

多孔 PDMS 基底复合柔性互连导线拉伸时 3D 变形行为研究

王延来, 陈诚, 张泽, 刘达喜, 赵汉伟, 计宏伟
(天津商业大学 机械工程学院, 天津 300134)

摘要: **目的** 探究多孔聚二甲基硅氧烷 (PDMS) 基底复合柔性互连导线的透气性能和延展性能, 以使其更好地应用在医疗领域。**方法** 本文采用三维数字图像相关 (3D-DIC) 方法检测了 25 °C 下不同孔隙率的多孔 PDMS 基底复合柔性互连导线单轴拉伸过程中导线与基底的面内应变失配和离面位移特征。在此基础上, 本文引入平均位移 (w_m) 和位移幅 (w_a) 作为量化表征复合柔性电子离面变形的指标, 并结合多孔 PDMS 基底的气密性实验结果评价了不同导线样品。**结果** 研究表明, 多孔 PDMS 材料作为基底能显著降低复合柔性电子的离面变形程度, 并使复合柔性电子具有良好的透气性。在相同拉伸载荷 (20 N) 和拉伸距离下, PDMS 与去离子水质量比为 6:1 时的多孔 PDMS 基底复合柔性互连导线具有稳定的离面变形变化量。**结论** 多孔 PDMS 基底复合柔性电子不仅具有良好的透气性, 而且可以有效地增强金属互联层与柔性基底的粘连程度。本文所获得的 PDMS 与去离子水最佳掺杂质量比, 可为制造高延展性多孔基底柔性电子器件提供参考。

关键词: 多孔聚二甲基硅氧烷; 复合柔性互连; 三维数字图像相关; 离面位移

中图分类号: TB484; TS801.8 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)13-0011-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.13.002

3D Deformation Behavior of Composite Flexible Interconnecting Wires with Porous PDMS Substrates during Tensile Process

WANG Yan-lai, CHEN Cheng, ZHANG Ze, LIU Da-xi, ZHAO Han-wei, JI Hong-wei

(School of Mechanical Engineering, Tianjin University of Commerce, Tianjin 300134, China)

ABSTRACT: The work aims to explore the air permeability and ductility of composite flexible interconnecting wires with porous polydimethyl siloxane (PDMS) substrates, so as to apply them in the medical field better. Three-dimensional digital image correlation (3D-DIC) method was used to detect the surface strain mismatch and out-of-plane displacement characteristics of the wires and the substrates during the uniaxial tensile process of composite flexible interconnecting wires with porous PDMS substrates of different porosity at 25 °C. On this basis, the mean displacement (w_m) and displacement amplitude (w_a) were introduced as evaluation indicators to quantitatively characterize the out-of-plane deformation of composite flexible electrons. In addition, the evaluation indicators and the air permeability test results of the porous PDMS substrates were combined to evaluate the different wire samples. The results of this study indicated that the porous PDMS substrates could significantly reduce the out-of-plane deformation of the composite flexible electrons and make the composite flexible electrons have good air permeability. When the mass ratio of PDMS to deionized water was 6:1, the composite flexible interconnecting wires with porous PDMS substrates had stable out-of-plane deformation under

收稿日期: 2023-04-04

基金项目: 天津市高等学校大学生创新创业训练计划项目 (202110069001)

作者简介: 王延来 (1998—), 男, 硕士生, 主攻柔性包装电子技术。

通信作者: 陈诚 (1975—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为智能检测技术。

the same tensile load (20 N) and the same tensile distance. The composite flexible electrons with porous PDMS substrates not only have good air permeability, but also can effectively enhance the degree of adhesion between the metal interconnect layer and the flexible substrate. The optimal doping mass ratio between PDMS and deionized water obtained can provide a reference for manufacturing high ductility flexible electronic devices with porous substrates.

KEY WORDS: porous polydimethyl siloxane; composite flexible interconnection; 3D digital image correlation (3D-DIC); out-of-plane displacement

通过柔性电子技术,全面记录产品名称、包装类型、生产日期、保质期等数据信息,可以为产品的防伪销售等提供依据,实现对产品的实时监控,及时发现问题并进行处理。柔性电子技术与其他技术相结合能够形成综合性的智能包装系统^[1]。柔性多孔材料^[2]和柔性复合材料^[3]因其良好的可延展性、生物兼容性和耐用性在这些领域得到了广泛应用。柔性器件需要与复杂形貌的目标紧密贴合,其频繁承受多种形式的变形^[4-5],这对柔性器件的结构稳定性提出了极高的要求。互连-基底结构是其中一种通用结构模型,由图案化的刚性金属互连和柔性聚合物基底上下叠加而成。由于材料异质性,金属互连层与柔性基底层之间的界面在承载时容易出现分层、屈曲甚至断裂^[6-7],从而影响包装微电子系统中互连结构的阻抗特性和整体的传输性能。因此,研究包装柔性互连结构的力学结构设计、电学性能及形变过程中寄生参数的变化具有重要意义^[8]。

除了结构强度方面的要求,生物兼容性也是关注的重要指标,需要长期实时、动态、在线地贴合人体表面进行各项指标的测量^[9]。人体皮肤具有分泌汗液和与外界进行气体交换的功能,如果在长期封闭的情况下,会导致皮肤表面的舒适度降低,进而导致皮肤损伤,并因电子器件对汗液的抵抗作用而导致结构失稳^[10]。为解决这一问题,一些学者采用制孔剂制备多孔聚合物基底(如多孔 PDMS)并测量其相关性能^[11],成功解决了这一问题。然而,作为支撑互连-基底结构的关键部分,多孔材料体系的引入必然会影响到结构的力学性能^[12]。由于多孔 PDMS 基底比纯 PDMS 基底适当提高了表面的粗糙程度,所以有效解决了金属层和基底之间的分层问题,且提高了整体结构的延展性^[13]。互连导线的失效与其图案结构有着直接的关系,其主要原因是塑性应变在导线中积累,而当前的研究方法主要是通过有限元仿真模拟的方式获得应力在导线上的分布^[14-15]。因此,通过非接触检测手段,对多孔基底对柔性传感器延展性能的调控进行测试,可以帮助量化这种影响,对平衡柔性传感器的结构稳定性和生物兼容性具有重要意义。

