

应用数字图像相关方法测试航空复合材料的弹性常数

Measurement of Elastic Constants for Aviation Composite Materials Using Digital Image Correlation Method

吉建民^{1,2}, 陈金龙¹, 郭广平², 陈新文², 王翔²

(1 天津大学 力学系, 天津 300072; 2 北京航空材料研究院, 北京 100095)

Ji Jian-min^{1,2}, CHEN Jin-long¹, GUO Guang-ping², CHEN Xin-wen², WANG Xiang²

(1 Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

2 Beijing Institute of Aeronautical Materials, Beijing 100095, China)

摘要: 通过数字图像相关方法对三种航空复合材料的弹性常数进行了测试。通过对 DICM 理论分析, 依据 ASTM 标准提出合理的测试方案使得 DICM 的应变测试精度达到 $25\mu\epsilon$, 满足航空复合材料测试要求。同时应用 DICM 和电测法对比测试了三种不同航空复合材料的弹性常数, 实验结果表明这两种方法得到的实验结果相对误差较小, 应力-应变曲线基本重合, DICM 能够很好地反映航空复合材料的应变响应和精确测试其弹性常数。

关键词: 数字图像相关; 航空复合材料; 弹性常数; 应变测试精度

doi: 10.3969/j.issn.1001-4381.2013.10.014

中图分类号: TB332; O348.1 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-4381(2013)10-0080-06

Abstract: The elastic constants for three kinds of aviation composite materials were measured using digital image correlation method (DICM) and the feasibility of DICM measuring elastic constants for aviation composite materials detailedly was studied. By theoretical analysis of DICM and proposing measuring method according to ASTM, the strain measurement precision could reach $25\mu\epsilon$. It meets the test requirement of aviation composite materials. The elastic constants for three different composite materials were measured by DICM and strain gauge method simultaneously, the results of the two methods are consistent. It demonstrates that DICM can measure the strain of aviation composite materials accurately.

Key words: digital image correlation; aviation composite material; elastic constant; strain measurement precision

随着中国航空工业的发展, 航空新材料的研制和应用越来越多, 而复合材料具有高比强度、高比模量、可设计性、成本较低等优点, 近年来在航空领域得到广泛应用, 因此对新型航空复合材料的力学行为研究更显得尤为重要^[1-3]。弹性常数是材料的固有属性, 是表征材料力学行为的基本参数。测试弹性常数的准确度取决于应变的测试精度, ASTM 标准对此有着很高要求, 其常用弹性常数测试方法为引伸计法和电测法两种接触式方法^[4,5]。引伸计有容易打滑、试样很小导致难以装卡、容易损伤试件、其自重和夹持力会引起试件的附加变形和不易测试压缩变形等缺点。而电测法有应变片易粘贴不牢、

引入附加贴片刚度、一次性使用、成本高等缺点。光学测量是一种非接触式测量方法: 徐莹等^[6]应用数字全息干涉法测量材料的泊松比; 李禾等^[3]应用云纹干涉法测量几种航空材料的弹性常数。但这些方法有以下缺点: 光路复杂、试件制备复杂、对测试环境要求高。数字图像相关方法 (Digital Image Correlation Method, DICM)^[7-9]具有非接触、光路简单、对测量环境要求低、全场测量、测量视场可调、自动化程度高等优点, 因此广泛应用于材料的多尺度力学行为测试^[10]。目前也有不少学者利用 DICM 测量材料的弹性常数^[11-13]。但很少有人对 DICM 的应变测试精度从理论和实验上进行系统的研究, 而根据

ASTM 标准分析其测试材料弹性常数的可行性研究更是鲜见报道。本工作首先介绍 DICM 基本原理并从理论上分析其应变测试精度,根据 ASTM 标准提出一种适合航空复合材料的弹性常数测试方案;应用 DICM 和电测法同时对航空复合材料进行拉伸和压缩实验,通过比较分析两种方法的实验结果,研究 DICM 应用到航空复合材料应变响应和弹性常数测试的可行性。

