

文章编号:1007-2780(2018)07-0555-06

可折叠 OLED 屏幕的弯折应力仿真

刘正周¹, 廖敦明^{1*}, 贾永臻¹, 张 博¹, 吴 棣¹, 陈继峯²

(1. 华中科技大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430074;

2. 武汉华星光电半导体显示技术有限公司, 湖北 武汉 430078)

摘要: 柔性 OLED 屏幕在弯折的过程中, 容易出现器件损伤、胶层剥离等现象。调整显示层的应力中性层位置和光学透明胶(OCA)胶层的应变是解决该问题的主要途径。本文通过建立柔性 OLED 屏幕的弯折仿真模型, 分析了不同堆叠结构、保护盖板刚度、OCA 胶层厚度、背板厚度和弯折半径对弯折后显示层应力中性层位置和 OCA 胶层应变的影响。结果表明, 不同堆叠结构对显示层的应力中性层位置有很大影响, 保护盖板刚度与 OCA 胶层厚度均对显示层的应力中性层位置无影响, 背板厚度的增大使显示层应力中性层位置向下移动, 弯折半径增大使结构应力下降, 保护盖板刚度降低、OCA 胶层厚度增大、背板厚度减小均对 OCA 胶层应变降低有利。仿真结果为柔性 OLED 的屏幕结构设计、材料选用以及解决弯折过程中出现的力学问题提供了参考。

关键词: 柔性 OLED; 折叠; 应力中性层; 仿真分析

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A **doi:** 10.3788/YJYXS20183307.0555

Stress simulation of foldable OLED screen bending

LIU Zheng-zhou¹, LIAO Dun-ming^{1*}, JIA Yong-zhen¹, ZHANG Bo¹, WU Di¹, CHEN Ji-feng²

(1. School of Materials Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China;

2. Wuhan China Star Optoelectronics Technology Co., Ltd, Wuhan 430078, China)

Abstract: Flexible OLED screens are prone to produce the phenomenon such as optical device damage, OCA peeling during the folding problem. The position of the stress neutral layer in the display layers should be carefully adjusted and the strain of the OCA layers should be reduced to solve this issue. In this paper, a simulation model for the foldable OLED screen is established. The influence of stack structures, cover window stiffness, OCA thickness, back plate thickness and bend radius on the position of stress neutral layer and the strain of OCA layers are analyzed. The results show that different stack structures have great influence on the position of stress neutral layer in the display layer, but cover window stiffness and OCA thickness have no effect on it, thicker back plate makes the stress neutral layer in the display layer move downward, larger bend radius makes the stress of whole panel reduced, meanwhile, lower cover window stiffness, thicker OCA layer and thinner back plate are beneficial to the strain reduction of the OCA layers. The simulation results provide a reference for the

收稿日期: 2018-02-05; 修订日期: 2018-04-21.

基金项目: 教育部新世纪优秀人才支持计划(No. NCET-13-0229); 国家杰出青年基金(No. NSFC51725504)

Supported by the Program for New Century Excellent Talents in University (No. NCET-13-0229);
National Science Fund for Distinguished Young Scholars (No. NSFC51725504)

* 通信联系人, E-mail: liaodunming@hust.edu.cn

design of flexible OLED screen structure, material selection and solving the problems occurred in the folding process.

Key words: flexible OLED; bend; neutral layer; stress simulation

1 引言

OLED 由于具有超薄、自发光、有机材质、平面结构、低温制造工序,并且能够与塑料基板相兼容等优良特征,使柔性 OLED 的制造成为可能^[1-5]。当前,柔性 OLED 屏幕正在向商业化的方向发展^[6],可折叠屏幕是其发展方向之一。当柔性 OLED 屏幕沿某一中线折叠时^[7],光学透明导电胶 (Optically Clear Adhesive, OCA) 胶层易产生剥离^[8],各个膜层均有应力中性层的出现,即应力应变变为 0 的位置,显示层的光学器件最容易产生损伤^[9]。因此,如何改善整个结构中的应力应变分布情况成为了多层堆叠结构屏幕所面临的主要问题,针对这些情况,已有学者从结构设计的角度对柔性屏幕进行性能改进,但仅比较了保护盖板厚度对中性层的影响,研究范围少,且对胶层剥离问题没有讨论^[10]。本文重点探究影响显示层处应力中性层位置的因素,从而进行调整,避免弯折过程对显示层造成的过度破坏,同时,减小胶层应变,使胶层剥离问题得到改善。对柔性 OLED 屏幕的弯折过程进行仿真分析,比较弯折 90°并静置 300 s 时,各层材料的堆叠结构、保护盖板刚度、OCA 胶层厚度、背板厚度以及弯折半径对显示层的应力、各 OCA 胶层应变产生的影响,通过材料参数、结构的调整,达到改善、消除上述缺陷的目的。

