

# 基于复合改性提升介电弹性体驱动性能的研究进展

丁国通, 吕祥鸿 \*

西安石油大学, 陕西 西安 710065

**摘 要 :** 介电弹性体 (DEs) 因其优异的电致变形性能广泛应用于柔性驱动器、人工肌肉和传感器等领域, 但仍面临力学强度、稳定性和耐用性等问题。为提升驱动性能和使用寿命, 复合改性技术 (如导电填料复合、纳米复合、纤维增强复合和交联改性) 被广泛采用, 这些方法有效改善了 DEs 的电致应变、力学性能和耐久性。本文综述了复合改性策略在提升 DEs 驱动性能方面的研究进展, 分析了不同改性方法的机制, 并展望了未来的发展方向与挑战。

**关 键 词 :** 介电弹性体; 复合材料; 驱动性能

## Research Progress on Improving the Driving Performance of Dielectric Elastomers Based on Composite Modification

Ding Guotong, Lv Xianghong \*

Xi'an Shiyou University, Xi'an, Shaanxi 710065

**Abstract:** Dielectric elastomers (DEs) are widely used in flexible actuators, artificial muscles and sensors due to their excellent electrodeformability, but they still face problems such as mechanical strength, stability and durability. In order to improve the driving performance and service life, composite modification technologies (such as conductive filler composite, nanocomposite, fiber reinforced composite and crosslinking modification) are widely used, which effectively improve the electroinduced strain, mechanical properties and durability of DEs. In this paper, the research progress of compound modification strategy in improving DEs driving performance is reviewed, the mechanism of different modification methods is analyzed, and the future development direction and challenges are prospected.

**Keywords:** dielectric elastomer; composite material; driving performance

## 引言

介电弹性体 (DEs) 因其优异的电致变形性能, 广泛应用于柔性驱动器、人工肌肉和传感器等领域, 具有高效、良好的柔韧性和低驱动电压, 适合大形变驱动任务<sup>[1]</sup>。然而, 力学强度、稳定性和耐用性等问题仍限制了其广泛应用。通过引入纳米材料、导电填料和增强纤维等成分, 可以有效提升 DEs 的导电性、力学性能和电致应变。例如, 碳纳米管和石墨烯等填料能提高介电常数, 增强电致响应能力; 增强纤维和无机纳米粒子的引入则有助于提高机械强度和稳定性。这些改性方法显著提升了 DEs 的性能, 为其在高性能柔性器件中的应用奠定了基础。

本文综述了近年来基于复合改性方法提升介电弹性体驱动性能的研究进展。首先, 简要介绍介电弹性体的基本原理及主要分类, 为理论基础奠定基础; 接着, 重点分析各类复合改性策略在提升导电性、力学性能和电致应变能力方面的研究成果与机制; 最后, 探讨复合改性介电弹性体的发展现状, 分析实际应用中的挑战, 并展望未来研究方向。

## 一、介电弹性体的工作原理及分类

### (一) 介电弹性体的工作原理

介电弹性体的工作原理基于 Maxwell 应力效应<sup>[2]</sup>。当电场作用于材料时, 电极表面产生静电力 (Maxwell 应力,  $p$ ), 导致材料发生压缩形变, 如图 1-1 所示。具体来说, 电场施加在致动器的上下电极时, 电荷在电极表面集中, 电荷间的排斥作用使材料横向膨胀, 而相反电荷则产生吸引力, 使材料厚度方向收缩。

电场移除后, 电荷恢复无序分布, 材料回到原始状态。

当驱动应变较小 ( $< 20\%$ ) 时, 介电弹性体的形变可以通过以下公式进行计算:

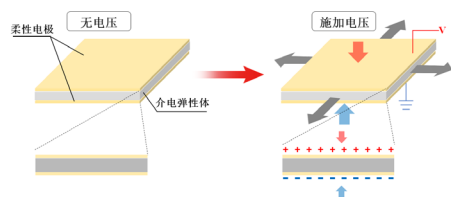
$$S_3 = -\frac{p}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r E^2}{Y} = -\frac{\epsilon_0 \epsilon_r}{Y} \left( \frac{U}{d} \right)^2 \quad (1-1)$$

式中,  $S_3$  表示材料厚度方向的形变 (3 表示厚度方向, 负号表示材料被压缩),  $\epsilon_0$  为真空介电常数、 $\epsilon_r$  为材料的相对介电常数、 $E$  为施加的电场、 $Y$  为弹性模量、 $U$  为施加电压、 $d$  为薄膜

作者简介: 丁国通 (1998.03-) 男, 汉族, 籍贯: 山东省青岛市莱西市, 学历: 硕士研究生, 研究方向: 介电弹性体驱动性能研究;