3D-DIC 是一种重要的非接触变形测量技术,通过对试样表面的三维变形进行测量,能够提供更高的测量精度,已在各种薄膜测试领域得到广泛应用^[16],测量精度得到了很多专家学者们的证实^[17-18]。在过去的研究中,通常采用基于单目视觉的 2D-DIC,实验过程简单,但测量精度受到离面位移的显著影响。对

本文研究的复合层构成的柔性互联导线施加一定程度的载荷,势必会引发离面位移,从而造成虚应变^[19]。相比之下,基于双目视觉的 3D-DIC 技术具有优势,在测量精度、观测三维形貌等方面表现出更好的性能^[20]。

这项研究基于多孔 PDMS 基底和二维马蹄形 Cu 互连的柔性电子复合膜,模拟其贴附于皮肤表面并受拉伸条件的实际工况,实验研究其变形行为。首先对制备的掺杂不同质量去离子水的多孔 PDMS 基底的孔隙率和透气性进行了评价;然后搭建了一套基于 3D-DIC 的原位检测系统,对复合膜在单轴拉伸下的应变场和位移场进行检测,通过在三维尺度下分析复合膜的变形行为,可以预测其中的分层、起皱等失效行为的趋势;最后提出平均离面位移 w_m 和位移幅 w_a ,以定量表征柔性电子复合膜离面位移的变形特征。通过这些评价指标,得到了基底多孔化对复合结构离面位移的调控性能,并最终找到了最佳的掺杂质量比。

1 实验设计

1.1 样品的制备

制备的柔性电子互连导线包含二维马蹄形金属互连导线、黏附层以及多孔 PDMS 基底,如图 1a 所示。具体而言,金属互连由铜(Cu,厚度为 2 μm)、钛(Ti,厚度为 5 nm)以及聚酰亚胺(PI)组成;黏附层则由 Ti(厚度为 5 nm)和二氧化硅(SiO_2 ,厚度为 50 nm)组成。这些材料的选择和组合考虑了它们的物理性质和相互作用,以实现所需的电学和力学性能,在保证金属层具有导电性的同时,确保多孔基底之间具有足够的粘连性。多孔 PDMS 基底具有重要的作用,不仅可以提供机械支撑,还可以通过掺杂不同质量的去离子水来改变其孔隙率和透气性,从而影响整个复合结构的应变特性。

1.1.1 多孔 PDMS 的制备与表征

本研究采用去离子水作为致孔剂,通过调节去离子水的掺杂比例制备了多组不同孔隙率的基底。制孔过程中,对掺杂去离子水的 PDMS 真空加热,使去离子水蒸发流失,形成气孔,从而制得多孔 PDMS。具体方法如图 1b 所示,在 PDMS 中加入 4 组不同质量比的去离子水并搅拌 5 min,制备出相应的 PDMS 预聚物。然后,将预聚物旋涂在规格为 70 mm×50 mm×1 mm 的浮法玻璃片上,并在 120 $^{\circ}\text{C}$ 真空干燥箱中烘烤,得到

厚度为 $300\ \mu\text{m}$ 的多孔 PDMS 薄膜。得到的各组 PDMS 本体与去离子水的质量比分别为 2:1 (A 组)、4:1 (B 组)、6:1 (C 组)、8:1 (D 组) 和 1:0 (E 组)。该方法具有操作简单、成本低廉等优点, 适用于大规模制备和工业化生产。

A 组和 C 组样品基底在电镜观测下的图像如图 2a—d 所示。从表面电镜图发现 A 组样品表面充满了气泡, 这是由于掺杂去离子水的质量过多造成的; 从横截面发现 A 组和 C 组孔径尺寸相差不大, 这是因为掺杂时混合搅拌的速率和时间是相同的。

