

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.050

# 介电型电活性聚合物驱动器机电耦合特性\*

朱银龙<sup>1</sup> 王化明<sup>2</sup>

(1. 南京林业大学机械电子工程学院, 南京 210037; 2. 南京航空航天大学机电学院, 南京 210016)

**摘要:** 研究了介电型电活性聚合物(DEAP)的机电耦合特性,分析了电场作用下 DEAP 的受力情况,结合超弹性理论建立了 DEAP 的非线性机电耦合本构模型。对电场作用下圆形结构 DEAP 驱动器的变形行为进行建模研究,给出 Yeoh 形式的 DEAP 本构方程、平衡方程和边界条件。通过求解微分方程组得出 DEAP 驱动器薄膜中的主延伸率和主应力分布,同时分析了预拉伸率、驱动器主动区域面积及激励电压对驱动器变形的影响。利用试验研究了电激励下的圆形驱动器变形行为,试验结果与理论分析比较吻合,从而验证了本构模型的正确性。研究表明:预拉伸率取值为 3~4 比较合适。

**关键词:** 介电型电活性聚合物 驱动器 机电耦合

**中图分类号:** TB34 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2013)12-0301-06

## Electromechanical Characteristic of Dielectric Electroactive Polymer Actuator

Zhu Yinlong<sup>1</sup> Wang Huaming<sup>2</sup>

(1. College of Mechanical and Electricronic Engineering, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

(2. College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

**Abstract:** In order to study the electromechanical coupling characteristic of dielectric electroactive polymer, the force analysis of DEAP under electrical field was performed, and the nonlinear electromechanical constitutive model was presented by combing the hyperelastic theory. On the basis of the model, the mechanical behavior of circular actuator was discussed. The Yeoh form of DEAP constitutive equation, the equilibrium equations and the boundary conditions were given. Thus, the principal stretch ratio and principal stress in the membrane of DEAP actuator were obtained by solving the differential equations. At the same time, the influences of pre-stretch ratio, the area of active region and actuation voltages on deformation of actuator were analyzed. And the experimental results for deformation behavior of circular DEAP actuator under voltage actuation were consistent with the theoretical analysis results. It was found that the optimal pre-stretch ratio was 3~4.

**Key words:** Dielectric electroactive polymer Actuator Electromechanical coupling

### 引言

近年来,介电型电活性聚合物(Dielectric electroactive polymer, DEAP)作为一种新型智能材料,以其具有大变形、高质量比等优点<sup>[1-6]</sup>引起了各研究机构的重视<sup>[7-9]</sup>。DEAP 驱动器由 DEAP 薄膜和敷在薄膜两侧的柔性电极构成,施加电压时,两侧

电极上的异性电荷相互吸引,同侧电极上的同性电荷相互排斥,使得 DEAP 在平面方向上延展,厚度方向收缩。一般,DEAP 可近似为一种不可压缩的超弹性体,在静压力作用下,电能转换为机械能。失电后,作用在弹性体上的压力消失,弹性体恢复原状。

对 DEAP 的机电耦合特性进行理论描述对应

收稿日期: 2012-11-28 修回日期: 2013-01-28

\* 国家自然科学基金资助项目(51305209)、江苏省自然科学基金资助项目(BK20130979)和江苏省自然科学基金资助项目(BK20111735)

作者简介: 朱银龙,讲师,主要从事介电型 EAP 换能器设计与仿生机器人研究, E-mail: zhuyinlong@nuaa.edu.cn

通讯作者: 王化明,教授,主要从事介电型 EAP 应用与机器人控制研究, E-mail: hmwang@nuaa.edu.cn

DEAP 驱动器的设计是不可缺少的。然而到目前为止,关于 DEAP 的机电耦合机理,存在两种观点:一种观点借用连续介质力学中关于电磁介质力学来研究 DEAP,认为 DEAP 的本构关系是机械应力和电场力的耦合<sup>[10-11]</sup>,另外一种观点认为电场力是不可测的,转而从变分原理角度来研究 DEAP 的力电耦合情况<sup>[12-13]</sup>,虽然二者的出发点不同,但是当材料不可压缩时所阐述的 DEAP 的本构方程是一致的。

