

# 柔性电极对介电弹性体机电转换效率影响分析

刘志运 李树杰 刘柯阳

(广州铁路职业技术学院机车车辆学院 广东 广州 510430)

**摘要:** 介电弹性体 (DE) 具有在电场的作用下发生形变, 且在撤离电场后恢复原状的特性, 可将环境中的机械能转化为电能。柔性电极和介电弹性体是组成机电转换装置的核心要素, 其材料的选择将直接影响到机电转换效率。本研究将分析不同的柔性电极材料对机电转换效率的影响以及通过改变组成机电转换结构的材料来提高机电转换效率。

**关键词:** 介电弹性体; 柔性电极; 机电转换效率

## 0 引言

近年来, 能量回收越来越受到人们的重视, 其中振动发电作为能量收集的一个方向开始被研究者所关注。介电弹性体材料作为一类新型的功能材料, 是基于麦克斯韦效应且属于聚合物的一种, 其自身具有结构简单、变形大、比能量高、适用范围广等优势。该类材料既可用于驱动, 如人工肌肉等, 也可用于发电, 如便携式发电机等。如果通过介电弹性体能够实现对周围环境中机械能的采集, 并将采集到的能量转换为方便利用的电能, 便可实现能量的有效回收, 避免能量浪费。影响介电弹性体能量回收的因素有很多, 如柔性电极材料、基础偏置电压、介电弹性体自身材料的结构特性等。其中, 制备所需的柔顺电极, 可以通过在基膜上涂覆电极材料实现, 也可以通过与填料合成复合材料实现, 因为柔性电极材料要能与介电弹性体薄膜一起组成机

电转换结构, 根据结构形变来达到能量转换的目的。柔性电极不仅要承受高的偏置电压, 还要能够与介电弹性体变形相配合, 在介电弹性体变形过程中均匀黏着在其表面不产生裂纹, 因此柔性电极成为限制介电弹性体广泛应用的重要因素之一。研究发现, 通过改善介电弹性体材料发电过程中电极材料与介电弹性体的黏着程度, 可以提升介电弹性体的机电转换效率, 最终提高介电弹性体对周围环境能量的获得利用效率。因此, 制备一种高黏结性柔性电极很有必要。

## 1 DE 的发电工作原理

依据机电转换结构的结构特征, 发电工作原理可简化为图 1。从宏观上看, 在伸展状态下 (大电容) 电荷注入到介电弹性体薄膜电极上, 如图 1 (a) 所示; 当在外力作用下紧缩弛豫时 (小电容), 如图 1 (b) 所示, 弹性体材料的弹性应力抵抗电场力, 提高了电能, 从而达到发电的

