评述

基于介电弹性软体材料的能量收集: 现状、趋势与挑战

钟林成^①, 王永泉^{①②*}, 陈花玲^{①③}^① 西安交通大学机械工程学院, 西安 710049;^② 西安交通大学机械制造系统工程国家重点实验室, 西安 710049;^③ 西安交通大学机械结构强度与振动国家重点实验室, 西安 710049

* E-mail: yqwang@mail.xjtu.edu.cn

收稿日期: 2016-01-07; 接受日期: 2016-07-05; 网络出版日期: 2016-09-27

国家自然科学基金(批准号: 51375367)和国家重点实验室开放研究课题基金(编号: sklms2014002)资助项目

摘要 介电弹性体作为一种新型电活性软体功能材料, 因具有柔性好、变形大、比能密度和能量转换效率高等多项优点, 在面向人体及自然界的能量收集领域具有巨大的应用潜能. 本文综述了国内外有关介电弹性体用于能量收集的研究现状及主要进展, 着重围绕 DE 能量收集行为机理及模型描述、材料性能对能量收集的影响、能量收集器件结构设计、电路设计及相关产品的开发与应用等研究内容, 分析了当前研究中存在的主要问题及挑战, 并对该课题未来的发展趋势及研究重点进行了展望.

关键词 介电弹性体, 能量收集, 系统优化, 黏弹性, 电路设计

1 引言

当前人类社会的可持续发展正面临前所未有的资源 and 环境压力, 由此也使得各种可再生能源的开发利用显得十分重要和紧迫. 作为这种需求和趋势的典型体现, 一种被称为能量收集(energy harvesting/energy scavenging)的技术近十余年来得到蓬勃发展. 所谓能量收集, 一般是指将存在于自然环境或人体机能之中, 原本或被浪费的能量(包括机械能、生物能等)加以捕获并转化为电能, 用以代替有限电源或电池, 来为各种中小型设备(如无线传感网络、嵌入

式智能结构、可穿戴数码装备、便携式电子产品等)提供动力. 目前, 能量收集已成为可再生能源利用中一个独立的技术分支, 应用对象涵盖到军事、航天、医疗保健、建筑监测、消费性电子等多个重要领域.

利用功能材料所具有的特殊的物理、化学或生物学效应, 来实现能量的获取与转化, 是能量收集领域基础而重要的研究内容. 人们对压电材料和形状记忆合金等用于能量收集已不陌生; 而在近年来, 一些低模量的软体活性聚合物材料, 更由于独特的功能特性, 引起了相关研究人员的极大兴趣.

电活性聚合物(electro-active polymers, EAP)是一

引用格式: 钟林成, 王永泉, 陈花玲. 基于介电弹性软体材料的能量收集: 现状、趋势与挑战. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 987-1004
Zhong L C, Wang Y Q, Chen H L. Energy harvesting based on soft material of dielectric elastomers: Status, trends and challenges (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 987-1004, doi: 10.1360/N092016-00020

类可在电激励下改变其形状或尺寸的聚合物材料的统称。按变形机理不同又可分为两大类^[1]: 一类是电场型, 即材料在电场力驱动下产生形变, 包括介电聚合物(dielectric polymers)、压电高聚物(piezoelectric polymers)和电致伸缩聚合物(electrostrictive polymers)等; 另一类是离子型, 其形变主要由带电离子的定向迁移引起, 包括离子聚合物-金属复合材料(ionic polymer metal composite, IPMC)及导电聚合物(conductive polymers, CP)等。

介电弹性体(dielectric elastomer, DE)是上述电场型 EAP 的代表性材料, 包括聚丙烯酸酯、硅橡胶、聚二甲基硅氧烷(PDMS)、天然橡胶等。当在这种具有良好介电性能的膜状基材的上下表面涂覆柔性电极并施加一定电压后, 它将在麦克斯韦静电力的作用下产生面内扩展, 厚度亦随之减小, 表现出电致变形的功能行为^[2]。同样, DE 也可以逆向工作在所谓“发电模式(generation mode)”^[3~5]: 拉伸并极化后的 DE 薄膜, 在弹性恢复的过程中会将机械应变能转化为电能。也就是说, 该种材料也具有能量收集的功能特性。

前期关于材料基本性能的研究表明, DE 用于能量收集至少具有以下优点:

- (1) 具有很高的比能密度和宽频范围内的高换能效率^[6,7];
- (2) 柔顺性好、质量轻(丙烯酸聚合物密度近似为 1 g/cm^3)、成本较低、无毒^[8];
- (3) 作为软体材料(等效弹性模量约为 1 MPa), 易与机械能量源直接耦合, 理论上无需中间转换环节;
- (4) 耐冲击、抗疲劳, 可工作在很宽的温度和湿度范围。据报道, DE 材料一般可承受 500 万次的机械拉伸循环而不致失效, 加电状态下亦可在水下工作

数月。硅树脂可工作在 $-50\sim 260^\circ\text{C}$ 的温度条件下, 丙烯酸酯可工作在 $-10\sim 70^\circ\text{C}$ 的温度条件下^[8];

(5) 易于加工成形, 其形状尺寸等可根据特定应用要求方便地加以调整, 高柔顺性的特点还可使其植入大变形结构中, 形成可靠实用的换能装置。

DE 材料的上述性能特点及低廉的生产成本, 使其在能量收集领域表现出极大的技术优势和应用价值。表 1 给出了 DE 与压电陶瓷、形状记忆合金等其他几种功能材料的性能对比。可以看出, DE 最显著的特点是变形很大, 且兼具较高的比能密度和换能效率, 如聚丙烯酸酯的比能密度高达 3.4 J/g , 换能效率可达 $60\%\sim 80\%$ ^[9]; 硅树脂的比能密度也有 0.75 J/g , 换能效率则可达到 90% 。总体上讲, 就能量收集所需的综合性能而言, 被称为“人工肌肉”的 DE 无疑是极具价值的功能材料之一, 尤其是在面向低频、大变形能量源(如人体运动、风和海浪等)的场合, 更是蕴含着巨大的应用潜力。

2 介电弹性体能量收集研究进展

2.1 DE 能量收集的工作原理及行为特点

基于 DE 的能量收集的工作原理及典型过程如图 1 所示^[10]。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。

表 1 介电弹性体与其他功能材料的性能比较

材料名称	最大应变 (%)	最大应力 (MPa)	理论比能密度 (J/g)	换能效率 (%)	响应速度	杨氏模量 (MPa)	泊松比	密度 (kg/m ³)
DE	聚丙烯酸酯	380	7.2	3.4	60~80	中	1~3	960
	硅树脂	63	3.0	0.75	90	快	0.1~1	1000
	压电陶瓷	0.2	110	0.013	90	快	$>10^4$	7500
	形状记忆合金	>5	>200	>15	<10	慢	10^5	6500
	电致伸缩材料	4	45	0.3	10	快	600	7500
	导电聚合物	12	34	10^{-3}	—	慢	$>10^3$	1500
	磁致伸缩材料	0.2	70	0.0027	60	快	0.1	8000

图 1 (网络版彩图)介电弹性体材料能量收集原理图^[10]

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(由材料黏滞损耗、电流泄漏和电子元件热损耗等引起)的转换与分配问题。

与致动行为相比, DE 能量收集是一种具有循环运动形式的连续过程, 整个过程要复杂很多。在一个循环周期内, 大变形 DE 结构体的有序伸缩与外部能量源输入、电路通断控制等都有着特定的交互与协同关系, 更多地体现了一种各环节、各要素相互影响和制约的系统行为机制。一些在 DE 致动中并非十分重要或较少涉及的问题, 在能量收集中则可能上升为影响其工作性能的关键问题。这就决定了基于 DE 的能量收集是一个既充满活力, 又面临挑战的全新课程。

现有的关于 DE 能量收集的研究, 从内容上大致可归纳为两个大的方面: (1) 有关材料性能及行为机理的基础性研究; (2) 能量收集系统设计与应用研究。下面分别对这两方面的研究进展及面临的问题与挑战加以评述。

2.2 DE 能量收集的基础性研究

从现有研究来看, 有关 DE 能量收集的基础性研究主要集中在其行为机理的分析、验证, 系统建模、仿真及过程优化, 以及材料改性制备等几个方面。当然, 这种划分并非十分准确, 很多基础性问题其实都是相互关联、密不可分的。

