

doi:10.3969/j.issn.1001-3539.2025.12.025

# 离子液体增强聚氯乙烯凝胶驱动器的驱动性能

李茂源<sup>1</sup>, 黄建建<sup>2</sup>, 李书侠<sup>2</sup>, 萧浩坤<sup>2</sup>, 王蒙蒙<sup>2</sup>, 晋刚<sup>2</sup>

(1. 厦门大学航空航天学院, 福建厦门 361000; 2. 华南理工大学机械与汽车工程学院, 广州 510000)

**摘要:** 聚氯乙烯凝胶(PVCG)驱动器在柔性可穿戴设备和仿生驱动领域具有重要的应用前景,但在常规工作电压下驱动性能不足的问题限制了其实际应用。为解决上述问题,采用溶剂蒸发法制备了五种离子液体改性的PVCG(iPVCG),包括1-烯丙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([AMIM]BF<sub>4</sub>)、1-烯丙基-3-甲基咪唑双(三氟甲烷磺酰)亚胺盐([AMIM]NTF<sub>2</sub>)、1-烯丙基-3-甲基咪唑氯盐([AMIM]Cl)、三丁基甲基氯化铵(TBMACl)和三己基十四烷基氯化磷(THTDPCI)。第一性原理计算表明,所选离子液体的分子体积范围为53.68~855.11 Å<sup>3</sup>,偶极矩为11.39~15.64 Debye。介电性能测试结果显示,离子液体通过离子极化、取向极化和界面极化的协同作用,显著提高了PVCG基体的介电常数。在1 000 Hz频率下,[AMIM]NTF<sub>2</sub>改性iPVCG的介电常数达到340.08,是纯PVCG的11.61倍;其他改性iPVCG的介电常数也提升了48.59~142.42;同时,弛豫频率最高提升至755.97 Hz,较纯PVCG(194.86 Hz)提升了288%。力学性能研究表明,离子体积对拉伸弹性模量具有反向调控作用。小体积离子液体(如[AMIM]Cl, 228.09 Å<sup>3</sup>)因高物质的量浓度形成密集相分离结构,使拉伸弹性模量降低24.91%;而大体积离子液体(如THTDPCI, 855.11 Å<sup>3</sup>)因分子数较少导致相分离减弱,其iPVCG的拉伸弹性模量(10.96 kPa)与纯PVCG(11.68 kPa)相近。这表明离子体积通过调控相分离程度主导了拉伸弹性模量的变化。介电性能的提升与拉伸弹性模量的降低协同优化了iPVCG的驱动性能。在800 V电压下,iPVCG的弯曲位移最高提升63.51%,其中[AMIM]NTF<sub>2</sub>改性iPVCG凝胶因其高介电常数和低模量表现出最优性能,驱动位移达到3.45 mm。本研究提出的离子体积效应与高偶极矩离子液体优选策略,为开发低电压、高性能柔性驱动器提供了重要的材料优化指导。

**关键词:** 软体驱动器; 聚氯乙烯凝胶; 离子液体; 离子凝胶; 介电常数

**中图分类号:** TQ327 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3539(2025)12-0190-07

## Ionic liquid enhanced actuation performance of polyvinyl chloride gel actuators

LI Maoyuan<sup>1</sup>, HUANG Jianjian<sup>2</sup>, LI Shuxia<sup>2</sup>, XIAO Haokun<sup>2</sup>, WANG Mengmeng<sup>2</sup>, JIN Gang<sup>2</sup>

(1. School of Aeronautics and Astronautics, Xiamen University, Xiamen 361000, China;

2. School of Mechanical and Automotive Engineering, South China University of Technology, Guangzhou 510000, China)

**Abstract:** Polyvinyl chloride gel (PVCG) actuators show great potential for flexible wearable devices and biomimetic actuation applications. However, their insufficient actuation performance under conventional operating voltages has limited practical implementation. In order to solve the above problems, five kinds of ionic liquid modified PVCG (iPVCG) were prepared with solvent evaporation method, including 1-allyl-3-methylimidazolium tetrafluoroborate ([AMIM]BF<sub>4</sub>), 1-allyl-3-methylimidazolium bis(trifluoromethanesulfonyl)imide ([AMIM]NTF<sub>2</sub>), 1-allyl-3-methylimidazolium chloride ([AMIM]Cl), tributylmethylammonium chloride (TBMACl), and trihexyltetradecylphosphonium chloride (THTDPCI). First-principles calculations characterized the ionic liquids, revealing molecular volumes ranging from 53.68 Å<sup>3</sup> to 855.11 Å<sup>3</sup> and dipole moments between 11.39 Debye and 15.64 Debye. Dielectric property measurements show that ionic liquid modification significantly enhances the PVCG's dielectric constant through combined ionic, orientation, and interfacial polarization effects. At 1 000 Hz frequency, the [AMIM]NTF<sub>2</sub> modified iPVCG achieves a remarkable dielectric constant ( $\epsilon'$ ) of 340.08, corresponding to an 11.61-fold increase over pure PVCG. Other modified

**基金项目:** 厦门市自然科学基金青年项目(3502Z202571001),福建省自然科学基金面上项目(2025J01052)

**通信作者:** 晋刚, 博士, 教授, 博士生导师, 研究方向为聚合物加工过程在线检测

**收稿日期:** 2025-09-22

**引用格式:** 李茂源, 黄建建, 李书侠, 等. 离子液体增强聚氯乙烯凝胶驱动器的驱动性能[J]. 工程塑料应用, 2025, 53(12): 190-196.

LI Maoyuan, HUANG Jianjian, LI Shuxia, et al. Ionic liquid enhanced actuation performance of polyvinyl chloride gel actuators[J]. Engineering Plastics Application, 2025, 53(12): 190-196.

