

文章编号: 1001-4888(2018)04-0509-08

电极面积对介电弹性体薄膜 电致起皱影响的实验研究^{*}

杨帆, 侯振德, 张国立, 富东慧, 屈川

(天津大学 机械工程学院力学系, 天津 300354)

摘要: 介电弹性体(dielectric elastomers, DE)薄膜在其自身的应变能和外加电场能的相互作用下既能实现大的电致变形, 也容易发生失稳起皱。对于单轴预拉伸的介电弹性体薄膜, 电极的长度是决定其电致变形的重要参数, 同时也可能是影响薄膜起皱的关键因素。为了确定以及量化该影响, 本文实验测量了不同电极长度下薄膜的临界起皱电压。同时为了分析薄膜的褶皱特征, 测量了不同电压下的褶皱波长。实验结果表明: 电极宽度对介电弹性体薄膜的起皱有较大影响; 随着电极长度逐渐增大, 薄膜的临界起皱电压呈现出先快速减小, 随后相对稳定, 最后又逐渐升高的趋势。而其褶皱波长随电压升高逐渐减小。实验结果显示, 褶皱分布在电极及电极附近, 据此分析认为, 薄膜的起皱是一种局部效应, 电极区与非电极区的相互作用与能量传递对其有较大影响。实验中通过铜丝搭接的方式引出电极能有效解决电极引出线的附加刚度影响薄膜起皱的问题, 可为相关实验提供技术参考。

关键词: 介电弹性体; 单向拉伸; 电极长度; 起皱; 临界电压; 波长

中图分类号: TB34

文献标识码: A

DOI: 10.7520/1001-4888-17-079

0 引言

电致活性聚合物(electroactive polymer, EAP)是一种智能多功能材料, 在受到外加电场的作用时能够改变自身形状, 当外加电场撤掉后, 又能恢复到原来的形状。EAP材料可以用来设计和制造智能转换器件, 如驱动器、传感器和能量收集器等^[1,2]。介电弹性体(dielectric elastomers, DE)是制造智能驱动器最具有潜力的电致活性聚合物^[3]。在外加电场下, DE材料可以产生较大变形, 具有高弹性能密度、高机电转化率、超短反应时间和轻质量等特点, 成为智能仿生、航空航天和生物等领域共同关注的新型材料^[4,5], 并取得了一些初步的成功应用。例如, 采用介电弹性体制作飞艇舵驱动器, 能够控制飞艇的自由转向, 以及采用介电弹性体材料研制人造肌肉驱动器等功能器件^[6]。

对介电弹性材料本身的力学性质、电学性质及其力电耦合作用进行系统的理论与实验研究, 是实现其广泛工程应用的基础。有关介电弹性材料的本构关系的研究中, Pelrine等人^[7]把均匀涂覆柔性电极的介电弹性体看成可变电容的平行板电容器, 基于经典的麦克斯韦理论, 推导出应力与外加电场和材料常数的关系; Mockensturm等人^[8]考虑材料非线性、几何非线性以及机电耦合场作用, 提出了介电弹性体的本构关系; Suo等人^[9,10]基于热力学理论, 考虑机电耦合效应, 建立联合弹性应变能和电场能的系统自由能函数, 推导了介电高弹聚合物的状态方程。

^{*} 收稿日期: 2017-03-29; 修回日期: 2017-05-08

基金项目: 国家自然科学基金(11672350)

通讯作者: 侯振德(1954—), 男, 博士, 教授, 主要从事实验固体力学和生物力学研究。Email: hou@tju.edu.cn

在机械力场和电场等物理场的耦合作用下,介电弹性体薄膜不仅可能发生电击穿,也容易产生失稳起皱。围绕介电弹性体薄膜稳定性已展开的研究中,Plante 等^[11]在实验中观测到薄膜的部分区域出现褶皱,并发现薄膜的褶皱部分和平整部分能稳定共存;Zhao 等^[12]提出应用任意的自由能研究理想介电弹性体的稳定性,并用 Hessian 矩阵的正定性来判别其稳定性;刘彦菊等人^[13,14]应用 Mooney-Rivlin、Ogden 形式弹性应变能模型分析了材料常数对介电弹性体机电稳定性的影响;D DE Tommasi 等人^[15]提出了一种分析介电弹性薄膜吸合失稳(Pull-in)和起皱失稳的单轴拉伸模型,分别推导了薄膜在发生以上两种失稳的临界状态下,临界电压或电荷量与预拉伸率的关系;Li 等人^[16]实验测量了等双轴和不等双轴预拉伸薄膜的介电常数和临界失稳电压,并分析了预拉伸提高薄膜稳定性的几种方式;Liu 等人^[17]基于在等双轴预拉伸薄膜中间涂覆固定宽度电极的实验模型,实验研究了不同拉伸率和电极宽度对薄膜失效形式的影响,发现预拉伸较大、电极较窄时,薄膜的主要失效形式是起皱。

