

文章编号:1007-2780(2022)09-1151-07

柔性 OLED 模组的落笔冲击仿真与模组优化分析

邹岚韬, 廖敦明*, 吴 棣, 时俊克, 黄丽婷, 石 爽

(华中科技大学 材料科学与工程学院 材料成形与模具技术国家重点实验室,
湖北 武汉 430074)

摘要: 柔性 OLED 模组在使用过程中, 由于撞击等因素, 会导致内部元器件受损。修改模组的结构, 通过机械试验测试性能, 是提升模组抗冲击性能的有效办法。本文通过有限元仿真的方法, 建立了落笔冲击试验的有限元模型, 分析了落笔冲击中使用单层盖板与双层盖板、改变盖板的厚度与模量、改变OCA胶层的厚度与模量、是否增加钢片(SUS)层等因素对柔性 OLED 显示模组中比较容易受损的薄膜封装(TFE)层的最大应变的影响。仿真结果表明, 使用双层盖板结构、增加上侧盖板和OCA胶材的厚度和模量、在底板下侧增加钢片层, 能减小TFE层的最大应变, 对提高模组的抗冲击性能有利, 并通过试验验证了部分结果。仿真结果为优化结构设计、改善现有结构的抗冲击性能提供了指导。

关键词: 数值模拟; 柔性 OLED; 落笔冲击模拟; 抗冲击性能

中图分类号: TN141 **文献标识码:** A **doi:** 10. 37188/CJLCD. 2022-0141

Pencil-impacted simulation and module optimization analysis of flexible OLED module

ZOU Lan-tao, LIAO Dun-ming*, WU Di, SHI Jun-ke, HUANG Li-ting, SHI Shuang

(State Key Laboratory of Materials Processing and Die & Mould Technology, School of Materials
Science and Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: The internal components of flexible OLED module will be damaged due to impact and other factors while used. Modifying the structure of the module and testing the performance through mechanical test are the effective way to improve the impact resistance strength of the module. In this paper, the finite element simulation method is used to establish a finite element model of pencil-impacted test. The model is used to analyze how the single or double cover window, the different thickness and modulus of cover window, the different thickness and modulus of OCA layers and whether add a SUS layer under the bottom will influence the maximum strain of TFE layer which is easily damaged in OLED panel. The simulation results show that using the double cover window structure, increasing the thickness and modulus of the upper cover window and OCA layer, and adding a steel SUS layer under the bottom plate can reduce the maximum strain of the TFE layer, which is beneficial to improving the impact resistance strength of the module, and some results are verified by the test. The simulation results provide guidance for

收稿日期:2022-04-22;修订日期:2022-05-09.

基金项目:湖北省科技揭榜制项目(No. 2020BED014)

Supported by Science and Technology Unveiling Program of Hubei Province (No. 2020BED014)

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

optimizing structural design and improving the impact resistance strength of existing structures.

Key words: numerical simulation; flexible OLED; pencil-impacted simulation; impact resistance strength

1 引言

与传统的 LCD 屏幕相比,有机发光二极管(OLED)模组具有广视角、自发光、超薄的厚度、更好的画质与更低的功耗、轻重量、可弯曲等诸多的优势^[1-3]。基于这些优势,柔性 OLED 模组在商标、医疗、照明、环境显示等领域有着广泛的应用前景^[4-8]。目前,柔性 OLED 模组正在向折叠、卷曲等领域发展。

由于对弯折方面的需要,柔性 OLED 模组去掉了其表面用来保护内部元件的玻璃盖板,使其抗冲击性能有所下降,在日常的使用当中,其内部的电子元件更容易受碰撞、摔落等因素损伤。为了改善柔性 OLED 模组的力学性能,学者们通常通过改进膜材的性能并使用机械试验来分析模组的相关性能^[9-10]。对于柔性显示 OLED 模组的机械试验,国际社会制定了《柔性显示器件机械试验方法冲击和硬度测试》、《柔性显示器件机械试验方法形变测试》等来规定机械试验的相关标准^[11-12]。其中,主要通过冲击试验来进行模组的抗冲击性能的研究。但机械试验的成本较为昂贵,准备时间较长,在数值上也存在着较大误差,通过有限元建模进行分析能够很好地解决这些问题。

