

DOI: 10.13382/j.jemi.B1902873

复合柔性电子变形失配数字图像相关研究*

陈少轩 陈 诚 张宏儒
(天津商业大学机械工程学院 天津 300134)

摘 要:为了定量表征复合柔性电子相邻层变形失配程度,设计了一种基于数字图像相关(digital image correlation, DIC)的实验系统和变形失配评价方法。首先制备复合柔性电子样品,通过平移实验对实验系统进行验证,其次在不同温度下对样品进行单轴拉伸,计算 Von Mises 应变,最后通过定义图案化应变波动指数 P 来对变形失配程度进行表征。实验结果表明,实验系统平移误差在 1% 之内,满足变形测量要求。50 ℃ 下样品被拉伸 2 mm, Von Mises 应变最大值与最小值相差约 65%, 样品呈现出应变大小不均匀但应变分布均匀的变形失配。同一拉伸条件下,变形失配程度在 25℃ ~ 75℃ 变化较小, 100℃ 下变化明显,增加了近 60%, 该方法有效的表征了柔性电子变形失配程度。

关键词: 数字图像相关; 复合柔性电子; Von Mises 应变; 变形失配;

中图分类号: TN407 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 130.1515

Digital image correlation research on deformation mismatch of composite flexible electronics

Chen Shaoxuan Chen Cheng Zhang Hongru
(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

Abstract: In order to quantitatively characterize the degree of deformation mismatch of adjacent layers of composite flexible electronics, an experimental system based on digital image correlation (DIC) and a method of evaluating deformation mismatch are designed. First, a composite flexible electronic sample was prepared, and the experimental system was verified through translation experiments. Second, the sample was uniaxially stretched at different temperatures and the Von Mises strain was calculated. Finally, the degree of deformation mismatch was characterized by defining the patterned strain fluctuation index P . The experimental results showed that the translation error of the experimental system was within 1%, which meets the requirements of deformation measurement. The sample was stretched by 2 mm at 50 ℃, and the maximum and minimum strains of Von Mises differed by about 65%. The sample showed deformation mismatch with uneven strain value but uniform strain distribution. Under the same tensile conditions, the degree of deformation mismatch changed little from 25 ℃ to 75 ℃, and it changed significantly at 100℃, the increment was about 60%. This method effectively characterizes the degree of flexible electronic deformation mismatch.

Keywords: digital image correlation; composite flexible electronics; Von Mises strain; deformation mismatch

0 引 言

近年来,复合柔性电子已经在生产生活中逐步应用,如柔性太阳能电池、柔性力敏传感器和植入式营养监测

传感器等^[1-3]。这些电子器件在保持良好电学特性的同时,又实现了整体结构的延展性,进一步满足了应用对象复杂结构界面的需要。

复合柔性电子在经历复杂变形时,作为导线的可拉伸互连几乎吸收了全部的力学变形^[1]。研究人员设

计了波浪形、非共面网格形、蛇形线形和马蹄形等可拉伸互连结构^[4-7],通过有限元和实验测试等方法进行验证,发现二维图案结构更有优势^[8-9]。但是独特的几何结构使可拉伸互连具有复杂的形变规律^[10-11],集成在柔性基底上更是会发生磨损、分层等失效行为^[12-13]。而在已有的研究中,多数学者采用原位光学和扫描电子显微镜(SEM)观察复合柔性电子的分层,或者建立理论模型来说明复合界面的失效行为^[14-15]。然而这些工作对于复合柔性电子实际工况下的形变研究还略有不足,光学和扫描电镜的观测局限于可见的变形情况,模拟仿真的方法也不能完全说明复合柔性电子在实际载荷下真实的形变规律,缺少了变形过程中的实时检测。复合柔性电子具有多层结构,加工工艺的复杂性和不同材料之间力学性能的差异,会导致相邻层在形变过程中不可避免的出现变形失配,这对复合柔性电子界面失效行为有着十分重要的影响,因此本文设计一种非接触实时检测实验系统和高效的变形失配程度评价方法,对复合柔性电子发生可见失效之前的变形失配进行定量表征,为柔性电子系统强度设计提供了重要参考。

