

DOI: 10.7652/xjtuxb201902002

介电弹性体驱动器动态电压下的 变形特征及击穿行为研究

刘学婧¹, 贾书海¹, 李博^{1,2}, 陈花玲^{1,2,3}

(1. 西安交通大学机械工程学院, 710049, 西安; 2. 西安交通大学陕西省智能机器人重点实验室, 710049, 西安; 3. 西安交通大学机械强度与振动国家重点实验室, 710049, 西安)

摘要: 针对介电弹性体(DE)驱动器驱动性能难以预测的问题,以 VHB4910 薄膜为待测 DE 材料,圆形 DE 驱动器作为研究对象,针对低频条件下(0.1~10 Hz)DE 驱动器的动态变形与击穿行为展开了实验研究。搭建了力电耦合实验测试平台,通过实验归纳了驱动电压参数对 DE 驱动器动态变形和击穿的影响规律。实验结果表明:DE 驱动器的动态变形平衡位置受到电压幅值的影响,动态变形的振幅则受到电压频率和幅值的共同制约。动态击穿电压的数值分散性强,难以得到明显的规律特征,因此不能准确对动态击穿行为进行表征,而通过实验发现 DE 驱动器能承受的电压循环周期数会受到多种驱动电压参数的显著影响,故提出采用电压循环周期数对动态击穿行为进行分析。借鉴机械循环载荷下的经典疲劳曲线方程,提出利用名义静电应力幅值代替机械应力幅值、对 DE 驱动器在动态电压下的电致疲劳寿命曲线进行拟合的方法,以期对动态电压作用下 DE 驱动器的寿命预测提供一种新思路。

关键词: 介电弹性体驱动器;动态变形;击穿;疲劳寿命

中图分类号: TH145.4;TP24 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2019)02-0009-07

A Research on Deformation and Breakdown Behavior of Dielectric Elastomer Actuators Under Dynamic Electrical Loads

LIU Xuejing¹, JIA Shuhai¹, LI Bo^{1,2}, CHEN Hualing^{1,2,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

2. Shaanxi Key Laboratory of Intelligent Robot, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

3. State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: Dielectric elastomer based actuators (DEAs) is regularly subjected to dynamic electric loads to produce reciprocating deformations and its driving performance such as deformation response and breakdown behavior is affected by various driving voltage parameters. The relevant changing laws are unrevealed, and it is difficult to predict its critical breakdown condition in applications. The dynamic deformation and breakdown behaviors of circular DEAs based on VHB4910 film are experimentally investigated, and the changing rules of driving voltage parameters on the dynamic deformation and breakdown behavior of DEA are summarized. The experimental results show that the dynamic deformation equilibrium positions of the DEAs are affected by the voltage amplitude and the deformation amplitudes are influenced by both the frequency and amplitude of the voltage. Moreover the dynamic breakdown voltages of DEAs

收稿日期: 2018-06-23。 作者简介: 刘学婧(1989—),女,博士生;李博(通信作者),男,副教授,硕士生导师。 基金项目: 国家自然科学基金重大研究计划资助项目(91748124)。

网络出版时间: 2018-12-17 网络出版地址: <http://kns.cnki.net/kcms/detail/61.1069.T.20181217.0841.002.html>

appear to be scattered with no obvious regularity, while the dynamic voltage cycle index of DEAs is significantly affected by driving voltage parameters. Finally, the classical fatigue curve equation under the mechanical cycle loads is referred to propose a formula that is used to characterize the electric fatigue curve of DEA by replacing the mechanical stress amplitude with the nominal electrostatic stress. This study provides a new way for predicting the dynamic voltage cycle index of DEA under dynamic voltages.

