

EAP 换能单元发电量的影响因素分析

赵丰刚¹, 陈洁¹, 郑国华², 曾浩然¹, 符悦¹

(1. 新疆大学 电气工程学院, 新疆 乌鲁木齐 830047; 2. 新疆大学 化学化工学院, 新疆 乌鲁木齐 830047)

摘要:电活性聚合物(EAP)作为一种新型电活性软体功能材料,具有多种优点,用于能量收集具有巨大的应用潜力。该文从宏观和微观两个层面阐述了介电材料用于能量收集的机电转化原理,以EAP换能单元为例,说明了EAP换能单元怎样将机械能转化为电能,并阐述了介电弹性体发电机理,为后面EAP换能单元的发电提供理论依据。以其他学者研究得到影响EAP换能单元发电量的因素为基础,通过正交试验得到EAP换能单元发电特性和最佳工作条件,并对试验的可靠性进行了分析。实验结果表明,各因素对EAP材料发电的影响大小顺序为: EAP膜面积>拉伸位移>预加电压>预拉伸率>EAP膜厚度。换能单元最佳工作条件为预加电压1 000 V,预拉伸率400%,拉伸位移4 cm,膜面积62.41 cm²,EAP膜厚度1 mm。

关键词:电活性聚合物;材料发电;EAP换能单元;正交试验;能量转化

中图分类号: TM215.1; TB34

文献标识码: A

DOI: 10.11977/j.issn.1004-2474.2019.02.030

Analysis of Influencing Factors of Power Generation of EAP Transducing Unit

ZHAO Fenggang¹, CHEN Jie¹, ZHENG Guohua², ZENG Haoran¹, FU Yue¹

(1. College of Electric Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China;

2. College of Chemistry and Chemical Engineering, Xinjiang University, Urumqi 830047, China)

Abstract: As a new type of electroactive soft functional material, the electroactive polymer (EAP) has many advantages and has great application potential for energy harvesting. This paper describes the principle of electromechanical conversion of dielectric materials for energy harvesting from both macroscopic and microscopic perspectives. Taking EAP transducing units as an example, this paper explains how EAP transducing units convert mechanical energy into electrical energy. The mechanism of dielectric elastomer generator is described, which provides theoretical basis for power generation of EAP energy conversion unit in the future. On the basis of other scholars' research, the factors affecting the generation capacity of EAP energy conversion unit are obtained. Through orthogonal test, the generation characteristics and optimal working conditions of EAP energy conversion unit are obtained, and the reliability of the test is analyzed. The experimental results show that the order of the factors affecting the power generation of EAP materials is as follows: EAP film area > tensile displacement > pre-applied voltage > pre-stretch rate > EAP film thickness. The best working conditions of the transducer unit are as follows: pre-applied voltage of 1 000 V, pre-stretch rate of 400%, tensile displacement of 4 cm, film area of 62.41 cm², EAP film thickness of 1 mm.

Key words: electroactive polymer; material power generation; EAP transducing unit; orthogonal test; energy conversion

0 引言

利用功能材料所具有的特殊物理、化学性质来实现能量的捕获和转化,是新能源领域的一个重要研究内容,压电陶瓷、磁致伸缩材料等用于能量收集已有应用^[1-2]。单层电活性聚合物(EAP)膜的电流

很小,当有1 000层或更多连在一起,就有可观的电流。EAP是一类可在电压下改变其形状或尺寸的聚合物材料的统称,其具有柔性好,变形大,强度持久,能量密度大和能量转换效率高等优点,在面向低频能量收集领域潜力大^[3]。

收稿日期: 2018-05-02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51467020);新疆维吾尔自治区高校科研基金资助项目(XJEDU20181005)

作者简介: 赵丰刚(1993-),男,河南固始人,硕士生,主要从事介电型电活性聚合物电学特性的研究。E-mail: zhaofenggang@icloud.com。

通信作者: 陈洁,女,浙江绍兴人,教授,博士,主要从事智能材料在机电领域中的应用方面的研究。E-mail: xj_cj@163.com。

与煤、新能源发电及其他功能材料收集能量相比,EAP材料用于能量转化具有以下优点^[4-7]:

1) 具有很高的比能密度和宽频范围内的高换能效率。

2) 柔韧度好,密度小,成本较低,无毒。

3) 作为软体材料,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,工作温度及湿度范围宽,3M公司的VHB系列的材料长期耐温是100℃,短期耐温160℃,材料一般可承受500万次的机械拉伸循环而不致失效。