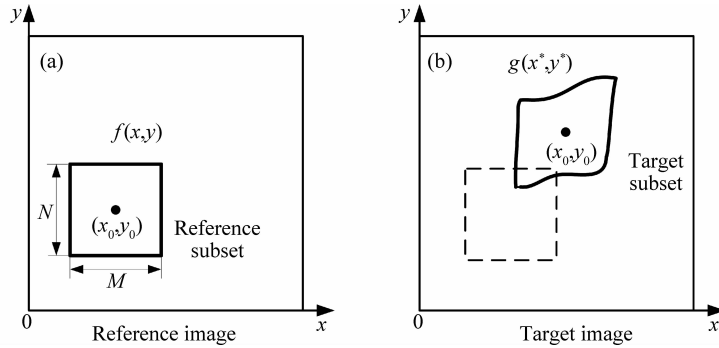


图 1 数字图像相关原理示意图 (a)参考图像;(b)目标图像

Fig. 1 Basic principle of digital image correlation method (a)reference image;(b)target image

假设参考图像灰度分布函数为 $f(x, y)$, 目标图像灰度分布函数为 $g(x^*, y^*)$ 。对于参考图像任意点 (x, y) , 有式(1):

$$\begin{cases} x^* = x + u(x, y) \\ y^* = y + v(x, y) \end{cases} \quad (1)$$

式中: u, v 是参考图像中点 (x, y) 在 x, y 方向的位移; (x^*, y^*) 是点 (x, y) 变形后的位置坐标。在参考图像中选择尺寸为 $M \times N$ 的子区如图 1 所示, 根据位移场的连续性假设, 位移 u, v 可以表示成式(2):

$$\begin{cases} u(x, y) = u_0 + \frac{\partial u}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial u}{\partial y} \Delta y \\ v(x, y) = v_0 + \frac{\partial v}{\partial x} \Delta x + \frac{\partial v}{\partial y} \Delta y \end{cases} \quad (2)$$

式中: $u(x, y), v(x, y)$ 表示子区内任意点 (x, y) 在 x, y 方向的位移; u_0, v_0 为中心点在 x, y 方向的位移; $(\partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)$ 为位移的一阶导数; $\Delta x, \Delta y$ 为点 (x, y) 到子区中心点 (x_0, y_0) 的距离。

选择归一化最小平方距离相关函数如式(3)所示对变形前后的子区进行匹配:

$$C_{ZNSSD}(\vec{p}) = \sum \left[\frac{f(x, y) - f_m}{\sqrt{\sum [f(x, y) - f_m]^2}} - \frac{g(x^*, y^*) - g_m}{\sqrt{\sum [g(x^*, y^*) - g_m]^2}} \right]^2 \quad (3)$$

式中: $f_m = \frac{1}{M \times N} \sum [f(x, y)]$, $g_m = \frac{1}{M \times N}$

1 数字图像相关方法

1.1 DICM 基本原理

数字图像相关方法(DICM)的实质是在试件表面变形过程中,通过匹配试件变形前后的散斑图像子区来跟踪散斑点的运动,最终获得试件的表面变形信息。通常将试件变形前的图像称作参考图像,变形后的图像称作目标图像。在图像上建立如图 1 所示坐标系。

$\sum [g(x^*, y^*)]$ 分别为参考图像与目标图像子区灰度平均值。将子区的变形假设代入式(1)再代入式(3),相关函数 $C_{ZNSSD}(\vec{p})$ 即成为关于中心点的变形参数 $\vec{P} = (u_0, v_0, \partial u / \partial x, \partial u / \partial y, \partial v / \partial x, \partial v / \partial y)$ 6 个参数的函数。当 $C_{ZNSSD}(\vec{p})$ 取最小值时,变形前后两子区最为匹配,即:

$$\nabla C_{ZNSSD}(\vec{p}) = \left[\frac{\partial C}{\partial p_i} \right]_{i=1, \dots, 6} = 0 \quad (4)$$

利用牛顿迭代法求解方程(4),即测试得到的子区中心的位移和变形。依据小变形假设,子区内的应变信息可以表示为式(5)。

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{\partial u}{\partial x} \\ \epsilon_y = \frac{\partial v}{\partial y} \\ \tau_{xy} = \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{cases} \quad (5)$$

1.2 应变测试精度理论分析

由上面叙述可知 DICM 可以直接测得试件表面全场位移和应变。根据文献[8],在良好的实验条件下, DICM 直接获得位移精度可达到 0.01pixel,应变测试精度可达到 100 $\mu\epsilon$;实际上在具体实验过程中影响 DICM 测试精度的因素很多,主要有图像采集系统内部噪声、镜头畸变、光照不均匀、光轴不垂直于试件表面等。