Keywords: dielectric elastomer actuator; dynamic deformation; breakdown; electric induced fatigue life

近年来,新型的智能材料层出不穷,为科技发展带来了巨大的推动作用,其中,电活性聚合物(EAP)材料^[1-3]由于能够在电驱动下产生较大变形,引起了学术界的高度重视。根据EAP材料的变形机理,可将其分成不同种类,其中,介电弹性体(DE)材料由于具有变形大、响应快、机电转换效率高等突出优势,成为国内外研究的热门方向之一。

DE材料是一种柔性介电聚合物薄膜,可在电压激励下产生高达100%^[4]的大应变,而在电压与机械力的协同作用下其应变甚至可以达到200%^[5];这种变形尺度大大超过了一般压电材料和形状记忆材料的变形尺度,因此在一些需要大变形的场合具有巨大的应用潜力。DE材料的响应速度在毫秒级,最大应力约为3.2 MPa,机电转换效率可达到80%^[6],其性能与人体生物肌肉组织非常相似,因此DE材料也被称为人工肌肉材料。鉴于其优异的电致变形特性,大量研究学者试图将其应用于各种新型柔性驱动器和柔性结构中^[7-11]。

虽然DE材料性能优异,具有巨大的应用前景,但是目前成熟且商用的基于DE材料的产品却不常见,大部分研究成果仍处于实验室阶段,尚未能进入工业界。究其原因是目前DE材料在工作中的可靠性不高,在驱动中容易发生击穿失效行为。固体电介质在足够强的静态电场作用下会丧失绝缘性能成为导体,这种现象称为介电击穿。之前介电击穿的研究对象多为弹性模量较大的刚性电介质,因此对其变形可以忽略不计,并将击穿场强视为材料自身固定的物理属性。DE材料由于其模量很低,在电场作用下会产生较大的扩张应变,其驱动和击穿过程中存在显著的机电耦合行为,因此之前的研究结论具有一定的局限性,难以解决DE材料应用中存在的新的失效问题。目前关于DE材料击穿行为的研究主要采用阶梯型升高的准静态电压来研究击穿发生的临界电压或场强。预拉伸倍数、温度等因素会显著影响DE材料的准静态击穿行为^[12-13]。

在应用中,DE驱动器常用于承受动态循环载荷以产生往复变形,常见应用案例包括微泵^[8]、振动结构^[14]等,而动态载荷下也存在击穿失效问题。DE材料是一种高弹性聚合物,在动态载荷下经历往复变形必然会引起DE材料的疲劳和使用寿命问题。但是,截止目前,仅有文献^[15]研究了DE材料在机械循环载荷下的疲劳寿命,发现其机械疲劳寿命可达 10^7 次,在基于DE材料的泵膜研究中发现,在动态电压下其寿命由于击穿行为的发生而远低于此值^[8]。可见,DE材料的疲劳寿命和电载荷水平有关。在动态电压下,DE驱动器变形过程更加复杂,动态载荷下击穿行为的发生也变得难以预测。Li等建立了正弦电压下DE材料发生纯剪切变形响应的理论模型,通过考虑材料的黏弹性耗散对动态变形的影响,获得了不同电压频率和幅值下DE材料动态变形的理论计算结果^[16]。不难看出,DE材料的动态变形受到驱动电压参数的影响,而目前对于等双轴拉伸条件下DE驱动器在动态电压驱动下的变形,尤其是动态击穿行为及规律的系统的实验研究尚少有涉及,导致其性能难以得到准确的预测及把握,对后续的应用设计也缺乏指导方案。虽然在加载足够大的准静态电压和动态电压作用下,DE材料在击穿时都表现为绝缘能力的丧失,并且伴随电火花、材料撕裂等现象,但是与准静态击穿的过程不同,DE材料在动态电压作用下会产生往复变形,因此对于动态击穿的研究重点不仅局限于击穿发生时的电压或场强的数值,而更应该考虑其所能承载的电压循环周期数。需要明确电压频率、峰值等驱动参数对于电压循环周期数的影响规律。

为了解决上述问题,本文以基于DE材料的圆形驱动器为研究对象,针对其在不同动态电压下的动态变形特征和动态击穿行为展开实验研究,归纳动态电压作用下DE驱动器的变形和击穿行为规律,阐明其中的物理机制,并对DE驱动器的电致疲劳行为进行了总结。

1 驱动器制备及实验平台构成

1.1 圆形 DE 驱动器的制备

本文所研究的 DE 驱动器是由 DE 材料即 3M 公司生产的 VHB4910 聚丙烯酸酯薄膜和上下两侧的柔性碳膏电极共同构成的“三明治”结构。对柔性电极施加激励电压后,在 DE 材料的上下两个电活性区域聚集的正负电荷相互吸引而产生静电力,迫使 DE 材料产生厚度收缩而面积扩展的变形,原理如图 1 所示。

