

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.003

介电弹性体材料研究现状综述^{*}

金丽丽¹, 鄂世举², 曹建波^{2*}, 刘爱飞¹, 江孝琪¹, 葛彩军², 朱喜林²
(1. 兰州交通大学 机电工程学院, 甘肃 兰州 730070; 2. 浙江师范大学 工学院, 浙江 金华 321000)

摘要:针对目前介电弹性体材料的相关研究进展及存在的问题,在分析介电弹性体特性的基础上,根据其不同种类,研究了硅橡胶、聚氨酯、丙烯酸等材料及复合材料的性质及制备方法;根据介电弹性体的不同用途,分析了近些年其在发电、仿生学、生物医学、光学器件、微系统、航天航空方面的具体应用及其未来发展趋势,并总结了介电弹性体在未来应用中存在薄膜制备、柔性电极材料覆盖绝缘、偏置高压电源限制、降低能量损耗和提高机电转换效率等相关问题,针对这些问题提出了相应的建议及未来发展思路。研究表明,介电弹性体具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、自偏置发电、效率优化等方面还要进行更为深入的研究。

关键词:介电弹性体;介电常数;复合材料;制备方法

中图分类号:TH140;TB33

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0012-07

Review of current research for dielectric elastomer materials

JIN Li-li¹, E Shi-ju², CAO Jian-bo², LIU Ai-fei¹, JIANG Xiao-qi¹, GE Cai-jun², Zhu Xi-lin²

(1. School of Mechanical and Electrical Engineering, Lanzhou Jiaotong University, Lanzhou 730070, China;

2. College of Engineering, Zhejiang Normal University, Jinhua 321000, China)

Abstract: Aiming at the relevant research advancing and the existing problems of dielectric elastomer material, the performance of dielectric elastomers fundamentally were analyzed. The property and preparation methods of materials and composite materials such as silicone rubber, polyurethane, acrylic acid and so on were studied according to their different types. The concrete application and future trend of development about power generation, bionics, biomedicine, optical devices, micro systems, aerospace aviation in recent years were analyzed according to the different applications of dielectric elastomer. The related issues of dielectric elastomer in the future applications about the preparation of thin film, the covering insulation of flexible electrode material, the limitation of bias high voltage source, the decrease of energy loss and the increase of electromechanical conversion efficiency were summarized. Some corresponding suggestions and ideas for future development aiming at the above problems were proposed. The results indicate that the dielectric elastomer has broad application prospect, but there are still many technical difficulties, and it shall be deeply studied in the aspects of the material composition of elastomer matrix, the material optimization of flexible electrode, the self-filling for power generation and the efficiency optimization and so on.

Key words: dielectric elastomer; dielectric constant; composites; preparation method

0 引言

在20世纪90年代逐步发展起来的电活性聚合物(electroactive polymer, EAP),其特性是在电刺激下发生

大的形状变化,这使得许多科学家和研究人员致力于改造EAP材料,并扩大了高分子材料的应用范围。EAP材料的行为模式类似于生物肌肉,具有高断裂性、固有振动阻尼、大驱动应变等特点,因此,常将其作为“人工

收稿日期:2015-07-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51377146,51407162);浙江省自然科学基金资助项目(LQ13E050009)

作者简介:金丽丽(1991-),女,浙江台州人,主要从事介电弹性体方面的研究。E-mail:276828373@qq.com

通信联系人:曹建波,男,副教授,硕士生导师。E-mail:caojianbo2008@163.com

肌肉”的代名词^[1-3]。EAP 材料可以比常规压电陶瓷提供更大的应变,通常可达到 380% 的应变变形^[4],国内也有类似的实验验证了该程度的大应变变形^[5]。在同样的应变条件下,EAP 适用于更多的应用需求。

一般来说,EAP 材料可以分为电子型 EAP 和离子型 EAP,具有不同的行为模式^[6-7]。如电子型 EAP 的驱动是利用电场或库仑力,可分为电致伸缩弹性体、介电弹性体、铁电聚合物;离子型 EAP 的驱动原理是利用离子的扩散或迁移^[8],有碳纳米管、导电聚合物、聚合物凝胶、离子聚合物-金属复合材料等种类,不同类型的 EAP 材料具有不同的优、缺点,从而应用在不同场合。其中,归属于电子型 EAP 的介电弹性体材料(dielectric elastomer, DE)广泛应用于致动器、传感器、发电机等,具有良好的应用性能。DE 从环境资源(如海洋能、风能、水流、人体运动等)中回收能量,由于其高的能量密度和高的转换效率,使其具有可观的发展前景。

