

介电弹性体的研究进展

卢婷婷,刘 茜*,辛三法

(上海工程技术大学 服装学院,上海 201620)

摘要:介电弹性体是一类在外加电场激励下可以发生形变,进行能量转换的新型纺织材料,属于电活性聚合物,电活性聚合物有电子型和离子型之分。介电弹性体在柔性驱动器的设计研究中有很广阔的应用前景,但是目前还存在很多技术难点,在弹性体基体材料构成、柔性电极材料优化、能量收集等方面仍然需更深入的研究。本文在明晰了介电弹性体的工作原理及分类后,对其在电极、预拉伸、温度和能量收集等方面进行了归纳总结,并对其应用前景进行了展望。

关键词:电活性聚合物;介电弹性体;驱动器;能量收集

电活性聚合物(Electro-active Polymer,简称 EAP)是一类在电场激励下可以产生大幅度尺寸或形状变化的新型柔性智能材料,具有特殊的电性能和机械性能。EAP 的起源可以追溯到 19 世纪 80 年代,那时,机电响应现象首次被发现,人们开始对该现象进行研究,20 世纪初,场致应变的规律被总结成公式。但是关于 EAP 材料的发现还很少,直至 20 世纪 20 年代压电聚合物的发现,这在 EAP 材料的发展史上具有里程碑的意义。20 世纪 40 年代末,人们发现了化学活性聚合物,例如,胶原质丝浸泡在酸或碱溶液中时,可以可逆伸缩。但是,关于“化学-机械”驱动器的研究还很少。1969 年,科学家发现了聚偏氟乙烯(PVDF)具有压电行为后,开始挖掘其聚合物体系,进而一系列 EAP 材料应运而生。近 10 年来,具有优异性能的 EAP 材料不断被开发出来,某些 EAP 材料的变形已经可以达到 300%^[1~8]。本文首先介绍了 EAP 材料的分类,然后从工作原理、种类以及研究现状对其中的介电弹性材料(Dielectric Elastomer,简称 DE)进行了详细阐述。

1 电活性聚合物的分类

按照作用机理的不同,EAP 材料主要分为两大类,即电子型 EAP 和离子型 EAP。

1.1 电子型 EAP

电子型 EAP 是由电场驱动产生电致应力,直接将电能转化为机械能,进而在宏观上表现出电致动特征,通常输出的应力较大,需要较高的激励电场。电子型 EAP 大致可以分为有机复合材料(All-Organic Composite,简称 AOC)、介电弹性体(DE)、电致伸缩接枝弹性体(Electrostrictive Graft Elastomer,简称 ESGE)、电致伸缩薄膜(Electrostrictive Paoer,简称 ESP)、电致粘弹性聚合物(Electro-Viscoelastic Elastomer,简称 EVEM)、铁电聚合物(Ferroelectric Polymer,简称 FEP)和液晶弹性体(Liquid Crystal Elastomer,简称 LCE)等。其中,目前人们研究比较多的是电致伸缩接枝弹性体(ESGE)、介电弹性体(DE)以及铁电聚合物(FEP)和液晶弹性体(LCE)^[9~12]。

1.1.1 电致伸缩接枝弹性体 电致伸缩接枝弹性体(ESGE)由柔性主链和支链组成,结构如图 1 所示。支链与相接近的主链物理交联,形成晶体单元。柔性主链与结晶的接枝单元由带有电荷的极性单体合成,可以产生偶极矩,并使结晶支链诱导极化。在施加电场的情况下,偶极子产生转矩作用,刺激结晶支链的极化单元旋转,主链局部重排,导致弹性体变形,应变可达到 5%,应变响应速度在毫米级别,但最大的缺点是驱动电压高达 $150\text{V}/\mu\text{m}$ ^[9,11]。

10.14028/j.cnki.1003-3726.2018.10.002

收稿:2018-01-29;修回:2018-04-12;

* 通讯联系人:刘茜(1978-),女,副教授,博士,研究方向为功能纺织材料。E-mail: liuqianfangzhi@126.com.

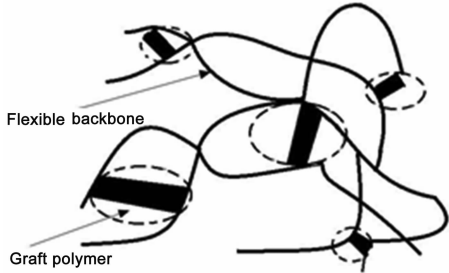


图 1 接枝弹性体的结构
Figure 1 Structure of graft elastomer

1. 1. 2 介电弹性体 介电弹性体(DE)在外电场的作用下可以产生很大的应变(最大可达 380%),去掉电场后,DE 材料迅速恢复到原始尺寸。与其它电子型 EAP 材料相比,DE 具有很多独特的优点,其变形大,弹性模量低,机电耦合效率高,工作温度范围宽,频率范围广。当在 DE 驱动单元上下两侧的柔性电极上施加直流电压,DE 材料将在麦克斯韦静电力作用下,沿电力线方向产生收缩,同时在电力线垂直正交的平面内扩展延伸。当激励电压撤除后,DE 材料将在弹性恢复力的作用下,迅速恢复到初始尺寸,在弹性回复的过程中会将机械应变转化为电能,利用这一特点可以进行能量收集。当电场达到或超过 DE 的临界击穿电场时,材料被击穿^[11]。

