基于力学理论的柔性显示模组的应变测量方法

吴棣^{1,2}, 范淑媛^{1,2}, 廖敦明^{1,2*}, 陈建平^{1,2}, 彭文静^{1,2}, 夏志庆^{1,2}, 程坤^{1,2}

1. 华中科技大学材料成形与模具技术国家重点实验室, 武汉 430074;

2. 华中科技大学材料科学与工程学院, 武汉 430074

*联系人, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-11-15; 接受日期: 2021-12-30; 网络出版日期: 2022-04-22

湖北省科技揭榜制科技项目(编号: 2020BED014)和广东省“珠江人才计划”本土创新科研团队项目(编号: 2017BT01G167)资助

摘要 柔性有机发光二极管(OLED)显示模组一般由各膜层与之间的粘合胶组成, 在折叠过程中膜层易发生破坏. 为了确保模组的可靠性, 需要基于实验测量膜层应变, 然而当前的应变测量方法并不适用于OLED模组中各膜层的应变测量. 本文基于电子计算机断层扫描法测量了OLED模组弯折之后各膜层的相对滑移量, 根据力学理论推导了相对滑移量与应变的关系, 通过测量各膜层之间的相对滑移量间接获得了各膜层的应变, 为应变测量提供了一种新方法. 然后与模拟结果对比, 相互验证确定了材料参数的准确性与应变测量理论的可靠性. 最后探究了应变测量准确性的影响因素, 分析表明, 为确保应变测量的精度, 应尽可能地获得弯折刚完成时的应变, 并保证模组与框架的紧密粘合.

关键词 应变测量方法, 柔性显示, 多层模组, 力学理论

PACS: 46.05.+b, 46.25.Cc, 46.35.+z, 46.80.+j, 78.60.Fi

1 引言

柔性有机发光二极管(Organic Light-Emitting Diode, OLED)^[1]显示因其画质出色、功耗低、可弯曲的优良特性, 逐渐成为市场上主流的显示技术^[2-6]. 实际生产中, 柔性OLED的屏幕模组一般由覆盖窗、偏光片、触控板、薄膜封装层、OLED显示层、背板以及用于粘合的光学透明胶(Optical Clear Adhesive, OCA)、压敏胶(Pressure Sensitive Adhesive, PSA)等组成^[7-15]. 在多层模组的折叠过程中, 薄膜封装层、显示层等极易发生破坏, 为了确保模组的可靠性, 需要进行

模组各层的力学分析^[16-21]. 通过数值模拟的方式, 可以进行模组力学分析, 获取模组中各膜层的应变^[18-22]. 但模组中OCA, PSA等材料的本构模型复杂, 难以获得准确的力学参数^[14,22-25], 无法保证模拟的准确性, 因此需要通过实验测量各膜层应变.

现有的应变测量方式主要分为三类: 机械测试法、电测应变法和光测应变法. 机械测试法是传统的应变测量方法, 一般是指利用引伸计测定试件变形的的方法, 分为接触式与非接触式引伸计两类, 当前多使用非接触式中的视频引伸计进行测量^[26,27]. 机械测试法多用于样品在单轴拉伸变形下的应变捕捉, 无法

引用格式: 吴棣, 范淑媛, 廖敦明, 等. 基于力学理论的柔性显示模组的应变测量方法. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2022, 52: 264611
Wu D, Fan S Y, Liao D M, et al. Film strain measurement method of flexible display modules based on mechanical theory (in Chinese). Sci Sin-Phys Mech Astron, 2022, 52: 264611, doi: 10.1360/SSPMA-2021-0319

实现OLED模组弯折后的各膜层应变测量. 电测应变法是当前生产上主流的测试方法, 一般是指在待测构件上贴电阻应变传感器从而测量构件应变的方法. 电阻应变传感器分为金属式和半导体式两类: 金属电阻应变片主要基于金属的电阻应变效应; 半导体应变片主要基于半导体材料的压阻效应^[28-30]. 电阻测试法适用于多种环境下的测量, 易于实现、成本低廉, 但只能测量构件表面的单点应变, 无法实现对OLED模组内部各膜层的应变测量. 此外, 模组各膜层较薄, 粘贴应变片会对弯折过程中的模组变形产生一定的影响, 进而影响测量的精度. 基于上述原因, 电测应变法不适用于OLED模组弯折后的各膜层应变测量. 近几十年来, 由于激光的出现以及数字图像处理软硬件的飞速发展, 光测应变法逐渐成为常规的应变测量方法. 光测应变法包括全息/数字全息干涉、光弹/全息光弹、云纹/云纹干涉/电镜云纹、散斑干涉、数字图像相关以及电子计算机断层扫描(Computed Tomography, CT)等^[31,32]. 全息/数字全息干涉法^[33,34]利用全息再现物光波的能力, 将构件变形前后的两个状态同时再现, 并通过光波的干涉得到二者之间的变化量. 光弹/全息光弹法^[35,36]主要基于材料的双折射效应, 即原本自然状态下的各向同性材料, 在有应力下表现出暂时的光学双折射现象. 云纹/云纹干涉/电镜云纹法^[37-41]是将不变形栅和一个带有变形信息的栅重叠, 形成视觉上的新的条纹图, 以测量应变. 散斑干涉法^[42-44]主要原理是激光照在构件表面发生漫反射, 随机干涉所形成的散斑会携带构件的信息. 数字图像相关^[45-47]是一种新型光测技术, 通过比较构件变形前后图像的灰度变化, 可以计算出整体应变场, 多应用于二维或三维表面位移场的测量. CT法^[48,49]的基本思想源于Radon变换, 即根据投影重建图像. 相对于其他的光测应变方法, CT法更适合测试构件内部变形, 因而适用于OLED模组弯折后的各膜层应变测量, 但受限于空间分辨率, 对于膜层变形较小而整体尺寸较大的模组应变测量问题, 依然很难保证测试的精度.