数字图像相关(DIC)方法是通过匹配物体变形前后图像的灰度信息,来计算形变过程中的应变与位移场,具有测量灵敏度高、全场实时测量等众多优点^[16-18]。在钢的带状结构微观变形检测、风电叶片全场变形测量和薄膜的热膨胀系数计算等众多领域中已经被成功运用^[19-21],针对本文复合柔性电子整体形变中相邻层变形失配的测量,更能发挥 DIC 方法高效、非接触检测等优势。

本文在聚二甲基硅氧烷(PDMS)基底上集成二维图案化金属制备样品,在 25 ℃~100 ℃下对样品进行单轴拉伸实验,采用 DIC 测量样品 Von Mises 应变场,通过定义和计算图案化应变波动指数 P ,定量表征了复合柔性电子相邻层变形失配程度。最后对结果进行分析,阐明了变形失配程度与拉伸距离及温度的变化关系,为复合柔性电子多层结构变形失配的研究提供了参考。

1 实验方案设计

1.1 样品制备

复合柔性电子样品的基本制作过程如图 1 所示。

1) 成膜,用丙酮和异丙醇清洗玻璃片,通过旋涂和 80 ℃烘烤使 PDMS 成膜,之后用紫外臭氧处理(UVO) PDMS 上表面,并旋涂聚酰亚胺(PI),梯度升温至 250 ℃烘烤成膜,最后在 PI 上溅射 5 nm Ti 和 100 nm Cu,并电镀 2 μm Cu 膜。

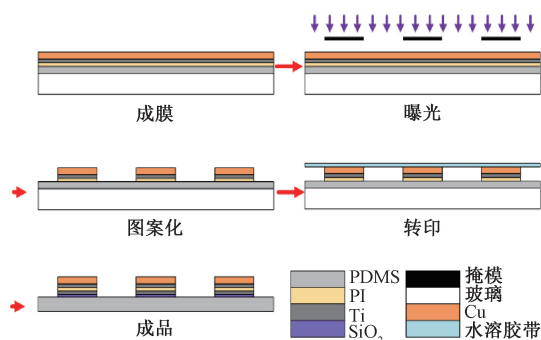


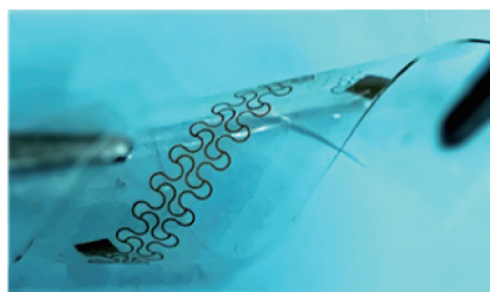
图 1 样品制备工艺示意图

Fig. 1 Schematic diagram of sample preparation process

2) 图案化,通过曝光和显影技术,使掩模版上的二维图案被复制到涂有光刻胶的薄膜上,最后利用刻蚀工艺将金属层图案化并清洗光刻胶。

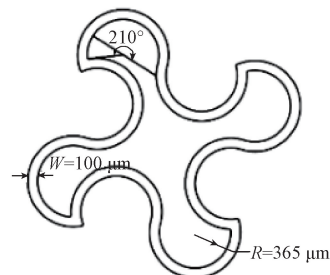
3) 转印,用水溶性胶带将二维马蹄形互连揭下,继续溅射 5 nm Ti 和 50 nm SiO₂,再和已经准备好的 200 μm 厚 PDMS 薄膜一起经 UVO 处理 20 min,最后贴合热压 20 min,清洗水溶性胶带,得到成品。

将制备的成品进行切割,得到一个完整的复合柔性电子样品,如图 2 所示,样品含有一条完整的图案化金属层。样品整体长为 40 mm,宽为 10 mm,PDMS 基底厚度为 200 μm,二维图案化金属层厚度约为 2 μm。图 2(a)所示为样品实物图,图 2(b)所示为二维图案结构的几何尺寸,图案宽度 $W = 100 \mu\text{m}$,弧半径 $R = 365 \mu\text{m}$,弧角 $\alpha = 210^\circ$ 。



