

电致动聚合物致动器的动态响应研究

景素芳, 庞宣明, 陈晓南

(西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安)

摘要: 采用电场型电致动聚合物——介电弹性体(DE)制作了一种圆形致动器,在交流电压和直流脉动电压驱动下,分别研究了电压波形、幅值和频率的位移响应情况.实验结果表明,当幅值和频率相同、波形不同时,DE薄膜的驱动位移相差较大,在方波、正弦波和三角波电压下,其驱动位移依次减小.随着频率的增高,驱动位移的递减速度依次增大.当电压波形相同时,位移随电压幅值的增加而增大,随频率的增高而减小,均呈非线性关系,并且直流脉动电压比交流电压的驱动过程稳定.对比双向预拉伸 2×2 、 3×3 、 4×4 倍的DE致动器电致动实验结果可知,预拉伸 4×4 倍的DE致动器所需的驱动电场强度比预拉伸 2×2 倍和 3×3 倍的DE致动器所需的驱动电场强度高,从变形过程的稳定性、响应速度以及稳定变形条件下DE致动器所能承受的频率来看,预拉伸 4×4 倍的DE致动器优于预拉伸 2×2 倍和 3×3 倍的DE致动器.

关键词: 电致动聚合物;介电弹性体;致动器;位移响应

中图分类号: TB34 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2009)11-0047-04

Investigation for Dynamic Response of Electroactive Polymer Actuator

JING Sufang, PANG Xuanming, CHEN Xiaonan

(School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Dielectric elastomer (DE), a kind of electronic electroactive polymer (EAP), was made as a circular actuator and investigated for displacement response of the different voltage waveform, amplitude and frequency as driven by AC voltage and pulsating DC voltage. The influences that the above factors bring to electroactive displacement of DE actuator were investigated through experiments. The experimental results lead to the following conclusions. The displacement differs with different wave of voltage, which decreases driven by square, sine and triangular wave of voltage respectively with other conditions remained while the reduction speed increases with the increasing frequency. The displacement increases with the increasing amplitude of voltage and decreases with the increasing frequency of voltage. The relation between displacement and amplitude as well as frequency of drive voltage gets nonlinear. The drive process is more stable driven by pulsating DC voltage than that driven by AC voltage. Comparing the experimental results of DE actuators with 2×2 , 3×3 and 4×4 pre-strain, the conclusion shows that the electric field strength for DE actuator with 4×4 pre-strain is higher than that for the DE actuator with 2×2 and 3×3 pre-strain. The DE actuator with 4×4 pre-strain is more desirable the actuator with 2×2 and 3×3 pre-strain for the deformation stability, response speed and frequency of voltage that the DE actuator can endure.

Keywords: electroactive polymer; dielectric elastomer; actuator; displacement response

电致动聚合物(EAP)是一类新型的智能材料,在电激励下产生的应变较大,具有较高的机电转换效率,由于具有质量轻、价格低、运动灵活、易于成形和不易疲劳损坏等优点,因此自20世纪90年代以来,吸引了不少国内外研究者的关注,并且从性能、模型及其在航空、航天、医用、机器人等多个应用领域中,开展了实验研究^[1-8]. 根据变形机理的不同,EAP材料主要分为离子型和电场型,电场型EAP变形速度快,产生的致动力较大,因此可以应用于微流体致动器. 目前在微流体系统中,使用的许多驱动器都存在驱动频率过低或冲程体积小等缺点,从而导致驱动流量太小,因此本文将一种电场型EAP-DE作为致动器材料进行研究,以改善驱动器的电致动性能,从而解决此类问题.

1 致动原理

介电弹性体(DE)属于电场型EAP,由芯层材料介电弹性体薄膜与涂覆在上、下表面上的柔性电极组成,如图1所示^[9].

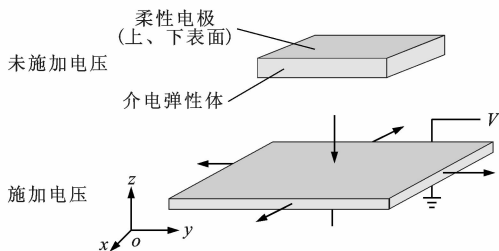


图1 介电弹性体致动器的致动原理

当施加电压后,在静电力的吸引下,芯层材料沿电场方向受压缩且厚度减小,同时在垂直于电场的方向上扩展延伸,从而产生变形. 图1中的箭头方向代表薄膜变形方向,薄膜所受的电致应力^[10]为

$$p_{el} = \epsilon_0 \epsilon_r (V/d)^2$$

式中: ϵ_0 和 ϵ_r 分别为真空介电常数和材料的相对介电常数; V 为驱动电压; d 为薄膜厚度. 其中, $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ A} \cdot \text{s}/(\text{V} \cdot \text{m})$, $\epsilon_r = 4.7$ ^[1]. 当薄膜四周有约束时,变形后的薄膜就很自然地无约束的方向凸起,如图2所示.

