

文章编号: 1001-4888(2018)01-0059-10

## 接触式与非接触式引伸计 应变和泊松比测量精度比较<sup>\*</sup>

张悦<sup>1</sup>, 潘兵<sup>2</sup>, 郭广平<sup>1</sup>, 赵澎涛<sup>1</sup>

(1. 北京航空材料研究院, 材料检测与评价航空科技重点实验室, 航空材料检测与评价北京市重点实验室, 先进高温结构材料国防科技重点实验室, 北京 100095; 2. 北京航空航天大学, 航空科学与工程学院, 北京 100191)

**摘要:** 接触式电子引伸计方法和非接触式视频引伸计方法是当前材料力学性能测试中应变测量的两种主要方法, 其测量原理迥异, 亦各具优缺点。本文对商业接触式电子引伸计和最新研制的基于数字图像相关方法(DIC)的先进视频引伸计的性能进行了系统比较, 设计标准铝板试样单向拉伸实验定量比较了两种引伸计横纵应变与泊松比的测量结果。结果显示, 两者测量纵向应变结果比较接近, 接触式引伸计的精度略高, 但两者的不确定度在相同的量级。考虑到视频引伸计使用便捷、适用测量对象和测量范围广泛的特点, 因此应用前景更为广阔。

**关键词:** 数字图像相关; 视频引伸计; 应变; 泊松比; 不确定度

**中图分类号:** O348

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.7520/1001-4888-16-205

### 0 引言

应变测量是材料力学性能检测的重要测量环节之一。引伸计法凭借其使用方便、测量结果可靠等特点成为材料力学性能表征中最常用的应变测量手段之一。引伸计可以定义为通过夹持、粘贴或灰度识别等手段标记并追踪两点位置, 测量两点间位移的仪器。按照是否与被测试件接触来分类, 引伸计分为接触式引伸计和非接触式引伸计两类。接触式引伸计由最初的需要人为读数来获取数据的机械式引伸计, 逐渐发展为可自动输出数据的电子引伸计。近些年, 随着数字图像处理技术的发展, 基于数字图像分析原理的非接触应变测量方法的精度和计算效率得到了显著提高, 在此基础上发展起来的非接触式视频引伸计也凭借其非接触测量、适用测量对象和测量范围广泛等优点成为材料力学性能表征中应变测量的新手段。

泊松比是除了应变之外, 可在拉伸实验中单纯依靠引伸计来测量的力学量。泊松比的定义是材料在特定方向上受到拉伸时横向应变与纵向应变之比的负值, 是表征材料力学性能的一个重要弹性常数。泊松比可依靠一个轴向引伸计和径向引伸计测得, 材料泊松比测量是检验引伸计精度的一个非常好的实验<sup>[1]</sup>。接触式电子引伸计与非接触式视频引伸计都可以得到加载过程每一时刻的横纵应变, 但要获得准确的泊松比数据还需要对应变数据进行合理地处理。

目前, 视频引伸计是引伸计发展的新热点, 各式各样的视频引伸计层出不穷。许多视频引伸计的研发者都将研制的视频引伸计与接触式引伸计的测量结果作比较。Viveiros等<sup>[2]</sup>将通过视频引伸计、电子引伸计与横梁位移三种方法计算出的结构钢单向拉伸的纵向应变进行比较, 发现视频引伸计与电子引伸计的示数比较接近, 横梁计算出的位移误差较大, 视频引伸计显著的优势在于可以应用于

<sup>\*</sup> 收稿日期: 2016-10-11; 修回日期: 2016-11-24

通讯作者: 郭广平(1969—), 男, 博士, 研究员, 主要从事材料力学性能表征与无损检测。Email: guangping.guo@163.com

表面光滑的试件。Xavier 等<sup>[3]</sup>将基于特征识别的视频引伸计与电子引伸计进行比较,发现在相同应力下视频引伸计测得的应变值大于电子引伸计测量值。但上述研究尚存在如下不足:(1)缺乏对接触式与非接触式引伸计从原理、优劣、测量精度等方面的全面比较;(2)已有文献中采用的视频引伸计精度较低,达不到 B-1 级。其测量误差较大,无法作为先进视频引伸计的代表;(3)没有将视频引伸计测量横向应变的结果与横向接触式引伸计的结果作比较。

本文分别以接触式引伸计与非接触式引伸计中比较成熟先进而且受到广泛应用的两种引伸计——电子引伸计与最近提出的基于数字图像相关(Digital Image Correlation, DIC)方法的先进视频引伸计<sup>[4]</sup>为例,分析其测量原理、优缺点以及误差来源。本文选用的基于 DIC 原理的视频引伸计<sup>[4]</sup>采用基于高质量双远心镜头的光学系统设计,亚像素位移测量算法使用了基于反向组合高速牛顿(Inverse Compositional Gauss-Newton, IC-GN)算法的亚像素测量算法,可对拉伸实验中的横纵应变进行高精度实时测量。本文选用的视频引伸计可看作目前视频引伸计领域的最高技术水平。通过设计测量材料泊松比的实验,在设备适用性与测量精度方面对两种引伸计的测量应变与泊松比进行详尽的比较,对在材料力学性能测试中的实际应用提出建议。