2.2.1 DE 能量收集的行为机理及性能优化

如前所述, DE 能量收集是一个动态循环的体系和过程, 其行为和性能(主要以增加的电能密度和转

换效率来衡量)会受到诸如失效条件、变形模式、力电边界、控制参数等多种因素的综合影响。如何从基础的材料行为的层面对这种影响因素和影响规律加以分析、探讨, 以获取最为适宜的能量收集策略, 实现其工作性能的改进与优化, 是 DE 能量收集研究中的一个基础和核心问题。

Koh 等人^[11]基于理想发电模式, 从理论上预估了 DE 薄膜在机械断裂($\lambda_{\max}$)、张力消失(LT)、电击穿(EB)和机电失稳(EMI)等 4 种失效模式综合约束下所能收集到的最大能量。在他们的研究中, 一个 DE 发电机(DE generator, DEG)的行为用 4 个独立参数所表征, 即拉伸力 P 、拉伸比 λ (机械参数)、电压 Φ 和电荷 Q (电学参数)。DEG 工作时的任一个状态可用图 2(a)所示“拉伸率-应力”机械平面或图 2(b)“电位移-电场强度”电学平面内的一个点表示。每个共轭平面中的一条曲线都代表着一条工作路径, $\lambda_{\max}$, LT, EB 及 EMI 这 4 条曲线分别代表了前述 4 种失效约束。曲线围成的封闭轮廓代表着 DE 的一个工作循环, 因此, 由 4 种失效约束曲线围成的封闭轮廓(阴影面)便代表了 DEG 工作循环理论上可收集到的最大能量。根据他们的预测, 对于 VHB 系列介电弹性体(美国 3M 公司生产的一种工业用聚丙烯酸酯胶带)材料, 所收集的电能密度最大可达 1.7 J/g。

Graf 和 Mass^[12,13]分析比较了不同电学边界条件对单轴拉伸 DE 薄膜能量收集性能的影响, 据此提出了循环过程优化方案; Brochu 等人^[14]建立了纯剪切应变方式下 DE 薄膜能量转化效率与介电常数、预拉伸量及偏置电压等影响因素之间的关系, 为最大效率的实现提供了理论依据。

Vertechy 等人^[15]在分析 DEG 工作时的能量损耗

图 2 (网络版彩图)4 种失效模式约束下的 VHB 能收集的最大能量^[11]

(a) 拉伸率-应力; (b) 电位移-电场强度平面

基础上, 提出获得最大的能量收集需要减少电荷泄漏、降低材料黏弹性、提高电极的电导率、优化 DEG 结构以及提升材料参数(如介电常数及介电强度等)等. Zhou 等人^[16]研究了换能效率与预拉伸比、变形率、极化电压的关系, 提出适当的初始极化电压可有效提升效率而对寿命影响较小, 又指出能量收集性能除了与 4 种失效模式有关外, 还与疲劳断裂有关.

Kang 等人^[17]研究了一种圆环形 DE 结构的能量转化效率与材料介电常数、初始厚度、相对变形及极化电压等参数间的关系, 并进行了实验验证; Kaltseis 等人^[18]提出了用大电容作为输入-输出电荷储存来测量能量密度及换能效率, 并用 VHB4910 实验得到了 102 mJ/g 的能量密度及 7.5% 的换能效率. Hoffstadt 等人^[19]提出通过控制最优的充放电时间实现最大的能量收集, 并结合定电场及定电荷等不同电学边界对 DEG 充放电进行优化设计. Springhetti 等人^[20]也对不同机械约束下的最优循环方式进行了探究, 得出最大能量获得取决于最终的拉伸率(预拉伸率与工作拉伸率的乘积).

在国内, 西安交通大学王垠等人^[21]基于 4 种失效模式, 用能量图谱研究、对比了不同变形方式下的 DE 能量收集特性. 南京航空航天大学王化明等人^[22]也针对类似结构开展了实验研究, 分析了极化电压、拉伸位移等参数对电能增量及能量转换效率的影响, 并探索使用两个及两个以上的环形单元组合结构来提高能量转化效率. 哈尔滨工业大学刘彦菊等人^[23]分析了几种特定失效模式约束下材料常数和均匀拉伸对其性能的影响. 随后, 该课题组吕雄飞等人^[24]又分别基于 Gent 和 Neo-Hookean 两种应变能模型形式, 构建了 DE 材料的本构关系, 并利用 Neo-Hookean 模型对 DE 能量收集的渐稳循环过程及此过程中的机械能量损耗进行了分析和预测.

西安交通大学课题组也开展了这方面的实验研究. 我们设计并制作了一种环形 DEG 器件结构(图 3), 并对其进行了一系列测试实验, 着重探讨了 3 个因素, 即材料预拉伸率、拉伸位移和偏置电压对器件所能收集到的电能的影响规律^[25,26].

图 4 给出了同一器件在不同拉伸位移下, 由示波器所观测到的输出电压波形图(薄膜的预拉伸率为 2, 偏置电压为 200 V). 该图直观地展示了在测量电路接通瞬间, 器件两端电压从偏置电压陡然跃升到一个峰值的现象. 增大的电压, 正是由于输入的机械能

图 3 (网络版彩图)DE 能量收集装置结构图^[25]

(a) 变形前; (b) 变形后

(a) $h=20$ mm

(b) $h=30$ mm

图 4 (网络版彩图)DEG 在不同拉伸位移下的输出电压^[25]

转换成电能而获得的. 这种基础性的实验研究工作增进了对 DE 能量收集过程及特点的直观认识, 并可作为合理设计开发实用的 DE 能量收集器件/系统提供了参考依据.

2.2.2 DEG 系统建模及仿真研究

从本质上讲, DE 致动和发电两种功能行为的核心问题, 都涉及到材料的力电耦合及不同类型能量

的存储与转换等. 因此, 已有的针对 DE 致动所开展的有关材料本构关系^[27-29]、力电响应^[30-38]、失效机理^[39,40]等的研究, 同样从属于 DE 能量收集的研究范围并为之提供了必不可少的理论基础. 众多学者据此开展了有关 DE 能量收集建模、仿真的研究, 以期能准确表述、预测其行为特性, 从而指导实际器件或系统的设计.

这方面的代表性工作有: Jean-Mistral 等人^[41]分析了 DE 材料能量收集的基本循环过程, 分别基于 Mooney-Rivlin 和 Yeoh 两种超弹性应变能函数, 建立了同时包含 DE 电致驱动和蓄能发电两种过程的综合分析模型; McKay 等人^[42]建立了一个完整的 DE 能量收集系统模型, 首先用 ABAQUS 有限元软件对 DEG 器件的行为特性进行分析, 然后将器件模拟数据作为电路仿真的输入, 将完整系统等效为一个电路模型, 进行了系统级的电路仿真与分析, 仿真结果与实验数据良好吻合(最大偏差在 6% 以内). Bortot 等人^[43]提出构建器件等效电路模型需要考虑到电极及介电体的电阻, 认为 DEG 应等效为一个可变电容与介电体电阻并联后再与电极电阻串联. Gastone 等人^[44]将材料的黏弹性考虑在内, 建立了一个动态的单自由度简化模型, 可对振荡水柱式海浪发电机进行快速分析及实时监测. Veretchny 等人^[45]建立了基于可膨胀充气式结构海浪发电机的简化模型. Brochu 等人^[46]提出了用于探究不同材料、机械加载参数和电参数对能量密度及效率影响的简化模型, 分析了能量密度和效率与变形、初始极化电压等的关系. Jean-Mistral 等人^[47]建立了基于 DE 与驻极体结合的分析计算模型, 并用有限元方法仿真了 DEG 的电容变化规律. Vu-Cong 等人^[48]分析讨论了温度、预拉伸、电极对介电常数的影响以及温度和预拉伸对击穿场强的影响, 建立了新的热力学模型用于定义新的机电约束, 与实际应用情况更加接近. Craf 等人^[49]分析考虑 DE 的材料参数和循环方式, 建立了考虑静电特性及非线性弹性行为等的机-电模型, 用于 DEG 的优化设计. 在国内, 南京大学 Zhu 等人^[50]针对一种环形电话性薄膜发电器的能量转换性能进行了建模分析和实验探索, 研究了薄膜变形过程中的力学响应特性.

要准确描述 DEG 的行为特性, 一个很大的挑战在于如何恰当刻画其动态黏弹特性. 当前的研究大多仍将 DE 视为一种弹性体材料, 对其力学本构行为的描述主要建立在各种标准超弹性应变能模型(如

Mooney-Rivlin, Ogden, Yeoh, Neo-Hookean 等)的基础之上. 然而 DE 本质上是一种黏弹性高分子聚合物材料, 当用于能量收集时, 材料将在外界连续载荷作用下发生周期性机械变形, 其动态及黏弹特性会对能量收集性能产生重要影响, 必须加以考虑.