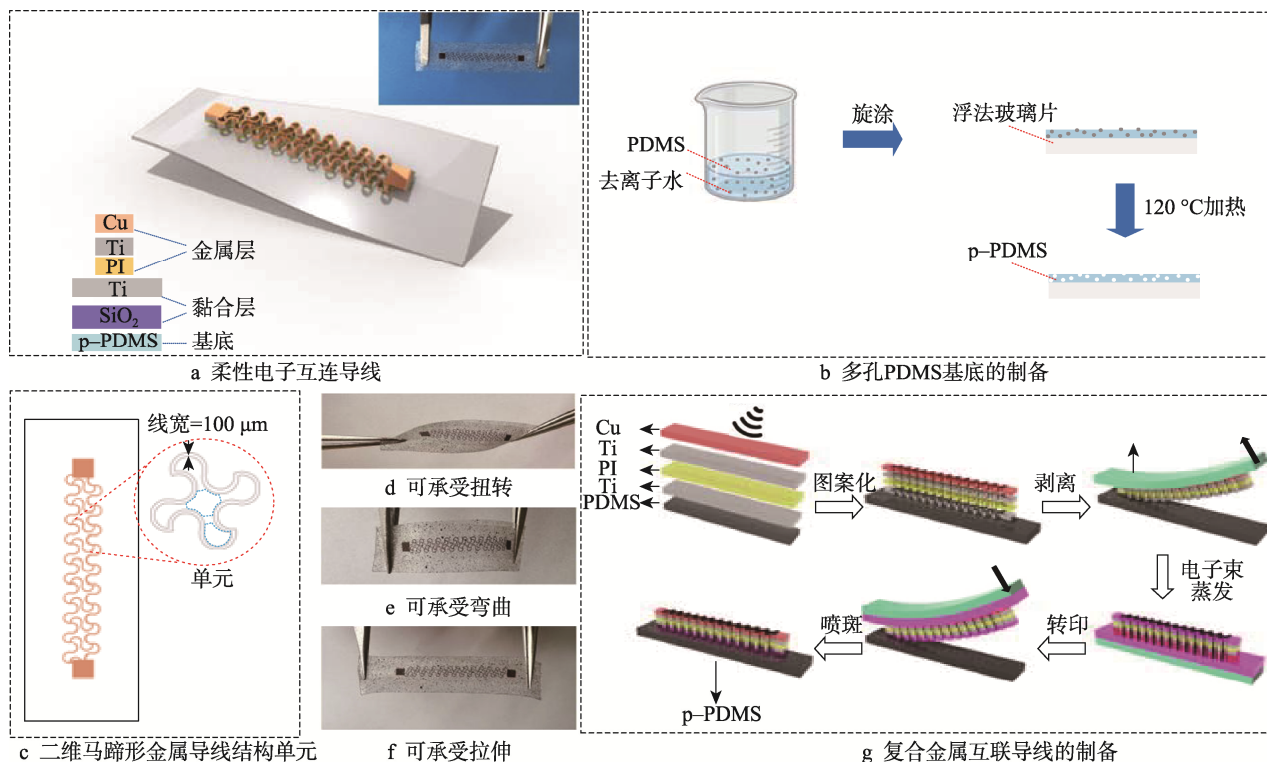


图 1 多孔 PDMS 基底柔性互连结构和制备工艺

Fig.1 Structure and preparation process of flexible interconnecting wire with porous PDMS substrate

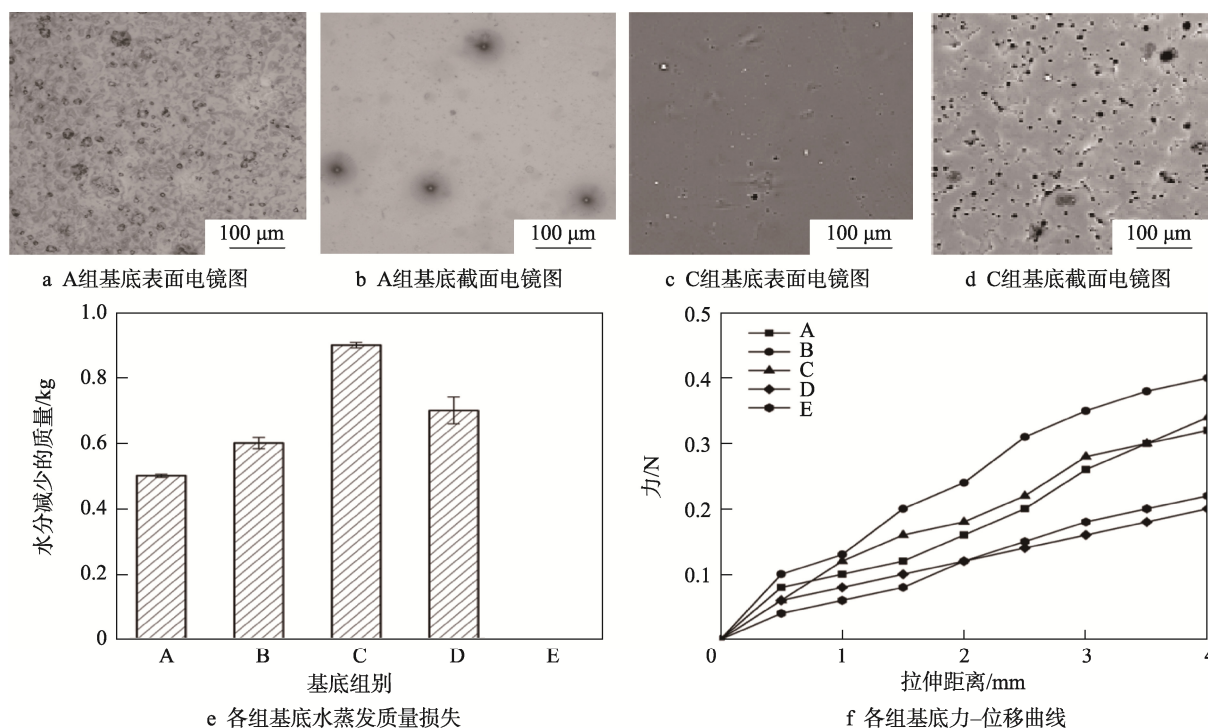


图 2 多孔 PDMS 基底特性图

Fig.2 Characteristics of porous PDMS substrate

为实现适用人体的柔性包装系统,需要对多孔 PDMS 的透气性和可拉伸性进行表征。在透气性方面,采用一种模拟人体表面汗液蒸发的方法,具体而言,将 4 组多孔 PDMS 薄膜分别紧密贴合在装有 10.0 g 蒸馏水的锥形瓶瓶口上,并用耐高温胶带缠绕裹紧。在 220 °C 下加热,当锥形瓶内水开始沸腾后开始计时,5 min 后取下称量,并计算各组基底称取加热前后的质量差值,这种热质量损伤可用于多孔 PDMS 基底透气性的评估。实验结果如图 2e 所示,多孔 PDMS 薄膜封装的锥形瓶内水分质量有所减少,其中 C 组的水分减少量最高,单位时间内水蒸气的透过速率最快,而对照组 E 组(纯 PDMS 基底)没有水分流失。这表明多孔 PDMS 基底具有透气性,C 组的透气性最佳,而纯 PDMS 则没有透气性。此外,若掺杂去离子水过多容易导致气泡产生,透气性下降,而掺杂过少则导致气孔的数量减少,同样降低透气性。在可拉伸性方面,使用拉伸测试机对 5 组不同基底进行了测试,以获得多孔 PDMS 基底的应变-位移曲线。测试结果如图 2f 所示,结果表明制备的多孔 PDMS 具有一定的抗拉伸性和延展性,采用多孔 PDMS 作为基底符合应用要求。