利用介电弹性体薄膜可以制作驱动器、传感器,本工作希望介电弹性体在尽量大的预拉伸下实现上述功能,因为大的预拉伸可使薄膜沿拉伸方向的刚度大大增加。但是,可能引起的问题是电场更容易引起薄膜褶皱,因此,本文关注的是大的预拉伸薄膜在不同电场条件下的失稳起皱特征。介电弹性体内的应变能和外加电场能的相互作用既是引起薄膜电致变形的必要条件,也是导致薄膜失稳起皱的根本原因。然而,目前在这两种能量的相互作用方式和结果的问题上已有研究尚不完善,诸如电极尺寸对介电弹性体的稳定性的影响机制等方面尚缺乏系统的理论与充分的实验研究,尤其对大的预拉伸薄膜更是如此。为此本文采用实验的方法,研究不同的电极长度或面积对于单轴拉伸的介电弹性体薄膜临界起皱电压的影响,同时分析了薄膜的褶皱特征。

1 材料与实验方法

1.1 试样准备

实验采用 VHB 系列丙烯酸聚合物(VHB9473PC,3M 公司生产)作为样品,试样原始形态是厚度为 0.25mm,宽度为 100mm 的条带。实验前,将薄膜试样沿条带长度方向(图 1 中 1 方向)预拉伸至原长的 8 倍,预应变为 700%。然后利用其本身的粘性将其中间纯拉伸段粘接到方形有机玻璃框上,如图 1 所示。图中 $L=200\text{mm}$ 为薄膜拉伸后的有效长度(也是有机玻璃边框的内边长), d 为试样拉伸后的宽度(拉伸前宽度用 d_0 表示)。在试样的中间部位对称地取长度为 D 的区域均匀地涂抹上石墨粉,作为柔性电极。定义电极长度比 $x=D/L$, $x \in [0,1]$,以 x 的取值来代表不同电极长度(或面积)的试样。

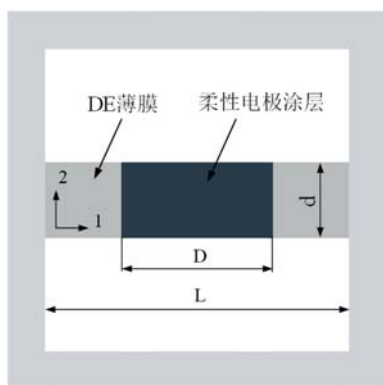


图 1 预拉伸薄膜试样

Fig. 1 Pre-stretched film specimen

1.2 电极预制

电极附着在薄膜的表面,随着薄膜一起发生形变。而薄膜自身的刚度非常小,任何附加刚度都有可能限制薄膜的自由变形。为了尽量减小实验中电极附加刚度带来的影响,石墨粉应在保证导通的情况下涂抹得尽可能的薄。图 1 中的柔性电极涂层为示意图,电极涂层均匀地附着在薄膜的上下表面,实际的电极涂层非常薄,可以透光。另外,实验中发现电极引出线的微小干扰也会对薄膜有明显的影响。如图 2(a)所示,图中电极引出端的铜箔宽度为 5mm,厚度仅为 $10\mu\text{m}$,仍然在未加载电压的情况下导致了薄膜起皱。为了解决这种扰动,采取的方法是将一根铜丝轻轻搭接在薄膜上,如图 2(b)所示。对比图 2(a)和(b)可以看出,采用铜丝搭接的方式引出电极对未加电时

薄膜的表面形态的几乎无影响。图 2(c)和(d)给出了试样在加载电压后薄膜起皱的对比图,也可以发现铜丝对薄膜自由变形的约束更小。此外,对于单向拉伸的薄膜,为了避免正负电极短路,石墨粉不能涂覆到薄膜宽度的边缘,需要留出一部分边界。本实验中薄膜试样宽度边缘约 0.5~1mm 的区域未涂覆电极。