为了得到较高的测试精度,需要在试样表面喷制散斑,目的是使试样表面散斑的随机性和对比度增大,便于试样变形前后散斑点的精确匹配。图 2 为 DICM 拍

摄的航空复合材料 5228A/CCF300 的 0°拉伸试样不受载情况下任意不同时刻的两张图像,应用 DICM 测试两张图片的相对变形来分析其测试精度,如表 1 所示。

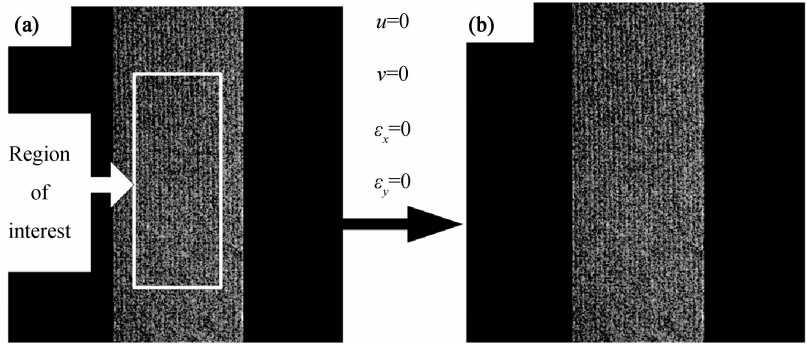


图 2 未施加载荷的条件下,不同时刻的散斑图
(a) $t=0$;(b) $t=10\text{s}$

Fig. 2 In the condition of no applied load, the two images at different time (a) $t=0$;(b) $t=10\text{s}$

表 1 测试结果
Table 1 The test results

	Transverse displacement/ pixel	Longitudinal displacement/ pixel	Transverse strain/ $\mu\epsilon$	Longitudinal strain/ $\mu\epsilon$
Max	0.0092	0.0059	158	241
Min	-0.0082	-0.0042	-96	-164

根据表 1, DICM 的位移测试精度可达到 0.01pixel,直接测得的应变精度为 $200\mu\epsilon$ 左右,而根据 ASTM 测试航空材料弹性常数时引伸计应达到 B1 级,应变精度为 $100\mu\epsilon$ 。显然 DICM 直接测得的应变精度偏低。

由于纤维增强复合材料为正交各向异性,其在拉伸和压缩实验中,任一点的应变基本相同。根据引伸计的基本原理,通过 DICM 测得标距两端点的位移来获得试件的平均应变,可以明显提高应变的测试精度。其基本原理如图 3 所示;按式(6)求出试件的轴向应变和横向应变。

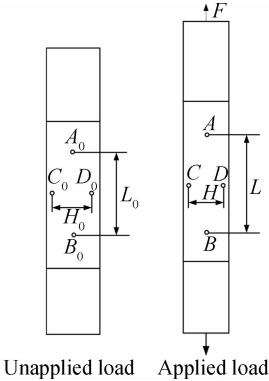


图 3 平均应变测试原理示意图
Fig. 3 The schematic of average strain test

伸计 B1 级测试精度;通过上述改进方案说明 DICM 具有较高的应变测试精度;因此通过理论分析, DICM 采用上述测试方案可以用来测试航空复合材料的弹性常数。

2 实验

2.1 试件制备

本研究选取了北京航空材料研究院生产的单向碳纤维增强复合材料和碳纤维织物增强复合材料,其参数如表 2 所示。为了对材料的应变响应进行对比,对试样的应变同时采用 DICM 和电测法进行测试。在试件表面粘贴应变片, DICM 需要在试样表面喷制散斑,散斑如图 4 所示。为了使得两者试验数据具有可比性,应变片粘贴位置应位于图像采集区域中间。

$$\begin{cases} \epsilon_x = \frac{H - H_0}{H_0} = \frac{u_D - u_C}{H_0} \\ \epsilon_y = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{v_A - v_B}{L_0} \end{cases} \quad (6)$$

式中: H_0, L_0 为横向平均应变与轴向平均应变的测试标距; u_C, u_D 为 C_0, D_0 横向位移; v_A, v_B 为 A_0, B_0 轴向位移。