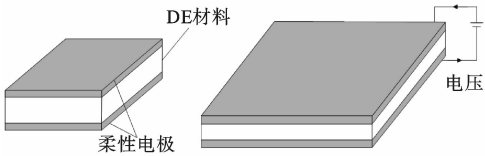


图 1 DE 材料在电压激励下的变形原理图

基于 DE 材料的变形原理,圆形 DE 驱动器的制备过程如图 2 所示。

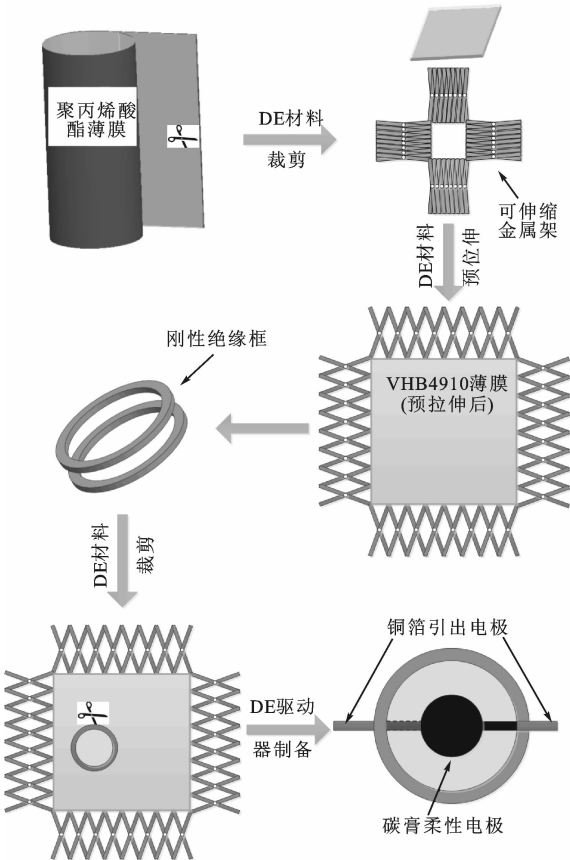


图 2 圆形 DE 驱动器的制备过程

首先,将 DE 材料按照预设的倍数进行等双轴预拉伸,固定在圆环形刚性绝缘框上;其次,在其内部中心的圆形区域均匀涂抹柔性碳膏电极作为驱动器的电活性区域;然后,将导电性良好的铜箔裁剪成

长条并贴在 DE 材料的两侧,铜箔的一端贴在刚性框架上,另一端延伸出来与高压激励模块进行连接;最后,将驱动器的电活性区域用碳膏与铜箔相连,使得驱动电压能直接加载到电活性区域的上下表面之间。至此,制备出具有特定预拉伸倍数的圆形 DE 驱动器。

根据文献[17]的结论可知,当圆形 DE 驱动器的电活性区域的半径足够小时,其电活性区域将不经历面外变形直接发生击穿破坏,可以测得真实有效的面内变形并计算击穿瞬间的真实场强。因此,在制备 DE 驱动器时,将驱动器的总直径定为 $D=70\text{ mm}$,电活性区域的直径定为 $d=12\text{ mm}$ 。

1.2 力电耦合实验平台的组成

为了研究圆形 DE 驱动器在动态电载荷下的变形与击穿行为规律,本文搭建了力电耦合实验平台。

如图 3 所示,实验平台由高压激励模块、数据采集模块和环境因素控制模块 3 个部分构成。

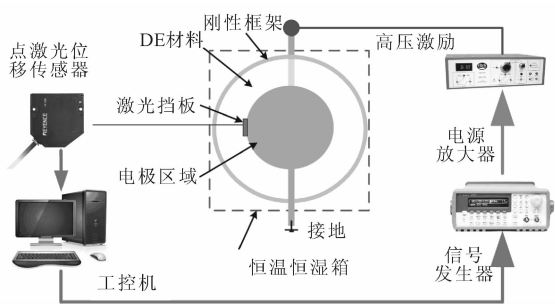


图 3 圆形 DE 驱动器的力电耦合实验平台

高压激励模块用来对圆形 DE 驱动器进行电压驱动使其产生变形直至最终的击穿。DE 材料的驱动电压在千伏级别,所以驱动电压的产生需要函数信号发生器(Rigol DG4000)及高压源放大器(Trek 20/20C-H-CE)的配合。通过函数发生器产生所需的动态低压信号并输入到高压电源放大器,放大 2 000 倍后,将得到的动态高压信号施加到圆形 DE 驱动器电活性区域的上下表面之间。

