

一种基于 PVDF 的微型热释电发电机研究

赵江铭¹, 邱国林^{1,2}, 张海霞²

(1. 郑州大学 机械工程学院, 河南 郑州 450001; 2. 北京大学 微电子学研究院, 北京 100871)

摘要: 依据聚偏氟乙烯(PVDF)薄膜的热释电效应,设计了一种新型的微型热释电发电机.介绍了该发电机的基本结构和工作原理,完成了该发电机的相关实验,并采用有限元方法对该发电机在不同温度差下的输出特性进行了分析.实验结果表明,该发电机的输出电压随匹配电阻的增大而增大,而输出电流反之,并且在 20℃和 40℃温差下最大瞬时输出功率分别为 208 μW 和 475 μW.仿真结果表明,随温差的增大,温度随时间的变化率也会增大,并且在 20℃和 40℃温差下相应的开路电压为 689 V 和 1 380 V,通过实验论证了该发电机可以作为能量采集的有效手段.

关键词: 聚偏氟乙烯(PVDF);热释电效应;微型发电机

中图分类号: TN384

文献标志码: A

doi:10.13705/j.issn.1671-6833.2016.06.015

0 引言

早在 2 400 多年前,人们就已经发现了电气石的热释电效应^[1].但是直到 19 世纪末,关于热释电效应定量和理论的研究才开始增多^[2].例如,Bowen 等^[3]对用于能量采集的热释电材料和器件进行了系统分析.而在热释电效应的研究当中,对聚偏氟乙烯(PVDF)的研究也得到了广泛关注.例如,张华等^[4]就对 PVDF 的制备及其应用进行了深入分析.目前,关于 PVDF 的研究当中,对其压电性能的研究居多,但对其热释电特性却鲜有相关研究.例如,辛毅等^[5]设计了一种基于 PVDF 的触滑觉传感器,通过 PVDF 的压电性将运动信号转化成电信号.而刘廷等^[6]设计了一种基于 PVDF 的微力传感器,通过电荷放大器将 PVDF 所受到的微力放大并得到电信号.程啟华^[7]对 PVDF 压电传感器的温度特性研究证实 PVDF 的热释电效应较强,对传感器精度会产生影响.王芳等^[8]提出了基于热释电效应的能量采集系统的设计,证实了采用热释电效应进行能量采集和存储的可行性.Leng 等^[9]首次提出了一种基于 PVDF 的微型热释电发电机并用于水能量采集,但是该发电机的输出性能仍有继续提升的空间,此外对微型热释电发电机的原理还需进行深

入探究.

笔者基于 PVDF 薄膜的热释电效应设计了一种新型微热释电发电机.通过测试实验分析了该器件在温度差为 20℃和 40℃时的输出特性,并通过有限元分析对该发电机在温度差为 20℃和 40℃的温度及电场变化进行了深入研究.

1 原理分析

热释电效应是指某些晶体在受热时晶体的自发极化随温度的变化而发生改变,从而导致晶体的表面束缚电荷发生改变的一种现象^[8].热释电效应产生的热释电电流可以通过下式来确定^[9].

$$I = pA \frac{dT}{dt} \quad (1)$$

式中: I 代表热释电电流; p 代表热释电系数; A 代表器件的有效面积; dT/dt 代表温度随时间的变化率.

图 1 给出了热释电效应的原理简图,图中箭头代表热量的传递方向.当 $dT/dt = 0$ 时,即温度不随时间产生变化,那么晶体的自发极化的强度不会发生改变,因而也就没有热释电电流的产生,也就是 $I = 0$,如图 1(a)所示.而一旦温度升高,即 $dT/dt > 0$ 时,那么晶体的自发极化的强度会减小,这时如果将外电路用导线连接,那么电路中

收稿日期:2016-05-10;修订日期:2016-08-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(61176103, 91323304, 51475436);国家“863”计划资助项目(2013AA041102);北京市自然科学基金资助项目(4141002)

作者简介:赵江铭(1972—),男,河南新郑人,郑州大学讲师,博士,主要从事微机电系统(MEMS)及其控制技术研究,E-mail:zhaojiangming@126.com.

会有热释电电流产生,如图 1(b)所示.而当温度升高并最终达到平衡时,由于温度不会继续发生变化,则热释电晶体的自发极化将也不会发生变化,因而相应的就没有热释电电流的产生,如图 1(c)所示.而如果此时晶体所受到的温度改变,例如将晶体降温,那么晶体的自发极化的强度将会变大,相应的在外电路中也会有热释电电流的产生,直到达到新的平衡,如图 1(d)所示.