若散斑图为 $1024\text{pixel} \times 1024\text{pixel}$,可取 $L_0, H_0=800\text{pixel}$,位移测试精度为 $\Delta u=0.01\text{pixel}$ 则平均应变测试精度为 $\Delta\epsilon=2 \times \Delta u/800=25\mu\epsilon$,其高于引

表 2 试件参数
Table 2 The parameters of samples

Specimen number	Material	Fiber form	Loading method
1	5228A/CCF300	Unidirection	0° tension
2	5224/CCF300	Unidirection	0° tension
3	5228A/CF3031	Fabric	0° tension

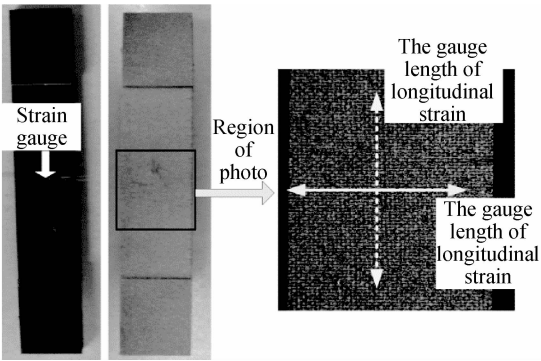


图 4 试件制备与图像采集区域

Fig. 4 The samples preparation and the area of image acquisition

2.2 实验设备及实验过程

拉伸和压缩实验均在 INSTRON 5882 电子万能试验机上进行,拉伸实验按 ASTM D3039 标准^[14]、压缩实验按 ASTM D6641 标准^[15]进行。应变仪选用 DH5922 动态应变仪,应变片为中航电测生产的 BE (BA) 120-3AA 应变片。图像采集所用 CCD 为 up1830 型,图像的尺寸为 1024pixel×1024pixel,实验装置如图 5 所示。

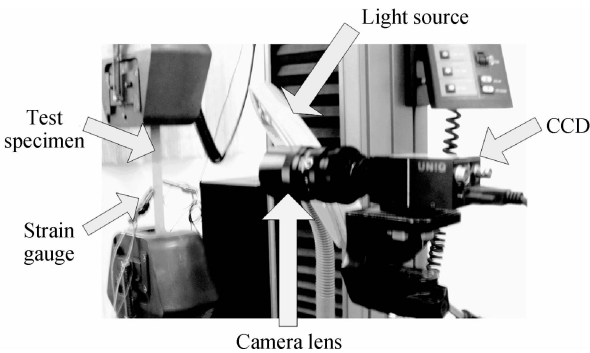


图 5 DICM 测试装置

Fig. 5 The experiment setup of DICM

在实验过程中,CCD、应变仪和拉伸试验机数据采集频率都设为 5Hz;实验时 CCD 与实验机同时进行采集数据。加载速率为 1mm/min,图像采集区域如图 4 所示。本实验通过拉伸实验测试材料拉伸弹性模量和泊松比,通过压缩实验测试材料的压缩弹性模量。

3 实验结果与分析

3.1 应变测试精度实验分析

将 DICM 测得数据与电测法所得数据进行比较分析。图 6 为三根试样实验中 DICM 与电测法的应变测试结果。从图 6 (a)~(c)可以看出在试样 1 和试样 2 承受单向拉伸实验过程中,电测法和 DICM 两种方法测得的纵向应变-应力曲线和横向应变-应力曲线基本重合,DICM 测得的应力-应变曲线的线性性相对更好;但由于试样在初始受载时,试样与实验机夹头之间存在微小滑动,使得曲线初始阶段误差相对较大,两者相对误差在 200μ ϵ 以内,随着应变增大,应变相对误差在 100μ ϵ 以内。图 6 (d)中应变越大相对误差越大,最大误差达到 200μ ϵ 左右,这是由于水平应变片与试件轴线不垂直所致。从图 6 (e)可以看出试样 3 在单向受压时,DICM 与电测法测得的应变曲线吻合较好,但由于试样在 ASTM D6641 下实验时,实验工装夹具比较复杂导致光照不均匀;且试样工作段只有 12.7mm,所使用的镜头的放大倍数有限使得平均应变测试标距只有 360pixel;这些导致 DICM 的应变测试精度下降,表现在压缩实验时 DICM 测得的应变-应力曲线初始部分与电测法存在偏差较大,相对误差在 200μ ϵ 以内。实际上电测法测得应变也有一定的误差,其误差约为±30μ ϵ 且应变片可能与试件轴线不平行导致误差变大。通过上述实验说明 DICM 可以很好地反映航空复合材料的应变响应,且精度完全满足实验要求。