## 1 接触式引伸计与非接触式引伸计的基本原理

### 1.1 接触式引伸计的原理及优缺点

接触式引伸计可以分为两类,机械式引伸计和电子引伸计,两者都是通过机械装置固定在试件上进行应变采集的,不同的是机械式引伸计是利用机械装置如齿轮、杠杆将变形放大进行显示;而电子引伸计是利用传感器将变形信号转换成电信号,处理器将电信号进行处理得到应变示数。根据传感器的不同,可将电子引伸计分为电阻式、电感式、电容式等<sup>[5]</sup>。

本文选取的电阻应变式电子引伸计是 Instron 生产的型号为 2630-105 的纵向引伸计<sup>[6]</sup>和 Epsilon 公司生产的型号为 357-100M-LHT 的横向引伸计<sup>[7]</sup>,如图 1 所示。引伸计由应变片、变形传递杆、弹性元件、限位标距杆、刀刃和夹紧弹簧等组成。工作原理是测量变形时将引伸计装卡于试件上,刀刃与试件接触而感受两刀刃间距内的伸长,通过变形杆使弹性元件产生应变,应变片将其转换为电阻变化量,再用适当的测量放大电路转换为电压信号。



图 1 (a)Instron 纵向引伸计 2630-105;(b)Epsilon 横向引伸计 357-100M-LHT

Fig. 1 (a)Instron vertical extensometer 2630-105; (b)Epsilon horizontal extensometer 357-100M-LHT

接触式引伸计具有结构简单、价格低廉、技术成熟、装卡方便等优点,因此在材料力学性能测试中得到了广泛的应用。然而在使用过程中,也暴露出如下不足:(1)测量表面光滑的试件容易出现装卡不牢固,造成滑脱;(2)标距范围有限,无法测量尺寸相对较大和较小的试件;(3)对于复杂结构中两点的伸长率较难测量;(4)无法承受刚性冲击,试件断裂时需要摘除,测不到断后伸长率;(5)高温条件下需要耐高温的引伸计,而且一般使用寿命较短;(6)接触式引伸计夹持到试件表面相当于对试件施加附加质量,等价于对试件加载,不适用于刚度较小的试样;(7)试件加载断裂会对引伸计造成刚性冲击,所以无法用来测量断裂时的应变数据。

## 1.2 非接触式引伸计的原理及优缺点

非接触式引伸计一般指的是视频引伸计,其原理主要是通过图像处理技术追踪特定的点在变形前后的位置来计算变形量。视频引伸计一般由照明光源、数字 CCD 相机、镜头以及包括视频图像跟踪程序的计算机等组成。视频引伸计在图像处理算法上可以分为基于特征提取的方法和基于灰度图像模块匹配的方法。

使用基于特征提取方法的视频引伸计需在试件表面做标记,然后提取该标志物的特征,在实验过程中追踪该特征点在变形后图像中的位置,通过前后的位置变化测得两点之间的位移变化。特征点的制作方法(见图 2)大致分为两种:一是在制备试件时增添特征,比如在试件制备中留肩<sup>[8]</sup>、打孔<sup>[9]</sup>等方式;还有一种是对试件以粘贴、喷涂的方法添加特征,比如画标记线<sup>[10]</sup>、粘贴标记物等。基于特征提取方法的视频引伸计适用于较大物体、高温或特征明显易识别等条件,但相比于基于模块匹配方法的视频引伸计,其精度较差。

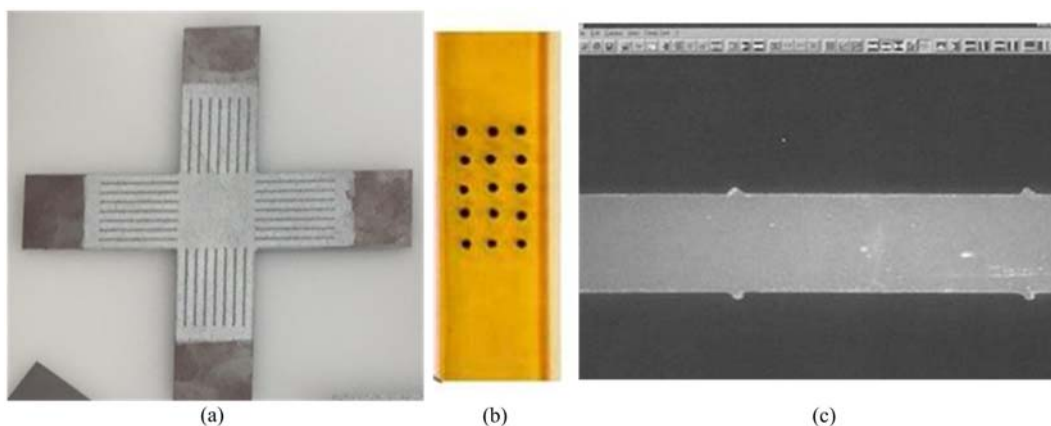


图 2 基于特征提取方法的视频引伸计采取的标记方法:(a)标记线 (b)孔 (c)肩

Fig. 2 Means of marks of video extensometer based on feature-based algorithms:

(a) mark lines; (b) holes; (c) shoulders

另一种使用比较广泛的是基于模板匹配算法的视频引伸计,这种视频引伸计通常采用数字图像相关方法跟踪标志点的位移,并计算试样在拉伸过程中的应变。DIC 法是基于数字图像处理技术,通过在试件表面喷涂散斑并利用散斑所形成的灰度矩阵来匹配追踪试件所受的位移与应变的一种非接触、非干涉的光学测量方法。上述视频引伸计在被测试样上选择矩形分布的四个点,以特征点为中心选择图像子区,并采用亚像素搜索算法跟踪各点在变形后视频图像中的位置。本文所用的高性能二维视频引伸计<sup>[4]</sup>由数字 CCD 相机、双远心镜头和照明光源组成(如图 3 所示),该设备具有 1 微应变的高分辨力和 B-1 级的高精度。



图 3 基于 DIC 方法的高性能视频引伸计示意图

Fig. 3 Advanced video extensometer based on DIC methods

相比于接触式引伸计,非接触式视频引伸计有如下优点:(1)可以测量光滑表面的试件,不用担心打滑造成的误差<sup>[7]</sup>;(2)量程和标距没有严格限制,可以通过更换镜头或调节视场对不同尺度试件的应变进行测量<sup>[4]</sup>;(3)能够测量复杂结构的应变或两点之间的伸长率;(4)可实现试件从开始加载到断裂之前的全程应变测量,能够很好地处理断裂时断后伸长率的测量问题;(5)理论上能够对高温应变进行低成本的测量<sup>[4]</sup>;(6)能够完成对存在透明介质的密闭环境箱内试件应变的测量。但是非接触式引伸计也存

在一些局限,比如大标距或大应变的测量会受到视场大小的局限,此时需要更换不同视场的成像镜头。

### 1.3 引伸计性能比较

根据 ASTM-E83 中描述引伸计的主要性能指标,将上述视频引伸计与电子引伸计在标距、量程范围、分辨率、精度等方面进行了比较,见表 1。

表 1 实验选用的视频引伸计与电子引伸计性能比较

Tab. 1 Comparison of performance of video extensometer and electronic extensometer

| 视频引伸计 |                                                     | 电子引伸计                                                                                      |
|-------|-----------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------------------------------------|
| 型号    | 基于 DIC 原理的先进视频引伸计 <sup>[4]</sup>                    | Instron 轴向引伸计(型号:2630-105) <sup>[6]</sup><br>Epsilon 横向引伸计(型号:357-100M-LHT) <sup>[7]</sup> |
| 标距    | 最大轴向 24mm,横向 32mm                                   | 轴向 25mm,横向 3~25mm                                                                          |
| 量程范围  | 无固定范围                                               | 5%~100%                                                                                    |
| 分辨率   | 1 微应变                                               | 10 微应变                                                                                     |
| 精度    | ASTM B-1 级                                          | ASTM B-1 级                                                                                 |
| 使用温度  | -40~1200℃                                           | -100~200℃                                                                                  |
| 信号频率  | 信号采集频率为计算速率与帧率的小值,CCD 采集帧率最高为 20Hz                  | 一般为 10Hz                                                                                   |
| 误差来源  | (1)散斑质量差,灰度梯度低;(2)试件图像倾斜;(3)镜头畸变造成的影响;(4)环境扰动造成信号噪声 | (1)引伸计安装倾斜;<br>(2)没有计入温度补偿;<br>(3)标距测量有误差                                                  |

## 2 实验

单向拉伸实验是测量材料力学性能的基础实验,通过测量单向拉伸实验的应力、横纵应变可以计算出材料的杨氏模量、屈服极限、弹性极限和泊松比。由于载荷信号传输到不同电脑中会引入一定误差,而本实验希望能够单纯地比较应变测量的差别,所以选取测量横纵应变、最大伸长量和泊松比这三个不依赖应力即可算出的物理量作为评价两者精度的指标。由于金属材料具有很强的一致性与均匀性,相比于复合材料偶然误差较小,所以本实验选取铝合金这种典型的金属材料作为实验对象。最终的实验结果分散度很低,表明该实验具有很强的重复性。

### 2.1 应变测量的不确定度分析

确定引伸计应变测量的不确定度需要对引伸计进行检定。引伸计的检定是指在一定位移下通过分析引伸计与标定器示数的差别来确定引伸计的精度级别。对于引伸计的计量性能存在 JJG762(见表 2)和 ASTM E83(见表 3)两种标准,引伸计的示值误差标准规定在 0.3mm 以下以绝对误差作为量度,0.3mm 以上以相对误差作为量度<sup>[11]</sup>。根据 ASTM E83 标准,如果 0.3mm 内绝对误差小于 100 微应变,0.3mm 以上相对误差低于 0.2%,则该引伸计可以达到 B-1 级精度。