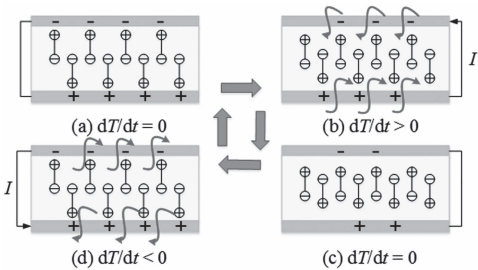


图 1 微型热释电发电机的工作原理图
Fig.1 The working principle of micro pyroelectric generator

2 结构设计

由于热释电效应的产生是基于温度随时间的变化,而自然环境具有恒定的温度梯度,并不会随时间而改变.因此,笔者采用两个盛水的烧杯,而水的温度不同,让器件交替浸入这两个热源,从而实现温度随时间变化^[10].图 2 是微型热释电发电机的结构简图.该发电机主要有 PVDF 薄膜和上下两层聚酰亚胺(PI)组成.首先选取一块大小为 2 cm × 6 cm 的 PVDF 薄膜,随后在薄膜的两面分别粘贴上铜导线并用铜导电胶带固定,最后用 PI 胶带将整个器件封装,并用环氧树脂进行密封.PI 胶带的作用是让器件和水进行隔离,避免器件和水接触而无法正常工作.

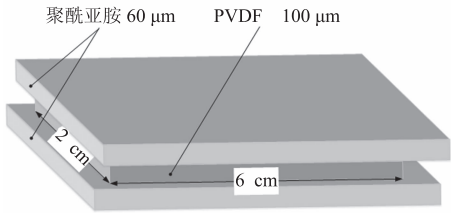


图 2 微型热释电发电机的结构图
Fig.2 The structure of the micro pyroelectric generator

3 实验结果讨论

该发电机在 20 ℃ 和 40 ℃ 温差下,匹配电阻为 100 MΩ 时的输出电压如图 3 所示.由实验结果可知,当 $t = 0.3$ s 左右时电压达到最大,相应的输出电压分别为 129 V 和 195 V,而热释电电压的输出周期大约为 2 s.图 4 给出了不同阻值的匹配电阻下,该发

电机的瞬时输出的最大电压和电流.由图 4 可知,该电机输出电压随着匹配电阻的增大而增大,而输出电流的变化趋势相反.图 5 给出了该发电机在不同阻值的匹配电阻下的最大瞬时输出功率.由实验结果可知,当匹配电阻为 80 MΩ 时,瞬时输出功率有一个最大值,在 20 ℃ 和 40 ℃ 温度差下的最大瞬时输出功率分别为 208 μW 和 475 μW.

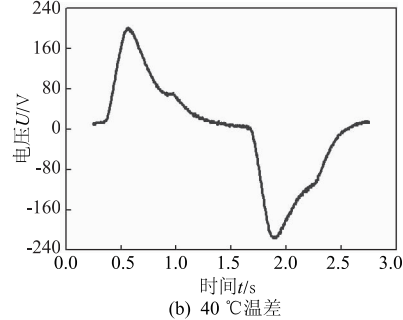
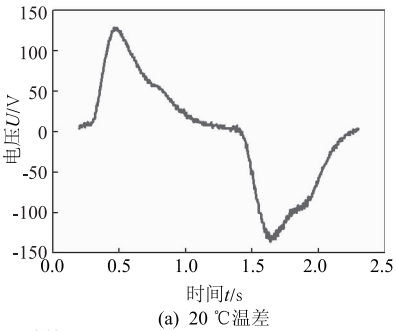


图 3 不同温差下的输出电压
Fig.3 The output voltage under different temperature difference

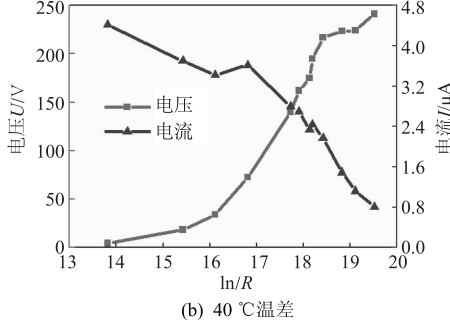
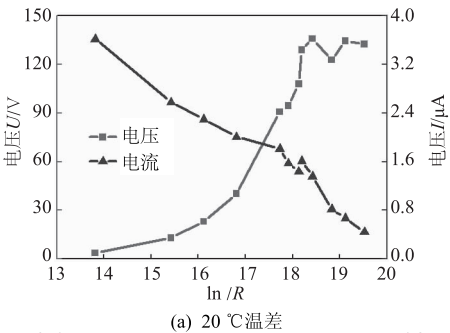