本文通过仿真分析的方法,使用 ABAQUS 软件建立落笔冲击的有限元模型,分析柔性 OLED 模组的叠构组成、厚度和模量的变化对 OLED 模组应变的影响,为改善柔性 OLED 模组的抗冲击性能提供指导。

2 仿真模型建立

2.1 几何模型建立与边界条件设置

本文使用的 OLED 模组由多重结构组成,材料组成及尺寸参数如图 1 所示。其中,薄膜封装(TFE)层及 AMOLED 层都由多层复合结构组成,并且其有几层结构厚度相对很薄,因此对这两层叠构进行等效模量处理,将其视为一层进行计算。在落笔冲击试验中,圆珠笔在一定的高度下

做自由落体,在接触屏体后减速再弹起。试验时,屏体放置在由支架撑起的金属板上,金属支撑板与支架之间通过亚克力背胶粘合在一起,支架放置在大理石地面上,如图 2 所示,相关材料参数如表 1 所示,落笔试验中使用的圆珠笔重 12 g,笔尖圆珠直径 0.5 mm,落笔初始位置高度为 15 cm。

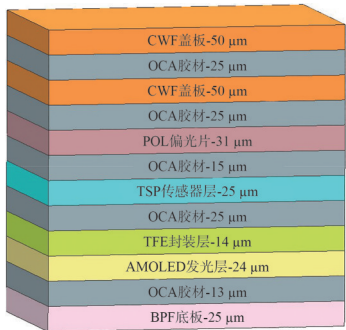


图 1 OLED 模组的结构

Fig. 1 Stack structure and thickness of OLED

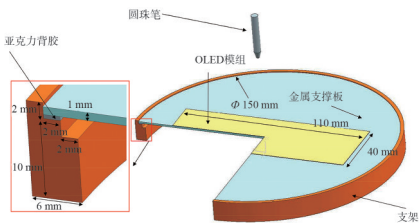


图 2 落笔冲击系统剖视图

Fig. 2 Cutaway view of the impact system

表 1 模型使用的材料参数

Tab. 1 Parameters of OLED used in the model

材料	杨氏模量/MPa	泊松比
CWF	5 500	0.29
POL	3 750	0.33
TSP	2 680	0.31
TFE	3 248	0.22
AMOLED	9 113	0.33
BPF	4 600	0.32
金属支撑板	68 900	0.33
亚克力背胶	3 300	0.37
电木支架	2 300	0.36

由于落笔冲击过程较为复杂,三维仿真模型存在计算量过大、计算时间过长以及占用资源较大等问题,本文通过设置相应的对称边界条件,将三维的冲击试验模型简化为二维的试验模型。同时,为了减小有限元分析的计算量,采用显式动态分析的方法,并设定初始时刻圆珠笔就与屏体接触,使用初速度来代替自由落体所带来的速度,根据初始高度 15 cm,换算为圆珠笔的初速度为 1 714.6 mm/s。由于圆珠笔在碰撞过程中主要是前端的笔头与 OLED 模组进行接触,为了节约计算资源,将圆珠笔模组进行化简,只保留圆珠笔头,调整圆珠笔头的密度使笔头能够达到原来整支笔的质量。地面和笔头的刚度较大,试验时也不关注其变化,因而将其设置为刚体。

2.2 网格划分

使用四边形为主的自由网格划分方式进行初始网格划分,网格选择四节点双线性轴对称四边形网格。由于屏体损坏部分基本都为落球与屏体接触部位,故对于模型的网格划分,在靠近屏体部分将网格密度增大以提高计算精度;而对于远离接触碰撞区域和地面、支架等分析需求较小的网格,则可以将网格密度适当降低来减少计算精度,从而达到计算时间与计算精度的一个均衡。在厚度方面,每层叠构间使用均匀网格,将每一层网格划分为数层,保证相邻网格间的尺寸差距不要过大以减少计算不收敛的情况。