表 2 JJG762 中部分引伸计的计量特性

Tab. 2 Metrological characteristics of extensometers in JJG762

| 引伸计<br>准确度等级 | 标距相对<br>误差/% | 相对位移<br>分辨力/% | 绝对位移<br>分辨力/ $\mu\text{m}$ | 相对位移<br>示值误差/% | 绝对位移<br>示值误差/ $\mu\text{m}$ |
|--------------|--------------|---------------|----------------------------|----------------|-----------------------------|
| 0.2          | 0.2          | 0.10          | 0.2                        | 0.2            | 0.6                         |
| 0.5          | 0.5          | 0.25          | 0.5                        | 0.5            | 1.5                         |
| 1            | 1.0          | 0.50          | 1.0                        | 1.0            | 3.0                         |

表 3 ASTM E83 中部分引伸计的计量性能  
Tab. 3 Metrological characteristics of extensometers in ASTM E83

| 引伸计<br>准确度等级 | 标距相对<br>误差/% | 相对应变<br>分辨力/% | 绝对应变<br>分辨力/(m/m) | 相对应变<br>示值误差/% | 绝对应变<br>示值误差/(m/m) |
|--------------|--------------|---------------|-------------------|----------------|--------------------|
| Class B-1    | 0.25         | 0.25          | 0.00005           | 0.2            | 0.0001             |
| Class B-2    | 0.5          | 0.25          | 0.0001            | 0.5            | 0.0002             |
| Class C      | 1.0          | 0.50          | 0.0005            | 1.0            | 0.001              |

按照 ISO 标准,应变测量的不确定度可以遵循 A 类、B 类标准进行评定。A 类不确定度  $S_A$  是通过观测重复测量所带来的统计误差来评定不确定度的。

$$S_A(\epsilon) = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n (\epsilon_i - \epsilon_{mean})^2} \quad (1)$$

其中,  $\epsilon_{mean}$  表示应变多次测量的平均值。

B 类不确定度是指根据误差来源的信息对测量的不确定度进行评估。由于两种引伸计计算应变的过程不相同,两者系统误差的来源也不相同。接触式引伸计通过内部的位移传感器获得两点之间的位移,除以手动测量的标距即可得到该方向的应变。非接触式引伸计如基于 DIC 原理的视频引伸计通过亚像素测量算法获得标距两端点之间以像素为单位的位移,除以原标距(以像素为单位)即可得到该方向的应变,省去了手动测量标距的过程。所以说,接触式引伸计直接读取的数据是位移,而非接触式引伸计直接读取的数据是应变。

非接触引伸计的 B 类不确定度来源主要可以分为图片信号采集引起的噪声、最小分辨率引起的误差和系统误差,其中系统误差的主要来源在于镜头畸变和环境的振动等因素。三者是相互独立的,可以进行正交合成。非接触引伸计 B 类不确定度  $S_B$  计算公式为:

$$S_B(\epsilon) = \sqrt{\delta_n^2 + \delta_m^2 + \delta_\epsilon^2} \quad (2)$$

式中,  $\delta_n$  表示噪声引起的误差;  $\delta_m$  表示最小分辨率引起的误差;  $\delta_\epsilon$  表示系统误差。

接触式引伸计的 B 类不确定度来源主要可以分为电信号采集引起的噪声、测量标距引入的误差、最小分辨率引起的误差和系统误差,其中系统误差的主要来源在于打滑和环境温度等因素。几者是相互独立的,可以进行正交合成。接触式引伸计应变计算公式为:

$$\epsilon = l/d \quad (3)$$

式中,  $l$  表示标记亮点之间的位移;  $d$  表示标距。

$l$  和  $d$  产生的不确定度可由公式得出:

$$\Delta\epsilon^2 = \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial l}\right)^2 \Delta l^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial d}\right)^2 \Delta d^2 \quad (4)$$

完整的接触式引伸计 B 类不确定度  $s_B$  计算公式为:

$$S_B(\epsilon) = \sqrt{\delta_n^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial l}\right)^2 \Delta l^2 + \left(\frac{\partial\epsilon}{\partial d}\right)^2 \Delta d^2 + \delta_m^2} = \sqrt{\delta_n^2 + \frac{1}{d^2} \delta_l^2 + \frac{l^2}{d^4} \delta_d^2 + \delta_m^2} \quad (5)$$

本实验采用的两种引伸计的原理差别很大,其不确定度的来源也有很大的区别,信号采集的噪声在不确定度中占据大部分,其中图片采集噪声大于电阻信号采集噪声,从 B 类评定标准来看,视频引伸计的不确定度较大。

## 2.2 泊松比测量的方法和不确定度分析

对于常温下静态法测量金属材料泊松比,数据处理方法遵循国家标准 GB/T 22315—2008。国家标准中对于数据处理有图解法和拟合法,其中图解法人为因素影响比较大,而拟合法更适合本实验的数据处理。