本文基于现有的CT法, 为保证应变测量的精度, 不采取直接测量膜层应变的方式, 而是测量OLED模组弯折后的各膜层的相对滑移量. 根据力学理论推导膜层相对滑移量与各膜层应变的关系, 间接获取各膜层的应变. 进而与模拟结果对比, 相互验证确定材料参数的准确性与应变测量理论的可靠性, 最后进行测

量精度的误差分析.

2 应变测量方法与理论

本文以简化的OLED模组为例, 分析其弯折区中间位置的模组切向应变, 弯折后的样品如图1所示. 框架的相应尺寸已标注于图中, 而模组的长度为30 mm, 宽度为5 mm. 模组中用激光打出了两个通孔, 用于标记以便测量滑移量. 由于孔尺寸较小, 宽度方向上模组较宽, 远远大于孔的尺寸, 因而孔难以影响膜层之间的整体滑移, 孔的影响可以忽略.

图2为弯折后的模组结构示意图, 可以看出, 各膜层之间发生了切向滑动, 这些滑动会降低模组外侧膜层的应变. 简化的OLED模组由四层膜层(Film1, Film2, Film3, Film4)与三层胶层(OCA1, OCA2, OCA3)组成. L_0 为弯折前用激光标记的两孔之间的距离, 此处为3 mm, L_{12} 为弯折后Film1与Film2之间的相对滑移量,

图1 (网络版彩图)样品示意图

Figure 1 (Color online) Schematic of the sample.

图2 (网络版彩图)弯折后的模组结构示意图

Figure 2 (Color online) Schematic of the module structure after being bent.

L_{13} 为Film1与Film3之间的相对滑移量, L_{14} 为Film1与Film4之间的相对滑移量, θ 为弯折后Film1上两标记之间的弧长对应的弯曲弧度, 模組的横截面面积为 A .

模組中各层的厚度及力学参数如表1所示, 膜材采用线弹性本构模型, OCA材料采用超弹性与黏弹性本构模型表征. 超弹性采用Yeoh模型^[18,50,51], 黏弹性采用广义麦克斯韦模型(Generalized Maxwell Model)的普罗尼级数(Prony Series)形式^[18,52-54], 其参数如表2所示. 表中超弹参数 C_{10} , C_{20} , C_{30} 与材料的长时模量(Long-term Modulus)有关, D_1 表征压缩性, D_1 为0表示胶因流动性较好而假定为不可压缩材料; 黏弹参数 g_1 , g_2 , g_3 , g_4 是松弛曲线权重系数, τ_1 , τ_2 , τ_3 , τ_4 与材料的松弛速率有关.

在弯曲后, 保证模組弯折区的最外侧弧长恰好为

表 1 OLED模組各层的厚度与力学参数

Table 1 Thickness and mechanical parameters of each layer of the OLED module

名称	厚度 (10^{-3} mm)	模量 (MPa)	泊松比
Film1	25	1860	0.33
OCA1	50	超弹与黏弹性	
Film2	25	1860	0.33
OCA2	25	超弹与黏弹性	
Film3	10	226	0.33
OCA3	25	超弹与黏弹性	
Film4	50	2442	0.33

表 2 OCA的超弹与黏弹力学参数

Table 2 Hyperelastic and viscoelastic parameters of OCA

参数	数值
C_{10} (MPa)	4.82044×10^{-3}
C_{20} (MPa)	-1.50202×10^{-4}
C_{30} (MPa)	5.12080×10^{-6}
D_1 (MPa $^{-1}$)	0
g_1	0.39282
g_2	0.22653
g_3	0.14456
g_4	0.07609
τ_1 (s)	0.02177
τ_2 (s)	0.28773
τ_3 (s)	4.31230
τ_4 (s)	124.460

框架内距的 $\pi/2$ 倍, Film1被强力速干胶紧紧地粘合在框架上(假定速干胶厚度为0). 此时的弯折区是纯弯曲的状态, 弯矩处处相等, 因而模組弯折区的应变在同一厚度位置上处处相等, 即弯折区为圆弧形.

由材料力学基本理论^[55]知, 单层材料上某处的弯曲应变为

$$\varepsilon = \frac{y}{R}, \quad (1)$$

式中, y 为此处距离中性面的距离, R 为此处的曲率半径.