数据采集模块的主要作用是对加载到 DE 驱动器上的实际驱动电压进行监测,同时采集驱动器电活性区域的实时面内扩张位移,从而得到 DE 驱动器的动态变形曲线。该模块由 NI 数采卡(DAQ2214)、激光位移传感器(Keyence LK-G150)和工控机组成。

环境因素控制模块用于调整测试环境的温湿度,由一台 Yoma 公司生产的 MHL-02S/12 恒温恒湿箱构成。在该箱体的左侧壁上有圆形孔洞,用于箱体内 DE 驱动器与外部高压激励的连接;箱体正面的双层观察窗具有隔热隔湿作用,经过校准后,利

用激光位移传感器透过双层观察窗对箱体内部 DE 驱动器变形进行测量;右上角的显示屏用来输入实验所需的环境温度和湿度,并显示箱体内部的实时环境温湿度条件。

2 DE 驱动器的动态变形实验

由于 DE 材料属于电场驱动型材料^[18],不存在极化方向的敏感性,其电致变形只与驱动电压的幅值有关,与电压的方向无关,因此,为了使 DE 驱动器的变形响应频率与激励信号频率保持一致,在本文实验中对 DE 驱动器加载带直流偏置的正弦驱动电压,保证驱动电压的正负性不发生改变。

目前,已有研究学者通过理论计算了不同环境温度下,基于 DE 材料的换能器(DEG)所能收集的最大能量密度与转换效率,表明温度对于 DEG 的性能具有较为明显的影响^[19],低温条件下 DEG 具有更高的工作效率。由于 DE 材料的力电性能参数对于环境温度比较敏感^[13],而本文的研究将重点放在驱动电压参数对 DE 驱动器动态变形特征和击穿行为的影响,所以将排除环境因素的影响,只针对预拉伸倍数为 4×4 的 DE 驱动器在室温恒湿条件下进行测试。

2.1 实验测试方法

将恒温恒湿箱的温度设置为室温 $20\text{ }^{\circ}\text{C}$,湿度设置为 50% ,以排除外界环境因素对于实验结果的干扰。利用信号发生器设置低压控制信号的参数,通过高压电源放大器放大后施加到待测 DE 驱动器上;电活性区域在动态电压驱动下发生往复变形,驱动时间设为 200 s ;在此期间,利用激光位移传感器测量电活性区域边缘的位移并通过数采卡进行采集;通过工控机中的 LabView 软件提取动态变形数据,其采样频率设置为 500 Hz 。

2.2 动态电压参数的设定

如果加载的动态电压具有波峰值 Φ_{peak} 和波谷值 Φ_{val} ,则其交流分量幅值为 $\Phi_{\text{AC}}=(\Phi_{\text{peak}}-\Phi_{\text{val}})/2$,直流分量幅值为 $\Phi_{\text{DC}}=(\Phi_{\text{peak}}+\Phi_{\text{val}})/2$;将动态电压的交直比定义为 $\beta=\Phi_{\text{AC}}/\Phi_{\text{DC}}$ 。

采用最常见的正弦电压对 DE 驱动器的动态变形行为进行实验,令 $\beta=1$,即将波谷值设为 0 V ,改变驱动电压的频率和峰值,归纳 DE 驱动器动态变形的影响因素和行为规律。动态变形实验中驱动电压参数的设定见表 1。

2.3 动态变形实验结果及分析

图 4 给出了驱动频率为 0.1 Hz 时 DE 驱动器的

表 1 动态变形实验电压参数设定

电压参数	数值选取
电压频率/Hz	0.1,0.25,0.5,1,2,5,10
电压峰值/kV	4,6,8

驱动电压和变形响应曲线。从图 4 中可以看出:①动态变形曲线明显滞后于驱动电压曲线,这是由 DE 材料自身的黏弹特性造成的,DE 驱动器的变形来自于 DE 材料内部分子链的延展和滑移运动,由于内摩擦力的影响导致分子链的运动跟不上外界应力的变化,因此变形曲线表现出一定的滞后性;②与驱动电压曲线不同,动态变形曲线不是标准的正弦曲线,而是峰谷非对称的曲线,这种变形特征是由于 DE 材料的应变刚化效应造成的。综合 DE 材料的应变刚化效应和自身黏弹性的影响,驱动器的动态变形曲线成为了具有一定滞后性的峰谷非对称曲线。