本研究主要介绍 DE 材料的相关研究发展,分析总结不同类型材料的性质、制备方法及近些年的具体应用来总结其未来发展趋势,并提出未来发展中可能存在的问题,以期指引后续研究的重要方向,优化新型材料性能并扩大其应用范围。

1 介电弹性体的特性

1880 年,Wilhelm Conrad Röntgen 首次提出 DE 致动原则:电极两端的电压诱导出现一个静电压对 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 装置通常由一个 DE 材料和覆盖其上下表面的柔性电极组成,具有反应快速、高机械能量密度、大致动荷载等特点,DE 材料模型及致动原则如图 1 所示。

DE 的一种双极板电容器装置致动效应,也可以理

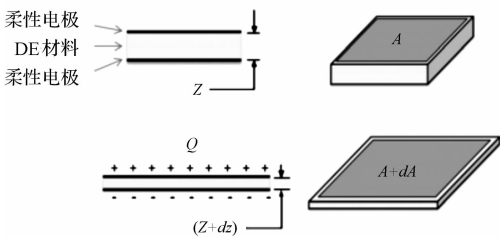


图 1 DE 材料模型及致动原则

解为电极加载电荷后,上、下柔性电极之间的电荷相互吸引产生麦克斯韦应力,从而压缩了 DE 薄膜,实现电能到机械能之间的转换。

DE 变换器的工作原理可以由多种方式来导出,如 Peltre 等提出,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 。假设体积恒定:

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

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

从式(1)可以看出,对于恒定电荷 Q ,膜在任何影响下出现厚度增加,从而机械能转变为电能,变换器当作传感器或发电机使用。相反的,膜在任何影响下出现厚度减小,从而电能转变为机械能,变换器当作驱动器使用。

2 介电弹性体的种类、性质、制备及其应用

2.1 介电弹性体材料的种类

目前常用的介电弹性体材料有硅橡胶、硅树脂、聚氨酯、丁腈橡胶、丙烯酸、天然橡胶、亚乙烯基氟化三氟乙烯及其复合材料,具体如表 1 所示^[9-18]。

表 1 常见的介电弹性体

	填料	基质	参考文献序号
聚合物共混	碳酸钡、二氧化钛、陶瓷	硅橡胶/聚氨酯	[9]
	聚氨酯	硅橡胶	[9]
	二氧化硅、Fe ₂ O ₃	硅橡胶	[10]
	石墨粉	硅橡胶	[11]
	钛酸钡	聚二甲基硅氧烷	[10]
弹性体与有机或无机填料共混	石墨烯	聚氨酯	[12]
	碳纳米球(CNS)	聚氨酯	[13]
	铜酞菁(CuPc)	丙烯酸	[14]
	铝	丙烯酸酯	[15]
	碳纳米管	丙烯酸	[16]
电场下弹性体与无机填料交联		硅橡胶	[17]
	碳黑、石墨和多壁碳纳米管	丁腈橡胶	[18]

2.2 介电弹性体的性质及制备方法

介电弹性体的特性影响因素主要有介电常数、介电击穿强度、体积电阻率、响应速率、剪切模量、杨氏模量、延伸率等。近些年,经实践研究得知增加聚合物的介电常数的常用方法是添加填料,如金属氧化物填料,如 TiO_2 、 BaTiO_3 、 Al_2O_3 等,同时还有大量的导电填料,如膨胀石墨、碳纳米管、 $\text{CaCuTi}_4\text{O}_{12}$ 、铜酞菁低聚物等。

2.2.1 硅橡胶及其复合材料

硅橡胶具有较好的弹性性能、应变响应速度,能够在较高温度下维持模量恒定,与填料形成复合材料后的电性能和机械性能发生改变,是制备介电弹性体材料常用的基质之一。

Frederikke Bahrt Madsen 等人使用偶极硅氧烷共聚物合成新型高介电常数弹性体,在保持介电击穿强度不变,随着硝基苯官能共聚物中硝基苯(20 wt% ~ 200 wt%)增长,介电常数、介电损耗和刚度随之增大,当 5.6 wt% 硝基苯和 $1\,200\text{ g} \cdot \text{mol}^{-1}$ 二甲基硅氧烷合成的共聚物膜整体性能最佳。制备方法:官能化叠氮基团以不同程度与高介电常数分子 1-乙炔基-4-硝基苯进行铜催化的叠氮化物-炔 1,3-偶极环加成(CuAAC)反应。

