

激光与光电子学进展

基于远心镜头与双向视场分离技术的光学引伸计

付思鹏, 李俊杰, 朱飞鹏*

河海大学力学与材料学院, 江苏 南京 211100

摘要 当前基于视场分离技术的光学引伸计只能提高单个方向的应变测量精度,而在与之垂直方向上的测量精度不够高,即无法同时实现双向高精度应变测量,限制了其应用范围。因此,提出了一种双向视场分离技术,该技术由 4 个相同斜方棱镜旋转而成,并与远心镜头结合,设计了一种双向高精度光学引伸计。开展了不锈钢试样的循环加载实验来验证上述光学引伸计相较于普通光学引伸计的优越性。此外,还进行了不锈钢试件的 4 次单轴拉伸实验,该双向光学引伸计与电测法所测得的弹性模量和泊松比的最大误差分别为 0.62% 和 2.86%,4 次平均误差分别为 0.41% 和 1.38%,表明该光学引伸计具有很高的应变测量精度。

关键词 光学引伸计; 双向视场分离; 数字图像相关; 应变测量精度; 弹性模量; 泊松比

中图分类号 O348.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP230965

Optical Extensometer Based on Telecentric Lens and Biaxial Field-of-View Splitting Technique

Fu Sipeng, Li Junjie, Zhu Feipeng*

College of Mechanics and Materials, Hohai University, Nanjing 211100, Jiangsu, China

Abstract At present, optical extensometers based on field-of-view splitting (FOV-splitting) technique can only improve the strain measurement accuracy in a single direction, but the measurement accuracy in the perpendicular direction is not high enough, that is, it cannot achieve biaxial high-precision strain measurement at the same time, which limits its application range. Therefore, a biaxial FOV-splitting technique is proposed, which is formed by rotating four identical rhombic prisms, and by combining with the telecentric lens, a biaxial high-precision optical extensometer was developed. The cyclic loading experiment of stainless steel specimen was carried out to verify the superiority of the above optical extensometers over ordinary optical extensometers. In addition, four uniaxial tensile experiments were carried out on stainless steel specimens, and the maximum errors of elastic modulus and Poisson's ratio obtained by the bidirectional optical extensometer and electrical measurement method were 0.62% and 2.86%, and the four average errors were 0.41% and 1.38%, respectively, indicating that this optical extensometer has high strain measurement accuracy.

Key words optical extensometer; biaxial field-of-view splitting; digital image correlation; strain measurement accuracy; elastic modulus; Poisson's ratio

1 引言

研究材料泊松比对于了解材料的性能具有十分重要的意义,泊松比作为力学的一个重要参数,被定义为横向应变与纵向应变的比值的绝对值,因此,对材料的应变进行高精度测量必不可缺。引伸计作为测量材料应变的一种实用工具,在应变测量中发挥着重要作用。其中,接触式引伸计非常成熟且应用广泛,具有精度高

且量程较大的优点,但是由于其接触式的特性,对特殊材料(如柔性材料)的试件或特殊环境(如高温环境)下的测量具有局限性。随着科学技术的进步,非接触式的光学引伸计^[1-3]也逐渐成熟,由过去的概念形式发展到了实用的程度,其适用范围更加广泛,目前已经在科研与实际工程中发挥着重要的作用。

光学引伸计主要通过亚像素算法,对图像或视频进行分析计算,从而得到任意两个点间的位移变化量

收稿日期: 2023-03-28; 修回日期: 2023-04-11; 录用日期: 2023-04-20; 网络首发日期: 2023-04-30

基金项目: 国家自然科学基金(12172120)

通信作者: *zhufeipeng@hhu.edu.cn

和应变值。但是在变形测量过程中,相机镜头的畸变与被测物体不可避免的离面运动都会影响应变的测量精度。针对离面位移的影响:Pan等^[4-5]与Bai等^[6]分别提出了基于外补偿法的引伸计,以减小离面位移对普通镜头成像的影响;Zhu等^[7-8]提出了一种基于双45°反射镜成像的自补偿技术,通过反射镜同时记录试样的前后两个表面,并取前后两个表面对应点的应变平均值来抵消离面位移的影响,提高测量精度。针对镜头畸变的影响:Sutton等^[9]建立了二维成像方程,分析并对比了普通镜头和远心镜头对离面位移的影响,最终得到了远心镜头可以减小离面位移所带来的应变误差的结论;Pan等^[10]提出了基于主动成像和双侧远心镜头的光学引伸计,并通过实验验证了其精度,但由于远心镜头的分辨率有限,其测量精度也受到了限制;为了提高应变计算像素的标距,Chen等^[11]提出了基于远心镜头和立方棱镜的光学引伸计,利用立方棱镜对光线的折射性质,在试样表面捕获了两个分离的视场,增大了应变精度;陆润之等^[12]提出了一种利用一块直角棱镜与两块反射镜视场分离(FOV-splitting)装置,将原本相距较远的两个视场会聚到一幅图像中,提高了光学引伸计的标距,减小了应变误差;Dong等^[13]提出了一种基于分光棱镜与两面反射镜的视场分离装置,利用红蓝两色光源分别照射两块区域,通过分光棱镜与反射镜可以同时观察两块区域,这种方法避免了成像时不同颜色通道之间的干扰,提高了测量的精度;Zhu等^[14-16]制作了一个由直角光学棱镜和两个反射镜组成的三元件反射成像装置,通过该装置大大提高了光学引伸计的标距,并结合远心镜头,减少了离面位移的影响;但是三元件装置较为复杂,对加工要求高,故Gu等^[17]利用两个对称布置的斜方棱镜,同时取得上下两个独立区域的图像,简化装置结构的同时,也可以获得较高的精度。然而,目前在2D-DIC(Digital Image Correlation)测量方面,常规基于视场分离装置的光学引伸计往往只能提高单个方向的应变测量精度,对于材料泊松比的测量不够精确,因此,本文将提出一种基

