

电活性介电弹性体的本构理论和稳定性研究进展

刘立武^①, 李金嵘^②, 吕雄飞^①, 李丰丰^①, 刘彦菊^①, 冷劲松^{②*}

① 哈尔滨工业大学航天科学与力学系, 哈尔滨 150001;

② 哈尔滨工业大学复合材料与结构研究所, 哈尔滨 150080

* E-mail: lengjs@hit.edu.cn

收稿日期: 2014-12-21; 接受日期: 2015-02-27

国家自然科学基金(批准号: 11102052, 11272106, 11225211)资助项目

摘要 电活性聚合物在外加电场诱导下能够改变形状或体积, 不施加电场时, 它又能恢复到原来的形状或体积, 具有特殊的力学及电学性能. 介电弹性体是制造驱动器、传感器、振荡器和能量收集器等转换器的最有潜力电活性聚合物材料之一, 在人工肌肉、智能仿生、航空航天、机械、生物等领域都有广泛的应用潜力. 本文首先简要综述了介电弹性体及其应用, 然后重点介绍了介电弹性体 EAP 材料的理论研究进展, 其中包括本构关系、机电稳定性、突跳稳定性、超大电致变形机理、许用区域描绘及其应用器件的失效分析. 本文最后对介电弹性体电致活性聚合物软质材料相关研究进行了展望.

关键词

介电弹性体
本构理论
大变形
稳定性
许用区域
应用器件失效

1 绪论

长期以来, 研究人员多致力于在工程领域广泛应用的硬质材料研究, 然而, 自然界中动、植物生物体的机械结构通常是软质材料. 与传统的金属、陶瓷等“硬质材料”相比, 高分子聚合物是“软质材料”的典型代表^[1]. 软质材料针对外界的刺激(如机械力、温度、电磁场、热场和化学场等等)能够产生不同程度的形变而体现出活性. 智能软质材料是一种能感知外部刺激、进行判断并适当处理且本身可执行的新型功能材料, 相比传统硬质智能材料具有可承受大变形、具备良好生物亲和性、轻质廉价等特点. 智能软材料及应用器件有巨大的潜在应用前景, 大到石油开采密封, 小到药物输送, 在航空航天、智能仿生、机械、生物、军工等领域都有广泛的应用潜力. 由于其变形能力和驱动力接近于生物肌肉, 在机器人领

域也有非常好的发展前景. 智能软质材料在模拟生物特征方面展现出了无与伦比的特性, 因此它也被称为活性软质材料. 作为新型智能软活性聚合物材料的代表, 电活性聚合物软质材料日益显示出其巨大的优越性^[1-17].

介电弹性体是典型的 EAP 材料, 由美国斯坦福研究院于 20 世纪 90 年代开始研究, 在外加电场下, 可以产生大变形, 具有高弹性能密度、超短反应时间、高效率等优点, 被广泛应用于人工肌肉、面部表情、驱动器、能量收集装置、传感装置、机器人和盲文显示装置等各个方面, 在航空航天、智能仿生等领域具有巨大的应用潜力^[1-26]. 虽然介电弹性体在近几年来迅猛发展, 但是现在多数还只限于实验室应用, 商业应用仍然面临着巨大挑战. 制约条件包括: 易失效破坏, 驱动力较低和电致变形达不到实际应用的要求等等. 因此, 迫切需要深入研究介电弹性

引用格式: 刘立武, 李金嵘, 吕雄飞, 等. 电活性介电弹性体的本构理论和稳定性研究进展. 中国科学: 技术科学, 2015, 45: 450-463
Liu L W, Li J R, Lv X F, et al. Progress in constitutive theory and stability research of electroactive dielectric elastomers (in Chinese). Sci Sin Tech, 2015, 45: 450-463, doi: 10.1360/N092014-00433

体及其结构的力学特性,进而对其材料和器件的设计进行指导和优化.另外,由于介电弹性体及其复合材料或结构在力学上具有几何大变形与材料非线性的特征,而且在响应机理和工作环境上具有多物理场耦合(机械力场、电场和热场等)的特点,因此对于这类材料与结构的力学问题研究具有十分重要的价值.

本文首先简要综述了介电弹性体及其应用,然后重点介绍了介电弹性体电活性聚合物材料的理论研究进展,其中包括本构关系、机电稳定性、突跳稳定性、超大电致变形机理、许用区域描绘及其应用器件的失效分析.本文最后对介电弹性体电致活性聚合物软质材料相关研究进行了展望.

2 介电弹性体简介

电活性聚合物是一种智能多功能材料,在受到外加电场作用时能够改变形状或体积,当外加电场撤掉后,又恢复成原来的形状或体积,可以用来设计和制造智能转换器件,如驱动器、传感器和能量收集器等等^[1-6].EAP材料与压电、铁电材料相比,具有大变形和轻质量等优点,是一种具有重大发展潜力的智能多功能软质材料^[7-27].

按照其作用机理不同,电活性聚合物主要分为电子型和离子型^[3-9].电子型电活性聚合物材料主要包括介电弹性体、铁电聚合物、液晶弹性体和电致伸

缩接枝弹性体材料等.离子型电活性聚合物材料主要包括离子聚合物金属复合材料、碳纳米管、电致流变液体、离子聚合物凝胶体和导电型聚合物^[3-6].

介电弹性体属于电子型电活性聚合物材料,在外加电场下,可以产生大变形,具有高弹性能密度、高机电转化率、超短反应时间、轻质量和极佳柔性等特点^[1-17].硅橡胶和丙烯酸是最常见的介电弹性体^[2-6,11-17].表1列举出硅橡胶和丙烯酸材料性能的比较.

在介电弹性体两个相对表面均匀涂覆柔性电极(比如石墨),当对其施加电压时,弹性体将发生厚度的减小和面积的扩大^[1-28].图1是电压驱动介电弹性体的原理图,由于在电极上施加电压,上下两层电极上的异性电荷相互吸引,每层电极上的同性电荷相互排斥,当电场力足够大的时候,薄膜将产生明显的面积和厚度变化.

3 介电弹性体的应用

基于此原理,介电弹性体可以用来设计和制造不同结构的智能驱动器(图2),人工肌肉(图3),仿生智能机器人(图4),除尘刷(图5),飞艇舵(图6),夹持器(图7),盲文显示装置(图8),扬声器(图9)等等^[3-6,10].基于此原理逆过程可设计和制造能量收集器(图10)^[10,29].

表1 硅橡胶和丙烯酸性能的比较^[5]

材料性质	硅橡胶(TC-5005)	丙烯酸(VHB4910)
最大应变(%)	150	380
应力(MPa)	典型: 0.3; 最大 3.2	典型: 1.6; 最大 7.7
能量密度(kJ/m ³)	典型: 10; 最大 750	典型: 150; 最大 3400
密度(kg/m ³)	1000	960
最高功率(W/kg)	5000	3600
可持续功率(W/kg)	500	400
带宽(Hz)	1400	10
最大适用范围	>50 kHz	>50 kHz
循环寿命(不同应变下)	>10 ⁷ : 5%; 10 ⁶ : 10%	>10 ⁷ : 5%; 10 ⁶ : 50%
机电耦合(%)	最大: 80; 典型: 15	最大: 90; 典型: 25
效率(%)	最大: 80; 典型: 25	最大: 90; 典型: 30
弹性模量(MPa)	0.1~1	1~3
响应速度(m/s)	<30	<55
热膨胀(mm/°C)		1.8×10 ⁻⁴
电压(V)	>1000	>1000
最大电场(MV/m)	110~350	125~440
相对介电常数	~3	~4.8
温度范围(°C)	-100~250	-10~90

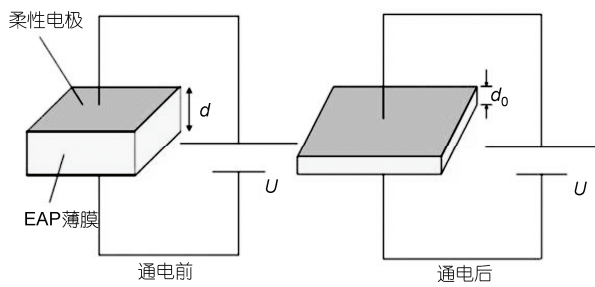


图 1 电压驱动介电弹性体的原理图^[2]

图 2 列举出一些 EAP 驱动器. 典型的结构包括三爪夹紧形(图 2(a)), 四爪夹紧形(图 2(b)), 半球形(图 2(c)), 卷形(图 2(d)), 折叠形(图 2(e)), 堆栈形(图 2(f)), 球形(图 2(g))等.

