http://pmse.scu.edu.cn

静动态电压加载下介电弹性体的电致形变性能

陆刚[1]，韩礼屹[1]，帅长庚[2]，杨雪[2]，马建国[2]，袁成人[2]，游峰[1]，江学良[1]，王亲亲[2]

（1. 武汉工程大学 材料科学与工程学院 等离子体化学与新材料湖北省重点实验室，湖北 武汉 430205；
2. 海军工程大学 动力工程学院，湖北 武汉 430033）

摘要：为揭示丙烯酸树脂介电弹性体在静动态电压下的电致形变规律及其频率依赖性，本文以丙烯酸树脂介电弹性体（VHB-4910）为研究对象，采用自建电致动试验平台系统测试了其在直流电压（1~6 kV）和交流电压（0.1~10 Hz）加载下的电致形变性能。结果表明，该材料在 100 Hz~4 kHz 频率范围内介电常数（约 4.7）和介电损耗（约 0.05）趋于稳定；直流电压加载下，稳态形变率随电压升高而显著增大（1 kV 时约 0.15%，6 kV 时可达 50%），但呈现显著的时间依赖性；5 kV 交流电压加载下，随频率由 0.1 Hz 升至 10 Hz，单周期有效致动幅度由约 12%降至约 1.5%，降幅达 87%。上述现象源于材料链段的粘弹性和分子弛豫效应。研究表明，追求大形变量的应用宜采用低频加载，快速响应应用需从材料层面减弱粘弹效应。

关键词：介电弹性体；丙烯酸树脂；静动态电压；电致形变

作为一种典型的新型智能材料，介电弹性体（Dielectric elastomer，DE）以其能量密度高、电致形变量大、响应速度快、结构设计性佳、质轻柔性好等优势，在仿生致动器、柔性传感器、能量收集器等软体机器人、医疗设备器械及消费电子领域极具研究价值和工程应用前景[1-5]。

在众多的 DE 材料中，丙烯酸树脂、聚氨酯以及硅橡胶最具代表性，其中以美国 3M 公司的商业化的 VHB 系列丙烯酸树脂 DE 最为常见，也是国内外学者研究 DE 特征性质，拓展其器件装置应用最常采用的载体材料，尤其是在柔性致动器领域[6-9]，其致动示意如 Fig.1 所示。VHB-4910 作为该系列的代表产品，具有高介电常数(约 4.7)、大应变能力(可达 300%以上)和良好的机械稳定性等优异性能。其商业化程度高、性能稳定、研究基础广泛，是研究介电弹性体形变规律的理想载体材料。因此，本研究选择 VHB-4910 丙烯酸树脂介电弹性体作为研究对象，系统探究其在不同电压加载模式下的电致形变行为。

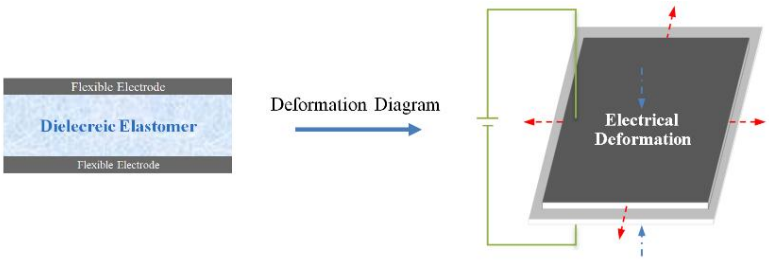


Fig. 1　Schematic diagram of DE deformation

Huang 等[10]在单轴预拉伸模式下对 VHB-4905-DE 进行了静态电压加载测试，发现 VHB-4905-DE

doi: 10.16865/j.cnki.1000-7555.2026.0146
收稿日期：2025-10-13
基金项目：国家自然科学基金资助项目（52171328）；船舶振动噪声重点实验室基金（6142204250306）；海洋关键材料全国重点实验室开放基金（2026K19）；武汉工程大学科学研究基金（23QD94）
通讯联系人：王亲亲，主要从事智能材料与器件研究，E-mail: d23382407@nue.edu.cn