于远心镜头和双向视场分离装置的光学引伸计,测量时既可以减少离面位移的影响又可以得到高精度的双向应变值。

2 测量原理

2.1 基于远心镜头与双向视场分离的光学引伸计

该双向视场分离装置是由4个尺寸完全相同的斜方棱镜组成(图1),每个棱镜的两个斜面(阴影镀膜面)都相互平行,为45°反射面,上、下两个面为经抛光处理的透光面。将该视场分离装置安装在远心镜头前,此时试样表面发出的入射光线通过上、下两端未被遮挡的透光面,经过反射面两次反射后,平行出射到远心镜头中,成像到单相机靶面,得到不连续的上、下、左、右4个方向的视场。



图1 4组斜方棱镜的排列示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the arrangement of four rhombic prisms

图2(a)为基于远心镜头和双向视场分离的光学引伸计测量示意图,通过该视场分离装置,相机得到的图像左上部分为 FOV_1 ,右上部分为 FOV_2 ,左下部分为 FOV_3 ,右下部分为 FOV_4 ,在4个区域交界处有一段十字形模糊区域。如图2(b)所示,选取图像上A、B、C、D四点为标距点,其中,A与B在同一竖线上,C与D在同一水平线上。由于远心镜头畸变很小,真实位

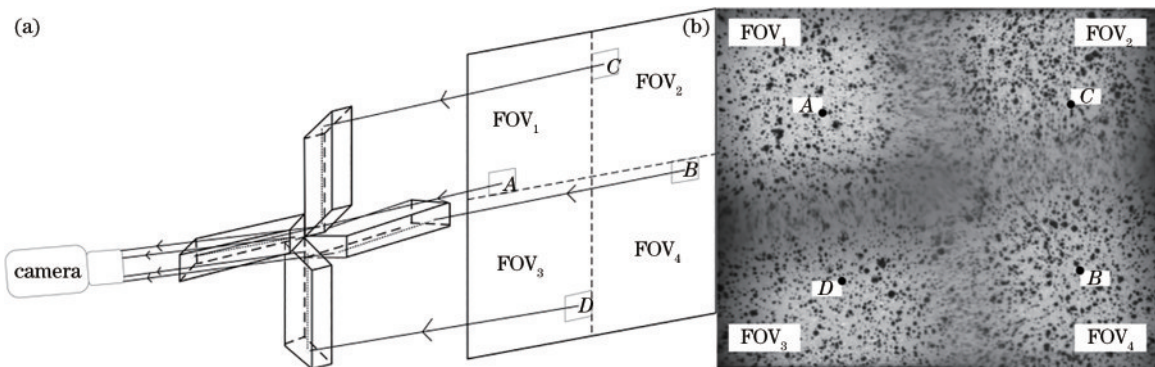


图2 所提光学引伸计的测量示意图。(a)光学布置;(b)记录下的图像

Fig. 2 Measurement schematic diagram of proposed optical extensometer. (a) Optical arrangement; (b) a recorded image

移与像素位移可认为呈比例关系。因此,该双向光学引伸计的应变可以表示为

$$\begin{cases} \epsilon_y = \frac{V_A - V_B}{L_{AB}} = \frac{v_A - v_B}{l_{AB}} \\ \epsilon_x = \frac{V_C - V_D}{L_{CD}} = \frac{v_C - v_D}{l_{CD}} \end{cases}, \quad (1)$$

式中: V_A, V_B, V_C, V_D 为 A 点、B 点、C 点、D 点的真实位移(单位: mm); L_{AB}, L_{CD} 分别为 A、B 两点和 C、D 两点间的真实距离(单位: mm); v_A, v_B, v_C, v_D 为图像上的像素位移(单位: pixel); l_{AB}, l_{CD} 分别为图像上 AB 两点和 CD 两点间的像素距离(单位: pixel)。