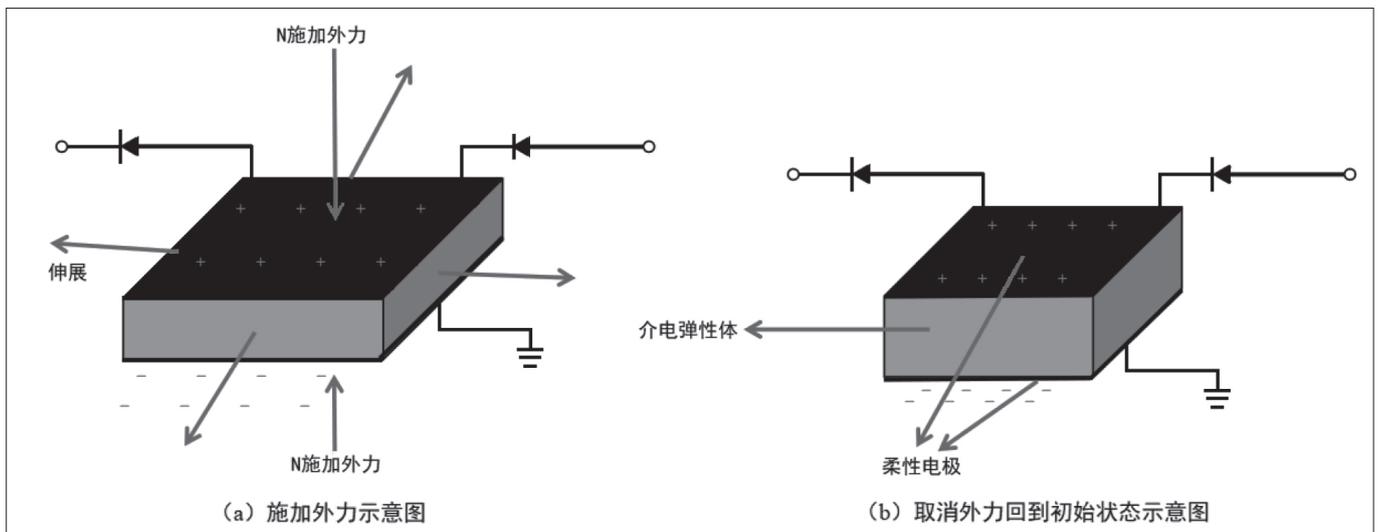


图 1 DE 发电原理简化图

效果。从微观上看，厚度增加时，由于异性电荷被推离，同性电荷被压缩彼此靠近，提高了电荷电压。因此，在一定条件下，对介电弹性体薄膜施加外力使其变形可以发电，且形变的幅度越大，其发电效果也会更明显<sup>[1]</sup>。

## 2 柔性电极概述

通常介电弹性体要在两端涂覆电极材料组成机电转换结构，通过伸展与弛豫的反复交替过程将机械能转化为电能输出或输出至储能装置储存。为提高介电弹性体机电转换效率，首先要提高介电弹性体机电转换结构所选用的电极材料的柔顺性及黏着度，因为使用足够柔顺的电极材料能够降低介电弹性体形变过程中对电介质的刚度影响。在导电性能不变的前提下，柔性电极材料要尽可能厚度小、质量轻、形变幅度大，能够进行高达数百万的形变循环次数。根据不同的材料类型，柔性电极一般可分为三类，分别是含碳元素电极、金属电极和复合电极<sup>[2]</sup>。

### 2.1 含碳元素电极

含碳元素电极一般有以下三种<sup>[3]</sup>。

第一种，具备低导电性能的半导体材料，以导电碳黑粉末作为机电转换结构电极，可与自带黏性的丙烯酸酯介电弹性体组成机电转换结构<sup>[4]</sup>。其优点在于该材质粒子之间的作用力较小，所以在机电转换过程中该材质能够在电致驱动形变中不受影响。其缺点在于介电弹性体在机电转换效应过程中所用到具备低导电性能导电碳黑粉末的两端电极，由于材质粒子之间相互作用力较小，在面对大应变时，该材质的粒子之间会出现断裂，从而导致电荷的传输被阻断，而在伸缩与弛豫反复交

替的过程中，电极材料会有碳粉颗粒掉落。

第二种是用具有高导电性能、机械强度较好、较小等特性的碳纳米管充当柔顺电极材料，因其特性决定了它在充当柔顺电极的领域占据重要位置。张冬至等<sup>[5]</sup>采用静电自组装办法与介电弹性体结合，组成28 μm机电转换结构，搭配手套组成机电转换装置，如图2所示。此装置在 $\theta=90^\circ$ 时，输出的电压峰值为3.7V。随后将机电转换结构放置于鞋的底部，组成新的机电转换装置。该装置的原理是通过脚着地和离地分别带动机电转换结构伸展与弛豫进行机电转换。该装置输出的电压峰值为1V，装置的介电弹性体相对介电常数为12，电容峰值为1.37nF。

第三种是以石墨烯材质制成电极。石墨烯的化学结构极其稳定，当对该材质施加外力时，碳原子面受到外力的影响弯曲变形，并非通过调整其原子排列来适应外力的影响，因此该材质稳定性强，且有不错的导热性能。该材料在导电领域也具备优异的性能：因为其机械强度较好，由此在设计机电转换结构的电极时常被提及。