超弹性应变能函数作为单一的弹性势能函数只能表征变形的“状态”, 却无法描述由速率或频率所决定的变形的“时间历程”, 更无法体现材料变形过程中的应变滞后及耗能特性. 近年来一些研究者也意识到该问题的重要性, 在 DE 材料黏弹性建模分析方面开展了一些探索. 如 Wissler 和 Mazza^[51], Jean-Mistral 等人^[41]分别在 Yeoh 或 Mooney-Rivlin 超弹性模型中引入 Prony 级数, 建立了相应的准静态黏弹性模型. Lochmatter 等人^[52]从 DE 的微观力学行为分析出发, 提出了广义 Kelvin-Voigt 型的黏-超弹性本构关系模型. 但在这些研究中, 由于模型参数的拟合和获取建立在材料应力松弛实验的基础上, 所建模型实际更适合描述材料在缓慢时变下的静态黏弹行为, 在表征能量收集过程中材料的动态黏弹机理及行为方面仍存在不足. 在动态黏弹性的研究方面, Plante 和 Dubowsky^[53]通过不同应变速率下 DE 薄膜的单轴拉伸实验发现, 同等应变条件下, 应力随应变速率的提高而明显增大, 说明 DE 材料的应力-应变关系受应变速率的影响较大, 而这正体现了 DE 材料的动态黏弹性. Bortot 等人^[43,54]讨论了不同应变率下的应力-应变关系及不同频率下介电常数与拉伸率的关系, 由此提出了一种大变形下的 Electro-viscoelastic 模型. Zhao 等人^[55], Foo 等人^[56,57]利用非平衡热力学理论, 基于 Gent 或 Neo-Hookean 等超弹性应变能模型, 构建了 DE 材料的三参数流变网络模型, 并通过引入中间状态变量, 较准确地描述了 DEG 与速率相关的黏-超弹性耗能行为.

针对 DE 在能量收集过程中以不同速率拉伸-回弹的循环变形特点及由此引起的迟滞耗能行为, 西安交通大学王永泉等人^[58]基于 Kelvin-Voigt 型的三参数流变模型, 从复模量理论出发, 同时利用 5 组不同应变速率下的应力响应实验数据, 在 $0.020 \sim 0.71 \text{ s}^{-1}$ 的速率空间内进行参数辨识, 得到了在该速率范围内具有较高精度的一组本征参数, 并对薄膜在拉伸率和拉伸速率两个运动参量共同影响下的迟滞耗能特性进行了数值预测和分析(图 5). 之后, 该课题组又从另一种研究路径出发, 以表征生物组织力学特

性常用的准线性黏弹性(quasi-linear viscoelastic, QLV)模型为框架, 建立了描述 DE 非线性黏-超弹性行为的时间卷积方程, 并利用控制工程的理论, 通过拉氏变换, 将时域内复杂的卷积积分转换为 s 域直观而相对简洁的信号流框图模型^[59]. 通过引入 Maxwell 静电应力的影响, 又将其进一步扩展到机电耦合状态. 该模型可由通用软件 MATLAB/Simulink 方便地实现求解和仿真. 分析表明, 在从 $10^{-4} \sim 1 \text{ s}^{-1}$ 的拉伸速率范围内, 无论载荷是单一的拉力还是力和电场同时作用, 基于该模型的理论预测结果均与 Plante 和 Dubowsky^[53]的实验结果吻合良好(图 6).

DEG 系统建模最大的困难来自于非线性. 如前所述, 从材料基础行为层面来看, 超弹性本构关系本身就具有程度不同的非线性. 力电耦合和动态条件的引入, 使这种行为变得更为复杂. 而从材料行为到 DEG 器件行为, 仍然是一种在由几何关系所决定的非线性坐标空间内的映射与转换, 又会进一步加剧问题的复杂程度. 总之, 上述因素的存在使 DEG 系

图 5 (网络版彩图) $0.029, 0.71 \text{ s}^{-1}$ 应变速率下滞回曲线的理论与实验对比^[58]

图 6 (网络版彩图)不同拉伸速率下应力的理论值与实验值对比^[59]

统的精确建模和求解变得非常困难. 因此在系统描述分析的过程中, 针对器件结构型式、变形方式、边界条件等的合理的简化和假设往往是必需的, 以尽量避免非线性模型过于繁琐和难以求解.

DE 能量收集固有的非线性效应尽管为其建模分析带来了困难, 但在设计和操作中也可对其加以合理利用以获得更好的性能. 如我们已经知道, 初始极化电压、材料预拉伸率、拉伸变形等控制参数均与电能的收集性能之间存在明显的非线性依赖关系; 在一定范围内, 这些参数小幅的增加就可能引起电能(密度)较大幅度的增加. 又如, 与压电能量收集对非线性效应的利用相类似, 在动态条件下通过合理设计 DEG 的固有频率, 使其与外界机械激励频率相当, 则可利用谐振效应使器件产生更大的变形^[8,10], 从而提高振动能量收集的性能.

2.2.3 材料改性及电极制备

DE 材料本身的材料参数及所用电极的参数影响着 DEG 的能量收集性能, 为此, 国内外研究者在材料改性及电极制备方面开展了研究, 进行了多种 DE 材料和不同电极的对比实验, 以寻求最适用于能量收集的 DE 材料及电极.

目前常用的介电弹性材料有聚丙烯酸酯(典型为 3M 公司生产的 VHB)、硅树脂、聚二甲硅氧烷(PDMS)、天然橡胶及某些合成橡胶等. Kaltseis 等人^[60]发现, 较之聚丙烯酸酯(VHB 系列薄膜), 天然橡胶(ZruElastTMA1040, OppoBandTM8003)具有更高的弹性模量、断裂能及介电强度, 因此应用于能量收集

器将具有更长的寿命及耐疲劳特性. Kaltseis 等人^[60]比较了 VHB4910, ZruElastTMA1040 和 OppoBand-TM8003 的材料特性, 并分别计算了每种材料所能收集到的能量密度, 提出用纳米填料来增强材料介电常数及介电强度以提升能量收集性能的想法. Jean-Mistral 等人^[1]从工作原理、材料特性、工作条件及应用等方面, 将 DE 与 IPMC、电致伸缩材料、导电聚合物、压电高聚物等进行了对比分析. Graf 等人^[61]对比了聚氨酯(polyurethanes)与聚丙烯酸酯材料, 认为前者具有更高的介电常数及击穿场强, 同等条件下收集到能量是后者的 10 倍以上, 并提出未来可在不牺牲其他材料特性的前提下通过改变某个特定材料参数来提升其能量收集性能. Vu-Cong 等人^[48]将 VHB4910 与硅橡胶进行了介电常数与击穿场强的对比, 发现在低温大变形条件下, VHB 的能量收集性能要优于硅橡胶, 反之, 在高温条件下, 硅橡胶性能更佳. Verthey 和 Fontana^[62]针对一种常用于健身拉力带的合成橡胶材料(TheraBand™ Latex Free Resistance Band Yellow)进行了实验研究, 证明其能量收集性能优于天然橡胶.

DEG 工作时必须要在要在薄膜两侧涂覆柔性电极以形成三明治式可变电容结构, 当前常用于制作柔性电极的材料主要有: 碳膏(常见为 MG Chemicals 公司生产 846 型)、导电橡胶、金属薄膜、碳粉、多壁碳纳米管等. Graf 等人^[61]通过研究发现银基导电碳膏作为 DE 薄膜的电极, 可大幅降低电极电阻. Lee 等人^[63]提出用碳膏与多壁碳纳米管混合制成电极, 可使其电阻降低至少 1 个数量级. Brochu 等人^[46]则尝试将碳粉和碳纳米管混合来制备电极. Iskandarani 等人^[64]利用智能柔性电极技术, 直接在硅橡胶的波纹状弹性表面压印形成金属电极.

2.3 DE 能量收集系统设计及应用研究

一个完整的 DE 能量收集系统包括 DE 柔性换能结构及控制与能量收集电路等几个部分. 近年来国内外也有学者分别针对 DE 能量收集器的结构设计、电路设计及系统优化开展了大量的研究工作.

2.3.1 结构设计

在结构设计方面, 研究者们对薄膜的 3 种基本拉伸方式, 即单轴拉伸、纯剪切拉伸和等双轴拉伸开展了大量研究, 对比分析了它们各自对材料本构关系

及能量收集性能的影响, 发现等双轴拉伸的效率最高, 纯剪切次之, 而单轴拉伸最低. 但在实际应用中, 真正的等双轴拉伸是难以实现的.