本文采用虚功原理的方法,从另外一种角度来分析电场作用下 DEAP 的受力情况,进而在连续介质力学框架内研究 DEAP 驱动器的机电耦合特性。

## 1 DEAP 的机电耦合模型

在电场作用下,DEAP 薄膜两面的电极上产生等量的正、负电荷,相同电荷之间互相排斥、异性电荷之间相互吸引,在静电力的作用下 DEAP 发生形变,这种静电力也称为 Maxwell 应力。

DEAP 驱动器可以等效为一可变形的平行板电容器,当对电容器充电时,正、负电极两端都积累了等量的正、负电荷  $Q$ ,此时 DEAP 驱动器的电容为

$$C = \frac{Q}{U} = \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r A}{h} \quad (1)$$

式中  $U$ ——电容器两端电压

$A$ ——电容器极板面积

$h$ ——电容器极板间距离

$\varepsilon_r$ ——相对介电常数

$\varepsilon_0$ ——真空介电常数

DEAP 驱动器充电时,驱动器上的电能为

$$W_e = \frac{Q^2}{2C} = \frac{Q^2 h}{2\varepsilon_0 \varepsilon_r A} \quad (2)$$

在驱动器上施加电压时,DEAP 薄膜厚度和面积均发生变化。对  $W_e$  取微分  $\delta W_e$  得

$$\delta W_e = \frac{Q}{C} \delta Q + W_e \left( \frac{1}{h} \delta h - \frac{1}{A} \delta A \right) \quad (3)$$

式(3)中,第1项代表电源流向驱动器的电能,第2项代表驱动器变形过程中转换为机械能的电能。充电过程中,电荷和 Maxwell 应力做功等于 DEAP 薄膜上电能的变化,利用虚功原理得

$$\begin{aligned} \delta W_e &= U \delta Q + \sigma_{EA} h \delta A + \sigma_{EZ} A \delta h = \\ &= \frac{Q}{C} \delta Q + \sigma_{EA} h \delta A + \sigma_{EZ} A \delta h \end{aligned} \quad (4)$$

式中  $\sigma_{EA}$ ——Maxwell 应力在平面方向的等效应力  
 $\sigma_{EZ}$ ——Maxwell 应力在厚度方向的等效应力  
 将式(3)和式(4)比较得

$$W_e \left( \frac{1}{h} dh - \frac{1}{A} dA \right) = \sigma_{EA} h dA + \sigma_{EZ} A dh \quad (5)$$

进一步简化可得

$$\begin{cases} \sigma_{EA} = -\frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (U/h)^2 \\ \sigma_{EZ} = \frac{1}{2} \varepsilon_0 \varepsilon_r (U/h)^2 \end{cases} \quad (6)$$

将电场作用下 DEAP 薄膜中的总应力表示为机械应力部分和电场力(Maxwell 应力)部分的和,即

$$\sigma_{tot} = \sigma_{mec} + \sigma_{el} \quad (7)$$

将式(6)进一步表示为

$$\sigma_{el} = \pm \varepsilon_r \varepsilon_0 U^2 / [2(\lambda_3 h_0)^2] \quad (8)$$

式(8)中薄膜平面方向的 Maxwell 应力取负号、厚度方向取正号。

各个主方向的整体柯西应力可以表示为

$$\sigma_i = \lambda_i \frac{\partial W}{\partial \lambda_i} - \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 U^2}{2(\lambda_3 h_0)^2} - p \quad (i=1,2,3) \quad (9)$$