3.2 弹性常数的测定

通过对 DICM 所测得轴向应力-轴向应变曲线线性拟合得到材料的弹性模量;对横向应变-轴向应变曲线线性拟合得到材料的泊松比。

ASTM D3039 和 D6641 规定在计算复合材料弹性常数时,推荐应变取值大于 1000μ ϵ ,所以对轴向应变 $\epsilon \geq 1000\mu\epsilon$ DICM 测得的轴向应力-轴向应变数据点进行线性拟合获得材料的弹性模量,如图 7 所示;并对对应区域内的横向应变-轴向应变数据点线性拟合获得材料的泊松比,如图 8 所示;测得的弹性常数如表 3 所示。从表 3 可以看出复合材料受拉伸时,DICM 测得的拉伸弹性模量与电测法测得数据吻合较好,二者相对误差不超过 3.7%,DICM 能够很好地反应材料的应变响应;DICM 测得的泊松比与电测法得到的数据基本一致,但由于泊松比数值较小,显得相对误差略大。在复合材料受压时,由于工装夹具导致光照不均匀,试样工作段太小导致平均应变测试标距较小,最终使得 DICM 测得的压缩模量与电测法得到的数据

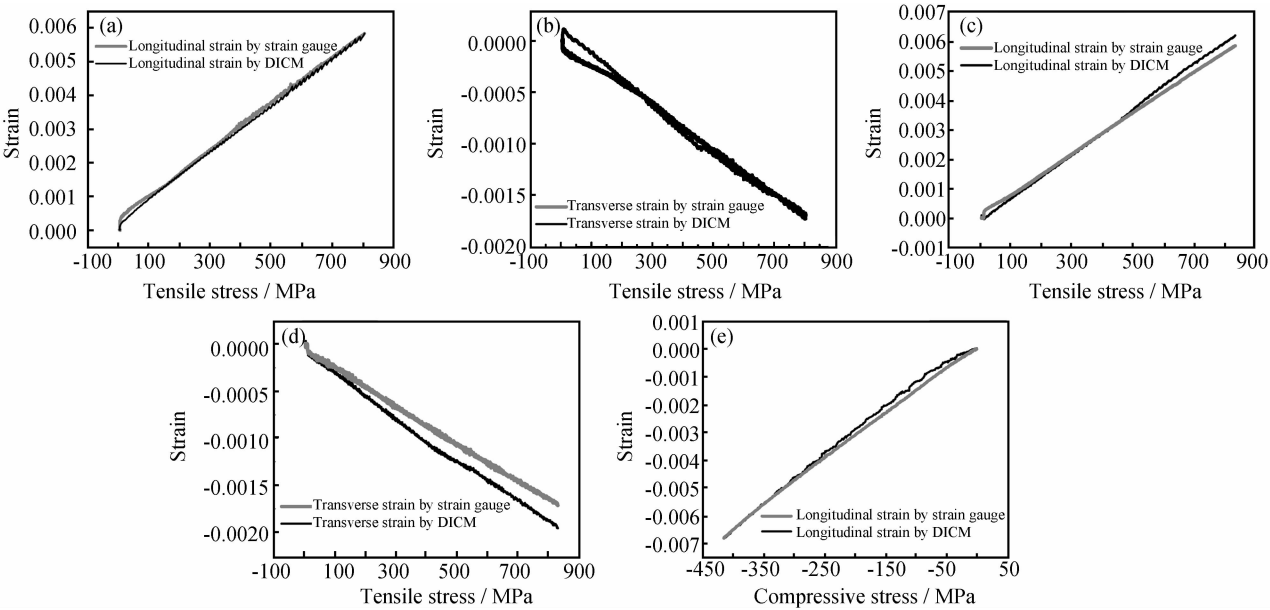


图 6 应变精度分析 (a)试件 1 纵向应变;(b)试件 1 横向应变;
(c)试件 2 纵向应变;(d)试件 2 横向应变;(e)试件 3 纵向应变
Fig. 6 The analysis of the precisions of strain (a)longitudinal strain of specimen 1;
(b)transverse strain of specimen 1;(c)longitudinal strain of specimen 2;
(d)transverse strain of specimen 2;(e)longitudinal strain of specimen 3