1.1.2 柔性电子互连导线的制造

图 1c 中展示了选取的二维马蹄形互连结构。相较于波浪线和蛇形等结构,马蹄形互连结构具有更优异的延展性。此外,二维马蹄形结构还能有效抵抗泊松效应引起的纵向应变^[21]。因此,选择二维马蹄形互连导线作为复合柔性电子样品进行力学性能研究。其互连单元体由四周的马蹄结构和中心十字连接区域组成,整个互连结构由有限个单元体拼接而成,互连线宽为 200 μm 。值得一提的是,不仅在扭转、弯曲和拉伸变形下测试了制备的二维马蹄形互连的保形性能,还在其他多种变形模式下进行了测试,并发现二维马蹄形互连结构在这些模式下同样表现出良好的保形性能,这些结果见图 1d—f。

图 1g 展示了二维马蹄形互连图案的刻蚀工艺。在浮法玻璃片上旋涂一层纯 PDMS 后放入 80 °C 真空干燥箱烘烤成膜,再放入微型紫外臭氧(UVO)清洗机中处理 PDMS 表面,之后旋涂亚聚酰胺(PI),再放在加热板上,在 30 min 内从 80 °C 梯度升温至 120 °C,然后放入无菌箱内在 250 °C 下保温 90 min,最后在 PI 表面磁控溅射 5 nm 厚的 Ti 膜和 100 nm 厚的 Cu 膜,再电镀 2 μm 厚的 Cu 膜。在电镀后的表面旋涂光刻胶,通过光刻和显影技术得到二维马蹄形互连的导线图案,最后通过刻蚀工艺将图案以外的复合金属层及光刻胶清洗干净。使用水溶性胶带将二维马蹄形互连导线与基底分离开;再继续用电子束蒸发技术在 PI 表面溅射 5 nm 厚的 Ti 膜和 50 nm 厚的 SiO_2 膜;然后和已经制备好的厚度为 200 μm 的多孔 PDMS 薄膜一起放在 UVO 中处理 20 min;再放在 90 °C 的加热板上用重物贴合热压 20 min 后,放在清水里洗

掉水溶性胶带;最后将制备的成品按照整体长和宽分别为 40 mm 和 10 mm 来进行切割,得到一条完整的多孔 PDMS 基底二维马蹄形互连导线样品。使用喷枪(型号为 IWATA HP-BH,喷嘴直径为 0.2 mm)在多孔 PDMS 基底二维马蹄形互连导线上制作散斑,静置 5 min 等散斑固化,通过光学显微镜观察,选择斑点大小和散斑分布都均匀的复合柔性互连导线作为 3D-DIC 实验试件。

1.2 测量方法

基于 3D-DIC 搭建的检测系统如图 3 所示。该 3D-DIC 系统基于双目视觉原理,将 2 个 POINT GREY 工业相机(相机型号均为 GS3-PGE-50S5M-C,分辨率均为 2 448 像素 $\times$ 2 048 像素)互成一定角度,并通过一个 OLYMPUS 镜头(其型号为 SDF-PLAPO-1XPF,放大倍数为 0.7~9 倍)和环形卤素光源(功率调控范围为 0~50 W),同时摄取感性区域的二维图像。待测试件被安装在微型精密拉伸台(Linkam TST350)上,其温度范围可以控制在-196~350 °C,温度控制速率为 0.01~60 °C/min。拉伸张力依据选择的力传感器不同而不同,张力范围为 0.01~20 N 或 0.1~200 N,而本文拉伸的材料为多孔 PDMS 基底柔性互连导线,因此选择张力为 20 N 的传感器,最大拉伸行程可达到 80 mm,装载的样品厚度最大为 2 mm。通过控制器对其施加步进拉伸载荷,测试材料的张应力特性,结合双目视觉原位观测拉伸过程中材料的结构演变。样品装夹示意图如图 3c 所示。根据双目视觉原理:首先,系统进行标定以获得测量系统的内外外部参数;然后,利用 DIC 数字图像相关运算方法搜寻采集图像中的对应点,计算得到这一点在三维坐标系中的空间坐标,进而重构三维形貌;接着,利用三维数字图像相关运算方法,将变形前后采集图像中的目标子区进行对比,得到所求的三维位移,进而对获得的三维位移场进行差分运算得到其应变场。

2 结果与分析

采用 3D-DIC 方法检测样品在单轴拉伸下的行为变形失效演变过程。在进行拉伸实验时,需要保证互连导线和多孔基底之间的紧密黏合,以避免复合分层、断裂现象的发生。为此,将最大拉伸距离设置为 5 mm,以确保样品在拉伸过程中的稳定性。在 B 组复合柔性电子样品被单轴拉伸时,通过图 4 所示的拉伸状态,提取单轴拉伸下面内的 von Mises 应变场和离面位移场,分析单轴拉伸下的面内应变和离面位移分布情况。在拉伸实验中,需要考虑温度的影响,因为温度的变化会对复合柔性电子样品的性能和表现产生影响。为了更好地贴近于实际使用的生物环境温度,在本实验中,将样品温度控制在常温 25 °C 条件下进行拉伸实验。