基于上述 3 种基本拉伸方式, 人们面向不同的能量收集应用场合, 设计了环形、平行四边形、菱形、管状及充气膨胀式等多种换能结构形式, 并进行了大量的实验研究或理论分析.

Huang 等人^[65]提出了一种如图 7 所示的最接近等双轴拉伸模式的圆形变形结构, 结合电路设计, 实测收集到能量密度为 560 J/kg, 效率达 27%, 这是目前见诸报道的 DE 能量收集实验所能达到的最佳性能.

环状结构因其薄膜边界约束容易实现, 变形控制简单, 而吸引了更多的国内外研究者. Wissler 和 Mazza^[51]研究了环状结构在不同拉伸量下薄膜应力随时间的变化规律, 并进行了实验与有限元仿真的对比分析. Anderson 等人^[66]和 McKay 等人^[67]设计了基于环状结构的 DEG 器件, 收集能量供给于无线传感器等小功率便携设备. 后又对该器件进行了改进优化, 图 8 是他们所设计的一种双 DEG 反向变形结构^[68,69]. 该器件实际由两个 DEG 子结构联接而成(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一个 180°的相位差, 当 DEG1 拉伸变形时, DEG2 正好收缩变形, 反之亦然. 这样, 在这种器件结构中, 任何时候总有一个 DEG 是处于收缩放电状态.

和图 8 结构的原理类似, Binh 等人^[70]设计了一种如图 9 所示的双向反式结构发电机(antagonistic energy converter, AEC). 该装置利用一个 DE 薄膜收缩阶段的弹性力来拉伸另一个 DE 薄膜, 由此降低了

图 7 最大拉伸结构图^[65]

图 8 双向 DEG 反向变形结构图^[68]

图 9 (网络版彩图)双向反式结构发电机原型^[70]

需要的机械能输入, 从而提升能量收集效率. 高的能量收集效率及紧凑的结构设计使其在海浪能收集中有巨大应用潜力.

大多数 DEG 结构需要固定框架使 DE 薄膜处于预拉伸状态, 为此 McKay 等人^[10]设计了一种如图 10 所示的不需要固定框架的自支撑层叠结构. 图 10 中

中间活性区域(active zone)由 48 层 DE 薄膜堆栈而成, 上下的硅橡胶端盖(end cap)使器件能与机械变形力源(压力)耦合, 保证每层 DE 膜基本实现自由变形, 进而保证每层薄膜的电场强度近似相等. 该结构的特点是体积小($<1 \text{ cm}^3$), 能收集低频运动能量(如树的摇摆, 人行走时脚跟的冲击压力等), 可应用于远程无线传感器而无需周期性电池.

尽管等双轴拉伸是效率最优的拉伸方式, 但实际上要精确建立 DE 薄膜与加载结构间的运动联系并不容易. Moretti 等人^[71]设计了一种如图 11 所示的平行四边形结构发电机(parallelogram-shaped dielectric elastomer generator, PS-DEG). PS-DEG 利用四杆机构固定薄膜, 外力可直接旋转驱动 DEG 摇杆, 无需额外传动机构, 可良好应用于旋转器械运动中. 此外, 他们还研究了如图 12 所示的菱形结构发电机^[72](lozenge-shaped DEG, LS-DEG), 分析计算了该器件在不同失效模式下所能收集到的能量密度, 结合实验指出张力消失是影响 LS-DEG 能量收集性能的最主要因素.

图 10 (网络版彩图)自支撑层叠结构^[10]

图 11 平行四边形结构 DEG^[71]

图 12 (网络版彩图)菱形结构 DEG^[72]

在某些应用场合, 外部机械输入能实现的变形较小, 为此, Jean-Mistral 等人^[73]设计了如图 13 所示的应变吸收器(strain absorber)结构. 结构中 2 个固定框架(frame)通过刚性绳连接, 绳的两端通过框架上的 n 个孔(eyelet)绑缚在 DEG 的两边. 当外部力施加到固定框架产生 Δl 位移时, DEG 在同一方向能实现 $n \times \Delta l$ 的变形, 以达到增大 DEG 变形的目的. 这种结构可应用于收集人体运动能量, 收集电能可供于可穿戴便携电子设备.

Righi 等人^[74]设计了如图 14 所示的一种可应用于海浪能发电机的膨胀式充气结构. 该结构可与活塞组合, 通过振荡水柱推动活塞使 DE 薄膜膨胀变形, 从而将空气动能转化为电能. 李铁风^[75]也针对类似结构, 采用数值模拟的方法, 研究了非均匀变形和黏弹性对器件能量收集的影响, 指出气压卸载时引起的失稳以及材料的黏弹性变形是导致能量收集效率低下的主要原因.

Fontana 等人^[76]提出了如图 15 的双层薄膜等双轴 DEG(dual-membrane equi-biaxial DEG, DuME-DEG), 可实现直线运动输入下的等双轴变形. 它实际上采用曲柄滑块机构原理, 通过直线运动输入推动滑块来回直线往复运动, 实现主动肌-对抗肌结构(agonist-antagonist configuration)上的两层圆形 DE 薄膜交替变形, 从而达到能量收集目的.

为了利用人体运动的机械能, Jean-Mistral 和 Basrou^[77]提出如图 16 的管状结构, 可贴在人的护膝等衣物上, 将人行走运动时的机械能变为电能收集利用. Jean-Mistral 通过实验测试了管长度 10 cm,

图 13 (网络版彩图)应变吸收器结构^[73]

图 14 (网络版彩图)可膨胀充气式结构^[74]

图 15 (网络版彩图)双层薄膜等双轴 DEG 原型^[76]

图 16 管状结构原理图^[77]

100%应变, 初始预加电压 1000 V 条件下可收集到能量为 40 μJ , 可应用于运动或医学的低能耗系统.

研究者们又考虑采用多层堆栈式的结构以提高能量收集的性能. 哈尔滨工业大学吕雄飞^[78]基于多层环形器件堆栈式设计出如图 17 所示的换能元件, 每个换能元件高约为 65 mm, 由 60 层硅橡胶薄膜组成. 随后, 将 3 个换能元件并联, 制作成能量收集器, 并对能量收集器的性能进行了实验探究及理论分析.

Foerster 和 Schlaak^[79]对堆栈式结构(图 18)进行了理论仿真和优化, 通过研究多层 DE 薄膜堆栈式结构的变形情况, 来对整个 DEG 结构进行优化设计以尽可能使其达到自由变形. 所研究结构的基本形式如图 18 所示, 由 50 层 40 μm 厚(Z_0)的硅橡胶膜及 51 层 10 μm 的碳粉电极叠加制成, 每层硅橡胶膜上下电极重叠区域(圆形)即为 DE 薄膜的有效工作面积.

图 17 (网络版彩图)堆栈式介电弹性体换能元件^[78]

表 2 定性地归纳、对比了上述不同 DEG 结构的主要性能参数以及各自的适用场合.

2.3.2 电路设计

不管是机械能转化为电能的拉伸-收缩循环过程, 还是电能的收集过程, 都涉及到电路设计. 良好的电路设计可使机电能量转换效率大幅提高, 在电能收集过程中减少不必要的电能损耗. 另外, DEG 进行能量收集时需要额外的初始电压(偏置电压)对其进行极化, 最初的探索性、验证性实验都是利用高压电源实时提供, 但面向实际应用, 最佳的方式应该是摆脱对外接高压电源的依赖.

为达到这一目的, Mckay^[80]提出了一种如图 19 所示的自供给电路(self-priming circuit, SPC). SPC 可视为一个电容组, 与 DEG 并联, 工作时可以实现电荷在 DEG 和 SPC 之间循环流动. 图 19(a)为 SPC 电路拓扑原型, 图 19(b)和(c)分别为电路工作时因 A、B 点电势差引起的两种工作状态: 当 DEG 放电时, 电荷由 DEG 流向 SPC; 当充电时, 电荷又由 SPC 流回 DEG.