在弯曲过程中, 由于OCA的存在, 各膜层之间会产生滑移, 这些滑移会降低模組的整体应变, 模組会产生多中性面现象^[19,56]. 各膜层的切向应变与膜层之间的相对滑移量存在一定关系, 下面对其进行推导.

模組进行弯折, 记弯折后Film1上两标记之间的弧长对应的弯曲弧度为 θ 后, 第1层膜层Film1的外侧应变 $\varepsilon_1^{\text{out}}$ 和内侧应变 $\varepsilon_1^{\text{in}}$ 可分别表示为

$$\varepsilon_1^{\text{out}} = \frac{R_1^{\text{out}}\theta - L_0}{L_0}, \quad (2)$$

$$\varepsilon_1^{\text{in}} = \frac{R_1^{\text{in}}\theta - L_0}{L_0}, \quad (3)$$

式中, R_1^{out} 和 R_1^{in} 分别表示Film1的外侧和内侧半径; L_0 为弯折前两孔之间的距离.

其他膜层Film2, Film3, Film4的外侧应变 $\varepsilon_i^{\text{out}}$ 和内侧应变 $\varepsilon_i^{\text{in}}$ 可分别表示为

$$\varepsilon_i^{\text{out}} = \frac{R_i^{\text{out}}(\theta + 2L_{1i}/\bar{R}_i) - L_0}{L_0}, \quad (4)$$

$$\varepsilon_i^{\text{in}} = \frac{R_i^{\text{in}}(\theta + 2L_{1i}/\bar{R}_i) - L_0}{L_0}, \quad (5)$$

式中, R_i^{out} 和 R_i^{in} 分别表示第 i 层膜层的外侧和内侧半径, $\bar{R}_i$ 为二者的均值, $\bar{R}_i = (R_i^{\text{out}} + R_i^{\text{in}})/2$, i 取2, 3, 4; L_{1i} 为第 i 层膜层与第1层膜层Film1之间的相对滑移量.

在模組弯折区的横截面上取一微面积 dA , 其受到的法向应力为 σ , 则作用在该微面积上的合力为 σdA , 在纯弯曲过程中该横截面上有如下静力关系:

$$F = \int_A \sigma dA = \int_A E\varepsilon dA = 0, \quad (6)$$

式中, F 为横截面法向受到的合力, A 为横截面的面积, E 为模組各层的模量, ε 为横截面上的法向应变.

由于模组中膜层的模量远远大于胶层OCA的模量, 因而式(6)的等式中可以忽略OCA部分, 有

$$\sum_{i=1}^N E_i h_i \bar{\varepsilon}_i = 0, \quad (7)$$

式中, N 为膜层的个数, $N = 4$; E_i 为第 i 层膜层的模量; h_i 为第 i 层膜层的厚度; $\bar{\varepsilon}_i$ 为第 i 层膜层的外侧应变与内侧应变的均值, $\bar{\varepsilon}_i = (\varepsilon_i^{\text{out}} + \varepsilon_i^{\text{in}}) / 2$.

将式(2)–(5)代入式(7)中, 消去 $\bar{\varepsilon}_i$, 有

$$E_1 h_1 \left(\frac{\bar{R}_1 \theta}{L_0} - 1 \right) + \sum_{i=2}^N E_i h_i \left(\frac{\bar{R}_i \theta + 2L_{1i}}{L_0} - 1 \right) = 0, \quad (8)$$

因而可以得到弯曲弧度 θ 的值, 如下:

$$\theta = \frac{\sum_{i=1}^N E_i h_i (L_0 - 2L_{1i})}{\sum_{j=1}^N E_j h_j \bar{R}_j}, \quad (9)$$

式中, 当 $i = 1$ 时, $L_{11} = 0$.

求得弯曲弧度 θ 之后, 重新代入式(2)–(5), 即可求得各膜层的应变数值. 可以将所有膜层的应变整理为通式, 计算得到的第 i 层($i = 1, 2, 3, 4$)膜层的应变为

$$\varepsilon_i^{\text{out}} = \frac{R_i^{\text{out}}}{L_0} \left(\frac{\sum_{j=1}^N E_j h_j (L_0 - 2L_{1j})}{\sum_{k=1}^N E_k h_k \bar{R}_k} + \frac{2L_{1i}}{\bar{R}_i} \right) - 1, \quad (10)$$

$$\varepsilon_i^{\text{in}} = \frac{R_i^{\text{in}}}{L_0} \left(\frac{\sum_{j=1}^N E_j h_j (L_0 - 2L_{1j})}{\sum_{k=1}^N E_k h_k \bar{R}_k} + \frac{2L_{1i}}{\bar{R}_i} \right) - 1. \quad (11)$$

式(9)–(11)中, E_i , h_i 的值见表1, L_0 的值在模组弯折前测量获得, R_i^{out} , R_i^{in} , $\bar{R}_i$ 可以根据框架的尺寸及模组各层厚度计算获得, 计算结果如表3所示.