测量模型:对于横纵应变组成的散点群  $(x, y)$ ,按  $y=kx+b$  进行拟合。根据最小二乘法,可得散点图的斜率为



$$k = \frac{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2} \quad (6)$$

$k$  的值原则上可以只通过两组数据即可求出,所以自由度为 2。由于  $x_i$  与  $y_i$  均存在不确定度,根据不确定度计算公式,泊松比  $k$  的不确定度等于它对所有项的偏导与所有项的不确定度的平方和的开方,即

$$s(k) = \sqrt{\frac{1}{n-2} \left( \sum \left( \frac{\partial k}{\partial x_i} \right)^2 s^2(x_i) + \sum \left( \frac{\partial k}{\partial y_i} \right)^2 s^2(y_i) \right)} \quad (7)$$

化简可得

$$s(k) = \frac{\sqrt{\left( \sum (y_i - \bar{y}) \sum (x_i - \bar{x})^2 - 2 \sum (x_i - \bar{x}) \sum (x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y}) \right) s^2(x_i) + \sum (x_i - \bar{x}) \sum (x_i - \bar{x})^2 s^2(y_i)}}{\sqrt{n-2} \sum (x_i - \bar{x})^2} \quad (8)$$

### 2.3 实验过程

(1) 准备适用于单向拉伸的铝合金试件,并对电子引伸计进行检定;

(2) 制作散斑:在试件的一面上,先喷涂一层均匀的白色哑光漆作为底色,再用黑色哑光漆喷涂一层均匀的、灰度对比度高的黑色散斑<sup>[12]</sup>,如图 4 所示;



图 4 喷涂散斑后的试件

Fig. 4 Specimen after painting speckles

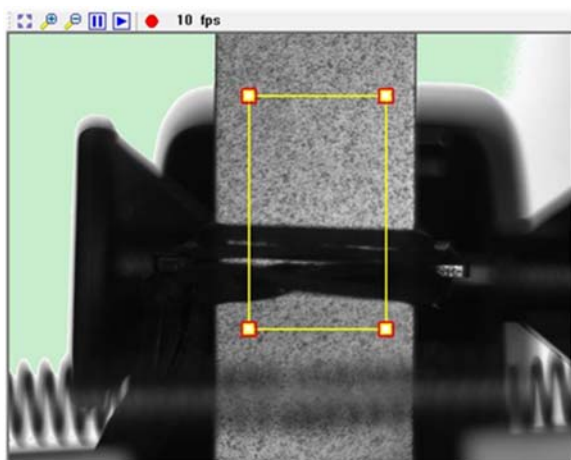


图 6 视频引伸计选取标记点示意图

Fig. 6 Methods of marks of video extensometer

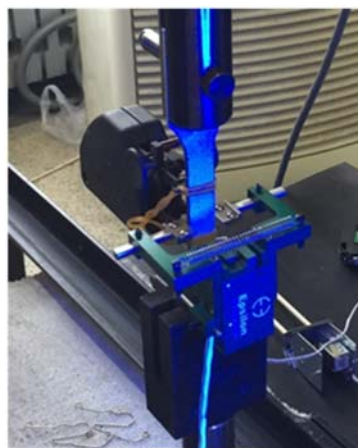


图 5 试验台与电子引伸计示意图

Fig. 5 Test bed and electronic extensometers

(3) 搭建试验台,先用夹具对试件进行固定,安装轴向、横向电子引伸计,二者的空间关系如图 5 所示。再搭建视频引伸计,调整接触式引伸计的位置,使得 CCD 能够清晰显示目标区域(如图 6);对于电子引伸计的控制端输入标距大小,使得位移信号转化为应变信号。

(4) 对试件进行拉伸,加载速度 1mm/min,同时引伸计对试件的纵横应变进行记录。其中视频引伸计选择跟踪目标区域四个角点进行计算,跟踪点的图像子区大小选择为  $41 \times 41$  pixel,图像采集速率设为每秒 10 帧。本实验只选取弹性段进行研究,即试件应力刚达到下屈服极限即停止拉伸<sup>[13]</sup>;

(5) 重复实验,并对引伸计测得数据进行

处理。

3 结果

拉伸实验中,通过电子引伸计、视频引伸计可以实时测得加载时刻每一点所对应的横纵应变。将两组应变对应的加载起始与结束时间对应起来,即可对应变测试结果进行比较。电子引伸计与视频引伸计的横、纵应变—时间关系如图 7 所示。测量过程中的最大应变值以及不确定度如表 4 所示,其中 A 类不确定度的计算来自于实验数据统计,B 类不确定度的计算来自于历史检定所得的数据<sup>[15]</sup>。同时将加载过程中应变误差的标准差也进行了比较,如图 8 所示。

