DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.09.039

介电弹性体材料机械能一电能转换特性

鄂世举¹ 朱喜林¹ 曹建波¹ 朱黎辉² 惠安峰¹ (1. 浙江师范大学工学院,金华 321004; 2. 吉林大学机械科学与工程学院,长春 130025)

【摘要】 介电弹性体功能材料是具有优异性能的电场活化聚合物,可在驱动和发电两种模式下工作。依据介 电弹性体薄膜材料的结构特征,分析了发电模式下介电弹性体材料发电的基本机理,即可变电容原理;建立了该材 料的理论模型,得到麦克斯韦效应可作为压电效应处理的结果,并确定了对应压电效应的等效参数。通过仿真及 实验分析了该材料的电能转换过程;分析了发电过程中电场与材料弹性回复力之间的关系,及其对发电效率的影 响,确定了介电弹性体薄膜材料的发电周期过程。

关键词:介电弹性体 发电 转换特性 仿真 实验 中图分类号:TB34 文献标识码:A 文章编号:1000-1298(2010)09-0194-05

Characteristics of Electrical Energy Conversion for Dielectric Elastomer Film

E Shiju¹ Zhu Xilin¹ Cao Jianbo¹ Zhu Lihui² Hui Anfeng¹

(1. College of Technology, Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China

2. School of Mechanical Engineering, Jilin University, Changchun 130025, China)

Abstract

As a new type of electroactive polymer (EAP), dielectric elastomers can work in both actuator and generator modes. Dielectric elastomers (DE) can achieve good performance in a generator mode, such as high energy density, good impedance matching to many energy sources, low cost, etc. Based on the structure of dielectric elastomers film, the fundamentals of dielectric elastomers, namely fundamentals of alterable capacitance are discussed. The theoretical models of dielectric material with an effective piezoelectric coefficient was drawn. Power energy conversion cycle was analyzed by simulation and experiments, and the experimental curves of output voltages were investigated. The relation between electric field and elastic restoring stress, and its influence on power generating efficiency, were discussed. At last, the mechanical cycle of power generation for dielectric elastomers was determined approximately.

Key words Dielectric elastomers, Power generation, Convertion characteristics, Simulation, Experiments

引言

电活化聚合物材料(EAP)是在电场的激励下, 尺寸和形状发生显著改变的一类聚合物,一般包括 两类:离子型和电场型。电场型 EAP 需要较高的电 压以产生大的应变,材料本身是干性的,性能稳定, 其中的介电弹性体材料,如丙烯酸、硅树脂等最具应 用前景。介电弹性体材料既可正向使用,作为人工 肌肉的最优仿生驱动材料^[1];也可逆向使用,工作 在发电或传感方式^[2-4]。面向发电领域,与其他发 电材料,如电磁及压电陶瓷等比较,介电弹性体材料 具有以下特点:①具有大的发电比能量,为0.4 J/g

收稿日期: 2010-02-07 修回日期: 2010-03-12

^{*} 国家自然科学基金资助项目(50777028)

作者简介:鄂世举,副教授,主要从事功能材料应用技术研究, E-mail: esx_2001@163.com

(目前测得值,理论上可达1%以上)。而压电材料 中具有最优性能的单晶陶瓷(PZN-PT)约为0.1 J/ g;电磁材料约为0.04 J/g(峰值)。②具有最大应 变变形,如丙烯酸材料可达380%。而电磁材料为 50%,单晶陶瓷(PZN-PT)约为1.7%。③可与能量 源直接耦合,无需中间转换环节。④柔顺性、耐冲 击、材料密度低、成本低。

以上性能特点,使介电弹性体材料特别适合于 针对低频、大变形能量源进行发电的场合,如用于风 力及海浪/潮汐发电等场合以及单兵装备中。这种 发电机将具有结构简单、效率高、成本低、重量轻、寿 命长、完全无污染等优点,而并行、高分布式将是这 种发电机的显著构造特征^[5]。本文建立介电弹性 体材料——丙烯酸弹性体的发电模型,并在此基础 上分析影响发电效率的因素。