表3 模组各膜层的半径值

Table 3 Radius of each layer of the module

膜层	R_i^{out} (mm)	R_i^{in} (mm)	$\bar{R}_i$ (mm)
$i = 1$	1	0.975	0.9875
$i = 2$	0.925	0.9	0.9125
$i = 3$	0.875	0.865	0.87
$i = 4$	0.84	0.79	0.815

因而只需测得各膜层与第1层膜层Film1之间的相对滑移量 L_{1i} , 即可获得弯曲弧度 θ 、各膜层外侧应变 $\varepsilon_i^{\text{out}}$ 与内侧应变 $\varepsilon_i^{\text{in}}$ 的值.

3 实验测量与应变计算

为获得孔标记处的各相对滑移量 L_{1i} , 分别采用了CT直接扫描法和镶样磨样-电镜观测法获得了模组滑移结果图. CT直接扫描法可以直接将图1中的样品置于三维CT测试设备中, 获得孔标记处的膜层相对滑移量, 对设备的精度要求较高. 镶样磨样-电镜观测法是将图1中的样品固定在冷镶嵌料中, 固化之后磨样至孔标记处, 然后在电镜下观测膜层相对滑移量. 该方法由于镶料固化收缩, 会造成弯折模组的形态变化, 进而导致结果有误差. CT直接扫描获取的某一截面上模组层间滑移如图3(a)所示, 在环境扫描电镜下观测的镶样磨样模组的层间滑移如图3(b)所示. 明显地, 在镶样磨样-电镜观测法中由于胶层OCA较软, 进行磨样时容易溢出从而阻碍对膜层的观测, 而CT直接扫描的结果较好. 因而选用CT扫描测量的滑移量进行分析.

根据图3(a)中的CT直接扫描结果, 测量打孔截面处各膜层与第1层膜层之间的相对滑移量. 事实上, 在数据处理过程中, 为了保证测量的准确性, 本文选用了标记的不同截面处的多张CT扫描结果图进行了测量, 然后对多组数据进行了均值处理. 各膜层与第1层膜层之间的相对滑移量如表4所示.

依据测量得到的各层滑移量, 根据式(9)–(11)计算得到模组弯折后Film1两标记之间的弧长对应的弯曲弧度 θ 及各膜层外侧应变 $\varepsilon_i^{\text{out}}$ 与内侧应变 $\varepsilon_i^{\text{in}}$ 的值, 如表5所示.

4 仿真建模与模拟分析

前文中已提出基于力学理论的OLED模组弯折后的膜层应变测量方法, 为确定膜层应变测量方法的可靠性, 需结合模拟结果进行分析.

4.1 仿真建模

基于模组与框架尺寸及其材料参数, 搭建模组弯折实验的ABAQUS仿真模型, 由于模组的宽度远大于模组的厚度, 将三维问题简化成了二维平面应变问题.

图 3 样品的CT图与电镜图. (a) CT直接扫描的截面图; (b) 镶样磨样后的电镜图

Figure 3 Images of computed tomography and scanning electron microscope of the sample. (a) Sectional view of direct computed tomography scan; (b) electron microscope image of the sample after being mounted and ground.

表 4 各膜层与第1层膜层之间的相对滑移量

Table 4 Relative slip between each film and Film1

第 <i>i</i> 层膜层与第1层膜层之间的相对滑移量	相对滑移量的值 (mm)
L_{11}	0
L_{12}	0.105
L_{13}	0.173
L_{14}	0.253

表 5 应变测量方法获得的弯曲弧度与各膜层应变量

Table 5 Bending radian and strains of each film obtained by the strain measurement method

参数	数值
θ (rad)	3.0541
$\varepsilon_1^{\text{out}}$	0.01803
$\varepsilon_1^{\text{in}}$	-0.00742
$\varepsilon_2^{\text{out}}$	0.01264
$\varepsilon_2^{\text{in}}$	-0.01473
$\varepsilon_3^{\text{out}}$	0.00677
$\varepsilon_3^{\text{in}}$	-0.00473
$\varepsilon_4^{\text{out}}$	0.02899
$\varepsilon_4^{\text{in}}$	-0.03226

因为模型是对称的, 搭建整体结构的1/2模型即可, 模型的相关尺寸前文已进行了描述.

框架相对于模组变形可以忽略, 将其看作刚体, 参

图 4 (网络版彩图)模拟计算的模组弯折状态及弯折区应变.

(a) 弯折后的模组变形状态; (b) 弯折区各膜层LE11应变. **Figure 4** (Color online) Simulation results. (a) Deformation state of the module after bending; (b) LE11 strain results of each film in the bending zone.

图 5 (网络版彩图)各膜层应变的模拟结果与基于应变测量理论的实验结果的对比

Figure 5 (Color online) Comparison between the results of the experiment based on the strain measurement theory and the simulation results of the film strains.

考点选在弯折区边界. 为方便后续沿膜层切向的应变 LE11 的分析, 指定了材料方向, 使得 LE11 的方向不随弯折变形而变化, 始终沿着膜层的切向. 为避免线性完全积分的剪力自锁问题, 采用了线性减缩积分单元. 模组中各层厚度方向上划分 5 个单元, 避免减缩积分单元的沙漏问题. 由于胶层 OCA 作为不可压缩材料处理, 胶层采用杂交单元.