1. 1. 3 铁电聚合物 铁电聚合物(FEP)中存在压电现象,压电现象是一种存在于一类特定晶体——铁电体中的独特效应。压电材料在施加电场时,产生伸缩变形;相反,在施加压力时,会产生电压。这种材料可以在空气、真空或水中使用,而且使用温度范围相当宽。聚偏氟乙烯(PVDF)及其共聚物是最常见的铁电聚合物。由于它们具有良好的柔韧性并易制成大面积的薄膜,因而在音频和超声传感器、生物医学传感器、机电换能器以及热释电和光学器件方面具有重要的应用前景。在水听器、医用超声传感器和机器人探测器等领域已获得实际应用^[10,11]。

1. 1. 4 液晶弹性体 液晶弹性体材料(LCE)由高分子主链与附着在主链上的液晶分子组成。因为主链比较柔软,液晶分子可以进行调整重排,但是不会自由移动。这种调整重排可以在热或电刺激下进行,如图 2 所示,液晶分子的调整重排对主链产生应力,从而使液晶弹性体材料产生体积应变。驱动机理包括液晶分子从向列向各向同性转变过程中,分子从球形到类球形的变化。电驱动过程中,液晶分子内会产生极化,从而引发液晶弹性体材料的应力与应变。与 FEP 和 DE 材料相比,LCE 材料所需驱动电压较低,仅为 $1.5\text{V}/\mu\text{m}$ ^[12]。

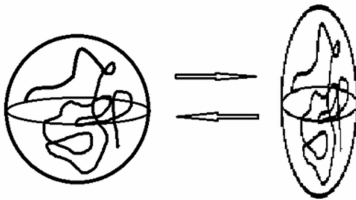


图 2 液晶弹性体应变原理图
Figure 2 Liquid crystal elastomer strain gauge diagram

1. 2 离子型 EAP

离子型 EAP 是在电化学的基础上,以化学能作为过渡实现电能到机械能的转化,这类材料一般由两个电极和电解液组成,特点是驱动电压低(1V~2V),产生的变形大。离子型 EAP 包括碳纳米管(Carbon Nanotube,简称 CNT)、导电聚合物(Conductive Polymer,简称 CP)、电致流变液体(Electro-Rheological Fluid,简称 ERF)、离子聚合物凝胶(Ionic Polymer Gel,简称 IPG)和离子聚集合物基金属复合材料(Ionic

Polymer Metallic Composite, 简称 IPMC) 等^[12~16]。

1.2.1 碳纳米管 碳纳米管(CNT)是一种高性能、多功能复合材料,具有高长径比、直径小、质量轻、机械强度高(类似于金刚石)、导电导热性好、热稳定性好、空气中稳定性好等优点。在注入离子后,碳纳米管和电解液的离子电荷平衡被破坏,键长改变产生电活性。注入的电荷愈多,尺寸变化愈大。因此,人们希望得到 CNT/聚合物纳米复合材料,使易于加工的聚合物基本具备 CNT 的优点。近几年来,由单层碳纳米管制成的薄层驱动器是一种性能优良的电化学驱动器,在低压(一般 $< 5\text{V}$)水电解液中可以产生 1% 的应变。单层碳纳米管在电解液界面形成双电层,伴随非感应电荷注入过程,产生驱动效应^[12,13]。

1.2.2 导电聚合物 导电聚合物材料(CP)是一类兼具高分子特性及导体特征的高分子材料。根据电荷载流子的种类,导电聚合物被分为电子 CP 和离子 CP。以自由电子或空穴为载流子的导电聚合物称为电子 CP,其特征是分子内含有大的线性共轭 π 电子体系,主要有聚乙炔、芳香单环、多环以及杂环的共聚物或均聚物,以正、负离子为载流子的导电聚合物称为离子 CP,主要有聚醚、聚酯和聚酰亚胺。这些聚合物分子的聚合物溶剂化能力强,有利于盐解理成离子或形成聚和络合物。仅有长链共轭体系的聚合物只能算是半导体,其导电能力还无法与金属导体相比,因此需要掺杂微量添加剂来提高其导电能力^[13]。