1 介电弹性体材料的发电原理

1.1 发电基本原理

介电弹性体材料是在弹性体材料(如丙烯酸、 硅树脂等)基质的上下表面渗入屈从电极材料(如 碳或石墨等)而形成的、基于麦克斯韦效应的一种 EAP 材料。依据其结构特征,介电弹性体材料的发 电原理可简化为图1所示,即可变电容。在伸展状 态下(大电容)初始电荷注入到介电弹性体薄膜电 极上。宏观上看,收缩时(小电容),介电弹性体材 料的弹性应力抵抗电场力,进而提高了电能。从微 观上,薄膜收缩、厚度增加时,由于异性电荷被推离, 同性电荷由于薄膜面积的缩小被压缩靠近,从而提 高了电荷电压。可见,当外力作用在具有预加电场 的介电弹性体材料上使其变形时,由于电容的改变 即可发电,变形越大,发电能力越强。而介电弹性体 材料的发电过程即为介电弹性体材料的伸展与弛豫 的交替过程。图1中V₀为偏置电压,V(t)为介电弹 性体材料的输出电压。







1.2 介电弹性体材料的工作模式

介电弹性体薄膜无论是工作在驱动模式,还是 发电模式,均需在电极上预置电荷。对于施加了电 压/电荷的介电弹性体薄膜,确定它的工作模式是一 个重要问题。由介电弹性体薄膜的工作原理及能量 转换的角度分析,电场场压与材料的弹性回复应力 是两个直接的影响因素,二者的关系可表示为图 2 所示,直线1为弹性回复应力直线。在弹性回复力 直线上方区域,电场场压大于材料的弹性回复应力, 介电弹性体薄膜扩展,工作在驱动器模式;反之,在 直线下方区域,介电弹性体薄膜收缩,工作在发电机 模式。当场压等于弹性回复应力、即沿着直线1时, 介电弹性体薄膜将保持当前的应变状态。可知,在 发电机模式下,随着薄膜收缩电压升高,而弹性应力 降低,二者达到某一等值状态。此时,薄膜将不再继 续收缩,直到电荷被移走,即电能存储之后。





2 介电弹性体薄膜的发电模型与分析

介电材料的麦克斯韦应力 T 一般表达式^[6]为

$$T_{ij}^{M} = -E_{i}D_{j} + \frac{1}{2}\delta_{ij}D_{k}E_{k}$$

$$(1)$$

式中,当i = j时, $\delta_{ij} = 1$,否则 $\delta_{ij} = 0$ 。上标 *M* 表示麦 克斯韦应力,*E* 为电场强度,*D* 为电通量密度。

令 $D_i = \varepsilon_{ij} E_j, \varepsilon$ 为相对介电常数。则式(1)可写 为

$$T_{ij}^{M} = -\varepsilon_{ij}E_{i}E_{j} + \frac{1}{2}\delta_{ij}\varepsilon_{kl}E_{l}E_{k}$$
(2)

于是,介电材料在麦克斯韦应力 T 作用下的应变 S 为

$$S_{ij} = -\left(s_{ijkm}\varepsilon_{ml} - \frac{1}{2}\delta_{ij}s_{ijmn}\varepsilon_{kl}\right)E_kE_l \qquad (3)$$

则对于没有机械约束的各向同性的材料,其纵向应 变为

$$S_3 = S_{33} = -\frac{1}{2} \varepsilon (s_{11} - 2s_{12}) E_3^2$$
(4)

横向应变为

$$S_1 = S_{11} = \frac{1}{2} \varepsilon s_{11} E_3^2 \tag{5}$$

式(4)及(5)表明了应变与电场之间的关系。

在发电模式下,介电弹性体材料产生的电气信 号与施加应力/应变之间的关系如下:

假设将各向同性的电活化材料看成平板可变电

容器,极板面积为A,厚度为d,对其施加V_D的直流 电压,则该电容器中的总电荷为

$$Q = \frac{\varepsilon A}{d} V_D \tag{6}$$

假设对该电容器施加的拉应力为 T_i ,则对应电能的产生,电容器中的电荷 Q 将产生变化,其变化量 ΔQ 为

$$\Delta Q = \left[\frac{AV_D}{d}\frac{\partial \varepsilon}{\partial T_i} + \varepsilon V_D \frac{\partial}{\partial T_i}(A/d)\right] \Delta T_i \qquad (7)$$

式中,第一项源自电致伸缩效应,第二项源自麦克斯 韦应力效应。由式(7)可见,电荷的变化量 ΔQ 即对 应电能的产生,其值与所加的直流电压 V_D 、介电常 数 ε 、薄膜面积 A 及厚度 d 的变化有关。令 $D_3 = \Delta Q/A, E_D = V_D/t,$ 式(7)可简化为

 $D_{3} = [2M_{i3}E_{D} - \varepsilon(s_{3i} - s_{1i} - s_{2i})E_{D}]\Delta T_{i}$ (8) 由式(8)可见,为实现发电过程,诱导材料的非 反转对称性,需要施加直流偏置电场。如果在与偏 置电场同方向施加应力,式(8)可变为

$$D_{3} = \left[2M_{33} - \varepsilon (s_{11} - 2s_{12}) \right] E_{D} T_{3}$$
(9)

式(9)中,对应各向同性材料, $s_{33} = s_{11}$,因此可 用 T_3 代替 ΔT_3 。结合电致效应和麦克斯韦效应,假 设施加的电场为 $E = E_D + E_{AC}$,其中 $E_D \gg E_{AC}$,则在 电场 E_{AC} 作用下的应变为

 $d_{33} = [2M_{33} - \varepsilon(s_{11} - 2s_{12})]E_p$ 同理,当施加与直流偏置电场正交的拉应力 T_1 时,有

$$D_{3} = (2M_{13} + \varepsilon s_{11}) E_{D} T_{1}$$
(11)

可见,麦克斯韦效应可作为压电效应处理,对应 的有效压电系数分别为

$$d_{33} = [2M_{33} - \varepsilon(s_{11} - 2s_{12})]E_D$$
$$d_{31} = (2M_{13} + \varepsilon s_{11})E_D$$

3 电能转换效率分析

由上分析,由于麦克斯韦效应可作为压电效应

处理,故可利用压电效应对介电弹性体薄膜的发电 过程进行分析。图 3a 给出了压电材料发电的典型 机械周期^[7]。图中,施加应力由零到 T_0 ,机械能存 储到压电材料中,能量密度为 $U_1 = \frac{1}{2} s^E T_0^2$, s^E 是常 电场(开路)下的柔顺系数。当应力由 T_0 降到零 时,压电材料对外做功。在开路条件下,恢复的机械 能为: $U_2 = \frac{1}{2} s^p T_0^2$ 。由于 $s^p < s^E$,故 $U_2 < U_1$ 。假设介 电损失及弹性损失很小,从能量转换的角度考虑, $U_1 与 U_2$ 之间的差值即为材料产生的电能。电能与 原始输入机械能之间的比值即为材料的能量转换效 率。如果沿极轴施加外部应力 T_3 ,则效率等于纵向 机械耦合因素 k_{33} 的平方,即

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{d_{33}^2}{s_{33}^E \varepsilon^T} = k_{33}^2$$
(12)

类似地,如应力垂直于极轴的方向,效率为

$$\frac{U_1 - U_2}{U_1} = \frac{d_{31}^2}{s_{11}^E \varepsilon^T} = k_{31}^2$$
(13)

可见,为获得高的电能输出,材料要具有高的耦 合因素。而且,对于同一材料,耦合因素的大小依赖 于输入机械应力及应变的方向(相对于材料的极 轴)。一些 EAP 材料(如丙烯酸、硅树脂等)表现出 较高的机电耦合因素,k₃₁可达0.65。由于工艺过程 对电场活化聚合物机电反应的影响非常明显,因此, 提高机电转换效率是一个重要的研究课题。