### 2.2 金属电极

选择充当机电转换结构的电极，要考虑其应具备较高的导电性能、形变幅度大等特点。对于选择金属充当机电转换结构两端的材料，其导电作用较好，但刚度较大。为解决这一问题，Pelrine等<sup>[6]</sup>提出了把金属镀在介电弹性体薄膜上充当电极组成机电转换结构的方法。

### 2.3 复合电极

将含碳元素电极或是金属电极用于机电转换结构中，单独采用任一含碳元素电极或金属电极充当机电转换结构的电极都会有一定的缺陷。目前对复合电极

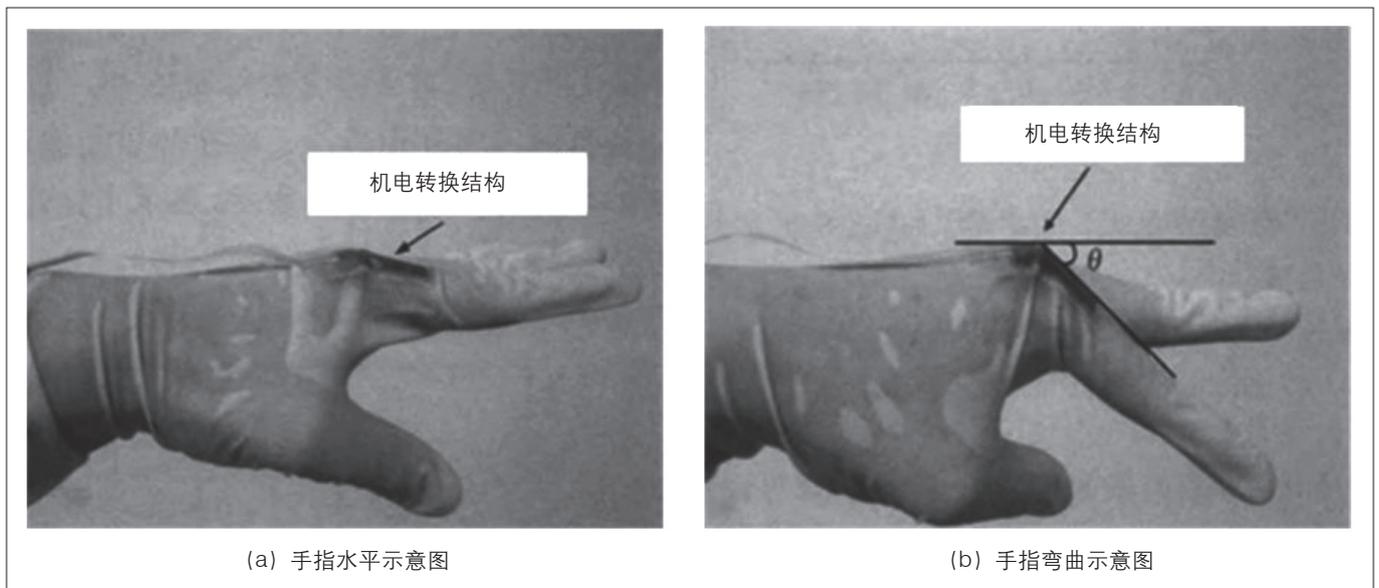


图2 机电转换装置示意图

材料的研发,更多的设想是通过两种不同的含碳元素电极材料配合使用或对两种不同材质进行合成或结合使用,从而减小任一含碳元素电极或金属电极单独充当机电转换结构的电极所带来的缺陷<sup>[2]</sup>。