PVCGs exhibit  $\epsilon'$  values ranging from 48.59 to 142.42. The relaxation frequency increases up to 755.97 Hz, representing a 288% enhancement compared to pure PVCG (194.86 Hz). Mechanical testing reveals an inverse correlation between ionic liquid volume and elastic modulus. Smaller volume ionic liquid such as [AMIM]Cl (228.09 Å<sup>3</sup>) induce dense phase-separated structures due to their higher molar concentration, reducing the tensile modulus by 24.91%. In contrast, larger volume ionic liquid like THTDPCI (855.11 Å<sup>3</sup>) show limited phase separation, maintaining an elastic modulus of 10.96 kPa comparable to pure PVCG of 11.68 kPa. These results indicate that ionic liquid volume primarily controls tensile modulus variation through phase separation regulation. The optimized dielectric properties and reduced tensile modulus work synergistically to enhance actuation performance. Under 800 V excitation, maximum bending displacement increases by 63.51%. The [AMIM]NTF<sub>2</sub> modified gel demonstrates superior performance with 3.45 mm displacement, attributed to its high dielectric constant and low modulus. The ionic volume effect and high dipole moment ionic liquid optimization strategy proposed in this study provide important material optimization guidance for the development of low-voltage, high-performance flexible actuators.

**Keywords:** soft actuator; polyvinyl chloride gel; ionic liquid; ionic gel; dielectric constant

在柔性电子、智能驱动及可穿戴生物电子等前沿领域快速发展背景下,聚氯乙烯凝胶(PVCG)驱动器因其独特的性能优势展现出广阔的应用前景<sup>[1]</sup>。该驱动器兼具低密度、低能耗、大变形量和高输出力等特点,同时具备优异的透明度与低成本特性,被认为是人工肌肉、软体机器人和可穿戴设备的理想候选器件<sup>[2]</sup>。该驱动器已被报道应用在仿生鱼尾<sup>[3]</sup>、黏附机构<sup>[4]</sup>、可穿戴设备<sup>[5]</sup>、盲文显示器<sup>[6]</sup>及可调谐透镜<sup>[7]</sup>等。

介电弹性体驱动器(DEA)通常需要数千伏的高压驱动,而PVCG驱动器的工作电压相对较低(通常<1 kV)。然而,在此常规工作电压下,PVCG驱动器的驱动性能无法满足应用需求<sup>[8-9]</sup>。因此,大量研究工作关注于提升驱动器在低电压下的驱动性能<sup>[10-11]</sup>。Wu等<sup>[12]</sup>通过快速热熔化技术制备的PVCG驱动器应变输出增加至20.62%,输出力为0.43 N,回复响应时间为1.42 s。研究发现,在PVCG中掺入微量离子液体能提高介电常数( $\epsilon'$ )并降低凝胶与电极之间的界面电阻,并且该方法有效增强了凝胶的变形响应能力。这一发现证实了离子液体的添加有助于增强PVCG的电刺激变形响应能力<sup>[13-16]</sup>。Asaka等<sup>[17]</sup>制备了添加离子液体的PVCG,并研究了添加不同结构的离子液体对驱动器驱动性能的影响,发现添加由大阳离子和小阴离子组成的离子液体时,驱动器的性能提升最显著,并且驱动器的位移随着离子液体添加量的增加而减小。Zheng等<sup>[18]</sup>提出一种电润湿机制来解释离子聚氯乙烯凝胶(iPVCG)的电刺激变形响应,研究指出,在几百伏的外加电压作用下,iPVCG在电极附近形成高度集中的自由离子层,离子体积的不对称性导致阳极侧出现较大的电压降,从而

降低了凝胶与阳极之间的界面张力,使凝胶发生形变。该理论模型进一步预测,增加离子液体阴阳离子之间的体积比有助于提升凝胶的电驱动性能,但这一结论仍需进一步实验验证。因此,深入研究离子液体在PVCG中的作用机制,明确其对电致变形性能的影响规律,具有重要的理论与应用价值。

笔者制备了五种添加不同离子液体的iPVCG,其设计旨在系统探究离子体积效应:一组固定阴离子,改变阳离子体积;另一组固定阳离子,改变阴离子体积。通过第一性原理计算了各离子液体阴离子和阳离子的体积,以及各离子液体的偶极矩。系统地研究离子液体体积对PVCG介电性能、力学性能和驱动性能的影响,并据此分析了离子液体对驱动性能的优化机制。

## 1 实验部分

### 1.1 主要原材料

聚氯乙烯(PVC):重均分子量为187 500,日本东曹株式会社;

己二酸二正丁酯(DBA):分析纯,上海麦克林生化科技股份有限公司;

1-烯丙基-3-甲基咪唑四氟硼酸盐([AMIM]BF<sub>4</sub>)、1-烯丙基-3-甲基咪唑双(三氟甲烷磺酰)亚胺盐([AMIM]NTF<sub>2</sub>)、1-烯丙基-3-甲基咪唑氯盐([AMIM]Cl)、三丁基甲基氯化铵(TBMACl)、三己基十四烷基氯化磷(THTDPCI):分析纯,上海阿达玛斯试剂有限公司;