(a) 样品实物图

(a) Sample photo



(b) 几何参数示意图

(b) Schematic diagram of geometric parameters

图 2 复合柔性电子样品图

Fig. 2 Composite flexible electronic sample diagram

1.2 实验系统设计

如图 3 所示,实验系统中包含精密移动平台,Linkam TST350 张力冷热台(温度控制精度为 0.1 ℃),三脚架,PointGray 工业 CCD 相机(GrasAS-50S5M-C,分辨率 1 624×1 224 pixels)和 Schneider Xenoplan 1:4 双远心镜头组成。在温度调控的过程中,通过 VarioCAM HD 红外热像仪精确监测目标温度,并在目标温度下保温 3 min 使样品受热均匀。

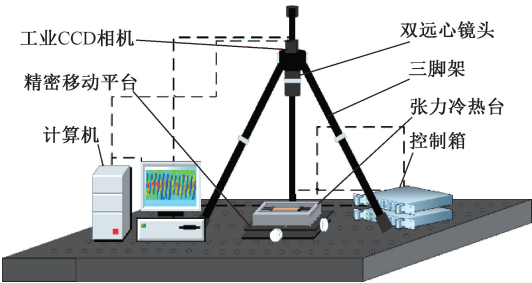


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the experimental system

1.3 平移验证实验

采用 Linkam TST350 张力冷热台,将制备带有散斑的 PDMS 薄膜沿拉伸方向等距离移动 6 次,每次移动 0.5 mm,采集每次移动之后的散斑图像,离面位移会严重影响实验图像的质量^[22],使用双远心镜头将离面位移引起的误差降到最低。选择第一幅图像作为参考图像,DIC (Vic-2D 2009, correlation solutions, Columbia, SC, USA) 软件对采集完的图像进行分析计算,DIC 的主要参数设置为感兴趣区域(ROI)的大小为 672×328 pixels,计算步长为 6 pixels,子集的大小是 29×29 pixels。

表 1 实测位移误差

Table 1 The error of measured displacement

移动距离 d/mm	0	0.5	1	1.5	2	2.5	3
位移均值 u/mm	0	0.497 1	1.003 73	1.504 95	1.995 54	2.503 62	3.004 75
平移误差/ μm	0	2.9	3.73	4.95	4.46	3.62	4.75
误差比例/%	0	0.58	0.746	0.99	0.892	0.724	0.95

2 变形失配测量结果分析

2.1 变形失配测量

在图 3 所示实验系统中,对复合柔性电子样品在 25 ℃、50 ℃、75 ℃和 100 ℃条件下分别进行单轴拉伸实验。样品装夹如图 5 所示,在装夹样品后,对其进行微拉伸,通过 DIC 计算拉伸方向的位移场,确保位移场与拉伸方向垂直,保证样品与拉伸方向平行。拉伸距离为 2 mm,拉伸速度为 200 $\mu\text{m}/\text{s}$,每拉伸 200 μm 采集一次实

相对位移的参考和实测图如图 4 所示,可以看出在 ROI 中间部分误差较小,上下边缘部分存在相对较大的误差,误差最大接近 10 μm ,因此在实验过程中,将样品放置于 ROI 中间部分可有效提高测量的精度。