式中  $W$ ——应变能方程  $p$ ——静水压力

由于薄膜厚度足够小,而且薄膜两边的静电压力大小相等、方向相反,可以假设薄膜法向应力为零。这样的假设足够精确,因为厚度方向的尺寸与平面方向的尺寸相比可以忽略,那么就可以消除静水压力  $p$ 。这样平面方向的两个主应力可以表示为

$$\sigma_1 = \lambda_1 \frac{\partial W}{\partial \lambda_1} - \lambda_3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} - \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 U^2}{(\lambda_3 h_0)^2} \quad (10)$$

$$\sigma_2 = \lambda_2 \frac{\partial W}{\partial \lambda_2} - \lambda_3 \frac{\partial W}{\partial \lambda_3} - \frac{\varepsilon_r \varepsilon_0 U^2}{(\lambda_3 h_0)^2} \quad (11)$$

## 2 圆形驱动器结构及变形示意图

圆形驱动器由3部分组成,主动区域(电极覆盖部分)、被动区域薄膜和边框构成,如图1所示。在主动区域施加电压后,由于 Maxwell 应力的作用,主动区域薄膜变薄的同时向被动区域处扩张,被动区域薄膜发生径向收缩的同时厚度变厚。

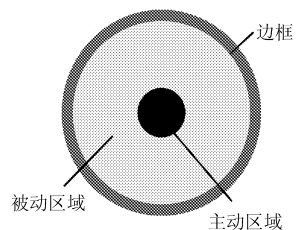


图1 圆形驱动器结构示意图

Fig.1 Schematic drawing of circular actuator

图2为主动区域与被动区域交界处的截面变形示意图。正常情况下,施加驱动电压以后,主动区域和被动区域交界处的厚度变化是连续的,如图2b所示。这里为了便于建模分析,假设主动区域与被动区域的交界处的薄膜厚度变化是突变的,如图2c所示。

薄膜的变形过程如图3所示,由预拉伸变形和

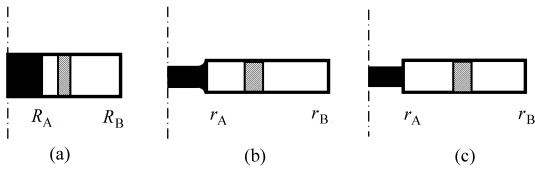


图 2 驱动器截面变形示意图

Fig. 2 Sectional view of actuator during deformation

(a) 截面初始形状 (b) 连续变形 (c) 不连续变形

电激励变形 2 部分组成。初始构型用坐标系  $(R, \Theta, Z)$  表示, 预拉伸及电激励时的构型用坐标系  $(r, \theta, z)$  表示。薄膜初始厚度为  $h_0$ , 被动区域的内外半径分别为  $R_A, R_B$ ; 等轴预拉伸  $\lambda_0$  倍后施加驱动电压, 薄膜主动区域厚度为  $h_{in}$ , 被动区域厚度为  $h_{out}$ , 被动区域的内外径分别为  $r_A, r_B$ , 对于圆形驱动器有  $R_B = r_B$ 。

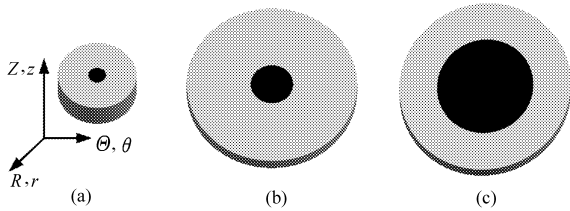


图 3 DEAP 驱动器构型示意图

Fig. 3 Configuration of DEAP actuator

(a) 初始构型 (b) 预拉伸后 (c) 电激励后

### 3 圆形驱动器建模

#### 3.1 主动区域受力分析

主动区域部分薄膜在电压驱动后, 薄膜径向扩张的变形是轴对称的, 无剪切变形, 薄膜上任一点的变形都相同, 其主延伸率可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_r = \lambda_0 \\ \lambda_z = 1/(\lambda_r \lambda_\theta) \end{cases} \quad (12)$$

施加电压  $U$  后, 薄膜中的主应力为

$$\sigma_r = \sigma_\theta = \lambda_r \frac{\partial W}{\partial \lambda_r} - \lambda_z \frac{\partial W}{\partial \lambda_z} - \varepsilon_r \varepsilon_0 \lambda_r^4 \left( \frac{U}{h_0} \right)^2 \quad (13)$$