2 仿真模型建立

2.1 几何模型建立及边界条件设置

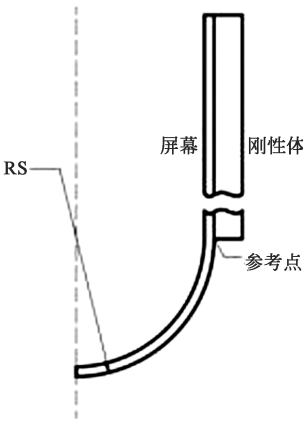
柔性 OLED 屏幕由多层结构组成,屏幕长度为 150 mm,下方设置刚性体,其尺寸参数如图 1 (a)所示。弯折时,由刚性体的转动带动屏幕弯折,为使弯折部位形成圆弧状以尽量减小受力,设定对称轴与参考点之间的距离为 $\frac{\pi}{4}R$,当半径为 5 mm 时,该距离即 7.85 mm,此外,参考点还需向左运动 $(\frac{\pi}{4}-1)R$,即 2.85 mm,最终达到图 1 (b)

位置。屏幕结构由上至下依次为保护盖板、OCA、触摸层、OCA、偏光片、OCA、显示层、基板、OCA、背板,各部分厚度如图 2 所示。



(a) 屏幕尺寸参数

(a) Screen dimension parameters



(b) 弯折后尺寸参数

(b) Bending dimension parameters

图 1 几何模型

Fig.1 Geometric model

保护盖板—60 μm
OCA—25 μm
触摸层—50 μm
OCA—25 μm
偏光片—47 μm
OCA—20 μm
显示层—10 μm
基板—15 μm
OCA—25 μm
背板—75 μm

图 2 屏幕结构

Fig.2 Screen structure

本文采用 Abaqus,将仿真模型简化为二维平面应变问题,给定的边界条件为,前 1 s 内,刚性体围绕参考点逆时针旋转,转速为 1.57 rad/s,同时向左移动,速度为 2.85 mm/s;随后,静置 300 s 以贴近实际使用情况。

2.2 网格划分

分析模型采用四面体网格进行划分,长度方向尺寸为 0.025 mm,厚度方向所有结构均划分为三层。网格单元类型选择平面应变、杂交、减缩积分单元。

2.3 材料模型

本文中保护盖板弹性模量为 5.6 GPa;背板弹性模量为 4.076 GPa;选用的 OCA 胶材具有超弹性和黏弹性,是一种不可压缩材料。其中,超弹性描述变形过程中的非线性弹性行为;黏弹性描述材料性能与应变率之间的关系^[11]。

超弹性本构模型有 Ogden、Mooney-Rivlin、Van der Waals、Yeoh 等多种形式^[12]。由于 Yeoh 模型与实验数据拟合结果较好,且计算收敛性强,因此本文采用 Yeoh 模型,其具体参数如表 1 所示。