图 4 不同温度差下的输出电压、电流与匹配电阻的关系
Fig.4 The relationship between output voltage, current and matched resistance under different temperature difference

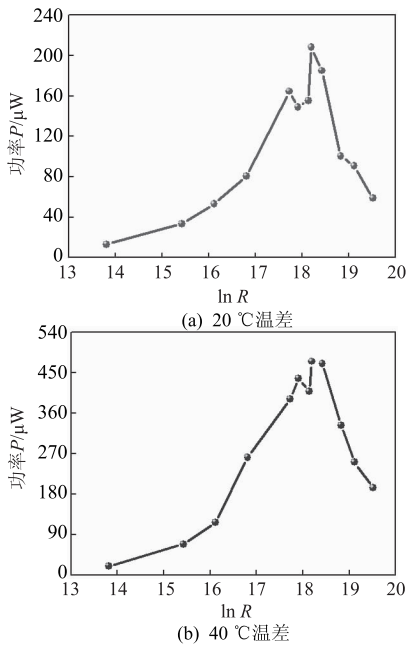


图 5 不同温度差下的输出功率
Fig. 5 The output power under different temperature difference

4 仿真结果讨论

通过有限元仿真分析了该发电机在 20 °C 和 40 °C 温度差下的温度变化及电压变化. 由公式(1)可以推出器件表面束缚电荷的面密度变化为:

$$\Delta\sigma = \frac{I\Delta T}{A} = P\Delta T. \quad (2)$$

而沿 PVDF 薄膜厚度方向的上下电极间的电压可以表示为:

$$U = Ed = \frac{\Delta\sigma d}{\epsilon_r\epsilon_0} = \frac{pd\Delta T}{\epsilon_r\epsilon_0}. \quad (3)$$

式中: ΔT 代表温度差; E 代表电场强度; d 代表 PVDF 薄膜的厚度; ϵ_r 和 ϵ_0 分别代表相对介电常数和真空介电常数^[9]. 仿真时将器件的上电极接地,同时选择 PVDF 的表面和中平面作为参考平面. PVDF 的热释电系数 p 取为 $4 \text{ nC} \cdot \text{cm}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$ ^[11].

图 6 显示的是在仿真时间 $t = 0.3 \text{ s}$, 温度差分别为 20 °C 和 40 °C 时热释电发电机的温度分布图. 从图 6 可以看出, 温度的变化是层状分布的. 图 7 显示的是仿真时间从 0 s 到 1 s 变化时, 在 20 °C 和 40 °C 温差下的器件表面和中平面的温度变化曲线. 图 7 显示温度随时间的变化是非线性的. 同时也发现, 器件中平面的温度变化要低于表面, 但是发现两者的差别不大. 分析图 7 的结果可知, 当仿真时间 $t = 0.3 \text{ s}$ 时, 整个器件的最大温度变化分别为 14 °C 和 28 °C. 由这两个数据及公式(2)和(3), 通过仿真可得图 8 的结果. 由图 8 可知, 20 °C 和 40 °C 温差下器件的最大开路电压分别为 689 V 和 1 380 V. 通过有限元分析可以更加

清晰地了解该发电机的工作原理和输出特性.

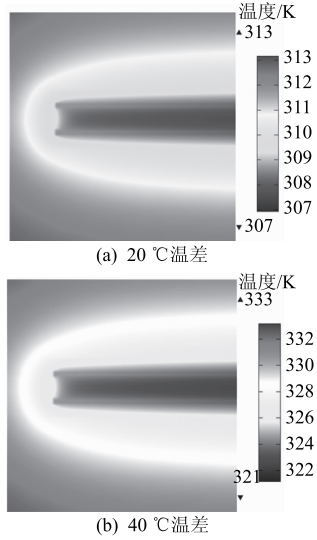


图 6 不同温度差下的温度分布图
Fig. 6 The temperature distribution under different temperature difference

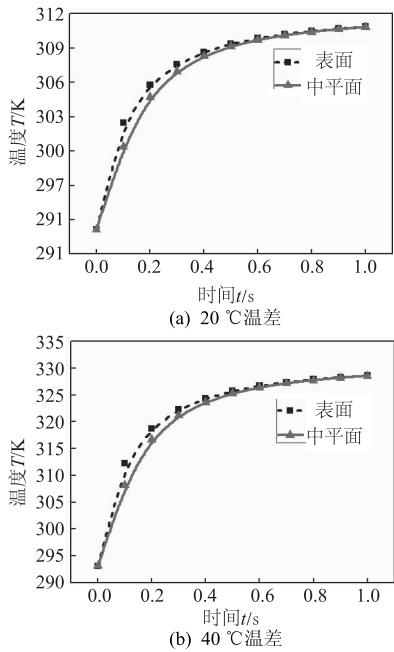


图 7 不同温度差下的温度变化曲线
Fig. 7 The temperature variation curve under different temperature difference