2 实验部分

实验所用主要材料为:芯层材料(美国3M公司的VHB4910)和柔性电极材料(加拿大MG mechenica公司生产的导电碳膏和深圳晶之源石墨材料有限公司生产的导电石墨粉).

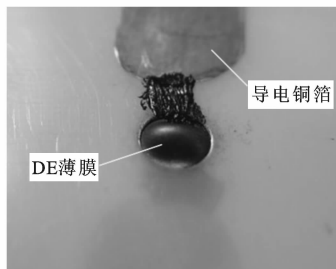


图2 试件的变形状态

实验用VHB4910材料的原始厚度为1 mm,通过双向预拉伸来控制薄膜厚度,同时改善薄膜的机械性能以提高它的机电转换效率. 将VHB4910薄膜双向预拉伸 2×2 、 3×3 、 4×4 倍后,制成圆形致动器的致动膜,相对应的膜厚分别为 $250 \mu\text{m}$ 、 $110 \mu\text{m}$ 和 $63 \mu\text{m}$,直径均为8 mm,并分别记作试件①、试件②和试件③. 驱动电压采用正弦波和三角波交流电压,以及对应的直流脉动电压和方波直流脉动电压.

实验项目有:①在一定的膜厚条件下,当电压波形相同时,电压幅值不变、频率变化时的位移响应,以及电压频率不变、幅值变化时的位移响应;②在一定的膜厚条件下,当电压幅值、频率相同,驱动电压波形不同时的位移响应.

3 实验结果及分析

3.1 交流电压下幅值变化时的位移响应

由于DE的变形方向不随电场方向变化,在交流电压正负半周期内均产生同方向的位移,所以薄膜位移的变化频率为电压频率的2倍. 图3为试件②在频率为0.5 Hz时的正弦交流电压下的位移响应曲线.

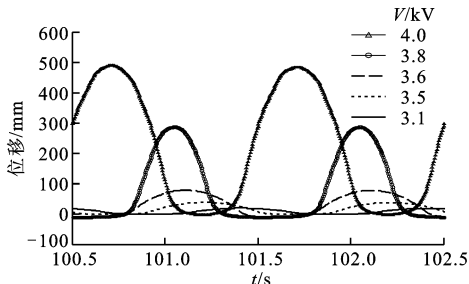


图3 不同电压幅值时的位移曲线

由图3可知,在稳定变形电压的范围内,当频率一定时,电压越高,位移越大. 当驱动电压取三角波时,位移变化趋势与正弦波电压对应的趋势一致. 当膜厚一定时,电压和电场强度 E 越高,膜厚方向所

受的电致应力就越大,即膜厚方向受压缩的程度越大,膜的变形量也越大。图 4 为试件②的电场强度-位移关系曲线,可以看出,当频率一定时,位移随电场强度的增高而增大且呈非线性关系。

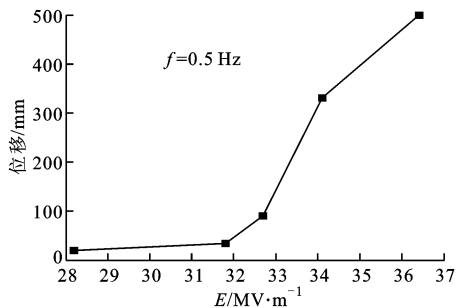


图 4 电场强度-位移关系曲线

3.2 交流电压下波形和频率变化时的位移响应

对于试件②,取电压幅值为 4 kV,波形为正弦波和三角波,频率分别取 0.5、1、2 和 5 Hz 进行实验。图 5 为在一定的幅值条件下,波形和频率变化时的两组位移响应曲线。