应用 Yeoh<sup>[14]</sup> 形式的应变能方程, 式 (13) 可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma_r = \sigma_\theta = & 2C_{10}(\lambda_r^2 - \lambda_r^{-4}) + 4C_{20}(2\lambda_r^3 + \lambda_r^{-3} - 3) \cdot \\ & (\lambda_r^2 - \lambda_r^{-4}) + 6C_{30}(2\lambda_r^3 + \lambda_r^{-3} - 3)^2 \cdot \\ & (\lambda_r^2 - \lambda_r^{-4}) - \varepsilon_r \varepsilon_0 \lambda_r^4 (U/h_0)^2 \end{aligned} \quad (14)$$

#### 3.2 被动区域受力分析

与主动区域薄膜的变形不同, 被动区域薄膜的变形和应力分布都是不均匀的。被动区域薄膜可以作为一个内外径受约束的环形薄膜进行建模分析, 任取环形薄膜上半径方向的一个微元进行受力分析, 如图 4 所示。微元在半径  $r$  处的真实应力为  $\sigma_r$ ,  $r + dr$  处的应力为  $\sigma_r + (\partial \sigma_r / \partial r) dr$ 。环向上应力相

同, 表示为  $\sigma_\theta$ 。

被动区域薄膜的主延伸率可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_r = \partial r / \partial R \\ \lambda_\theta = r / R \\ \lambda_z = 1/(\lambda_r \lambda_\theta) \end{cases} \quad (15)$$

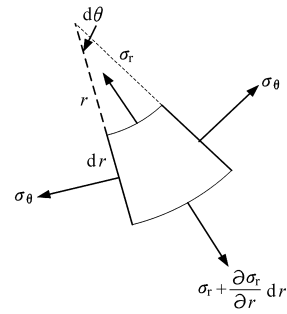


图 4 被动区域受力分析示意图

Fig. 4 Force analysis of passive region

$r$  方向平衡方程为

$$\begin{aligned} \left( \sigma_r + \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} dr \right) (r + dr) d\theta - \sigma_r r d\theta - \\ 2\sigma_\theta dr \sin\left(\frac{d\theta}{2}\right) = 0 \end{aligned} \quad (16)$$

式 (16) 中, 取  $\sin(d\theta/2) = d\theta/2$ , 略去高阶无穷小量得

$$r \frac{\partial \sigma_r}{\partial r} + \sigma_r - \sigma_\theta = 0 \quad (17)$$

应用 Yeoh 形式应变能方程<sup>[14]</sup>, 被动区域薄膜内的主应力可以表示为

$$\begin{aligned} \sigma_r = & 2C_{10}(\lambda_r^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) + \\ & 4C_{20}(\lambda_r^3 + \lambda_r \lambda_\theta^2 + \lambda_r^{-1} \lambda_\theta^{-2} - 3)(\lambda_r^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) + \\ & 6C_{30}(\lambda_r^3 + \lambda_r \lambda_\theta^2 + \lambda_r^{-1} \lambda_\theta^{-2} - 3)^2 (\lambda_r^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) \end{aligned} \quad (18)$$

$$\begin{aligned} \sigma_\theta = & 2C_{10}(\lambda_\theta^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) + 4C_{20}(\lambda_\theta^3 + \lambda_\theta \lambda_r^2 + \\ & \lambda_\theta^{-1} \lambda_r^{-2} - 3)(\lambda_\theta^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) + \\ & 6C_{30}(\lambda_\theta^3 + \lambda_\theta \lambda_r^2 + \lambda_\theta^{-1} \lambda_r^{-2} - 3)^2 (\lambda_\theta^2 - \lambda_r^{-2} \lambda_\theta^{-2}) \end{aligned} \quad (19)$$