表 1 Yeoh 模型参数

Tab.1 Parameters of Yeoh Model

C10	C20	C30
0.010 605 3	-0.000 120 6	1.731 8×10 ⁻⁶

黏弹性参数可通过剪切松弛实验数据经归一化处理后输入得到,如图 3 所示。

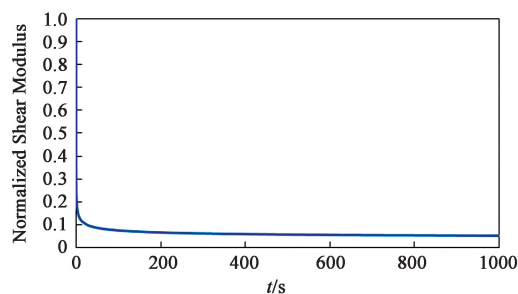


图 3 黏弹性数据

Fig.3 Viscoelastic data

3 结果与讨论

3.1 不同堆叠结构对比

在探究不同堆叠结构对显示层应力中性层的

影响时,由于显示层与基板为一整体,因此选取显示层与封装层作为空白对照,以此为基础增加其他材料,对比 5 组不同结构(1、显示层+基板;2、偏光片+OCA+显示层+基板;3、触摸层+OCA+偏光片+OCA+显示层+基板;4、保护盖板+OCA+触摸层+OCA+偏光片+OCA+显示层+基板;5、全结构模型)中显示层在弯折 90°并静置 300 s 时的应力中性层变化,结果如图 4 所示。

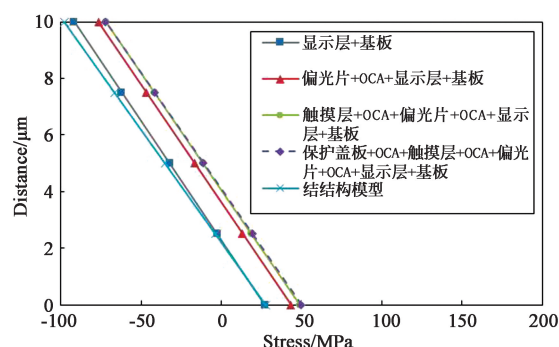


图 4 不同堆叠结构对显示层应力影响

Fig.4 Influence of different stack structure on the stress of display layer

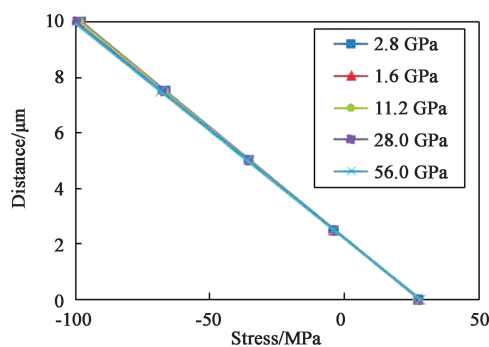
可见,在显示层与基板的基础上,增加偏光片后,应力中性层明显上移,加入触摸层后,应力中性层继续上移,保护盖板的加入没有产生影响,但最后加入背板后,应力中性层位置发生了显著变化,下移程度较大,基本回到初始位置。从中可以发现,结构的变化和调整对应力中性层位置改变有很大影响。

3.2 保护盖板不同刚度对比

保护盖板属于柔性屏幕结构中较易进行调整的膜层,基于此,对保护盖板进行材料参数调整,探究其刚度对应力应变的影响。

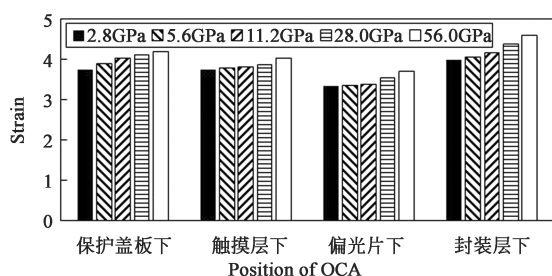
选用弹性模量分别为 2.8 GPa、5.6 GPa、11.2 GPa、28.0 GPa、56.0 GPa 的保护盖板进行对比分析,讨论对显示层应力中性层和 OCA 胶层应变的影响,结果如图 5 所示。

从图 5 中可以看出,在不同刚度下,显示层应力曲线基本重合,即保护盖板刚度对显示层应力中性层的影响可以忽略不计;而 OCA 胶层的应变随着刚度变化有明显改变,保护盖板弹性模量变大,各 OCA 胶层的应变也有不同程度增加。保护盖板的刚度变化,仅对该层应力产生了较为显著的影响,随着刚度增加,该层应力显著上升,



