

光学透明胶的超弹性力学性能表征方法研究

贾永臻

(北京大学 深圳研究生院 深圳 518055)

摘要 光学透明胶(OCA)的复杂力学行为可以导致柔性显示屏幕表面形成波浪状条纹,最终影响显示效果。而构建OCA胶材的力学本构模型是研究柔性OLED屏幕应力管控问题的关键。本文采用DMA和旋转流变仪,分别测试了OCA胶材在拉伸和简单剪切变形模式下的应力应变关系,并选用减缩多项式模型和Arruda-Boyce模型建立OCA胶材的超弹性本构模型。基于实验获取的应力应变数据,采用Levenberg-Marquardt算法,完成了模型参数的拟合和Drucker稳定性评估。结果表明:三阶以上的减缩多项式模型可以构建出适用于OCA胶材的高精度超弹性本构模型。

关键词 光学透明胶; 柔性 OLED; 超弹性本构; 减缩多项式模型; Arruda-Boyce 模型

中图分类号 O484.2 **文献标识码** A **文章编号** 1672-4321(2018)04-0084-04

The Characterization Method of the Hyperelastic Behavior for the Optically Clear Adhesive

Jia Yongzhen

(Shenzhen Graduated School, Peking University, Shenzhen 518055, China)

Abstract The optically clear adhesive (OCA) has a complicated mechanical behavior, which can lead to the wavy stripe in the surface of the flexible OLED screen. This issue has a negative effect on the flexible display. Hence, the construction of the mechanical model is essential to conduct the stress management of the flexible display. In the present work, the stress-strain curves under the tensile and simple shear deformation are tested by the dynamic thermomechanical analysis and the rheometer, respectively. Besides, the Arruda-Boyce model and the reduced polynomial model are used to study the hyperelastic behavior of the adhesive. Based on the stress-strain data, the Levenberg-Marquardt method is conducted to fit the model parameters. Then the Drucker stability is evaluated to select the reasonable model. The result shows that the reduced polynomial model ($N \geq 3$) can be used to characterize the hyperelastic behavior of the adhesive with good precision.

Keywords optically clear adhesive; flexible OLED; Hyperelasticity modeling; reduced polynomial model; Arruda-Boyce model

柔性显示屏幕是未来显示技术的一个重要研发方向。当前,柔性屏幕各个膜层间常采用光学透明胶材(Optically Clear Adhesive, OCA)进行粘接^[1,2],柔性屏幕的整体变形过程中,OCA胶材的力学行为最为复杂,易发生粘性流动,导致屏幕表面不平整,是形成波纹状显示效果的主要原因。构建OCA胶材的力学本构模型是仿真分析波纹状显示效应的理论基础。Yeh^[3]等率先建立了柔性屏幕的弯折仿真模型,但是该研究将OCA胶材看作简单的线弹性材料,无法对

屏幕摊平及回弹过程中的非线性大变形问题进行解析。薛宗伟^[4]建立了基于小压缩变形数据的OCA超弹性本构模型,同样无法应用于柔性显示屏幕的大变形分析。基于此,本文展开对OCA胶材力学行为的基础研究,通过力学性能测试,获取了OCA胶材在单轴拉伸和简单剪切两种大变形模式下的应力应变曲线,并选用唯象模型和热力学模型,建立OCA胶材的超弹性本构模型。

收稿日期 2018-03-14

作者简介 贾永臻(1989-)男,博士,在站博士后,研究方向:柔性OLED屏幕的模组材料及工艺研究,E-mail: jia Yongzhen@hust.edu.cn

基金项目 中央高校基本科研业务费资助项目(2012TS010)

1 实验测试

OCA 胶材可以在发生大变形的情况下, 卸载后自动恢复为初始形状, 符合超弹性材料的一般特征, 可以采用超弹性本构模型建立 OCA 胶材的弹性力学行为. 传统橡胶类超弹性材料通常采用单轴试验、双轴试验和平面试验等三种实验方法获取其应力应变曲线, 但是 OCA 胶材的模量很低, 商业化的双轴和平面拉伸试验机的传感器精度无法准确获取 OCA 胶材

的应力变化, 因此, 采用精密度较高的动态机械分析仪和旋转流变仪, 分别对 OCA 胶材的拉伸行为和简单剪切行为进行测试.

