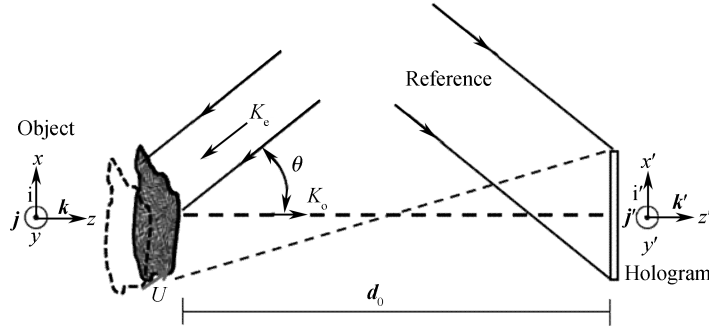


图 2 照明和观察矢量示意图

Fig.2 Scheme for illumination vector and observation vector

图 3 为照明和观察矢量在笛卡尔坐标系中的投影图.

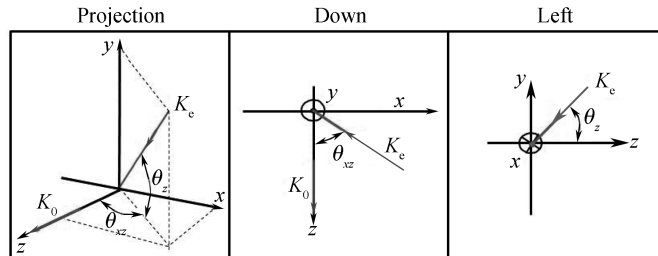


图 3 照明和观察矢量的投影图

Fig.3 Projection for illumination vector and observation vector

由图 3 可以得到照明和观察矢量为

$$\mathbf{K}_e = -\cos \theta_z \sin \theta_{xz} \mathbf{i} - \sin \theta_z \mathbf{j} - \cos \theta_z \cos \theta_{xz} \mathbf{k} \quad (8)$$

$$\mathbf{K}_o = \mathbf{k} \quad (9)$$

从而该照明光的感应矢量为

$$\mathbf{S} = \mathbf{K}_e - \mathbf{K}_o = -\cos \theta_z \sin \theta_{xz} \mathbf{i} - \sin \theta_z \mathbf{j} - (1 + \cos \theta_z \cos \theta_{xz}) \mathbf{k} \quad (10)$$

因此由位移 \mathbf{U} 引起的相位变化量可表示为

$$\Delta\varphi = \frac{2\pi}{\lambda} \mathbf{S} \cdot \mathbf{U} = -\frac{2\pi}{\lambda} [\cos\theta_z \sin\theta_{xz} u_x + \sin\theta_z u_y + (1 + \cos\theta_z \cos\theta_{xz}) u_z] \quad (11)$$

其中, u_x, u_y, u_z 为未知的待测量.

为获得 u_x, u_y, u_z , 需要三个方程. 为此采用红绿蓝三种波长的激光从不同的方向照明物体, 从而获得三个独立的方程.

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{\lambda_R} = \frac{2\pi}{\lambda_R} \mathbf{S}_R \cdot \mathbf{U} = -\frac{2\pi}{\lambda_R} [\cos\theta_z^{\lambda_R} \sin\theta_{xz}^{\lambda_R} u_x + \sin\theta_z^{\lambda_R} u_y + (1 + \cos\theta_z^{\lambda_R} \cos\theta_{xz}^{\lambda_R}) u_z] \\ \Delta\varphi_{\lambda_G} = \frac{2\pi}{\lambda_G} \mathbf{S}_G \cdot \mathbf{U} = -\frac{2\pi}{\lambda_G} [\cos\theta_z^{\lambda_G} \sin\theta_{xz}^{\lambda_G} u_x + \sin\theta_z^{\lambda_G} u_y + (1 + \cos\theta_z^{\lambda_G} \cos\theta_{xz}^{\lambda_G}) u_z] \\ \Delta\varphi_{\lambda_B} = \frac{2\pi}{\lambda_B} \mathbf{S}_B \cdot \mathbf{U} = -\frac{2\pi}{\lambda_B} [\cos\theta_z^{\lambda_B} \sin\theta_{xz}^{\lambda_B} u_x + \sin\theta_z^{\lambda_B} u_y + (1 + \cos\theta_z^{\lambda_B} \cos\theta_{xz}^{\lambda_B}) u_z] \end{cases} \quad (12)$$

