

介电弹性体力学松弛的试验与理论研究

赵政弘 帅长庚* 杨 雪

(海军工程大学振动与噪声研究所船舶振动噪声重点实验室, 武汉 430033)

摘 要 针对介电弹性体的粘弹性应力松弛现象,通过单轴拉伸的应力松弛试验研究了材料应力在不同预拉伸率下的时变特征,建立了材料基于 Prony 级数的准线性粘弹性模型。研究表明:通过理论计算和实验结果的对比验证了模型的准确性,预拉伸率是影响介电弹性体薄膜应力松弛曲线的重要因素,基于二阶 Prony 级数的准线性粘弹性模型能够有效模拟介电弹性体薄膜预拉伸率在 $[2,6]$ 区间内的非线性力学松弛特性,而且与实验值拟合度较高;在预拉伸率为 4,400s 条件下,介电弹性体薄膜的应力达到 0.126MPa。

关键词 介电弹性体,应力松弛,粘弹性,准线性

Experimental and theoretical study on mechanical relaxation of dielectric elastomer

Zhao Zhenghong Shuai Changgeng Yang Xue

(Institute of Noise & Vibration, National Key Laboratory on Ship & Vibration Noise, Naval University of Engineering, Wuhan 430033)

Abstract Focusing on the phenomenon of viscoelastic stress relaxation of dielectric elastomer, uniaxial tensile stress relaxation experiment under different pre-stretches was conducted to explore the time-varying characteristics of material stress. Besides, the quasi-linear viscoelastic model based on prony series was established, and its accuracy was verified by comparison between theoretical calculation and experimental statistics. The results indicated that pre-stretch was a key factor to determine the stress relaxation curve of dielectric elastomer and the quasi-linear viscoelastic model based on second-order prony series can describe the nonlinear mechanical relaxation characteristics effectively under the pre-stretch range of $[2,6]$.

Key words dielectric elastomer, stress relaxation, viscoelasticity, quasilinear

介电弹性体是在外加电场激励下能够产生较大尺寸和形状变形的高分子聚合物,是一种具有巨大发展潜力的新型智能材料。同形状记忆合金、压电陶瓷和磁致伸缩材料等传统的智能材料相比,介电弹性体具有变形大、机电转换效率高、质量轻、响应速度快和制备成本低等独特优势,在仿生机器人、新型换能器设计等领域具有广阔的发展空间^[1-4]。

介电弹性体的力学特性具有明显的几何非线性和材料非线性,其在外界荷载作用下产生的应力不仅取决于材料应变的大小,而且还依赖于应变过程,具有明显的非线性时变特征。本研究通过介电弹性体薄膜的应力松弛实验,研究了材料应力在不同预拉伸率下的时变特征,建立了材料基于 Prony 级数

的准线性粘弹性模型,并根据试验数据拟合得到了模型的应力松弛参数,验证了基于二阶 Prony 级数的准线性粘弹性模型能够较好地描述介电弹性体的非线性力学松弛特性。

1 实验部分

1.1 材料与仪器

聚乙烯(PE)离型膜(VHB4910 型双面透明胶带,长度 30m,宽度 50mm,厚度 1mm),美国 3M 公司。

微机控制电子万能试验机(CMT4304 型),美国 MTS 系统公司;力传感器(BSA-25MT 型),美国 TRANSCELL 技术公司;夹具,实验室自制。

基金项目:国家自然科学基金项目(51303209)

作者简介:赵政弘(1989-),男,博士,主要研究方向为新型智能材料的特性研究。

联系人:帅长庚(1975-),男,博士,教授,主要从事智能减振降噪研究。

1.2 样品的制备

将介电弹性体薄膜(VHB4910 薄膜)制得若干长宽比为 8:1 的样品,示意图见图 1。从图可以看出,阴影为试件供夹具夹持的部分。

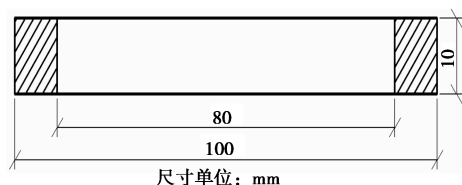


图 1 介电弹性体薄膜应力松弛测试样品的尺寸示意图

1.3 样品的测试

在温度为 12℃、相对湿度为 60 的条件下,采用微机控制电子万能试验机(CMT4304 型,美国 MTS 系统公司)对样品的取单轴预拉伸率进行测试,预拉伸率分别为 2、3、4、5 和 6(每个预拉伸率条件下分别进行 3 次测试,取 3 次的平均值作为该样品预拉伸率的最终结果),以 500mm/min 的速度拉伸至相应的变形位置后,保持 1800s;最后采用力传感器(BSA-25MT 型,美国 TRANSCCELL 技术公司)对样品的应力进行测试,记录整个实验过程中样品的应力与时间的变化情况。