的循环软化效应明显。Sahu 等[11]利用氧化石墨烯对 VHB-4910-DE 进行改性，研究了其介电性能及静态电压下面内致动效果，结果显示改性后 DE 致动效果得到增强。可见，现有文献主要聚焦于直流电压下 DE 的电致形变性能，而对交流电压下 DE 的形变规律研究尚不充分。在实际应用中，介电弹性体往往需要在交流电压下工作（如仿生机器人肌肉收缩、微泵周期性工作等），其形变行为与静态加载存在显著差异。因此，深入研究 DE 在静态和动态加载下的形变规律及频率依赖性，对于优化器件设计和拓展应用范围具有重要意义。

为此，本文以 VHB-4910-DE 为研究对象，利用自建致动试验平台对 DE 致动单元在静动态电压下的电致形变性能进行系统测试，对比分析直流电压和交流电压下的电致形变行为特征与差异，旨在全面了解该系列 DE 电致形变规律及频率相关性，为今后设计具有目标效果的 DE 致动器件提供技术参考。

1　实验部分

1.1　试剂与仪器

VHB-4910 型介电弹性体，美国 3M 公司；HP-800 型全氟聚醚导电润滑脂电极，美国道康宁公司。

径向拉伸装置，自制（采用 16 个圆周均布夹爪径向同步驱动，实现 DE 膜均匀径向拉伸，最大拉伸比 5 倍）；TH2836 型阻抗分析仪，中国常州市同惠电子有限公司；610E 型高压电源，美国优仪公司；VS-L160MX 型精密视觉传感器，日本基恩士公司；AFG1022 型波形信号发生器，美国泰克公司。

1.2　DE 致动单元的封装

首先使用自制的径向拉伸装置(见 Fig.2(a))，将直径为 4cm DE 膜拉伸至直径为 12cm(拉伸比λ=3，见 Fig.2(b))，预拉伸之后 DE 膜厚度为 120μm 左右。将预拉伸后的薄膜固定在内径 5cm 的亚克力圆环上(见 Fig.2(c))，在中间区域上下表面涂敷直径为 20mm 的圆形全氟聚醚高温导电润滑脂柔性电极(见 Fig.2(d))，并用镀银铜导线引出，得到封装后的 DE 致动单元[12]。

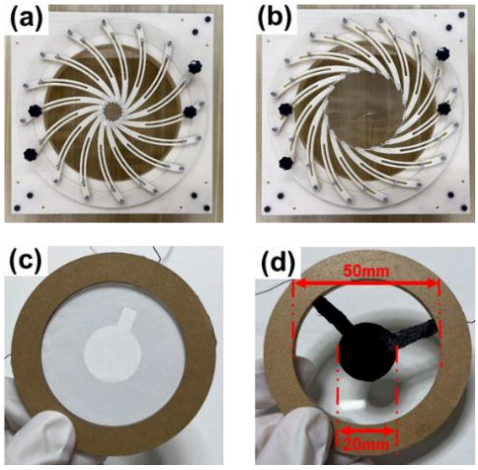


Fig. 2　(a) radial stretching device; (b) stretching DE film; (c) DE film packaging mold; (d) encapsulated DE actuator unit

1.3　测试与表征

1.3.1 介电性能测试：使用常州同惠电子股份有限公司 TH2836 型阻抗分析仪，测量 VHB-4910 型

DE 在 100 Hz~1 MHz 频率范围内的介电常数和介电损耗。

1.3.2 静动态电压下的电致形变测试：DE 致动单元连接到高压系统的正负极上（见 Fig.3），其中，静态致动性能测试使用美国 Advanced Energy 公司 TREK 610E 型号直流高压电源，同时采用日本基恩士公司的 VS-L160MX 型号一体式智能相机，实时跟踪拍摄圆形膜片致动器的致动变化，示意图如 Fig.3(a)所示，实物图如 Fig.3(b)所示[12]，并记录中间黑色柔性电极区域在不同电压下的面积变化。电致形变 S_{act} 的计算公式如式（1）：