或者可由矩阵形式表示为

$$\begin{pmatrix} \lambda_R \Delta\varphi_{\lambda_R} \\ \lambda_G \Delta\varphi_{\lambda_G} \\ \lambda_B \Delta\varphi_{\lambda_B} \end{pmatrix} = 2\pi \underbrace{\begin{bmatrix} \cos\theta_z^{\lambda_R} \sin\theta_{xz}^{\lambda_R} & \sin\theta_z^{\lambda_R} & 1 + \cos\theta_z^{\lambda_R} \cos\theta_{xz}^{\lambda_R} \\ \cos\theta_z^{\lambda_G} \sin\theta_{xz}^{\lambda_G} & \sin\theta_z^{\lambda_G} & 1 + \cos\theta_z^{\lambda_G} \cos\theta_{xz}^{\lambda_G} \\ \cos\theta_z^{\lambda_B} \sin\theta_{xz}^{\lambda_B} & \sin\theta_z^{\lambda_B} & 1 + \cos\theta_z^{\lambda_B} \cos\theta_{xz}^{\lambda_B} \end{bmatrix}}_{\mathbf{A}} \begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} \quad (13)$$

当三个照明向量不共面时, 矩阵 \mathbf{A} 可逆, 这样, 三个方向的位移分量可表示为

$$\begin{pmatrix} u_x \\ u_y \\ u_z \end{pmatrix} = \frac{1}{2\pi} \mathbf{A}^{-1} \begin{pmatrix} \lambda_R \Delta\varphi_{\lambda_R} \\ \lambda_G \Delta\varphi_{\lambda_G} \\ \lambda_B \Delta\varphi_{\lambda_B} \end{pmatrix} \quad (14)$$

利用彩色数字全息图重建出物体加载前后的三种色光物光场相位 $\varphi_{\lambda_R}^0(x, y), \varphi_{\lambda_G}^0(x, y), \varphi_{\lambda_B}^0(x, y)$ 和 $\varphi_{\lambda_R}^1(x, y), \varphi_{\lambda_G}^1(x, y), \varphi_{\lambda_B}^1(x, y)$, 从而获得 3 个不共面的相位差分布

$$\begin{cases} \Delta\varphi_{\lambda_R}(x, y) = \varphi_{\lambda_R}^1(x, y) - \varphi_{\lambda_R}^0(x, y) \\ \Delta\varphi_{\lambda_G}(x, y) = \varphi_{\lambda_G}^1(x, y) - \varphi_{\lambda_G}^0(x, y) \\ \Delta\varphi_{\lambda_B}(x, y) = \varphi_{\lambda_B}^1(x, y) - \varphi_{\lambda_B}^0(x, y) \end{cases} \quad (15)$$

将(15)式代入(14)式, 即可求出三个方向的位移分量场, 从而获得三维位移场分布.

3 实验装置及参数

3.1 彩色数字全息检测系统

实验光路如图 1 所示. 三种颜色激光波长分别为红光 $\lambda_R = 671 \text{ nm}$, 绿光 $\lambda_G = 532 \text{ nm}$, 蓝光 $\lambda_B = 457 \text{ nm}$. 以物体中心到 CCD 中心为光轴, 物体到 CCD 的距离为 $d_0 = 1\,520 \text{ mm}$. 红光从光轴下方入射, 入射角为 4.52° , 绿光从光轴上方入射, 入射角为 4.56° , 蓝光从光轴侧方入射, 入射角为 6.56° . CCD 型号为 Guppy PRO F-146C, 点阵数为 $1\,388 \times 1\,038$ 像素, 点距为 $4.65 \mu\text{m} \times 4.65 \mu\text{m}$.

3.2 试件及加力装置

实验使用的试件为 TC4 钛合金, TC4 钛合金工作温度在 $-100 \text{ }^\circ\text{C}$ 至 $550 \text{ }^\circ\text{C}$ 之间, 属于 (a+b) 型钛合金, 具有良好的综合力学机械性能, 该材料应用非常广泛. 将样品通过线切割加工成哑铃型试件形式, 使得拉伸时试件中间区域为线性形变区, 其外形如图 4, 其物理尺寸参数见表 1.