4.2 模拟结果与弯折区形态分析

弯折后静置 1 h 的模组弯折变形状态及弯折区各膜层 LE11 应变模拟结果如图 4 所示. 静置的主要原因是模组中的胶层 OCA 具有黏弹性能, 模拟中静置 1 h 是为了保证模拟与实验的一致性. 由图 4(a) 可看出, 模组尾部向框架外侧翘起, 这主要因为模组在弯折区的内外侧曲率半径不一致, 内侧弯曲半径更小, 推动膜层向图中上侧滑移, 最终导致模组尾部产生翘起. 对比图 1 中的实验样品, 可以看出模拟结果与实际情况是一致的. 由图 4(b) 可看出, 由对称轴位置到弯折区边缘, LE11 并不是完全相等的, 而是有一定的减小. 这主要因为在弯折过程中, 对称轴处的胶层受压向两侧有一定的流动, 胶的流动导致弯折区内侧膜层在对称轴处的曲率半径小于弯折区边缘的曲率半径, 进而导致对称轴处的 LE11 应变略大于弯折区边缘处, 这对结果分析有一定的影响.

5 应变测量理论评估

5.1 应变测量理论的可靠性评估

提取模拟结果中对称轴处的各膜层的 LE11 应变, 将其与基于应变测量理论的实验结果进行对比, 如图 5 所示. 由图可以看出, 实验结果与模拟结果基本一致, 这证明了膜层应变测量理论的可靠性, 也证明了模拟参数的可靠性, 进而可以借助现有的材料参数进行深入地分析. 二者差异最大处位于膜层 Film3, 这是由于 Film3 的模量较小, 两侧胶层 OCA 的材料参数对模拟结果的影响更大. 但从整体上看, 整个模组各膜层的应变结果是准确的, 因而应变测试理论是可靠的.

5.2 测量理论准确性的影响因素

为了进一步分析影响应变测量理论可靠性的主要因素, 本文选取了考虑弯折后静置以及模组与框架间

隙的几种不同情况下的模组弯折区应变状态进行分析, 如图 6 所示.

图 6(a) 表示紧密粘合下, 弯折完成后瞬间的模组弯折区各膜层的 LE11 应变分布, 图 6(b) 表示静置 1 h 的弯折区各膜层的 LE11 应变分布. 可以看出, 弯折刚完成时, 从对称轴位置到弯折区边缘, 模组的各膜层应变分布均匀; 而静置 1 h 后的模组弯折区, 从对称轴位置到弯折区边缘, 各膜层的应变逐渐减小. 这表明弯折刚完成时, 弯折区形态更接近于完美的圆弧形, 即更贴近纯弯曲的变形状态. 静置过程中, 胶层 OCA 不断蠕变, 释放了模组中的部分应力, 也导致模组的弯折区形状不再是完美的圆弧形, 这会影响本文应变测量理论的结果. 此外, 弯折刚完成时最大拉、压应变分别为 0.0347 和 -0.0322, 而静置 1 h 后, 模组的拉、压应变绝对值都有所降低, 因而应尽可能地获得弯折刚完成时的应变, 因为此时膜层应变更大, 破坏风险更大. 基于上述原因, 在条件允许的情况下, 模组弯折完成后应尽快进行膜层之间的相对滑移量测试, 此时既能保证弯折区的纯弯曲状态, 又能获得膜层应变的峰值.

制样过程中, 弯折区的形态受速干胶粘合情况的影响. 倘若将模组粘合到框架上时, 模组与框架之间存在间隙, 则弯折完成后瞬间及静置 1 h 后的模组弯折区各膜层的 LE11 应变分布分别如图 6(c) 和 (d) 所示. 同样地, 随着模组的静置, 从对称轴位置到弯折区边缘, 膜层的应变差异变大. 但不同于图 6(a) 和 (b) 紧密粘合的情况, 由图 6(c) 可以看出, 即使是模组弯折完成后的瞬间, 弯折区形态也不是圆弧形, 静置之后, 弯折区形态朝偏离圆弧形的状态发展. 因而在制样过程中应使得模组与框架紧密地粘合. 另一方面, 应保证 Film1 弯折区的弧长恰好为框架内距的 $\pi/2$ 倍, 从而保证弯折区的形态.

一般情况下, 三维 CT 扫描的分辨率是低于扫描电镜的, 对于模组宽度不大的情况, 可以在模组的边缘做标记, 然后在电镜下测量边缘的滑移情况, 这避免了镶样磨样引入的误差. 在这种情况下, 获取边缘的各膜层相对滑移量之后, 基于本文的应变测量理论, 同样可以获得模组中各膜层的应变值.

6 结论

根据可折叠 OLED 模组的多中性面现象, 推导了

图 6 (网络版彩图)几种不同情况下的模组弯折区的各膜层LE11应变. (a) 紧密粘合下的模组弯折完成后瞬间的应变; (b) 紧密粘合下的模组静置1 h后的应变; (c) 有间隙时的模组弯折完成后瞬间的应变; (d) 有间隙时的模组静置1 h后的应变

Figure 6 (Color online) LE11 strain results of each film in the bending zone of the module in several cases. (a) Strain of the module right after the module stops bending under seamless adhesion; (b) strain of the module after standing for 1 h under seamless adhesion; (c) strain of the module right after the module stops bending under a gap; (d) strain of the module after standing for 1 h under a gap.