(a) 保护盖板刚度对显示层应力影响

(a) Influence of cover window stiffness on the stress of display layer

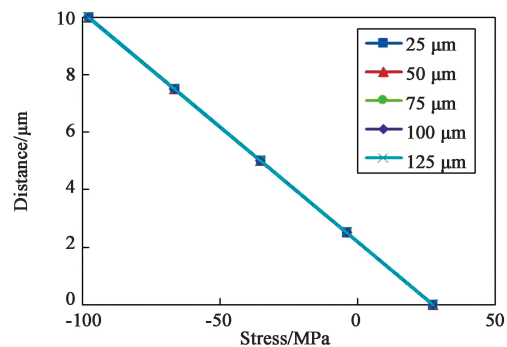


(b) 保护盖板刚度对各 OCA 胶层应变影响

(b) Influence of coverwindow stiffness on the strain of OCA layers

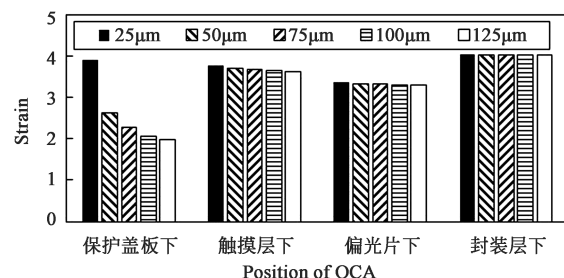
图 5 保护盖板不同刚度对比

Fig.5 Contrast of different cover window stiffness



(a) 保护盖板下 OCA 厚度对显示层应力影响

(a) Influence of OCA layer thickness under protective cover on the stress of display layer



(b) 保护盖板下 OCA 厚度对各 OCA 胶层应变影响

(b) Influence of OCA layer thickness under protective cover on the strain of OCA layers

图 6 保护盖板下 OCA 不同厚度对比

Fig.6 Contrast of different OCA thickness under protective cover

因此与之相邻的 OCA 胶层应变也随之变化,从而间接影响到其他胶层的应变。适当降低保护盖板刚度,有利于屏幕弯折过程的优化。

3.3 保护盖板下 OCA 胶层不同厚度对比

OCA 胶层用于屏幕中不同膜层之间的粘结,其厚度易于调整,因此探究 OCA 胶层厚度对应力应变的影响很有必要。

为便于比较,仅对保护盖板下的 OCA 胶层厚度进行改变,厚度分别取为 25 μm 、50 μm 、75 μm 、100 μm 、125 μm ,其结果如图 6 所示。

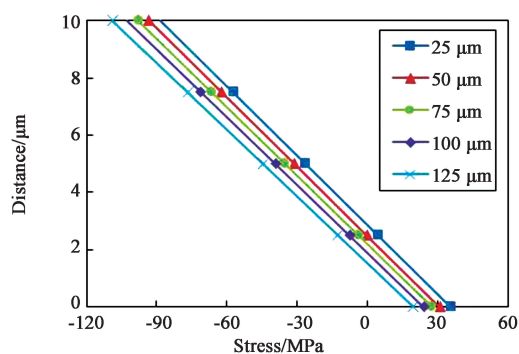
由图 6 可知,在不同 OCA 厚度下,显示层应力曲线基本重合,即 OCA 胶层厚度对显示层应力中性层的影响可以忽略不计;而各 OCA 胶层的应变,与 OCA 胶层厚度变化关系密切,随着保护盖板下 OCA 胶层厚度增大,该层应变明显降低,其他层应变也有较小减小。OCA 胶层厚度的增大,仅对与之相邻的保护盖板、触摸层产生较明显的影响。一方面,保护盖板由于胶层厚度增加,

使弯折时的曲率增加,从而导致应力的增大,对胶层应变减小起抑制作用;另一方面,胶层厚度增大,使单位长度胶层受力减小,对应变减小起促进作用,且效果更为显著,因此,胶层应变最终呈现出降低趋势。为降低保护盖板的剥离风险,可以适当增厚其下部 OCA 胶材的厚度。

3.4 背板不同厚度对比

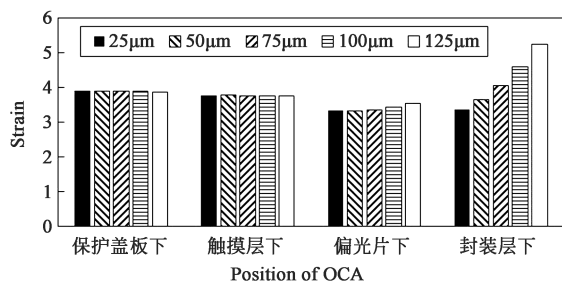
背板常常处在柔性屏幕的最下方,对光学器件起到保护和支撑的作用,因此,背板对显示层中性层的影响也需进行探讨。选用厚度分别为 25 μm 、50 μm 、75 μm 、100 μm 、125 μm 的背板进行对比分析,其结果如图 7 所示。