*N,N*-二甲基甲酰胺(DMF):分析纯,国药集团化学试剂有限公司。

### 1.2 主要仪器及设备

宽频介电阻抗分析仪:Concept40,德国Novo-

control公司;

台式万能材料试验机:5566,美国Instron公司;

激光位移传感器:LK-G80A,日本Keyence公司;

直流电源:跃迁光电WT2-MC,北京精益达明电子科技有限责任公司。

### 1.3 试样制备

采用溶剂蒸发法制备PVC凝胶样品,在室温下将27 g增塑剂DBA倒入45 mL DMF中。通过磁力搅拌在200 r/min的转速下使DBA和DMF均

匀混合1 h。再将3 g PVC树脂粉末以及0.03 g [AMIM]BF<sub>4</sub>倒入混合液中,调整转速至800 r/min,搅拌温度为40 °C,充分搅拌8 h。最后,将25 g质量的溶液倒入直径为100 mm的玻璃培养皿中,在65 °C的烘箱中经过36 h彻底排除溶剂得到iPVCG,该样品的名称被记为i<sub>[AMIM]BF<sub>4</sub></sub>PVCG。按照表1中iPVCG制备过程的用量配比,通过不添加离子液体,或者添加不同离子液体分别制备了PVCG, i<sub>[AMIM]BF<sub>4</sub></sub>PVCG, i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG, i<sub>[AMIM]Cl</sub>PVCG, i<sub>TBMACl</sub>PVCG, i<sub>THTDPCl</sub>PVCG。

表1 iPVCG样品制备过程的用量配比

Tab. 1 Formulation ratio for iPVCG samples preparation process

Samples	Ionic liquid	Ionic liquid mass/g	PVC mass/g	DBA mass/g	DMF volume/mL
PVCG			3.00	27.00	45.00
i <sub>[AMIM]BF<sub>4</sub></sub> PVCG	[AMIM]BF <sub>4</sub>	0.03	3.00	27.00	45.00
i <sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub> PVCG	[AMIM]NTF <sub>2</sub>	0.03	3.00	27.00	45.00
i <sub>[AMIM]Cl</sub> PVCG	[AMIM]Cl	0.03	3.00	27.00	45.00
i <sub>TBMACl</sub> PVCG	TBMACl	0.03	3.00	27.00	45.00
i <sub>THTDPCl</sub> PVCG	THTDPCl	0.03	3.00	27.00	45.00

### 1.4 测试与表征

采用台式万能材料试验机测量样品的力学性能。凝胶样品采用标准哑铃模型(GB/T 528-2009, 3型)切割,总长为50 mm,标距为18 mm,宽度为4 mm,厚度为2 mm。在室温下以100 mm/min的拉伸速率拉伸标准样条,直至样条断裂(应力衰减程度超过10%)。每个样品重复测试三次,其拉伸弹性模量依据应力-应变曲线在0%~5%应变区间内的线性段计算,并取三次测试结果的平均值。

采用阻抗分析仪,参照GB/T 31838.6-2021测量iPVCG频率相关介电性能。将凝胶样品剪裁为直径30 mm的圆形片状结构并置于两片铜电极之间,测试在室温下进行,频率扫描范围为10<sup>-2</sup>~10<sup>7</sup> Hz。将所制备的iPVCG置于两个铜电极之间,电刺激时凝胶总是向阳极弯曲。

图1为驱动器驱动性能测试示意图。如图1所示,采用弯曲驱动器的测试来分析添加不同离子液

体对驱动性能的影响。使用夹持装置将长度为30 mm、宽度为10 mm的凝胶样品固定在两个铜电极之间,其中1/3的凝胶被铜电极夹住。利用激光位移传感器记录了凝胶随时间的弯曲位移。

## 2 结果与讨论

### 2.1 离子液体的化学特性

为系统研究离子体积对PVC凝胶驱动器性能的影响机制,选取了具有显著体积差异的五种离子液体([AMIM]BF<sub>4</sub>, [AMIM]NTF<sub>2</sub>, [AMIM]Cl, TBMACl, THTDPCl)作为改性剂。构建了五种离子液体的分子模型,并采用B3LYP泛函结合def-TZVP基组,在Gaussian 16程序中进行几何优化和单点能计算。随后,利用波函数分析程序Multiwfn计算了偶极矩( $\mu$ )以及阳离子与阴离子的分子体积(见表2)<sup>[19]</sup>。此外,基于文献中提出的方法,通过Multiwfn高效地计算了分子的范德华表面静电势分布(ESP),并借助Visual Molecular Dynamics软件进行可视化展

表2 离子液体体积与偶极矩参数

Tab. 2 Volume and dipole moment parameters of ionic liquids

Ionic liquid	$V^+/\text{Å}^3$	$V^-/\text{Å}^3$	$V^-/V^+$	$V/\text{Å}^3$	$\mu/\text{Debye}$
[AMIM]BF <sub>4</sub>	174.41	73.83	0.42	248.24	12.95
[AMIM]NTF <sub>2</sub>	174.41	210.56	1.21	384.97	15.64
[AMIM]Cl	174.41	53.68	0.31	228.09	12.53
TBMACl	350.36	53.68	0.15	404.04	12.06
THTDPCl	801.43	53.68	0.07	855.11	11.39

Notes:  $V^+$  is cation volume;  $V^-$  is anion volume;  $V^-/V^+$  is anion-cation volume ratio;  $V$  is ionic liquid volume;  $\mu$  is dipole moment.