通讯作者: 吕祥鸿, 男, 汉族, 籍贯: 江苏省徐州市, 职称: 教授, 邮箱: lxhong71@sina.com

厚度。



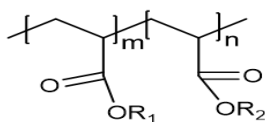
> 图 1-1 介电弹性体的工作原理

## （二）介电弹性体的分类

目前常见的 DE 材料主要包括聚丙烯酸酯（PA）<sup>[3]</sup>、硅基弹性体、聚氨酯（PU）<sup>[4]</sup> 和氢化丁腈橡胶（HNBR）等。这些材料在外加电场作用下能显著变形，展现出优异的电致驱动性能。

### 1. 聚丙烯酸酯类介电弹性体

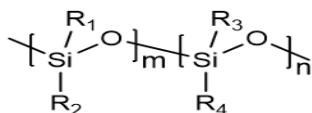
聚丙烯酸酯材料因其较高的介电常数和较低的介电损耗，在电场驱动下展现出优异的形变能力。这些材料的分子结构包含极性的丙烯酸酯基团，能在外加电场作用下产生显著的极化效应，从而引起形变。最常用的是由美国 3M 公司生产 VHB 系列薄膜，其分子式见图 1-2。



> 图 1-2 VHB 材料分子式

### 2. 硅橡胶类介电弹性体

硅橡胶类介电弹性体因其较低的玻璃化转变温度（T<sub>g</sub>），能够在较广温度范围内保持良好的电驱动性能。此外，硅橡胶具有卓越的弹性和可逆形变能力，在电场作用下能产生显著形变，成为高柔性和大变形驱动应用的理想选择。硅橡胶属于具有硅-氧骨架结构的聚合物，通常以交联或氢化形式存在。常见类型包括有机硅橡胶、氟硅橡胶和氢硅橡胶，其分子式见图 1-3。



> 图 1-3 硅橡胶材料分子式

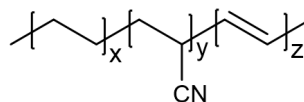
### 3. 聚氨酯类介电弹性体

聚氨酯类介电弹性体在驱动方面具有良好的柔韧性和大变形能力，能够在低电压下实现显著致动效果。其优异的机械性能和电性能使其成为理想的柔性驱动材料。这些特点源于聚氨酯中含有有机酯链段和氨基化学基团，它们能在电场作用下有效产生极化效应，同时分子结构的柔性赋予材料较好的变形能力。常用的聚氨酯类介电弹性体包括聚醚型、聚酯型热塑性聚氨酯及聚氨酯/复合材料。

### 4. HNBR 类介电弹性体

HNBR 材料具有较高的介电强度，能在较高电场强度下运行而不发生电击穿，确保其在高电压下的可靠性。同时，HNBR 的低电导率有助于减少电场中的能量损失，从而提升驱动性能。常见的 HNBR 类介电弹性体包括 HNBR 本体、HNBR/ 聚氨酯复合材料、HNBR/ 硅橡胶复合材料和 HNBR/ 填料复合材料，其分子

式见图 1-4。



> 图 1-4 HNBR 材料分子式

## 二、复合改性方法概述

随着柔性电子和智能材料技术的发展，DEs 因其优异的电致应变性能和可拉伸性，成为柔性驱动器、传感器及人工肌肉等领域的关键材料。然而，传统单一聚合物基 DE 材料存在导电性低、力学强度不足和耐久性差的问题，限制了其应用。为克服这些问题，研究者提出并采用了多种复合改性策略，如导电填料复合、纳米复合、纤维增强复合和交联改性等，这些技术有效提升了 DEs 的电致应变能力、力学性能和耐久性，拓展了其在智能材料和柔性电子器件中的应用前景。

### （一）导电填料复合

为提升 DE 在柔性驱动器中的驱动性能，研究人员提出了多种创新技术，旨在优化其电学性能和机械响应。引入导电填料（如碳黑、导电纳米粒子等）以提高介电常数，已被证明是一种有效策略，能够显著改善电致应变性能。

Seo 等人<sup>[5]</sup>设计了一种胶囊状混合填料，通过在二氧化钛纳米线表面涂覆聚多巴胺（PDA），并将纳米级还原氧化石墨烯（nrGO）与 PDA 通过共价键结合，构建了具有良好界面相容性的填料。该填料与低粘度聚二甲基硅氧烷（PDMS）混合，制成柔性弹性体薄膜。复合材料在提高介电常数的同时抑制了损耗因子的增加，能够在 1.6 V/μm 下实现 2% 的致动应变，在 28 V/μm 下达到 27.31% 的最大应变。制成的锥形致动器可驱动最大 200 克负载，展现了优异的输出能力，为介电弹性体性能提升提供了新的应用前景。

### （二）纳米复合改性

纳米填料的引入已成为提升 DE 性能的重要策略。通过在聚合物基体中添加碳纳米管、石墨烯等纳米级填料，能够有效提高材料的介电常数、导电性和热稳定性，从而显著改善其电致驱动性能。