由于使用远心镜头成像,故所提光学引伸计受离面位移的影响较小,同时斜方棱镜的布置使得引伸计的标距增加,因此应变测量精度得到了提高,此外,该双向引伸计通过分别调整纵向、横向两组斜方棱镜的间距可以测量不同尺寸的试样,可解决双相机严格同步问题,优化工作空间。

2.2 标定原理

在开始实验前通过单相机采集 4 个视场的清晰图像进行标距计算,如图 3 所示,其中视场 FOV₁、FOV₃ 表示水平方向,视场 FOV₂、FOV₄ 表示竖直方向。在 FOV₁ 和 FOV₃ 视场中,分别选取两个已知的刻度点 A、B 和 C、D,由刻度值 V_A, V_B, V_C, V_D 和图像像素坐标 v_A, v_B, v_C, v_D 得到真实距离 L_{AB}, L_{CD} 与像素距离 l_{AB}, l_{CD} 。根据下式得到两个视场的放大系数 K_1 与 K_2 (单位: pixel/mm)

$$\begin{cases} k_1 = \frac{l_{AB}}{L_{AB}} \\ k_2 = \frac{l_{CD}}{L_{CD}} \end{cases}. \quad (2)$$

分别以 K_1 与 K_2 为放大系数计算两视场间的像素距离,

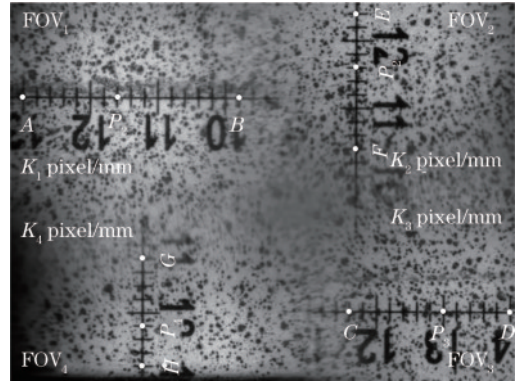


图 3 标距标定示意图

Fig. 3 Schematic diagram of gauge-length calibration

$$l_{\text{gap}} = K \times L_{AD} - l_{AB} - l_{CD}, \quad (3)$$

式中: K 取放大系数 K_1 和 K_3 ; L_{AD} 表示 A 点到 D 点的真实长度; l_{AB}, l_{CD} 为对应点的像素长度。之后,计算放大系数 K_1 和 K_3 下的 l_{gap} 的误差,要求该误差小于 1%,并选取其中较大的 l_{gap} 作为该方向上两个视场间的距离,则 P_1 与 P_3 点间的像素距离可以表示为

$$l_{P_1P_3} = l_{\text{gap}} + l_{BP_1} + l_{CP_3}. \quad (4)$$

同理,也可以标定出视场 FOV₂、FOV₄ 中 P_2 与 P_4 间的像素距离,至此,视场分离装置的标定完成。

3 实验装置及标定过程

为了便于开展后续实验,以验证双向光学引伸计的可行性,需要加工视场分离装置并进行标定。

3.1 视场分离装置

图 4(a) 为设计、加工并组装好的视场分离装置实物侧视图,该装置外壳尺寸为 45 mm × 45 mm × 28 mm,装置前端有 4 个尺寸为 4 mm × 4 mm 的透光区域,装置正视图如图 4(b) 所示,单轴方向两个视场距离为 20 mm。

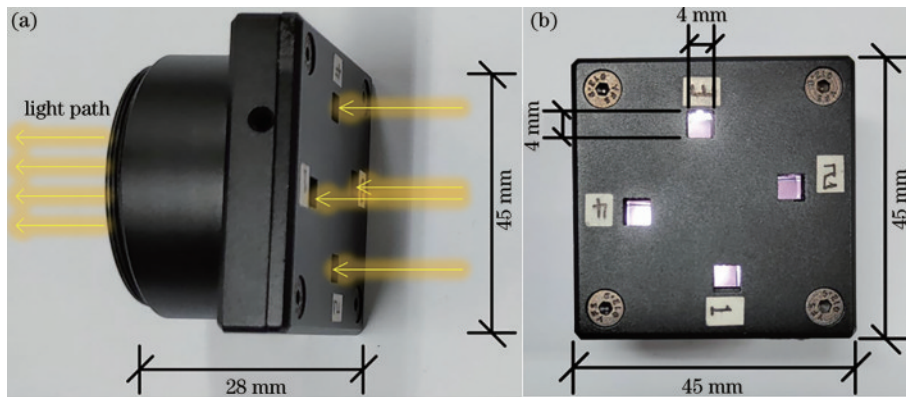


图 4 视场分离装置实物图。(a) 视场分离装置侧视图; (b) 视场分离装置正视图

Fig. 4 Physical picture of FOV-splitting device. (a) Side view of FOV-splitting device; (b) front view of FOV-splitting device