1.2.3 离子聚合物凝胶 离子聚合物凝胶(IPG)在酸性环境中可发生化学反应,凝胶伸缩,产生电活性。聚合物基体通常是离子交换材料,用来选择单电荷离子(阴离子或阳离子),因此,通常具有共价离子基团。施加电场后离子从材料中迁移出来,其运动方向与极化方向有关,迁移速率与施加的电压和材料性能有关^[13]。

1.2.4 离子聚合物-金属复合材料 聚合物通常是离子交换材料,用来选择单电荷离子(阴离子或阳离子)。IPMC 材料质轻,柔性好,只需低电压($< 3\text{V}$)即可产生较大形变,可在潮湿环境中使用,而且具有生物相容性,因此多应用于医学设备上。目前,一种新的 IPMC 材料受到广泛关注。这种材料是将电极层镀在 Nafion 薄膜两侧,它除了具有一般 IPMC 的优点外,还可以保持多次($\geq 1 \times 10^5$ 次)较大的弯曲变形,而且可以制成微米尺寸。实验证明,可以通过增加 Nafion 薄膜的厚度增加驱动力,如 Kim 等通过液态离子交换聚合物浇铸得到了 0.4mm~1.2mm 厚的薄膜^[14~16]。

从电子型 EAP 到离子型 EAP,电活性聚合物(EAP)的应用十分广泛,其中,介电弹性体(DE)被认为是最具前景的一类材料,在柔性致动器、传感器领域极富应用潜力^[14]。以下将对 DE 材料进行介绍。

2 介电弹性体的电致动原理

1880 年,Rontgen 首次提出 DE 致动原理。电极两端的电压诱导出现一个静电压,其对 DE 材料产生作用后,DE 材料在水平方向上扩展延伸,在垂直方向上收缩变小。DE 材料模型及致动原理如图 3 所示。这种结构被称为“三明治结构”,分为上、中、下三层,上下两层为柔性电极,中间是 DE 薄膜,在上下柔电极接通电源后,电极之间的电荷相互吸引产生麦克斯韦应力,从而压缩 DE 薄膜,实现电能到机械能的转换,撤掉电压,DE 恢复到原来形状。利用 DE 膜的形变及恢复,可以产生机械能到电能的转换,从而进行能量的收集^[17~22]。

DE 变换器的工作原理可以由多种方式来导出,其中 Pelrine 等提出的在电容 C 带有电荷量 Q 的情况下,随着电极板电容器的厚度 z 和面积 A 的变化导致电能 U_e 的微分变化 dU_e ,是最简单、最容易理解的。假设体积恒定:

$$dU_e = \left(\frac{Q}{C}\right)dQ - 2U_e\left(\frac{1}{A}\right) = \left(\frac{Q}{C}\right)dQ + 2U_e\left(\frac{1}{z}\right)dz \quad (1)$$

如式(1)所示: $\left(\frac{Q}{C}\right)dQ$ 为电容上的电荷; dQ 为变化产生的电能改变; $2U_e\left(\frac{1}{A}\right)dA$ 为电场上所做的机械能。

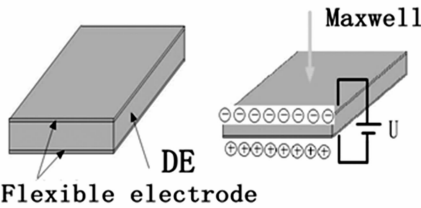


图 3 DE 材料电致变形工作原理

Figure 3 DE material electrostriction working principle

从式(1)中可以看出,对于恒定电荷 Q ,膜出现厚度增加,从而机械能转变为电能,转换器可以当作传感器或发电机使用。相反的,膜出现厚度减小,从而转能转变为机械能,转换器当作驱动器使用。如此往复,实现电能和机械能的相互转换^[22,23]。

3 介电弹性体的种类及性能

目前常用的介电弹性体(DE)有硅橡胶、丙烯酸及其复合材料。复合 DE 材料通常由基质和填料构成,虽然填料不相同,但是基质主要是硅橡胶和丙烯酸。目前,大部分的研究也都是围绕丙烯酸和硅橡胶两类主要的 DE 材料展开^[24~30]。

3.1 丙烯酸

丙烯酸(Acrylic)是重要的有机合成原料及合成树脂单体,是聚合速度非常快的乙烯类单体,最简单的不饱和羧酸,由一个乙烯基和一个羧基组成。丙烯酸及丙烯酸酯可以均聚及共聚,其聚合物用于合成树脂、合成纤维、高吸水性树脂、建材、涂料等工业部门。用作 DE 材料的丙烯酸,目前市场上主要是 3M 公司生产的 VHB 系列压敏人造橡胶粘贴薄膜,该薄膜的两侧都有粘结剂,有利于柔性电极的附着,和硅橡胶相比,应用更加方便^[24]。