结合式 (15) 和 (17) 可得

$$\frac{\partial \lambda_\theta}{\partial R} = \frac{\frac{\partial r}{\partial R} R - r}{R^2} = \frac{\lambda_r - \lambda_\theta}{R} \quad (20)$$

$$\frac{\partial \lambda_r}{\partial R} = \frac{\lambda_r}{R \lambda_\theta} \frac{\sigma_\theta - \sigma_r}{\frac{\partial \sigma_r}{\partial \lambda_r}} - \frac{\lambda_r - \lambda_\theta}{R} \frac{\frac{\partial \sigma_r}{\partial \lambda_\theta}}{\frac{\partial \sigma_r}{\partial \lambda_r}} \quad (21)$$

易见主动区域和被动区域交点处的周向延伸率和径向应力均相等, 同时被动区域外径处被边框固定, 其周向延伸率等于预拉伸率, 那么两个区域 (分别用 in、out 下标区分) 的边界条件可以表示为

$$\begin{cases} \lambda_{\theta_{in}}(A) = \lambda_{\theta_{out}}(A) \\ \sigma_{rin}(A) = \sigma_{rout}(A) \\ \lambda_{\theta_{out}}(B) = \lambda_0 \end{cases} \quad (22)$$

#### 4 数值分析

式(20)、(21)构成了微分方程组的边值问题,选取 Matlab 中的边值求解器 `bvp4c` 函数进行求解,该函数文件是根据有限元法中的配置法,它比初值问题的求解器(如 ODE45)具有更好的鲁棒性,误差控制也更好。首先给定一主动区域通电后的边界,求解此变形对应的被动区域主应力、主应变分布情况,进而得到对应主动区域上施加的电压。在此基础上,将算法略作改动,可以得到任一驱动电压下的驱动器变形情况。

DEAP 材料选用 3M 公司的 VHB4910,采用 Wissler M<sup>[15]</sup> 材料参数,取圆形驱动器的主动区域半径  $r_A = 15$  mm,被动区域半径  $r_B = 40$  mm,预拉伸率为  $\lambda_0 = 3.5$ 。求解微分方程组,得到驱动器被动区域的应力、应变分布情况和驱动器主动区域、被动区域的薄膜变形情况。图 5 为被动区域薄膜内的径向、周向主应力分布情况,为了便于表示不同电压下的应力分布情况,横坐标采用通电前被动区域初始尺寸。可以看出,15~40 mm 半径方向,相同电压下的径向应力逐渐增加;随着驱动电压从 1 kV 增加至 4 kV,被动区域径向应力逐渐减小。与径向应力的变化情况截然不同,被动区域薄膜的周向应力沿着半径方向逐渐减小,随着驱动电压的增加呈现递增趋势。这是因为随着驱动电压的增加,主动区域向被动区域扩展,被动区域在径向受压缩,薄膜中的径向减小;与此同时,被动区域薄膜在周向有伸长趋势,所以薄膜中的周向应力增加。

图 6 为被动区域薄膜内的径向、周向主延伸率分布情况,同样采用被动区域初始半径尺寸作为横坐标。从图 6 中可看出,15~40 mm 半径方向,相同电压下的径向应变逐渐增加;随着驱动电压从 1 kV 增加至 4 kV,被动区域径向应变逐渐减小。与径向应变的变化情况相反,被动区域薄膜的周向应力沿着半径方向逐渐减小,并且随着驱动电压的增加呈现递增趋势。这是因为随着激励电压的增加,主动区域向被动区域扩展,被动区域薄膜径向收缩,周向扩张的缘故。

图 7 为 3 kV、4 kV 驱动电压下的薄膜厚度分布情况,易见主动区域的薄膜厚度是相同的,被动区域的薄膜厚度分布不均,呈现出沿半径方向减小的趋势。和前面的假设一致,主动区域和被动区域交界处的薄膜厚度变化是不连续的。实际情况并非如