首先进行试样制备, 将 3M 公司生产的 OCA 胶材叠层粘接, 厚度 h 达到 1 mm, 之后再按照夹具要求完成试样的切割, 两种变形模式所采用的测试设备及相应的样品尺寸如表 1 所示. DMA 拉伸测试时, 拉伸速率参考 ASTM 标准 D412^[5]; 采用旋转流变仪进行简单剪切测试时, 剪切应变速率控制在 0.01 s^{-1} .

表 1 试验测试设备及样品尺寸规格

Tab.1 Test equipment and sample size specifications

测试变形模式	单轴拉伸	简单剪切
样品要求	长条形试样, 长 $l=50 \text{ mm}$; 宽 $b=5 \text{ mm}$	圆盘状试样, 半径 $r=40 \text{ mm}$
测试仪器	DMA 动态机械分析仪	旋转流变仪
仪器厂商及型号	TA Instruments RSA-G2	TA Instruments DHR-2
测试精度	0.01 mN	0.01 mN

原始实验数据经过处理后, 可以提取出应力 σ 和应变 ε 数据, 具体的计算公式如下所示.

(1) 单轴拉伸变形模式下, 拉伸应变 ε_T 和拉伸应力 σ_T 的关系式:

$$\varepsilon_T = \frac{l - l_0}{l_0} \sigma_T = \frac{f}{bh}, \quad (1)$$

式中 l_0 表示试样原始长度; l 表示试样拉伸长度; f 表示拉伸载荷.

(2) 简单剪切变形模式下, 剪切应变 γ_s 和剪切应力 σ_s 的关系式如下:

$$\gamma_s = \frac{r\varphi}{h} \sigma_s = \frac{2\tau}{\pi r^3}, \quad (2)$$

式中 φ 表示平行板的旋转位移; τ 表示平行板扭矩.

2 超弹性本构模型构建及参数拟合

2.1 基本理论

超弹性材料的基本物理特征是弹性变形过程中熵产率为 0, 不发生能量耗散, 因此超弹性材料的本构关系可以通过应变能密度函数 U 的形式给出:

$$U = U(I_1, I_2, I_3), \quad (3)$$

式中 I_1, I_2, I_3 分别为变形张量的三个不变量, 这些不变量和主伸长率 $\lambda_i (i = 1, 2, 3)$ 的关系如下:

$$\begin{cases} I_1 = \lambda_1 + \lambda_2 + \lambda_3 \\ I_2 = \lambda_1\lambda_2 + \lambda_2\lambda_3 + \lambda_3\lambda_1 \\ I_3 = \lambda_1\lambda_2\lambda_3 \\ \lambda_i = 1 + \gamma_i \end{cases}, \quad (4)$$

式中 γ_i 表示主应变, I_3 可以表征材料体积的变化, 也用 J_{el} 表示, OCA 胶材通常认为是不可压缩的, 有 $I_3 = 1$.

将应变能密度函数对主伸长率求偏导, 得出 Cauchy 应力张量与主伸长率的关系^[6]:

$$\sigma_i = 2 \left[\lambda_1^2 \frac{\partial U}{\partial I_1} - \frac{1}{\lambda_2} \frac{\partial U}{\partial I_2} \right] - p, \quad i = 1, 2, 3. \quad (5)$$

式中 p 表示静水压力.