图 18 (网络版彩图)50 层硅橡胶膜堆栈式 DEG^[79]

表 2 不同 DEG 结构的工作参数及性能比较

结构	拉伸率	效率	能量密度	适用场合
圆面型结构	大	中	高	海浪能收集
双向反式环状结构	中	低	中	风能、海浪能收集
双向反式片状结构	中	低	低	海浪能收集
自支撑结构	小	低	低	人体运动能量
平行四边形结构	小	低	低	旋转式发电机
菱形结构	小	低	中	直线运动
充气式结构	中	低	中	海浪能收集
伞状结构	大	中	中	海浪能收集
管状结构	小	中	低	人体能量收集

图 19 Self-priming 电路原理^[80]

(a) SPC 拓扑原型; (b) 电势 $A > B$; (c) 电势 $B > A$

SPC 使 DEG 的持续发电只需初始进行一次充电, 后续即可断开电源, 依靠初始存储电荷在器件和电路间的循环流动来保证系统连续工作. 该电路不但摆脱了对外加电源的实时依赖, 又可以通过自身数十次的循环中让 DEG 的工作电压由几伏的低压自举到数百伏、上千伏, 从而大大提高了能量收集效率. Mckay 等人^[68,69]后续又对自供给电路及 DEG 器件进行了改进优化, 提出 SPC 电容与 DE 电容相匹配实现最大能量收集, 并进行了实验验证.

利用 DEG 本身具有的电容特性, Mckay 等人^[68,69]进而提出了集成式自供给电路(integrated self-priming circuit, ISPC)的概念, 基于前述图 7 的双 DEG 反向变形结构, 对比分析了由单个 DEG 器件形成的单集成式系统和以双 DEG 器件为核心形成的双集成式系统的工作性能, 如图 20 所示, 可以看出, 工作电压从 100 V 增加至 1000 V, 单集成式电路需要约 6.5 s, 而双集成式只需约 5.7 s, 可见后者具有更高的工作效率. 且集成式自供给电路缩小了电路元器件的电能损耗, 如单集成式系统仅仅需要 3 个二极管, 提高了能量收集效率.

除了 Mckay 等人的研究之外, Vu-Cong 等人^[81~84]也针对 DEG 对外部供电电源的依赖问题提出了另一种解决方案. 他们用驻极体代替外加极化电压源, 也可不需要外加高压电源和复杂供电电路, 在轻小型 DEG 的设计制造中有很好的应用价值, 图 21 所示为基于驻极体的 DEG 原型结构, 针对此结构原型, 在驻极体电势为 -1000 V, 有效应变 50% 的实验条件下可以实现 0.55 mJ/g 的能量收集, 证明了用驻极体代

图 20 (网络版彩图)单集成式与双集成式 ISPC 升压性能实验对比^[68]

图 21 (网络版彩图)基于驻极体的 DEG 原型(未拉伸状态与最大拉伸状态)^[81]

替外加高压电源是可行的, 而且随着驻极体电势的提高, 所能收集到的电能增加。

在能量收集过程中为了保证有较高的能量转换效率, 一般需对 DEG 施加较高的偏置电压(千伏级), 因此器件端的输出电压将会更高, 而这种高电压、低电荷的电能状态是无法直接供给用电器使用的, 所以在 DEG 的开发中, 必须在保证较小的损耗下, 将这种非恒定的高压电能转换为直流低压或连续的交流低压信号。针对这一问题, Eitzen 等人^[85,86]曾提出了一种可匹配能量收集中高压电源的双向 DC-DC 转换器的电路拓扑结构。Lo 等人^[87]则提出了两种方案, 用以实现将 DEG 放电时的高电压转换为普通充电电池可利用的低电压。

第一种是如图 22(a)所示的降压变换器(buck converter)。首先, 闭合开关 S, 电流通过电感 L, 输出电压 V_{out} 随之增加。负载(Load)的作用是避免电感电流瞬间变化可能产生的高电压。当 V_{out} 增到与 V_{in} 相等时, 断开 S, 通过电感的电流慢慢减小, 当平均输出电流值低于电压源直接连接负载时提供的电流值时, 即可得到一个更小的负载电压。这种方案可获得较高的机电能量转换效率, 可靠性好, 但电路复杂, 很多额外组件会增加成本及负担, 且商业可用电子元件部分特性难以满足要求, 这些都在一定程度上限制了它的应用。

另一种是如图 22(b)所示的电荷泵(charge pump)方案。这种方案工作原理类似于 SPC 电路, 理想情况下只需加一次极化电压。首先, 当 V_{DEG} 增加时, V_{Dz} 也随之增加直至超过 C_{load} 电压, 二极管 D 正向导通, DEG 给电容 C 和负载电容 C_{load} 充电, 此时 2 个电容串联分压。之后, 随 V_{DEG} 降低, V_{Dz} 也随之降低直到 Dz 正向导通, 电容 C 反过来通过 Dz 给 DEG 充电, 从而使 V_{DEG} 增加。如此循环往复以达到降低 DEG 电压的目的。电荷泵方案组件少, 电路比降压变换器简单, 不需要控制电路和传感电路, 但收集能量低。尽管它可以直接用于电池充电, 但由于输出电压不可控, 不能直接用于提供电能。

总体上讲, 在上述两种方案中, 降压变换器适合大规模、高电能的 DEG 应用, 如海浪发电等; 而电荷泵则较适合于小型且分散的能量收集, 如可穿戴 DEG 等。

图 22 两种 DEG 输出电能降压方案原理图^[87]

(a) 降压变换器; (b) 电荷泵

2.3.3 应用研究

在 DE 能量收集系统的应用研究方面, 斯坦福国际研究院(SRI International)等机构研发出基于不同能量来源的 DE 能量收集系统(装置). 图 23 中为 SRI International 开发的鞋跟发电机^[8,88], 可利用人体行进时脚跟的冲击动作使安装于鞋跟部位的多层 DE 薄膜产生周期性的扩展-紧缩循环, 从而达到连续发电的目的. 据报道, 这种发电鞋可获得每步 0.8 J 的能量输出. 类似地, 也可利用人体行走时膝关节的运动, 如图 24 通过安装于膝部的发 DE 发电装置^[8,89], 将机械能转化为电能, 为人们随身携带的小功率电子产品充电.

在风力发电领域, 常规风车由于涡轮机叶片和基础支撑结构庞大、噪声问题等原因一般远离对电力需求较高的城市地区, 如果能用旗状或帆状的 DE 发电装置^[90](图 25)来产生高分布式、并行、局部的能源, 将大大降低风力发电装置的成本以及电力传输过程中的损耗.

DE 的宽频工作范围能很好地匹配自然界中风和海浪等的运动, 这为它用于风力及潮汐能量收集提

图 23 (网络版彩图)基于 DE 薄膜的鞋跟冲击发电机^[8]

图 24 (网络版彩图)人体膝关节运动能量收集器^[8,89]

图 25 (网络版彩图)基于风能的帆状发电机^[90]

供了有利条件. 图 26(a)所示是一种海上浮标式发电装置^[8]. 海浪运动使浮架和惯性质量产生相对位移, 从而使安装于浮架上的卷状 DE 结构发生变形, 其转换输出的电能可为远程海洋传感器(如海啸预警传感器等)及需要海基局部电源的系统供电. 图 26(b)^[90]与 (a)类似, 它所产生的分布式电能可以给个人手机及 GPS 系统充电等, 也可以供给于局部的独立电站.

Chiba 等人^[91]及 Kornbluh 等人^[8]通过水轮式结构将河水流动时产生的机械能转化为所需电能. 如图 27 所示, 该水车直径为 30 cm, 用一个小水泵(280 mL/s 流量)供水使水轮旋转, 水轮又通过推杆连接到曲轴上, 然后和 DEG 连接, 轮子每转一次能提供 35 mJ 的电能. 由于受水车直径限制, 该电能数值是较小的; 但根据估算, 若水车直径增大到 80 cm, 则水轮每次转动可望产生 5.4~6 J 的电能.

Vertechy 等人^[15]设计了如图 28 所示的半球状海浪能收集器. 它将压锤通过连杆与刚性绳固定在水底, 将堆栈式介电弹性体换能元件安置于浮体上. 海浪起伏将带动浮体随之运动, 使得压锤将堆栈式介电弹性体换能元件压缩, 将海浪流动的机械能输入.