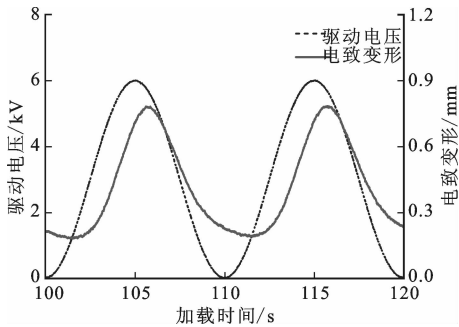
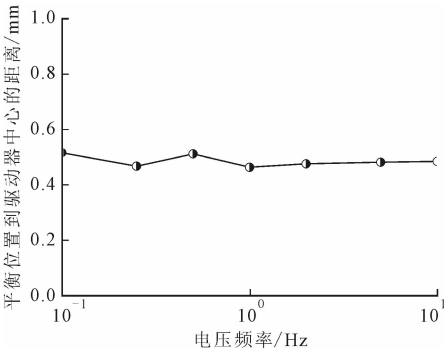


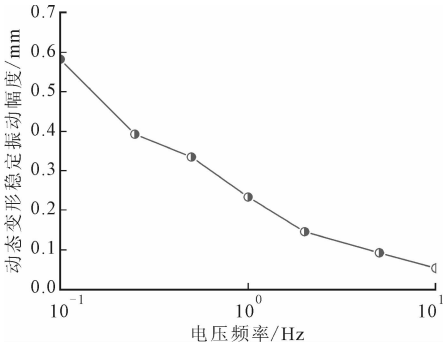
图 4 $f=0.1\text{ Hz}$ 时正弦电压驱动下 DE 驱动器动态变形随时间的变化

图 5a 给出了在不同频率的正弦电压驱动下,DE 驱动器的动态变形的平衡位置,可见,其平衡位置几乎不随频率的变化发生改变,图 5b 给出了驱动器动态变形的幅度与电压频率的关系,由图 5 可知,随着频率的增大,变形的幅度呈现出明显的减小趋势。

针对变形平衡位置几乎不随频率改变的现象,其机理可通过能量转换机制进行解释。DE 材料具有将输入电能转化成输出变形能的物理机制。频率不同的正弦电压在相同的时间内产生的电能与加载相应动态电压的等效直流电压所产生的电能相同,即上述电压对 DE 驱动器做功相同。因此,动态变形的平衡位置与加载等效直流电压时的电致变形基本一致,这解释了动态变形的平衡位置几乎不受电压频率影响的原因。而振幅随频率升高而降低的现象是由于 DE 材料自身的黏弹性造成的。由于驱动器动态变形具有一定的滞后特征,其变形在没有达



(a) 频率对平衡位置的影响



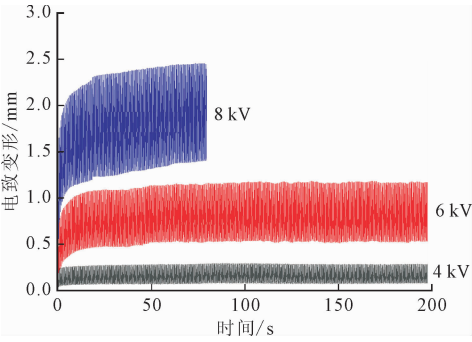
(b) 频率对变形幅度的影响

图 5 正弦电压频率对 DE 驱动器动态变形的影响

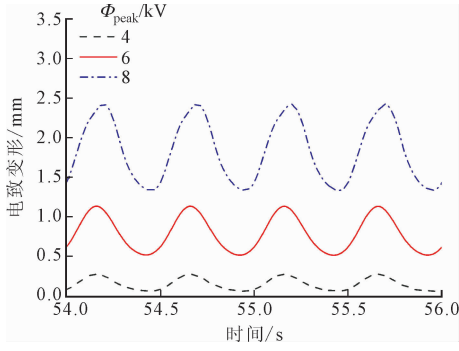
到最大值时驱动电压就已从峰值回落,在变形没有充分回落时驱动电压就开始从波谷爬升,因此驱动电压的频率越高,DE 驱动器的动态变形的振幅就越低。