基于电场活化聚合物是绝缘材料,如果忽略介 电损失,通过合适的电路设计,电能恢复可接近 100%。于是,可以利用电气边界条件改变图 3a 所 示的机械周期,以获得更高的效率。当应力由 T_0 减 小到零的过程中,如果同时对聚合物施加外部电场, 以保持材料的对应 T_0 的应变不变,则 U_2 成为零,进 而获得较材料允许转换效率 k^2 高的多的有效能量 转换效率,该系统可表示为图 3b。

介电弹性体材料的电能密度为 k²U₁。为了获得更高的电能,除了优化材料的耦合因素 k,获得最



rig. 5 Meenumeur eyere of power generation

(a) 典型周期 (b) 施加电场保持 T₀ (c) 提高输入机械能

大 U_1 是另外一个关键问题。对于一定 T_0 下的电能 转换系统,介电弹性体的弹性柔顺系数越大越好。 这是因为大的柔顺系数可产生大的应变,进而得到 较大的 U_1 。另外,可通过图 3c 所示的机械周期提 高输入机械能 U_1 ,其中 Δ 为电场 E 下的应变。首 先,介电弹性体材料在应力作用下产生应变达到最 大值。之后,在 T_0 下,对材料施加电场 E,则输入的 机械能获得提高。总的输入机械能密度为 $\frac{1}{2}s^ET_0^2$ + dET_0 ,其中 d 为相应的压电系数。提高的输入机械 能水平依赖于 dE 与 s^ET_0 的比值。

4 模型仿真与实验

4.1 实验原理

如图 1, 令 E_s 和 E_c 分别为伸展和收缩两个瞬态 下存储在介电弹性体薄膜中的电能。在伸展状态下 施加偏置电压 V_D , 在收缩状态下通过泄放电阻 R释 放一些电荷后保持偏置电压 V_D 不变。假如通过泄 放电阻 R的电荷为 $\Delta Q, Q_s$ 和 Q_c 分别为介电弹性体 薄膜在伸展及收缩状态时的电荷, 则有

 $\Delta Q = Q_s - Q_e = I(t) dt = (V(t)/R) dt \quad (14)$ 令 E_R 为泄放电阻耗散的电能,介电弹性体薄 膜中产生的电能为 E_a ,则有 $E_a = E_R + E_e - E_s$,而

$$\begin{cases} E_{s} = \frac{1}{2} V_{D} Q_{s} \\ E_{c} = \frac{1}{2} V_{D} Q_{c} \\ E_{R} = (V(t)^{2} / R) dt \\ E_{a} = E_{R} + E_{c} - E_{s} = \end{cases}$$

$$V(t)^{2} / R) dt = \frac{1}{2} V_{A} Q_{C}$$
(15)

则有

$$E_{a} = E_{R} + E_{c} - E_{s} =$$

$$(V(t)^{2}/R) dt - \frac{1}{2}V_{D}\Delta Q =$$

$$(V(t)^{2}/R) dt - \frac{1}{2}V_{D}(V(t)/R) dt \qquad (16)$$

4.2 仿真与实验结果

由式(15)及(16)可见,通过测得电压-时间曲 线 V(t)即可通过数值计算的方法得到介电弹性体 薄膜产生的电能,测量电路原理如图 4a 所示。

实验中所使用的弹性体材料为丙烯酸材料 VBM4910,电极材料为导电胶 RL – FORM K06,测试 的边界条件为弹性体材料均匀预拉伸 1:2.5,四周 粘接固定在绝缘板上,如图 4b 所示。实验测试条 件:利用 WWW – LSG31 型直流稳压电源,通过二极 管给伸展状态下的介电弹性体薄膜材料施加偏置电 压,偏置电压值为 2 kV。薄膜收缩产生的输出电压 V(t)经高压探头降压,由示波器输出。使用泄放电 阻 R 有两个目的:其一是为了加快介电弹性体材料 的放电时间,加快实验循环。这是由于介电弹性体