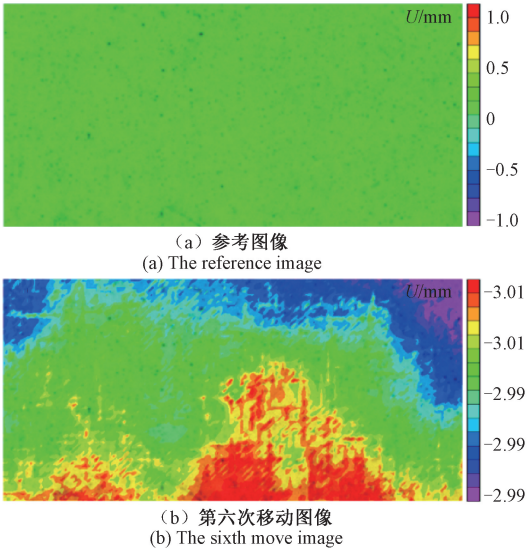


图 4 测量的相对位移

Fig. 4 the measured relative displacements

实测均值与移动距离的误差如表 1 所示, u 代表测量 ROI 位移的平均值,实测均值和移动距离之差最大为 4.95 μm ,最小为 2.9 μm ,误差比例均在 1%之内。在单轴拉伸试验中,可延展柔性电子互连与柔性基底的变形一般可以扩展到几十个微米,因此,该系统的性能可以满足拉伸变形测量实验的要求。

验图像。选择第一幅图像作为参考图像,对其余图像进行分析计算,DIC 的主要参数设置为 ROI 的大小为 310×1 180 pixels,计算步长为 6 pixels,子集的大小是 29×29 pixels。

2.2 结果分析

通过 DIC 方法测量复合柔性电子样品单轴拉伸下的 Von Mises 应变,如图 6 所示,展示了复合柔性电子样品在 50 ℃下拉伸距离为 2 mm 的 Von Mises 应变场。

从全场应变可以看出,在应变大小方面,不同部分的应变大小不一,差异明显且不均匀,样品 ROI 最大应变为

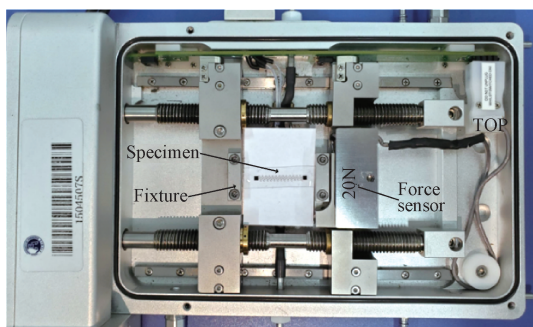


图5 样品装夹图

Fig. 5 Sample clamping diagram

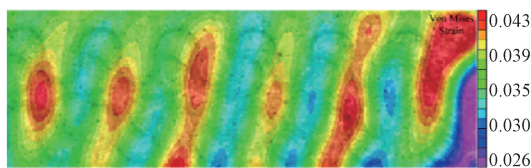


图6 样品 Von Mises 应变图

Fig. 6 Von Mises strain diagram of the sample

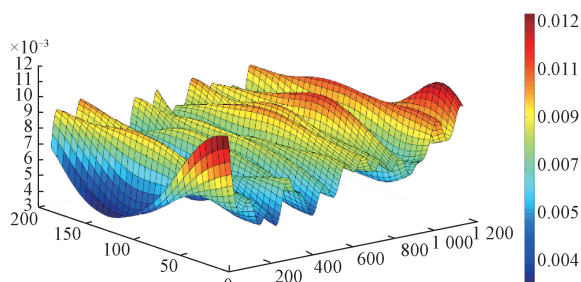
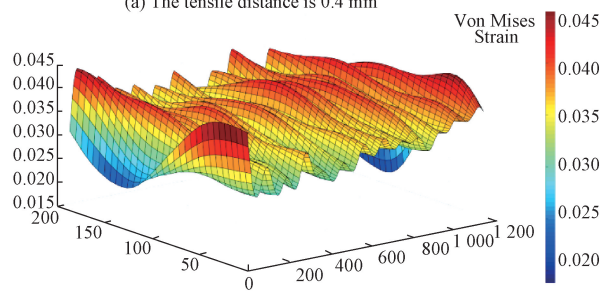
(a) 拉伸0.4 mm
(a) The tensile distance is 0.4 mm(b) 拉伸0.2 mm
(b) The tensile distance is 0.2 mm

图7 样品 Von Mises 应变三维图

Fig. 7 Von Mises strain 3D plot of the sample

0.043, 相对于最小应变的 0.026, 相差约 65%。从应变分布来看, 大应变区域和小应变区域相互交替出现, 呈现出均匀的条状间隔分布, 且条状的方向与水平拉伸方向之间的夹角约为 60° , 这与金属层二维图案的弧角有关。