接下来的实验将探究动态电压的峰值对驱动器动态变形曲线的影响。保持驱动电压的频率固定,仅改变电压峰值,实验结果如图 6 所示。

图 6a 给出了圆形 DE 驱动器在频率为 2 Hz 的正弦电压驱动下的动态变形曲线,可见随着电压峰值的升高,电活性区域动态变形的平衡位置呈现出明显的升高趋势,而且电压峰值的提高会降低动态变形稳定性,导致平衡位置飘升现象更加明显;此外,当电压峰值为 8 kV 时,驱动器发生动态击穿现



(a) 电压峰值的影响



(b) 不同电压峰值下的局部动态变形曲线

图 6 电压峰值对 DE 驱动器动态变形的影响

象。图 6b 给出了 DE 驱动器在 3 种电压峰值的正弦电压驱动下的局部动态变形曲线,从中可见随着驱动电压峰值的增长,驱动器动态变形的平衡位置和振幅都有所提高。这是因为随着电压峰值的提高,DE 驱动器所承受的电压信号的波峰值增大,因此导致了振动幅度的增加;同时电压峰值的提高也意味着电压信号包含的能量随之增加,从而引起了平衡位置的升高。

3 DE 驱动器的动态击穿研究

实验中 DE 驱动器在动态电压下会发生击穿行为,但是对动态击穿行为的特征和预测尚存在实验研究不足的现状,因此本文将针对室温条件下 DE 驱动器的动态击穿行为开展实验研究,明确动态击穿规律,并给出相应的分析。

3.1 实验方法及参数设定

本节的测试方法与上节中基本相同,采用控制变量法对 DE 驱动器的动态击穿行为规律进行实验研究。驱动电压的波形、频率、交直比的设定与上节相同。

在实验中通过工控机中的 LabView 软件记录电击穿瞬间的临界电压和电压循环周期数,归纳 DE 驱动器在动态电压下发生击穿的行为规律。

3.2 动态击穿实验结果及分析

在上一节的动态变形研究中发现,当正弦电压峰值在 8 kV 时,DE 驱动器会在 200 s 内发生击穿,因此本节首先将正弦电压的峰值设为 8 kV,研究电压频率对动态击穿行为的影响规律。

表 2 中记录了不同正弦电压频率下 DE 驱动器发生击穿瞬间电压的测试结果。可以看出在不同的电压频率下,DE 驱动器动态击穿电压测试结果分散性强,几乎没有规律可循。此外,DE 驱动器在动态电载荷的作用下,其击穿行为发生时驱动电压的

循环周期数也可能受到频率的影响,对应的实验测试结果由图 7 给出。

表 2 正弦电压驱动下不同正弦电压频率对击穿瞬间电压的影响

样品 序号	击穿瞬间电压/kV						
	0.1	0.25	0.5	1	2	5	10
	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz	Hz
1	4.77	7.86	5.95	6.24	7.62	3.53	6.96
2	7.71	7.26	3.64	7.53	6.70	7.62	3.85
3	2.54	6.04	6.94	5.14	3.78	5.44	4.83
4	7.74	5.84	8.00	3.54	6.80	6.44	7.88
5	5.93	7.24	4.96	7.24	6.64	4.56	6.89
6	3.67	4.58	2.97	5.81	2.18	7.01	5.86

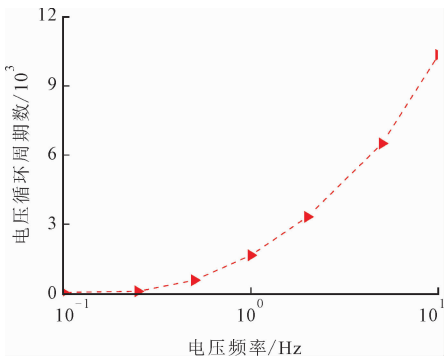


图 7 不同电压频率下驱动器发生击穿的循环周期数

由实验结果可知,动态电压作用下驱动器的击穿电压可能是整个周期波形中的任意一点,存在较强的分散性;而发生动态击穿时的电压循环周期数随着频率的改变却有较为明确的变化规律。DE 驱动器在动态载荷下产生往复的变形,在此过程中逐渐积累热量造成材料内部温升,形成电热击穿。显然,这种电热击穿的特征与其循环变形的周期数有直接关系。在下面的研究中采用循环周期数作为表征其动态击穿的关键指标。