图 3(a)是基于介电弹性体卷形驱动器驱动的人工肌肉手臂. 它与人进行了掰手腕比赛. 制造出的人工肌肉手臂能够支撑对抗人类手臂时间长达 26 s, 这是一个重要的里程碑. 显示出介电弹性体在人工肌肉仿生领域的巨大应用潜力^[8]. 介电弹性体的可塑性和可控制性, 将对人造假肢和类机器人的快速发展起到极大的推动作用. 如图 3(b)所示, 2005 年 11 月在韩国釜山举办的 APEC 最高首脑会议上, 由汉森机器人技术公司设计和制造的机器人展示了介电弹性体的在面部表情领域应用的潜力(模拟爱因斯坦面部表情), 它可以表现出快乐、忧伤和愤怒等不同情绪, 引起参会人员的广泛关注和极大反响^[8].

为达到理想的仿生学性能, 用于制造人工肌肉的材料必须具有类自然肌肉的重要特征, 如驱动方式、驱动应力、反应速度和效率等等. 肌肉功能很多, 运动时肌肉通常作为能量的供应者, 同时起支撑作用, 具有可变的硬度和刚度. 具有“人工肌肉”之称的介电弹性体材料已经用于仿生学机器人领域, 图 4 是一些例子, (a)和(b) 是应用丙烯酸介电弹性体制备的卷型驱动器驱动的一类昆虫机器人, (c) 是南丹麦大学设计和制造的自感知智能机器人. 它四肢的传感器是应用介电弹性体材料制造的^[8].

科技的迅猛发展有望制造出类昆虫机器人(机器昆虫), 它们能够进入隐蔽地区的结构(例如飞机引擎)执行维修和侦察等任务. 可以想象, 在不久的将来, 电活性聚合物在集成众多学科成就的基础上将完成模拟地球上生物的庞大而崭新的计划, 比如, 像猫一样的软着陆, 像蚱蜢一样作远距离跳跃, 像鱼一样会游泳, 像鸟一样会飞翔, 像蚂蚁一样会挖掘和分工协作.

介电弹性体重量轻和柔性好的特点使其在航空航天等领域具有广阔的应用前景, 美国航空航天局、国防部高级计划研究局和欧洲航空航天局等相关机构都积极开展了广泛的探索研究, 取得了一系列的研究成果^[7].

1995 年, 美国航空航天局启动了轻质肌肉驱动器的研究计划, 由喷气推进实验室 Yoseph Bar-Cohen

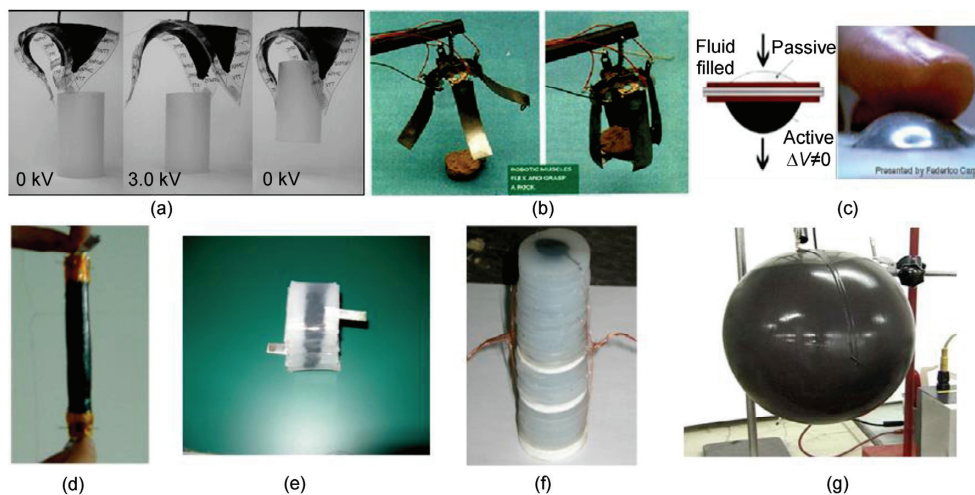


图 2 (网络版彩图)典型的 EAP 驱动器^[7,10-12,25,26,28]

(a) 介电弹性体三爪夹紧装置^[28]; (b) IPMC 三爪夹紧装置^[7]; (c) 耦合流体的半球形驱动器^[10]; (d) 卷形驱动器^[11]; (e) 折叠形驱动器^[25]; (f) 堆栈形驱动器^[10]; (g) 充气式球形驱动器^[12]



图3 (网络版彩图)基于介电弹性体的人工肌肉手臂^[13](a)和面部表情的驱动^[8](b)

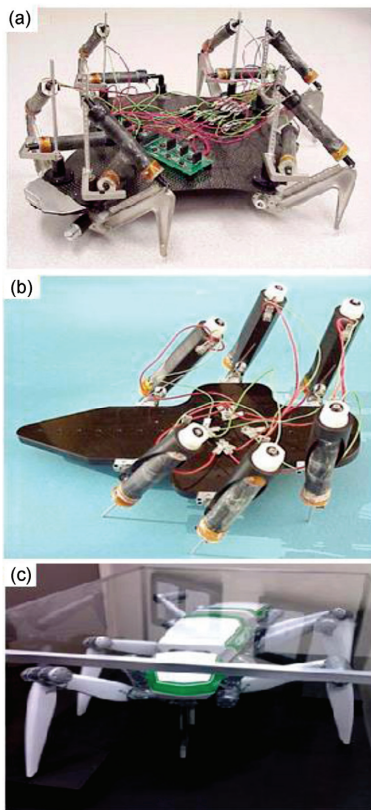


图4 (网络版彩图)介电弹性体仿生机器人^[8,18]

博士研究组开展了介电弹性体驱动机器人手臂的研究. 美国斯坦福研究院与日本签署了微型机器人研究计划, 并最终选择了介电弹性体材料研制人造肌肉驱动器^[8].

原有的空间探测器窗口除尘机械刷重量大、结构复杂, 而基于电活性聚合物驱动器, 可以制成空间用智能除尘刷(比如月球车除尘刷, 如图 5(a)和(b)分别为示意图与实物图), 具有重量轻、结构紧凑、驱动功率低等优点, 可有效减轻空间探测器的重量和节约能源^[15].

如图 6(a)所示, 2007年, 瑞士联邦材料测试研究实验室提出采用介电弹性体制作飞艇舵驱动器, 能够控制飞艇的自由转向^[16]. 如图 6(b)所示, 从 2002年, 俄亥俄航天局开始了基于电活性聚合物材料进行的新概念飞行器——固态飞行器 SSA 的研究^[17].

太空碎片对于运行在地球轨道的航天器已经产生了日益严重的威胁, 基于介电弹性体最小能量结构制作的夹持器已经在朝着缓解该问题方面做出了努力^[30]. 相比于机械臂、网状与非接触式的碎片捕捉机构, 所提出的新型夹持器具有重量轻、可重复工作、能耗低等优点. 图 7中(a), (b)与(c)分别是安装有该夹持器的卫星概念图, 夹持目标与多节式夹持器实物图. 工作过程如图 7(d)所示, 在发射过程中处于卷曲状态(stage 1), 入轨后释放, 由于弹性能恢复初始状态(stage 2), 电压加载后可进一步展开(stage 3),

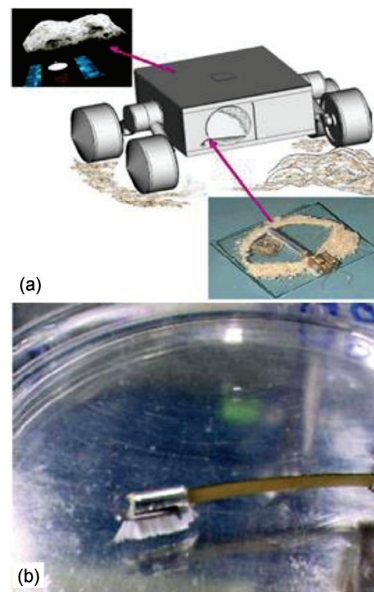


图5 (网络版彩图)基于电活性聚合物材料的智能除尘刷^[15]