2.2 应变能密度函数与变形模式

超弹性材料的应变能密度函数主要分为唯象模型和统计热力学模型两大类. 基于经验的唯象模型主要包括 Ogden 模型、多项式模型、减缩多项式模型、Marlow 模型等. 其中减缩多项式模型的实验拟合精度较高, 同时仿真计算的收敛性较好, 是比较常用的唯象模型之一. 统计热力学模型则主要有 Arruda-Boyce 模型、Van der Waals 模型和 Gent 模型等. 下面将分别给出两类模型中比较有代表性的减缩多项式模型和 Arruda-Boyce 模型的具体表达式, 以及在不同变形模式下推导出的应力应变关系.

由式 5 可以导出具体变形模式下 Cauchy 应力张量 σ_i 的表达式. 在单轴拉伸变形模式下, 拉伸应力的表达式为^[7]:

$$\sigma_T = 2(1 - \lambda^{-3}) \left(\lambda_1 \frac{\partial U}{\partial I_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \quad (\lambda_1 = 1 + \varepsilon_T). \quad (6)$$

在简单剪切变形模式下, 剪切应力的表达式为:

$$\sigma_T = \gamma_s \left(\frac{\partial U}{\partial I_1} + \frac{\partial U}{\partial I_2} \right) \quad (\gamma_T = \lambda_1 + \lambda_1^{-1}). \quad (7)$$

2.2.1 减缩多项式模型

减缩多项式 (Reduced Polynomial) 模型^[8,9] 中忽略了第二变形张量不变量对于应变能的影响, 具体的应变能密度函数表达式为:

$$U = \sum_{i=1}^N C_{i0}(I_1 - 3)^i + \sum_{i=1}^2 \frac{1}{D}(J_{el} - 1)^{2i}, \quad (8)$$

式中 N 表示多项式的阶数; $C_{i0} (i = 1 \sim 6)$ 为表征剪切变形的材料常数 D_i 为表征体积变形的材料常数 对于 OCA 胶材不予考虑.

将式(8)代入式(6)和(7), 可得到减缩多项式本构模型中的应力-应变关系. 在单轴拉伸变形模式下 其应力应变关系为:

$$\sigma_T = \frac{\partial U}{\partial \lambda_T} = 1(\lambda_T - \lambda_T^{-2}) \sum_{i=1}^N iC_{i0}(I_1 - 3)^{i-1}, \quad (9)$$

其中 $\lambda_T = 1 + \varepsilon_T$ 在简单剪切变形模式下 其应力应变关系为:

$$\sigma_T = \frac{\partial U}{\partial \gamma_T} = 2 \sum_{i=1}^N iC_{i0}\gamma_s^{2i-1}. \quad (10)$$

2.2.2 Arruda - Boyce 模型

Arruda - Boyce 模型^[10] 是一类由非高斯统计理论建立的简单热力学模型, 其应变能函数表达式如下:

$$U = \mu \sum_{i=1}^5 \frac{C_i}{\lambda_m^{2i-2}} (\bar{I}_1 - 2^i) + \frac{1}{D} \left(\frac{J_{el}^2 - 1}{2} - \ln J_{el} \right), \quad (11)$$

表 2 OCA 胶材的超弹性本构模型参数拟合误差分析

Tab.2 The fitting error analysis of the OCA hyperelastic constitutive model

本构模型	模型参数	RMS 误差	Drucker 稳定性
Reducedpolynomial $N=1$	C_{10}	0.283	稳定
Reducedpolynomial $N=2$	$\begin{cases} C_{10} = 5.73 \times 10^{-3} \\ C_{20} = -7.79 \times 10^{-3} \end{cases}$	0.164	不稳定
Reducedpolynomial $N=3$	$\begin{cases} C_{10} = 6.74 \times 10^{-3} \\ C_{20} = -2.5 \times 10^{-4} \\ C_{30} = 7.53 \times 10^{-6} \end{cases}$	0.0979	稳定
Reducedpolynomial $N=4$	$\begin{cases} C_{10} = 7.40 \times 10^{-3} \\ C_{20} = -4.74 \times 10^{-4} \\ C_{30} = -3.12 \times 10^{-5} \\ C_{40} = -7.83 \times 10^{-7} \end{cases}$	0.0725	不稳定
Reducedpolynomial $N=5$	$\begin{cases} C_{10} = 7.88 \times 10^{-3} \\ C_{20} = -7.51 \times 10^{-3} \\ C_{30} = 8.41 \times 10^{-4} \\ C_{40} = -4.87 \times 10^{-5} \\ C_{50} = 1.1 \times 10^{-6} \end{cases}$	0.0590	稳定
Arruda-Boyce	$\begin{cases} \mu = 9.05 \times 10^{-3} \\ \lambda_m = 9.98 \times 10^5 \end{cases}$	0.283	稳定