5) EAP材料成本低,其形状尺寸可根据实际需要改变。

EAP材料最显著的特点是变形量很大,具有较高的能量密度和换能效率,EAP材料的能量密度为0.4 J/g,换能效率可达60%~80%。总之,就能量收集所需的综合性能而言,被称为“人工肌肉”的EAP是极具应用价值的功能材料之一,特别在低频、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^[8]。文献[9]对EAP材料的驱动模式进行了研究,文献[10-13]对EAP材料在发电模式下能量转化和收集进行了研究。

1 EAP材料发电机理

EAP材料有两种工作模式:

1) 驱动模式。在EAP材料两面涂抹上柔性电极,再加上电压,由于异性电荷相互吸引,静电力作用在EAP上,EAP变薄,面积变大,可实现电能向机械能的转化,可用于机器人^[14]。

2) 发电模式。将EAP拉伸,使其面积增加,厚度减小,电容增大,再给EAP加上电源,令其带上电荷,再自由收缩,此过程EAP膜的弹力克服静电力做功,弹性势能减少,电势能增大,直到材料的恢复力等于静电力,EAP膜不再收缩,完成了机械能向电能的转化。

EAP材料的这两种工作方式是两个可逆的过程。EAP是一种介电有机材料,具有弹性,当对EAP材料加上电荷、再继续对材料输入机械能后,EAP材料可实现将机械能转化为电势能。外部提供预加电压,是为了对EAP材料进行充电,是完成发电循环不可缺少的环节。

EAP换能单元按结构可分为上层、中间层和下层。中间层为聚丙烯酸介电弹性体材料,上、下两层为柔性电极材料构成等效电容。在拉伸EAP膜时,认为其体积不变,EAP膜未拉伸前的表面积为 A_0 ,厚为 l_0 ,拉伸后的表面积为 A ,膜厚为 l ,则有:

$$A_0 l_0 = A l \quad (1)$$

EAP换能单元等效为一个电容器,电容为

$$C = \frac{\epsilon_r \epsilon_0 A}{l} \quad (2)$$

式中: ϵ_r 为EAP材料的相对介电常数; ϵ_0 为真空介电常数。

拉伸后的EAP换能单元,形似一个圆台(见图1),则拉伸后换能单元的表面积 A 为

$$A = \frac{1}{2} \pi (D + d) \sqrt{\frac{(D + d)^2}{2} + l^2} \quad (3)$$

合并式(1)~(3)可得EAP换能单元等效电容 C_{eq} 与拉伸位移 y 的关系为

$$C_{eq} = C_0 \left[1 + \frac{4y^2}{(D - d)^2} \right] \quad (4)$$

式中 C_0 为拉伸位移 $y=0$ 时换能单元的电容。

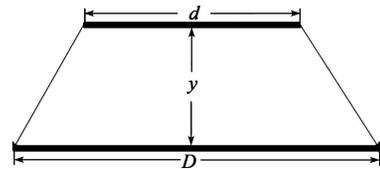


图1 EAP换能单元变形图

在发电前需提供预加电压,为EAP换能单元提供初始电荷。因此,预加电压是介电弹性体发电机完成机电转换必不可少的环节。

EAP换能单元机电转换过程,图2(a)为一个简单的机电转换示意图,可直观地解释介电弹性体的机电转换的宏观过程。首先加载外部电源给介电弹性体材料充电,并在外部机械力作用下产生形变,然后断开电源,由于自身的形状记忆效应使得介电弹性体在弹性恢复力作用下恢复初始形状,从而自身电容值降低,电压值升高,并向外放电。理想状况下,输入的机械能即为换能单元增加的电能。假设换能单元的初始储存电能 W_0 ($y=0$)为