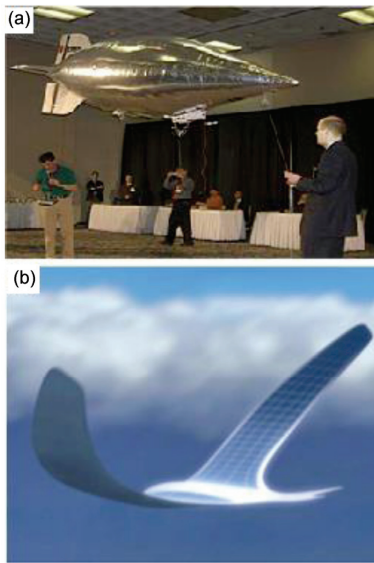


图6 (网络版彩图)基于电活性聚合物的飞艇舵^[16](a)和固态飞行器^[17](b)

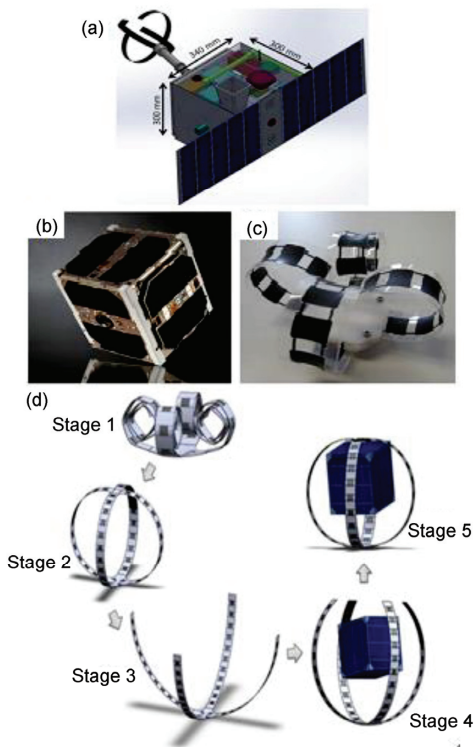


图7 (网络版彩图)卷曲多节式可展开夹持器^[30]

夹持空间碎片后电压卸载可将其抓牢(stage 4 与 5)。经试验测量, 已制作出的用于概念验证的夹持器可以实现大于 60° 的最大弯曲角与 2.2 mN 的最大夹持

力, 同时结构质量仅有 0.65 g。

传统的可重复利用的盲文设备都是由压电元件制成的, 其结构设计复杂再加上压电盲文元件的昂贵, 导致广大视力有障碍的患者对于这种设备望而却步。如图 8(a)和(b)所示, 哈尔滨工业大学冷劲松课题组设计和制造了基于介电弹性体驱动器的盲文触觉显示器。它由控制部分、驱动器和机械传动部分、触摸屏幕及外壳组成。当用户通过人机交互界面输入英文字母或单词时, 程序由对应的布莱尔编码关系转换成电信号, 通过单片机输出信号, 控制 6 个继电器的开断, 进而控制驱动器是否变形, 而连接在介电弹性体驱动器上的机械传动结构将控制触摸屏幕的规则变化。

由于介电弹性体具有较宽的频带, 而且机电响应在毫秒数量级, 当对其施加交流电压时, 它将以某一频率振动, 产生声音。图 9(a)和(b)分别是介电弹性体扬声器的基本结构和工作原理。面临的一个问题是, 声音在传播过程中的失真较为严重。已经有一些初步的研究通过修正声音的非线性部分来提高声音的保真度, 取得了一定效果^[26]。

基于介电弹性体的机械致电效应, 可以设计和制造能量收集器。图 10(a)将介电弹性体安装在鞋跟处来收集人类行走时的能量^[9,26]; 图 10(b)与(e)通过水轮式与管式结构收集河水流动产生的机械能并转化成电能^[31,32]; 图 10(c)展示了一个薄膜充气式能量

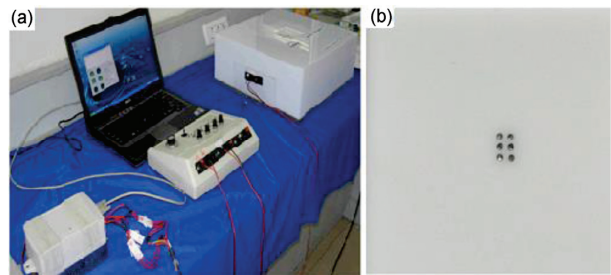


图8 (网络版彩图)基于介电弹性体的盲文显示器^[14]

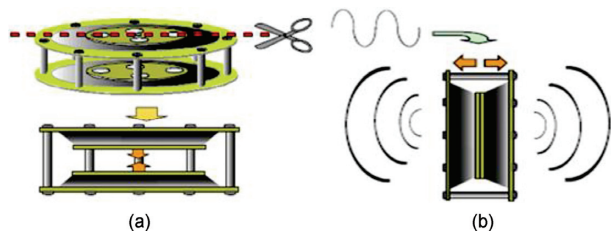


图9 (网络版彩图)介电弹性体扬声器^[26]

收集器^[33]; 图 10(d)通过浮漂式能量收集器将海浪振动的机械能转化为电能^[34]。

介电弹性体材料已经开始商业化. 丹麦 Danfoss PolyPower A/S 公司 2011 年成立, 并制备出一种新型性能优异的介电弹性体. 下图 11 描述介电弹性体的薄膜的商业生产过程. 据报道, Danfoss 公司应用此材料制造的驱动器可以驱动 10 kg 的重物.

4 介电弹性体本构理论研究进展

介电弹性体软质材料具有材料非线性和几何大变形特性, 而且其承受的载荷还具有多场耦合特点, 比如机械力场和电场耦合, 机械力场、电场和热场耦合等等. 另外, 虽然介电弹性体在航空航天, 机器人等工程领域应用潜力巨大, 但商业应用仍然面临着巨大挑战. 因此, 研究这类材料的力学性能是十分重要和有意义的. 介电弹性体的稳定性和大变形两大研究主题引起了研究人员的广泛兴趣. 围绕着这两

个主题, 介电弹性体及其复合材料在多物理场耦合的本构关系、机电稳定性、突跳稳定性、超大电致变形机理、许用区域描绘及其应用器件的失效分析被研究人员深入而广泛的研究^[1,2,35-101].

4.1 介电弹性体本构理论研究进展

2000 年, Pelrine 等人^[2]建立了一个简单的模型来描述施加电场后的介电弹性体的力学性能. 他们把均匀涂覆柔性电极的介电弹性体看成可变电容的平行板电容器, (这是因为施加机械力和电场力后, 材料将产生厚度的降低和面积的增加, 引起电容的变化), 基于经典的麦克斯韦理论, 推导出应力与施加电场和材料介电常数的关系. 它揭开了介电弹性体本构理论研究的序幕.

介电弹性体本构理论的研究主要包括下面三种代表性的方法^[21,35-39]. 第一种研究方法是基于超弹性或粘弹性理论, 联合唯象学的方法建立介电弹性体的本构关系^[21,40-45]. 比如, Kofod 进行了丙烯酸单向拉伸实验, 证明了 4 个参数的 Ogden 模型与实验吻合的最好^[21]. Carpi 等人^[40]建立了硅橡胶圆柱形驱动器的简单力学模型, 并实验验证了该模型的有效性. Lochmatter 等人^[41]考虑超弹性理论研究了介电弹性体的平面驱动器力学行为. Sommer 等人^[42]基于粘弹性理论研究丙烯酸驱动器的动态响应, 但与实验符合的不好. Yang 等人^[43], Plante 和 Dubowsky^[44], Wissler 和 Mazza^[45]分别提出介电弹性体环形驱动器、圆形驱动器和菱形驱动器的粘弹性解析模型. 这种方法没有考虑机电耦合的影响.