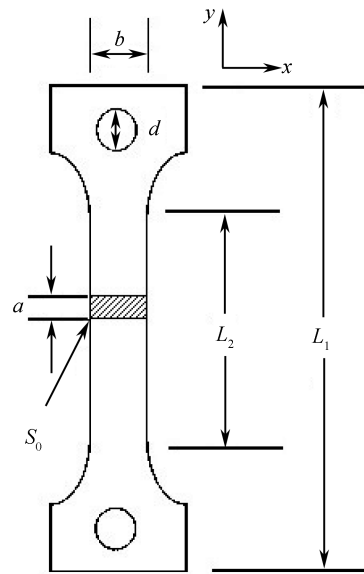


图 4 试件外形图

Fig.4 The shape of specimen

表 1 试件尺寸参数表

Table 1 Parameters of specimen size

parameter name	Symbols/units	parameters
total length of specimen	L_1/mm	67.32
parallelzone length	L_2/mm	20.00
cross-section thickness	a/mm	1.10
parallelzone width	b/mm	6.00
aperture diameter	d/mm	5.00
cross sectional area of parallel zone	S_0/mm^2	6.6

加载系统为数控应力加载试验机,型号为长春科新试验机 WDW-20,最小加载分辨力为 0.1 N,最大可加载 20 kN.通过加力装置对待测试件沿垂直方向(y 方向)施加拉力,施力从 600 N 开始,每次间隔 10 N,一直加到 800 N,每次间隔为 15 s,并用 CCD 拍摄每隔一次加载的瞬时态彩色数字全息图.

4 实验结果分析

4.1 彩色数字全息系统测量杨氏模量实验

所得的实验结果如图 5、图 6.图 5 给出的是从 750 N 加力到 790 N,拉力差为 40 N 时线性形变区的相位变化图,其中(a)、(b)、(c)分别对应红光、绿光、蓝光由于形变所引起的相位变化.对图 5 中相位进行解包裹后,利用(14)式计算出试件表面在 x , y , z 三个方向的位移分布图,分别如图 6(a)、(b)、(c)所示,横向坐标为像素.由图 6 可以看出,试件在 y 方向和 z 方向的位移接近, z 方向垂直于物体表面,说明在加力过程中物体产生了离面位移. x 方向的位移量很小,这与加力的方向为 y 方向有关.图 6 (d)给出 y 方向上位移分布的平均值曲线.

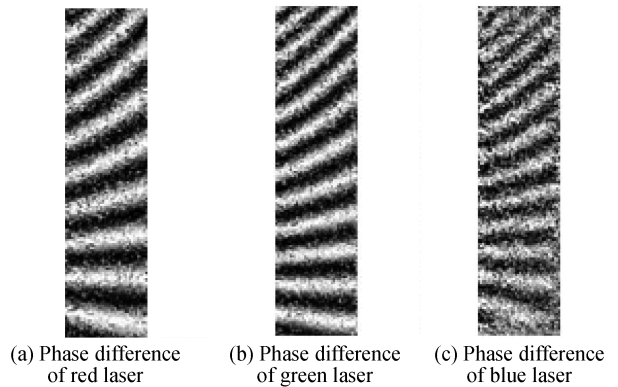


图 5 40 N 拉力差对应的三色光相位变化
Fig.5 Phase transformation of three color holograms with 40 N strain