3.2 标定工具

采用定制的具有十字刻度的菲林片进行标定,如图 5 所示,刻度双向长度为 30 mm,分度值为 0.2 mm。

为确保菲林片与试件表面平行接触,将薄玻璃片压在菲林片上并用小磁铁固定,调整菲林片方向以确保其十字刻度方向分别与试件轴向与横向平行,且菲林片

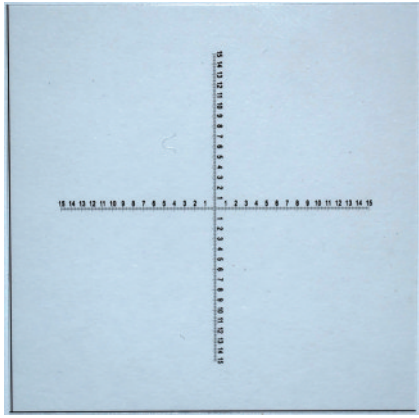


图5 标定片实物图

Fig. 5 Physical picture of calibration piece

整体位于视场中央,使得装上视场分离装置后的 4 个视场都能观测到清晰的刻度值。

3.3 实验标定

以不锈钢试件循环加载实验为例,该实验采用

FLIR 图像传感器(型号为 BFS-U3-89S6M-C,分辨率为 $4096 \text{ pixel} \times 2160 \text{ pixel}$,像素为 $3.45 \mu\text{m}$)和 Edmund Optics 1X 55350 远心镜头(畸变 0.003%)对变形试件进行了图像采集。通过相机获得 4 个视场的标定图像,其中视场 FOV_1 、 FOV_3 表示竖直方向,视场 FOV_2 、 FOV_4 表示水平方向,分别对水平和竖直方向进行标定,轴向标定参数如表 1 所示。

根据前文所述标定原理,通过计算可以得到两个不同放大倍数下的轴向标距:

$$\begin{cases} l_{v_1} = K_1 \times L_{AD} - l_{AB} - l_{CD} + l_{P_1B} + l_{CP_3} = 7104 \text{ pixel} \\ l_{v_3} = K_3 \times L_{AD} - l_{AB} - l_{CD} + l_{P_1B} + l_{CP_3} = 7117 \text{ pixel} \end{cases}$$

通过计算可知竖直视场因不同放大倍数引起的相对误差为 0.22% ,因此选择两者中的较大值 $l_v = 7117 \text{ pixel}$ 作为轴向标距。同理,得到横向标距分别为 6854 pixel 和 6832 pixel ,通过计算可知横向视场因不同放大倍数引起的相对误差为 0.36% ,因此选择两者中的较大值 $l_h = 6854 \text{ pixel}$ 作为横向标距。

表 1 轴向标定参数

Table 1 Axial calibration parameters

Parameter	FOV_1			FOV_3		
Coordinate point	A	P_1	B	C	P_3	D
Scale /mm	14.6	13	10.8	10	11.6	13.6
Abscissa /pixel	51	511	1148	1380	1844	2421
Magnification $K /(\text{pixel} \cdot \text{mm}^{-1})$	288.68			289.16		

4 不锈钢试件拉伸实验

该实验采用如图 6(a) 所示的不锈钢拉伸试件,试样尺寸为 $300 \text{ mm} \times 26 \text{ mm} \times 1 \text{ mm}$,在试样表面(除中间区域)喷涂白色底漆后喷覆上均匀黑色散斑。为了确定双向光学引伸计的精度水平,在试样中间区域分别贴上纵向和横向的应变片,并将其连接在 TST3826E 静态应

变仪上,测量精度是 $1 \mu\epsilon$ (采用 1/4 桥)。如图 6(b) 所示,用夹头将试样固定在 INSTRON 3367 万能试验机上,双向视场分离装置距离试样的工作距离为 81 mm ,装上菲林标定片后,调整相机焦距,直至 4 个视场出现清晰的刻度和散斑,对第一张图片进行标定后,取下标定片。实验均采用 2D-DIC 算法进行图像位移计算,其中计算子区大小为 $89 \text{ pixel} \times 89 \text{ pixel}$,步长为 3 pixel 。