Giuseppe Gallone 等人采用 BJB TC-5005 A/BC 型硅橡胶(PDMS)、聚系列 74 双组分聚氨酯(PU)与不同填料合成新的介电弹性体,得到体积分数为 PDMS/PU = 60/40 比 PDMS/PU = 80/20 具有更好的机电性能,15 vol% PMN 比 15 vol% BaTiO_3 和 15 vol% TiO_2 具有更高的介电常数,总体增加介电常数和机电响应,降低了拉伸弹性模量,具有良好的弹性能量密度。制备方法:以氯仿为溶剂的 P3H7 (Poly 3-hexylthiophene) 薄片溶解在 PDMS 预聚物内,形成 PDMS/P3H7 共混物,钛酸钡、二氧化钛、陶瓷填料在共混物固化前被加入,经喷射静置真空室内 15 min 消除气泡,后室温固化 24 h ~ 48 h。

Hang Zhao 等人使用二甲基硅油(DMSO)作为刚度调谐器制备刚度可调的 BaTiO_3 /PDMS 复合材料,显著改善机电驱动灵敏度(0% ~ 490%)和驱动区域应变(0% ~ 350%),其介电和机械性能具有优异热稳定性。添加 PDMS 可提高机电性能,添加 DMSO 可减少相对介电常数和弹性模量。制备方法:采用机械混合法混合 100 nm 直径的 BaTiO_3 粒子 100 phr 和 0 ~ 100 phr 的 DMSO 在 0.1 Pas 粘度下制成 PDMS,后在室温下 15 MPa 压力下压制 8 h,制成 BT/PDMS。

A Roggero 等人^[19]采用室温下为网状的双组分硅橡胶弹性体,证实样品厚度的线性热膨胀使表面

电位随温度呈线性变化,降低电介质的介电常数,增加导电率,而硅酸盐、 Fe_2O_3 填料决定材料低频电行为。制备方法:A 部分由 35% 的聚苯基甲基硅氧烷基质混合二氧化硅、氧化铁填料,B 部分固化剂和 Pt 催化剂下的聚合反应,将 A、B 两部分(重量比为 9:1)手动混合,后倒入铝基底模具中,置于 100 °C 环境下固化 6 h。

2.2.2 聚氨酯及其复合材料

Tian Chen 等人采用聚(甲基丙烯酸甲酯)官能化的石墨烯/聚氨酯(MG-PU)合成介电弹性体复合材料,不同质量分数 MG 制备薄膜频率范围为 40 Hz ~ 110 kHz,随着频率增加,MG-PU 的介电常数减少、介电损耗增加。如 1.50 wt% MG-PU 薄膜相对介电常数为 28.21、电场诱导应变为 32.8%、断裂伸长率为 440%、杨氏模量为 39.3 MPa、介电损耗为 4.68 (在 1 kHz 时)。制备方法:采用 ATRP 技术将氧化石墨烯制备成 MG,使用有序介孔碳(OMC)制备聚氨酯。

Suting Liu, Ming Tian 等人^[20]研究了热还原氧化石墨烯/热塑性聚氨酯(TRG/TPU)具有高介电常数、低介电损耗,在 103 Hz 的频率下机电灵敏度增长 106 倍,在 250 V/mm 低电场中通过增加 2.0 vol% TRG,使驱动应变增加了 17 倍。制备方法:采用 1 000 目的天然石墨制备的石墨氧化物在二甲基甲酰胺溶剂(98%, $1\text{ mg} \cdot \text{ml}^{-1}$)中溶解,在 GA 98 超声波细胞粉碎机中 1 000 W 震荡 1 h 形成石墨烯氧化物纳米片(GONS),离心去除杂质得 GONS 粉末后过滤、干燥。180 °C 真空中还原 GONS 1 h 制得 TRG,再制备 GONS/TPU 复合材料,后 15 MPa、180 °C 条件下经过 1 h 原位局部热还原法制得 TRG/TPU。