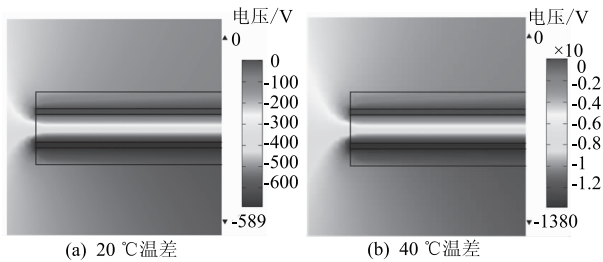


图 8 不同温度差下的电势分布图
Fig. 8 The potential distribution under different temperature difference

5 结论

(1)实验结果表明,该发电机的输出电压随匹配电阻的增大而增大;输出电流反之,瞬时输出功率在匹配电阻为 80 MΩ 时达到最大。

(2)仿真结果表明,温度的变化是非线性的,高温下的温度随时间的变化率要更高,因此其输出电压也要高。

(3)输出电压的有限元仿真结果与实验结果在具体数值上存在一定的差距,其原因主要有两个方面:实际的热传导影响;实验温度差要低于理论仿真结果. 因此该研究仍有可以提升的空间。

参考文献:

[1] 李景德,雷德铭,沈文彬. 热电系数及其精确测量方法[J]. 物理, 1984(7):407-409.

[2] 候识华,宋世庚,陶明德. 热释电材料及其应用[J]. 电子元件与材料, 2000, 19(6):26-28.

[3] BOWEN C R, TAYLOR J, LEBOULBAR E, et al. Pyroelectric materials and devices for energy harvesting applications[J]. Energy & environmental science, 2014, 7(12): 3836-3856.

[4] 张华,张桂芳. 压电和热释电聚合物 PVDF 及其应用[J]. 天津工业大学学报, 2002, 22(1):35-39.

[5] 辛毅,杨庆雨,郑浩田,等. PVDF 触滑觉传感器结构及其调理电路设计[J]. 压电与声光, 2014, 36(1):76-78.

[6] 刘廷,吴晓军,赵河明. PVDF 微力传感器的设计[J]. 仪表技术与传感器, 2014(10):7-9.

[7] 程啟华. PVDF 压电传感器温度特性研究[J]. 南京工程学院学报(自然科学版), 2009, 7(3):68-72.

[8] 王芳,李焕焕,韩文超,等. 基于热释电传感器的能量采集系统设计[J]. 功能材料与器件学报, 2012, 18(5):387-390.

[9] LENG Q, CHEN L, GUO H Y, et al. Harvesting heat energy from hot/cold water with a pyroelectric generator[J]. Journal of materials chemistry A, 2014(2): 11940-11947.

[10] SEBALD G, GUYOMAR D, AGBOSSOU A, et al. On thermoelectric and pyroelectric energy harvesting[J]. Smart materials & structures, 2009, 18(12): 125006-125013.

[11] 谢娜,秦岚. 三维柔性触觉/热觉传感器设计与仿真[J]. 传感器与微系统, 2015, 34(2):106-108.

A Micro Pyroelectric Generator Based on PVDF

ZHAO Jiangming¹, QIU Guolin^{1,2}, ZHANG Haixia²

(1. School of Mechanical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China; 2. Institute of Microelectronics, Peking University, Beijing 100871, China)

Abstract: Based on the pyroelectric effect of polyvinylidene fluoride (PVDF) film, a new micro pyroelectric generator was designed. The basic structure and working principle of the generator were introduced, corresponding experiments were completed and output characteristics of the generator under different temperature differences were analyzed through finite element method. The experimental results showed that the output voltage increased with the increase of the matched resistance and the output current was vice versa. The maximum instantaneous output power under 20 ℃ and 40 ℃ temperature difference was 208 μW and 475 μW, respectively. The simulation results show that with the increase of the temperature difference, the changing rate of temperature with time increased. The respective open-circuit voltage under 20 ℃ and 40 ℃ temperature difference was 689 V and 1380 V. The simulation and experiment proved that the generator could be used as an effective means of energy harvesting, which would give guidance for further research in the future.

Key words: PVDF; pyroelectric effect; micro generator