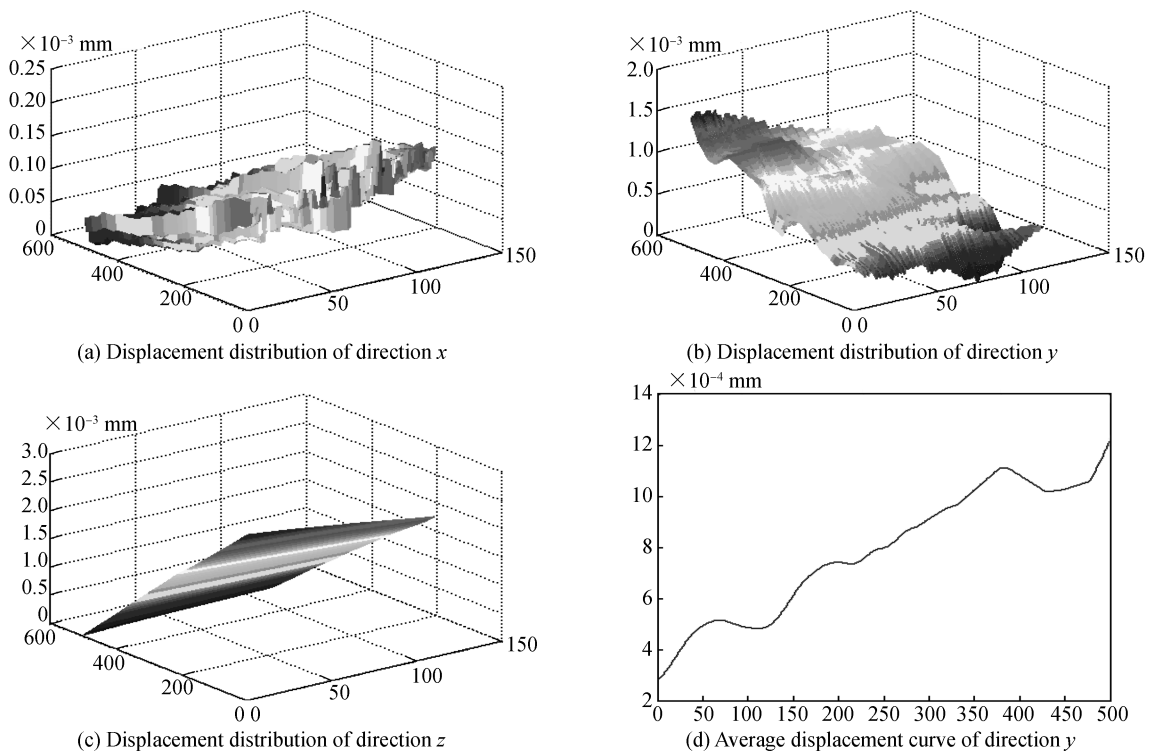


图 6 40 N 作用下试件的 3D 形变分布图(横坐标为像素)
Fig.6 Distribution of 3D deformation field with 40 N strain (The abscissa is pixel)

物体杨氏模量的计算公式为

$$Y = \frac{FL}{S\Delta L} \quad (16)$$

式中 F 、 S 、 L 分别对应施加在物体上的作用力、物体的横截面积以及物体的长度, ΔL 表示物体在力 F 的作用下, 在力的方向上的伸长量. 根据图 6(d) 的计算结果, 可得试件在 40 N 作用下的伸长量 $\Delta L = 0.51 \times 10^{-3}$ mm. 具体计算方法是: 因为采取的相位解包裹无初始值, 选取 y 方向 500 个像素单位, 对间隔 250 像素之间的位移量进行移动平均. 图 5 中线性形变区域 250 像素对应长度为 7.64 mm, 由表 1 所给出的工件原始横截面积为 6.6 mm^2 , 将上述参数代入(16)式可计算得杨氏模量 $Y = 90.79 \text{ GPa}$.

4.2 应变仪测量杨氏模量实验

为验证彩色数字全息方法测量杨氏模量的可行性, 对同一试件采用应变仪法进行复测. 使用 DH3818 静态应变测试仪检测了该试件弹性模量, 为了避免试件受力过程中的扭曲对检测结果的影响, 在该试件两面居中位置各贴一个应变片. 所使用的应变片长 21 mm, 电阻值为 120Ω . 测量结果绘制曲线如图 7, 对曲线求斜率即为测量杨氏模量, 结果为 99.05 GPa .

彩色数字全息法测得的杨氏模量为 90.79 GPa , 应变仪法测得的杨氏模量为 99.05 GPa . 可以看出, 两种方法测量结果接近, 因此, 利用彩色数字全息术来测量材料杨氏模量的方法是可行的.

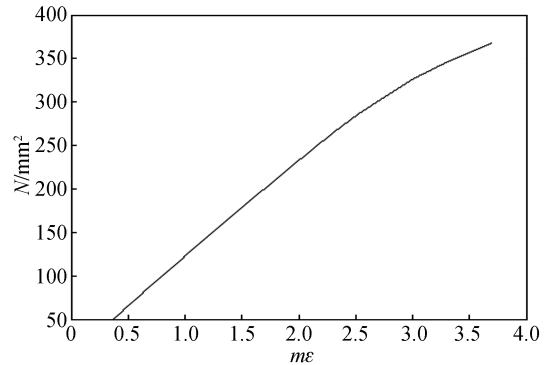


图 7 应变仪检测结果曲线

Fig.7 Stress-Strain curve with strain measuring instrument

5 结论

利用彩色数字全息技术对 TC4 钛合金材料进行了检测. 试件加工成了哑铃型标准件, 在垂直方向上施加拉力, 通过彩色数字全息检测系统获得三维形变场, 然后结合材料参数计算出了材料的杨氏模量. 并将该方法实验所获得的结果与传统的应变仪检测结果进行对比, 结果表明, 使用彩色数字全息技术测量材料杨氏模量的方法是切实可行的. 通过进一步的研究, 可以获得更多形变场相关的物理参数, 如应变场、应力场、热膨胀系数等. 本文所采用的检测理论与方法对高温环境下物体三维形变场的检测以及材料性能参数的测定也具有一定的参考意义.