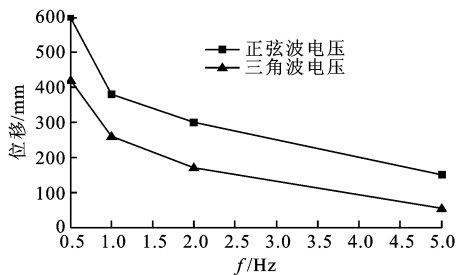


图 5 试件②在不同波形电压下的频率-位移曲线

由图 5 可以看出,正弦波电压的驱动位移比相同条件下的三角波电压的驱动位移大,而且随着频率的增大,三角波电压的驱动位移递减较快,当 $f = 0.5$ Hz 时,正弦波电压的驱动位移是三角波电压驱动位移的 1.4 倍,当 $f = 5$ Hz 时,正弦波电压的驱动位移是三角波电压驱动位移的 3.1 倍,位移随频率的增大而减小,且呈非线性关系。对于其他预拉伸状态的试件,其变化趋势与之相同。由于 VHB4910 属于高黏弹性材料,黏弹性材料的应变与应力之间存在滞后现象,而滞后现象与作用力的变化频率有关。当外力频率较小时,高分子的链段运动完全能跟上外力变化,因此滞后现象不明显。当外力频率较大时,链段可以运动又不能同步跟上时,滞后现象较明显,因此在连续的交变外力作用下,滞后现象的积累将导致变形量的减小。同时,材料的杨氏模量在一定范围内随着频率的增大而增大^[11],即频率

越大时,材料的杨氏模量越大,当材料所受的外力一定时,其变形则相对较困难,因而位移就越小。

当电压幅值和频率一定时,在同一周期内,三角波电压比正弦波电压具有的电能少,因此在相同周期内转换的机械能也少,从而导致三角波电压下 DE 薄膜的位移比正弦波电压下的小。

3.3 直流脉动电压下的位移响应

图 6 为试件②的实验曲线,其驱动电压为正弦直流脉动电压,频率为 1 Hz,位移随电压的增高而增大,与交流驱动电压的情形相似。

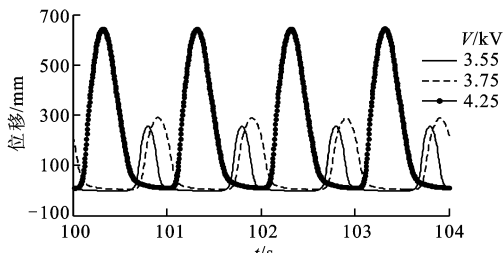


图 6 一定频率下电压幅值变化时的位移曲线

3.4 直流脉动电压下频率变化时的位移响应

对于试件②,驱动电压为正弦直流脉动电压,电压幅值取 3.75 kV 时,不同频率下的位移响应曲线如图 7 所示。当电压一定时,频率越大,位移越小,其变化趋势与交流电压时的变化趋势一致。从整体的位移响应过程来看,当频率增大时,直流脉动电压比交流电压下的变形过程明显稳定。这是因为 DE 薄膜相当于充满介质的平板电容,当施加交流电场时,电介质中的固有偶极进行往复多次取向极化,需克服分子间的作用力而消耗部分电能,形成介电损耗,而这部分电能又转换为热能加强了热击穿的影响,导致了驱动过程的不稳定性。

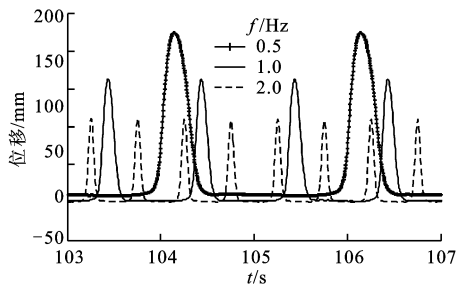


图 7 频率变化时的位移曲线

3.5 直流脉动电压下波形变化时的位移响应

图 8 为试件③在电压幅值均为 3.375 kV 时,所对应的频率-位移曲线。由图可以看出,当电压幅值和频率一定时,3 种不同波形电压下的驱动位移各不相同,其中方波直流脉动电压的驱动位移最大,正

弦波次之,三角波最小.随着频率的增大,三角直流脉动电压下的驱动位移递减速度最快,方波直流脉动电压下的位移递减速度最慢.因此,方波直流脉动电压的驱动效果最好.