3.2 硅橡胶

硅橡胶(Silicone)是主链由硅和氧原子交替构成,硅原子上通常连有两个有机基团的橡胶。硅橡胶分类的方法很多,通常按固化前的形态,分为固体硅橡胶和液体硅橡胶;按硫化温度,分为室温硫化硅橡胶、高温硫化硅橡胶;按所用单体的不同,可分为甲基乙烯硅橡胶、甲基苯基乙烯基硅橡胶、腈硅橡胶等;按性能和用途,可分为通用型、超耐低温型、超耐高温型、高强度型、耐油型、医用型等。用作 DE 材料的硅橡胶是液体硅橡胶,目前市场上主要有 Dow Corning184/186、3481、HS3、Nusil R31-2186、CF19-2186 等型号。一般来说,这些硅橡胶都是需要一定比例的软化剂、硬化剂,并在特定的模具中固化成需要的形状,以获取不同形状和机电特性的弹性体。与丙烯酸酯类弹性体相比,硅橡胶适用温度范围宽,响应速度快(3s),黏弹滞后小^[25,26]。

3.3 硅橡胶和丙烯酸对比

Mathew 等^[27]通过溶胀法将两种不同硅胶 Sylgard-184 和 Elastosil E-43 与 VHB4910 共混,发现相同电场引发的麦克斯韦应力高于纯丙烯酸酯弹性体材料。

Zhang 等^[28]将 VHB4910 与硅胶(DC3481)的机电性能做了对比研究,发现硅橡胶的温度稳定性更好,应变响应速度快(3s),有良好的可重复性,能量损耗小,并且应变不受电场频率影响;而 VHB4910 恰好相反。

通过对丙烯酸和硅橡胶的比较,它们的异同点可总结为以下几点:

- (1)两者都需要较高的驱动电压(>1000V)(这成为限制其推广应用的主要原因之一);
- (2)Acrylic 的应力响应能力比 Silicone 要好,而 Silicone 的相应速度要比 Acrylic 快;
- (3)预拉伸能够显著提高 DE 材料的机电稳定性. Silicone 相对于 Acrylic 对预应力要求较低,在较小

或没有预应力条件下也能够表现出适中的驱动应变；

(4)Silicone 相对于 Acrylic 具有较低的黏弹性,因此能够在更高的频率下工作；

(5)Acrylic 的特性随着温度变化会产生较大变化,而 Silicone 则没有表现出这一缺点,其弹性在很宽的温度范围内保持稳定,更适合用于驱动器设计^[30~35]。

4 介电弹性体的研究进展

2000 年,Pelrine 等^[36]发表在 *Nature* 上的文章报道了介电弹性体的电致应变可超过 100%。1991 年,日本 SRI 公司开始研究 DE 材料,并于 2007 年在一个浮标上安装了电活性聚合物人工肌肉发电机,实现了从自然海浪运动产生电能的功能^[37]。2010 年,哈佛大学的 Zhu^[38]从热动力学出发,通过扰动方法研究了 DE 气球的非线性振动特性;2011 年,兰州大学的 Yong 等^[38]建立了一套 DE 动态分析模型,研究了厚球壳的稳定性;2014 年,浙江大学的 Li^[39]研究了纯剪切共振器的机电耦合性能及其动态性能;2014 年,Soares 等^[38]利用打靶法对预拉伸后的超弹性平面膜的动态方程进行了求解,并与有限元求解方法进行了对比;2016 年,Xu^[39]利用拉格朗日方程得到了平面 DE 的动态运动方程,并研究了动态载荷下的位移响应和稳定性,但是没有考虑预应力的影响。归纳下来,具体可以从以下几个方面讨论。

4.1 电极的影响

不同的电极会产生不同的电致动效果,比较常规的电极通常是石墨、银浆、碳纳米管等柔性电极以及金属电极。石墨电极一般采取涂刷和喷涂的方式置于介电弹性体上,Schlaak^[34]将这两种方式进行了对比,发现由涂刷方式制备的电极比由喷涂方式制备的电极导电率更高,且操作方便。张冬至等^[35]用静电自组装的方法制作碳纳米管电极,Yuan 等验证了碳纳米管电极的容错性,发现使用碳纳米管电极的 DE 薄膜某一处被击穿后,不影响薄膜的后续使用。对于金属电极来说,常用的方法是化学镀,它是依据氧化还原的化学原理,利用强还原剂将溶液中的金属离子还原沉积在物体表面形成镀层。

Ghosh 等^[34]从 2014 年开始通过在制膜的过程中加入纤维,研究膜的单向弹性活性。他们加入了 5.2%膜体积的 PU 到 DE 材料中,制成了新的膜,实验发现,添加高介电常数纤维会增强单相弹性。

Fang 等^[40]在 2015 年通过涂覆纳米 CNT 的方法,将膜拉伸至 200%,做一个循环 25 次的实验,探讨对介电弹性体的各向异性影响。实验发现,在 DE 薄膜周围涂覆纳米 CNT,并掺杂纤维到 DE 膜中,在 DE 膜周围涂覆的纤维取向的 CNT 片在点集中展现强烈的相互作用。