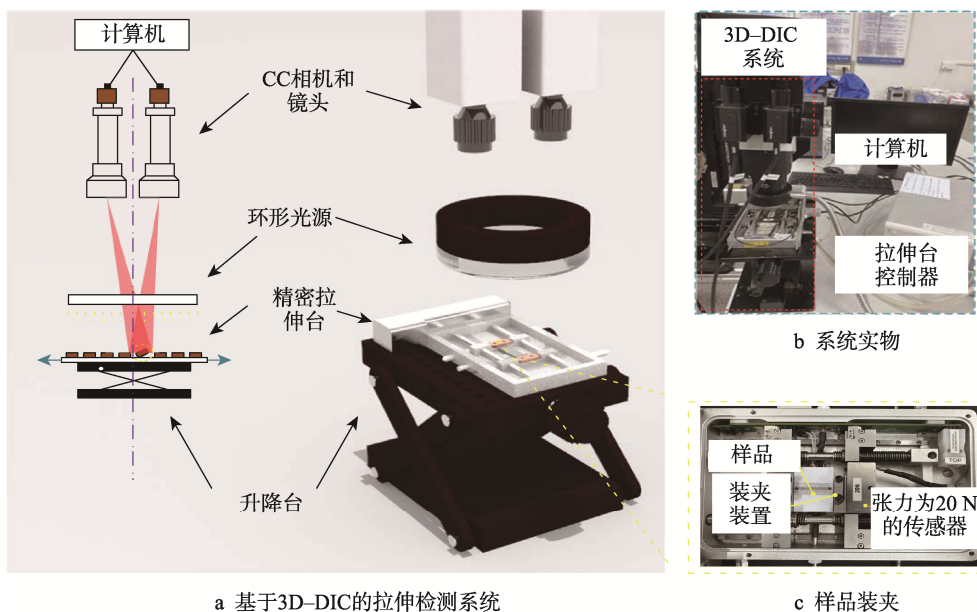


图 3 3D-DIC 柔性电子互连变形检测系统

Fig.3 3D-DIC flexible electronic interconnection deformation detection system

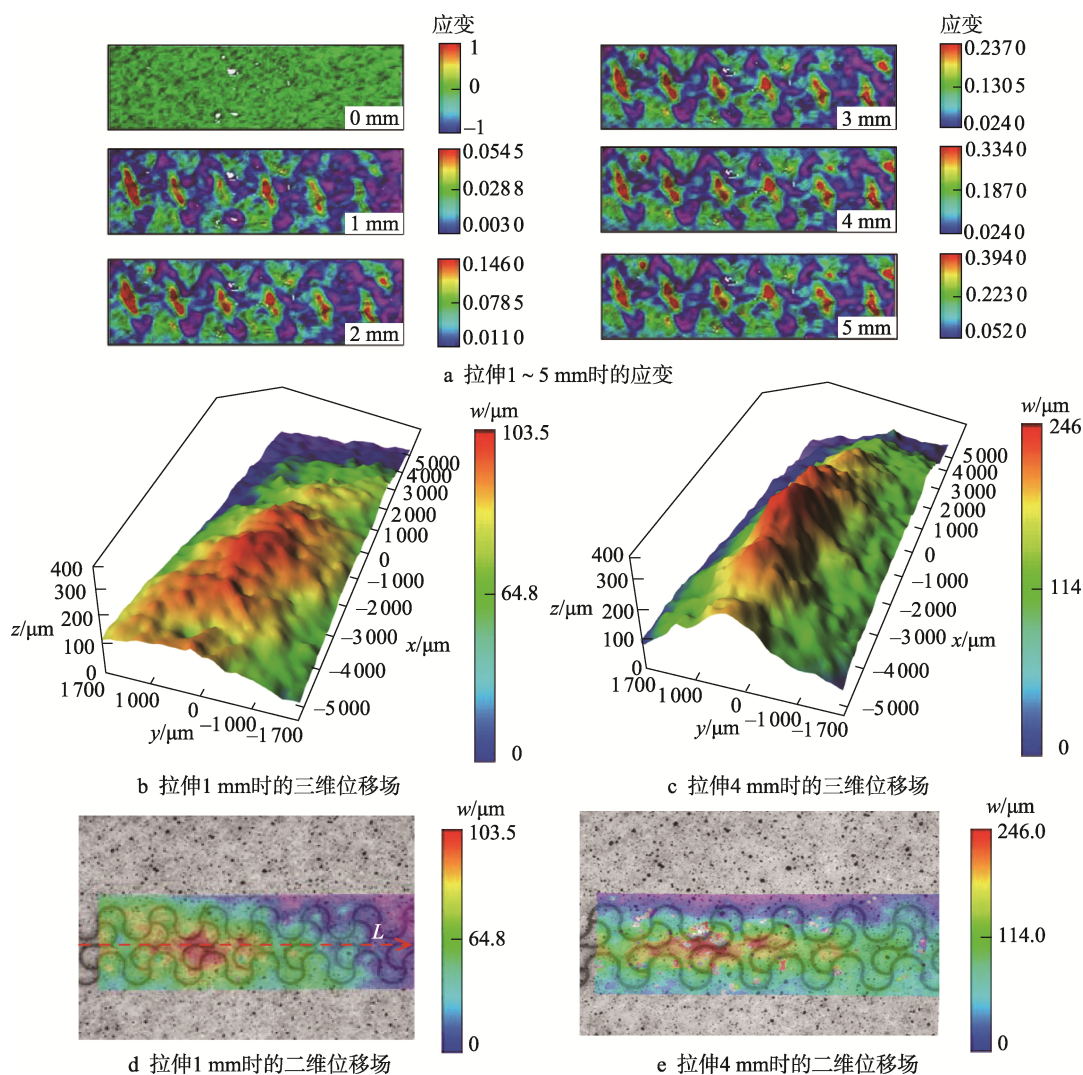


图 4 B 组样品在 25 °C 下单轴拉伸后的 von Mises 应变云图和 w 位移图

Fig.4 Cloud plot of von Mises strain and w displacement plot of group B samples after single axis stretching at 25 °C