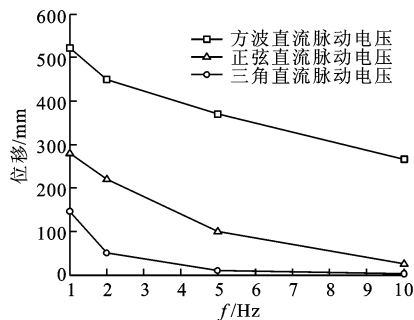


图8 试件③在不同波形电压下的频率-位移曲线

4 结 论

(1)在产生稳定变形的驱动电压范围内,DE薄膜的变形量随着电压幅值的增高而增大,随着电压频率的增大而减小,并且均呈非线性关系.

(2)在直流脉动电压驱动下,方波直流脉动电压的驱动位移最大,正弦直流脉动电压次之,三角直流脉动电压的最小.随着频率的增大,三角直流脉动电压的驱动位移递减速度最快,方波直流脉动电压的驱动位移递减速度最慢,直流脉动电压的驱动效果明显优于交流电压,不仅稳定变形时间较长,驱动频率较高,而且变形过程稳定.

(3)对不同预拉伸状态下的DE薄膜,预拉伸倍数越大,所需的驱动电场强度就越高,对频率的响应越稳定.

(4)DE薄膜的可恢复的形变次数受驱动电压的类型、幅值、频率以及DE薄膜的预拉伸倍数、柔性电极等因素的影响,DE薄膜的形变次数在直流脉动电压下比交流电压下多,并且电压幅值和频率越低,形变次数就越多.当材料预拉伸较大时,形变次数也较多,柔性电极涂抹得越均匀,DE薄膜的形变次数就越多.

参考文献:

- [1] KOFOD G, SOMMER-LARSEN P, KORNBLUH R, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers [J]. *Journal of Intelligent Material Systems and Structures*, 2003, 14(12): 787-793.
- [2] WISSLER M, MAZZA E. Modeling of a pre-strained circular actuator made of dielectric elastomers [J]. *Sensors and Actuators, A: Physical*, 2005, 120(1): 184.

- [3] 韩福峰,王彦,刘立宏,等.基于驱动器的并联式管道机器人机构设计[J]. *机械科学与技术*, 2006, 26(2): 214-232.
- HAN Fufeng, WANG Yan, LIU Lihong, et al. A parallel pipeline robot mechanism designed by using EAP actuators [J]. *Mechanical Science and Technology*, 2006, 26(2): 214-232.
- [4] HEYDT R, KORNBLUH R, ECKERLE J, et al. Sound radiation properties of dielectric elastomer electroactive polymer loudspeakers [C]// *Smart Structures and Materials 2006: Electroactive Polymer Actuators and Devices*. San Diego, California, USA: International Society for Optical Engineering, 2006: 6168M1-6168M8.
- [5] CHOI H R, RYEW S M, JUNG K M, et al. Soft actuator for robotic applications based on dielectric elastomer: quasi-static analysis [C]// *IEEE Robotics and Automation*. Washington, DC, USA: IEEE, 2002: 3212-3217.
- [6] 陈娟,赵翠清,祁新梅,等.电场活化聚合物的实验研究[J]. *高分子材料科学与工程*, 2007, 23(4): 250-253.
- CHEN Juan, ZHAO Cuiqing, QI Xinmei, et al. Experimental research of electroactive polymer [J]. *Polymer Materials Science and Engineering*, 2007, 23(4): 250-253.
- [7] 李刚,冯敏亮,吕新生.基于电场活化聚合物的一维伸缩致动器设计[J]. *机械工程师*, 2007(8): 100-102.
- LI Gang, FENG Minliang, LU Xinsheng. Design of unilateral push-pull actuator of dielectric elastomers [J]. *Mechanical Engineer*, 2007(8): 100-102.
- [8] FOX J W, GOULBOURNE N C. Goulbourne, on the dynamic electromechanical loading of dielectric elastomer membranes [J]. *Journal of the Mechanics and Physics of Solids*, 2008(56): 2669-2686.
- [9] PELLYNE R E, KORNBLUH R D, JOSEPH J P, et al. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation [J]. *Sensors and Actuators A*, 1998(64): 77-85.
- [10] WISSLER M, MAZZA E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators [J]. *Smart Materials Structures*, 2005 (14): 1396-1402.
- [11] MA Wenhui, CROSS L E. An experimental investigation of electromechanical response in a dielectric acrylic elastomer [J]. *Applied Physics A-Materials Science & Processing*, 2004 (78): 1201-1204.