由于OCA胶材的刚度较小,在冲击过程中,该部分结构的网格会由于挤压发生极大的变形而导致计算不收敛。为了解决这些结构的网格不收敛问题,对OCA层进行ALE自适应网格划分,并在计算中设置双精度计算以提高计算的精度,避免计算不收敛的问题出现,仿真模型如图3所示。

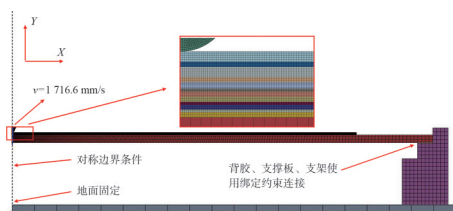


图3 简化后的有限元模型

Fig. 3 Simplified finite element model

2.3 胶材本构模型

膜层间的OCA胶材是一种同时具有超弹性

和粘弹性的不可压缩材料,其通过粘弹性来表征材料的性能与应变率之间的关系,通过超弹性表征材料变形过程当中的非线性弹性行为^[13]。

对于超弹性材料,目前常用的本构模型有基于唯象理论的 Mooney-Rivlin 模型、Yeoh 模型、Ogden 3 阶模型以及基于热力学的 Arruda-Boyce 模型和 Van Der Waals 模型等^[14]。由于 Yeoh 模型与本试验的测量数据拟合较好,故本文选用 Yeoh 模型,具体参数如表 2 所示。

表2 Yeoh模型参数

Tab. 2 Parameters of Yeoh model

	C10	C20	C30
OCA	1.060 53E-02	-1.205 7E-04	1.731 89E-06

目前粘弹性的模型有 Maxwell 模型、Kelvin 模型、三参数固体模型、广义 Maxwell 模型等。本文使用基于广义 Maxwell 的 Prony 级数方程进行拟合。由于测试设备最高只能测试 100 Hz 频率下的胶材参数,无法取得高频条件下的胶材参数,而胶材参数受应变速率的影响较大,所以对于落球与落笔冲击这种过程很短的仿真计算,在表征胶材力学性能时存在着一定的误差。为了减小这种误差,使用时温等效^[15]的方式,通过取得低温下的低频模量来推算室温下的高频模量,图4所示为归一化处理后的胶材参数。

本文使用的 ABAQUS 软件可以通过输入图4的频率-模量数据对材料的粘弹性进行表征,但不能评估拟合的精度,可以自行对其进行拟合和评估。

根据广义 Maxwell 模型^[16],胶材的复合模

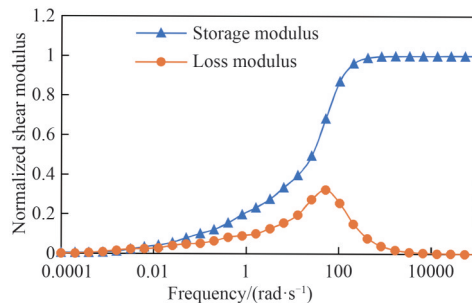


图4 时温等效后的OCA胶材模量

Fig. 4 Shear modulus of OCA layer after time-temperature equivalence

量为:

$$G^* = G_0 - \sum_{i=1}^N G_i + \sum_{i=1}^N G_i \frac{\omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2} + i \sum_{i=1}^N G_i \frac{\omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}, \tag{1}$$

其中: G_i 为第*i*个单元的复模量, ω 为频率, τ_i 为松弛时间, G_0 表示 $\omega\tau_i \rightarrow \infty$ 时胶材的模量,从而可以得到储能模量 G_S 和损耗模量 G_L 的Prony级数方程分别为:

$$G_S = G_0 \left(1 - \sum_{i=1}^N g_i\right) + G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2},$$
$$G_L = G_0 \sum_{i=1}^N \frac{g_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}. \tag{2}$$