样品金属层表面图案特殊,导致应变大小和离面位移呈现不均匀分布的现象,并存在一定程度的周期性。提取B组样品在常温(25℃)下的面内 von Mises 应变场和离面位移场,如图4a所示。可以看出受拉伸载荷时,导线分布或密集的区域应变值小,但发生较大的离面位移,而无金属导线分布或非密集的区域应变值大,且发生较小的离面位移。这是由于多孔PDMS基底和复合金属互联导线在力学性能方面存在着巨大差异所导致的。多孔PDMS基底具有较高的弹性模量,而二维马蹄形金属互联导线则具有较高的机械强度,因此样品内部复合层在拉伸过程中的形变大小存在不一致性,最终导致在应变场上和高度位移场出现大小不一的现象。整体位移场变化量也十分剧烈,说明样品表面离面变形程度随着拉伸距离的增大而增加。当样品被拉伸1 mm时,样品整体应变场的峰值和谷值的差值为0.0515,最大高度和最低高度的差值约为103.5 μm;而当样品被拉伸4 mm时,样品整体应变场的峰值和谷值的差值为0.310,增大了约500%,最大高度和最低高度的差值约为246 μm,增大了约138%。此外,从局部看,应力多集中在金属层的马蹄形结构内部弧顶两侧。因为马蹄形结构在拉伸过程中,其主要变形位于导线稀疏的位置,其内部提供的变形量很小,该差异导致基底表面承受较大的拉应力,应力在导线稀疏的部位和基底黏结界面集中,而应力集中的部位也是导致金属导线和多孔基底界面发生失效的部位,所以在三维位移场图中发现金属导线和基底黏结的区域呈现中间高四周低且分布均匀的鼓包。如图4b—c中所示,虽然变形量级较低,但是随着拉伸距离的增加,翘曲程度逐渐增大,这样会导致金属

导线的电感突变,进而影响电子器件的使用性能。因此,分别对照二维位移场(图4d—e),发现三维位移场中出现鼓包的位置就是金属互联结构分布密集的区域位置。

为了更好地表征该w高度位移变化程度,在位移场横向选取一条水平中轴线,如图3d中的线L,线L经过导线和基底黏结的中心区域。由拉伸1~5 mm时产生的波动图可知,波动的幅度反映了样品上导线和基底被拉伸的离面变形程度。在不同组的样品中,线L上的w位移波动曲线如图5所示。实验结果表明,金属互连导线与多孔基底之间的应变失配程度随着拉伸距离的变化而不同,离面位移变形的程度也随之增大。

为了定量表征和评估样品z轴方向的离面位移量,提出了新的指标——平均位移 w_m 和位移幅 w_a ,其计算方法见式(1)—(2)。

$$w_m = \sum_{i=1}^n w_i \quad (1)$$

$$w_a = \frac{\sum w_{\max}/n + \sum w_{\min}/n}{2} \quad (2)$$

式中: w_i 为线L扫过区域在z轴方向上的离面位移量; $w_{\max}$ 为最大位移量; $w_{\min}$ 为最小位移量; n 为出现最大位移量或最小位移量的个数。

具体而言,将检测区域中线L经过部分的z轴方向上w位移值代入平均值和位移波动幅值公式中进行计算,可以量化表征样品金属层和多孔PDMS基底的拉伸失效程度。平均位移和位移幅值越小,表示其拉伸发生的失效程度越小,整体结构的延展性更优异。此外,这种指标的引入还可以有效地避免w位移场在某一位置因其他干扰因素而导致位移突变的影响,从而使得评估结果更加合理和可靠。具体数据见表1。