Yang Yao 等人采用碳纳米球(CNS)作为导电填料以提高热塑性聚氨酯(TPU)的机电性能,结果表明,多羟基 CNS 可形成有氢键的热塑性聚氨酯分子,得到的复合材料具有高机械强度,低弹性模量和磁滞损失。如 5 wt% CNS/TPU 复合材料的介电常数 137.3,低的介电损耗(<1),提高驱动应变。制备方法:在 10 wt% 的四氢呋喃(THF)中搅拌溶解 TPU,溶解 CNS 于体积比为 14:1 的 THF、二甲基甲酰胺(DMF)混合溶剂中超声处理 6 h,将 TPU 和 CNS 溶液混合均匀,经浓缩、浇注、干燥处理得到 CNS/TPU。

2.2.3 丙烯酸类弹性体

丙烯酸类弹性体中应用最多的是美国 3M 公司生产的 VHB 4910,特点是 960 kg/m^3 低质量密度、-10 °C ~ 90 °C 的可操作温度范围、高粘弹性且具有不同厚度和长度类型,较好的相容性,常用于加工多种驱动器设

备、发电机等。

Ruonan Liu 等人合成的丙烯酸弹性体 (ACM) 和铜酞菁 (CuPc) 的嫁接物,具有高介电常数、良好介电性能和热稳定性、低介电损耗和显著增加的介电响应。制备方法:通过复合超声搅拌使 ACM、CuPc 均匀混合,再浇注在聚四氟乙烯模具中 70 ℃ 空气干燥 12 h,在 120 ℃ 下退火并在真空中放置 12 h 后缓慢冷却到室温,得到 CuPc 低聚物嫁接 ACM 弹性体薄膜。

Baohong Chen 等人^[21]在离子液体 1-乙基-3-甲基咪唑乙基硫酸盐中用丙烯酸自由基聚合合成离子型凝胶,其杨氏模量为 (3.1 ± 0.6) kPa,断裂强度为 (7.4 ± 0.4) kPa,断裂延伸为 4.6 ± 0.3 ,电导率为 $0.23 \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$,离子凝胶的吸水性能可增加后续电导率。制备方法:在曝光室内,离子液体在 50 W 功率和 365 nm 波长下辐射 2 h,得到可伸缩的、透明的聚(丙烯酸)离子型凝胶薄片。

Wei Hu 等人研究了一种高介电常数弹性体—铝纳米颗粒和丙烯酸酯的共聚物,其介电常数为 8.4,介电强度为 $140 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$,最大驱动面积应变为 56%,断裂伸长率为 1 100%,可见铝纳米粒子可以提高介电常数、基质刚度、断裂伸长率、磁场强度等。制备方法:选用球形铝纳米颗粒经磷酸 2-丙烯酸酯改性,磷酸形成胶结良好的氧化物壳,丙烯酸酯紧密联系颗粒表面,经本体聚合发生共聚反应形成均匀的纳米复合材料。Enes Cakmak 等人同样证实 D-EAP 驱动器的定向驱动应变可以极大地和方便地增加由电极诱导的各向异性,并通过优化碳纳米管薄片材料的电气和机械性能,可以提高驱动应变。

2.3 介电弹性体的应用

2007 年 8 月,国际非盈利独立研究机构 SRI 开展了海洋实验,在一个浮标上安装电话化聚合物人工肌肉 (EPAM) 发电机,实现了从自然海浪运动产生电能。2008 年 12 月 8 日,SRI 在加利福尼亚附近海洋测试了一个浮标式海洋能发电机,证实其产生的电力可以存储在一个蓄电池中。该发电机使用 EPAM 技术,可直接通过波浪运动产生电能,而不需要通过复杂和昂贵的液压传动装置,在很少的运动部件支持下即可改变聚合物形状产生电能,降低了生产电力成本。测试结果显示,该发电机浮标输出功率较为适度,产生的电力可以在一个电池中存储。该发电机可以适用于小溪、河流等场所,使用同样的设计以产生更加显著的输出功率并为浮标提供电能或为陆地提供电网服务,这将是长期发展的目标。