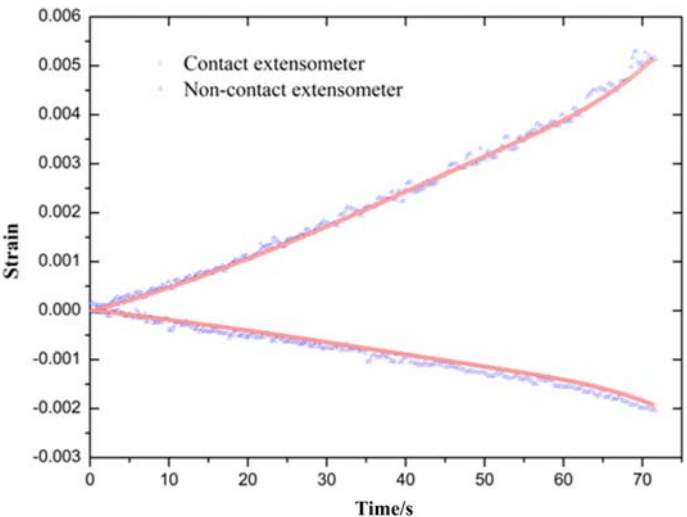


图 7 视频引伸计与电子引伸计横纵应变随时间变化图

Fig. 7 Longitudinal and transversal strain curves with time tested by video extensometer and electronic extensometer

表 4 非接触式引伸计与接触式引伸计最大纵应变与最大横应变的误差比较(单位:微应变)  
Tab. 4 Maximum longitudinal and transversal strain value and its error (unit: microstrain)

|        |       | 最大应变值 | A 类不确定度 | B 类不确定度 | 合成不确定度 |
|--------|-------|-------|---------|---------|--------|
| 纵向最大应变 | 视频引伸计 | 5073  | 47      | 79      | 92     |
|        | 电子引伸计 | 5060  | 10      | 50      | 51     |
| 横向最大应变 | 视频引伸计 | −1875 | 56      | 130     | 142    |
|        | 电子引伸计 | −1800 | 10      | 100     | 101    |

整体上看,两种引伸计测量的数据呈现出如下的规律:电子引伸计所得数据比较连续,标准差小,拟合系数较高;而视频引伸计所得数据相对比较分散,标准差大,拟合系数相对较低。两者数据相对平均误差比较小,轴向误差低于 1.5%,横向误差低于 5%。电子引伸计的标准差明显小于视频引伸计,随着温度升高,这种优势还会逐渐扩大。所以,在电子引伸计工作温度范围内,电子引伸计在稳定性方面更有优势。

两种引伸计的应变测量结果存在一定差异,其中横向应变测量结果中视频引伸计示数要大于电子引伸计的示数,而这一现象在本实验中是普遍存在的。本文将两种引伸计同一时间下测量的横纵应变点进行了线性拟合,如图 9 所示。结果表明,视频引伸计测得的应变对应力的变化率要比电子引伸计测得的变化率大 10%左右。造成这一现象的原因可能在于试件倾斜、存在离面位移以及镜头畸变的影响。尽管本视频引伸计选用的是畸变影响可忽略的双远心镜头,可镜头畸变是普遍存在于成像系统中的<sup>[14]</sup>。因为试件一般位于取景区域的正上方或正下方,所以横向应变产生的畸变比较大。这些因素也造成了视频引伸计测得的泊松比普遍偏大,如图 10。

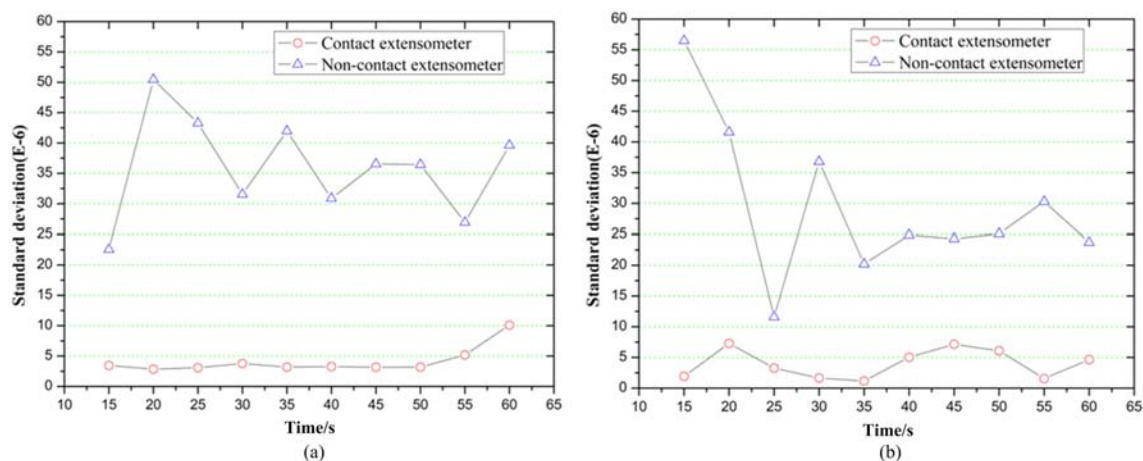


图 8 纵应变(a)与横应变(b)在各点的标准差

Fig. 8 Standard deviation of longitudinal strain (a) and transversal strain (b)