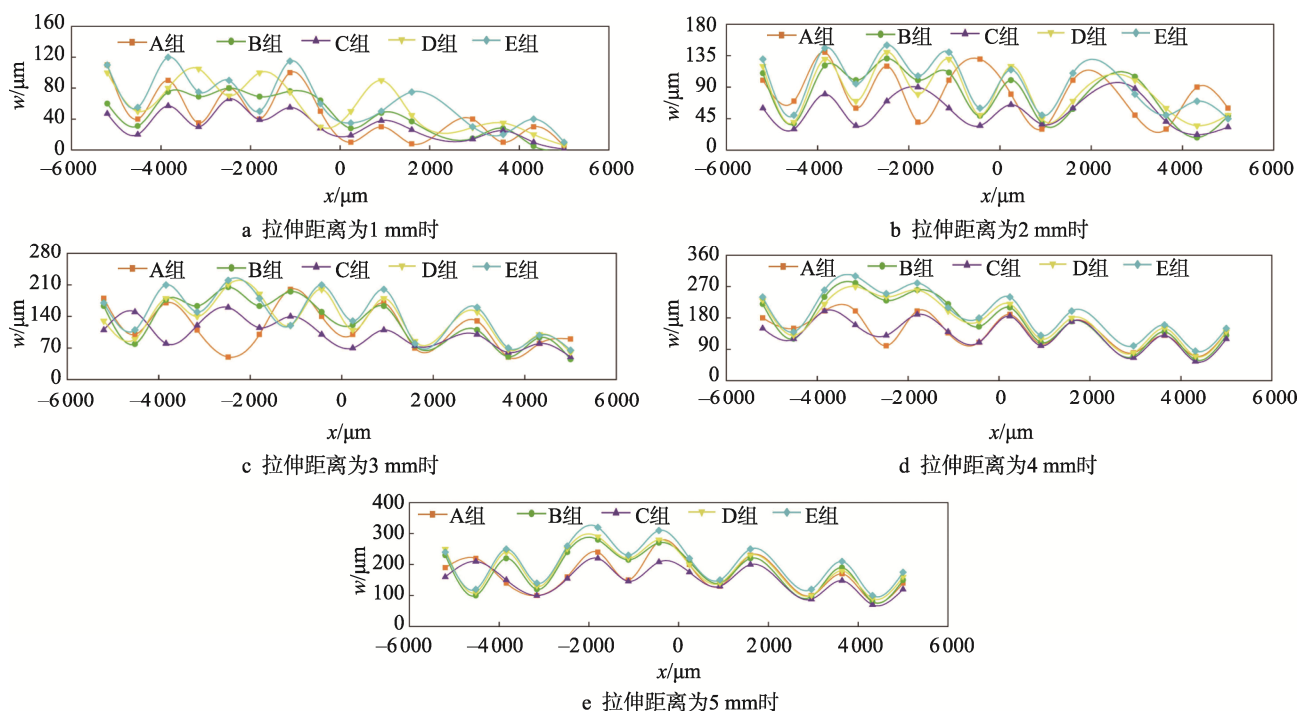


图5 每组试样在不同拉伸距离的位移波动曲线

Fig.5 Displacement fluctuation curves for each group of samples at different stretching distances

表 1 各组样品拉伸 1~5 mm 时的平均位移和位移幅
Tab.1 Average displacement and displacement amplitude of samples stretching for 1 mm to 5 mm

样品	1 mm		2 mm		3 mm		4 mm		5 mm	
	$w_m/\mu\text{m}$	$w_a/\mu\text{m}$	$w_m/\mu\text{m}$	$w_a/\mu\text{m}$	$w_m/\mu\text{m}$	$w_a/\mu\text{m}$	$w_m/\mu\text{m}$	$w_a/\mu\text{m}$	$w_m/\mu\text{m}$	$w_a/\mu\text{m}$
A 组	45.2	44.9	80	72.5	116	115.3	144.1	139.4	168.3	162.3
B 组	45.7	48.3	78.6	82	130.2	128.7	174.3	162.8	184.1	174
C 组	31.7	34.3	53.7	50.6	101.3	101.7	135.1	130.2	152	150
D 组	59	61.5	82.7	83.1	134.1	130.1	178.7	171.1	191.3	182.3
E 组	62.3	66.3	93.1	94.1	144.9	142.4	195	185.9	206.3	197.7

从表 1 中可以发现, 在温度为 25 ℃时, 随着拉伸距离的增加, 不同样品的 w_m 和 w_a 整体上也明显增加。然而, 经过优化后的多孔 PDMS 基底电子样品的 w_m 和 w_a 值均小于以纯 PDMS 为基底的电子样品。从表 1 中还可以发现, 在多孔基底样品中, C 组样品的值明显最低, 且数值变化程度最小。这表明 C 组样品的性能稳定性更出色。此外, 当 C 组样品的参数指标与其他组相同时, 其拉伸的距离更大, 说明 C 组样品的整体延展性最优。掺杂去离子水过多易产生气泡, 对拉伸时多孔 PDMS 基底和金属互连导线之间的离面位移变化是不利的; 掺杂去离子水过少, 气孔过少, 对拉伸时多孔 PDMS 基底和金属互连导线之间的离面位移变化也是不利的。在实际工况下, C 组样品的性能稳定性更好, 说明 C 组是最佳的去离子水掺杂比。

3 结语

采用掺杂去离子水和 PDMS 制备了一种具有透气性的多孔基底柔性电子互连导线, 并利用 3D-DIC 检测计算实现了单轴拉伸载荷下面内的 von Mises 应变场和离面位移场的原位测试。通过离面位移波动表征参数平均位移 w_m 和位移幅 w_a 来评价多孔 PDMS 基底和金属互连导线受拉伸时的变形失效程度, 从而综合表征了多孔基底对柔性电子互连延展性的调控。结果表明, 以多孔 PDMS 作为基底能显著降低样品的变形失配程度, 且样品的离面位移随基底组分的改变也得到了优化。特别是当基底的 PDMS 与去离子水的质量比为 6:1 (C 组样品) 时, 其 w 位移指标参数值最低, 变化趋势最平稳。通过透气性检测实验发现, C 组薄膜基底在相同时间内透过水蒸气的质量最多, 表明 C 组基底的透气性最好。因此, 多孔 PDMS 基底复合柔性电子不仅具有良好的透气性, 而且可以有效地降低金属互连层与柔性基底的变形失配程度, 从而减少因拉伸变形失配导致复合柔性电子互连导线屈曲甚至断裂, 进而提高柔性电子器件的延展性。

参考文献:

[1] LI Ting, LLOYD K, BIRCH J, et al. A Quantitative

Survey of Consumer Perceptions of Smart Food Packaging in China[J]. Food Science & Nutrition, 2020, 8(8): 3977-3988.

[2] CHENG Hao, XU Hao, MCCLEMENTS D J, et al. Recent Advances in Intelligent Food Packaging Materials: Principles, Preparation and Applications[J]. Food Chemistry, 2022, 375: 131738.