完成参数拟合的本构模型需进行 Drucker 稳定性评估 对于通过稳定性评估的本构模型 其应力应变曲线如图 1~4 所示.

由应力应变曲线的拟合结果对比后可知,

式中 μ, λ_m 为表征剪切变形的材料常数.

将式(11)代入式(6)和(7), 可得到 Arruda-Boyce 本构模型中的应力-应变关系. 在单轴拉伸变形模式下 其应力应变关系为:

$$\lambda_T = \frac{\partial U}{\partial \lambda_T} = 2\mu(\lambda_U - \lambda_U^{-2}) \sum_{i=1}^5 \frac{iC_i \bar{I}_1^{i-1}}{\lambda_m^{2i-2}}, \quad (12)$$

在简单剪切变形模式下 其应力应变关系为:

$$\sigma_s = \frac{\partial U}{\partial \gamma_s} = 2\mu\lambda \sum_{i=1}^5 \frac{iC(\gamma_s^2 + 3)^{i-1}}{\lambda_m^{2i-2}}. \quad (13)$$

3 参数拟合与分析

基于上述推导出的应力-应变关系 结合单轴拉伸和简单剪切的实验数据 即可实现超弹性参数的拟合. 目前 尚无商业化的仿真软件可以将单轴拉伸和简单剪切数据同时拟合 也未见相关的公式推导和拟合方法等内容有公开报道. 本文利用数学软件 1Stopt 采用 Levenberg-Marquardt 算法 按照上述本构方程编写代码 实现了单轴拉伸与简单剪切数据的同时拟合 具体结果如表 2 所示.

Arruda-Boyce 本构模型和一阶减缩多项式模型的拟合误差较大 在拉伸和简单剪切变形模式下 其力学行为趋近于线弹性. Ritto 等^[7] 进行了基于简单剪切数据的超弹性本构模型参数拟合 其研究成果指出,

拟合误差控制在 0.2 以内,就代表了较高的拟合精度.由表 2 可知,三阶(拟合误差 0.0979)和五阶的减缩多项式模型(拟合误差 0.0590)具备了较好的拟合精度,相较而言,五阶减缩多项式本构模型的拟合精度更高,但是更高阶数的本构模型在仿真分析时会带来较严重的收敛性问题,因此,对于柔性 OLED 屏幕的应力管控问题,本文推荐采用三阶减缩多项式本构模型进行研究.