第二种研究方法是基于经典连续介质力学和麦克斯韦—法拉第电磁学理论, 建立介电弹性体机电耦合系统的基本理论框架, 进而获得本构关系. 比较有代表的包括: Goulbourne 等人^[36]考虑材料非线性, 几何非线性以及机电耦合场作用, 推导出介电弹性体的本构关系, 并把此模型应用到数值求解充气式的驱动器中, 研究了预应变, 外部压力, 施加电压, 电极面积等不同参数对驱动器性能的影响. Dorfmann 等人^[35]提出了非线性弹性电介质的基本理论框架, 以本构关系为基础, 求解了几个描述电场对系统性能影响的边界值问题. Mcmeeking 和 Landis^[38]建立了可变性电介质, 电极和周围空间所构成的热力学系统在等温过程的能量平衡方程, 推导出本构关系. Trimarco^[39]建立了弹性固体的拉格朗日静电学理论

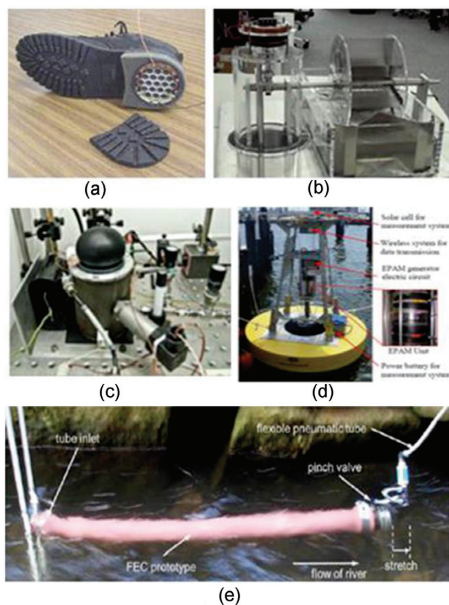


图 10 (网络版彩图)基于介电弹性体的能量收集器^[9,26,31-34]



图 11 (网络版彩图)介电弹性体商业生产^[10]

框架, 推导出应力张量的解析表达式.

第三种研究方法是基于热力学理论, 建立可变形电介质的热力学理论框架. 有代表的是美国哈佛大学 Suo 教授研究组^[37]. 他们从能量的角度出发, 考虑机电耦合效应, 建立联合弹性应变能和电场能的系统自由能函数, 推导可变形电介质(比如介电弹性体)的本构关系, 研究其力学行为. 这里他们把自由能直接写成了弹性能和电场能的简单加和形式, 没考虑两种能量之间的耦合. 这是因为机械响应和电响应的响应时间相差几个数量级. 耦合存在于电场能的表达和几何学关系中. 在此基础上, Liu 等人^[46]基于超弹性理论和机电耦合理论, 并联合材料参数的实验测试, 分析了介电弹性体及其复合材料的力学行为, 推导出不同条件下的本构关系(比如: 约束变形情况下和自由变形情况下). Hong^[47]建立了粘弹性电介质耗散系统的热力学框架, 推导出本构关系, 并研究其瞬态的不稳定性. Zhao 等人^[48]研究了介电弹性体非线性和非平衡态粘弹性力学行为.

4.2 介电弹性体稳定性研究进展

介电弹性体在机械力场和电场等物理场耦合作用下将导致系统失稳, 影响材料及其应用器件的正常工作. 介电弹性体机电稳定性研究开始于 2007 年^[49]. 锁志刚等基于文献[54]的研究, 揭示了介电弹性体软质材料从机电稳定到机电不稳定这一过程. 在介电弹性体两个相对表面均匀涂覆柔性电极, (这里忽略柔性电极的电阻, 并假设柔性电极和弹性体的变形协调), 施加电场后, 由于静电力作用, 材料将沿电场施加的方向收缩, 而在垂直于电场施加的方向扩展延伸. 介电弹性体厚度变小导致施加的电场强度更高, 这一不可逆过程一直持续下去, 当施加的电场超过其临界电场时, 介电弹性体被击穿, 这就是介电弹性体的机电不稳定^[49].

介电弹性体的机电不稳定现象被 Plante 和 Dubowsky^[44]在实验中观测到, 如图 12 所示, 在某一特定电压作用下, 变形的介电弹性体薄膜一部分区域的状态是平滑的, 另一部分区域的状态是褶皱的. 薄膜的平滑区比较厚, 具有较小的平面拉伸; 薄膜的褶皱区比较薄, 具有较大的平面拉伸. 这两种状态共存. 而且, 实验中也可以明显的观察到介电弹性体薄膜的机电不稳定区域的传播^[50].

Zhao 和 Suo^[49]提出可以应用任意的自由能分析

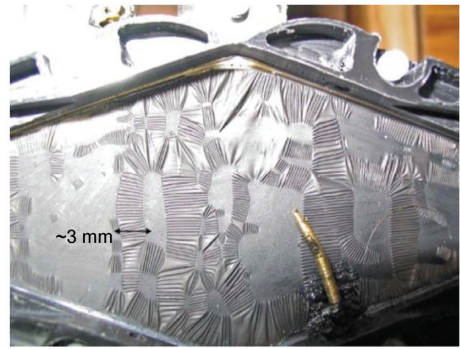


图 12 (网络版彩图)介电弹性体的机电不稳定^[44,50]

介电弹性体机电稳定性. 他们以 neo-Hookean 为例, 分别研究了施加等双轴预应力和非等双轴预应力时的性质, 描绘了介电弹性体名义电位移和名义电场的关系, 理论证明了预拉伸能够显著提高介电弹性体的机电稳定性这一实验现象, 计算出的临界击穿电场和实验结果吻合的很好^[44,49]. 基于此, 介电弹性体机电耦合系统的非线性机电稳定性分析越来越深入和具体^[49-61]. Liu 等人^[51]应用两个材料常数的 Mooney-Rivlin 弹性应变能模型分析介电弹性体的机电稳定性行为, 引入的材料常数比 k 能够分析不同类型和结构的介电弹性体, 得出当 k 增大时, 对应不同类型或结构的介电弹性体机电稳定性显著增强. 理论结果能够帮助指导介电弹性体驱动器的设计和制造. 进一步, Liu 等人^[52]应用多材料常数的弹性应变能模型进行介电弹性体机电稳定性的分析.

Norris^[53]应用 Ogden 弹性应变能分析弹性体的稳定性行为, 精确推导出临界真实电场、名义应力与拉伸率的关系, 并给出 Ogden 模型简化形式时, 临界真实电场、名义应力与拉伸率的更为简化的精确关系. Zhou 等人^[50]研究了介电弹性体的不稳定性传播. He 等人研究了介电弹性体经历非均匀变形时的机电稳定性^[55,56]. Xu 等人^[57]应用全应力理论进行了介电弹性体的机电稳定性研究. 上述工作中的研究对象是理想介电弹性体.

线性或非线性电致伸缩变化的介电弹性体的大变形和机电稳定性被深入研究^[58-62]. 介电弹性体经历大变形时的介电常数依赖于自身的变形^[45,46,62]. Zhao 和 Suo^[58]提出把介电常数拟合为依赖于拉伸的线性变化函数, 研究了介电弹性体的大变形和稳定性行为. Liu 等人^[59-61]基于 Gofod 等人^[62]对丙烯酸实验研究, 提出介电常数是拉伸的非线性函数, 从解

析表达和数值模拟两个角度深入研究系统的机电稳定性.

在对介电弹性体的电致变形实验中, 研究人员观测到它从一个稳定状态突然跳变到另一个稳定状态, 这一过程被称为突跳稳定性^[63,64]. 理论结果也表明, 介电弹性体有可能在未被电击穿的情况下避免机电不稳定的产生, 进而稳定在一个厚度更薄的状态. 这是由于介电弹性体达到拉伸极限附近时, 硬度突然急剧增大, 增加了其抵抗电击穿的能力, 避免或者消除了机电不稳定的产生^[65]. Suo 和 Zhu^[64]研究了互穿网络介电弹性体的突跳不稳定性, 预测出应用器件的超大电致变形. Li 等人^[65-67]进行了经历极化饱和的非线性介电弹性体的大变形和突跳稳定性研究, 得到的结论可以指导应用介电弹性体制备大变形高性能的转换器. Liu 等人^[68]建立了非线性极化饱和介电弹性体的一般理论. 应用经历极化饱和的电场能计算出电场力, 得出和经典麦克斯韦理论不同的结果, 进一步研究突跳不稳定性性能, 并预测极化饱和对电致变形的影响. He 等人^[69]研究了介电弹性体球壳的突跳不稳定性. Rudykh 等人^[70]研究了电致活性聚合物球体的突跳电致变形驱动性能. Zhu 等人^[71]研究了弹性体中气泡的非线性突跳膨胀行为.