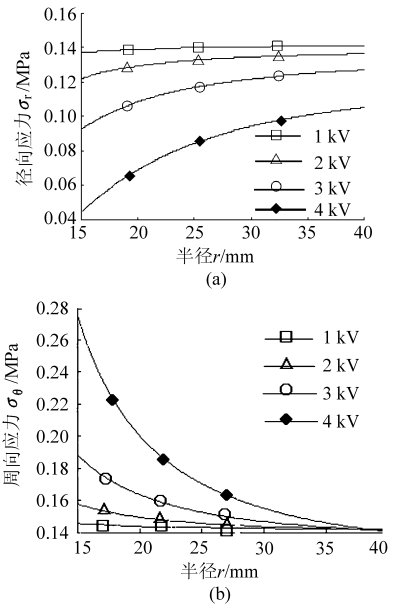


图 5 薄膜中主应力分布

Fig. 5 Distribution of principal stress in membrane

(a) 径向应力 (b) 周向应力

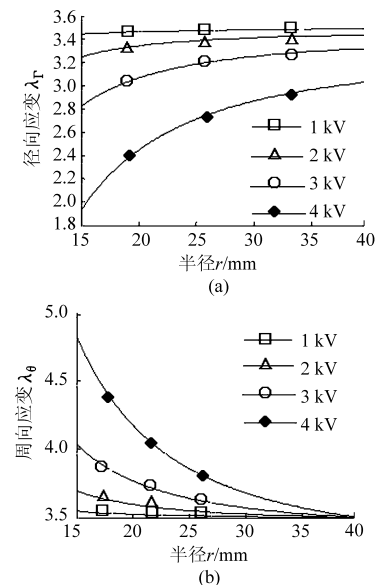


图 6 薄膜中主应变分布

Fig. 6 Distribution of principal strain in membrane

(a) 径向应变 (b) 周向应变

此,这里作的假设只是为了便于分析。3 kV 电压下,主动区域的厚度约为 0.061 mm,被动区域厚度沿半径方向略有减小,主动区域和被动区域交界处的厚度最大,4 kV 电压时主动区域薄膜厚度为 0.042 mm,变化较 3 kV 电压下的更大,也就是说随着激励电压的增加,圆形驱动器的变形也相应增大。

设置驱动电压为 3 kV、3.5 kV,主动区域直径从 10 mm 依次增加到 50 mm,分析驱动器的输出应变如图 8 所示。可见随着主动区域面积的增加,整个驱动器在电压驱动下的变形率逐渐减小。也就是说,主动区域面积较小时,驱动器的变形能力反而变

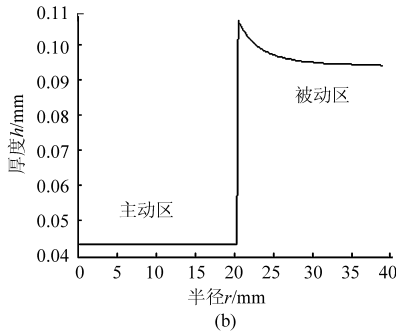
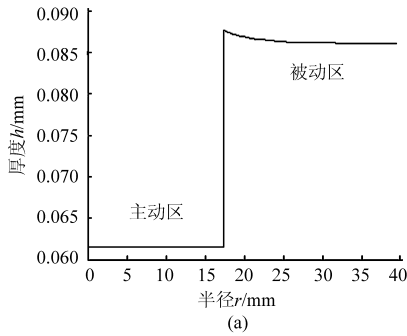


图 7 不同驱动电压下薄膜厚度

Fig. 7 Thickness of membrane under different voltage  
(a) 3 kV (b) 4 kV

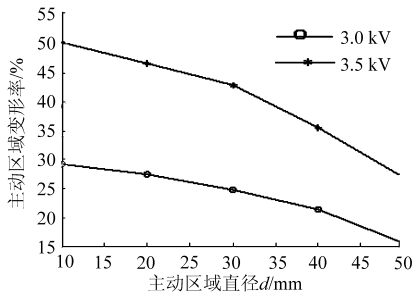


图 8 改变主动区域时的变形率

Fig. 8 Deformation ratio of active region

得较大。

图 9 为 3 kV、3.5 kV 激励电压下,主动区域取直径为 20 mm 时,取不同预拉伸率时的驱动器主动区域变形率曲线。可见随着主动区域的变形率和预拉伸率的关系并非单调的,而是随着预拉伸率的增加,先增加后减小。 $\lambda_0$ 取 3~4 时,主动区域的变形率最大,达到 47%。由此可见,在电场相同的情形下,增加预拉伸率可降低薄膜上的激励电压,与此同时要获得较大的变形率,须选择适当的预拉伸率。