应变的大小取决于相对变形的程度, 由于 PDMS 基底和金属层材料之间力学性能的巨大差异, 导致相邻层在形变过程中应变大小不一致, 不可避免的出现变形失配。因此, 包含图案化金属层的复合柔性电子在整体形变的过程中, 由于表面金属层二维图案的特殊化, 如图 2 所示, 样品表面会出现不均匀应变大小和均匀应变分布的现象。

为了更好的研究到这种变形失配的变化特征, 本文提取在 50°C 下拉伸距离分别为 0.4 和 2 mm 样品 Von Mises 应变场的全场应变数据, 利用 MATLAB 绘制三维应变图, 如图 7 所示, 可以更加直观的观测到应变的间隔分布和应变大小比较大的差异。图 7(a) 样品拉伸 0.4 mm 的三维应变场整体展现出波浪状, 波谷和波峰的最大高度差约为 0.008, 体现了相邻应变区域的变形失配程度。图 7(b) 样品拉伸 2 mm 的三维应变场的波谷和波峰最大高度差约为 0.025, 比图 7(a) 增大了近 300%, 且波浪状应变场的整体波动程度更加剧烈, 说明在拉伸距离增大的情况下, 样品表面变形失配程度也在增加。因此, 将整个波浪的波动大小进行量化, 可以更加准确的反映出图案化金属层与柔性基底全场变形失配的程度。

采用 Von Mises 应变场全场实测值的标准差来表征复合柔性电子表面应变的波动情况, 并将其定义为图案

化应变波动指数 P , 如式 (1) 所示。标准差的衡量方法可以有效的定量的描述出图案化金属层与柔性基底的变形失配程度, 避免样品表面非材料差异的其他随机因素造成的应变突变的影响, 从而使描述更具有合理性。

$$P = \sqrt{\frac{1}{mn - 1} \sum_{(i,j)=(0,0)}^{(m,n)} (\varepsilon_{(i,j)} - \bar{\varepsilon})^2} \quad (1)$$

式中: (i,j) 表示 ROI 的像素坐标; $\varepsilon_{(i,j)}$ 表示坐标为 (i,j) 像素上的应变值; $\bar{\varepsilon}$ 表示 ROI 的应变均值; mn 表示 ROI 像素总数。

计算样品在不同温度下拉伸变形的图案化应变波动指数 P , 如图 8 所示。由图 8 可以看出, 复合柔性电子样品在单一温度条件下, 指数 P 随着拉伸距离的增加在线性增长, 说明图案化金属与柔性基底的变形失配程度随着拉伸距离的增加在增大, 这与图 7 的分析一致。图案化金属层和柔性基底的形变难易程度不同, 随着整体变形的加剧, 它们之间变形失配程度会越来越大, 最终将引发柔性电子的失效。在不同温度下, 这种线性增长趋势的变化速度有所差别, 在 25°C 、 50°C 和 75°C 下, 变化速度依次发生了小幅度的下降, 但是在 100°C 下, 变化速度明显提高, 说明 100°C 的高温对样品的变形失配产生了相对比较大的影响。

为了更加清晰的掌握温度对变形失配的影响, 本文对拉伸距离分别为 0.6、1.2 和 2 mm 下图案化应变波动指数 P 随温度的变化进行了计算, 如图 9 所示。将 $25^\circ\text{C} \sim 75^\circ\text{C}$ 定义为相对低温, $75^\circ\text{C} \sim 100^\circ\text{C}$ 定义为相对