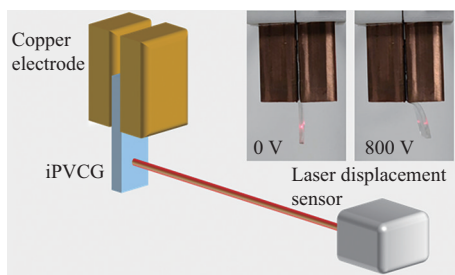


图1 驱动器驱动性能测试示意图

Fig. 1 Schematic diagram of actuator performance characterization

示<sup>[20]</sup>。实验设计包含两种体积变化路径:(1)阳离子主导型体积变化:固定阴离子为 $\text{Cl}^-$  ( $53.68 \text{ \AA}^3$ ),阳离子体积从 $[\text{AMIM}]^+$  ( $174.41 \text{ \AA}^3$ )到 $[\text{TMA}]^+$  ( $350.36 \text{ \AA}^3$ )直至 $[\text{THTDP}]^+$  ( $801.43 \text{ \AA}^3$ ),体积增幅达4.6倍;(2)阴离子主导型体积变化:固定阳离子为 $[\text{AMIM}]^+$  ( $174.41 \text{ \AA}^3$ ),阴离子体积从 $\text{Cl}^-$  ( $53.68 \text{ \AA}^3$ )到 $\text{BF}_4^-$  ( $73.83 \text{ \AA}^3$ )直至 $[\text{NTf}_2]^-$  ( $210.56 \text{ \AA}^3$ ),其中 $[\text{NTf}_2]^-$ 体积为 $\text{Cl}^-$ 的3.9倍。

图2为离子液体的静电势图,如图2所示,离子液体改性PVC凝胶体系中, $[\text{AMIM}]\text{BF}_4$ , $[\text{AMIM}]\text{NTf}_2$ , $[\text{AMIM}]\text{Cl}$ , $\text{TBMACl}$ 和 $\text{THTDPCl}$ 的偶极矩分别为12.95,15.64,12.53,12.06,11.39 Debye,其中 $[\text{AMIM}]\text{NTf}_2$ 以15.64 Debye表现出最高极性。这些偶极矩源于阴阳离子尺寸差异导致的电荷分布不对称性,例如 $[\text{AMIM}]\text{NTf}_2$ 阴阳离子体积比达1.21,正负电荷中心显著分离形成强偶极矩。当此类高偶极矩离子液体(如15.64 Debye的 $[\text{AMIM}]\text{NTf}_2$ )添加到PVC凝胶后,其极性基团在电场作用下发生高效取向极化,直接贡献额外的分子级极化响应;这种机制使离子凝胶的介电特性获得本质性提升。

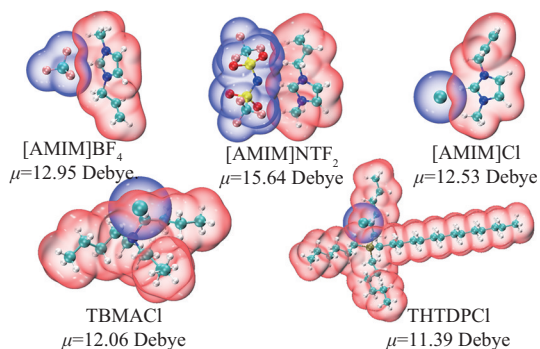
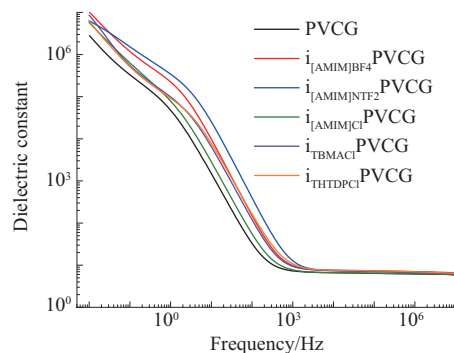


图2 离子液体的静电势图

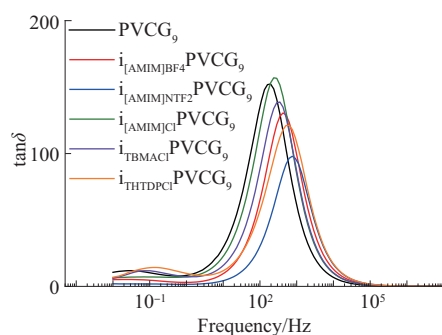
Fig. 2 Electrostatic potential map of ionic liquids

## 2.2 PVCG和iPVCG的介电特性

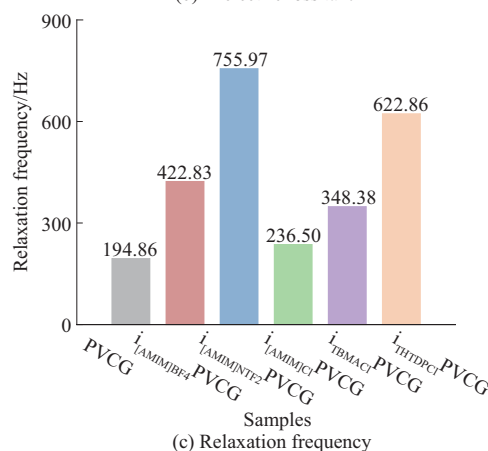
介电性能能够反应材料储存和损耗电荷的能力,对于PVCG驱动器来说非常重要。图3展示了PVCG和iPVCG的介电常数和介电损耗正切值( $\tan\delta$ )随频率的变化,以及根据 $\tan\delta$ 峰的频率计算得到的介电弛豫时间。在凝胶状态下,PVC链之间充斥着大量的增塑剂分子,PVC链和增塑剂在电场作用下很容易产生取向极化,因此,PVCG通常展现出非常高的介电常数,以及非常高的 $\tan\delta$ 。离子液体作为一种极性小分子,加入PVCG后能够在取向极化和离子极化上作出贡献,使PVCG的介电常数提