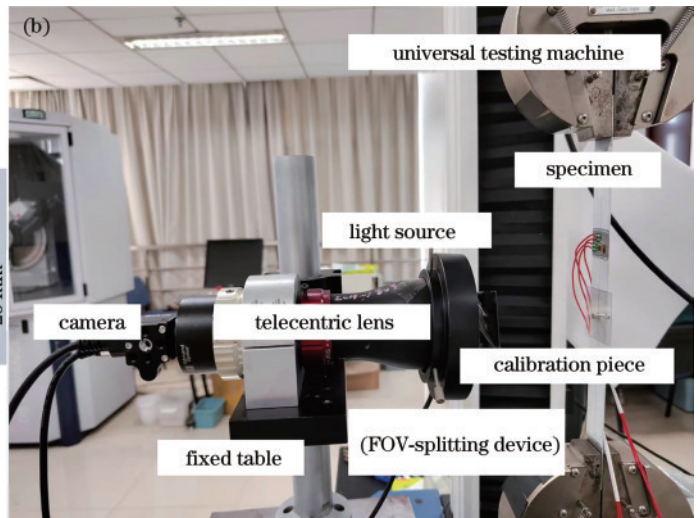
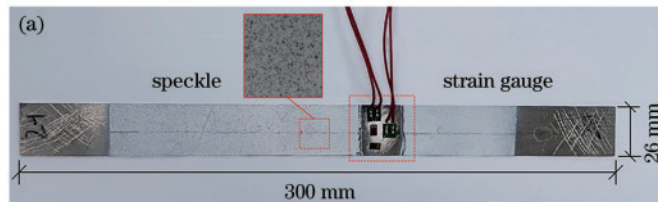


图 6 实验内容。(a) 不锈钢试样;(b) 实验装置

Fig. 6 Experimental content. (a) Stainless steel specimen; (b) experimental equipment

4.1 循环加载对比实验

为了比较双向光学引伸计与普通光学引伸计的稳定性与精确性,分别利用两种引伸计进行3次循环加载实验。在进行循环加载实验前,首先通过夹头固定不锈钢试件并设置初始荷载0.3 kN,之后将试件上的应变片连接到TST3826E静态应变仪上,设置应变仪自动采集速率为 1 s^{-1} ,并对各通道进行平衡和清零操作,最后设置万能试验机以 0.5 mm/min 的恒定速率进行三次循环加载。实验时,首先打开应变仪记录数据,待数据稳定后启动万能试验机,同时以 10 frame/s

的采集频率开始记录图像。在循环加载实验完成后,卸下视场分离装置,调整焦距和光圈至视场成像清晰,进行普通光学引伸计的不锈钢试样循环加载实验,将其结果与双向光学引伸计实验的结果进行对比。卸下了视场分离装置后,重新标定出的轴向标距为 2154 pixel ,横向标距为 1856 pixel 。

如图7应变-时间曲线所示,两种光学引伸计测得的应变值与电测法测出的应变在趋势上基本一致,但是明显可看出,双向光学引伸计测出的结果与电测法的结果更加吻合,且离散程度小。

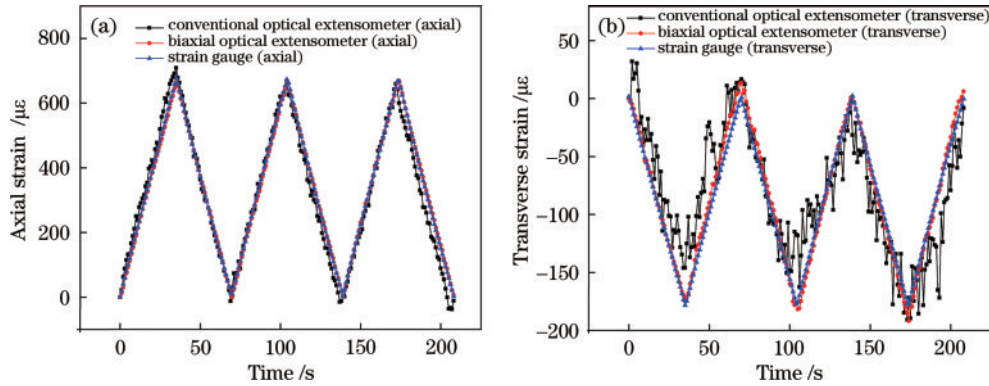


图7 不同引伸计的应力-时间曲线。(a)轴向应力-时间曲线;(b)横向应力-时间曲线

Fig. 7 Strain-time curves of different extensometers. (a) Axial strain-time curve; (b) transverse strain-time curve

两种光学引伸计与电测法之间的应变测量误差值如图8所示:普通光学引伸计轴向最大应变误差绝对值为 $78\text{ }\mu\epsilon$,横向最大应变误差绝对值为 $110\text{ }\mu\epsilon$;双向光学引伸计轴向最大应变误差绝对值为 $18\text{ }\mu\epsilon$,横向最大应变误差绝对值为 $18\text{ }\mu\epsilon$ 。理论上轴向应变误差可降至 $2154/7117=0.30$,横向应变误差可降至 $1856/$

$6854=0.28$,经计算分析可知,双向光学引伸计应变误差下降程度要大于理论误差下降程度,双向光学引伸计的均方根误差如表2所示。总体而言,该实验证明了所提双向光学引伸计有着比普通光学引伸计更高的精度和更好的稳定性。