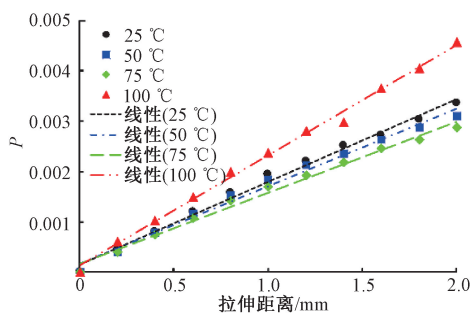
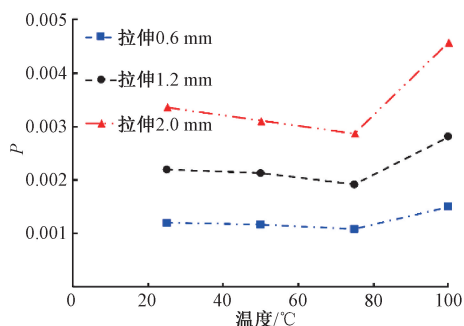


图8 样品在不同温度下变形失配曲线

Fig. 8 Deformation mismatch curves of samples at different temperatures

高温。在拉伸距离分别为0.6、1.2和2 mm下,相对低温中指数 P 最大相差分别为 8.7×10^{-5} 、 2×10^{-4} 和 2.5×10^{-4} ,相对高温中指数 P 最大相差分别为 4×10^{-4} 、 8.9×10^{-4} 和 1.7×10^{-3} ,指数 P 最大相差值随着拉伸距离的增加在增大,但在同一拉伸距离下相对高温的值比相对低温的值有了显著的提高,最多提高了720%。

图9 指数 P 随温度变化曲线Fig. 9 Change curves of index P with temperature

表明图案化金属层与柔性基底的变形失配程度在75 °C之前受环境温度的影响较小,在75 °C~100 °C时,温度的升高给图案化金属层与柔性基底的变形失配带来了比较大的改变,但无论是相对高温还是相对低温的影响,它们都会随着拉伸距离的增加在增大。这是因为样品在被拉伸的状态下几何位置被限制,图案化金属层以及PDMS基底之间膨胀系数不匹配,环境温度的改变会引发样品内部的热应力,进一步影响了变形失配程度。因此在柔性电子的设计中,相邻层选择膨胀系数相同或接近的材料,会大大减小温度对变形失配所带来的影响,提高其使用寿命。

3 结论

本文设计了一种用于测量复合柔性电子变形失配的实验系统,提出了基于图案化应变波动指数 P 的变形失

配评价方法,并在不同温度条件下对样品进行了实验研究,发现在同一拉伸条件下,25 °C~75 °C之间,样品变形失配程度变化不明显,75 °C~100 °C时,变形失配程度随着温度的升高而显著增加。通过该方法将相邻层变形失配程度进行了有效的表征,进一步为工程上客观评价复合柔性电子多层结构变形失配提供了参考。

参考文献

- [1] LEE J, WU J, SHI M, et al. Stretchable GaAs photovoltaics with designs that enable high areal coverage[J]. *Advanced Materials*, 2011, 23(8): 986-991.
- [2] 吴云杰,徐超,周旭,杨先军,等. 柔性力敏传感器的快速标定方法的研究[J]. *电子测量技术*, 2019, 42(1): 78-82.
WU Y J, XU CH, ZHOU X, et al. Fast calibration method for flexible force sensors [J]. *Electronic Measurement Technology*, 2019, 42(1): 78-82.
- [3] LIN W, LIEW G G, LI Y, et al. Implantable flexible electronics: materials and techniques for implantable nutrient sensing using flexible sensors integrated with metal-organic frameworks [J]. *Advanced Materials*, 2018, 30(23): 1870166.
- [4] XU F, LU W, ZHU Y. Controlled 3D buckling of silicon nanowires for stretchable electronics [J]. *Acs Nano*, 2011, 5(1): 672-672.
- [5] KIM D H, SONG J, CHOI W M, et al. Materials and noncoplanar mesh designs for integrated circuits with linear elastic responses to extreme mechanical deformations[J]. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 2008, 105(48): 18675-18680.
- [6] WIDLUND T, YANG S, HSU Y Y, et al. Stretchability and compliance of freestanding serpentine-shaped ribbons[J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2014, 51(23-24): 4026-4037.
- [7] LI M, XIA J, LI R, et al. Design of two-dimensional horseshoe layout for stretchable electronic systems [J]. *Journal of Materials Science*, 2013, 48(24): 8443-8448.
- [8] GONZALEZ M, AXISA F, BULCKE M V, et al. Design of metal interconnects for stretchable electronic circuits[J]. *Microelectronics Reliability*, 2008, 48(6): 825-832.
- [9] KIM D H, LU N, MA R, et al. Epidermal electronics[J]. *Science*, 2011, 333(6): 485.
- [10] FAN Z, ZHANG Y, MA Q, et al. A finite deformation model of planar serpentine interconnects for stretchable electronics [J]. *International Journal of Solids and Structures*, 2016(91): 46-54.