$$S_{act} = \frac{A_{act} - A_0}{A_0} \times 100\% \tag{1}$$

式中，A_{act} 为施加电场时电极区域面积；A_0 为未施加电场时电极区域面积。

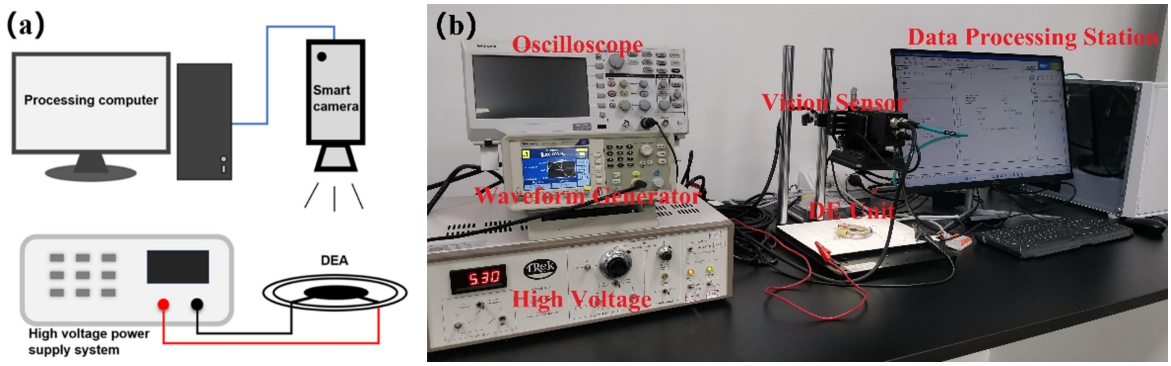


Fig. 3 (a) Schematic diagram of the actuation test platform; (b) actuation test platform

动态致动性能测试使用 Tektronix 公司 AFG1022 型波形信号发生器输出波形频率信号，经高压电源放大 1000 倍作用在圆形膜片致动器上，电致形变 S_{act} 的计算公式同上。有效致动幅度定义为单个电压周期内 DE 致动单元的最大形变与最小形变之差，即：

$$\Delta S = S_{max} - S_{min} \tag{2}$$

式中，S_{max} 为单周期内最大电致形变；S_{min} 为单周期内最小电致形变。

2 结果与讨论

2.1 介电性能分析

Fig.4 为 VHB-4910-DE 的介电常数和介电损耗随频率变化的数据。由图可知，当测试频率由 100Hz 增加至 4kHz 时，DE 的介电性能趋于稳定，介电常数维持在约 4.7，介电损耗保持在约 0.05，这是因为 DE 内部的极化机制和分子运动达到一种平衡状态，使得介电常数和介电损耗趋于稳定；而当测试频率大于 4kHz 时，电子极化和原子极化开始发挥作用，这些机制在高频下能够响应电场变化，导致 DE 介电损耗增加。

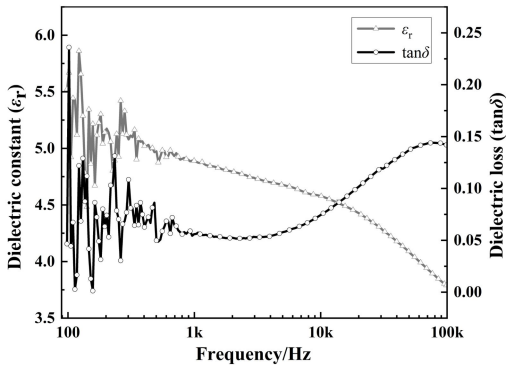


Fig. 4　Dielectric properties of VHB-4910-DE

2.2 直流电压下的电致形变性能

Fig.5 为 VHB-4910-DE 在梯度直流电压下（1-6kV）的电致形变率随加载时间（3min）变化的关系图。由图可知，各电压下 DE 的电致形变率均呈现先快速上升后趋于稳定的特征。稳态形变率随电压升高而显著增大：1 kV 时仅约 0.15%，2 kV 时约 1.0%，3 kV 时约 4.8%，4 kV 时约 12%，5 kV 时约 24%，6 kV 时可达 50%。此外，电压越高，形变的时间依赖性越显著。以电致形变曲线由快速上升转为缓慢上升的转折处为拐点，6 kV 下拐点形变约 31%，稳态形变约 50%，拐点后增幅达 61%；而 2 kV 下拐点形变约 0.76%，稳态形变约 1.0%，拐点后增幅仅 32%。这是因为当加载的直流电压越大，加载到 DE 致动单元两端的电场强度越大，导致麦克斯韦应力增加，进而加速了 DE 的面积形变过程，使得 DE 电致形变随时间变化影响越大。