4.3 介电弹性体的电致变形研究进展

研究人员从实验和理论两个方面进行了弹性体电致变形的研究^[2,72-77]. 实验证明, 为了获得介电弹性体大电致变形可以通过以下几种不同方法: 预拉伸介电弹性体^[2], 互穿网络的介电弹性体^[27,72], 应用弹性体在溶剂中的溶胀效应^[73], 电荷驱动介电弹性体^[74]等等. 下面列举几个典型的电致变形实验. 1998年, Pelrine 等人^[75]揭示出对硅橡胶介电弹性体施加电场后可以产生 30%的电致驱动变形. 2000年, Science 报道了经历 300%的等双轴预拉伸后丙烯酸在施加电场的条件下产生 100%的电致驱动变形^[2]. Ha 等人^[72]进行的实验证明了在介电弹性体中引入第 2 种网络, 使弹性体内部的预拉伸增加, 进而增大了其电致驱动变形. 另外, 应用电荷驱动代替电压驱动介电弹性体可以诱导其产生超过 100%的电致变形, 这是因为应用电荷驱动可以有效的抑制或避免机电不稳定的发生^[74].

Zhao 和 Suo^[76]建立了能够产生超大电致变形的介电弹性体理论, 根据电压-拉伸曲线和电击穿-拉伸

曲线的不同位置关系, 提出三种不同机电响应特性的介电弹性体. 该理论预测出选择和设计适当的电压变形响应, 超过 500%的超大电致变形是可能达到的. Koh 等人^[77]理论阐明了预拉伸后的介电弹性体或具有短链的介电弹性体复合材料将产生更大的电致驱动变形, 综合考虑预拉伸, 应变硬化和聚合物链长的影响, 提出了介电弹性体产生超大变形的机理.

4.4 介电弹性体的许用区域研究进展

介电弹性体的许用区域描述也是一个研究热点^[78-82]. Díaz-Calleja 等人^[78]对 neo-Hookean 型硅橡胶的机电稳定性行为进行了深入的研究, 给出两种特殊载荷情况下的 Hessian 矩阵. 描绘的形象而直观的理解 neo-Hookean 硅橡胶的稳定性行为. 另外, 他们研究了不可压缩硅橡胶在电场作用下的变形及分叉情况^[79]. Koh 等人^[88]采用 Neo-Hookean 模型通过许用区域计算理想状态时, 能量收集器的最大理论转换能量为 6.3 J/g. Liu 等人^[80]描绘出 Mooney-Rivlin 型硅橡胶的机电稳定性许用区域. Katia 和 Massimiliano^[81]研究了多层软电介质的不稳定性. 根据电介质机电耦合系统 Hessian 矩阵的正定性消失, 微观分叉, 宏观分叉和电击穿四种典型的临界控制条件建立层状电介质的许用区域. Moscardo 等人^[82]应用 neo-Hookean 弹性应变能和不变介电常数的电场能耦合研究了介电弹性体卷形驱动器失效的理论模型, 包括电击穿、拉力消失、拉伸破坏和机电不稳定等等. Koh 等人^[89]采用 Arruda-Boyce 模型给出了许用区域, 分析了拉伸极限对于转换能量的影响. Wang 等人^[83]研究了介电弹性体薄膜在不同变形模式下的许用区域, 得出纯剪变形可以避免力电失稳, 而等双轴变形则可以转换更多的能量.

4.5 介电弹性体应用器件理论研究进展

为了更好的指导设计和实际应用, 研究人员进行了介电弹性体驱动器、能量收集器等应用器件的大变形, 稳定性和失效等力学行为研究^[29,84-90]. Zhu 等人^[84]推导了介电弹性体管状驱动器的力电耦合本构关系, 研究了管状驱动器的有限变形和机电稳定性. Zhu 等人^[85,86]研究了介电弹性体球形驱动器的简谐振动, 受迫振动等力学行为和混沌行为. Wang 等人^[87]进行了充液式半球形介电弹性体驱动器数值分析. 数值

预报和实验结果吻合的非常好. 提出的数值计算模型可以用来探索充液式驱动器的非线性行为. Koh 等人^[88]对介电弹性体能量收集器进行了理论分析, 并给出循环一周情况下产生的能量和机电转换效率. Liu 等人^[29]考虑 Mooney-Rivlin 型硅橡胶能量收集器的典型失效模型, 给出等双轴和非等双轴情况下的许用区域, 计算出能量收集器工作一周情况下产生的能量, 设计和制造出能量收集器并进行初步测试. Koh 等人^[89]比较了介电弹性体和自然橡胶用来制备能量收集器时能产生的最大能量. Zhao 和 Suo^[90]提出介电弹性体驱动器的有限元可编程设计的方法. 最近, Suo^[1]详细综述了介电弹性体的基本理论, 发展了耦合大变形和电场的连续介质力学和热力学, 描述了非线性和非平衡行为, 比如机电不稳定性和粘弹性行为. 采用介电弹性体机电耦合理论能够通过有限元方法对介电弹性体应用器件进行仿真模拟^[1,90].

4.6 非均匀介电弹性体的力学行为

Suo^[1]对非均匀变形的介电弹性体膜进行了理论分析. 他由热力学平衡条件导出了变形场和电势场的控制方程组, 并通过控制方程的等价弱形式建立了介电弹性体的有限元方法. He 等人^[95]基于理想介电弹性体模型研究了轴对称面外变形的介电弹性体膜, 并分析了此种形式的换能器的尺寸对其性能的影响.

4.7 介电弹性体的机电相变

介电弹性体的机电相变理论及应用此理论进行更大能量转化的方法被哈佛大学 Suo 教授研究组^[91]提出. 在介电弹性体薄膜上下表面均匀涂覆柔性电极, 施加电场后, 会导致薄膜的面积增大和厚度减小, 薄膜上的电荷及电容也随之改变. 正如前面实验现象所提到的, 在一定的外力及电压下, 介电弹性体膜部分较厚的区域会由于机电不稳定而变薄, 但不会发生电击穿, 于是产生了薄厚区域共存的情况. 由于介电弹性体的体积不可压缩, 较薄区域的面积要增加, 但由于受到较厚区域的约束, 较薄区域便会发生褶皱. 不稳定介电弹性体平滑区域的膜较皱缩区域厚. 随着膜上电荷的增加, 较薄区域增长直至弹性体整体变薄. 这一过程与普通物质的状态改变类似.

Huang 和 Suo^[91]将这一过程与热机所经历的典型卡诺热力学循环进行对比. 热机的卡诺循环是通过

物质的状态改变来实现(比如气-液转变), 这一过程中系统的熵和体积发生改变; 而介电弹性体膜厚度的改变伴随着膜的面积和膜上电荷的改变, 这一过程也伴随着能量的变化. 与物质的相变类似, 介电弹性体的厚度改变过程被称为机电相变. 他们从理论角度解释了介电弹性体机电相变现象. 他们得到介电弹性体在单轴拉伸和施加电压情况下, 自由能随拉伸率的变化规律^[91]. 曲线中存在两个局部最小点和一个鞍点, 分别对应于介电弹性体拉伸率不同的两个变形稳定状态以及不稳定状态. 两个稳定状态对应不同的自由能, 对应于介电弹性体的薄厚两个稳定的状态. 当机械力及施加电压发生改变时, 弹性体将从当前稳定状态跳变到另一个稳定状态.

对于介电弹性体来说, 可以在电压, 电荷平面上讨论其热力学行为. 在这个平面上, 不同的热力学循环可以代表驱动器或能量收集器的不同的工作状态. 考虑常见的失效模型, 例如, 电荷消失, 电击穿, 拉力消失, 拉伸破裂, 机电不稳定, 跳变不稳定, 可以在此平面上描述介电弹性体的许用区域, 计算出许用区域的面积, 它代表转换器在每一个热力学循环中产生或消耗的能量, 进而可以通过调整材料的参数来改变转换器所转化的能量, 为高性能转换器器件的优化设计提供新途径^[91].