- [11] XU X M, HENAO D. An efficient numerical method for cavitation in nonlinear elasticity [J]. *Mathematical Models and Methods in Applied Sciences*, 2011, 21(8):1733-1760.
- [12] JABLONSKI M, BOSSUYT F, VANFLETEREN J, et al. Reliability of a stretchable interconnect utilizing terminated, in-plane meandered copper conductor [J]. *Microelectronics Reliability*, 2013, 53(7):956-963.
- [13] HUANG Y, YUAN J, ZHANG Y, et al. Interfacial delamination of inorganic films on viscoelastic substrate[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2016, 83(10):101005.
- [14] CHEN H, FENG X, CHEN Y. Slip zone model for interfacial failures of stiff film/soft substrate composite system in flexible electronics [J]. *Mechanics of Materials*, 2014(79):35-44.
- [15] LUCCHINI R, CATTARINUZZI E, MARAGHECHI S, et al. Delamination phenomena in aluminum/polyimide deformable interconnects; In-situ micro-tensile testing[J]. *Materials & Design*, 2016, 89:121-128.
- [16] 蔡友发,傅星,李飞. 数字图像相关方法的桥梁挠度仪的温度补偿[J]. *电子测量与仪器学报*, 2019, 33(7):88-92.
- CAI Y F, FU X, LI F. Temperature compensations for bridge deflection meter by using of digital image correlation method [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2019, 33(7):88-92.
- [17] NIU Y L, WANG J, SHAO S, et al. A comprehensive solution for electronic packages' reliability assessment with digital image correlation (DIC) method [J]. *Microelectronics Reliability*, 2018(87):81-88.
- [18] 张凯,董菲,赵吉文,等. 基于图像熵的直线电机动子位置精密测量方法[J]. *仪器仪表学报*, 2015, 36(12):2821-2827.
- ZHANG K, DONG F, ZHAO J W, et al. Precise measurement of linear motor mover position using an improved digital image correlation based image entropy[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2015, 36(12):2821-2827.
- [19] ZHANG X, WANG Y, YANG J, et al. Deformation analysis of ferrite/pearlite banded structure under uniaxial tension using digital image correlation[J]. *Optics and Lasers in Engineering*, 2016(85):24-28.
- [20] PAN B, XIE H M, HUA T, et al. Measurement of coefficient of thermal expansion of films using digital image correlation method [J]. *Polymer Testing*, 2009, 28(1):75-83.
- [21] 吴荣,刘依,周建民. 数字图像相关用于测量风电叶片全场变形[J]. *仪器仪表学报*, 2018, 39(11):258-264.
- WU R, LIU Y, ZHOU J. Full-field deformation measurement of wind turbine blades using digital image correlation[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2018, 39(11):258-264.
- [22] 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.

作者简介



陈诚, 分别在 2007 年和 2010 年于天津大学获得硕士学位和博士学位, 现为天津商业大学副教授, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: chencheng@tjcu.edu.cn



陈少轩, 2016 年于天津商业大学获得学士学位, 现为天津商业大学硕士研究生, 主要研究方向为精密测试技术及智能传感器。

E-mail: chsxtjcu@163.com

Chen Shaoxuan received his B. Sc. degree from Tianjin University of Commerce in 2016. Now, he is a M. Sc. candidate at Tianjin University of Commerce. His main research interests include precision measurement technology and intelligent sensors.