接下来研究电压峰值与循环周期数的关系。将正弦电压频率设定为 $f=2\text{ Hz}$,仅改变正弦电压的峰值,探究正弦电压峰值对 DE 驱动器发生动态击穿时的循环周期数的影响规律。将测试的电压峰值分别选取为 9.0、8.5、8.0、7.5、7.0、6.5 和 6.0 kV。

图 8 给出了正弦电压驱动下电压峰值与 DE 驱动器发生动态击穿时的电压循环周期数之间的变化关系。由图 8 可以看出,正弦电压峰值的改变会对 DE 驱动器能承受的电压循环周期数产生明显的影响:随着电压峰值的降低,电压循环周期数呈现先平缓后剧烈的非线性增长趋势。

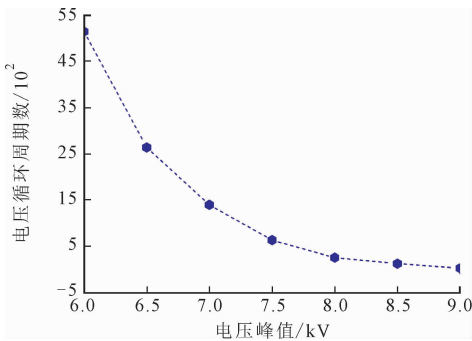


图 8 不同电压峰值下驱动器发生击穿的循环周期数

可见,动态电压驱动参数的改变不会对 DE 驱动器动态击穿瞬间电压产生明显的影响,但是对 DE 驱动器所能承受的动态电压循环周期数的影响较为明显。

上述电压峰值对 DE 驱动器能承受的循环周期数的影响规律,与材料机械疲劳破坏行为的变化趋势比较类似,因此在针对 DE 驱动器动态击穿行为的研究中,将动态电压峰值所对应的名义静电应力 σ_E 等效为机械疲劳测试中的应力幅值 S ,研究名义静电应力 σ_E 对 DE 驱动器在动态电压驱动下循环周期数的影响规律。 σ_E 定义为

$$\sigma_E = \frac{1}{2}\epsilon E_{\text{peak}}^2 = \frac{1}{2}\epsilon \left(\frac{\Phi_{\text{peak}}}{H}\right)^2 \lambda_p^4 \tag{1}$$

式中: ϵ 为 DE 材料的介电常数; E_{peak} 为动态电场的峰值; H 为 DE 材料的初始厚度; λ_p 为 DE 材料的预拉伸倍数。

参照动态机械载荷作用下,材料循环次数预测中常采用的经典疲劳曲线方程 $S^m N = C$,其中 S 为应力幅值, N 为循环次数, m 、 C 为材料参数;用 σ_E 代替 S ,对 DE 驱动器在正弦电压下的循环次数 N 与名义静电应力 σ_E 之间的关系进行拟合。表达式如下

$$\sigma_E^m N = C \tag{2}$$

将实验数据带入上述公式,并用 Origin 软件进行数据拟合,得到结果 $m=7.755$, $C=0.03$ 。图 9 给出了实验测试结果与 DE 驱动器动态击穿寿命预测的 $S-N$ 拟合曲线,上述结果表明本文拟合的电疲劳寿命曲线可以有效预测 DE 驱动器在动态电压驱动下击穿行为发生时的循环周期数。

本文的研究明确了电压频率、峰值等参数对 DE 驱动器动态变形响应及电疲劳寿命的影响规律。通过本文的电疲劳寿命曲线方程,可以较为准确地预测实际应用中的 DE 驱动器的电疲劳寿命,以避免击穿行为过早发生而导致的系统崩溃。