$$W_0 = \frac{1}{2} C_0 U_0^2 \quad (5)$$

式中 U_0 为拉伸位移 $y=0$ 时换能单元的电压。

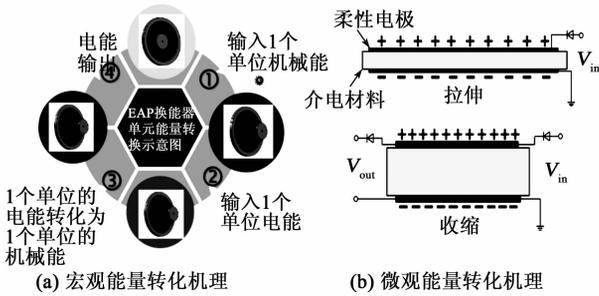


图 2 EAP 换能单元能量转化机理

拉伸位移为 y 后, 换能单元储存电能为

$$W_1 = \frac{1}{2} C_1 U_1^2 \quad (6)$$

式中 C_1, U_1 分别是拉伸位移为 y 时换能单元的电容和电压, 则换能单元增加的电能为

$$\Delta E = W_1 - W_0 \quad (7)$$

基于 EAP 换能单元工作原理及宏观过程(见图 2(a)), 其能量收集循环过程由以下 4 个基本环节构成:

1) 拉伸 EAP 换能单元, 即输入机械能, 假设输入了 1 个单位的机械能。

2) 拉伸状态下, 对 EAP 换能单元加偏置电压, 相当于在薄膜两面加入异性电荷, 假设输入了一个单位的电能。

3) 收缩过程(见图 2(b)), 薄膜自然弹性恢复, 薄膜厚度增大; 同时, 异性电荷在薄膜两面距离增大, 同性电荷距离减少, EAP 膜的弹力克服柔性电极上电子的静电力做功, 电势能增加, 弹性势能减少。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 EAP 换能单元的电能增加。

4) 电能被释放, 换能单元回到工作拉伸前的初始状态, 准备下一次循环。

2 试验部分

2.1 主要试验仪器和试验试剂

主要试验仪器有示波器(TBS 1052B-EDU)、万用表(VICTOR VC890D)、高压发生器及模拟电路实验箱(THM-1 型)。试验试剂有聚丙烯酸橡胶(VHB 4910 型)及导电膏(DDG-A 型)。

2.2 EAP 换能单元的制作

圆形 EAP 换能单元制作容易, 结构稳定。实验采用 VHB 4910 橡胶作为介电材料, 制作圆形 EAP 换能单元。制作步骤:

1) 预拉伸。按照每次试验给定的预拉伸率对

膜进行双向等轴预拉伸。

2) 安装。将 2 个外框各贴一层有粘性的锡箔纸, 然后将预拉伸好的膜固定在两个外框中, 使用电烙铁焊接 2 个导线在 2 个外框上, 作为换能单元的正、负极。

3) 涂抹柔性电极。将事先配置好的柔性电极均匀涂在 EAP 膜两侧, 使柔性电极和锡箔纸充分接触。

2.3 正交试验影响因素的确定

影响 EAP 换能单元输出电流的因素较多, 研究发现, 介电材料、偏置电压、预拉伸率、电极材料、薄膜厚度、拉伸位移及温度等因素对 EAP 换能单元的输出电流影响较大^[15-19],

为了减少试验次数, 我们采用正交试验, 不仅要保证试验中未考虑因素的一致性, 还需要考虑窗口直径大小及预拉伸方式, 温度的一致性。为保证未考虑因素的一致性, 预拉伸方式都为等轴双向拉伸, 柔性电极都为同一导电膏涂抹。

2.3.1 换能单元工作模式的选择

EAP 换能单元发电时是 EAP 驱动器的逆向使用, 他有两种工作模式, 根据回退过程中 EAP 换能单元是否与高压发生器接通, 分为恒电荷模式和恒电压模式。本文试验采用恒电荷模式, 其电路如图 3 所示。表 1 为 EAP 换能单元两种工作模式。

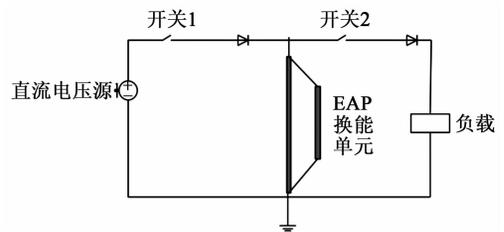


图 3 EAP 换能单元两种工作模式电路图

表 1 EAP 换能单元两种工作模式实现

模式	开关	初始阶段	拉伸充电阶段	收缩阶段	放电阶段
恒电荷	开关 1	断开	闭合	断开	断开
	开关 2	断开	断开	断开	闭合
恒电压	开关 1	闭合	闭合	闭合	闭合
	开关 2	断开	断开	断开	闭合

2.3.2 试验电路和试验平台

为进行正交试验, 搭建试验平台如图 4、5 所示。由于换能单元的放电电流为微安级, 万用表无法直接读数, 采用 $2\text{ G}\Omega$ 的电阻与 EAP 换能单元串联,