Feng 等人<sup>[6]</sup>提出了一种新方法，通过脱羧开环聚合（ROP）反应在低电压下构建高性能介电弹性体纳米复合材料。该方法使用 KOH/ 二甲苯体系制备阴离子引发剂 MXeneK，引发 COS 与 FGE 的聚合，并通过 BMI 实现动态共价交联，获得 MXeneK-FGE-BMI 复合体系。材料通过 MXene 面接枝聚硫醚链段，提升了界面相容性和填料分散性，确保高介电常数（ε'=12.3 @ 10<sup>3</sup> Hz）并抑制了介电损耗（tan δ=0.03 @ 10<sup>3</sup> Hz）。在 11.9 V/μm 电场下，材料实现了 17.1% 的致动应变，展现了在低能耗仿生驱动器件中的应用潜力。

### （三）纤维增强复合

纤维增强复合是提升 DE 综合性能的有效策略。通过在聚合物基体中引入增强纤维（如碳纤维、芳纶纤维、玻璃纤维等），不

仅能显著提高材料的力学强度和抗疲劳性，还能增强其在大应变和高负载条件下的形状保持能力和稳定性，从而拓宽其在复杂环境中的应用范围。

Zhao 等人探讨了碳纳米管（CNT）纤维作为增强组分在 DE 材料中的应用可行性。基于其良好的机电响应特性，研究者引入剪切滞后模型，构建界面过渡层以表征应变不一致性，并建立 CNT 纤维应变与 DE 整体应变的关系模型。该模型在 0.05 Hz、20 kV/mm 条件下预测误差低于 4%，验证了其在自感应柔性驱动系统中的有效性，为增强纤维驱动系统的设计提供了理论依据。

#### （四）交联改性

交联改性在提升 DE 力学性能和电场响应能力方面发挥着重要作用。通过调控聚合物基体的交联密度，可以增强材料的机械强度和热稳定性，同时保持其柔性和可变形性，从而优化驱动性能。较高的交联度有助于提高抗老化性和力学强度，而适度的交联度则有助于保持较大的可伸展性和响应灵敏度。

Li 等人<sup>[7]</sup>通过刚性短链交联剂对弛豫型铁电聚合物进行化学交联，构建出兼具高介电常数（35）和低介电损耗（0.09）的本

征弹性体。该材料在高达 80% 应变下仍保持稳定的铁电响应和良好弛豫行为，展现出优异的机电耦合性能与形变适应性。研究为降低高介电弹性体损耗、拓展其在可穿戴电子和柔性传感等领域的应用提供了理论与材料支持。

### 三、结语

尽管 DE 材料在驱动性能、力学强度和稳定性方面取得了显著进展，整体发展仍处于探索阶段。研究者通过导电填料掺杂、纳米复合和纤维增强等改性策略，提升了介电常数和机械性能，拓展了其在柔性电子器件、人工肌肉和软体机器人等领域的应用。然而，微观结构设计、组分间协同作用机制及其对宏观介电性能的影响仍缺乏系统性研究和理论支持。未来，随着高性能纳米填料的开发和界面调控技术的成熟，DE 材料有望在机电耦合效率、耐久性和可加工性方面实现进一步提升，为工程应用提供更坚实的基础。

### 参考文献

- [1] Yang L, Wang H, Zhang D, et al. Large deformation, high energy density dielectric elastomer actuators: Principles, factors, optimization, applications, and prospects[J]. Chemical Engineering Journal, 2024: 151402.
- [2] Pelrine R, Kornbluh R, Kofod G. High-Strain Actuator Materials Based on Dielectric Elastomers [J]. Advanced Materials, 2000, 12(16): 1223–5.
- [3] Lu G, Zhang Y, Zhang J, et al. Trade-offs between ion-conducting and mechanical properties: The case of polyacrylate electrolytes[J]. Carbon Energy, 2023, 5(2): e287.
- [4] Delavarde A, Savin G, Derkenne P, et al. Sustainable polyurethanes: toward new cutting-edge opportunities[J]. Progress in Polymer Science, 2024: 101805.
- [5] Seo J S, Park K T, Oh S M, et al. Nano-Sized rGO-Encapsulated TiO<sub>2</sub> Nanowire-Filled PDMS cone type dielectric elastomer actuator operating at low applied electric field[J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 494: 152801.
- [6] Feng Z, Feng G, Yue X, et al. Poly (thioether) grafted Ti<sub>3</sub>C<sub>2</sub>Tx MXenes: new dielectric elastomer nanocomposites with high area strain at low driving voltage[J]. European Polymer Journal, 2023, 188: 111945.
- [7] Li F, Wang L, Gao L, et al. Reducing Dielectric Loss of High-Dielectric-Constant Elastomer via Rigid Short-Chain Crosslinking[J]. Advanced Materials, 2024, 36(47): 2411082.