可见,背板厚度对显示层的应力中性层位置和胶层应变均有很大影响。背板厚度的增加,使显示层的弯折曲率增大,应力中性层位置下移。因此,增大背板厚度有利于降低 OLED 器件所受到的拉应力,对显示层起保护作用,但不利于胶层



(a) 背板厚度对显示层应力影响

(a) Influence of back plate thickness on the stress of display layer



(b) 背板厚度对各 OCA 胶层应变影响

(b) Influence of back plate thickness on the strain of OCA layers

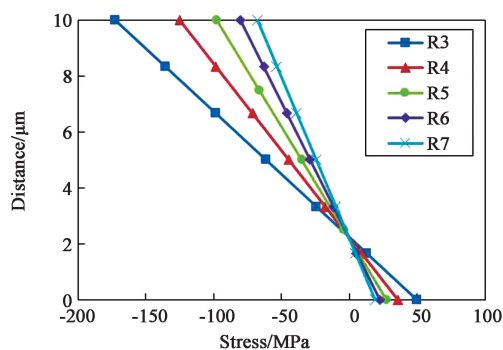
图 7 背板不同厚度对比

Fig.7 Contrast of different back plate thickness

应变的降低,需综合考虑进行调整。

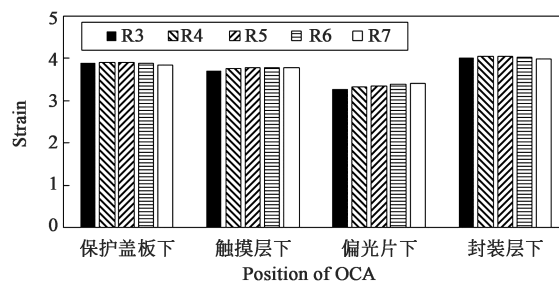
3.5 不同弯折半径对比

柔性 OLED 屏幕的弯折半径是设计时必须考虑的因素。在进行弯折半径对屏幕影响的研究时,采用半径 3 mm、4 mm、5 mm、6 mm、7 mm 做对比,其结果如图 8 所示。



(a) 弯折半径对显示层应力影响

(a) Influence of bend radius on the stress of display layer



(b) 弯折半径对各 OCA 胶层应变影响

(b) Influence of bend radius on the strain of OCA layers

图 8 弯折半径对比

Fig.8 Contrast of bend radius

可以看出,随着弯折半径的增大,显示层应力下降,胶层应变变化不显著。弯折半径的增大,使得整体结构的受力情况都有所改善。

4 结 论

本文针对柔性 OLED 屏幕弯折时的应力应变进行模拟分析,并讨论了堆叠结构、玻璃盖板刚度、玻璃盖板下 OCA 胶层厚度、弯折半径等 4 个因素,对显示层应力中性层位置和各 OCA 胶层厚度的影响,经过对比分析,得出以下结论:

(1)不同堆叠结构对显示层的应力中性层位置有很大影响,是造成应力中性层位置变化的重要因素。

(2)当保护盖板刚度从 2.8 GP 提高到 56 GPa 时,显示层的应力中性层位置基本没有改变,但各个 OCA 胶层应变有所增加。

(3)保护盖板下 OCA 胶层厚度从 25 μm 增加到 125 μm 时,显示层的应力中性层位置基本无变化,但该层应变有显著降低。

(4)背板厚度由 25 μm 增大到 125 μm 时,显示层的应力中性层位置下移,与其相邻的 OCA 胶层应变增大。

(5)弯折半径由 3 mm 增大到 7 mm 时,显示层应力有明显下降,且 OCA 胶层应变变化不显著。

综合以上可知,适当减小保护盖板刚度、背板厚度,增大保护盖板下 OCA 厚度,均有利于改善胶层剥离现象;增大背板厚度有利于显示层拉力降低,弯折半径的增大有利于结构整体应力优化,可对显示层起保护作用。