(a) Dielectric constant



(b) Dielectric loss  $\tan\delta$



(c) Relaxation frequency

图3 PVCG和添加不同离子液体的iPVCG的介电性能

Fig. 3 Dielectric properties of PVCG and iPVCG with different ionic liquids

升。在1 000 Hz处,PVCG的介电常数为29.29,添加离子液体后形成的 $i_{[\text{AMIM}]\text{BF}_4}\text{PVCG}$ , $i_{[\text{AMIM}]\text{NTf}_2}\text{PVCG}$ , $i_{[\text{AMIM}]\text{Cl}}\text{PVCG}$ , $i_{\text{TBMACl}}\text{PVCG}$ 和 $i_{\text{THTDPCl}}\text{PVCG}$ 的介电常数则分别为128.61,340.08,48.59,103.68和142.42。在所有这些iPVCG中, $i_{[\text{AMIM}]\text{NTf}_2}\text{PVCG}$ 340.08的介电常数(1 000 Hz)最为突出,这与其阳离子 $[\text{AMIM}]^+$ 和阴离子 $\text{NTf}_2^-$ 所形成的强偶极矩(15.64 Debye)密切相关。在电场作用下,具有高固有偶极矩的 $[\text{AMIM}]\text{NTf}_2$ 分子,其自身的极化能力更强。当电场方向改变时,偶极子能够更有效地沿电场方向进行排列,直接为整个材料体系贡献了远超其他离子

液体的极化响应。这是  $i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$  PVCG 介电常数获得大幅提升的本质原因。

PVCG 和 iPVCg 的  $\tan\delta$  随频率变化的曲线会出现一个峰值,并且在  $<10^5$  Hz 频率范围内  $\tan\delta > 1$ 。  $\tan\delta > 1$  表明凝胶体系表现出类导体行为而非典型电介质。有研究也表明 PVCG 和 iPVCg 在电刺激过程中会有电流通过凝胶内部<sup>[21-22]</sup>。事实上,离子液体的含量是调控此类离子导体电学性能的核心参数之一。在前期的研究中已证实:随着离子液体含量的增加,iPVCg 的  $\tan\delta$  和泄漏电流均随之逐渐增加<sup>[4]</sup>。因此,在本研究中,为所有 iPVCg 样品选择了同一个优化的、适中的离子液体添加量,在保证良好驱动性能的同时,避免因含量过高导致的泄漏电流过大和电击穿风险。

$\tan\delta$ -频率曲线的峰值对应的频率为小分子增塑剂的偶极弛豫和离子液体的离子弛豫,它反映了分子响应电场极化的能力。频率越低,响应电场极化所需要的时间越长。PVCG 的弛豫频率为 194.86 Hz,添加离子液体后形成的  $i_{[\text{AMIM}]\text{BF}_4}$  PVCG,  $i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$  PVCG,  $i_{[\text{AMIM}]\text{Cl}}$  PVCG,  $i_{\text{TBMACl}}$  PVCG 和  $i_{\text{THTDPCl}}$  PVCG 的弛豫频率分别为 422.83, 755.97, 236.50, 348.38, 622.86 Hz。其中,  $i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$  PVCG 的弛豫频率最高,较纯 PVCG 提升了 288%。所有添加离子液体的样品弛豫频率均高于纯 PVCG (194.86 Hz),表明离子液体通过提供自由离子增强极化响应速度。

### 2.3 PVCG 和 iPVCg 的力学性能

PVC 凝胶驱动器在凝胶的模量更低时更容易在静电力的作用下产生变形响应。离子液体作为软质填料添加到 PVCG 中,会降低其拉伸弹性模量,从而使驱动器更易变形。研究中对所制备的样品进行了单轴拉伸测试,得到了 iPVCg 的应力-应变曲线,并计算了其拉伸弹性模量,如图 4 所示。结果表明,PVCG 的拉伸弹性模量为 11.68 kPa;添加离子液体后形成的  $i_{[\text{AMIM}]\text{BF}_4}$  PVCG,  $i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$  PVCG,  $i_{[\text{AMIM}]\text{Cl}}$  PVCG,  $i_{\text{TBMACl}}$  PVCG 和  $i_{\text{THTDPCl}}$  PVCG 的拉伸弹性模量则分别为 9.87, 10.10, 8.77, 9.79 kPa 和 10.96 kPa。iPVCg 力学性能的衰减程度也受所添加离子液体的总体积影响,即从整体趋势来看,离子液体的体积越大,力学性能下降越不明显。具体而言,PVCG 与  $i_{\text{THTDPCl}}$  PVCG 的拉伸弹性模量非常接近,因为 THTDPCl 的离子体积最大,为  $855.11 \text{ \AA}^3$ ,远大于其他离子液体。这是因为对于相同质量的离子液