### 3 提高 DE 机电转换效率的方法

通过对介电弹性体机电转换结构的结构组成进行分析,可以通过以下方法提高其机电转换效率:选择更为合适的介电弹性体和柔性电极,选用的柔性电极必须满足厚度小、质量轻、变形大、比能量高、可适合多种场合等条件。除此之外,所选用的柔性电极必须满足较高的柔度,足够柔顺的电极材料能够降低对电介质刚度的影响,并且柔性电极应具备高粘合性。由于柔性电极在整个机电转换装置发电过程中会随着介电弹性体发生形变而变形,因此在形变过程中粘合性能强的柔性电极可以紧密黏着在介电弹性体表面,而不会因为介电弹性体变形而脱离介电弹性体表面。

由 Pelrine 等<sup>[7]</sup>提出的电致驱动形变的公式可知,要想扩大介电弹性体因电而产生的驱动形变,可以通过改变介电弹性体的杨氏模量、厚度、介电常数来扩大。机电转换是通电产生驱动形变的逆过程,即机电转换结构的介电弹性体形变越大,其发电能力就越强,想要通过改变介电弹性体的结构特性来提高能量回收的效率,可选择更薄的介电弹性体薄膜,减小拉伸模量,增加相对介电常数。

### 4 高黏结性柔性电极

一般机电转换结构由柔性电极与介电弹性体组合而成,机电转换结构在受到外力的作用时变形,改变介电弹性体电容即可发电,伸展和弛豫反复交替幅度越大,发电能力就越强,而在发电过程中柔性电极会随着介电弹性体形变而变形,若在发电过程中柔性电极滑动甚至脱离薄膜表面,将会导致介电弹性体薄膜的机电转换效率减小或为0。为避免该情况出现,柔性电极与介电弹性体之间的黏结性要尽可能高,从而达到提高介电弹性体薄膜机械能转化为电能效率的目的。

### 5 结语

柔性电极黏着在介电弹性体上下两表面,实现机械能转化为电能,依靠其特性将环境周围的机械能有效

地回收储存并利用,有效地避免能源浪费,提供了一种新型机电转换的能源回收方式。通过对不同电极材料的分析可知,单一以碳元素或者以金属为电极,在性能上都达不到预期结果,应转向开发复合电极以减少单一材质存在的缺陷。

为了提高机电转换结构的机电转换效率,可通过选择组成机电转换结构的材料来实现,对于通过介电弹性体的改变来提高机电转换效率,可选择更薄的介电弹性体材料、减小其拉伸模量、增加其相对介电常数;而对于通过改变柔性电极从而改变机电转换效率,则可通过制备一种高黏结柔性电极与介电弹性体配合使用,其效果是在发电过程中,组成机电转换结构的紧密黏合程度能够得到有效提高,从而提高介电弹性体的机电转换效率。

**基金项目:**2022年度广东省大学生科技创新培育项目:高粘性柔性电极对介电弹性体发电特性影响的实验研究(pdjh2022b0959)。

### 参考文献:

- [1] 刘志运,周芸悦.介电弹性体发电原理分析及应用[J].机电信息,2021(17):61-62.
- [2] 武畏志鹏,邹华,宁南英,等.柔性电极材料的国内外研究进展[J].功能材料,2021,52(02):2039-2049.
- [3] 曹建波,任钰雪,鄂世举,等.介电弹性体驱动器柔性电极技术发展动态[J].电子元件与材料,2017,36(07):9-16.
- [4] 孙宗学.高黏结性柔性电极制备及介电弹性体器件驱动性能研究[D].北京:北京化工大学,2018.
- [5] 张冬至,童俊,刘哲,等.基于电话性聚合物薄膜柔性器件的触觉传感特性[J].光学精密工程,2014,22(8):2151-2158.
- [6] Ronald E. Pelrine, Roy D. Kornbluh, Jose P. Joseph. Electrostriction of polymer dielectrics with compliant electrodes as a means of actuation[J]. Sensors & Actuators: A. Physical, 1998, 64(1): 77-85.
- [7] Ron Pelrine, Roy Kornbluh, Jose Joseph, et al. High-field deformation of elastomeric dielectrics for actuators[J]. Materials Science & Engineering C, 2000, 11(2): 89-100.