参 考 文 献:

- [1] LEOK. Organic light-emitting diodes: efficient and Flexible solution [J]. *Nature Photonics*, 2011, 5(12): 716-718.
- [2] LEE S M, CHO Y, KIM D Y, *et al.* Enhanced light extraction from mechanically flexible, nanostructured organic light-emitting diodes with plasmonic nanomesh electrodes [J]. *Advanced Optical Materials*, 2015, 3(9): 1240-1247.
- [3] 马东阁. OLED 显示与照明——从基础研究到未来的应用[J]. 液晶与显示, 2016, 31(3): 229-241.
MA D G. OLED display and lighting—from basic research to future applications [J]. *Chinese Journal of Liquid Crystals and Displays*, 2016, 31(3): 229-241. (in Chinese)
- [4] 刘晋红, 张方辉. OLED 薄膜干燥剂的制备及其对 OLED 的影响[J]. 发光学报, 2017, 38(1): 76-84.
LIU J H, ZHANG F H. Preparation of OLED desiccant film and the Impact for OLED [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2017, 38(1): 76-84. (in Chinese)
- [5] 杨永强, 段羽, 陈平, 等. 低温原子层沉积氧化铝作为有机电致发光器件的封装薄膜 [J]. 发光学报, 2014, 35(9): 1087-1092.
YANG Y Q, DUAN Y, CHEN P, *et al.* Deposition of Al_2O_3 film using atomic layer deposition method at low temperature as encapsulation layer for OLEDs [J]. *Chinese Journal of Luminescence*, 2014, 35(9): 1087-1092. (in Chinese)
- [6] LEE S M, KWON J H, KWON S, *et al.* A review of flexible OLEDs toward highly durable unusual displays [J]. *IEEE Transactions on Electron Devices*, 2017, 64(5): 1922-1931.
- [7] 李琛, 黄根茂, 段炼, 等. 柔性有机发光二极管材料与器件研究进展[J]. 中国材料进展, 2016, 35(2): 101-107.
LI C, HUANG G M, DUAN L, *et al.* Recent advances in organic light-emitting diodes for flexible applications [J]. *Materials China*, 2016, 35(2): 101-107. (in Chinese)
- [8] 曹艳, 汪辉. OLED 技术及柔性 OLED 性能、缺陷的研究[J]. 现代显示, 2008(6): 36-39.
CAO Y, WANG H. The OLED technology, the performance and deficiency of flexible OLED [J]. *Advanced Display*, 2008(6): 36-39. (in Chinese)
- [9] CAMPBELL C J, CLAPPER J, BEHLING R E, *et al.* Optically clear adhesives enabling foldable and flexible OLED displays [J]. *SID Symposium Digest of Technical Papers*, 2017, 48(1): 2009-2011.
- [10] LEE CC, SHIH Y S, WU C S, *et al.* Development of robust flexible OLED encapsulations using simulated estimations and experimental validations [J]. *Journal of Physics D: Applied Physics*, 2012, 45(27): 275102.
- [11] 薛宗伟. 基于 Abaqus 的光学胶动态力学行为分析[J]. 计算机辅助工程, 2013, 22(S2): 404-407.
XUE Z W. Analysis on dynamic mechanical behavior for optical adhesive based on Abaqus [J]. *Computer Aided Engineering*, 2013, 22(S2): 404-407. (in Chinese)
- [12] 王文涛, 上官文斌, 段小成. 超弹性本构模型对橡胶隔振器静态特性预测影响的研究 [J]. 汽车工程, 2012, 34(6): 544-550, 539.
WANG W T, SHANGGUAN W B, DUAN X C. A study on the effects of hyperelastic constitutive models on the static characteristic prediction of rubber isolator [J]. *Automotive Engineering*, 2012, 34(6): 544-550, 539. (in Chinese)

作者简介: 刘正周(1995—), 男, 湖北保康人, 硕士生, 主要从事有限元仿真分析方面的研究。E-mail: 467401235@qq.com

廖敦明(1973—), 男, 湖南人, 博士, 教授, 主要研究领域为材料成形数字化。E-mail: liaodunming@hust.edu.cn