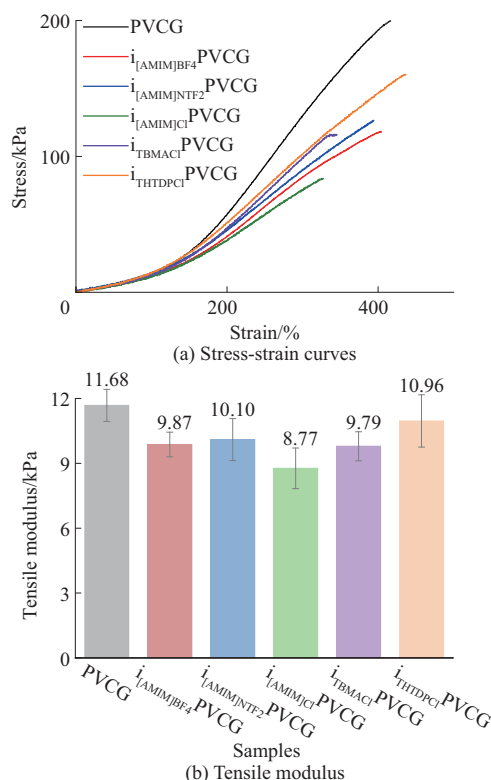


图4 PVCG 和添加不同离子液体的 iPVCg 的力学性能

Fig. 4 Mechanical properties of PVCG and iPVCg with different ionic liquids

体,体积较大的离子液体所含分子数更少,即摩尔数较小。这就意味着 PVC 凝胶内部形成的相分离结构较少,因此对凝胶整体力学性能的影响也较小。

### 2.4 PVCG 和 iPVCg 的电刺激变形响应能力

不同离子液体改性的 PVC 凝胶弯曲驱动器在电场作用下的弯曲位移响应如图 5a 所示。由图 5a 可见,离子液体的引入显著增强了驱动器的驱动性能,所制备的 PVCG 和 iPVCg 的位移排序为:  $i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$  PVCG (3.45 mm)  $>$   $i_{\text{THTDPCl}}$  PVCG (3.07 mm)  $>$   $i_{[\text{AMIM}]\text{BF}_4}$  PVCG (2.86 mm)  $>$   $i_{\text{TBMACl}}$  PVCG (2.74 mm)  $>$   $i_{[\text{AMIM}]\text{Cl}}$  PVCG (2.63 mm)  $>$  PVCG (2.11 mm)。离子液体的引入,从两个方面共同优化了驱动性能。首先,如介电测试结果所示,离子液体显著提升了凝胶的介电常数,这意味着在相同电场下,凝胶内部能积累更多的电荷,产生更大的麦克斯韦应力,这是变形响应的源动力。其次,如表 3 数据所示,离子液体的加入同时降低了凝胶的拉伸弹性模量,使材料在相同应力下更易发生形变。因此,“更强的驱动力”与“更弱的变形阻力”共同导致了所有 iPVCg 驱动器均获得了比 PVCG 更大的弯曲位移。

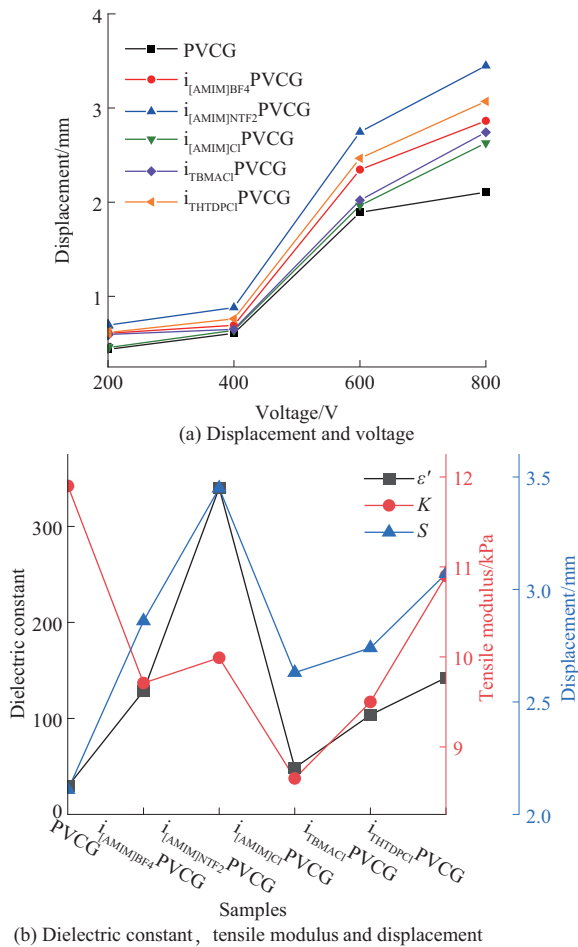


图5 PVCG和添加不同离子液体的iPVCG的机电性能与驱动性能  
Fig. 5 Electromechanical properties and actuation performance of PVCG and iPVCG with different ionic liquids

表3 离子液体改性PVC凝胶的机电特性与驱动性能参数表

Tab. 3 Electromechanical properties and actuation performance of ionic liquid-modified PVC gels