除此之外,Maas and Graf 等人^[22]利用介电弹性体材料组成的管体同样进行水力发电,介绍了环境能源进行不同能量回收设备,并详细描述了一种新型溢流能量转换器,其优点是具有广泛的可扩展性,附加的机械部件较少,可以应用在小河流中,可作为环境可持续发展的可再生能源技术代表。T G McKay, S Rosset 等人^[23]制造一种体积小于 1 cm^3 的软介电弹性体发电机,可以很好实现从环境和人体运动中回收能量,适用于低频运动且结构紧凑、质地轻,并提出了一个数学模型用来设计发电机的电子控制系统以优化能源生产。Rocco Verdecy 等人^[24]设计一种充气圆形膜片介电弹性体发电机 (ICD-DEGS),可以用来将气动能量转换为有用的电能,其潜在应用是作为动力输出装置系统,基于振荡水柱 (OWC) 原则的波浪能转换器 (WEC)。

Samuel Rosset, Benjamin M O'Brien 等人^[25]提出了介电弹性体驱动器作为可调光学应用,如可调谐光栅,并报告了一种新的薄变形光栅制造方法,是基于一个水溶性主体响应,一个高粘弹性基础设备得到光栅周期出现 27% 变化。

M Follador, F Tramacere 等人^[26]分析磁铁、夹持器、导轨、仿生设备、吸盘等附件受到应用的环境条件、需求等影响,根据章鱼吸盘可减少压力、可应用在平滑和部分粗糙表面特点,设计了吸盘型介电弹性体致动器,可以在水中产生 6 kPa 高压且少于 300 ms 就可以达到最大压力。Federico Carpi 等人^[27]开发了一种刚度可变的驱动器,由硅橡胶薄膜制作而成,可开发刚度控制策略允许力-伸长率相应的电动调节,有助于开发电控动态矫形器为有运动障碍的病患手康复护理,实时控制患者训练以提高疗效,只要佩戴矫正器正确而不需任何治疗师帮助。Thanh-Giang La, Gih-Keong Lau 等人^[28]为阻止介电弹性体的介电击穿避免产生破裂,设计了一种在软膜胶囊中封装绝缘油来维持在 835 MVm^{-1} 这一超高击穿电场中介电弹性体驱动器 (DEA) 不破裂,驱动器性能可媲美那些人类屈肌可实现的在肘关节弯曲时达到 1.2 MPa,这种类肌肉、高应力 DEA 将推动未来类机器人的发展。

3 介电弹性体未来研究和发展趋势

3.1 发电方向研究

许多国家都开始重新认识并利用潮汐能、海洋能、风能等自然可再生能源。在海洋能方面的应用,避免了传统使用的由海浪推动的液压活塞泵,如浮标式海洋

能发电系统就是专门设计用于海浪超过 2 m ~ 3 m 的场所^[29]。但由于基于 EPAM 的海浪发电系统具有简单性、高效率、可伸缩的规模特点,未来其必将朝着大型波浪和小型波浪的方向共同发展,大大降低发电成本。未来 DE 发电机发展将不仅仅局限于海洋能,同济大学的陈明教授^[30]研究设计了依靠风力进行发电的电话性聚合物微型发电机,还有如研究的回收自然环境(如树叶晃动)和人体运动(如鞋与地面产生的冲击)等能量,溪流、河流等小型水流能量回收。在广泛应用和分布式的自然能源这一巨大的潜力能源下,DE 发电机将帮助解决全球变暖、能源需求等问题。

3.2 驱动方向研究

3.2.1 仿生方面的发展

仿生机器人具有高模量、轻质量、小体积、简单机械结构和低成本特点,可广泛应用于勘探、导航、狭小空间或限制环境中救援等场合。最早出现的是 2002 年 12 月日本大阪 Eamex 公司生产的可自由在水中游泳的机械鱼。而后出现了 CWRU 研究的板球微型机器人、斯坦福大学研究的四足机器人、SMA 驱动的跳跃机器人、SRI 的步行机器人、Uikyum Kim 等人研究的小仿生四足机器人、章永华等人^[31]设计的仿生机器人关节机构。

3.2.2 生物医学方面的发展

对于如中风后遗症、创伤、术后愈合等存在运动障碍的病患,研究人员进行介电弹性体驱动方面的研究开发。如 Federico Carpi 等人研究的动态康复矫形器可以为通过自我复原练习的患者提供帮助;Carpi 等人和冷劲松等人研究了眼球控制装置;瑞士联邦材料测试与开发研究所(EMPA)研发了人工关节;Goulbourne N 等人研究了一种膜片泵并将其应用在人工心脏方面;CHUC Nguyen Huu 等人^[32]设计了可嵌入的趾骨关节机器人手指,并可扩展为机械手、机制腿式机器人等。