在此基础上, Lu 和 Suo^[92]研究了介电弹性体管状充气驱动器在电压和内压共同作用下的机电相变及其能量转化. 充气时, 管状充气驱动器均匀缓慢地膨胀. 驱动器的一部分区域发生膨胀, 与剩下的未膨胀区域共存. 充入更多空气后, 膨胀区域增长, 未膨胀区域减少, 直到整个驱动器完全发生膨胀. 这一现象与液体-蒸汽相变类似. 他们研究了充气且内外表面通电的介电弹性体管状驱动器的膨胀转变过程, 推导出膨胀区域与未膨胀区域共存的条件, 并根据电击穿和机械破坏确定了其许用区域. 结果表明管内压可以降低介电弹性体管机电相变所需的电压, 并且膨胀转换可以显著增大机电能量转换, 管内通气膨胀区域与未膨胀区域共存时一个机电循环产生的能量是仅有未膨胀区域时的几千倍.

4.8 介电弹性体耗散理论

介电弹性体换能器的动态特性以及机电转换能力会受到耗散过程(如粘弹性, 介电松弛以及漏电)的

影响. 高弹聚合物受力和电压作用时产生响应是时间相关的耗散过程. 聚合物长链间的滑动和单体连接点的旋转可导致黏弹性松弛; 电子云畸变和极化群转动可导致介电松弛; 电子和离子在高弹聚合物内的迁移可导致导电松弛^[1]. 在外力作用下, 介电弹性体在一个特征时间内松弛至一个新的变形状态, 这一特征时间即为粘弹性松弛时间; 相应的, 在外电场作用下, 存在介电松弛时间.

Foo 等人^[93]基于非平衡热力学建立了介电弹性体的耗散模型并对耗散介电弹性体的机电性能进行分析. 与耗散有关的变量影响系统的自由能密度函数但与外载做功无关. 他们利用弹簧和粘壶表征粘弹性松弛, 利用并联的电容和电阻表征漏电, 由此得到的结论与实验结果一致.

基于上述模型, Foo 等人^[94]又对介电弹性体机电换能器性能进行分析. 他们对一种机电换能器进行了研究, 分析了不同循环速度以及不同变形条件下的换能器性能.

Li 等人^[96]研究了薄膜充气式能量收集器在考虑非均匀场和粘弹性变形时的能量耗散和循环, 指出了能量收集装置在急速加载卸载以及经过预拉伸下具有更优的性能.

Wang 等人^[97]研究了介电弹性体薄膜在气压与电压耦合加载下的粘弹性变形, 计算个各种场随时间的变化, 结果表明当外载小时薄膜会逐渐达到稳定, 而外载过大会随着时间推移发生力电失稳.

4.9 介电弹性体的动力学

介电弹性体也常常因为动态电压信号的加载而产生动力学振动响应而失效^[98-106]. 介电弹性体薄膜在电压加载下会产生变形, 并可通过一定的结构设计作为驱动器应用. 某些介电弹性体驱动器受到动态电压信号加载时, 会产生振动响应. 目前, 已有多种振动器结构被设计并报道^[98-105]. 某些介电弹性体振动器可工作在高达 50 kHz 的工作频率下^[106]. 相比传统的振动器, 介电弹性体振动器具有轻质、廉价和结构紧凑等优点, 还可通过结构设计或调节静态电压的方法来动态改变振动器的共振频率, 实现多种模式的振动输出.

介电弹性体在电压加载下会产生较大变形. 在振动器应用中, 其响应行为体现出非线性振动特征. 介电弹性体薄膜充气式结构也可以在交变电压载荷

下发生振动, 人们对其动力学行为进行了实验观测和数值模拟^[64,65,99-101]. Dubois 等人研究了介电弹性体环形结构的振动行为, 并报道了可以通过改变静态电压来实现振动器的动态调频功能^[107]. 介电弹性体也可以应用于微小结构中, Feng 等人报道了由介电弹性体薄膜和微结构梁组成的微型振动器, 并研究分析了结构参数对振动器性能的影响^[108].

4.10 其他理论研究

在高弹聚合物中, 每个聚合物链可能由电偶极子单体组成. 没有外加电压时, 偶极子经历热涨落, 取向随机, 这种情形和水分子类似. 当高弹聚合物受电压作用时, 偶极子向电场方向转动. 当电压足够大时, 偶极子和电场完全平行, 材料极化达到饱和. 这种非线性介电性能可包含在广义理想介电高弹聚合物模型中^[1].

Li 等人^[109]研究了极化饱和对介电弹性体的机电不稳定性的影响. 他们基于理想弹性体模型, 考虑了介电非线性, 对等双轴拉伸的介电弹性体膜进行分析, 得到了介电弹性体在不发生机电不稳定的情况下获得大变形的几种途径; 提出了介电弹性体的不同极化模型, 进而研究了当材料失效时的驱动模式, 理论证明了极化饱和可以有效抑制或消除机电不稳定, 而且驱动模式过渡过程中有助于产生更大电致变形^[68].

Li 等人^[110]从分子链角度建立了条件极化模型, 通过理论说明了条件极化能够消除介电弹性体的不稳定性. Lallart 等人^[111]考虑了空间电荷分布不均匀性, 确立了介电常数-薄膜厚度表达式, 并考虑极化饱和的影响, 对极化强度进行修正. 理论分析及实验结果表明极化饱和对聚合物的变形有限制作用. 在此基础上, 他们又对多相电活性聚合物驱动器的变形驱动能力进行了研究^[112], 通过理论对影响考虑了极化饱和的两相电活性聚合物系统变形能力的因素(相比, 电场, 频率, 温度等)进行分析, 并通过实验进行验证.

5 结论

电活性聚合物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. 介电弹性体是制造驱动器和能量收集器等转换器的最有潜力电活性聚合物材料. 本文首先简

要综述了介电弹性体及其应用, 然后重点介绍了介电弹性体材料的理论研究进展, 包括本构关系、机电稳定性、突跳稳定性、超大电致变形机理、许用区域

描绘及其应用器件的失效分析. 本文最后对电致活性介电弹性体相关研究进行了展望.

参考文献

- 1 Suo Z G. Theory of dielectric elastomers. *Acta Mech Solida Sin*, 2010, 23: 549–578
- 2 Pelrine R, Kornbluh R, Pei Q B. High-speed electrically actuated elastomers with strain greater than 100%. *Science*, 2000, 287: 836–839
- 3 Brochu P, Pei Q B. Advances in dielectric elastomers for actuators and artificial muscles. *Macromol Rapid Commun*, 2010, 31: 10–36
- 4 Mirfakhrai T, Madden J, Baughman R. Polymer artificial muscles. *Mater Today*, 2007, 10: 30–38
- 5 O'Halloran A, O'Malley F, McHugh P. A review on dielectric elastomer actuators, technology, applications, and challenges. *J Appl Phys*, 2008, 104: 071101
- 6 Madden J D, Vandesteeg N, Madden P G, et al. Artificial muscle technology: physical principles and naval prospects. *IEEE J Ocean Eng*, 2004, 29: 706
- 7 Bar-Cohen Y. Electroactive polymers as artificial muscles capabilities, potentials and challenges. Fourth International Conference and Exposition on Robotics for Challenging Situations and Environments. Albuquerque, New Mexico, 2000. 1–13
- 8 Bar-Cohen Y. Biologically inspired technology using electroactive polymers (EAP). *Proc SPIE*, 2006, 6168: 616803
- 9 Bar-Cohen Y. Electroactive polymers: current capabilities and challenges. *Proc SPIE*. 2002, 4695: 1–7
- 10 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2008, 10: 1–17
- 11 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2003, 5: 1–15
- 12 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2004, 6: 1–23
- 13 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2005, 7: 1–26
- 14 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2010, 12: 1–19
- 15 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2001, 3: 1–15
- 16 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2007, 9: 1–15
- 17 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2004, 6: 1–20
- 18 Bar-Cohen Y. World Wide Electro Active Polymer (WW-EAP). Newsletter, 2011, 13: 1–13
- 19 Yang E E Y. Phenomenological Constitutive Models for Dielectric Elastomer Membranes for Artificial Muscle. Dissertation for the Doctoral Degree. Pennsylvania: The Pennsylvania State University, 2006: 1–144
- 20 Zhao X H. Mechanics of Soft Active Materials. Dissertation for the Doctoral Degree. Cambridge: Harvard University, 2009. 1–62
- 21 Kofod G. Dielectric Elastomer Actuators. Dissertation for the Doctoral Degree. Kongens Lyngby: The Technical University of Denmark, 2001. 1–83
- 22 Plante J S. Dielectric Elastomer Actuators for Binary Robotics and Mechatronics. Dissertation for the Doctoral Degree. Cambridge: Massachusetts Institute of Technology, 2006. 1–43
- 23 Fox J W. Electromechanical Characterization of the Static and Dynamic Response of Dielectric Elastomer Membranes. Dissertation for the Doctoral Degree. Virginia: Virginia Polytechnic Institute and State University, 2007. 1–55
- 24 Leng J S, Lau K T. Multifunctional Polymer Nanocomposites. Boca Raton: CRC press, 2010. 65–136
- 25 Carpi F, De Rossi D, Kornbluh R, et al. Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers. New York: Elsevier, 2008. 12–260
- 26 Bar-Cohen Y. Electroactive Polymer (EAP) Actuators as Artificial Muscles: Reality, Potential, And Challenges. Bellingham: SPIE press, 2004. 1–765
- 27 Ha S M, Yuan W, Q. Pei Q B, et al. Interpenetrating networks of elastomers exhibiting 300% electrically-induced area strain. *Smart Mater Struct*, 2007, 16: S280–S287
- 28 Kofod G, Wirges W. Energy minimization for self-organized structure formation and actuation. *Appl Phys Lett*, 2007, 90: 081916
- 29 Liu Y J, Liu L W, Leng J S. Analysis and manufacture of energy harvester based on Mooney-Rivlin type dielectric elastomer. *EPL*, 2010, 90: 36004
- 30 Araromi O A, Gavrilovich I, Shintake J, et al. Rollable multisegment dielectric elastomer minimum energy structures for a deployable microsatellite Gripper. *IEEE-ASME Trans Mechatron*, 2014, 20: 438–446
- 31 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Innovative wave power generation system using electroactive polymer artificial muscles. *Oceans-IEEE*. Bremen: IEEE, 2009. 143–145