### 5 驱动器变形试验

驱动器的主要部件有 DEAP 薄膜、内外框、引线和柔性电极。图 10 所示为制作的驱动器,DEAP 薄膜选用 3M 公司的 VHB 4910,引线选用铝箔纸,驱动器的内外框架采用玻璃纤维加强环氧树脂板。

利用坐标纸观察通电前、后,圆形电极区域的直径变化,进而得到不同电压下圆形驱动器的变形率。

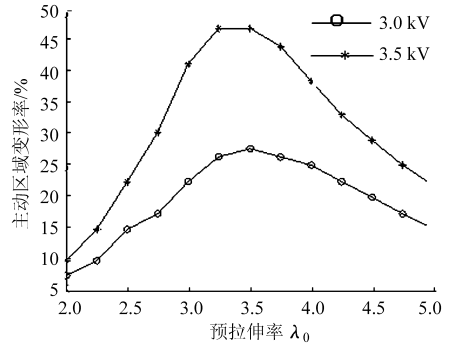


图 9 预拉伸率与主动区域变形率关系曲线  
Fig. 9 Relationship curve between pre-stretch ratio and deformation of active region

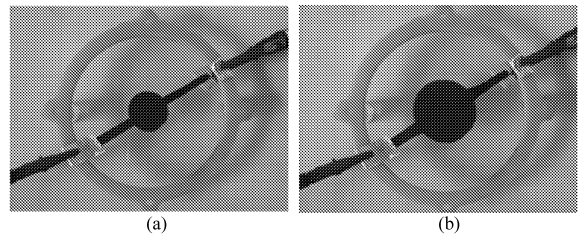


图 10 圆形驱动器电激励变形试验图  
Fig. 10 Deformation of circular actuator with electrical actuation  
(a) 通电前 (b) 通电后

首先分析圆形驱动器尺寸固定时,主动区域大小对驱动器变形率的影响。取预拉伸率为 3.5,驱动器外径为 80 mm,主动区域直径从 10 mm 递增至 50 mm,激励电压为 3.5 kV。为了提高试验精度,每一试验重复 3 次,取平均值,试验结果如图 11 所示。可见随着主动区域直径尺寸的增加,主动区域的变形率呈递减趋势。这主要是因为,主动区域面积增加的同时,被动区域的面积相应地减小,在激励电压的作用下,主动区域向被动区域扩张的能力被削弱了。

另外,取主动区域直径为 20 mm,改变薄膜预拉伸率从 2 递增至 5 时,观察圆形驱动器的变形率,试验结果如图 12 所示。可见,在预拉伸率取 3.5 时,

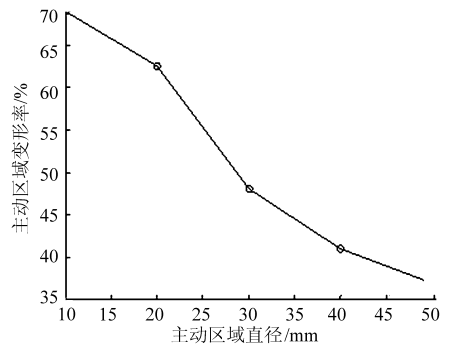


图 11 主动区域直径尺寸与变形率关系曲线  
Fig. 11 Relationship curve between diameter of active region and deformation ratio