施江吉等^[12]于 2016 年以介电弹性体材料 VHB4910 为基底,添加高介电性能填充物(氨纶纤维)制成双层夹心复合材料,测试复合材料的介电性能和复合材料驱动器的驱动性能,并分析了其介电性能提高与偶极子的取向极化及分子链上极性基团活性的关系。结果表明:添加氨纶纤维的复合材料具有更好的介电性能和驱动性能,与介电弹性体驱动器相比,复合材料驱动器具有更为优越的驱动性能^[24,25]。

2017 年,陈鹿民等^[37]研究了不对称电极。他们的实验以 DowCorning186 硅橡胶为介电弹性体基底膜,以精细 Ag 纳米颗粒和导电石墨掺杂的硅橡胶为电极,组装了不对称 DE 电致动膜。Ag 纳米颗粒掺杂后,电极的模量提高了 23%,表现出了明显的不对称性,同时,导电石墨和 Ag 纳米颗粒掺杂的薄膜均具备了良好的导电性能,可作为柔性导电电极使用,两者的协同作用,进一步加强了硅橡胶内部的导电通路,增强了导电性能。随后,他们对 DE 不对称电极薄膜的致动性能进行了分析。DE 材料的致动性能源于两电极间的麦克斯韦电场力,与电源的激励电压、致动频率、占空比密切相关。利用激光位移传感器分别采集了不同电压、频率下泵膜中心位置的位移曲线,发现不对称 DE 泵膜具有高度的可控制性,增加电源的激励电压、泵膜形变程度,进而泵膜流量和功率输出就会增大。由此可以看出,不对称电极对 DE 材料的电致动效果产生了比较大的影响。在这一方向上,国内外的研究还是比较缺乏的^[31~33]。

4.2 温度的影响

DE 材料是一种粘弹性高分子材料,在变形过程中会受到温度的影响。2004 年,Zhang 等^[34]研究了

温度对 DE 材料弹性模量的影响,发现在 $-50\sim 70^{\circ}\text{C}$ 温度范围内,DE 材料的杨氏模量下降了三个数量级,DE 材料的玻璃化转变温度大约为 -40°C 。2009 年,Michel^[35]研究发现,当温度从 -50°C 升高到 75°C 时,DE 弹性模量从 550MPa 减小到 0.05MPa。2013 年,Cong 等^[36]得到了 DE 材料的弹性模量随温度变化的数学方程。Ha 等^[37]通过热重分析研究了 VHB 4910 的热稳定性,得到其开始失重的温度点为 250°C ,同时通过差示扫描量热方法测量了 DE 材料的玻璃化转变温度为 -43°C 。Walder^[38]通过测量不同温度下 DE 的动态剪切模量和损耗模量,估算出其可能的工作温度范围为 $10^{\circ}\text{C}\sim 80^{\circ}\text{C}$ 。总体来看,研究发现最常用的 DE 材料 VHB 4910 的弹性模量对温度和频率非常敏感,研究学者虽然总结了一些基本规律,但是由于不同结果之间存在分歧,在 DE 材料的机电耦合建模过程中,大多数学者仍将 DE 材料的弹性模量视为恒定,并没有把外界因素特别是频率和温度引起的弹性模量变化引入到理论分析中,所有关于 DE 材料驱动性能的研究仅限于室温条件下。

基于此,2016 年盛俊杰等^[7,13]从热力学中的热弹性理论入手,一是引入温度参数的变化,二是引入介电常数随温度的变化,建立了基于 Gent 模型的非线性热-力-电耦合的自由能模型,分析温度对力电失稳、电击穿失效、张力损失、材料强度失效的影响,并研究了该影响的大小及规律,从而为 DE 材料的实际应用奠定基础。研究发现,温度升高后,系统的共振频率减小,最大振幅会增加,在 295K、305K、和 315K 温度下,DE 在共振频率附近的振动都是稳定的,同时温度升高后,滞后会越来越明显,此时具有比较明显的能量损耗。但是,对于温度变化对 DE 材料机电耦合稳定性的影响,仍然没有研究出比较明确的理想数据。

4.3 预拉伸的影响

用 DE 材料制备驱动器,只有在较高的电场强度激励下才能产生较大的驱动响应,而在工程实际应用中,节约能源和安全工作的人要求很高,因此降低其工作场强的研究逐渐兴起。