各膜层的应变与相对滑移量之间的关系, 建立的模组应变测量理论表明, 可以通过测量各膜层之间的相对滑移量来确定膜层应变.

分别采取CT直接测试与镶样磨样-电镜观测两种方式获取了OLED模组各膜层之间的相对滑移量. 镶样磨样-电镜观测法在镶样时镶料会固化收缩, 造成弯折模组的形态变化, 在磨样时OCA产生溢出, 阻碍对膜层的观测. 而CT直接测试法获得的结果较好, 因而选用CT扫描获取了各膜层间的滑移量, 然后通过应变

测量理论计算了各膜层的内外侧应变.

搭建了OLED模组的弯折仿真模型, 提取了模拟计算结果的膜层切向应变, 与本文应变测量方法获取的膜层切向应变进行对比, 从整体上看二者基本一致, 这证明了应变测量理论的可靠性. 分析了模组弯折后的静置以及模组与框架的粘合间隙对各膜层应变的影响, 结果表明, 为保证应变测量理论的准确性, 应尽可能地获得弯折刚完成时的应变, 并使得模组与框架紧密地粘合.

致谢 环境扫描电镜测试在华中科技大学分析测试中心罗慧倩等人的支持下得以完成, CT测试在英华检测(上海)有限公司王卉、武俊鹏等人的帮助下得以顺利实施, 课题开展期间研究团队的刘渊恪、陈宇豪、邹岚韬、时俊克以及华星光电的贾永臻、华为的段宝明等人给予了大力帮助, 在此深表感谢.

参考文献

- 1 Tang C W, VanSlyke S A. Organic electroluminescent diodes. *Appl Phys Lett*, 1987, 51: 913–915
- 2 Sain N, Sharma D, Choudhary P. A review paper on: Organic light-emitting diode (OLED) technology and applications. *Int J Eng Appl Sci Technol*, 2020, 04: 587–591
- 3 Huang Y, Hsiang E L, Deng M Y, et al. Mini-LED, Micro-LED and OLED displays: Present status and future perspectives. *Light Sci Appl*, 2020, 9: 105
- 4 Chen H W, Lee J H, Lin B Y, et al. Liquid crystal display and organic light-emitting diode display: Present status and future perspectives. *Light Sci Appl*, 2018, 7: 17168
- 5 Lee S M, Kwon J H, Kwon S, et al. A review of flexible OLEDs toward highly durable unusual displays. *IEEE Trans Electron Devices*, 2017, 64: 1922–1931
- 6 Yang M J, Niu L B, Chen J L, et al. Organic stacked light-emitting devices based on PEDOT: PSS layer (in Chinese). *Sci Sin-Phys Mech Astron*, 2020, 50: 074202 [杨明军, 牛连斌, 陈丽佳, 等. 导电聚合物作为连接层的叠层电致发光器件. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2020, 50: 074202]
- 7 Park J H, Kim C H, Lee J H, et al. Transparent and flexible SiOC films on colorless polyimide substrate for flexible cover window. *Micromachines*, 2021, 12: 233
- 8 Won Y, Shin H S, Jo M, et al. An electrically switchable dye-doped liquid crystal polarizer for organic light emitting-diode displays. *J Mol Liquids*, 2021, 333: 115922
- 9 Kim B C, Lim Y J, Song J H, et al. Wideband antireflective circular polarizer exhibiting a perfect dark state in organic light-emitting-diode display. *Opt Express*, 2014, 22: A1725
- 10 Tian H, Yang Y, Xie D, et al. A novel flexible capacitive touch pad based on graphene oxide film. *Nanoscale*, 2013, 5: 890–894
- 11 Yagi I, Hirai N, Miyamoto Y, et al. A flexible full-color AMOLED display driven by OTFTs. *J Soc Inf Display*, 2008, 16: 15–20
- 12 Han Y C, Jeong E G, Kim H, et al. Reliable thin-film encapsulation of flexible OLEDs and enhancing their bending characteristics through mechanical analysis. *RSC Adv*, 2016, 6: 40835–40843
- 13 Liu Y, Liao D, Wu D, et al. Stress simulation of a foldable active matrix organic light-emitting diode panel with opening thin film transistor structures based on a finite element unit-cell model. *J Soc Inf Display*, 2021, 29: 489–496
- 14 Park C H, Lee S J, Lee T H, et al. Characterization of an acrylic polymer under hygrothermal aging as an optically clear adhesive for touch screen panels. *Int J Adhes Adhes*, 2015, 63: 137–144
- 15 Wang M, Chen D, Feng W, et al. Synthesis and characterization of optically clear pressure-sensitive adhesive. *Mater Trans*, 2015, 56: 895–898
- 16 Niu Y F, Liu S F, Chiou J Y, et al. Improving the flexibility of AMOLED display through modulating thickness of layer stack structure. *J Soc Inf Disp*, 2016, 24: 293–298
- 17 Yan J Y, Ho J C, Chen J. Foldable AMOLED display development: Progress and challenges. *Inf Display*, 2015, 31: 12–16
- 18 Wu D, Liao D, Shi J, et al. Structural optimization method of foldable active-matrix organic light-emitting diode panel based on mechanical theory. *J Soc Inf Disp*, 2021, 29: 923–929
- 19 Jia Y, Liu Z, Wu D, et al. Mechanical simulation of foldable AMOLED panel with a module structure. *Org Electron*, 2019, 65: 185–192
- 20 Chae Y, Chae G S, Youn Y O, et al. Optimal design of thickness and Young's modulus of multi-layered foldable structure considering bending stress, neutral plane and delamination under 2.5 mm radius of curvature. *Int J Precis Eng Manuf*, 2018, 19: 1143–1154
- 21 Liu Z Z, Liao D M, Jia Y Z, et al. Stress simulation of foldable OLED screen bending (in Chinese). *Chin J Liq Cryst Disp*, 2018, 33: 555–560 [刘正周, 廖敦明, 贾永臻, 等. 可折叠OLED屏幕的弯折应力仿真. 液晶与显示, 2018, 33: 555–560]
- 22 Salmon F, Everaerts A, Campbell C, et al. Modeling the mechanical performance of a foldable display panel bonded by 3M optically clear adhesives. *SID Symp Dig Tech Papers*, 2017, 48: 938–941
- 23 Abrahamson J T, Beagi H Z, Salmon F, et al. Optically clear adhesives for OLED. In: Pyshkin S, ed. *Luminescence: OLED Technology and Applications*. London: IntechOpen, 2019. 63–89
- 24 Lee T H, Kim J S, Lee J H, et al. Pressure-sensitive adhesives for flexible display applications. In: Vargas-Bernal R, He P, Zhang S, eds. *Hybrid Nanomaterials: Flexible Electronics Materials*. London: IntechOpen, 2019. 67–82