参考文献

- [1] TANKAM P, SONG Q H, KARRAY M, *et al.* Real-time three-sensitivity measurements based on three-color digital Fresnel holographic interferometry[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(12): 2055-2057.
- [2] ZHOU Can-lin, KANG Yi-lan. Deformation measurement by digital holography[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2004, **33**(2): 171-173.
周灿林, 亢一澜. 数字全息干涉法用于变形测量[J]. 光子学报, 2004, **33**(2): 171-173.
- [3] ZHOU Wen-jing, PENG jiao, YU Ying-jie. Deformation measurement via digital holography[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2005, **13**(s1): 46-51.
周文静, 彭娇, 于瀛洁. 基于数字全息技术的变形测量[J]. 光学精密工程, 2005, **13**(s1): 46-51.
- [4] XIA Hai-ting, GUO Rong-xin, FAN Ze-bin, *et al.* Study on deformation measurement of transparent objects by digital holography[J]. *Journal of Optoelectronics · Laser*, 2011, **22**(7): 1046-1050.
夏海廷, 郭荣鑫, 樊则宾, 等. 数字全息法测量透明物体变形的研究[J]. 光电子·激光, 2011, **22**(7): 1046-1050.
- [5] MORIMOTO Y, NOMURA T, FUJIGAKI M, *et al.* Deformation measurement by phase-shifting digital holography [J]. *Experimental Mechanics*, 2005, **45**(1): 65-70.
- [6] DEPEURSINGE C, MORATAL C, SHAFFER E, *et al.* Label-free second-harmonic phase imaging of biological specimen by digital holographic microscopy[J]. *Optics Letters*, 2010, **35**(24): 4102-4.
- [7] EDWARDS C, BHADURI B, GRIFFIN B G, *et al.* Epi-illumination diffraction phase microscopy with white light. [J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(21): 6162-5.
- [8] GIRSHOVITZ P, SHAKED N T. Compact and portable low-coherence interferometer with off-axis geometry for quantitative phase microscopy and nanoscopy. [J]. *Optics Express*, 2013, **21**(5): 5701.
- [9] GABAI H, SHAKED N T. Dual-channel low-coherence interferometry and its application to quantitative phase imaging