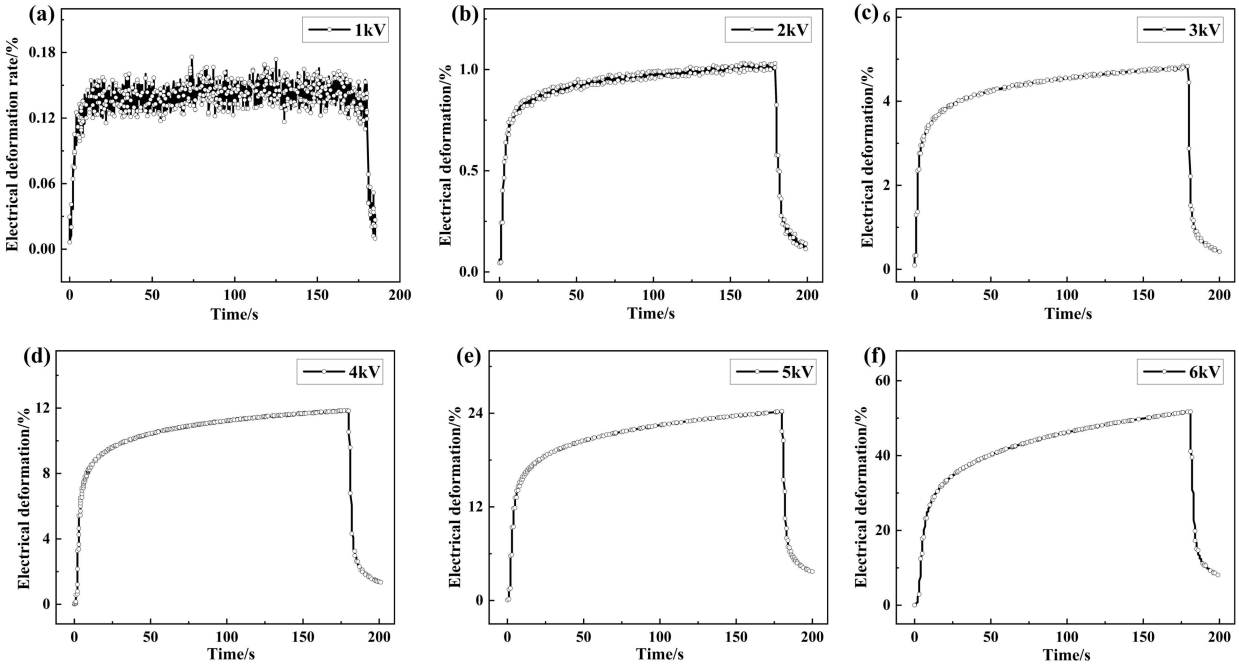


Fig. 5　Electrical deformation of VHB-4910-DE actuator unit with gradient DC voltage: (a) 1 kV; (b) 2 kV; (c) 3 kV; (d) 4 kV; (e) 5 kV; (f) 6 kV

为了解 DE 在直流电压下的电致循环性能，对 5kV 稳定电压下加载 60s/间歇 30s 循环下 DE 电致性能进行了研究，如 Fig.6 可知，间歇循环下 DE 最大形变有所提高（第 1 周期约 21%，第 3 周期约 23%），但 30s 间歇时间不足以使 DE 回落原始位置且残余形变逐渐累积：第 1 周期结束时残余形变约 1.7%，第 3 周期结束时残余形变约 2.7%，表明分子链弛豫时间远超 30s。这与 DE 分子链弛豫效应有关。当电压加

载时，DE 分子链网络结构发生重排，在电压去除后，这些分子链网络结构需较长时间恢复至初始状态，且随着循环次数的增加，弛豫效应更加明显；此外 DE 链段的粘滞特性也延长了分子链段的回复时间。

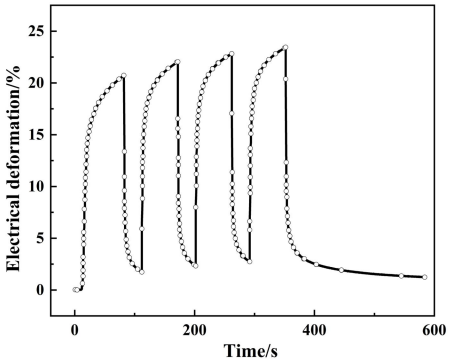


Fig. 6　Electrical deformation of VHB-4910-DE actuator unit with intermittent loading of 5 kV DC voltage