- 32 Maas J, Graf C. Dielectric elastomers for hydro power harvesting. *Smart Mater Struct*, 2012, 21: 064006
- 33 Kaltseis R, Keplinger C, Baumgartner R, et al. Method for measuring energy generation and efficiency of dielectric elastomer generators. *Appl Phys Lett*, 2011, 99: 162904
- 34 Chiba S, Waki M, Kornbluh R, et al. Innovative power generators for energy harvesting using electroactive polymer artificial muscles. *Proc SPIE*. San Diego: SPIE, 2008. 692715
- 35 Dorfmann A, Austria V, Ogden R W. Nonlinear electroelasticity. *Acta Mech*, 2005, 174: 167–183
- 36 Goulbourne N C, Mockensturm E M, Frecker M I. A nonlinear model for dielectric elastomer membranes. *J Appl Mech Trans ASME*, 2005, 72: 899–906
- 37 Suo Z G, Zhao X H, Greene W H. A nonlinear field theory of deformable dielectrics. *J Mech Phys Solid*, 2008, 56: 467–486
- 38 Mcmeeking R M, Landis C M. Electrostatic forces and stored energy for deformable dielectric materials. *J Appl Mech Trans ASME*, 2005, 72: 581–590
- 39 Tramarco C. On the Lagrangian electrostatics of elastic solids. *Acta Mech*, 2009, 204: 193–201
- 40 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
- 41 Lochmatter P, Michel S, Kovacs G. Electromechanical model for static and dynamic activation of elementary dielectric elastomer actuators. *Proc SPIE*, 2006, 6168: 61680F
- 42 Sommer-Larsen P, Kofod G, Shridhar M H. Performance of dielectric elastomer actuators and materials. *Proc SPIE*, 2002, 4695: 158–166
- 43 Yang E, Frecker M, Mockensturm E. Viscoelastic model of dielectric elastomer membranes. *Proc SPIE*, 2005, 5759: 82–92
- 44 Plante J S, Dubowsky S. Large-scale failure modes of dielectric elastomer actuators. *Int J Solids Struct*, 2006, 43: 7727–7751
- 45 Wissler M, Mazza E. Electromechanical coupling in dielectric elastomer actuators. *Sens Actuator A Phys*, 2007, A138: 384–393
- 46 Liu Y J, Liu L W, Zhang Z, et al. Dielectric elastomer film actuators: characterization, experiment and analysis. *Smart Mater Struct*, 2009, 18: 095024
- 47 Hong W. Modeling viscoelastic dielectrics. *J Mech Phys Solids*, 2011, 59: 637–650
- 48 Zhao X H, Koh S J A, Suo Z G. Nonequilibrium thermodynamics of dielectric elastomers. *Int J Appl Mech*, 2011, 3: 203–217
- 49 Zhao X H, Suo Z G. Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers. *Appl Phys Lett*, 2007, 91: 061921
- 50 Zhou J X, Hong W, Zhao X H, et al. Propagation of instability in dielectric elastomers. *Int J Solids Struct*, 2008, 45: 3739
- 51 Liu Y J, Liu L W, Zhang Z, et al. Comment on “Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers” [*Appl. Phys. Lett.* 91, 061921, 2007]. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 106101
- 52 Liu Y J, Liu L W, Sun S H, et al. Stability analysis of dielectric elastomer film actuator. *Sci China Ser E Tech Sci.* 2009, 52: 2715–2723
- 53 Norris A N. Comment on “Method to analyze electromechanical stability of dielectric elastomers [*Appl. Phys. Lett.* 91, 061921, 2007]”. *Appl Phys Lett*, 2007, 92: 026101
- 54 Stark K H, Garton C G. Electric strength of irradiated polythene. *Nature*, 1955, 176: 1225–1226
- 55 He T H, Zhao X H, Suo Z G. Equilibrium and stability of dielectric elastomer membranes undergoing inhomogeneous deformation. *J Appl Phys*, 2009, 106: 083522
- 56 He T H, Cui L L, Chen C, et al. Nonlinear deformation analysis of a dielectric elastomer membrane-spring system. *Smart Mater Struct*, 2010, 19: 085017
- 57 Xu B X, Mueller R, Classen M, et al. On electromechanical stability analysis of dielectric elastomer actuators. *Appl Phys Lett*, 2010, 97: 162908
- 58 Zhao X H, Suo Z G. Electrostriction in elastic dielectrics undergoing large deformation. *J Appl Phys*, 2008, 104: 123530
- 59 Leng J S, Liu L W, Liu Y J, et al. Electromechanical stability of dielectric elastomer. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 211901
- 60 Liu Y J, Liu L W, Sun S H, et al. Electromechanical stability of Mooney-Rivlin-type dielectric elastomer with nonlinear variable dielectric constant. *Polym Int*, 2010, 59: 371–377
- 61 Liu Y J, Liu L W, Yu K, et al. An investigation on electromechanical stability of dielectric elastomers undergoing large deformation. *Smart Mater Struct*, 2009, 18: 095040
- 62 Kofod G, Sommer-Larsen P, Kronbluh R, et al. Actuation response of polyacrylate dielectric elastomers. *J Intell Mater Syst Struct*, 2003, 14: 787
- 63 Zhao X H, Hong W, Suo Z G. Electromechanical hysteresis and coexistent states in dielectric elastomers. *Phys Rev B*, 2007, 76: 134113
- 64 Suo Z G, Zhu J. Dielectric elastomers of interpenetrating networks. *Appl Phys Lett*, 2009, 95: 232909
- 65 Li B, Liu L W, Suo Z G. Extension limit, polarization saturation, and snap-through instability of dielectric elastomers. *Int J Smart Nano*