由于示波器不能直接读数,所以使用万用表直接读取电阻两端电压 U_R 。由于换能单元放电电流是衰减电流,所以测得的电阻电压也逐渐减小。故使用万用表测电压时,每次取读到的最大值。

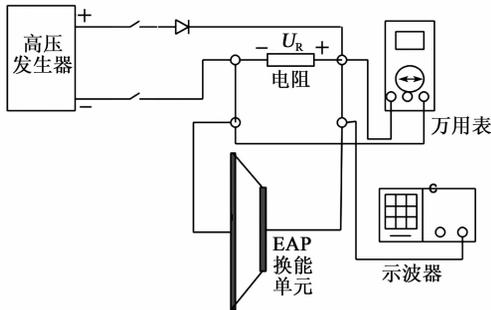


图4 试验平台电路图



图5 试验平台实物图

3 试验结果与分析

3.1 因素水平表的确定

对输出电压的影响因素较多,研究者都给出了自己的影响因素,如预拉伸率、拉伸位移、预加电压、电极材料等。根据 EAP 材料发电原理,试验选择预拉伸率、拉伸位移、预加电压、膜面积及膜厚度为试验因素,设计出正交实验因素水平表,如表 2 所示。

表 2 正交试验因素水平表

水平	因素				
	预拉伸率/%	预加电压/V	拉伸位移/cm	膜面积/ cm ²	膜厚/ mm
1	100	500	1	1	1
2	200	1 000	2	2	2
3	300	1 500	3	3	
4	400	2 000	4	4	

3.2 正交试验结果及分析

由因素水平表,利用统计分析软件 SPSS 22.0 生成正交表 $L_{16}(4^4 \times 2^2)$ (见表 3),设置一空白列来衡量实验的误差,判断试验可靠性,以避免进行重复试验,提高分析的可靠性。表 3 中, K_i 为各因素 i 水平之和; \bar{K}_i 为各因素 i 水平的平均值; R 为各因素平均值的极差; U_R 为电阻电压。

表 3 正交试验设计结果及极差分析

实验序号	列号						U_R/V
	预拉伸率/%	预加电压/V	拉伸位移/cm	膜面积/cm ²	膜厚/mm	空白列	
1	2	3	4	4	1	1	432
2	4	2	3	3	1	1	415
3	1	2	2	4	1	2	404
4	4	1	4	2	1	2	383
5	2	1	2	3	2	2	396
6	4	3	2	1	2	1	327
7	3	2	4	1	2	2	348
8	2	2	1	2	2	1	354
9	3	4	2	2	1	1	366
10	3	3	1	3	1	2	388
11	1	4	4	3	2	1	412
12	4	4	1	4	2	2	405
13	3	1	3	4	2	1	407
14	2	4	3	1	1	2	339
15	1	3	3	2	2	2	367
16	1	1	1	1	1	1	308
K_1	1 491	1 494	1 455	1 322	3 035	3 021	
K_2	1 521	1 557	1 493	1 470	3 016	3 030	
K_3	1 509	1 514	1 528	1 611			
K_4	1 530	1 522	1 575	1 648			
\bar{K}_1	373	374	364	331	379	378	
\bar{K}_2	380	389	373	368	377	379	
\bar{K}_3	377	379	382	403			
\bar{K}_4	383	381	394	412			
R	10	15	30	44	2	1	

3.2.1 试验因素与电阻电压的关系

图 6 为试验因素与试验水平关系。由表 3、图 6 可看出,预拉伸率的各水平平均值随着预拉伸率增大而增大,即其他因素不变,预拉伸率越大,电阻电压越大。从表 3 中第一列的极差 R 值小可知,预拉伸率对试验的目标电阻电压影响较小。对于 EAP 材料,有自己能承受拉伸的范围,预拉伸率过大,则 EAP 膜会裂开。拉伸位移的水平平均值随着水平值增大而增大,即在其他因素不变的情况下,拉伸位移越大,电阻电压越大,这也符合实际情况,拉伸位移越大,相当于输入更多的机械能,从而可转换为更多的电能。换能单元的 EAP 膜不可能有很大的拉伸位移,当拉伸位移变大时,膜的厚度变小,当膜和高压发生器接通时,膜上电压大,很可能击穿膜。EAP 膜面积的水平平均值随着水平增大而增大,且极差 R 值最大,说明换能单元膜的面积对试验结果