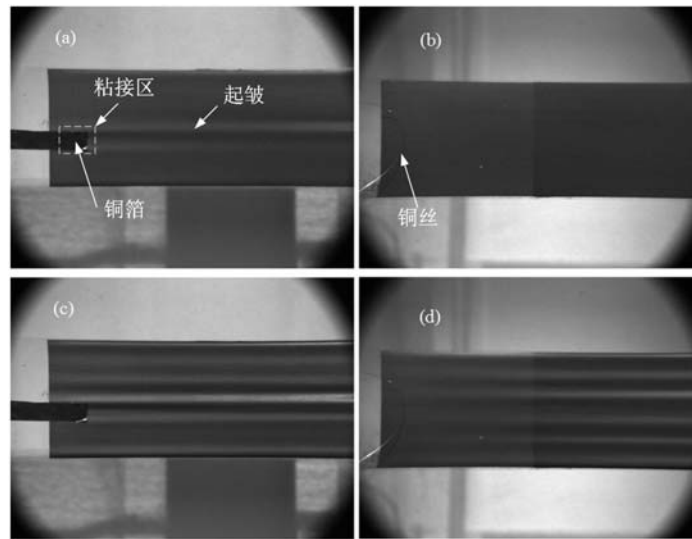


图2 电极引出方式对比图

Fig. 2 Comparison of different electrode extraction methods

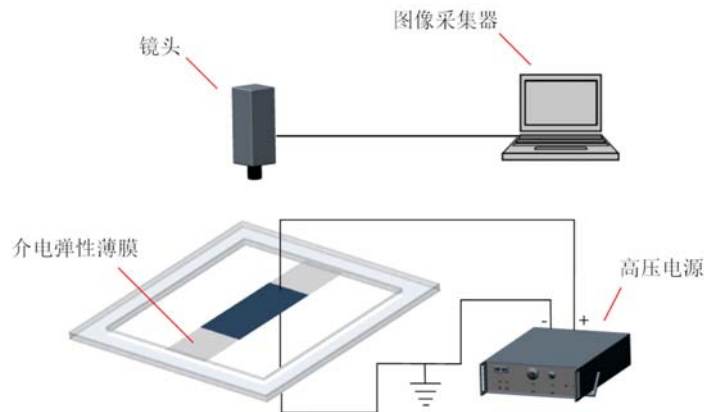


图3 实验装置图

Fig. 3 Experimental setup for measuring the wrinkling of dielectric elastomer film

1.3 实验方法

图3所示为介电弹性薄膜失稳起皱的实验装置图,包括:经过预拉伸的薄膜试样、高压直流电源、镜头和图像采集系统。实验前,将高压直流电源的两个输出端分别接在介电弹性薄膜的上下表面。将镜头(视场 $106\text{mm}\times 80.6\text{mm}$)置于薄膜的正上方,使薄膜涂覆电极的区域处于图像正中央,同时标定图像, 1626×1236 像素对应实际尺寸 $106\text{mm}\times 80.6\text{mm}$,记录像素与实际尺寸的换算关系: $1\text{像素}=65.2\mu\text{m}$ 。因为褶皱主要发生于试样中央的电极区周围,所以调节图像视场仅对应中间长 106mm 的范围。

实验中,将加载的电压从 100V 逐渐加至薄膜电击穿破坏,每隔 20V 保存一张图片来记录薄膜的形态变化。通过图像中记录的薄膜形态来识别薄膜的临界起皱电压,并通过读取像素位置的方式来确定褶皱波长。通过图像识别试样是否起皱相对精确的方法是将每张数字图像与加电前的图像相减,所得图像若有规则的条纹出现,即判定其发生了褶皱,对应的电压为临界起皱电压。实验中发现每张图片之间的电压增量是 20V ,这一电压差足以引起试样的起皱形态有明显的变化,所以直接采用观测图像状态的方式能确定其起皱电压,误差范围约为 $\pm 10\text{V}$ 。本实验的目的是探索起皱电压与电极尺寸的关系,从讨论变化规律的角度分析,该误差水平不会影响实验结果的有效性。实验测试了11种不同电极长度比的试样, x 取值分别为 0.05 、 0.06 、 0.1 、 0.15 、 0.2 、 0.3 、 0.4 、 0.5 、 0.6 、 0.8 、 1.0 。