图 26 (网络版彩图)海上浮标式发电装置

(a) 海上浮标式发电机^[8]; (b) 海上浮标式发电机^[90]

图 27 (网络版彩图)水轮式能量收集器^[91] 图 28 (网络版彩图)基于海浪能的半球状结构能量收集器^[15]

在国内,同济大学陈明等人^[92]也利用丹佛斯公司的 DE 薄膜,构建了小型的风力发电实验装置,并对其能量收集性能进行了实验测试。

目前来看,除鞋跟发电机等极少数产品外,上述器件或装置多还属于功能验证型的原型机,尚未实现工程应用,实际装置的能量收集性能也远低于理论预期。如 Chiba 等人^[93]针对所研制的海浪能量收集装置,通过人工造波的方式进行了模拟实验,在不同的海浪高度及周期下,发电功率为 18.33~40.17 mW,能量转化效率仅为 1.3%~6.65%。一个重要的原因在于,现有的研究及设计缺乏对 DEG 的系统性研究,未能建立适用于各种应用场合的系统化 DEG 模型,并由此进行材料参数、电路参数及结构设计等优化设计。

3 未来需要解决的问题

虽然目前国内外对 DE 用于能量收集进行了大量的理论及应用研究,但在这一领域,仍存在较多亟待解决的问题。

3.1 寿命与可靠性

虽然前文提到 DE 薄膜抗疲劳特性好,可工作在宽的温度湿度范围下,但在某些应用场合,DEG 仍面临着寿命短的限制,这种限制通常发生在需要实现最大应变或最大能量输出场合^[32,94]。据 Pelrine 等人^[27]的研究,聚丙烯酸及硅弹性体在超过 100%应变下,会表现出高的能量密度,但是在低频工作条件下,这种高性能仅能维持几百或几千次的循环。

DE 薄膜在低频机械循环下的电击穿通常是限制其寿命的主要失效形式。目前,虽然有通过采用新型电极^[95]或控制电场强^[96]来改善致动器寿命的研究,且被证实有效,但也未能从根本上解决技术潜在的局限性。无论是致动器还是能量收集器,通过改善 DE 材料和电极材料,优化结构设计以及控制工作条件(工作频率、环境条件、充电电路等)来延长寿命的研究均相对较少。未来 DEG 大规模的应用需要其抗干扰及自修复能力的提升,因此,如何在不大影响 DEG 寿命及可靠性的前提下提高其性能,是未来研究急需解决的问题之一。

3.2 材料特性

DE 用于能量收集的研究表明,介电常数、击穿场强及最大拉伸率的提高,黏弹损耗的降低都有利于提升 DEG 的能量收集性能。然而,目前在材料特性的研究中仍缺乏对材料性能参数的系统化研究,从而难以实现对各材料参数的整体优化。有些材料,如 VHB 聚丙烯酸酯虽可达到较大的拉伸率,理论上可提升能量收集性能,但该种材料在工作时常伴随着较大的黏弹损耗。所以未来需要综合考虑介电常数、击穿场强、最大拉伸率、黏弹损耗等材料性能,着眼于应用目标,实现对材料性能的最优化设计并进行相应的化学改性。

3.3 收集电能供给电池

能量收集过程中由机械能转化形成的电能往往处在高电压、低电荷状态,难以被充电电池或负载电器直接利用,所以收集的电能如何被人们所利用是困扰研究者们的一个难题。目前常将收集的电能经过电路转换为恒定的直流电或其他能用于充电电池及负载电器的电能模式,但引入的复杂电路对收集电能的损耗较大,成本较高,解决方案并不理想。作

为能量收集的最后阶段和最终目标, 收集的电能如何被很好地利用, 是未来研究者们面临的又一个重要问题, 必须加以解决.

3.4 系统性工作建模

当前大多数研究都是孤立的单独看待某一因素对能量收集的影响, 如材料参数, 甚至是某一个参数, 普遍缺乏系统观点, 缺乏集材料-结构-电路于一体的系统化分析理论模型及能量收集策略, 这实际是不利于对介电弹性体能量收集器的系统性优化设计的.

因此, 从高性能 DE 能量收集动态循环系统的设计要求出发, 仅有对材料性能及行为机理的研究, 或者仅进行结构和电路各自孤立的研究都是不够的. 必须在合理的能量收集策略和方案的基础上, 围绕系统中 DE 结构与电路的动态耦合及换能机制这一关键问题, 以材料-结构-电路的动态关联或耦合关系为核心, 构建能统一描述 DEG 非线性动态行为的系统化分析模型, 对机械结构和控制电路各自的动态行为及其兼容、匹配关系加以研究, 综合分析器件结构、电路配置、边界及负载条件等多种因素对系统性能的影响规律, 寻求系统性能的全局最优. 换句话说, 必须进行 DE 能量收集多能域耦合系统的一体化设计及优化研究.

4 结论

介电弹性体作为一种新型电活性功能材料, 因

具有柔性好、变形大、能量密度高等多项优点, 并且能高效率地将自然界中机械能转换为电能, 故而在面向人体及自然界的能量收集领域具有巨大的潜能.

本文综述了介电弹性体用于能量收集的研究情况, 重点介绍了在材料基本性能、能量收集行为机理、能量收集器件结构设计、电路设计及原型产品开发等方面的国内外研究进展, 分析提出了当前研究中面临的主要问题及挑战. 据此, 关于介电弹性体能量收集技术的发展趋势, 本文认为未来研究工作的着力点应聚焦以下几个方面:

(1) 追求高能量收集性能、高寿命及良好可靠性的良好结合, 研究能量收集器性能与寿命、可靠性的最优化设计;

(2) 开展材料改性研究, 寻找设计最适合用于能量收集的 DE 材料;

(3) 在能量收集电路及控制电路上有所突破, 减少电路损耗, 设计出构造相对简单而能量收集性能又佳的电路;

(4) 针对小变形可携带能量收集器或大变形海浪发电器等具体应用背景, 进行实验及理论分析, 得出适用于不同环境应用下的能量收集理论模型. 孤立地单独看待某一因素对能量收集的影响不利于对介电弹性体能量收集器的系统性优化设计, 建立集材料-结构-电路于一体的系统化分析理论模型及能量收集策略十分重要.

参考文献

- 1 Jean-Mistral C, Basrour S, Chaillout J J. Comparison of electroactive polymers for energy scavenging applications. *Smart Mater Struct*, 2010, 19: 085012-1-14
- 2 Suo Z G. Theory of dielectric elastomers. *Acta Mech Solid Sin*, 2010, 23: 549-578
- 3 Peirine R, Kornbluh R, Eckerle J, et al. Dielectric elastomers: Generator mode fundamentals and applications. In: *Proc SPIE 4329, Smart Structures and Materials 2001: Electroactive Polymer Actuators and Devices*, 2001, 4329: 148-156
- 4 O'Halloran A, O'Malley F, McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications and challenges. *J Appl Phys*, 2008, 104: 071101-1-10
- 5 Lallart M, Cottinet P, Guyomar D, et al. Electrostrictive polymer for mechanical energy harvesting. *J Polym Sci Pol Phys*, 2004, 42: 5385-5395
- 6 Chu B, Zhou X, Ren K, et al. A dielectric polymer with high electric energy density and fast discharge speed. *Science*, 2006, 313: 334-336
- 7 Kornbluh R, Peirine R, Prahlaad H, et al. Dielectric elastomers: Stretching the capabilities of energy harvesting. *Mat Res S*, 2012, 37: 246-253
- 8 Kornbluh R D, Peirine R, Prahlaad H, et al. From boots to buoys: Promises and challenges of dielectric elastomer energy harvesting. In: *Rasmussen L, ed. Electroactivity in Polymeric Materials*. New York: Springer, 2012. 67-93
- 9 Kornbluh R, Peirine R, Pei Q, et al. Electroelastomers: Applications of dielectric elastomer transducers for actuation, generation and smart structures. In: *Proc. SPIE 4698, Smart Structures and Materials 2002: Industrial and Commercial Applications of Smart Structures*