2016 年,樊亚玲等^[31]在等双轴预拉伸下对介电弹性体驱动器力电稳定性进行了分析。借助有限元数值模拟手段,针对等双轴预拉伸条件下的介电弹性体驱动器,进行了驱动器力电特性有限元仿真计算,建立了伸长率与名义电场强度之间的关系,将仿真结果与已有的理论计算结果进行了对比,二者完全重合;同时根据等双轴预拉伸情况下系统的状态方程,分析不同预拉伸水平下极限电致应变、电场强度、电位移等参数关系,获取该介电弹性体驱动器稳态工作区间。实验结果表明:

(1)驱动器失稳时名义电场强度临界值随着预拉伸的增大而减小,要达到相同的拉伸率,施加的预拉伸越大,则需要施加的名义电场强度就越小;

(2)真实电场强度随着预拉伸的增大而增大,即预拉伸越大,使驱动器失稳所需的真实电场强度就越大;

(3)驱动器失稳时名义电位移随着预拉伸的增大而增大,预拉伸越大,失稳时对应的名义电位移也越大。

2015 年和 2017 年,Fang 等^[42]针对 CNT 这种电极,分别通过涂覆纳米 CNT 和激光刻蚀 CNT 的方法,将膜拉伸至 200%,做循环 25 次的实验。实验发现,在 DE 薄膜周围涂覆纳米 CNT,并铺设纤维到 DE 膜中,在 DE 膜铺设纤维部分的 CNT 之间有强烈的相互作用。通过激光刻蚀 CNT,在相同的电场条件下,可以达到 33% 的单向应变^[37~40]。

2016 年,施江吉等^[12]以 VHB4910 为基底,添加高介电性能填充物 PU 纤维制成双层夹心复合材料,在预拉伸条件下测试复合材料的介电性能和驱动性能。在相同的测试条件下,双层材料在大倍数预拉伸下的介电常数高于单层材料。同时,介质损耗随着预拉伸的增加而增大,随着预拉伸倍数的增加而增大,在 102~106Hz 的测试频率范围内,相较于 VHB4910 材料,添加了 PU 纤维的复合材料的介电常数在不同预拉伸作用下均得到了显著的提升。在同等预拉伸条件下,添加 PU 纤维能够降低材料的介质损耗。随着预拉伸倍数的增大,复合材料介质损耗的降低幅度越大。

4.4 基于介电弹性体的能量收集

介电弹性体材料(DE)的弹性回复性能,使其在面向人体及自然界的能量收集领域具有巨大的潜能,

介电弹性体发电机(Dielectric Elastomer Generator,简称 DEG)作为一种可变电容器发电装置,具有轻质、柔顺性好、耐冲击、能量密度高、噪音低等优点,越来越引起人们的关注。实际上,上下表面涂有柔性电极的“三明治”式 DE 薄膜的基本功能就相当于一个可变电容器,其能量收集循环过程由以下 4 个基本环节构成:(1)拉伸 DE 薄膜,即输入机械能;(2)对拉伸状态下的 DE 薄膜充电,也称为极化;(3)薄膜弹性恢复,与此同时异性电荷分离,同性电荷靠近,麦克斯韦静电力做负功,电压增加,此过程中以薄膜应变形式存在的机械能转化为电能,实现了 DE 电容器储能的增加;(4)电能被收集(移除)薄膜重回工作拉伸前的初始状态,开始下一次循环。图 4 是介电弹性体材料能量收集原理图。

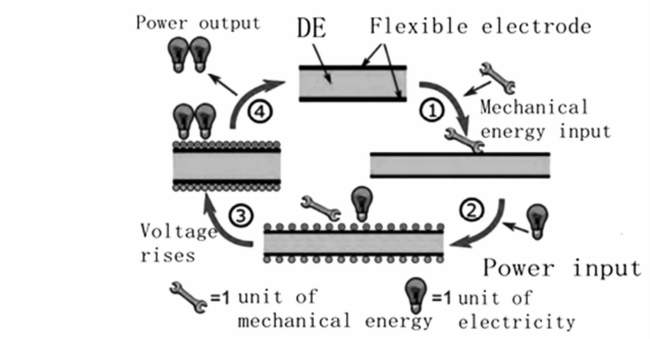


图 4 介电弹性体材料能量收集原理图

Figure 4 Dielectric elastomer material energy collection principle diagram

2016 年,陈花玲^[53]对介电弹性材料的能量收集现状、趋势进行了研究。从能量角度看,DE 能量收集的本质,就是在这样一个弹性体与外部环境交互作用的体系内,4 种基本能量形式,即动能、应变能、电能和热能(由材料粘滞损耗、电流泄露和电子元件热损耗等引起)的转换与分配问题。图 5 是其提出的一种双向反向结构图。