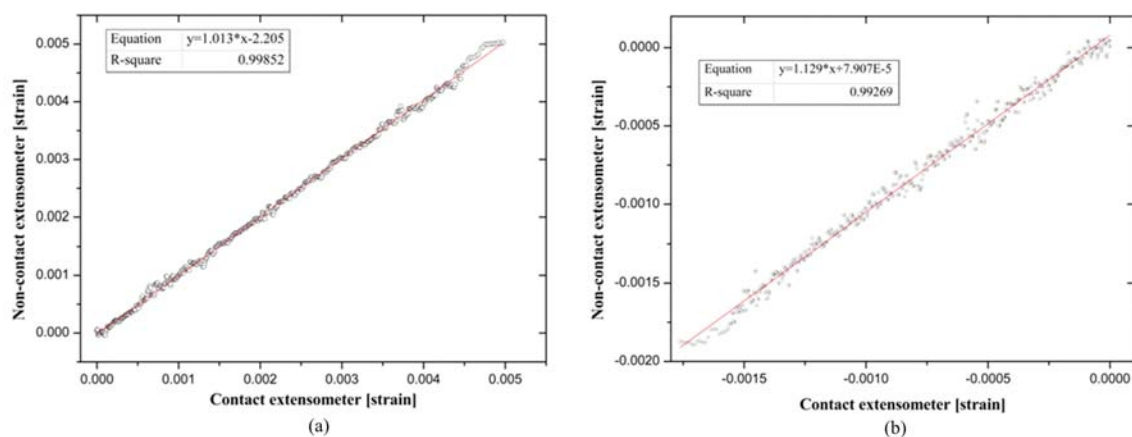


图 9 两种引伸计测量纵向应变(a)、横向应变(b)的拟合图

Fig. 9 Liner fitting of longitudinal strain (a) and transversal strain (b) tested by contact and non-contact extensometers

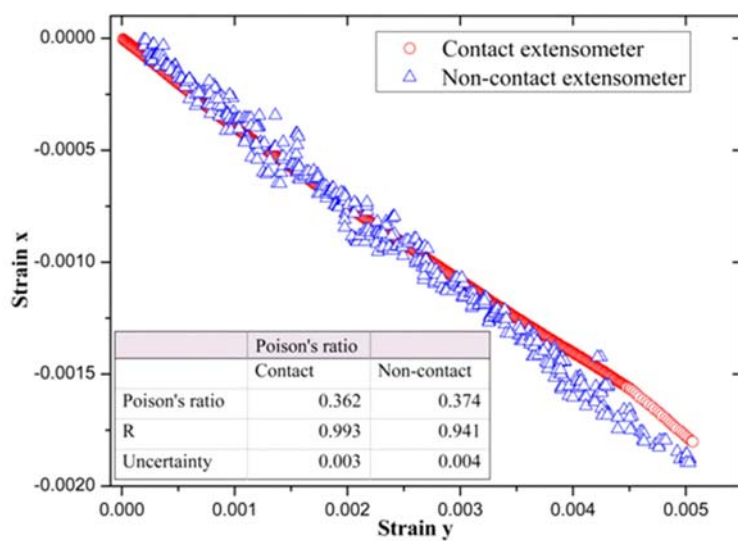


图 10 两种引伸计测量纵横应变关系图

Fig. 10 Horizontal and vertical strain tested by two extensometers



## 4 结论

本文将目前能够充分代表最高精度的视频引伸计即以数字图像相关方法(DIC)为原理、采用IC-GN的亚像素搜索算法、配有双远心镜头的视频引伸计,与已经在工业中应用成熟的电阻应变式电子引伸计从基本原理和测量精准度等方面进行了比较,主要结论如下:

接触式引伸计与非接触式引伸计在原理上存在较大差别,接触式引伸计通过夹持、卡住、粘贴等方式固定到试件表面的两点来追踪位移,非接触式引伸计通过识别试件表面两点的灰度矩阵或特征来追踪位移。功能上非接触式引伸计在力学测试中比接触式引伸计有着更广的适用范围,可适用于光滑表面、过大过小试件、非均匀应变等复杂情况。接触式引伸计有着更好的稳定性,数据波动非常小,对于承受范围内的高温应变测量具有更好的准确性。

视频引伸计对于应变的分辨力要超过电子引伸计,但是数据连续性要差于电子引伸计。所以对比两者不确定度的来源,视频引伸计主要来源于数据的波动,而电子引伸计主要来源于分辨率低。总体来讲,电子引伸计精度要略高于视频引伸计,但两者A类不确定度相差在五倍以内,可认为基本在同一量级上。精度方面,电子引伸计相比于视频引伸计已经没有显著的优势。

无论是接触式的电子引伸计还是非接触式的视频引伸计,都能很好地完成对两点间应变的测量。两者纵向应变测量值十分接近,对横向测量值来说视频引伸计的绝对值要大于电子引伸计的测量值。造成这一结果的原因可能与镜头畸变与试件倾斜有关。这导致两者在测量纵向应变时比较接近,在测量泊松比方面DIC引伸计测量值略大于电子引伸计。