进行无量纲处理后可得到损耗模量 g_S 与 g_L 的Prony级数方程:

$$g_S(\omega) = 1 - \sum_{i=1}^N g_i + \sum_{i=1}^N \frac{g_i \omega^2 \tau_i^2}{1 + \omega^2 \tau_i^2},$$
$$g_L(\omega) = \sum_{i=1}^N \frac{g_i \omega \tau_i}{1 + \omega^2 \tau_i^2}. \tag{3}$$

根据归一化后的胶材储能模量、损耗模量与频率的关系,对参数进行拟合,即可得到 g_i 与 τ_i 的值,具体参数如表3所示。

表3 Prony级数方程参数
Tab.3 Parameters of Prony series

<i>i</i>	g_i	τ_i
1	0.621 1	0.018 797 2
2	0.152 11	0.214 29
3	0.118 918	2.004 3
4	0.068 251 9	23.258
5	0.034 583 5	331.55

2.4 强度理论选择

整个模组受落笔冲击过程中竖直方向受压,水平方向受拉,根据第二强度理论,选择水平方向的拉应变LE11最大值进行分析。由于OLED模组在冲击中TFE层较容易损坏,故分析结果时提取TFE层的最大拉应变。

3 结果与讨论

3.1 CWF层的影响

CWF盖板的作用是保护下面的脆性机电元件,避免其受到机械损伤,本文使用的OLED模组

为双盖板结构,也有许多OLED模组使用单盖板结构。与AMOLED的复合迭层材料和其他膜层相比,CWF层的参数也比较容易调整。分别对CWF层的模量和厚度进行调整并与单层盖板的冲击结果进行比较,分析这些变化对模组应变的影响。为了便于分析,修改最上层的CWF层的参数。

分别将上侧CWF层的模量从5.5 GPa增加到11 GPa、16.5 GPa……,对计算结果进行分析,再分别将其厚度从原来的50 μm修改为25 μm、75 μm、100 μm、125 μm和150 μm,并与去掉最上层CWF层和OCA层的单层盖板的模组比较,结果如图5所示。

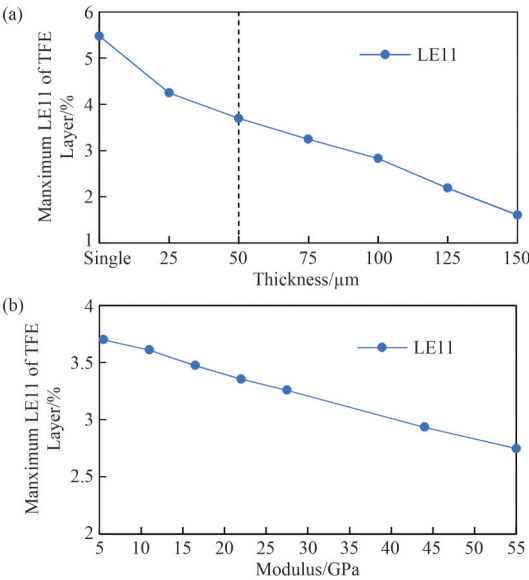


图5 上侧CWF层参数对TFE层最大应变的影响。(a)上侧CWF层厚度的影响;(b)上侧CWF层模量的影响。

Fig. 5 Influence of parameters of top CWF layer on the maximum strain of TFE layer. (a) Influence of modulus of top CWF layer; (b) Influence of thickness of top CWF layer.