材料绝缘性能好,回复到偏置电压的时间需要较长 时间。其二是为分析和验证电场场压与弹性回复应 力之间的关系。

由式(7)可知,输出电荷电压与偏置电压成比 例。图5中,通过理论仿真与实验的方法分别验证 了这一点。同时,理论模型与实验数据基本吻合。 实验数据小于理论数值,原因在于电荷泄漏、以及介 电弹性体中的能量损耗等因素。



Fig. 5 Relation between biased voltage and output voltage

基于介电弹性体薄膜的发电原理,其发电、存储 过程可做如下设定:① 薄膜在零电荷下伸展。② 电荷被放置到薄膜上。③ 薄膜收缩的同时电荷被 导出、存储。④ 薄膜中,弹性回复应力与电场场压 达到平衡,即沿着图 2 中直线 1。⑤ 电荷逐渐被导 出直至回到零电荷、零应变的起始状态。在这个发 电过程中,一个需要证明的是过程④。本文中,将电 场场压与弹性回复应力相等的时刻称为维持期。这 个维持期的存在通过以下方法得以证实:通过改变 泄放电阻 R 的阻值调整电荷的泄放时间,进而影响 输出电压的波形,如图 6 所示。其中,图 6a 中的泄 放电阻阻值小于图 6b。注意到,对照于图 6a 中的 收缩过程出现的电压尖峰情况,图 6b 中输出电压存





依据以上发电周期、即伸展与收缩的交替过程 分析,电能存储的时机对发挥材料的最大潜能、获得 最大电能转换效率是非常重要的。在介电弹性体薄 膜下一个转换周期的伸展之前,应将电能转移。否 则,介电弹性体材料将以驱动器模式消耗机-电转换 获得的电能,减小发电的比能量及转换效率。

5 结束语

分析了介电弹性体材料的电能转换过程,通过 仿真及实验的方式,验证了介电弹性体材料的可变 电容的发电机理。为了充分发挥介电弹性体材料的 发电性能,提高材料的机一电耦合效率至关重要,关 键问题涉及薄膜材料的机械模型和电气边界条件 等。本文为进一步的研究工作打下了基础。

参考文献

- 1 Bar-Cohen Y. Electroactive ploymers(EAP) actuators as artificial muscles-reality, potential and challenge[M]. Washington: SPIE Press, 2001.
- 2 Penglin Niu, Patrick Chapman, Raziel Riemer, et al. Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting[C] // 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, Aachen, Germany, 2004, 3:2 100 ~ 2 106.
- 3 Ron Pelrine, Roy D Kornbluh, Joseph Eckerle, et al. Dielectric elastomers: generator mode fundamentals and applications [C] // Yoseph Bar-Cohen. Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices: Proceedings of SPIE, 2001, 4329: 148 ~ 156.
- 4 Liu Y, Ren K, Hofmann H F, et al. Electrostrictive polymer for mechanical energy harvesting [C] // Yoseph Bar-Cohen. Smart Structures and Materials 2004; Electroactive Polymer Actuators and Devices; Proceedings of SPIE, 2004, 5358; 17~18.
- 5 Moretti P M. Tension in fluttering flags [C] // 23rd Oklahoma AIAA/ASME Symposium, University of Oklahoma, Norman, 2003.
- 6 Landau L D, Lifshitz E M. Electrodynamics of continuous media[M]. Oxford: Pergamon Press Ltd., 1970.
- 7 ANSI/IEEE Std 176 1987. IEEE standard on piezoelectricity[S]. New York: IEEE, 1988.

(上接第 213 页)

- 6 刘开第,吴和琴,庞彦军,等.不确定性信息数学处理及应用[M].北京:科学出版社,1999:163~173.
- 7 石博强,肖成勇.系统不确定性的数值计算方法[J].北京科技大学学报,2003,25(4):374~376. Shi Boqiang, Xiao Chengyong. Numerical calculation of system uncertainty [J]. Journal of University of Science and Technology Beijing, 2003, 25(4): 374~376. (in Chinese)
- 8 刘维信. 机械可靠性设计[M]. 北京:清华大学出版社,1996:169~171.