[3] LI Yi-ding, YAN Shi-bo, YAN Ying, et al. Modelling of the Compressive Behavior of 3D Braided Tubular Composites by a Novel Unit Cell[J]. Composite Structures, 2022, 287: 115303.

[4] BARIYA M, NYEIN H, JAVEY A. Wearable Sweat Sensors[J]. Nature Electronics, 2018, 1(3): 160-171.

[5] 饶江, 何邦贵, 陈芳锐, 等. 柔性电子器件集成与其在包装上的应用[J]. 包装工程, 2021, 42(19): 232-242.

RAO Jiang, HE Bang-gui, CHEN Fang-rui, et al. Integration of Flexible Electronic Device and Its Application in Packaging[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(19): 232-242.

[6] 邵明月, 张森, 武吉梅, 等. 非均匀张力作用下多层膜结构动力稳定性研究[J]. 包装工程, 2022, 43(15): 195-202.

SHAO Ming-yue, ZHANG Miao, WU Ji-mei, et al. Dynamic Stability of Multilayer Film Structure under Non-Uniform Tension[J]. Packaging Engineering, 2022, 43(15): 195-202.

[7] LI Le-le, ZHENG Yang, LIU En-ping, et al. Stretchable and Ultrasensitive Strain Sensor Based on a Bilayer Wrinkle-Microcracking Mechanism[J]. Chemical Engineering Journal, 2022, 437: 135399.

[8] XIE Kai-li, GLASSER A, SHINDE S, et al. Flexible Thin Films: Delamination and Wrinkling of Flexible Conductive Polymer Thin Films (Adv. Funct. Mater. 21/2021)[J]. Advanced Functional Materials, 2021, 31(21): 2009039.

[9] QI Zhi-jie, ZHOU Ming-xing, YA Li, et al. Reconfigurable Flexible Electronics Driven by Origami Magnetic

- Membranes[J]. Advanced Materials Technologies, 2021, 6(4): 2001124.
- [10] QIAO Yan-cong, LI Xiao-shi, et al. Graphene-based Wearable Sensors[J]. Nanoscale, 2019, 11(41): 18923-18945.
- [11] YOON S, SEOK M, KIM M, et al. Wearable Porous PDMS Layer of High Moisture Permeability for Skin Trouble Reduction[J]. Scientific Reports, 2021, 11(1): 938.
- [12] SO S Y, PARK S H, PARK S H, et al. Additive-Manufactured Flexible Triboelectric Sensor Based on Porous PDMS Sponge for Highly Detecting Joint Movements[J]. International Journal of Precision Engineering and Manufacturing-Green Technology, 2022, 10(1): 97-107.
- [13] KONG K T S, JAAFAR M, AZURA A, et al. Enhanced Conductivity Behavior of Polydimethylsiloxane (PDMS) Hybrid Composites Containing Exfoliated Graphite Nanoplatelets and Carbon Nanotubes[J]. Composites Part B Engineering, 2014, 58: 457-462.
- [14] LAMBRICHT N, PARDOEN T, YUNUS S. Giant Stretchability of Thin Gold Films on Rough Elastomeric Substrates[J]. Acta Materialia, 2013, 61(2): 540-547.
- [15] 林骅, 潘开林, 陈仁章, 等. 可延展柔性无机电子互连结构及其力学特性[J]. 微纳电子技术, 2015, 52(6): 341-347.
- LIN Hua, PAN Kai-lin, CHEN Ren-zhang, et al. Inorganic Stretchable, Flexible Electronic Interconnect Structure and Its Mechanical Properties[J]. Micronanoelectronic Technology, 2015, 52(6): 341-347.
- [16] MEHRABIAN M, BOUKHILI R. 3D-DIC Strain Field Measurements in Bolted and Hybrid Bolted-Bonded Joints of Woven Carbon-Epoxy Composites[J]. Composites Part B Engineering, 2021, 218(11): 108875.
- [17] 张顺庆, 高晨家, 张龙. 数字图像相关技术在应力应变测量中的发展与最新应用[J]. 影像科学与光化学, 2017, 35(2): 193-198.
- ZHANG Shun-qing, GAO Chen-jia, ZHANG Long. The Development and Latest Applications of Digital Image Correlation in Stress and Strain Measurement[J]. Imaging Science and Photochemistry, 2017, 35(2): 193-198.
- [18] 潘兵, 王博. 数字体图像相关方法研究进展[J]. 科学通报, 2017, 62(16): 1671-1681.
- PAN Bing, WANG Bo. Research Progress of Digital Volume Image Correlation Methods[J]. Chinese Science Bulletin, 2017, 62(16): 1671-1681.
- [19] 肖志斌, 武丽丽, 裴雄伟, 等. 数字图像相关法在复合材料研究中的应用进展[J]. 理化检验(物理分册), 2021, 57(5): 39-45.
- XIAO Zhi-bin, WU Li-li, QIU Xiong-wei, et al. Application Progress of Digital Image Correlation in Composite Materials Research[J]. Physical Testing and Chemical Analysis Part A (Physical Testing), 2021, 57(5): 39-45.
- [20] YE Mei-tu, LIANG Jin, LI Lei-gang, et al. Full-field Motion and Deformation Measurement of High Speed Rotation Based on Temporal Phase-locking and 3D-DIC[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2021, 146: 1-17.
- [21] CHEN Cheng, CHEN Shao-xuan, GU Wang-hang, et al. Characterization of Delamination Failure of Two-Dimensional Horseshoe Stretchable Interconnects Using Digital Image Correlation[J]. Polymer Testing, 2020, 94: 107041.

责任编辑: 曾钰婵