- of fingerprints[J]. *Optics Express*, 2012, **20**(24): 26906-12.
- [10] RAJSHEKHAR G, BHADURI B, EDWARDS C, *et al.* Nanoscale topography and spatial light modulator characterization using wide-field quantitative phase imaging[J]. *Optics Express*, 2014, **22**(3): 3432-3438.
- [11] PICART P, MALEK M. Complex field recovering from in-line digital holography[J]. *Optics Letters*, 2013, **38**(17): 3230.
- [12] DESSE J M, PICART P, TANKAM P. Digital three-color holographic interferometry for flow analysis[J]. *Optics Express*, 2008, **16**(8): 5471-5480.
- [13] DESSE J M, PICART P, TANKAM P. Digital color holography applied to fluid and structural mechanics[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2012, **50**(1): 18-28.
- [14] KAKUE T, YONESAKA R, TAHARA T, *et al.* High-speed phase imaging by parallel phase-shifting digital holography[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(21): 4131-3.
- [15] SEEBACHER S, OSTEN W, BAUMBACH T, *et al.* The determination of material parameters of microcomponents using digital holography[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2001, **36**(2): 103-126.
- [16] WANG Jun, YANG Rong, ZHENG Jiao, *et al.* Visualized measurement of the liquid phase diffusion by using digital holographic interferometry[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2016, **45**(4): 0412001.
王骏,杨蓉,郑娇,等. 基于数字全息干涉术的液相扩散过程可视化[J]. 光子学报, 2016, **45**(4): 0412001.
- [17] MAYSSA K, CHRISTOPHE P, MOHAMED G, *et al.* Evaluation of interlaminar shear of laminate by 3D digital holography[J]. *Optics & Lasers in Engineering*, 2017, **92**: 57-62.
- [18] THOMAS B P, ANNAMALA P S, NARAYANAMURTHY C S. Investigation on vibration excitation of debonded sandwich structures using time-average digital holography[J]. *Applied Optics*, 2017, **56**(13): F7-F13.
- [19] SAMSON B, VERPILLAT F, GROSS M, *et al.* Video-rate laser Doppler vibrometry by heterodyne holography[J]. *Optics Letters*, 2011, **36**(8): 1449-1451.
- [20] LECLERCQ M, KARRAY M, ISNARD V, *et al.* Evaluation of surface acoustic waves on the human skin using quasi-time-averaged digital Fresnel holograms[J]. *Applied Optics*, 2013, **52**(1): A136-A146.
- [21] LI Ming, LUO Xiao, XUE Dong-lin, *et al.* Design of CGH for testing large off-axis asphere by considering mapping distortion[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, **23**(5): 1246-1253.
李明,罗霄,薛栋林,等. 考虑投影畸变设计大口径离轴非球面检测用计算全息图[J]. 光学精密工程, 2015, **23**(5): 1246-1253.
- [22] WANG Yun-xin, WANG Da-yong, ZHAO Jie, *et al.* 3D Profile measurement for micro-optical component by using digital holographic microscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2011, **33**(4): 0412003.
王云新,王大勇,赵洁,等. 基于数字全息显微成像的微光学元件三维面形检测[J]. 光学学报, 2011, **33**(4): 0412003.
- [23] YAMAGUCHI I, IDA T, YOKOTA M, *et al.* Surface shape measurement by phase-shifting digital holography with a wavelength shift[J]. *Applied Optics*, 2006, **45**(29): 7610-7616.
- [24] LECLERCQ M, PICART P, PENELET G, *et al.* Investigation of 3D surface acoustic waves in granular media with 3-color digital holography[J]. *Journal of Applied Physics*, 2017, **121**: 045112.
- [25] BAI Yi-ru. Comparison of several optical measurement methods applied to measure displacement of test model[J]. *Rock and Soil Mechanics*, 2009, **30**(9): 2783-2786.
白义如. 试验模型位移场中的几种光学测量方法比较[J]. 岩土力学, 2009, **30**(9): 2783-2786.
- [26] WANG Kai-fu, GAO Ming-hui, ZHOU Ke-yin. Modern photomechanics techniques[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2009.
王开福,高明慧,周克印. 现代光测力学技术[M]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社, 2009.
- [27] HARDWICK D A. The mechanical properties of thin films: a review[J]. *Thin Solid Films*, 1987, **154**(1): 109-124.
- [28] SILVA M F V, HANCOCK P, NICHOLLS J R. An improved three-point bending method by nanoindentation[J]. *Surface & Coatings Technology*, 2003, **169-170**: 748-752.
- [29] XU T, DU Y, LUO H, *et al.* Measurement of temperature-dependent young's modulus at a strain rate for a molding compound by nanoindentation[J]. *Experimental Mechanics*, 2016, **56**(9): 1-13.
- [30] BEN AMAR A, FAUCHER M, BRANDLI V, *et al.* Young's modulus extraction of epitaxial heterostructure AlGaIn/GaN for MEMS application[J]. *Physica Status Solidi*, 2014, **211**(7): 1655-1659.
- [31] ZHANG S Z, QI H Y, YANG H W, *et al.* Measurement of Young's modulus of thermal barrier coatings by suspended coupled flexural resonance method[J]. *Applied Mechanics & Materials*, 2016, **853**: 436-440.
- [32] GROSS W, KRESS H. Simultaneous measurement of the Young's modulus and the Poisson ratio of thin elastic layers[J]. *Soft Matter*, 2017, **13**(5): 1048-1055.
- [33] LI J C, TANKAM P, PENG Z J, *et al.* Digital holographic reconstruction of large objects using a convolution approach and adjustable magnification[J]. *Optics Letters*, 2009, **34**(5): 572-574.
- [34] PICART P, TANKAM P, MOUNIER D, *et al.* Spatial bandwidth extended reconstruction for digital color Fresnel holograms[J]. *Optics Express*, 2009, **17**(11): 9145-9156.
- [35] LI J C, PENG Z J, TANKAM P, *et al.* Digital holographic reconstruction of a local object field using an adjustable magnification[J]. *Journal of the Optical Society of America A Optics Image Science & Vision*, 2011, **28**(6): 1291-1296.