3.2.3 光学方面的发展

Samuel Rosset 等人研究的可调谐光栅;Federico Carpi 等人研究的可调镜头;Aschwanden M 等人研究的可调衍射光栅;Beck M 等人研究的可调相位延迟器;Romano P 等人研究的可调毫米波相位转换器;Jordan G 等人研究了一种驱动微光学基板,呈现光学部件一维高精度定位操作。

3.2.4 微系统方面的发展

介电弹性体材料适应于小型化、复杂化系统和结构特点,可以在许多变化环境中应用,近些年在微系统中得到发展。Alexander K. Price 等人使用集成介电弹性体驱动器开发微流体装置实现通用的非偏置水动力

注射;C. Fenga 等人研究了大振幅微光束谐振器;Michael R Hays 等人采用电话性薄膜气动控制研究的微型飞行器机翼。

3.2.5 航空航天方面的发展

随着航空航天工业发展的同时也不断提高了对复合材料性能要求,特别是一些具有良好介电性能材料。Burkitt, Brian 等人通过创新硅技术开发了耐溶剂硅树脂弹性体、燃料等,吸收热循环过程中的应力。

介电弹性体在驱动方面的发展应用范围不断扩大,得到了广泛的关注和研究。随着各种应用的开发,未来其必将改变人们的生活,带来更多的便捷服务。

3.3 未来应用中需要解决的问题

(1) 薄膜制备中存在的问题。通常做法是采用各种高介电常数的填料来增加介电常数、介电击穿强度和改善驱动应变、弹性模量复合材料的能量密度、断裂伸长率、力输出等。而介电弹性体中的介电性能和弹性模量参数之间存在对立关系,添加高介电性能填料将增加材料模量,但可能不会较好改善机电性能;不同比例填料对材料性能产生不同程度影响,需优化填料用量。

笔者在以下几方面提出建议:①研究不同填料用量,制备高介电、低模量弹性体材料;②研制更轻薄的介电弹性体薄膜,如现有的 1 mm、0.5 mm VHB4910 降低至微米级别,产生更大变形;③采用更加细密的填料颗粒,增加粒子在电极中的分散均匀和紧密粘合程度,改善介电弹性体薄膜性能。

(2) 柔性电极材料的覆盖绝缘问题。柔性电极制备可以在基质上涂覆电极材料形成,也可以通过与填料合成复合材料,柔性电极不但要能与薄膜一起伸缩,而且还要与高压偏置电压相连,因此,其覆盖绝缘工艺也是一个制约其广泛应用的问题。

(3) 偏置高压电源的限制问题。每毫米弹性体材料要采用上千伏驱动电压,导致其驱动电压过高,限制了应用范围。

后续研究可通过如降低基质厚度以降低驱动电压,或利用 DE 本身升压特性,并基于翻转电荷泵原理,可将 DE 所提升电压的一部分转换为电荷实现自偏置去除高压电源。

(4) 降低能量损耗和提高机电转换效率的问题。介电弹性体材料用于发电机方面时,由于存在聚合物损耗、电极损耗、电力电子损耗、能量存储装置损耗、发电过程的机械损耗等,降低了发电能量回收效率。

后续研究可以通过降低应用电压、电极内阻,提高电极导电率,减少能量转换器中的电阻损耗,优化机械能到电能转换循环方式,从而提高机电转换效率。

4 结束语

基于介电弹性体材料的高弹性能密、耐冲击性、循环周期长、低成本等特点,其产生了一系列驱动、发电、传感等方面的技术研究,在未来的发电、仿生、生物学、光学、微系统、航空航天等方面有较好的应用前景,将会对人们的现有生产生活(人体运动能量回收、动态康复矫形器、人工关节等)、环境(可再生新能源)、社会产生很大影响。

笔者在研究现有资料的基础上,对介电弹性体的薄膜制备、柔性电极覆盖、高压电源、能量损耗及转换效率问题等进行了相关分析并提出建议,后续发展还必须针对这几方面问题展开深入研究以优化其整体机电性能,为未来的广泛应用做好技术准备。

参考文献(References):