影响最大,且膜的面积越大,电阻电压越大,这符合 EAP 换能单元的发电原理,膜的面积越大,则膜上可存储更多的电荷,当换能单元和电阻接通时,则可放出更大的电流。

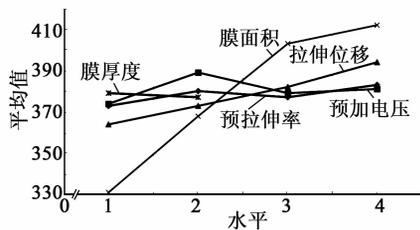


图 6 试验因素与试验水平关系

3.2.2 正交试验结果的方差分析

由表 3 中误差列的极差小于其他因素的极差,说明本次试验所考虑的各因素间无交互作用,且试验误差小,试验结果可靠性高。由 R 值可知,各因素对试验结果影响顺序为:膜面积 > 拉伸位移 > 预加电压 > 预拉伸率 > EAP 膜厚度。将 5 个因素的最优水平组合,得到条件为预加电压 1 000 V,预拉伸率 400%,拉伸位移 4 cm,膜面积 62.41 cm²,EAP 膜厚度 1 mm。但这个试验水平组合未在 16 组实验中,从实验结果来看,最好的是第 1 次实验,而这次实验预拉伸率和预加电压都不是处在最好水平,这也说明预拉伸率和预加电压对试验结果的影响无拉伸位移和 EAP 膜面积大。最后做 1 组补充实验,在最佳工作条件下测得电阻电压为 447 V。

极差分析无法准确计算实验误差的大小,各因素水平对实验结果影响的显著性也无法正确估计^[20]。方差分析可将试验中因试验因素水平变化引起的数据波动同试验误差引起的数据波动区分^[21],因此,采用方差分析试验误差,由 spss 软件自动生成方差分析表和显著性检验,如表 4 所示。表中, F 为采用 F 检验公式计算得到的值, Sig 为差异性显著的检验值,该值与 0.05 比较,小于 0.05 表示差异显著。

表 4 方差分析

方差来源	偏差平方和	自由度	均方差	F	Sig
预拉伸率	213.187	3	71.062	2.149	0.456
预加电压	126.687	3	42.229	1.277	0.559
拉伸位移	1 958.180	3	652.729	19.742	0.164
膜面积	16 539.600	3	5513.220	166.750	0.027
膜厚度	22.563	1	22.563	0.682	0.560
空白列	5.063	1	5.063	0.153	0.763

由表 4 可知,分析结果表明,实验因素预拉伸率、预加电压、拉伸位移、膜厚度的 Sig 值都大于 0.05,则这两个因素对试验结果的作用不显著;膜面积的 Sig 值为 0.027,小于 0.05,说明因素膜面积显著。由表 4 中 Sig 值可看出,各因素的主次顺序为:膜面积,拉伸位移,预拉伸率,预加电压,膜厚度。与极差分析结果一致。

4 结论

本文从微观和宏观阐述了 EAP 换能单元的能量转化过程和发电原理,再通过正交试验定量的说明了影响 EAP 换能单元一个循环过程发电量的因素,并得出如下结论:

- 1) EAP 换能单元的发电是依靠 EAP 膜的弹性将机械能转化为电能,了解 EAP 换能单元的发电原理,对应用 EAP 材料进行能量收集有重要意义。
- 2) 正交试验考虑的 5 个因素中,EAP 膜面积影响最大,拉伸位移其次,但拉伸位移不可能过大,过大的拉伸位移会将膜撕破,且随着拉伸位移的不断增大,EAP 膜越来越薄,易被高电压击穿,形成漏电流,导致电能损失。
- 3) 通过正交试验得出,预拉伸率 400%,预加电压 1 000 V,拉伸位移 4 cm,膜面积 62.41 cm²,EAP 膜厚度 1 mm 时,电阻电压最大。

参考文献:

[1] 刘爱飞. 介电弹性体发电机自偏置机理研究[D]. 兰州:兰州交通大学,2016.

[2] 陈洁,李玉麒,郑国华. 介电型电活性聚合物应变响应的优化[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2015,43(10):123-127.
CHEN Jie, LI Yuqi, ZHENG Guohua. Optimization of strain response of dielectric electroactive polymer[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology(Nature Science),2015,43(10):123-127.