- 25 Cheng A, Chen Y, Jin J, et al. Study on mechanical behavior and effect of adhesive layers in foldable AMOLED display by finite element analysis. *SID Symp Dig Tech Papers*, 2019, 50: 1060–1063
- 26 Li J, Yang G, Siebert T, et al. A method of the direct measurement of the true stress-strain curve over a large strain range using multi-camera digital image correlation. *Opt Lasers Eng*, 2018, 107: 194–201
- 27 Dong B, Li C, Pan B. Ultrasensitive video extensometer using single-camera dual field-of-view telecentric imaging system. *Opt Lett*, 2019, 44: 4499–4502
- 28 Suryana A, Muntini M S. Strain gage for mass sensor using cantilever beam. In: 2017 International Conference on Computing, Engineering, and Design (ICCED). Kuala Lumpur: IEEE, 2017. 1–4
- 29 Belhouideg S, Lagache M. Effect of embedded strain gage on the mechanical behavior of composite structures. *J Mod Mater*, 2018, 5: 1–7
- 30 Lehmann T, Stockmann M, Ihlemann J, et al. Applications of electrical strain gages in the fields of monitoring and material mechanics. *GAMM-Mitteilungen*, 2018, 41: e201800006
- 31 Wu X P. A brief review of photomechanics progress in recent 40 years (in Chinese). *J Exp Mech*, 2010, 25: 491–508 [伍小平. 近40年光力学进展的回顾. *实验力学*, 2010, 25: 491–508]
- 32 Zheng J, Zhao H W, Duo X M. Summarization of stress and strain test method (in Chinese). *Auto Sci-Tech*, 2009, 1: 5–8 [郑俊, 赵红旺, 朵兴茂. 应力应变测试方法综述. *汽车科技*, 2009, 1: 5–8]
- 33 Vishnoi A, Rajshekhar G. Rapid deformation analysis in digital holographic interferometry using graphics processing unit accelerated Wigner-Ville distribution. *Appl Opt*, 2019, 58: 4420–4424
- 34 Hÿtch M, Houdellier F, Hÿe F, et al. Nanoscale holographic interferometry for strain measurements in electronic devices. *Nature*, 2008, 453: 1086–1089
- 35 Narayanamurthy C S, Pedrini G, Osten W. Digital holographic photoelasticity. *Appl Opt*, 2017, 56: F213
- 36 Fourney M E. Application of holography to photoelasticity. *Exp Mech*, 1968, 8: 33–38
- 37 Wu B, Han B. Advanced mechanical/optical configuration of real-time moiré interferometry for thermal deformation analysis of fan-out wafer level package. *IEEE Trans Compon Packag Manufact Technol*, 2018, 8: 764–772
- 38 Ifju P G, Han B. Recent applications of moiré interferometry. *Exp Mech*, 2010, 50: 1129–1147
- 39 Post D, Han B, Ifju P G. Moiré methods for engineering and science-moiré interferometry and shadow moiré. In: Rastogi P K, ed. *Photomechanics. Topics in Applied Physics*, vol 77. Berlin, Heidelberg: Springer, 2000. 151–196
- 40 Post D, Baracat W A. High-sensitivity moiré interferometry—A simplified approach. *Exp Mech*, 1981, 21: 100–104
- 41 Wu L F, Zhang B G, Huo C M, et al. Experimental study on residual stress measurement methods of moiré interferometry based on ring-core and slitting (in Chinese). *Sci Sin-Tech*, 2015, 45: 503–511 [吴立夫, 张宝鸽, 霍成民, 等. 基于云纹干涉技术的环芯和切槽残余应力测量方法的实验研究. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 503–511]
- 42 Archbold E, Ennos A E. Displacement measurement from double-exposure laser photographs. *Opt Acta-Int J Opt*, 1972, 19: 253–271
- 43 Stetson K A. From the speckle interferometer to digital holography. *Proc SPIE*, 2018, 10749: 107490D
- 44 Wu X, Yu H, Li X, et al. Microdeformation evolution properties of copper bicrystals by digital speckle correlation metrology. *Proc SPIE-Int Soc Opt Eng*, 1997, 2921: 643–648
- 45 Shao X X, Chen Z N, Dai X J, et al. High-accuracy two-dimensional full field strain measurement method using camera array (in Chinese). *Sci Sin Tech*, 2015, 45: 483–490 [邵新星, 陈振宁, 代祥俊, 等. 相机阵列测量二维应变场的高精度分析方法. *中国科学: 技术科学*, 2015, 45: 483–490]
- 46 Pan B, Qian K, Xie H, et al. Two-dimensional digital image correlation for in-plane displacement and strain measurement: A review. *Meas Sci Technol*, 2009, 20: 062001
- 47 Huang X, Liu Z, Xie H. Recent progress in residual stress measurement techniques. *Acta Mech Solid Sin*, 2013, 26: 570–583
- 48 Schöberl E, Breite C, Melnikov A, et al. Fibre-direction strain measurement in a composite ply under quasi-static tensile loading using digital volume correlation and *in situ* synchrotron radiation computed tomography. *Compos Part A-Appl Sci Manuf*, 2020, 137: 105935
- 49 Huang W X, Yuan Q X, Tian Y L, et al. Diffraction-enhanced imaging experiments in BSRF (in Chinese). *Acta Phys Sin*, 2005, 54: 677–681 [黄万霞, 袁清习, 田玉莲, 等. 同步辐射硬X射线衍射增强成像新进展. *物理学报*, 2005, 54: 677–681]
- 50 Shahzad M, Kamran A, Siddiqui M Z, et al. Mechanical characterization and FE modelling of a hyperelastic material. *Mat Res*, 2015, 18: 918–924