### 参考文献:

- [1] Pan B, Yu L, Yuan J, et al. Determination of viscoelastic Poisson's ratio of solid propellants using an accuracy-enhanced 2D digital Image correlation technique[J]. Propellants Explosives Pyrotechnics, 2015, 40(6):821-830.
- [2] Viveiros M, Lin Z C. Comparison of a video extensometer over a clip-on extensometer and crosshead motion as a strain measurement technique for testing nitinol specimens[C]//International Conference on Shape Memory and Superelastic Technologies, 2008:197-206.
- [3] Xavier J, Custodio J, Morais J, et al. Assessing mechanical properties of a polymer material by a video extensometer technique[C]//In: Proc of 7th Euromech. Lisbon, Portugal, 2009:253-260.
- [4] Pan B, Tian L. Advanced video extensometer for non-contact, real-time, high-accuracy strain measurement[J]. Optics Express, 2016, 24(17):19082-19093.
- [5] 胡国华, 艾彦, 唐亮. 引伸计的过去和现在[J]. 理化检验:物理分册, 2011(2):67-71 (HU Guohua, AI Yan, TANG Liang. The past and present of extensometers[J]. Physics and Chemistry Examine: Physics Part, 2011(2):67-71 (in Chinese))
- [6] <http://strain.instron.com/zh-cn/ways-to-measure-strain>
- [7] 刘美. 视频引伸计系统研发[D]. 长春:吉林大学, 2015:1-7 (LIU Mei. The Research and development of video extensometer system[D]. Changchun: Jilin University, 2015:1-7 (in Chinese))
- [8] Völkl R, Fischer B. Mechanical testing of ultra-high temperature alloys[J]. Experiment Mechanics, 2004, 44(2):121-127.
- [9] Motra H B, Hildebrand J, Dimmig-Osburg A. Assessment of strain measurement techniques to characterise mechanical properties of structural steel[J]. Engineering Science & Technology An International Journal, 2014, 17(4):260-269.
- [10] Jenner F, Walter M E, Iyengar R M, et al. Application of high-speed video extensometry for high-temperature tensile characterization of boron heat-treated steels[J]. Journal of Strain Analysis for Engineering Design, 2014, 49:378-387.
- [11] 邓玉湖. 引伸计示值误差测量不确定度评定[J]. 计量与测试技术, 2015(10):96-97 (DENG Yuhu. The uncertainty evaluate of extensometers measurement errors[J]. Measurement and Test Technology, 2015(10):96-97(in Chinese))

- [12] Hao W F, Ge D Y, Ma Y J, et al. Experimental investigation on deformation and strength of carbon/epoxy laminated curved beams[J]. *Polymer Testing*, 2012, 31(4):520—526.
- [13] 郝文峰, 郭广平, 陈新文, 等. 基于数字图像相关方法的复合材料层间剪切性能研究[J]. *玻璃钢/复合材料*, 2016(1): 29—32 (HAO Wenfeng, GUO Guangping, CHEN Xinwen, et al. Composite interlayer shear performance study based on digital image correlation method[J]. *Journal of FRP/Composite Materials*, 2016(1): 29—32 (in Chinese))
- [14] 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.
- [15] 王博, 俞立平, 潘兵. 数字图像相关方法中匹配及过匹配形函数的误差分析[J]. *实验力学*, 2016, 31(3):291—298 (WANG Bo, YU Liping, PAN Bing. Matching and the matching error analysis of the shape function in digital image correlation method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2016, 31(3):291—298 (in Chinese))

## Comparison of measurement precision of strain and Poisson's ratio using contact and non-contact extensometer

ZHANG Yue<sup>1</sup>, PAN Bing<sup>2</sup>, GUO Guang-ping<sup>1</sup>, ZHAO Peng-tao<sup>1</sup>

(1. Aviation Key Laboratory of Science and Technology on Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Beijing Key Laboratory of Aeronautical Materials Testing and Evaluation, Science and Technology on Advanced High Temperature Structural Materials Laboratory, Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China; 2. School of Aeronautical and Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

**Abstract:** Contact type electronic extensometer and non-contact video extensometer are nowadays two major strain measurement techniques in material mechanical property measurement. Both extensometers have entirely different measurement principles and respective advantages and disadvantages. A systematic performance comparison between an advanced video extensometer which is newly developed based on digital image correlation (DIC) method and a commercial contact type electronic extensometer is presented in this paper. Standard aluminum plate sample uniaxial tensile experiment was designed and carried out to quantitatively compare the longitudinal and transverse strain and Poisson's ratio measurement results obtained by using two kinds of extensometers. Comparison results show that both measured longitudinal strain results are relatively close. Contact type extensometer has slightly better precision, but the uncertainty of two kinds of extensometer is at the same order of magnitude. Taking into account of the convenient use of video extensometer, applicable measurement objects and wide range of measurement, video extensometer has broader application prospect.

**Keywords:** Digital Image Correlation(DIC); video extensometer; strain; Poisson's ratio; uncertainty