圆形驱动器主动区域变化最大,这与前面的理论分析结果图9相同。由此可见,DEAP薄膜作为驱动

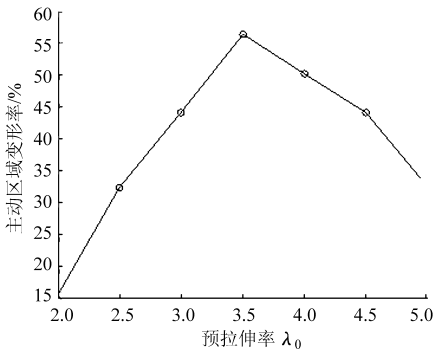


图 12 预拉伸率与变形率关系曲线

Fig. 12 Relationship curve between pre-stretch ratio and deformation ratio

器而言,预拉伸率取 3~4 比较合适。

## 6 结论

(1)分析了电场作用下,DEAP 的受力情况,结合超弹性理论建立了 DEAP 的机电耦合方程。

(2)建立了圆形 DEAP 驱动器模型,通过求解微分方程组得出 DEAP 驱动器薄膜中的主延伸率、主应力分布情况,同时分析了预拉伸率、驱动器主动区域面积及激励电压对驱动器变形的影响情况,给出了最佳的预拉伸率。

(3)根据数值计算结果,选用相应尺寸的圆形驱动器及预拉伸率、激励电压进行试验研究。试验结果进一步验证了理论分析的正确性。

## 参 考 文 献

- 1 Bar-Cohen Y. Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles: reality, potential and challenges[M]. Bellingham, WA, USA: SPIE, 2004.
- 2 Madden J D, Vandesteeg N A, Anquetil P A, et al. Artificial muscle technology: physical principles and naval prospects[J]. IEEE Journal of Oceanic Engineering, 2004, 29(3): 706~728.
- 3 Kornbluh R, Perline R, Pei Q B, et al. Electroelastomers: applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation and smart structures [C] // Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures Technologies, Proceedings of SPIE, 2002, 4 698: 254~270.
- 4 Sunar M, Rao S S. Recent advances in sensing and control of flexible structures via piezoelectric materials technology[J]. Applied Mechanics Reviews, 1999, 52(1): 1~16.
- 5 Jung K, Nam J, Lee Y, et al. Micro inchworm robot actuated by artificial muscle actuator based on non-prestrained dielectric elastomer[C] // Smart Structures and Materials 2004: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), Proceedings of SPIE, 2004, 5385(1): 357~367.
- 6 Bowes A E, Rossiter J M, Walters P J, et al. Dielectric elastomer pump for artificial organisms [C] // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011, Proceedings of SPIE, 2011, 7976: 1~7.
- 7 Vinogradov A M. Accomplishments and future trends in the field of electroactive polymers [C] // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, Proceedings of SPIE, 2008, 6927: M-1~M-11.
- 8 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles [C] // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, Proceedings of SPIE, 2008, 6927: 15-1~15-9.
- 9 罗华安,王化明,游有鹏. 介电弹性体圆柱形驱动器静态特性分析[J]. 农业机械学报, 2012, 43(9): 202~208.  
Luo Huan, Wang Huaming, You Youpeng. Static characteristic of dielectric elastomer cylindrical actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(9): 202~208. (in Chinese)
- 10 Kofod G, Sommer-Larsen P. Silicone dielectric elastomer actuators: finite elasticity model of actuation [J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2005, 122(2): 273~283.
- 11 Goulbourne N C. A mathematical model for cylindrical, fiber reinforced electro-pneumatic actuators [J]. International Journal of Solids and Structures, 2009, 46(5): 1 043~1 052.
- 12 Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics [J]. Journal of the Mechanics and Physics of Solids, 2008, 56(2): 467~486.
- 13 Suo Z G, Zhao X H, Wei H, et al. A theory of large deformation in soft active materials [C] // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, Proceedings of SPIE, 2008, 6927: 10-1~10-12.
- 14 Yeoh O H. Characterization of elastic properties of carbon-black-filled rubber vulcanizates [J]. Rubber Chemistry and Technology, 1990, 63(5): 792~805.
- 15 Wissler M, Mazza E, Kovacs G. Circular pre-stretched dielectric elastomer actuator: modeling, simulation and experimental verification [C] // Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2005, Proceedings of SPIE, 2005, 5759: 182~193.