根据仿真结果,增加CWF层,将模组变更为双盖板结构后TFE层拉应变有明显的降低,起到了更好的缓冲效果。双层盖板相比于单层盖板,其对TFE层的保护作用更加明显。当上侧盖板的厚度增加时,TFE层的最大拉应变随之降低,盖板的缓冲效果增加,从而提高了柔性OLED模组的抗冲击性能。随着上侧盖板的模量的增加带来的刚度增加,TFE层的最大拉应变有一定的减少,说明提高上侧盖板的刚度能增加

模组的抗冲击性能。

3.2 OCA 胶材模量和厚度的影响

OCA 胶材可通过变更胶材的种类变更胶材的模量,其厚度也可以通过在粘合时涂抹的量来变更,这些都较容易进行变更。基于此,分别调整 OCA 胶材的模量和厚度,来分析其对 OLED 模组中脆弱层 TFE 层的最大拉应变的影响。

首先调整 OCA 胶材的弹性模量,分别将 OCA 的模量缩小和放大。并提取 TFE 层在冲击过程中的最大拉应变 LE11;对于 OCA 胶材的厚度,为了方便比较,依次变更两层玻璃盖板之间的胶材 OCA1 和下层盖板下的胶材 OCA2 以及两层胶材同时变更厚度(OCA1&2),从 13 μm 依次调整到 75 μm ,并对模型提交计算,输出 TFE 层单元的 LE11 的最大值,将结果与原始情况进行对比,如图 6 所示。

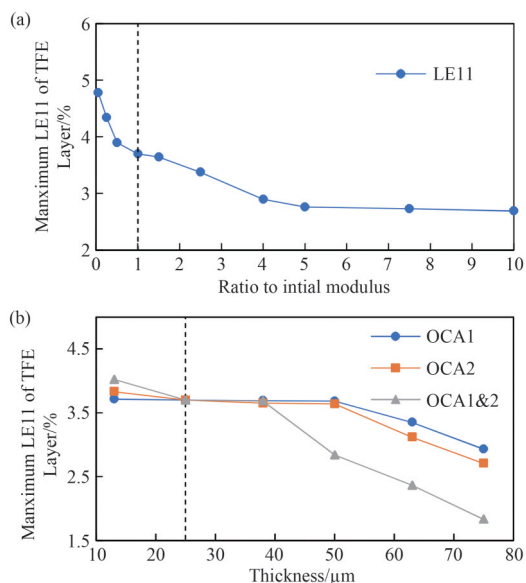


图6 OCA 参数对 TFE 层最大应变影响。(a)OCA 胶层的模量的影响;(b)OCA 胶层厚度的影响。

Fig. 6 Influence of parameters of OCA layer on the maximum strain of TFE layer. (a) Influence of OCA's modulus; (b) Influence of OCA's thickness.

从图中 6 可以看出,随着 OCA 模量的增加,TFE 层的拉压应变均有所减小,即便 OCA 胶材的模量增大到原来的 10 倍时,TFE 层的拉压应变依旧在随之减小。而减少胶层的厚度会导致 TFE 层的应变增加,对结构的抗冲击性能有不利的影响。增加胶层的厚度能够减少 TFE 层的应

变,单一胶层的改变对 TFE 层应变的影响较小,而同时增加两层胶层的厚度后,其影响明显增大。

3.3 在底板下层增加一层钢片(SUS)层的影响

考虑到屏体结构在冲击过程中会产生抖动从而可能与其余部位发生更强的碰撞或者接触从而导致受力增大,在底板 BPF 下侧加上一层 25 μm 的 OCA 胶材及一层 30 μm SUS 片对模组进行约束处理,从而限制其抖动,并将 SUS 层的厚度依次增加到 60,80,100,120 μm ,并与原始模组进行对比,其结果如图 7 所示。