- [1] BAR-COHEN Y. Electroactive polymers (EAP) actuators as artificial muscles[M]. Society of Photo Optical, 2004.
- [2] CARPI F, DE-ROSSI D, KORNBLUH R, et al. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers[M]. Elsevier, 2008.
- [3] CHU P K, Liu Xuan-yong. Biomaterials Fabrication and Processing Handbook[M]. CRC Press Inc, 2008.
- [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] 欧阳杰, 胡意立. 新型电致活化材料—介电弹性体的驱动特性研究[J]. 机电工程, 2011, 28(10): 1203-1205.
- [6] NIU P, CHAPMAN P, RIEMER R, et al. Evaluation of motions and actuation methods for biomechanical energy harvesting[C]. 2004 IEEE 35th Annual Power Electronics Specialists Conference, 2004.
- [7] MOHSEN S, HANS-JORG S. Intelligent Materials[M]. Los Wises press, 2008.
- [8] 刘怀民, 王湘江. 三层结构导电聚合物驱动器动态特性及其建模研究[J]. 机电工程, 2015, 32(6): 783-787.
- [9] GIUSEPPE G, FABIA G, FEDERICO C. Perspectives for new dielectric elastomers with improved electromechanical actuation performance: composites versus blends[J]. **Polymer International**, 2010, 59(3): 400-406.
- [10] ZHAO Hang, ZHANG Ling, YANG Min-Hao, et al. Temperature-dependent electro-mechanical actuation sensitivity in stiffness-tunable BaTiO₃ / polydimethylsiloxane dielectric elastomer nanocomposites [J]. **Applied Physics Let-**

ters, 2015, 106(9): 0929041-0929045.

- [11] GIH-KEONG L, HOONG-TA L, JING-YING T. Light-weight mechanical amplifiers for rolled dielectric elastomer actuators and their integration with bio-inspired wing flappers[J]. **Smart Materials and Structures**, 2014, 23(2): 0250211-02502113.
- [12] CHEN Tian, QIU Jin-hao, ZHU Kong-jun, et al. Poly (methyl methacrylate)-functionalized graphene/polyurethane dielectric elastomer composites with superior electricfield induced strain[J]. **Materials Letters**, 2014, 128(1): 19-22.
- [13] YAO Yang, NING Nan-ying. Largely improved electromechanical properties of thermoplastic polyurethane dielectric elastomer by carbon nanospheres [J]. **RSC Advances**, 2015, 5(30): 23719-23726.
- [14] LIU Ruo-nan, WANG Jing-wen, LI Qing. Copper phthalocyanine oligomer grafted acrylic elastomer nanocomposites with high dielectric constants[J]. **Journal of Applied Polymer Science**, 2014, 131(6): 399751-399757.
- [15] HU W, ZHANG S N, NIU X, et al. An aluminum nanoparticle-acrylate copolymer nanocomposite as a dielectric elastomer with a high dielectric constant [J]. **Journal of Materials Chemistry C**, 2014, 2(9): 1658-1666.
- [16] ENES C, FANG Xiao-meng, OZKAN Y. Carbon nanotube sheet electrodes for anisotropic actuation of dielectric elastomers[J]. **Carbon**, 2015, 89: 113-120.
- [17] FREDERIKKE B M, YU Li-yun, ANDERS E D, et al. Silicone elastomers with high dielectric permittivity and high dielectric breakdown strength based on dipolar copolymers[J]. **Polymer**, 2014, 55(24): 6212-6219.
- [18] TIEN-DAT N, CABG-TOAB N, DONG-HYUK L, et al. Highly Stretchable Dielectric Elastomer Material Based on Acrylonitrile Butadiene Rubber[J]. **Macromolecular Research**, 2014, 22(11): 1170-1177.
- [19] ROGGERO A, DANTRAS E, PAULMIER T. Electrical behaviour of a silicone elastomer under simulated space environment[J]. **Journal of Physics D: Applied Physics**, 2015, 48(13): 1353021-13530210.
- [20] LIU Su-ting, TIAN Ming. High performance dielectric elastomers by partially reduced graphene oxide and disruption of hydrogen bonding of polyurethanes [J]. **Polymer**, 2015, 56(1): 375-384.
- [21] CHEN Bao-hong, LU Jing-jing. Highly Stretchable and Transparent Ionogels as Nonvolatile Conductors for Dielectric Elastomer Transducers [J]. **ACS Applied Materials and Interfaces**, 2014, 6(10): 7840-7845.

(下转第36页)

本文引用格式:

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, 36.

JIN Li-li, E Shi-ju, CAO Jian-bo, et al. Review of current research for dielectric elastomer materials[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2016, 33(1): 12-17, 36.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>