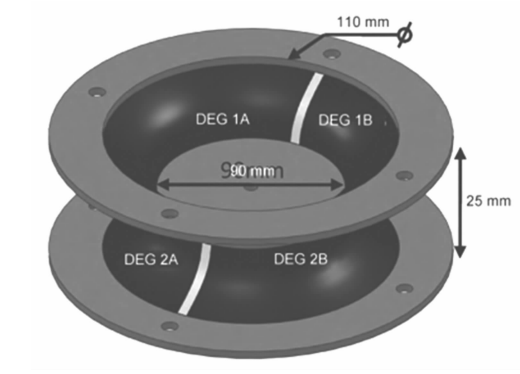


图 5 双向 DE 反向变形结构图

Figure 5 Bidirectional DE reverse deformation structure

该器件实际由两个 DE 子结构联结而成(每个子结构又分为 A、B 两个基本单元),它们的变形正好存在 180°的相位差,当 DE1 拉伸变形时,DE2 正好收缩变形,反之亦然,这样,任何时候总有一个 DE 是处于收缩放电状态,从而达到能量收集的效果。

关于能量收集,国内外的研究学者尽管提出了很多构想,但还没有一个明确固定能够稳定收集能量的设备,这启发我们要去开展更多深入的研究^[46~53]。

5 结束语

电活性聚合物(EAP)能在外加电场诱导下改变形状或体积,而当不施加电场时,它又能恢复到原来

的形状或体积。介电弹性体(DE)是制造驱动器和能量收集器等转换器的最有潜力的电活性聚合物材料。对 DE 材料的研究表明,不对称电极、电极纤维复合材料会对薄膜的各向异性产生影响,预拉伸将影响 DE 的电场强度,温度影响 DE 的力电耦合性能。虽然研究的学者很多,但是有关 DE 材料的力电耦合特性和能量收集研究仍然没有公认的结论,导致 DE 材料的驱动器也未能实现商业化,严重影响了DE 的发展与实际应用。继续改善和明确材料性能,设计新型的 DE 材料结构将是实际工程应用开发的重要任务。

参考文献:

[1] 尹博. 纺织报告,2017(7):39~42.

[2] 张育香. 染整技术,2017,39(2):6~9.

[3] 施楣梧,肖红. 高科技纤维与应用,2010,35(4):5~8,15.

[4] 俞洛伊,刘茜,廖发,马鑫,邱昱琛. 黑龙江纺织,2015,1:16~19.

[5] 许博皓,杨会歌,刘旭影,代坤,王猛,钱彬彬,陈金周. 包装工程,2017,38(13):51~54.

[6] 曹建波,任钰雪,鄂世举,夏文俊,周武. 电子元件与材料,2017,36(7):9~16.

[7] 盛俊杰,李树勇,张玉庆,陈花铃. 动力学与控制学报,2017,15(2):119~124.

[8] 何青松,张梦,杨旭. 机械制造与自动化,2017,46(2):153~155+180.

[9] 金丽丽,鄂世举,曹建,刘爱飞,江孝琪,葛彩军,朱喜林. 机电工程,2016,33(1):12~17+36.

[10] 钟林成,王永泉,陈花玲. 中国科学:技术科学,2016,46(10):987~1004.

[11] 戈风行,杨丹,田明,宁南英,武文杰,张立群. 材料科学与工艺,2016,24(5):1~8.

[12] 施江吉,孙文杰,马梓淇. 绝缘材料,2016,49(9):66~71.

[13] 盛俊杰,张玉庆,李树勇. 四川理工学院学报(自然科学版),2016,29(4):16~20.

[14] Ahmed M, Billah M M. Int J Adv Robot Syst, 2016, 84(13).

[15] Chen T, Liu B. Mater Lett, 2018, 211: 69~73.

[16] Getz R, Shmuel G. Int J Solids Struct,2017,128: 11~22.

[17] Hoffstadt T, Maas J. Ieee-Asme T Mech, 2017,22(5): 2241~2251.

[18] Kim S J, Hwang D Y, Moon H, Choi H R, Koo J C. Micro Syst Technol, 2017,23(11): 5163~5169.

[19] Mao G, Wu L, Liang X Y, Qu S X. J Appl Mech-T Asme, 2017,84(11).

[20] Mutlu R, Alici G, Li W H. Ieee-Asme T Mech, 2016,21(3): 1467~1478. .

[21] Park S, Park B, Nam S, Yun S, Park S K, Mun S, Lim J M, Ryu Y, Song S H, Kyung K U. Opt Express, 2017, 25(20): 23801~23808.

[22] 陈洁,李玉麒,刘庆飞,何山,詹仲强. 华南理工大学学报(自然科学版),2016,44(8):13~17,25.

[23] 时秋伟. 中国化学会第 30 届学术年会摘要集-第四十一分会:纳米材料与器件. 2016:1.

[24] 杨丹. 新颖介电弹性体复合材料的设计、制备及性能. 北京:北京化工大学博士毕业论文,2014.

[25] 邓磊. 介电弹性体的力电行为与动态性能研究. 长沙:湖南大学硕士毕业论文,2016.