Samples	$\epsilon'$	$\tan\delta$	$f/\text{Hz}$	$K/\text{kPa}$	$S/\text{mm}$
PVCG	29.29	152.29	194.86	11.68	2.11
$i_{[\text{AMIM}]\text{BF}_4}$ PVCG	128.61	130.56	422.83	9.87	2.86
$i_{[\text{AMIM}]\text{NTF}_2}$ PVCG	340.08	97.98	755.97	10.10	3.45
$i_{[\text{AMIM}]\text{Cl}}$ PVCG	48.59	157.02	236.50	8.77	2.63
$i_{\text{TBMACl}}$ PVCG	103.68	138.78	348.38	9.79	2.74
$i_{\text{THTDPCl}}$ PVCG	142.42	121.23	622.86	10.96	3.07

Notes:  $\epsilon'$  is dielectric constant;  $\tan\delta$  is dielectric loss tangent;  $f$  is relaxation frequency;  $K$  is tensile modulus;  $S$  is displacement.

[AMIM]NTF<sub>2</sub>改性凝胶在800 V电压下实现最大位移3.45 mm,较PVCG提升了63.51%(图5a)。i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG能实现峰值位移,源于其在关键参数上达到了最佳平衡。一方面,i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG的介电常数(340.08@1 000 Hz)远高于其他样品,这归因于[AMIM]NTF<sub>2</sub>分子高达15.64 Debye的固有偶极矩,赋予了其最强的取向极化能力,从而在电场下能产

生最大的驱动应力;另一方面,尽管i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG的拉伸弹性模量并非最低,但仍处于相对较低的水平。这表明i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG在获得极高驱动应力的同时,依然保持了良好的易变形性。相比之下,其他iPVCG样品往往只能在介电常数或模量某一项上表现优异,而i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG则实现了两者优势的结合,从而产生了最优的综合驱动性能。

由于离子液体是一种软填料,且对基体凝胶拉伸弹性模量的影响非常小,远远低于对介电性能的影响。添加离子液体后,iPVCG的介电常数增加了1.66~11.61倍,而拉伸弹性模量仅仅降低到了原始值的73%~92%。在图5b中可以看到,iPVCG的介电常数和驱动器位移的变化趋势一致,而拉伸弹性模量与驱动器位移的变化趋势没有明显的关系。以PVCG(介电常数 $\epsilon'$ =29.29,位移 $S$ =2.11 mm)为基准,i<sub>[AMIM]NTF<sub>2</sub></sub>PVCG的介电常数较纯PVCG提升至11.61倍,位移同步提升至1.63倍;i<sub>[AMIM]Cl</sub>PVCG的介电常数提升为纯PVCG的1.66倍,位移同步增至1.25倍,结合图5a可以看出介电常数增幅与位移增幅呈非线性正相关。

### 3 结论

制备了添加五种不同类型离子液体的iPVCG,并将其置于两个铜电极之间得到了向阳极弯曲的iPVCG弯曲驱动器。结合第一性原理计算了离子液体的体积和偶极矩,并分析了iPVCG的力学性能、介电性能和弯曲驱动器的位移,得出以下结论。

(1)对于iPVCG,离子液体的加入贡献了离子极化、取向极化和界面极化,协同作用下能够大幅提升PVCG基体的介电常数。当离子液体的弛豫频率更高时能够在高频下完成极化取向,并更有效地提升基体的介电常数。

(2)离子液体的体积效应对PVCG力学性能衰减具有核心调控作用。当添加大体积离子液体时,如离子体积达855.11 Å<sup>3</sup>的THTDPCl,由于其摩尔浓度较低,在凝胶内部形成的相分离结构显著减少,使模量衰减幅度大幅缩小。如i<sub>THTDPCl</sub>PVCG的拉伸弹性模量为10.96 kPa,与基体PVCG的11.68 kPa极为接近;反之,小体积离子液体如[AMIM]Cl因高浓度相分离结构导致模量出现最大降幅,i<sub>[AMIM]Cl</sub>PVCG的拉伸弹性模量降至8.77 kPa,降幅达24.91%。

(3)添加离子液体的iPVCG,介电常数从原始PVCG的29.29提升至48.59~340.08,拉伸弹性模量

从 11.68 kPa 降低至 8.65~10.90 kPa, 弯曲驱动器的位移从 2.11 mm 增加至 2.63~3.45 mm。显然, 添加离子液体能够提升 PVCg 基体的介电常数, 并降低拉伸弹性模量, 使驱动器的驱动性能显著提升。其中,  $i_{[AMIM]NTF_2}$  PVCg 表现出最优的综合驱动性能(位移达 3.45 mm), 这归因于其同时具备了最高的介电常数(340.08)与相对较低的拉伸弹性模量(10.10 kPa), 从而在电场下能产生更大的麦克斯韦应力, 同时材料也易于发生形变。