2 实验结果与分析

2.1 薄膜的起皱与褶皱特征

图 4 以电极宽度比 $x=0.5$ 的薄膜试样为例,展示了薄膜形态随着电压增加而变化的典型过程。可以观察到当电压低于 700V 的时候,薄膜保持平整,且未发生褶皱,如图中(a)所示。随着电压的逐渐增大,当到达临界点($740\pm 10\text{V}$)的时候,薄膜从中间的电极区及相邻的非电极区开始产生褶皱,如图中的(b)所示。随着电压的进一步增大,形状规则且条理分明的褶皱会完全表现出来,如图中(c)所示。

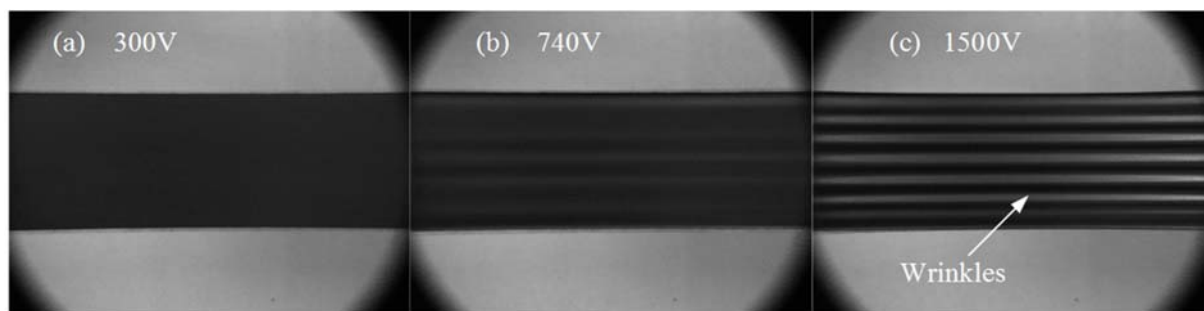


图 4 薄膜起皱前后形态图 (a)起皱前, (b)起皱时, (c)完全褶皱后

Fig. 4 Morphology of the film, before wrinkling(a), being wrinkling(b), after wrinkling(c)

试样起皱之后,随着电压的不断增大,新的褶皱波峰会逐渐从原有的两个波峰之间“生长”出来,使得波形的数量增多。而薄膜自身的宽度未发生明显的改变,这意味着褶皱的波长是随着电压的增加而逐渐减小的。因为试样的宽度越宽越便于观察褶皱数量随电压增加的变化情况,为此,特用了三种不同原始宽度的试样预拉 8 倍后进行测试。图 5 描绘了原始宽度 d_0 分别为 10cm、15cm 和 20cm 的薄膜(电极比 x 均为 0.5)起皱后的波长随电压的变化曲线,其基本一致的变化趋势也很好地支撑了这一结论。曲线中, $d_0=10\text{cm}$ 的薄膜在电压从 1kV 增加至 2kV 的过程中,波峰数量从 6 个增长至 8 个,平均波长从 84.9 个像素缩减至 59.1 个像素,减少了 30.4%。另外,在整个电压加载的过程中薄膜涂覆电极的区域长度和宽度都变化很小。以 $x=0.4$ 的薄膜试样为例,在电压从零加载至 2kV 的过程中,其电极区域的平均长度 D 从 1280 个像素增加到 1286 个像素,平均宽度 d 从 542 个像素缩减到 534 个像素,两个方向的形变均不超过 1.5%。