[3] 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[J]. 中国科学:技术科学,2016,46(10):987-1004.
ZHONG Lincheng, WANG Yongquan, CHEN Hualing. Energy harvesting based on dielectric elastic soft materials:status, trends and challenges[J]. Science of China:Technology,2016,46(10):987-1004.

[4] 温永清,刘小鱼,鲁飞,等. 压电发电技术及其应用研究[J]. 稀土,2013,34(5):82-85.
WEN Yongqing, LIU Xiaoyu, LU Fei, et al. Study on

- piezoelectric technology and its application[J]. Chinese Journal of Rare Earths, 2013, 34(5): 82-85.
- [5] 龙军, 李茂军. 基于压电片的风力发电装置及其自动迎风研究[J]. 压电与声光, 2017, 39(3): 467-471.
LONG Jun, LI Maojun. Study on wind power generator based on piezoelectric chip and its automatic windward study[J]. Piezoelectrics & Acousto-optics, 2017, 39(3): 467-471.
- [6] 于江成. 基于碳纳米管电极的介电弹性体堆叠型驱动器研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
- [7] 刘金刚, 张秀敏, 田付强, 等. 耐高温聚合物电介质材料的研究与应用进展[J]. 电工技术学报, 2017, 32(16): 14-24.
LIU Jingang, ZHANG Xiumin, TIAN Fuqiang, et al. Research and application progress of high temperature resistant polymer dielectric materials[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(16): 14-24.
- [8] XU W L, CAO J B, JU E S, et al. Principle experiment of electroactive polymer wind-driven generator [J]. Advanced Materials Research, 2011, 305: 88-91.
- [9] 朱银龙. 介电型 EAP 换能器机电耦合特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [10] 张霞. 介电型 EAP 发电系统研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.
- [11] 袁同燕. 介电型 EAP 发电特性研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2012.
- [12] LUO H P, QIU F C, SUN Q H, et al. Experimental Research on dielectric elastomer power generation[J]. Key Engineering Materials, 2012, 522(7): 927-930.
- [13] 赵俊. 介电型 EAP 发电能量转换研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2011.
- [14] 丁宝, 王林月, 吴智量. 压电材料的蓄电和放电系统[J]. 实验室研究与探索, 2015, 34(3): 63-65.
DING Bao, WANG Linyue, WU Zhiliang. Storing and discharging system of piezoelectric materials[J]. Laboratory Research and Exploration, 2015, 34(3): 63-65.
- [15] 盛俊杰, 陈花玲, 李博. 频率对 VHB4910 介电弹性体材料介电性能的影响[J]. 功能材料与器件学报, 2011, 17(6): 549-554.
SHENG Junjie, CHEN Hualing, LI Bo. Effects of frequency on dielectric properties of VHB4910 dielectric elastomer materials[J]. Journal of Functional Materials and Devices, 2011, 17(6): 549-554.
- [16] 盛俊杰, 张玉庆, 李树勇, 等. 温度对介电弹性体材料电耦合变形的影响[J]. 固体力学报, 2015, 36(2): 129-136.
SHENG Junjie, ZHANG Yuqing, LI Shuyong, et al. Effects of temperature on electromechanical coupling deformation of dielectric elastomers[J]. Journal of Solid Mechanics, 2015, 36(2): 129-136.
- [17] SEELECKE S. Experimental analysis of biasing elements for dielectric electro-active polymers[J]. Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering, 2011, 7976(10): 797639-797639-14.
- [18] OKAMOTO S, KUWABARA K, OTSUKA K. Electrical stimuli-induced deformation and material properties of electro-active polymer nafion117[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2006, 125(2): 376-381.
- [19] HOFFSTADT T, BAR-COHEN Y, GRAF C, et al. Modeling of roll-actuators based on electroactive polymers[J]. Electroactive Polymer Actuators and Devices (EAPAD), 2013, 8687: 86871F.
- [20] 李阳. 电动汽车电池仓内温度场的数值模拟[D]. 包头: 内蒙古科技大学, 2013.
- [21] 朱世东, 魏建锋, 周根数, 等. 基于正交试验的 P110 腐蚀行为的研究[J]. 热处理技术与装备, 2010, 31(1): 4-9.
ZHU Shidong, WEI Jianfeng, ZHOU Genshu, et al. Research on corrosion behavior of P110 based on orthogonal test[J]. Heat Treatment Technology and Equipment, 2010, 31(1): 4-9.