### 参考文献

- [1] 王延杰, 徐望舒, 赵春, 等. 聚氯乙烯电活性凝胶材料研究进展[J]. 高分子材料科学与工程, 2020, 36(12):151-157.  
WANG Yanjie, XU Wangshu, ZHAO Chun, et al. Progress of polyvinyl chloride electroactive gel[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2020, 36(12):151-157.
- [2] 潘辉, 何青松, 于敏, 等. PVC gel 材料驱动性能研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版), 2022, 36(11):152-160.  
PAN Hui, HE Qingsong, YU Min, et al. Study on driving performance of PVC gel material[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2022, 36(11):152-160.
- [3] DONG C Y, ZHU Z C, LI Z F, et al. Design of fishtail structure based on oscillating mechanisms using PVC gel actuators[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2022, 341. DOI: 10.1016/j.sna.2022.113588.
- [4] HUANG J J, XIAO H K, LIANG X R, et al. Well-balanced reversible electroadhesion performance in ionic polyvinyl chloride gel *via* integrating with electrostatic and electrochemical adhesion mechanisms[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2025, 17(23): 34 845-34 854.
- [5] LIU C, ZHANG K T. A wearable finger tremor-suppression orthosis using the PVC gel linear actuator[J]. IEEE Robotics and Automation Letters, 2024, 9(4):3 854-3 861.
- [6] TIAN C B, YU M, WU Y W, et al. Dynamic Braille display based on surface-structured PVC gel[J]. Smart Materials and Structures, 2024, 33(3). DOI:10.1088/1361-665X/ad254b.
- [7] UK Y, WOO B. Phthalate-free plasticizer-based polyvinyl chloride gels for electrically focus-tunable microlens applications[J]. Polymer, 2024, 308. DOI:10.1016/j.polymer.2024.127338.
- [8] 俞燕蕾, 谢涛, 刘明杰, 等. 面向软体机器的智能形变高分子材料化学基础[J]. 中国科学基金, 2025, 39(3):389-397.  
YU Yanlei, XIE Tao, LIU Mingjie, et al. Chemical foundation of intelligent shape-changing polymer materials towards soft robots[J]. Bulletin of National Natural Science Foundation of China, 2025, 39(3):389-397.
- [9] 梅龙祥, 郭晓伟, 马丽, 等. IPMC 的材料组成与驱动传感性能研究进展[J]. 复合材料学报, 2024, 41(10):5 202-5 221.  
MEI Longxiang, GUO Xiaowei, MA Li, et al. Research progress on IPMC's material compositions and actuation/sensing properties[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 41(10):5 202-5 221.
- [10] 马丽, 李创, 宋翔宇, 等. 二元复配增塑剂改性聚氨酯介电弹性体的电驱动行为[J]. 复合材料学报, 2025, 42. DOI:10.13801/j.cnki.fhclxb.20241204.002.  
MA Li, LI Chuang, SONG Xiangyu, et al. Effects of binary plasticizers on driving properties of modified polyurethane dielectric elastomer[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2025, 42. DOI: 10.13801/j.cnki.fhclxb.20241204.002.
- [11] ALI I, ALI A, YANG W M, et al. Enhancing the electrostimulation performance of polyvinyl chloride matrix with nanofillers: A comprehensive review[J]. Polymers for Advanced Technologies, 2025, 36(4). DOI:10.1002/pat.70165.
- [12] WU Y W, YU M, TIAN C B, et al. Enhanced performance of electro-responsive PVC gel actuators prepared by advanced rapid thermal melting technique[J]. Sensors and Actuators B:Chemical, 2024, 401. DOI:10.1016/j.snb.2023.134945.
- [13] HIRAI T, XIA H, HIRAI K. The effects of adding ionic liquids to plasticized PVC gel actuators[C]//2010 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. August 4-7, 2010, Xi'an, China. IEEE, 2010:71-76. DOI:10.1109/ICMA.2010.5587920.
- [14] LI B B, LIU Z W, LIU Y D, et al. Effect of ionic liquids on structure and electromechanical properties of plasticized polyvinyl chloride (PVC) gels[J]. Polymer, 2024, 294. DOI: 10.1016/j.polymer.2024.126714.
- [15] TERASAWA N, MONOBE H. High-performance transparent hybrid (ionic and dielectric) gel actuator system based on poly(vinyl chloride)/dibutyl adipate/ionic liquid gels operating at a low applied voltage[J]. Materials Advances, 2024, 5(11):4 715-4 719.
- [16] ALI I, LATIF A, HUSSAIN K, et al. Ionic liquids enhanced performance of PVC gels actuator[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(29). DOI:10.1002/app.50710.
- [17] ASAKA K, HASHIMOTO M. Effect of ionic liquids as additives for improving the performance of plasticized PVC gel actuators[J]. Smart Materials and Structures, 2020, 29(2). DOI: 10.1088/1361-665X/ab5cf6.
- [18] ZHENG B, MAN X K, ANDELMAN D, et al. Enhanced electroactuation in dielectric elastomers: The nonlinear effect of free ions[J]. ACS Macro Letters, 2021, 10(4):498-502.
- [19] ZHANG J, LU T. Efficient evaluation of electrostatic potential with computerized optimized code[J]. Physical Chemistry Chemical Physics, 2021, 23(36):20 323-20 328.
- [20] LU T, CHEN Q X. Van der Waals potential: An important complement to molecular electrostatic potential in studying intermolecular interactions[J]. Journal of Molecular Modeling, 2020, 26(11). DOI:10.1007/s00894-020-04577-0.
- [21] 雷冬, 陆丹. 介电松弛谱法用于高分子链动力学行为的研究[J]. 化学学报, 2018, 76(8):605-616.  
LEI Dong, LU Dan. Dielectric spectroscopy for the study of the dynamic behavior of polymer chains[J]. Acta Chimica Sinica, 2018, 76(8):605-616.
- [22] LIU Z W, LI B B, LIU Y D, et al. Integrated bending actuation and the self-sensing capability of poly(vinyl chloride) gels with ionic liquids[J]. Advanced Functional Materials, 2022, 32(35). DOI:10.1002/adfm.202204259.