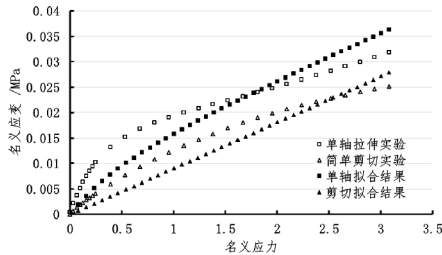


图 1 一阶减缩多项式本构模型的拟合结果

Fig.1 Fitting result of the first-order reduced polynomial model

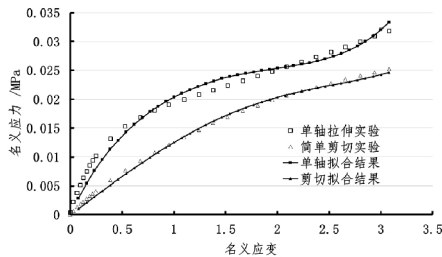


图 2 三阶减缩多项式本构模型的拟合结果

Fig.2 Fitting result of the third-order reduced polynomial model

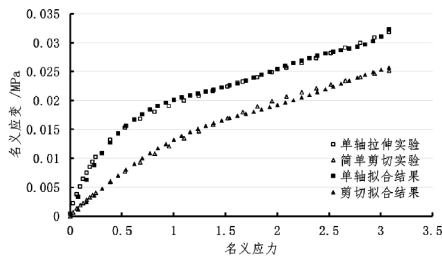


图 3 五阶减缩多项式本构模型的拟合结果

Fig.3 Fitting result of the fifth-order reduced polynomial mode

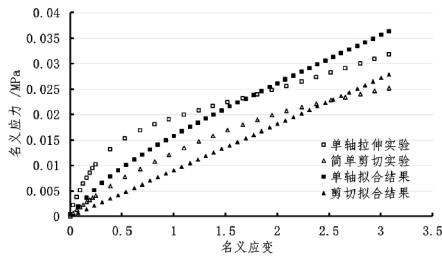


图 4 Arruda-Boyce 本构模型的拟合结果

Fig.4 Fitting result of the Arruda-Boyce model

4 结语

基于应变能函数的超弹性模型是描述材料超弹

性行为的一种有效方法. 本文采用 DMA 和流变仪准确测得了 OCA 胶材在拉伸和简单剪切变形模式下的应力应变曲线,为构建胶材的超弹性模型准备了充足的原始数据. 以减缩多项式模型和 Arruda-Boyce 模型作为 OCA 胶材的应变能函数,推导了两种模型在拉伸和简单剪切变形模式下的应力应变公式,并使用 Levenberg-Marquardt 算法,实现了同时运用单轴拉伸与简单剪切数据,完成本构模型的参数拟合. 通过 Druker 稳定性评估,最终筛选出了与实验吻合精度高的本构模型及相应参数. 该理论算法可适用于一般胶黏剂材料的超弹性本构模型构建及参数拟合.

参 考 文 献

- [1] 杨青. 光学透明胶特性及其在触控显示行业中的应用[J]. 中国胶粘剂, 2014, 23(8): 56-58.
- [2] 孙金媛, 黄家健, 周华俊, 等. 膨胀单体改性液态光学胶的制备及性能[J]. 高分子材料科学与工程, 2015, 31(2): 155-159.
- [3] Yeh M K, Chang L Y, Cheng H C, et al. Bending stress analysis of laminated foldable touch panel [J]. Procedia Engineering, 2014, 79(3): 189-193.
- [4] 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.
- [5] ASTM International. Standard test methods for vulcanized rubber and thermoplastic elastomers-tension D412 [S]. West Conshohocken, Pennsylvania, United States: ASTM International, 2003, 9.
- [6] 傅志红, 喻坚, 魏灵娇. 聚碳酸酯的应力松弛实验及数据处理分析[J]. 塑料工业, 2014, 42(6): 89-92.
- [7] Ritto T G, Nunes L C S. Bayesian model selection of hyperelastic models for simple and pure shear at large deformations [J]. Computers & Structures, 2015, 156: 101-109.
- [8] Darjani H, Naghdabadi R. Hyperelastic materials behavior modeling using consistent strain energy density functions [J]. Acta Mechanica, 2010, 213(3-4): 235-254.
- [9] Mao Y, Li Y, Chen Y, et al. Hyperelastic behavior of two rubber materials under quasistatic and dynamic compressive loadings — testing, modeling and application [J]. Polimery -Warsaw-, 2015, 60(7/8): 516-522.
- [10] Boyce M C. Direct comparison of the Gent and the Arruda-Boyce Constitutive models of rubber elasticity [J]. Rubber Chemistry & Technology, 1996, 69(5): 781-785.

(责任编辑 姚春娜)