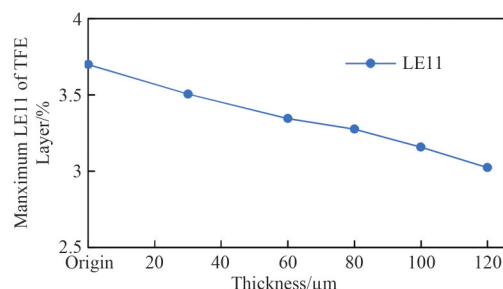


图7 SUS 层及其厚度对 TFE 层应变的影响

Fig. 7 Influence of SUS and thickness of SUS on the strain of TFE layer

在底板下加入 OCA 层和 SUS 层后,模组的整体受到了有较大模量的 SUS 层约束,其在冲击过程中产生的抖动减小,从而使得 TFE 层的最大应变有所减小,随着 SUS 层厚度的增加,TFE 层的最大应变会随之降低。结果表明,加入 SUS 层叠构对 TFE 层的应变改善有利,并且这种改善情况会随着 SUS 层的厚度增加而增加。

3.4 试验验证

为了验证仿真的结果,使用试验进行验证。以 1 cm 为间隔,调整落球初始高度,分别记录模组破坏时的初始高度,试验装置如图 8(a)所示。为了与试验进行对照,分别在减半 OCA1 厚度和增加 SUS 层的模型中,通过调节落球的高度,使 TFE 层的最大应变与未调整模型前保持一致,通过对比不同方案中落球提高的高度分析对下落高度的影响,结果如图 8(b)所示。

根据仿真结果,对于减半 OCA1 厚度的方案,当初始高度在 9.2 cm 时,其造成的应变与原始叠构在初始高度为 10 cm 时相同,落笔造成损坏的高度从 10 cm 降低到 9.2 cm,抗冲击性能有所下降。增加 SUS 层的结果也与之类似。仿真

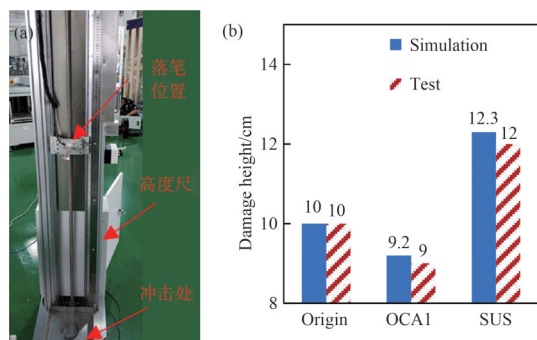


图8 落笔试验与仿真。(a)冲击试验装置;(b)仿真与试验结果对比。

Fig. 8 Pencil-impacted test and simulation. (a) Impacted test system; (b) Comparison between simulation and test results.

结果说明,原始模组如果在 10 cm 时损坏,则现在会在 12.3 cm 的初始高度被圆珠笔冲击损坏,抗冲击性能有所提升。减半 OCA1 的厚度,其初始高度由 10 cm 降低至 9 cm, SUS 层由 10 cm 增加至 12 cm,试验与仿真的结果十分接近。

4 结 论

本文根据柔性 OLED 模组在性能测试时使

用的落笔冲击试验,建立了有限元模型,对模组的抗冲击性能进行分析,并讨论了 CWF 盖板、SUS 层和 OCA 胶材等影响因素对模组的影响。对仿真结果的对比分析,得出以下结论:

(1)盖板对模组内部元件的保护作用十分明显,双层盖板结构要比单层盖板的效果更好。上侧盖板的模量在 5.5~55 GPa 之间变更,厚度在 25~150 μm 之间变更时,随着模量和厚度的增大 TFE 层的最大拉应变减小,抗冲击性能得到提升。

(2)盖板下的 OCA 胶层模量在原来的 0.1~10 倍,厚度在 13~75 μm 之间变更时,随着 OCA 胶材模量和厚度的增加,会减小 TFE 层的最大拉应变。同时增加两层盖板下的 OCA 胶材厚度会有更好的效果。

(3)在底板下增加一层 SUS 层能够通过减小冲击中的抖动很好地减小 TFE 层的最大应变, SUS 层厚度在 30~120 μm 范围内增加时,随着 SUS 层厚度的增加,应变会继续减小