- 51 Martins P A L S, Natal Jorge R M, Ferreira A J M. A comparative study of several material models for prediction of hyperelastic properties: Application to silicone-rubber and soft tissues. [Strain](#), 2006, 42: 135–147
- 52 Renaud F, Dion J L, Chevallier G, et al. A new identification method of viscoelastic behavior: Application to the generalized maxwell model. [Mech Syst Signal Process](#), 2011, 25: 991–1010
- 53 Soussou J E, Moavenzadeh F, Gradowczyk M H. Application of Prony series to linear viscoelasticity. [Trans Soc Rheol](#), 1970, 14: 573–584
- 54 Barrientos E, Pelayo F, Noriega Á, et al. Optimal discrete-time Prony series fitting method for viscoelastic materials. [Mech Time-Depend Mater](#), 2019, 23: 193–206
- 55 Ni Q, Li G Q, Qian Q. Mechanics of Materials (in Chinese). 2nd ed. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 2010. 75–77 [倪樵, 李国清, 钱勤. 材料力学. 第2版. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010. 75–77]
- 56 Shi Y, Rogers J A, Gao C, et al. Multiple neutral axes in bending of a multiple-layer beam with extremely different elastic properties. [J Appl Mech](#), 2014, 81: 114501

Film strain measurement method of flexible display modules based on mechanical theory

WU Di^{1,2}, FAN ShuYuan^{1,2}, LIAO DunMing^{1,2*}, CHEN JianPing^{1,2}, PENG WenJing^{1,2},
XIA ZhiQing^{1,2} & CHENG Kun^{1,2}

¹ State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

² School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China

The flexible organic light-emitting diode (OLED) display modules are composed of films and adhesives, and the films are prone to damage during the folding process. To ensure the trouble-free use of the module, it is necessary to measure the film strain experimentally, but current methods are not suitable for the strain measurement of each film in the OLED module. In this paper, the relative slips among various films of the OLED module are measured based on the computed tomography method, and the relationship between the relative slips and strains is deduced according to mechanical theory. The strain of each film is indirectly obtained by measuring the relative slips among various films, providing a new method for strain measurement. Then, it is compared with the simulation results, so the accuracy of material parameters and the reliability of strain measurement theory are verified. Finally, the factors affecting the accuracy of the strain measurement method are explored. The analysis shows that the accuracy of strain measurement is ensured by the strain right after the module stops bending and the seamless adhesion between the module and frame.

strain measurement method, flexible display, multilayer module, mechanical theory

PACS: 46.05.+b, 46.25.Cc, 46.35.+z, 46.80.+j, 78.60.Fi

doi: [10.1360/SSPMA-2021-0319](https://doi.org/10.1360/SSPMA-2021-0319)