2.3 交流电压下的电致形变性能

开展 DE 在交流电压下的电致性能研究，更能为今后 DE 的实际器件设计及装置应用提供实际参考。Fig.7(a~d)为 VHB-4910-DE 在 5kV/0.1-10Hz 交流电压下电致形变数据，由图可知，频率越高，DE 最大形变及恢复能力越差，有效致动幅度也下降明显。具体而言，在 5 kV 交流电压下，0.1 Hz 时单周期有效致动幅度约为 12%(Fig.7(a))，随频率升至 1 Hz 降至约 5.5%(Fig.7(b))，5 Hz 时进一步降至约 3%(Fig.7(c))，10 Hz 时仅约 1.5%(Fig.7(d))，降幅达 87%。这是因为动态加载下，DE 分子链的滑移运动存在内摩擦阻力，导致宏观变形滞后于电场变化，当致动频率升高时，分子链松弛时间又无法与电场周期匹配，变形尚未达到最大值便开始反向恢复，从而限制了有效致动幅度。

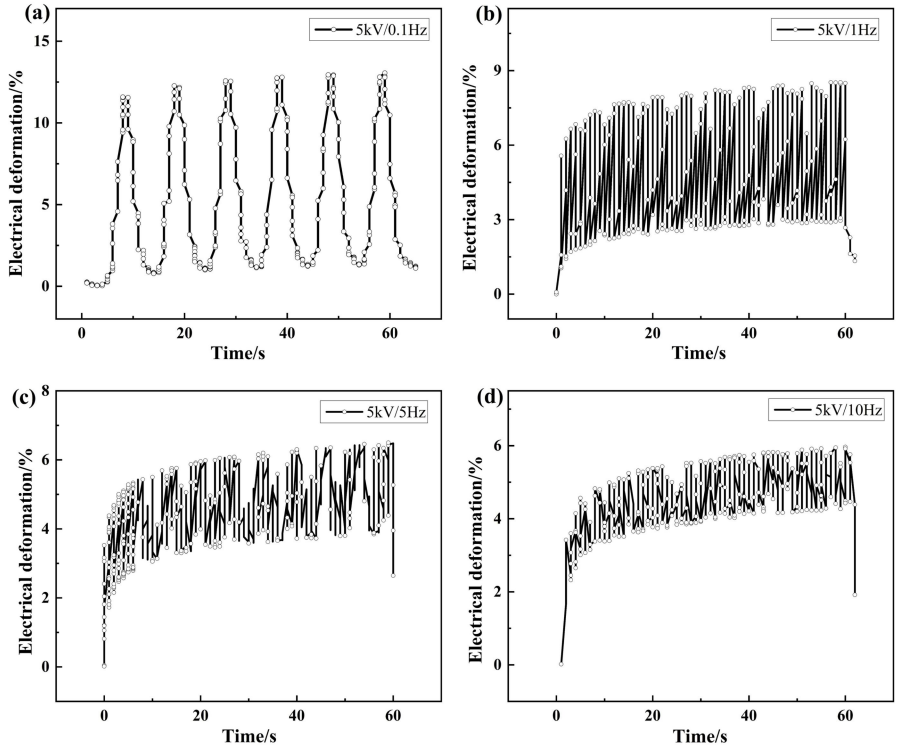


Fig. 7　Electrical deformation of VHB-4910-DE actuator unit with AC voltage of 5 kV at different frequencies: (a) 0.1 Hz; (b) 1 Hz; (c) 5 Hz; (d) 10 Hz

Fig.8 为 DE 连续变频加载下的试验数据，单一频率加载时间为 60s。可以看出，随着加载频率

上升，DE 有效致动幅度明显下降（从 0.1 Hz 的约 12%降至 10 Hz 的约 1.5%）。值得注意的是，由于前一频率段的残余形变未消除，当切换到新频率时（1 Hz、5 Hz、10 Hz），DE 的振荡幅度从第一个周期开始就接近稳定状态，各频率段内部的振荡保持稳定。然而，连续加载导致残余形变逐渐累积，从 0.1 Hz 段的约 1%抬升至 10 Hz 段的约 5%，表明分子链弛豫时间不足以在频率切换间隔内完全恢复。