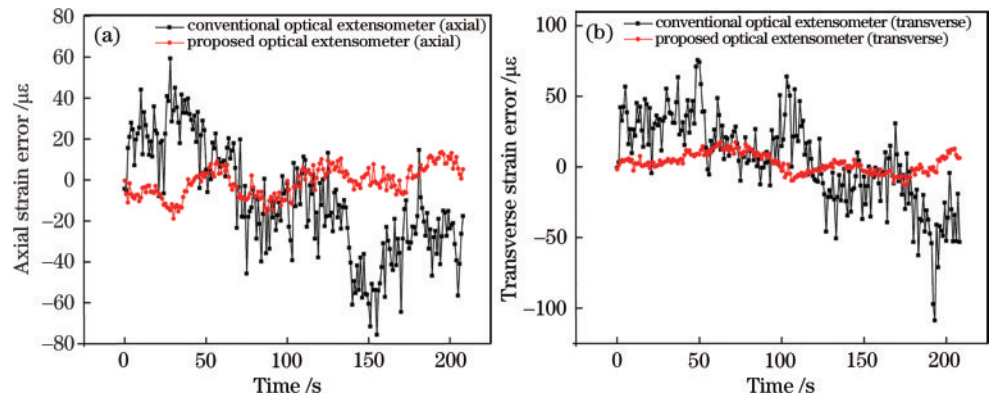


图8 两种光学引伸计与应变计之间的应变误差。(a)轴向应变误差;(b)横向应变误差

Fig. 8 Strain error between two optical extensometers and strain gauges. (a) Axial strain error; (b) transverse strain error

表2 循环加载实验双向光学引伸计均方根误差

Table 2 Root mean square error of biaxial optical extensometer in cyclic loading test

Root mean square error	Group 1	Group 2	Group 3
Axial strain error / $\mu\epsilon$	7.23	7.03	6.25
Transverse strain error / $\mu\epsilon$	7.22	5.36	5.04

4.2 单轴拉伸实验

将电测法得出的弹性模量与泊松比作为参考值,来验证两种光学引伸计测出的弹性模量与泊松比的准确性。采用逐级等量加载方式,设置万能试验机初荷载为 0.3 kN ,并采集参考图像,以 0.3 kN 增量进行加载,记录每次加载后的图像和对应应变值,当荷载为

3.6 kN 时停止加载,共采集 12 幅图像。卸下视场分离装置,对引伸计进行重新标定,并重复上述步骤进行普通引伸计的测量实验。

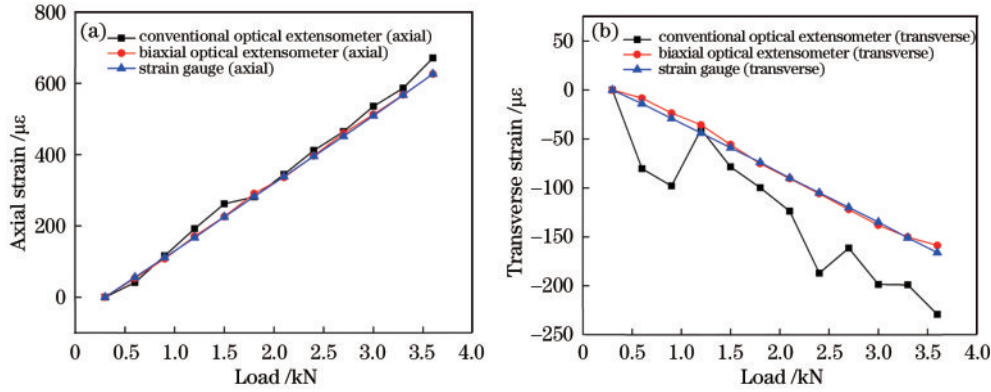


图 9 两种光学引伸计与应变计测得的应变。(a) 轴向应变;(b) 横向应变

Fig. 9 Strain measured by two optical extensometers and strain gauges. (a) Axial strain; (b) transverse strain

如图 10 所示:普通光学引伸计双向的应变误差的稳定性较低,轴向最大应变误差绝对值为 $50 \mu\epsilon$, 横向最大应变误差绝对值为 $52 \mu\epsilon$;双向光学引伸计轴向最大应变误差绝对值为 $9 \mu\epsilon$, 横向最大应变误差绝对值为 $8 \mu\epsilon$ 。理论上轴向应变误差可下降至 $2194/7272=0.30$, 横向应变误差可下降至 $1765/6900=0.26$, 所以