2 结果与讨论

2.1 介电弹性体薄膜的应力分析

在预拉伸率为 4 的条件下,介电弹性体薄膜的应力松弛曲线见图 2。从图可以看出,在预拉伸率为 4 的条件下,在 0s 到 400s 的区间内,介电弹性体薄膜的应力呈下降较快态势,应力松弛现象明显;400s 条件下,介电弹性体薄膜的应力达到 0.126MPa;400s 之后,介电弹性体薄膜的应力变化不大,且呈逐渐趋于平缓态势。此外,通过对比不同预拉伸率条件下,介电弹性体薄膜的应力与时间变化的整体趋势是一致的;不同的是,预拉伸率越高,介电弹性体的应力下降越快,材料初始应力和最终应力的差值越大。

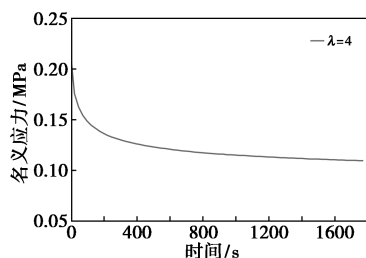


图 2 介电弹性体薄膜的应力松弛曲线图

2.2 准线性粘弹性模型

研究表明,介电弹性体材料与时间相关的粘弹性特性可以用准线性粘弹性模型来描述^[5-6],此时应变能函数中的材料参数(C_{ij}^R)是依赖于时间的变量,可以由 Prony 级数表示,见式(1)。

$$C_{ij}^R(t) = C_{ij}^0 \cdot \left\{ 1 - \sum_{k=1}^N g_k \cdot [1 - \exp(-\frac{t}{t_k})] \right\} = C_{ij}^0 \cdot f(t) \quad (1)$$

式中, C_{ij}^0 为描述介电弹性体瞬时弹性响应的材料参数; $f(t)$ 为材料的应力松弛函数,且 $f(t=0)=1$; g_k 、 t_k 为介电弹性体应力松弛系数,可由应力松弛实验测得。

根据准线性粘弹性理论^[7-8],介电弹性体材料的应力松弛曲线可以表示为式(2)。

$$\sigma(t) = \sigma_{\infty} + \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_i}) \quad (2)$$

式中, σ_{∞} 为足够长时间后材料的名义应力,MPa; σ_i 、 τ_i 为描述应力松弛特性的材料参数,可根据实验数据由式(1)拟合获得。

为了确定 Prony 级数,联立式(1)和式(2)可得 $S_{\infty}(t)$,见式(3)。

$$S_{\infty}(t) = \frac{\sigma(t)}{\sigma_{\infty}} = \frac{\sigma_{\infty} + \sum_{i=1}^N \sigma_i \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_i})}{\sigma_{\infty}} = \frac{1 - \sum_{k=1}^N g_k [1 - \exp(-\frac{t}{\tau_k})]}{1 - \sum_{k=1}^N g_k} \quad (3)$$

由式(3)可以得到式(4)。

$$\sum_{i=1}^N \frac{\sigma_i}{\sigma_{\infty}} \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_i}) = \frac{\sum_{k=1}^N g_k \cdot \exp(-\frac{t}{\tau_k})}{1 - \sum_{k=1}^N g_k} \quad (4)$$