- Technologies, 254 (July 9, 2002), San Diego, CA, 2002, 4698: 254–270
- 10 McKay T, Rosset S, Anderson I A, et al. Dielectric elastomer generators that stack up. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 015014-1–8
 - 11 Koh S J A, Keplinger C, Li T F, et al. Dielectric elastomer generators: How much energy can be converted. *Trans Mech*, 2011, 16: 33–41
 - 12 Graf C, Maas J. Energy harvesting cycles based on electro active polymers. In: *Proc. SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, San Diego, California, USA, March 07, 2010, 7642: 1–12
 - 13 Graf C, Maas J. Evaluation and optimization of energy harvesting cycles using dielectric elastomers. In: *Proc. SPIE 7976, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 79760H (March 28, 2011), 2011, 7976: 1–12
 - 14 Brochu P, Stoyanov H, Niu X F, et al. Energy conversion efficiency of dielectric elastomer energy harvesters under pure shear strain conditions. In: *Proc. SPIE 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 83401W (April 26, 2012), 2012, 8340: 1–6
 - 15 Vertechy R, Fontana M, Rosati Papini G P, et al. In-tank tests of a dielectric elastomer generator for wave energy harvesting. In: *Proc. SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 90561G (March 8, 2014). 2014, 9056: 1–11
 - 16 Zhou J Y, Jiang L Y, Khayat R E. Investigation on the performance of a viscoelastic dielectric elastomer membrane generator. *Soft Matter*, 2015, 15: 2983–2992
 - 17 Kang G, Kim K S, Kim S. Note: Analysis of the efficiency of a dielectric elastomer generator for energy harvesting. *Rev Sci Instrum*. 2011, 82: 046101
 - 18 Kaltseis R, Keplinger C, Baumgartner R. Method for measuring energy generation and efficiency of dielectric elastomer generators. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 162904-1–3
 - 19 Hoffstadt T, Graf C, Maas J. Optimization of the energy harvesting control for dielectric elastomer generators. *Smart Mater Struct*, 2013, 22: 094028-1–10
 - 20 Springhetti R, Bortot E, Botton G, et al. Optimal energy-harvesting cycles for load-driven dielectric generators in plane Strain. *J Appl Math* 2014, 79: 1–21
 - 21 Wang Y, Zhou J X, Wu X H, et al. Energy diagrams of dielectric elastomer generators under different types of deformation. *Chin Phys Lett*, 2013, 30: 6 066103
 - 22 Wang H M, Zhu Y L, Wang L, et al. Experimental investigation on energy conversion for dielectric electroactive polymer generator. *J Intell Mat Syst Struct*, 2012, 23: 885–895
 - 23 Liu Y J, Liu L W, Zhang Z, et al. Analysis and manufacture of an energy harvester based on a Mooney-Rivlin-type dielectric elastomer. *Euro Phys Lett*, 2010, 90: 36004
 - 24 Lv X F, Liu L W, Liu Y J, et al. Dielectric elastomer energy harvesting: Maximal converted energy, viscoelastic dissipation and a wave power generator. *Smart Mater Struct*, 2015, 24: 115036
 - 25 Wang Y Q, Liu X J, Xue H H, et al. Experimental investigations on energy harvesting performance of dielectric elastomers. In: *Proc SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 905633 (March 8, 2014) 2014, 9056: 1–10
 - 26 薛欢欢. 面向能量收集的介电弹性体发电机理及行为研究. 硕士学位论文. 西安: 西安交通大学, 2013. 1–61
 - 27 Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q B. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science*, 2000, 287: 836–839
 - 28 Dorfmann A, Austria V, Ogden R W. Nonlinear electroelasticity. *Acta Mech*, 2005, 174: 167–183
 - 29 Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics. *J Mech Phys Solid*, 2008, 56: 467–486
 - 30 Wissler M, Mazza E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators. *Sens Actuator A-Phys*, 2007, A138: 384–393
 - 31 Carpi F, Chiarelli P, Mazzoldi A, et al. Electromechanical characterization of dielectric elastomer planar actuators: Comparative evaluation of different electrode materials and different counter loads. *Sens Actuator A-Phys*, 2003, 107: 85–95
 - 32 Kornbluh R, Wong-Foy A, Pelrine R, et al. Long-lifetime all-polymer artificial muscle transducers. *Mater Res Soc*, 2010, 1271: 1271-JJ03-01
 - 33 Ha S M, Park I S, Wissler M, et al. High electromechanical performance of electroelastomers based on interpenetrating polymer networks. In: *Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)* 2008, 69272C (April 10, 2008). 2008, 6927: 69272C
 - 34 Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q, et al. Dielectric elastomer artificial muscle actuators: Toward biomimetic motion. In: *Proc. SPIE 4695, Smart Structures and Materials 2002: Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD)*, 126 (July 10, 2002). 2002, 4695: 126-137
 - 35 Pelrine R, Kornbluh R, Kofod G. High-strain actuator materials based on dielectric elastomers. *Adv Mater*, 2000, 12: 1223–1225
 - 36 Qiang J H, Chen H L, Li B. Experimental study on the dielectric properties of polyacrylate dielectric elastomer. *Smart Mater Struct*, 2012, 21: 025006
 - 37 Li B, Chen H L, Qiang J H, et al. Effect of mechanical pre-stretch on the stabilization of dielectric elastomer actuation. *J Phys D-Appl Phys*, 2011, 44: 1–8

- 38 盛俊杰, 陈花玲, 强俊花, 等. 介电弹性材料的机电耦合性能研究. 应用力学学报, 2012, 29: 38–42
- 39 Moscardo M, Zhao X H, Suo Z G, et al. On designing dielectric elastomer actuators. *J Appl Phys*, 2008, 104: 093503
- 40 Zhu J, Stoyanov H, Kofod G, et al. Large deformation and electromechanical instability of a dielectric elastomer tube actuator. *J Appl Phys*, 2010, 108: 074113
- 41 Jean-Mistral C, Basrour S, Chaillout J J. Modelling of dielectric polymers for energy scavenging applications. *Smart Mater Struct*, 2010, 19: 105006
- 42 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. An integrated dielectric elastomer generator model. In: *Proc SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*, 764216 (April 09, 2010). 2010, 7642: 764216
- 43 Bortot E, Denzer R, Menzel A, et al. Analysis of a viscous soft dielectric elastomer generator operating in an electrical circuit. *Proc Appl Math Mech*, 2014, 14: 511–512
- 44 Rosati Papini G P, Vertechy R, Fontana M. Dynamic model of dielectric elastomer diaphragm generators for oscillating water column wave energy converters. In: *ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems Volume 1: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation and Control of Adaptive Systems; Integrated System Design and Implementation*. Snowbird, Utah, USA, September 16–18, 2013. 3255: 1–9
- 45 Vertechy R, Rosati Papini G P, Fontana M. Reduced model and application of inflating circular diaphragm dielectric elastomer generators for wave energy harvesting. *J Vib Acoust*, 2015, 137: 011016
- 46 Brochu P, Li H F, Niu X F, et al. Factors influencing the performance of dielectric elastomer energy harvesters. In: *Proc. SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*, 76422J (April 09, 2010). 2010, 7642: 76422J
- 47 Jean-Mistral C, Porter T, Vu-Cong T, et al. Modelling of soft generator combining electret and dielectric elastomer. In: *Advanced Intelligent Mechatronics (AIM), 2014 IEEE/ASME International Conference on*, 2014. 1430–1435
- 48 Vu-Cong T, Jean-Mistral C, Sylvestre A. New operating limits for applications with electroactive elastomer: Effect of the drift of the dielectric permittivity and the electrical breakdown. In: *Proc. SPIE 8687, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2013*, 86871S (April 9, 2013). 2013, 8687: 86871S
- 49 Graf C, Aust M, Maas J. Simulation model for electroactive polymer generators. In: *Solid Dielectrics (ICSD), 2010 10th IEEE International Conference on 4–9 July 2010*
- 50 Zhu Y L, Wang H M, Zhao D B. Energy conversion analysis and performance research on a cone-type dielectric electroactive polymer generator. *Smart Mater Struct*, 2011, 20: 115022
- 51 Wissler M, Mazza E. Modeling and simulation of dielectric elastomer actuators. *Smart Mater Struct*, 2005, 14: 1396–1402
- 52 Lochmatter P, Kovacs G and Wissler M. Characterization of dielectric elastomer actuators based on a visco-hyperelastic film model. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: 477–486
- 53 Plante J S, Dubowsky S. Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators. *Int J Solids Struct*, 2006, 43: 7727–7751
- 54 Bortot E, Denzer R, Menzel A, et al. Analysis of viscoelastic soft dielectric elastomer generators operating in an electrical circuit. *Int J Solids Struct*, 2014, 78
- 55 Zhao X, Koh S J A, Suo Z G. Nonequilibrium thermodynamics of dielectric elastomers. *Int J Appl Mech*, 2011, 3: 203–217
- 56 Foo C C, Cai S, Koh S J A, et al. Model of dissipative dielectric elastomers. *J Appl Phys*, 2012, 111: 034102
- 57 Foo C C, Cai S, Koh S J A, et al. Performance of dissipative dielectric elastomer generators. *J Appl Phys*, 2012, 111: 094107
- 58 Wang Y Q, Xue H H, Chen H L, et al. A dynamic visco-hyperelastic model of dielectric elastomers and their energy dissipation characteristics. *Appl Phys A*, 2013, 112: 339–347
- 59 Wang Y Q, Chen H L, Wang Y J, et al. A general visco-hyperelastic model for dielectric elastomers and its efficient simulation based on complex frequency representation. *J Appl Mech*, 2015, 7: 1550011
- 60 Kaltseis R, Keplinger C, Koh S J A, et al. Natural rubber for sustainable high-power electrical energy generation. *RSC Adv*, 2014, 4: 27905–27913
- 61 Graf C, Hitzbleck J, Feller T, et al. Dielectric elastomer-based energy harvesting: Material, generator design, and optimization. *J Intell Mat Syst Str*, 2014, 25: 951–966
- 62 Vertechy R, Fontana M. Electromechanical characterization of a new synthetic rubber membrane for dielectric elastomer transducers. In: *Proc. SPIE 9430, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2015*, 94300K (April 1, 2015). 2015, 9430: 94300K
- 63 Lee R H, Basuli U, Lyu M Y, et al. Fabrication and performance of a donut-shaped generator based on dielectric elastomer. *J Appl Polym Sci*, 2014, 131: 2113–2124
- 64 Iskandarani Y H, Jones R W, Villumsen E. Modeling and experimental verification of a dielectric polymer energy scavenging cycle. In:

- Proc. SPIE 7287, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2009, 72871Y (April 06, 2009). 2009, 7287: 72871Y
- 65 Huang J S, Shian S, Suo Z G, et al. Maximizing the energy density of dielectric elastomer generators using equi-biaxial loading. *Adv Funct Mater*, 2013, 23: 5056–5061
- 66 Anderson I A, Ieropoulos I A, McKay T, et al. Power for robotic artificial muscles. In: *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*. 2011, 16: 1083–4435
- 67 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. Self-priming dielectric elastomer generator design. In: *Proc. SPIE 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012*, 83401Y (April 26, 2012). 2012, 8340: 83401Y
- 68 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. Realizing the Potential of Dielectric Elastomer Generators. In: *Proc. SPIE 7976, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*, 79760B (March 28, 2011). 2011, 7976: 79760B
- 69 McKay T, O'Brien B, Calius E, et al. Soft generators using dielectric elastomers. *Appl Phys Lett*, 2011, 98: 142903
- 70 Binh P C, Nam D N C, Ahn K K. Modeling and experimental analysis of an antagonistic energy conversion using dielectric electroactive polymers. *Mechatronics*, 2014, 24: 1166–1177
- 71 Moretti G, Fontana M, Verthey R. Parallelogram-shaped dielectric elastomer generators: Analytical model and experimental validation. *J Intell Mat Syst Str*, 2015, 26: 740–751
- 72 Moretti G, Fontana M, Verthey R. Modeling and control of lozenge-shaped dielectric elastomers. In: *ASME 2013 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems Volume 1: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation and Control of Adaptive Systems; Integrated System Design and Implementation*. Snowbird, Utah, USA, September 16–18, 2013. 2013–3258
- 73 Jean-Mistral C, Beaune M, Vu-Cong T, et al. Energy scavenging strain absorber: Application to kinetic dielectric elastomer generator. In: *Proc. SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*, 90561H (March 8, 2014). 2014, 9056: 90561H
- 74 Righi M, Verthey R, Fontana M. Experimental characterization of a circular diaphragm dielectric elastomer generator. In: *ASME 2014 Conference on Smart Materials, Adaptive Structures and Intelligent Systems Volume 1: Development and Characterization of Multifunctional Materials; Modeling, Simulation and Control of Adaptive Systems; Structural Health Monitoring; Keynote Presentation*. Newport, Rhode Island, USA, September 8–10, 2014. 7481: 1-9
- 75 李铁风. 介电高弹聚合物力电行为研究与器件设计. 博士学位论文, 杭州: 浙江大学, 2012. 1–124
- 76 Fontana M, Moretti G, Lenzo B, et al. Loading system mechanism for dielectric elastomer generators with equi-biaxial state of deformation. In: *Proc. SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*, 90561F (March 8, 2014). 2014, 9056: 90561F-1–11
- 77 Jean-Mistral C, Basrour S. Scavenging energy from human motion with tubular dielectric polymer. In: *Proc. SPIE 7642, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2010*, 764209 (April 09, 2010). 2010, 7642, 764209: 1–12
- 78 吕雄飞. 基于介电弹性体智能软材料的能量收集理论研究与器件设计. 硕士学位论文, 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014. 1–80
- 79 Foerster F, Schlaak H F. Optimized deformation behavior of a dielectric elastomer generator. In: *Proc. SPIE 9056, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2014*, 905637 (March 8, 2014). 2014, 9056: 905637-1–11
- 80 McKay T G. Soft, low complexity dielectric elastomer generators. Dissertation for Doctoral Degree. New Zealand: The University of Auckland, 2010. 1–144
- 81 Vu-Cong T, Jean-Mistral C, Sylvestre A, et al. Electrets substituting external bias voltage in dielectric elastomer generators: Application to human motion. *Smart Mater Struct*, 2013, 22: 025012
- 82 Vu-Cong T, Jean-Mistral C, Sylvestre A. Autonomous dielectric elastomer generator using electrets. In: *Proc. SPIE 8687, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2013*, 86870H (April 9, 2013). 2013, 8687: 86870H
- 83 Jean-Mistral C, Vu-Cong T, Sylvestre A. Flexible autonomous scavengers: The combination of dielectric polymers and electrets. In: *Proc. SPIE 8340, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2012*, 834029 (April 26, 2012). 2012, 8340: 834029
- 84 Jean-Mistral C, Vu-Cong T, Sylvestre A. On the power management and electrets hybridization of dielectric elastomer generators. *Smart Mater Struct*, 2013, 22: 104017
- 85 Eitzen L, Graf C, Maas J. Bidirectional HV DC-DC converters for energy harvesting with dielectric elastomer generators. *IEEE*, 2011, 47: 897–901
- 86 Eitzen L, Graf C, Maas J. Cascaded bidirectional flyback converter driving DEAP transducers. *IEEE*, 2011, 1553-572X: 1226–1231
- 87 Lo H C, McKay T, O'Brien B, et al. Circuit design considerations for regulating energy generated by dielectric elastomer generators. In: *Proc. SPIE 7976, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2011*, 79760C (March 28, 2011). 2011, 7976: 79760C
- 88 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Current status and future prospects of power generators using dielectric elastomers. *Smart Mater Struct*, 2011, 20: 124006

- 89 Jean-Mistral C, Basrour S, Chaillout J-J. Dielectric polymer: Scavenging energy from human motion. In: Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, 692716 (April 10, 2008). 2008, 6927: 692716
- 90 Prahlad H, Kornbluh R, Pelrine R, et al. Polymer power: Dielectric elastomers and their applications in distributed actuation and power generation. In: Proceedings of ISSS 2005 International Conference on Smart Materials Structures and Systems, July 28–30, 2005, Bangalore, India. 100–107
- 91 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Innovative Wave Power Generation System Using Electroactive Polymer Artificial Muscles. Bremen: Oceans-IEEE, 2009. 143–145
- 92 陈明, 林桂娟, 宋德朝. 电活性聚合物微型发电机. 光学精密工程, 2010, 18: 2413–2420
- 93 Chiba S, Waki M, Wadac T. Consistent ocean wave energy harvesting using electroactive polymer (dielectric elastomer) artificial muscle generators. Appl Energy, 2013, 104: 497–502
- 94 Liu Y, Ren K L, Hofmann H F, et al. Investigation of electrostrictive polymers for energy harvesting. IEEE Trans. 2005, 52: 2411–2417
- 95 Lam T, Tran H, Yuan W, et al. Polyaniline nanofibers as a novel electrode material for fault-tolerant dielectric elastomer actuators. In: Proc. SPIE 6927, Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD) 2008, 692700 (April 10, 2008). 2008, 6927: 692700
- 96 Babic M, Vertechy R, Berselli G, et al. An electronic driver for improving the open and closed loop electro-mechanical response of dielectric elastomer actuators. Mechatronics, 2010, 20: 201–212

Energy harvesting based on soft material of dielectric elastomers: Status, trends and challenges

ZHONG LinCheng¹, WANG YongQuan^{1,2} & CHEN HuaLing^{1,3}

¹ School of Mechanical Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

² State Key Laboratory for Manufacturing System Engineering, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China;

³ State Key Laboratory for Strength and Vibration of Mechanical Structures, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China

As a kind of new soft electroactive function materials (EAP), dielectric elastomers (DE) show great potentials in harvesting energy from human bodies or the nature, due to its good flexibility, large deformation, high specific energy density and many other advantages. This paper makes a review of the research status and main progress on energy harvesting based on dielectric elastomers, including its behavior mechanism and model description, the influence of material property to energy harvesting performance, DE generator (DEG) structure design, circuit design, as well as the development and application of related prototype products. Then, the main problems and challenges existing in current research are analyzed. At last, this paper makes a outlook for the development trend and research priorities on DE-based energy harvesting.

dielectric elastomers, energy harvesting, systematic optimization, viscoelasticity, circuit design

doi: 10.1360/N092016-00020