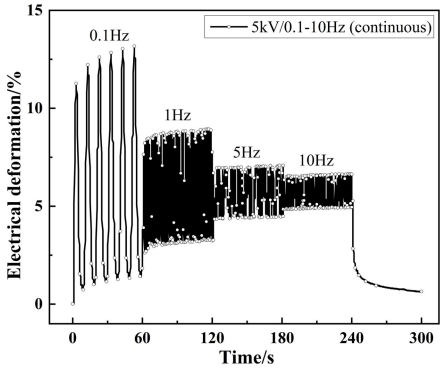


Fig. 8　Electrical deformation of VHB-4910-DE actuator unit with continuous loading of 5 kV/0.1 Hz-10 Hz AC voltage

Fig.9 为 DE 间歇变频加载下的试验数据，单一频率加载时间为 60s，间歇时间为 30s。与 Fig.8 的“立即稳定”特征不同，间歇加载下，每次电压去除的 30s 间歇期使形变回落至接近 0。当重新加载新频率时（1Hz、5Hz、10Hz），DE 需要经历一个明显的“从接近 0 爬升到稳定”的过渡过程，通常需要若干个振荡周期才能达到稳定状态。这是因为间歇期间分子链网络得到部分弛豫时间，重新加载时需要重新建立极化和分子链取向。达到稳定后的有效致动幅度与连续变频基本相近。虽然残余形变仍有累积（从约 1%增至约 4.5%），但由于周期性弛豫的作用，累积幅度小于连续变频加载（约 5%），且每次间歇使形变暂时回落，减轻了持续应力对材料的影响。

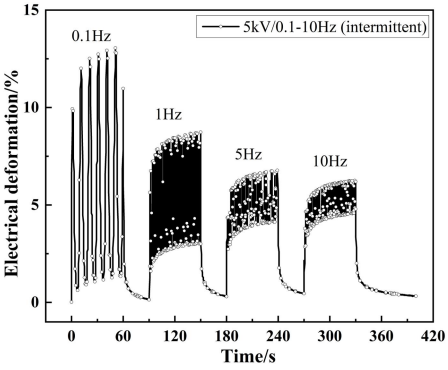


Fig. 9　Electrical deformation of VHB-4910-DE actuator unit with intermittent loading of 5 kV/0.1 Hz-10 Hz AC voltage

3　结论

（1）VHB-4910 型丙烯酸树脂介电弹性体在 100 Hz~4 kHz 频率范围内介电常数（约 4.7）和介电损耗（约 0.05）保持稳定。

（2）直流电压下，稳态形变率随电压升高显著增大（1 kV 时约 0.15%，6 kV 时达 50%），且呈

现明显的时间依赖性。间歇循环加载时，残余形变累积表明分子链弛豫时间远超 30 s。

（3）交流电压下表现出明显的频率依赖性。5 kV 时，频率由 0.1 Hz 升至 10 Hz，单周期有效致动幅度由约 12%降至约 1.5%，降幅达 87%。连续变频加载时残余形变累积至约 5%，间歇变频加载通过周期性弛豫使残余形变累积减缓至约 4.5%，但需经历“从零爬升到稳定”的过渡过程。

（4）基于材料粘弹性和分子弛豫效应，追求大形变的应用宜采用低频或直流加载，快速响应应用需从材料层面降低链段粘弹性。本研究为介电弹性体致动器的优化设计和应用拓展提供了理论依据和实验支持。

参考文献：

[1] 陈哲琪, 罗英武. 介电弹性体驱动器:从分子、材料到器件[J]. 中国科学: 化学, 2024, 54(11): 2183-2198.
Chen Z Q, Luo Y W. Dielectric elastomer actuators: molecules, materials, and devices[J]. Scientia Sinica Chimica, 2024, 54(11): 2183-2198.

[2] Mirvakili S M, Hunter I W. Artificial muscles: mechanisms, applications, and challenges[J]. Advanced Materials, 2018, 30: 1704407-1704435.