[26] 葛彩军. 介电弹性体发电机机电耦合机理研究. 杭州:浙江师范大学硕士毕业论文,2016.

[27] 丁燕. 聚合物的粘附和电致动性能研究. 南京:南京航空航天大学硕士毕业论文,2011.

[28] 白恩光. 介电弹性体共存态分析. 兰州:兰州理工大学硕士毕业论文,2016.

[29] 刘怀民. 弯曲型导电聚合物驱动器机电系统建模与逆模控制. 南华大学硕士毕业论文,2016.

[30] 郭飞泉,刘茜,翟志刚,倪楷淇,郑金杰. 山东纺织科技,2016,57(2):53~56.

[31] 樊亚玲,杨宏亮. 金属功能材料,2016,23(2):40~44.

[32] Ren J, Wang C. Appl Math Mech-Engl, 2016,37(8): 1067~1076.

[33] Sharma A K, Bajpayee S, Joglekar D M, Joglekar M M. Smart Mater Struct, 2017,26(11).

[34] Subramani K B, Cakmak E, Spontak R J, Ghosh T K. Adv Mater, 2014,26(18): 2949~2953.

[35] Yurchenko D, Lai H, Thomson G, Val D V, Bobryk R V. Appl Energ, 2017,208: 456~470.

[36] 郭东杰,李亚珂,刘瑞,方少明. 功能材料,2015,46(22):22103~22107,22112.

[37] 陈洁,李玉麒,郑国华. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(10):123~127.

[38] 刘怀民,王湘江. 机电工程,2015,32(6):783~787.

[39] 刘立武,李金嵘,吕雄飞,李丰丰,刘彦菊,冷劲松. . 中国科学:技术科学,2015,45(5):450~463.

[40] Fang X,Li A,Yildiz O,Shao H,Bradford P D. Carbon,2017,120: 366~373.

[41] Fasolt B,Hodgins M, Rizzello C,Seeleck S. Sensor Actuat A-Phys,2017, 265: 10~19.

[42] Feng G H,Yen S C. Ieee EDTM,2017,216~218

[43] 张梦. 胶囊机器人的 IPMC 驱动设计. 南京:南京航空航天大学硕士毕业论文,2015.

[44] 马艳丽. 基于硅橡胶/碳纳米管复合导电膜的电容传感器的制备与研究. 上海:上海工程技术大学硕士毕业论文,2015.

[45] 周丽萍,王化明,魏礼建. 机械设计与制造,2014(11):115~118.

[46] 武观,胡颖,陈韦. 科学通报,2014,59(23):2240~2252.

[47] 罗华安,王化明,游有鹏,朱银龙,杨位东. 机械工程学报,2014,50(19):80~87.

[48] 吕雄飞. 基于介电弹性体智能软材料的能量收集理论研究 with 器件设计. 哈尔滨:哈尔滨工业大学硕士毕业论文,2014.

[49] 李莉. 活性炭及聚苯胺在电致动膜材料中的应用研究. 上海:上海师范大学硕士毕业论文,2014.

[50] Zhang H,Wang Y X,Gobada H,Khoo B C,Zhang Z S,Zhu J. J Appl Mech-T Asme,2017,84(12).

[51] Zhang X M,Zhang J J,Li C H,Wang J F,Xia L C,Xu F,Zhang X L,Wu H,Guo S Y. Chem Eng J,2017,328: 609~618.

[52] 朱银龙,王化明. 农业机械学报,2013,44(12):301~306.

[53] 陈花玲,王永泉,盛俊杰,常龙飞,王延杰. 机械工程学报,2013,49(6):205~214.

[54] 刘浩亮. 硅橡胶介电弹性体复合材料的制备与性能研究. 北京:北京化工大学硕士毕业论文,2012.

[55] 欧阳杰,胡意立. 机电工程,2011,28(10):1203~1205+1221.

[56] 郭闯强,吴春亚,邹添,张子健,刘宏. 哈尔滨工业大学学报,2016,48(1):1~12.

Research Progress of Dielectric Elastomers

LU Ting-ting, LIU Qian* , XIN San-fa

(School of Fashion Engineering , Shanghai University of Engineering Science ,Shanghai 201620 , China)

Abstract:Dielectric elastomers are a kind of new textile materials that can be deformed under energy-excited electric field to perform energy conversion. They belong to electroactive polymers, and electroactive polymers have electronic and ionic types. Dielectric elastomers have broad application prospects in the design of flexible actuators. However, there are still many technical difficulties. There is still a need for more in-depth studies on the composition of elastomeric matrix materials, optimization of flexible electrode materials, and energy harvesting. In this paper, after clarifying the working principle and classification of the dielectric elastomer, it summarized the electrode, pre-stretching, temperature and energy collection, etc. , and prospected its application prospects.

Key words:Electroactive polymers; Dielectric elastomers; Drivers; Energy harvesting