综合以上结果,使用双层盖板结构、增大盖板自身或者盖板下的 OCA 厚度和模量、在底板下增加 SUS 层均能够减小 TFE 层的最大应变,从而达到增加 OLED 模组的抗冲击性能的效果。

参 考 文 献:

- [1] LOGOTHETIDIS S, LASKARAKIS A. Towards the optimization of materials and processes for flexible organic electronics devices [J]. *The European Physical Journal Applied Physics*, 2009, 46(1): 12502.
- [2] HANADA T, NEGISHI T, SHIROISHI I, *et al.* Plastic substrate with gas barrier layer and transparent conductive oxide thin film for flexible displays [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11): 3089-3092.
- [3] 李天华. 柔性显示实现的关键技术[J]. *电视技术*, 2009, 33(8): 25-29.
LI T H. Brief introduction to key issues of flexible display technology [J]. *Video Engineering*, 2009, 33(8): 25-29. (in Chinese)
- [4] JU S, LI J F, LIU J, *et al.* Transparent active matrix organic light-emitting diode displays driven by nanowire transistor circuitry [J]. *Nano Letters*, 2008, 8(4): 997-1004.
- [5] BAE S, KIM H, LEE Y, *et al.* Roll-to-roll production of 30-inch graphene films for transparent electrodes [J]. *Nature Nanotechnology*, 2010, 5(8): 574-578.
- [6] SEKITANI T, NAKAJIMA H, MAEDA H, *et al.* Stretchable active-matrix organic light-emitting diode display using printable elastic conductors [J]. *Nature Materials*, 2009, 8(6): 494-499.
- [7] SOMEYA T. Tiny lamps to illuminate the body [J]. *Nature Materials*, 2010, 9(11): 879-880.
- [8] ERITT M, MAY C, LEO K, *et al.* OLED manufacturing for large area lighting applications [J]. *Thin Solid Films*, 2010, 518(11): 3042-3045.
- [9] NOH J, BAI Q S, SHEN R Q, *et al.* Laser-induced shock wave sintering of silver nanoparticles on flexible substrates [J]. *Applied Surface Science*, 2021, 546: 149097.

- [10] BACK J H, BAEK D, PARK J W, *et al.* Shock absorption of semi-interpenetrating network acrylic pressure-sensitive adhesive for mobile display impact resistance [J]. *International Journal of Adhesion and Adhesives*, 2020, 99: 102558.
- [11] 刘艳玲,胡坤,党鹏乐,等. 柔性显示器件机械试验方法研究[J]. 信息技术与标准化,2017(6):21-24.
LIU Y L, HU K, DANG P L, *et al.* Study on mechanical test method used for flexible display device [J]. *Information Technology & Standardization*, 2017(6): 21-24. (in Chinese)
- [12] 党鹏乐,胡坤,张小宝,等. 柔性显示器件机械试验方法标准进展[J]. 信息技术与标准化,2016(10):22-25.
DANG P L, HU K, ZHANG X B, *et al.* Development of international standards of flexible display device mechanical test method [J]. *Information Technology & Standardization*, 2016(10): 22-25. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] LUO W B, WANG C H, HU X L, *et al.* Long-term creep assessment of viscoelastic polymer by time-temperature-stress superposition [J]. *Acta Mechanica Solida Sinica*, 2012, 25(6): 571-578.
- [16] 张文飞. 动力总成橡胶悬置本构关系与优化设计[D]. 北京:清华大学,2012.
ZHANG W F. Powertrain rubber mounting constitutive relation and optimization [D]. Beijing: Tsinghua University, 2012. (in Chinese)

作者简介:



邹岚韬(1994—),男,湖南邵阳人,硕士研究生,2016年于华中科技大学获得学士学位,研究方向为柔性 OLED 屏幕的力学仿真。E-mail: 178462532@qq.com



廖敦明(1973—),男,湖南邵阳人,博士,教授,2002年于华中科技大学获得博士学位,主要从事材料成形数值模拟的研究。E-mail: liaodunming@hust.edu.cn