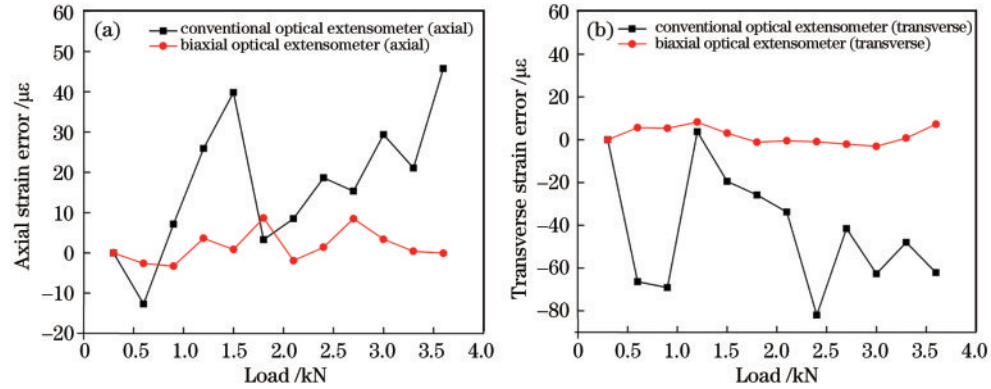


图 10 两种光学引伸计的应变误差。(a) 轴向应变误差;(b) 横向应变误差

Fig. 10 Strain errors of two optical extensometers. (a) Axial strain error;(b) transverse strain error

表 3 单轴拉伸实验双向光学引伸计均方根误差

Table 3 Root mean square error of biaxial optical extensometer in uniaxial tensile tests

Root mean square error	Group 1	Group 2	Group 3	Group 4
Axial strain error / $\mu\epsilon$	4.04	3.49	5.02	3.04
Transverse strain error / $\mu\epsilon$	4.17	3.82	5.42	4.13

将弹性模量和泊松比的计算公式导入两种光学引伸计进行测试并与电测法测出的数据进行对比,图 11 为 4 组实验测得的弹性模量和泊松比,可以发现相较于所提双向光学引伸计,普通光学引伸计所测出的弹性模量

图 9 分别为不锈钢试件轴向和横向的荷载-应变曲线,普通光学引伸计所测出应变的离散程度偏高,吻合度较低,这与不锈钢循环加载实验的结果一致。

经计算分析可知,所提双向光学引伸计应变误差下降程度要大于理论应变误差下降程度。双向光学引伸计的均方根误差如表 3 所示。如表 1 所示,轴向两标距点之间距离为 1333 pixel,0.003% 镜头畸变引起的成像误差为 0.04 pixel,与 7117 pixel 标距相比完全可以忽略不计。

远低于电测法结果。图 11(b)为 4 组实验测得的泊松比,双向光学引伸计测出的泊松比离散较小,且稳定性高。

以电测法所得弹性模量为标准值,通过比较 4 组实验的两种光学引伸计所得弹性模量,如表 4 所示,第 4 组实验中普通光学引伸计最大误差为 16.17%,双向光学引伸计最小误差为 0.30%,双向光学引伸计与电测法结果最大误差仅为 2.86%。仍然以电测法所得泊松比为标准值,第 4 组实验中普通光学引伸计精度最大误差绝对值为 6.43%,双向光学引伸计精度最小误差绝对值为 0.07%,双向光学引伸计与电测法结果最大误差仅为 0.62%,远高于弹性模量精度提升比,说明了该双向光学引伸计具有实用性。

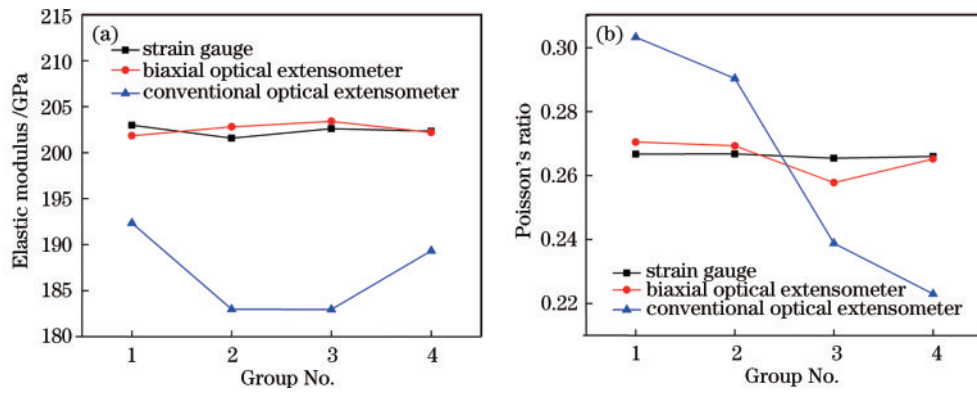


图 11 不同光学引伸计所测的力学参数对比。(a) 弹性模量;(b) 泊松比

Fig. 11 Comparison of mechanical parameters measured by different optical extensometers. (a) Elastic modulus; (b) Poisson's ratio

表 4 弹性模量和泊松比的测量误差

Table 4 Measurement error of elastic modulus and Poisson's ratio

unit: %

Data set	Elastic modulus		Poisson's ratio	
	Conventional optical extensometer	Proposed optical extensometer	Conventional optical extensometer	Proposed optical extensometer
Group 1	5.24	0.56	13.72	1.42
Group 2	9.22	0.62	8.85	0.94
Group 3	9.69	0.39	10.02	2.86
Group 4	6.43	0.07	16.17	0.30
Mean value	7.65	0.41	12.19	1.38