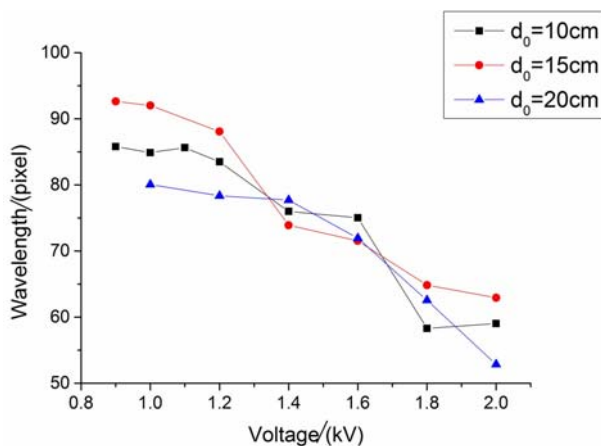


图 5 三种薄膜宽度下褶皱波长随电压变化曲线

Fig. 5 Curves of changes of wavelength versus to voltage

换言之,薄膜的起皱是一种局部行为。当 x 逐渐增大,褶皱范围迅速地扩展,在 $x=0.2$ 时,已经几乎扩展到边界(图 7(b)),随后受到边界的限制,不再发生扩展(图 7(c))。为了量化和分析这些差异,图 8 给出了不同长度比 x 下的临界起皱电压变化规律。

由图 8 给出的不同电极长度下薄膜临界起皱电压的变化曲线可以看出,当电极长度很小($x=$

2.2 电极长度对薄膜临界起皱电压的影响

实验结果还显示,试样的临界起皱电压与电极长度或电极面积并非简单的线性关系。图 6 中(a)、(b)、(c)分别代表了电极长度比为 0.05、0.2 和 0.4 的三种试样处于起皱临界点的薄膜形态,其中(b)和(c)试样的临界起皱电压较为接近,但是远低于(a)。图 7 则分别描述了上述三种电极长度的试样在同一电压(2kV)下的薄膜形态,可以发现薄膜的褶皱范围明显受到电极长度的影响。当 $x=0.05$ 时,电极长度很小,薄膜只在涂覆电极的部分及其周围区域内发生褶皱(图 7(a)),而远离电极的区域保持平整。

0.05)时,薄膜的临界起皱电压较高,在 1400V(± 10 V)才开始出现褶皱。随着电极长度的逐渐增大,薄膜的临界起皱电压急剧地减小。在 $x=0.15$ 时达到最低点,电压低至 600V(± 10 V)。随后曲线变化相对平缓,电极长度对临界电压的影响较不明显。长度比 x 从 0.15 到 0.4 的过程中,起皱电压仅变化了 10%。但是随着电极长度的进一步加大($x \geq 0.4$),薄膜的临界起皱电压又出现明显的升高。在 $x=1$ 时,其起皱电压达到 1200V(± 10 V)。