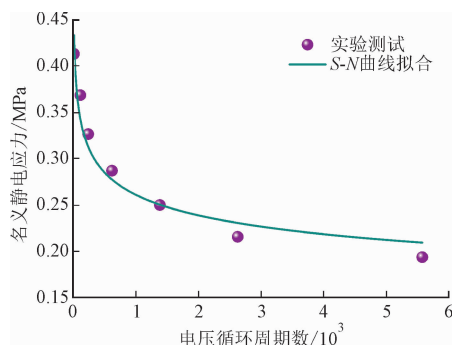


图9 不同电压峰值下名义静电应力对循环周期数的影响

4 结 论

针对 DE 驱动器在动态电压下的变形响应和击穿行为,本文通过实验方法研究了不同驱动电压参数对上述两种行为的影响规律,得到如下结论。

(1)电压频率对动态变形的平衡位置几乎没有影响,但是电压频率的升高会导致振幅的下降;提高电压幅值会增大变形振幅和变形平衡位置与初始位置之间的距离。上述现象可以用动态电压蕴含能量的大小不同给出解释。

(2)电压参数的改变对击穿瞬间电压的影响不具备明显的规律性,而对 DE 驱动器的循环周期数有显著影响:电压频率的升高和峰值的降低会延长 DE 驱动器的循环周期数。

(3)利用名义静电应力对 DE 材料电致疲劳寿命进行表征,可对其在动态电载荷下的电疲劳击穿进行准确预测。

参考文献:

- [1] BAUGHMAN R H. Muscles made from metal [J]. Science, 2003, 300(5617): 268-269.
- [2] CARPI F, BAUER S, DE ROSSI D. Stretching dielectric elastomer performance [J]. Science, 2010, 330(6012): 1759-1761.
- [3] MA Mingming, GUO Liang, ANDERSON D G, et al. Bio-inspired polymer composite actuator and generator driven by water gradients [J]. Science, 2013, 339(6116): 186-189.
- [4] 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.
- [5] AN Le, WANG Fangfang, CHENG Sibao, et al. Experimental investigation of the electromechanical phase transition in a dielectric elastomer tube [J]. Smart Ma-

terials and Structures, 2015, 24(3): 035006.

- [6] BIGUÉJ L, PLANTE J S. Experimental study of dielectric elastomer actuator energy conversion efficiency [J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 169-177.
- [7] 盛俊杰, 陈花玲, 强俊花, 等. 介电弹性材料的机电耦合性能研究 [J]. 应用力学学报, 2012, 29(1): 38-42.
- SHENG Junjie, CHEN Hualing, QIANG Junhua, et al. Study of the electromechanical coupling behaviour in dielectric elastomers [J]. Chinese Journal of Applied Mechanics, 2012, 29(1): 38-42.
- [8] 胡树林, 陈花玲, 李博, 等. 介电弹性材料驱动的大流量无阀微泵研究 [J]. 功能材料与器件学报, 2010, 16(6): 555-559.
- HU Shulin, CHEN Hualing, LI Bo, et al. Study of the valveless micropump driven by dielectric elastomer [J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2010, 16(6): 555-559.
- [9] 郑金文. DEAP 柔性仿生驱动器的建模与控制研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2016: 52-86.
- [10] 李铁风, 李国瑞, 梁艺鸣, 等. 软体机器人结构机理与驱动材料研究综述 [J]. 力学学报, 2016, 48(4): 756-766.
- LI Tiefeng, LI Guorui, LIANG Yiming, et al. Review of materials and structures in soft robotics [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2016, 48(4): 756-766.
- [11] 冷劲松, 孙健, 刘彦菊. 智能材料和结构在变体飞行器上的应用现状与前景展望 [J]. 航空学报, 2014, 35(1): 29-45.
- LENG Jinsong, SUN Jian, LIU Yanju. Application status and future prospect of smart materials and structures in morphing aircraft [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2014, 35(1): 29-45.
- [12] HUANG Jiangshui, SHIAN S, DIEBOLD R M, et al. The thickness and stretch dependence of the electrical breakdown strength of an acrylic dielectric elastomer [J]. Applied Physics Letters, 2012, 101(12): 122905.
- [13] LIU Lei, CHEN Hualing, LI Bo, et al. Thermal and strain-stiffening effects on the electromechanical breakdown strength of dielectric elastomers [J]. Applied Physics Letters, 2015, 107(6): 062906.
- [14] ZHU Jian, CAI Shengqiang, SUO Zhigang. Nonlinear oscillation of a dielectric elastomer balloon [J]. Polymer International, 2010, 59(3): 378-383.

(下转第 127 页)