5 结 论

针对基于单向视场分离装置在实际应用中存在的双向应变精度不足的问题,本文提出了一种基于远心镜头和双向视场分离技术的光学引伸计。首先,设计、加工并组装了视场分离实物装置,在采集到的图像中,选择4个视场的4个标距点,构成两个光学引伸计,不但使轴向和横向标距分别提高了4.2倍和5.2倍,即应变误差降低到约1/5,而且简化了试件双向应变的测量步骤,为具体实际应用提供了思路。然后,进行了不锈钢试件循环加载与单轴拉伸实验以验证上述引伸计的精度和稳定性。实验结果证明,本文方法与电测法的纵向和横向应变均方根误差均值基本都在 $7\mu\epsilon$ 以内,所测得的泊松比和弹性模量也有着较高的精度。因此,本文提出的基于远心镜头和双向视场分离技术的光学引伸计在材料弹性常数测试应用中具有良好的应用前景。

参 考 文 献

- [1] 吴旷达, 屈敬业, 邵新星, 等. 基于单相机四视角成像的双轴三维视频引伸计[J]. 光学学报, 2022, 42(13): 1315001.
Wu K D, Qu J Y, Shao X X, et al. Two-axis three-dimensional video extensometer based on single camera four-view imaging[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(13): 1315001.
- [2] 韩伟, 吴丹. 光学显微镜图像恢复及在数字图像相关方
- [3] 胡烁陶, 孙晖, 王敏诚, 等. 空间结构形变的多视点高精度测量方法[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(19): 1912004.
- [4] Pan B, Yu L P, Wu D F. High-accuracy 2D digital image correlation measurements with bilateral telecentric lenses: error analysis and experimental verification[J]. Experimental Mechanics, 2013, 53(9): 1719-1733.
- [5] Tian L, Yu L P, Pan B. Accuracy enhancement of a video extensometer by real-time error compensation[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2018, 110: 272-278.
- [6] Bai P X, Zhu F P, He X Y. Optical extensometer and elimination of the effect of out-of-plane motions[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2015, 65: 28-37.
- [7] Zhu F P, Bai P X, Shi H J, et al. Enhancement of strain measurement accuracy using optical extensometer by application of dual-reflector imaging[J]. Measurement Science and Technology, 2016, 27(6): 065007.
- [8] 朱飞鹏, 龚琰, 白鹏翔, 等. 基于二维DIC的脆性材料拉伸应力-应变曲线测定[J]. 实验力学, 2018, 33(3): 333-342.

- Zhu F P, Gong Y, Bai P X, et al. Determination of tensile stress-strain curve of brittle materials based on two-dimensional digital image correlation[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2018, 33(3): 333-342.
- [9] Sutton M A, Yan J H, Tiwari V, et al. The effect of out-of-plane motion on 2D and 3D digital image correlation measurements[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2008, 46(10): 746-757.
- [10] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. *Optics Express*, 2016, 24(17): 19082-19093.
- [11] Chen B, Chen W P, Pan B. High-precision video extensometer based on a simple dual field-of-view telecentric imaging system[J]. *Measurement*, 2020, 166: 108209.
- [12] 陆润之, 朱飞鹏, 陶金, 等. 基于视场分离的长标距高精度光学引伸计[J]. *光学精密工程*, 2020, 28(11): 2446-2451.
- Lu R Z, Zhu F P, Tao J, et al. Long-gauge-length and high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2020, 28(11): 2446-2451.
- [13] Dong B, Li C Z, Pan B. Ultrasensitive video extensometer using single-camera dual field-of-view telecentric imaging system[J]. *Optics Letters*, 2019, 44(18): 4499-4502.
- [14] Zhu F P, Lu R Z, Gu J, et al. High-resolution and high-accuracy optical extensometer based on a reflective imaging technique[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2020, 132: 106136.
- [15] 朱飞鹏, 顾剑, 陆润之, 等. 视场分离式光学引伸计的改进与实现[J]. *激光与光电子学进展*, 2021, 58(23): 2312002.
- Zhu F P, Gu J, Lu R Z, et al. Improvement and realization of field-of-view splitting optical extensometer[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2021, 58(23): 2312002.
- [16] Zhu F P, Tao J, Lu R Z, et al. Advanced self-compensated, high-accuracy optical extensometer based on field-of-view splitting and dual-reflector imaging techniques[J]. *Measurement*, 2021, 174: 109024.
- [17] Gu J A, Zhu F P, Bai P X, et al. An optimized design for a field-of-view splitting-based long-gauge-length optical extensometer using two rhombic prisms[J]. *Measurement Science and Technology*, 2021, 32(5): 054001.