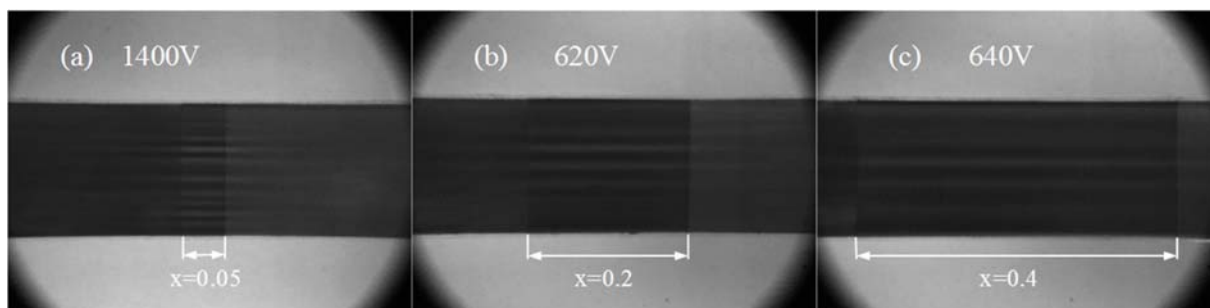


图6 三种不同电极长度的薄膜临界起皱状态

Fig. 6 Critical wrinkling behavior of the films with three electrode lengths

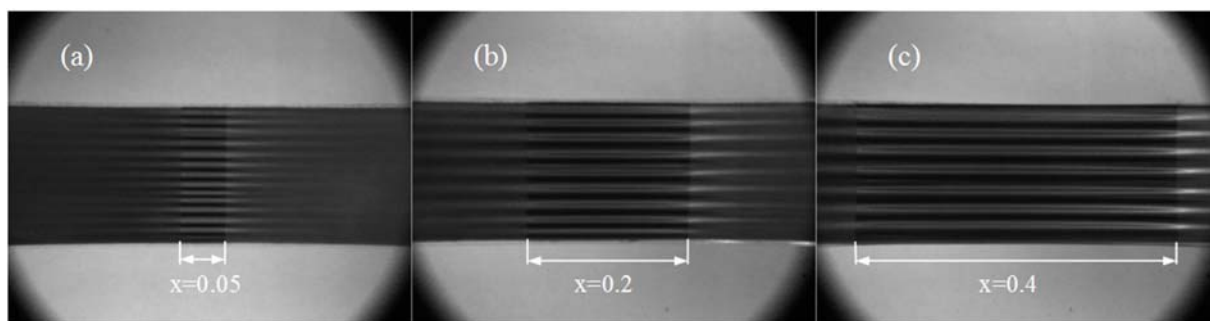


图7 电压 2kV 下三种不同电极长度的薄膜褶皱形态图

Fig. 7 Wrinkles of the films with three electrode lengths at voltage 2kV

尽管已有多数力学模型可以用于描述超弹性材料的本构关系,但多数比较适合于预拉伸倍数小于 4 时的应变能密度描述。Ogden 模型是相对适合于大伸长比的应变能模型,但是伸长比大于 7 时,材料拉伸方向的刚度随拉伸变形快速增加,Ogden 模型与实验结果也不能很好地吻合^[18-21]。因此,我们只从物理本质的角度定性分析上述结果。考虑薄膜自身结构,其涂覆电极的区域等价于一个平行板电容器。薄膜厚度相同时,电极的面积越大,电容量越大。相应的,当外加电压相同时,电极的长度越大,电场的能量越大。随着电极长度的增大,薄膜与电极电容这个体系的自由能也越大,薄膜更容易起皱,或者说临界起皱电压更低,这是图 8 中曲线前半段的变化趋势。但是当电极长度大到一定程度,薄膜的临界屈曲电压又开始逐渐增大。这意味着并非能量越大,薄膜就越容易屈曲,还应该考虑其他因素。

加载电压后,薄膜的电极区域受到静电 Maxwell 应力的挤压而变薄,并向 1 和 2 方向(见图 1,下同)延展。沿 1 方向延展使得非电极区收缩,预拉伸应力减小。这有助于电极区的厚度变薄,增加电极

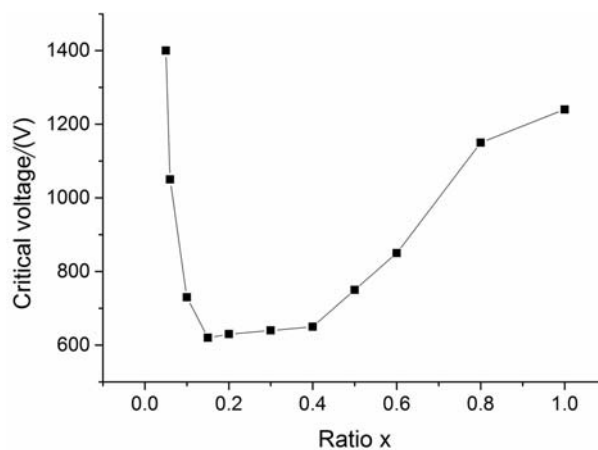


图8 不同长度比 x 下的临界起皱电压

Fig. 8 Critical wrinkling voltage of the films with different length ratios x

区的等效电容量,从而使电极区获得更多的电能。可以认为非电极区沿 1 方向的收缩是增加电极区自由能的因素之一,是一种能量交换。另一方面,电极区的能量越高,薄膜向 2 方向延展趋势越强,这使得电极区与非电极区的边界两侧变形趋势不一致,相当于边界一侧非电极区的薄膜会约束 2 方向和厚度方向的变形。所以在电极区与非电极区的边界附近会产生切应力,切应力与试样预拉伸产生的拉应力共同作用,在电极边界周围必然产生压应力。由于薄膜的抗弯刚度几乎为零,压应力会导致其产生褶皱。

电极区产生褶皱后,薄膜的弯曲自由能增加了。由于电极区和非电极区的边界是非刚性的,边界两侧的变形是连续的,所以非电极区靠近边界的薄膜也随之产生褶皱。褶皱扩展至非电极区也是一种能量交换的结果。