- Mater, 2011, 2: 59–67
- 66 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: 155301
- 67 Li B, Chen H L, Zhou J X, et al. Polarization modified instability and actuation transition of deformable dielectric. *Europhysics Letters*, 2011, 95: 37006
- 68 Liu L W, Liu Y J, Luo X J, et al. Electromechanical stability and snap-through stability of dielectric elastomers undergoing polarization saturation. *Mech Mater*, 2012, 55: 60–72
- 69 He X Z, Yong H D, Zhou Y H. The characteristics and stability of a dielectric elastomer spherical shell with a thick wall. *Smart Mater Struct*, 2011, 20: 055016
- 70 Rudykh S, Bhattacharya K, Debotton G. Snap-through actuation of thick-wall electroactive balloons. *Int J Non-Linear Mech*, 2012, 47: 206–209
- 71 Zhu J, Li T F, Cai S Q, et al. Snap-through expansion of a gas bubble in an elastomer. *J Adhesion*, 2011, 87: 466–481
- 72 Ha S M, Yuan W, Pei Q B, et al. Interpenetrating polymer networks for high-performance electroelastomer artificial muscles. *Adv Mater*. 2006, 18: 887–891
- 73 Shankar R, T Ghosh T K, Spontak R J. Mechanical and actuation nanostructured polymers as tunable actuators. *Adv Mater*, 2007, 19: 2218–2223
- 74 Keplinger C, Kaltenbrunner M, Arnold N, et al. Röntgen's electrode-free elastomer actuators without electromechanical pull-in instability. *Proc Natl Acad Sci USA*, 2010, 107: 4505–4510
- 75 Pelrine R E, Kornbluh R D, Joseph J P. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation. *Sens Actuator A Phys*, 1998, 64: 77–85
- 76 Zhao X H, Suo Z G. Theory of dielectric elastomers capable of giant deformation of actuation. *Phys Rev Lett*, 2010, 104: 178302
- 77 Koh S J A, Li T F, Zhou J X, et al. Mechanisms of large actuation strain in dielectric elastomers. *J Polym Sci Pt B Polym Phys*, 2011, 49: 504–515
- 78 Díaz-Calleja R, Riande E, Sanchis M J. On electromechanical stability of dielectric elastomers. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 101902
- 79 Díaz-Calleja R, Riande E, Sanchis M J. Effect of an electric field on the deformation of incompressible rubbers: Bifurcation phenomena. *J Electrostat*, 2009, 67: 158–166
- 80 Liu Y J, Liu L W, Shi L, et al. Comment “On electromechanical stability of dielectric elastomers [Appl. Phys. Lett. 93, 101902, 2008]”. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 096101
- 81 Katia B, Massimiliano G. Instabilities in multilayered soft dielectrics. *J Mech Phys Solids*, 2011, 59: 18–42
- 82 Moscardo M, Zhao X H, Suo Z G, et al. On designing dielectric elastomer actuators. *J Appl Phys*. 2008, 104: 093503
- 83 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: 066103
- 84 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
- 85 Zhu J, Cai S Q, Suo Z G. Nonlinear oscillation of a dielectric elastomer balloon. *Polym Int*, 2010, 59: 378–383
- 86 Zhu J, Cai S Q, Suo Z G. Resonant behavior of a membrane of a dielectric elastomer. *Int J Solids Struct*, 2010, 47: 3254–3262
- 87 Wang H M, Cai S Q, Carpi F, et al. Computational model of hydrostatically coupled dielectric elastomer actuators. *J Appl Mech Trans ASME*, 2012, 79: 031008
- 88 Koh S J A, Zhao X H, Suo Z G. Maximal energy that can be converted by a dielectric elastomer generator. *Appl Phys Lett*, 2009, 94: 262902
- 89 Koh S J A, Keplinger C, Li T F, et al. Dielectric elastomer generators: how much energy can be converted. *IEEE ASME Trans Mechatron*, 2011, 16: 33–41
- 90 Zhao X H, Suo Z G. Method to analyze programmable deformation of dielectric elastomer layers. *Appl Phys Lett*, 2008, 93: 251902
- 91 Huang R, Suo Z G. Electromechanical phase transition in dielectric elastomers. *Proc R Soc A Math Phys Eng Sci*, 2012, 468: 1014–1040
- 92 Lu T Q, Suo Z G. Large conversion of energy in dielectric elastomers by electromechanical phase transition. *Acta Mech Sin*, 2011, 28: 1106–1114
- 93 Foo C C, Cai S Q, Koh S J A, et al. Model of dissipative dielectric elastomers. *J Appl Phys*, 2012, 111: 034102
- 94 Foo C C, Koh S J A, Keplinger C, et al. Performance of dissipative dielectric elastomer generators. *J Appl Phys*, 2012, 111: 094107
- 95 He T H, Zhao X H, Suo Z G. Equilibrium and stability of dielectric elastomer membranes undergoing inhomogeneous deformation. *J Appl*

- Phys, 2009, 106: 083522
- 96 Li T F, Qu S X, Yang W. Energy harvesting of dielectric elastomer generators concerning inhomogeneous fields and viscoelastic deformation. *J Appl Phys*, 2012, 112: 034119
- 97 Wang H M, Lei M, Cai S Q. Viscoelastic deformation of a dielectric elastomer membrane subject to electromechanical loads. *J Appl Phys*, 2013, 113: 213508
- 98 Carpi F, De Rossi D, Kornbluh R, et al. *Dielectric Elastomers as Electromechanical Transducers: Fundamentals, Materials, Devices, Models and Applications of an Emerging Electroactive Polymer Technology*. Oxford: Elsevier, 2008
- 99 Mockensturm E M, Goulbourne N C. Dynamic response of dielectric elastomers. *Int J Non-Linear Mech*, 2006, 41: 388–395
- 100 Fox J W, Goulbourne N C. On the dynamic electromechanical loading of dielectric elastomer membranes. *J Mech Phys Solids*, 2008, 56: 2669–2686
- 101 Fox J W, Goulbourne N C. Electric field-induced surface transformations and experimental dynamic characteristics of dielectric elastomer membranes. *J Mech Phys Solids*, 2009, 57: 1417–1435
- 102 Yong H D, He X Z, Zhou Y H. Dynamics of a thick-walled dielectric elastomer spherical shell. *Int J Eng Sci*, 2011, 49: 792–800
- 103 Seyul S, Goulbourne N C. Dynamic response of tubular dielectric elastomer transducers. *Int J Solids Struct*, 2010, 47: 2672–2679
- 104 Xu B X, Mueller R, Theis A, et al. Dynamic analysis of dielectric elastomer actuators. *Appl Phys Lett*, 2012, 100: 112903
- 105 Li T F, Qu S X, Yang W. Electromechanical and dynamic analyses of tunable dielectric elastomer resonator. *Int J Solids Struct*, 2012, 49: 3754–3761
- 106 Bonwit N, Heim J, Rosenthal M, et al. Design of commercial applications of EPAM technology. *Proc SPIE*, 2006, 6168: 39–48
- 107 Dubois P, Rosset S, Niklaus M, et al. Voltage control of the resonance frequency of dielectric electroactive polymer (DEAP) membranes. *J Microelectromech Syst*, 2008, 17: 1072–1081
- 108 Feng C, Jiang L Y, Lau W M. Dynamic characteristics of a dielectric elastomer-based microbeam resonator with small vibration amplitude. *J Micromech Microeng*, 2011, 21: 095002
- 109 Li B, Liu L W, Suo Z G. Extension limit, polarization saturation, and snap-through instability of dielectric elastomers. *Int J Smart Nano Mater*, 2011, 2: 59–67
- 110 Li B, Chen H L, Qiang J H, et al. A model for conditional polarization of the actuation enhancement of a dielectric elastomer. *Soft Matter*, 2012, 8: 311
- 111 Lallart M, Capsal J F, Kanda M, et al. Modeling of thickness effect and polarization saturation in electrostrictive polymers. *Sens Actuator B Chem*, 2012, 171–172: 739–746
- 112 Lallart M, Capsal J F, Idrissa A K M, et al. Actuation abilities of multiphase electroactive polymeric systems. *J Appl Phys*, 2012, 112: 094108

Progress in constitutive theory and stability research of electroactive dielectric elastomers

LIU LiWu¹, LI JinRong², LV XiongFei¹, LI FengFeng¹, LIU YanJu¹ & LENG JinSong²

¹ Department of Astronautical Science and Mechanics, Harbin Institute of Technology, Harbin 150001, China;

² Centre for Composite Materials and Structures, Harbin Institute of Technology, Harbin 150080, China

Dielectric elastomer has special mechanical and electrical performance. It can change its shape or volume under external electric field and can recover the original shape or volume when the electric field is removed. That makes it one of the most promising electroactive polymers for fabricating actuators, sensors, shakers and energy harvesters and have huge application potential in areas such as artificial muscle, intelligent biomimetics, aerospace, mechanics and biology. This paper make a brief review of dielectric elastomer and its applications first and then focuses on the progress in dielectric elastomer theories, including constitutive theory, electromechanical stability, snap-through stability, giant electrostriction mechanism, allowable area description and failure analysis of dielectric devices. At last, this paper make a outlook on the research of soft dielectric electroactive elastomer.

dielectric elastomer, constitutive theory, giant deformation, stability, allowable area, failure of devices

doi: 10.1360/N092014-00433