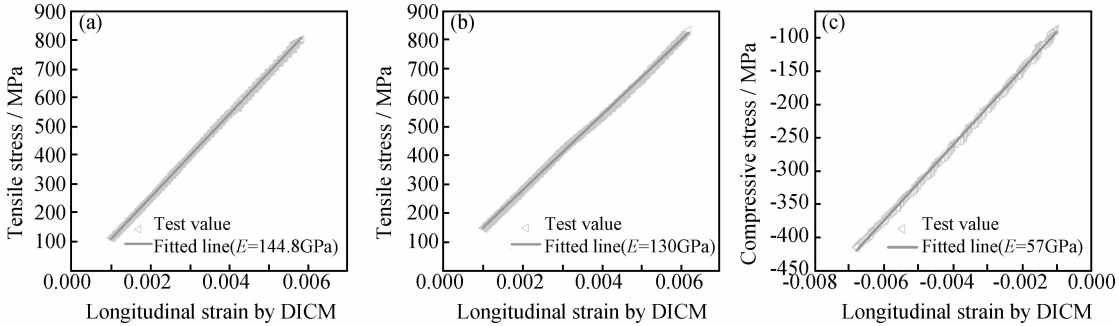


图 7 轴向应力-纵向应变曲线 (a)试件 1;(b)试件 2;(c)试件 3
Fig. 7 The stress-longitudinal strain curves (a)specimen 1;(b)specimen 2;(c)specimen 3

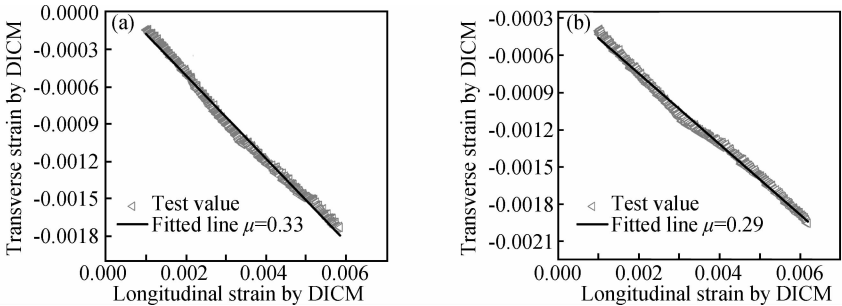


图 8 横向应变-纵向应变曲线 (a)试件 1;(b)试件 2
Fig. 8 The transverse strain-longitudinal strain curves (a)specimen 1;(b)specimen 2

相比略小,但相对误差不超过 7%,这对于复合材料压缩实验是可以接受的。通过对弹性模量和泊松比的计算进一步说明了 DICM 可以精确测试航空复合材料

的弹性常数。

3.3 分析与讨论

实验过程中影响数字图像相关方法测试精度的因

表 3 测得的弹性常数比较

Table 3 The comparison of the measured elastic constants

Specimen number	Elastic modulus measured by DICM/GPa	Elastic modulus measured by strain gauge/GPa	Relative errors of elastic modulus/%	Poisson's ratio measured by DICM	Poisson's ratio measured by strain gauge	Relative errors of Poisson's ratio/%
1	144.8	144	0.56	0.33	0.31	6.5
2	130	135	3.70	0.29	0.29	0
3	57	61	6.60	—	—	—

素很多,主要有图像采集系统内部噪声、镜头畸变、光照不均匀、光轴不垂直于试件表面等。所以在具体测量过程中更好地排除或减小这些因素影响,可提高应变测试精度,使得该方法测量材料弹性常数的精度更高。

4 结论

(1)根据 ASTM 标准提出一种基于引伸计原理的材料弹性常数测试方案,基于此方案 DICM 应变测试精度可达到 25με,完全满足航空复合材料弹性常数的测试精度要求。

(2)应用 DICM 和电测法同时对航空复合材料进行拉伸和压缩实验,两种方法的实验结果相当吻合,相对误差在实验允许范围之内,进一步证明了 DICM 基于本研究提出的测试方案能够很好地测试航空复合材料的弹性常数。

(3)为进一步提高航空复合材料弹性常数测试精度,可以通过提高 CCD 分辨率、增大平均应变计算标距,从而提高应变测试精度来实现。

参考文献

[1] 张国栋,苏彬,王泓,等. 弹性模量对低周疲劳性能参数的影响[J]. 航空动力学报,2005,20(5):768—771.
ZHANG G D, SU B, WANG H, et al. Effect of elastic modulus on parameter of low cycle fatigue performance [J]. Chinese Journal of Aerospace Power, 2005,20(5):768—771.