当电极长度或面积较小时,电极电容储存的能量较低不易引起薄膜起皱,所以临界起皱电压较高;随着电极面积的增加,相同电压下能量变大,起皱电压逐渐降低。但是如前所述,起皱不仅需要能量,也需要电极区与非电极区的能量交换。当电极面积进一步增大时,非电极区域的面积变小,能量交换减弱,所以试样的起皱临界电压反而逐渐升高。极限情况是 $x=1$ 时,非电极区域面积为零,电极区无法沿 1 方向扩展,从而不利于电极电容吸收电能,致使其临界起皱电压依然高达 1200V,接近曲线中最低起皱电压的两倍。这是图 8 所示现象的物理原因。

文献[22]在分析单轴拉伸(拉应变不超过 10%)薄膜起皱(非电致)的原因时,认为试样两端的刚性夹持阻止试样沿宽度方向收缩会在夹持附近产生切应力,并确认切应力引起的压应力是导致薄膜褶皱的原因。本文实验中,试样预拉伸 8 倍后,用有机玻璃框粘取的试样可以认为是纯拉伸段,在试样中不存在切应力。仅当电极区发生电致变形时,在电极区与非电极区的边界附近才会产生切应力,且切应力相对较小,与文献[22]中的情况有一定差别。可以说对于力电耦合作用引起的褶皱,刚性边界约束而产生的切应力远不是起皱的根本原因。电极区与非电极区的能量交换比刚性边界约束对电致起皱的贡献更大。 $x=1$ 时,薄膜在加载电压后存在刚性边界约束,但是没有电极区与非电极区的能量交换,所以需要较高电压才能导致起皱,这一点也很好支撑了该结论。

前文中分析得出,褶皱的波长随外加电压的升高而变小。文献[22]给出的褶皱弯曲自由能的表达式中,自由能与波长的四次方成反比,即波长越小,弯曲自由能越大。当外加电压升高时,试样内总的自由能增加,弯曲自由能相应地也增大,所以出现褶皱的数量增多与波长减小。这一实验的意义之一是定量测量了波长随外加电压的变化范围。

3 结 论

(1) 本文通过实验研究了电极长度或面积对单向拉伸下介电弹性体薄膜起皱的影响。实验结果表明电极长度对薄膜的临界起皱电压有较大影响。当电极长度很小($x \leq 0.15$)时,薄膜的临界起皱电压随着电极长度的增加而快速下降;电极长度稍大一些($0.15 \leq x \leq 0.4$),薄膜的临界起皱电压变化相对平缓,电极对其影响不明显;随着电极长度进一步增大($x \geq 0.4$),薄膜的临界起皱电压又逐渐升高,直至电极布满整个薄膜表面。同时薄膜的褶皱波长随着外加电压的升高而逐渐减小。

(2) 对实验结果进行分析后认为,薄膜的起皱是一种局部效应。电极区域与非电极区域的相互作用与能量传递对起皱有较大影响。

(3) 实验中通过采用铜丝搭接的方式引出电极,解决了电极引出线的附加刚度影响薄膜起皱的问题,对于今后进行相关的实验研究从技术层面提供了参考。

参考文献:

- [1] Barcohen Y. Biologically inspired technology using electroactive polymers (EAP)[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2006, 6168:616803-1-6.
- [2] Wissler M, Mazza E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2007, 138(2):384-393.