式中,通过参数 σ_{∞} 、 σ_i 和 τ_i ,可以得到介电弹性体的应力松弛系数 g_k 、 t_k 。

2.3 力学松弛仿真分析

根据前述的介电弹性体基于 Prony 级数的准线性粘弹性模型,采用数值计算软件 MATLAB 对介电弹性体薄膜单轴拉伸的应力松弛实验过程进行仿

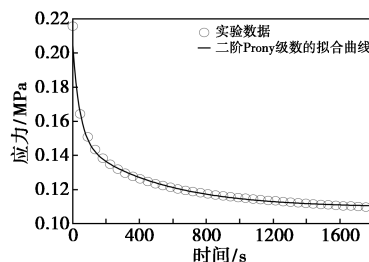


图 3 二阶 Prony 级数的拟合曲线与实验值的对比图

真,并将理论计算与实验结果进行了对比。在预拉伸率为 4 的条件下,二阶 Prony 级数的拟合曲线与实验值的对比图见图 3。从图可以看出,介电弹性体薄膜的实验结果与二阶 Prony 级数的拟合十分接近。

考虑到拟合精度和模型计算的简便性,采用基于二阶 Prony 级数的准线性粘弹性模型对介电弹性体薄膜预拉伸率在 $[2,6]$ 区间内的应力松弛实验数据进行拟合。预拉伸率不同二阶 Prony 级数的拟合曲线与实验值的对比图见图 4。从图可以看出,在预拉伸率分别为 2、4 和 6 条件下,400s 条件下,介电弹性体薄膜的应力分别为 0.077MPa、0.126MPa 和 0.196MPa,基于介电弹性体二阶 Prony 级数的准线性粘弹性模型的应力松弛曲线与实验数据拟合较好,能够准确描述介电弹性体薄膜的非线性粘弹特性。

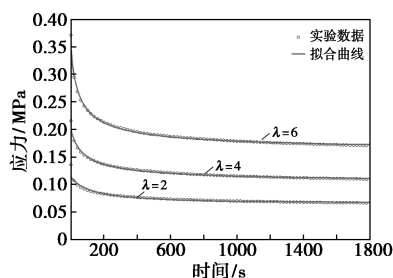


图 4 预拉伸率不同二阶 Prony 级数的拟合曲线与实验值的对比图

3 结论

对介电弹性体薄膜进行了单轴拉伸的应力松弛研究,分析了不同预拉伸率条件下介电弹性体薄膜应力的时变特征,建立了基于 Prony 级数的准线性粘弹性模型,并通过理论计算和实验结果的对比验

证了模型的准确性。结果表明:预拉伸率是影响介电弹性体薄膜应力松弛曲线的关键因素,当预拉伸率由 2 增大至 6 条件下,介电弹性体薄膜的应力随之增大,应力松弛曲线变化明显,在预拉伸率为 4, 400s 条件下,介电弹性体薄膜的应力为 0.126MPa;考虑到拟合精度和计算的简便性,基于二阶 Prony 级数的准线性粘弹性模型能够有效模拟介电弹性体薄膜预拉伸率在 $[2,6]$ 区间内的非线性力学松弛特性。

参考文献

- [1] Bar-Cohen Y. Directions for development of the field of electroactive polymer[C]. SPIE Conf: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 2011, 797604-7976011.
- [2] 金丽丽, 鄂世举, 曹建波, 等. 介电弹性体材料研究现状综述[J]. 机电工程, 2016, 33(1): 12-17.
- [3] Zhao Z H, Shuai C G, Gao Y, et al. An application review of dielectric electroactive polymer actuators in acoustics and vibration control[J]. Recent Advances in Structural Dynamics, 2016, 744(1): 012162-012171.
- [4] Biggs J, Danielmeier K, Hitzbleck J, et al. Electroactive polymers: developments of and perspectives for dielectric elastomers[J]. Angew Chem Int Ed, 2013, 52: 9409-9421.
- [5] 朱银龙. 介电型 EAP 换能器机电耦合特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [6] Niu S, Wang Z. Experimental analysis of the characteristics of an acrylic elastomer[J]. Material Research Innovations, 2016, 19(S8): 17-21.
- [7] 罗华安. 圆柱形介电型 EAP 驱动器特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2015.
- [8] Ask A, Menzel A, Ristinmaa M. Modelling of viscoelastic dielectric elastomers with deformation dependent electric properties[J]. Procedia Iutam, 2015, 12: 134-144.

收稿日期: 2017-08-09

修稿日期: 2018-09-25

欢迎订阅《化工新型材料》, 邮发代号 82—816。

2019 年全年定价 360 元/年, 台港澳 240 美元/年, 国外 240 美元/年