[2] 郭成,董伟,臧顺来,等. 弹性模量与塑性变形变化规律实验研究[J]. 锻压技术,2008,33(2):116—119.
GUO C, DONG W, ZANG S L, et al. Experimental study on variation law of Young's modulus and plastic deformation [J]. Forging and Stamping Technology, 2008,33(2):116—119.

[3] 李禾,严超华,李仁增,等. 云纹干涉法测定高温材料弹性模量及泊松比[J]. 机械强度,2004,26(3):302—306.
LI H, YAN C H, LI R Z, et al. Measuring elastic modulus and poisson ratio for high-temperature materials by moiré interferometry [J]. Journal of Mechanical Strength, 2004,26(3):302—306.

[4] ASTM E132-04, standard test method for Poisson's ratio at room temperature[S].

[5] ASTM E11-04, standard test method for Young's modulus, Tangent modulus, and Chord modulus [S].

[6] 徐莹,赵建林,范琦,等. 利用数字全息干涉术测定材料的泊松比

[J]. 中国激光,2005,32(6):787—790.

XU Y, ZHAO J L, FAN Q, et al. Determination of the Poisson's ratio of material by digital holographic interferometry [J]. Chinese Journal of Lasers, 2005,32(6):787—790.

[7] PETERS W H, RANSON W F. Digital imaging techniques in experimental mechanics [J]. Optical Engineering, 1982, 21(3): 427—431.

[8] 王怀文,亢一澜,谢和平. 数字散斑方法与应用研究进展 [J]. 力学进展, 2005, 35(2): 195—203.
WANG H W, KANG Y L, XIE H P. Advance in digital speckle correlation method and its application[J]. Advance in Mechanics, 2005, 35(2): 195—203.

[9] PAN B. Recent progress in image correlation [J]. Society for Experimental Mechanics, 2011, 51(7):1223—1235.

[10] CHENG J L, ZHANG X H, ZHAN N. Extend digital image correlation method for micro-region deformation [J]. Technological Sciences, 2011,54(6): 1355—1361.

[11] 张蕊,贺玲凤,胡斌. 数字图像相关测量钢绞线弹性模量的应用研究[J]. 工程力学, 2011, 28(9):251—256.
ZHANG R, HE L F, HU B. Elastic modulus measurement of strand wire by digital image correlation [J]. Engineering Mechanics, 2011,28(9):251—256.

[12] 赵巍,侯振德,任朝峰,等. 基于图像相关法的珊瑚羟基磷灰石材料静态力学性能[J]. 天津大学学报, 2008, 41(12):1422—1426.
ZHAO W, HOU Z D, REN C F, et al. Static mechanical properties of coralline hydroxyapatite using digital image correlation technique[J]. Journal of Tianjin University, 2008, 41(12):1422—1426.

[13] 曹小龙,谢勇,毕中臣,等. 应用数字图像相关法测量瓦楞原纸的泊松比[J]. 包装学报, 2011, 3(3):31—35.
CAO X L, XIE Y, BI Z C, et al. Use of digital image correlation for Poisson's ratio of corrugated paper [J]. Packing Journal, 2011, 3(3):31—35.

[14] ASTM D3039M-08, standard test method for tensile properties of polymer matrix composite materials[S].

[15] ASTM D6641M-01e1, standard test method for determining the compressive properties of polymer matrix composite materials using a combined loading compression (CLC) test fixture[S].

收稿日期:2012-04-24;修订日期:2012-07-09

作者简介:吉建民(1987—),男,硕士研究生,现从事光测力学与复合材料力学性能方面的研究,联系地址:天津市南开区卫津路 92 号天津大学力学系(300072),E-mail:huaian.jijianmin@163.com