- [3] Kofod G, Sommerlarsen P, Kornbluh R D, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers[J]. *Journal of Intelligent Material Systems & Structures*, 2003, 14(12):787–793.
- [4] O'Halloran A, O'Malley F, McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges[J]. *Journal of Applied Physics*, 2008, 104(7):9.
- [5] Patrick L, Gabor K, Silvain M. Characterization of dielectric elastomer actuators based on a hyperelastic film model[J]. *Smart Materials & Structures*, 2007, 16(2):748–757.
- [6] Brochu P, Pei Q B. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles[J]. *Macromol Rapid Commun*, 2010, 31:10–36.
- [7] Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q, et al. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100% [J]. *Science*, 2000, 287(5454):836–839.
- [8] Mockensturm E, Goulbourne N, Frecker M. A nonlinear model for dielectric elastomer membranes[J]. *Journal of Applied Mechanics*, 2005, 72(6):899.
- [9] 锁志刚, 曲绍兴. 介电高弹聚物理理论[J]. *力学进展*, 2011, 41(6):730–750 (SUO Zhiangang, QU Shaoxing. The theory of dielectric elastomers[J]. *Advances in Mechanics*, 2011, 41(6):730–750 (in Chinese))
- [10] Suo Z, Zhao X, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics[J]. *Journal of the Mechanics & Physics of Solids*, 2008, 56(2):467–486.
- [11] Plante J S, Dubowsky S. Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators[J]. *International Journal of Solids & Structures*, 2006, 43(25):7727–7751.
- [12] Zhao X, Suo Z. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers[J]. *Applied Physics Letters*, 2007, 91(6):061921-1-3.
- [13] 刘彦菊, 刘立武, 孙寿华, 等. 介电弹性体驱动器的稳定性分析[J]. *中国科学 E 辑: 技术科学*, 2009, 52(9): 2715–2723 (LIU Yanju, LIU Liwu, SUN Shouhua, et al. Stability analysis of dielectric elastomer film actuator [J]. *Science China Technological Sciences*, 2009, 52(9):2715–2723 (in Chinese))
- [14] 刘立武, 孙寿华, 刘彦菊, 等. 具有线性介电常数的 Ogden 型介电弹性体的本构关系和机电稳定性[J]. *固体力学学报*, 2010, 31(2): 181–192 (LIU Liwu, SUN shouhua, LIU Yanju, et al. Constitutive relation electromechanical stability analysis of Ogden type dielectric elastomer with linear permittivity[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2010, 31(2):181–192 (in Chinese))
- [15] De Tommasi D, Puglisi G, Saccomandi G, et al. Pull-in and wrinkling instabilities of electroactive dielectric actuators[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2010, 43(32):325501–325509.
- [16] Li B, Chen H, Qiang J, et al. Effect of mechanical pre-stretch on the stabilization of dielectric elastomer actuation [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2011, 44(15):155301.
- [17] Liu X, Li B, Chen H, et al. Voltage-induced wrinkling behavior of dielectric elastomer[J]. *Journal of Applied Polymer Science*, 2015, 133(14):43258.
- [18] Beda T. An approach for hyperelastic model-building and parameters estimation a review of constitutive models [J]. *European Polymer Journal*, 2014, 50(1):97–108.
- [19] Steinmann P, Hossain M, Possart G. Hyperelastic models for rubber-like materials: consistent tangent operators and suitability for Treloar's data[J]. *Archive of Applied Mechanics*, 2012, 82(9):1183–1217.
- [20] Sasso M, Palmieri G, Chiappini G, et al. Characterization of hyperelastic rubber-like materials by biaxial and uniaxial stretching tests based on optical methods[J]. *Polymer Testing*, 2008, 27(8):995–1004.
- [21] Díazcalleja R, Lloverasegovia P, Dominguez J J, et al. Theoretical modelling and experimental results of electromechanical actuation of an elastomer[J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2013, 46(46):235305.
- [22] Cerda E, Ravi-Chandar K, Mahadevan L. Thin films Wrinkling of an elastic sheet under tension[J]. *Nature*, 2002, 419(6907):579–580.

An experimental study on the effect of electrode area on electric wrinkling of dielectric elastomer film

YANG Fan, HOU Zhen-de, ZHANG Guo-li, FU Dong-hui, QU Chuan

(Department of Mechanics, Tianjin University, Tianjin 300354, China)

Abstract: Prestretched dielectric elastomer (DE) film not only can achieve large electric-field induced deformation but also is prone to wrinkling, under the interaction of its own strain energy and the applied electric field energy. For a uniaxially pre-stretched dielectric elastomer film, the electrode area is an important parameter to the electric-field induced deformation, and may also be a key factor affecting the film wrinkling. To determine and quantify the effect, critical wrinkling voltages of the film with different electrode areas were measured, and the wrinkle wavelengths were obtained simultaneously for analyzing the wrinkling characteristics. Experimental results indicate when the electrode area is smaller the wrinkling voltage is higher, and with the increases of electrode area, the wrinkling voltage decreases rapidly until a specific area. After that, the wrinkling voltage becomes larger gradually with the increases of the area. While the wrinkle wavelength decreases gradually with the increase of voltage monotonically. Analysis believes that the film wrinkling is a kind of local effect, the interaction and the energy transfer between electrode region and non-electrode region have great influence on wrinkling. In the experiment, very thin copper wires are used as the electrode leads that just contact with the electrodes, which can avoid the stiffness of the leads affecting the wrinkling.

Keywords: dielectric elastomer; uniaxial tension; electrode length; wrinkling; critical voltage; wavelength