[3] 马文涛, 王海天, 孙文杰, 等. 叠层式介电弹性体人工肌肉驱动器:设计、制备与柔性驱动应用[J]. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2024, 54(6):19-46.
Ma W T, Wang H T, Sun W J, et al. Use of a multilayered dielectric elastomer actuator as a high-performance artificial muscle: design, fabrication, and applications[J]. Scientia Sinica Physica, Mechanica & Astronomica, 2024, 54(6): 264503.

[4] Huang D Y, Ma J X, Han Y B, et al. Artificial intelligence artificial muscle of dielectric elastomers[J]. Materials & Design, 2025, 251: 113691.

[5] Mohammadi V, Mohammadi S G, Tajdani M, et al. Evaluating stacked dielectric elastomer actuators as soft motor units for forming artificial muscles in biomimetic rehabilitation robots[J]. Actuators, 2024, 13: 381.

[6] Zhang Q H, Yu W, Zhao J H, et al. A Review of the applications and challenges of dielectric elastomer actuators in soft robotics[J]. Machines, 2025, 13: 101.

[7] 王新茹. 高驱动应变聚氨酯介电弹性体的制备及性能研究[D]. 长春: 吉林大学, 2024.
Wang X R. Study on preparation and performance of high actuating strain polyurethane dielectric elastomers[D]. Changchun: Jilin University, 2024.

[8] 费华峰, 喻研, 张志杰. 硅橡胶介电弹性体的研究进展[J]. 有机硅材料, 2023, 37(5): 61-69.
Fei H F, Yu Y, Zhang Z J. Research progress of silicone rubber dielectric elastomers[J]. Silicone Material, 2023, 37(5): 61-69.

[9] Jiang S C, Peng J B, Wang L T, et al. Recent progress in the development of dielectric elastomer materials and their multilayer actuators[J]. Journal of Zhejiang University-Science A, 2024, 25: 183-205.

[10] Huang W Y, Kang G Z, Ma P Y. Uniaxial electro-mechanically coupled cyclic deformation of VHB 4905 dielectric elastomer: experiment and constitutive model[J]. Journal of Materials Engineering and Performance, 2023, 33: 2952-2967.

[11] Sahu D, Sahu R K, Patra K. In-plane actuation performance of graphene oxide filled VHB 4910 dielectric elastomer[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 139: 51594.

[12] Wang Q Q, Shuai C G, Yang X, et al. A novel dielectric elastomer with low modulus and fast response[J]. Smart Materials and Structures, 2025, 34: 025032.

Electrical Deformation Performance of Dielectric Elastomer Under Static and Dynamic Voltage Loading

Gang Lu[1], Liyi Han[1], Changgeng Shuai[2], Xue Yang[2], Jianguo Ma[2], Chengren Yuan[2], Feng You[1], Xueliang Jiang[1], Qinqin Wang[2]

(1. Hubei Key Laboratory of Plasma Chemistry and Advanced Materials, School of Materials Science and Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430205, China; 2. School of Power Engineering, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, China)

ABSTRACT: To investigate the electro-deformation behavior and frequency dependence of acrylic dielectric elastomers under static and dynamic voltage loading, in this study VHB-4910 acrylic dielectric elastomer was employed as the research subject. A custom-built actuation testing platform was used to systematically examine the electro-deformation performance under DC voltage (1~6 kV) and AC voltage (0.1~10 Hz) loading. The results demonstrate that the dielectric constant (~4.7) and dielectric loss (~0.05) remain stable within the frequency range of 100 Hz to 4 kHz; under the loading of DC voltage, the steady-state deformation rate increases significantly with the rise of voltage (from ~0.15% at 1 kV to 50% at 6 kV), but exhibits a pronounced time dependence; under the loading of 5 kV AC voltage, as the frequency increases from 0.1 Hz to 10 Hz, the effective actuation amplitude per cycle decreases from ~12% to ~1.5%, representing a reduction of 87%. These phenomena are attributed to the viscoelasticity and molecular relaxation effect of the material chain segments. The findings indicate that low-frequency loading is preferable for applications requiring large deformation, while fast-response applications necessitate reducing the segmental viscoelasticity at the material level.

Keywords: dielectric elastomer; acrylic resin; static and dynamic voltage; electrical deformation