引用格式：杜勇，戴小明，袁亚文，等. 三维交联网状结构提升PVDF基聚合物复合电介质薄膜的储能性能[J]. 材料工程，2026，54(7)：330-337.
DU Yong，DAI Xiaoming，YUAN Yawen，et al.3D cross-linked network structure for enhanced energy storage performance in PVDF-based polymer composite dielectric films[J].Journal of Materials Engineering，2026，54(7)：330-337.

三维交联网状结构提升PVDF基聚合物复合电介质薄膜的储能性能

杜 勇[1]，戴小明[2*]，袁亚文[2]，雷炳育[2]，王孟果[2]，谢祖靠[2]
（1 中国船级社广州分社，广州 510235；2 中船黄埔文冲船舶有限公司，广州 510715）

摘要：金属化薄膜电容器因其快速充放电特性而在油电混动汽车、光伏发电、舰载武器等领域受到广泛应用。本工作通过PVDF基聚合物改性、高介电陶瓷填料钛酸锶钡(BST)引入与交联成型制备三维交联网状结构复合电介质薄膜coPVDF/BST，研究了复合电介质材料结构与性能的关系。结果表明，三维交联网状结构有效改善了填料分布均匀性，使得复合薄膜的最高击穿场强提升至424 MV/m，同时显著增强了材料的模量与耐压强度。此外，陶瓷填料的引入明显提高了复合薄膜的介电常数，最终使其储能密度达到10.4 J/cm^3。研究结果有助于为新型金属化薄膜电容器提供设计思路，并为薄膜电容器的发展做出理论贡献。

关键词：三维；交联；网状结构；击穿场强；储能性能；聚偏氟乙烯；复合电介质薄膜
doi：10.11868/j.issn.1001-4381.2024.000262 **CSTR**：32421.14.j.issn.1001-4381.2024.000262
中图分类号：TB33 **文献标识码**：A **文章编号**：1001-4381(2026)07-0330-08

3D cross-linked network structure for enhanced energy storage performance in PVDF-based polymer composite dielectric films

DU Yong[1]，DAI Xiaoming[2*]，YUAN Yawen[2]，LEI Bingyu[2]，WANG Mengguo[2]，XIE Zukao[2]
（1 China Classification Society Guangzhou Branch，Guangzhou 510235，China；
2 CSSC Huangpu Wenchong Shipbuilding Co.，Ltd.，Guangzhou 510715，China）

Abstract：Metalized thin film capacitors find diverse applications in hybrid electric vehicles，photovoltaic power generation，and ship-borne weapons due to their high-rate charge-discharge behavior. Improving the energy density of thin-film dielectric materials is crucial for advancing the electronic power industry. Here，a three-dimensional cross-linked network structure composite dielectric film-coPVDF/BST has been prepared by modifying a PVDF-based polymer，introducing high dielectric ceramic fillers，and cross-linking molding. The results demonstrate that the 3D cross-linked network structure effectively improves filler distribution uniformity，leading to a maximum breakdown strength of 424 MV/m and an enhancement in the modulus. Furthermore，the incorporation of ceramic fillers substantially increases the dielectric constant，resulting in an energy storage density of 10.4 J/cm^3. This study provides design ideas for new metallized film capacitors and establishes a theoretical basis for the development of thin-film capacitors.

Key words：3D；cross-link；network structure；breakdown strength；energy storage property；polyvinylidene fluoride；composite dielectric film

随着全球能源需求的不断增长和可再生能源利用的快速发展，高性能储能设备的需求日益迫切。金属化薄膜电容器作为一种具有快速充放电特性的能量存储与释放器件，广泛应用于油电混动汽车、光伏发电、舰载武器等领域的电子电力设备中[1-4]。目前最常见的薄膜电介质双向拉伸聚丙烯(BOPP)，其具有低介电常数(ε_r)且在高达600 MV/m的击穿场强(E_b)下仍只有2.2 J/cm^{3}的储能密度(U_e)[5-6]，严重限制这类

设备的集成化与小型化，因此亟须提升电介质薄膜的U_e。

由电介质材料储能密度公式$U_e=0.5\varepsilon_0\varepsilon_r E_b^2$可知，高$U_e$需要高的$\varepsilon_r$与$E_b$[7-10]，近年来研究人员提出了一系列改性方法，如添加纳米填料、掺杂功能化基团等[11-14]。常见的是将超高介电常数的陶瓷如BTO，PZT、CCTO等填充聚合物基体中，在其逾渗理论填充量附近时可将聚合物ε_r提升至近百，但这会严重降低其机械强度E_b，进而导致低储能性能[15-17]；引入高绝缘填料如BN、MMT等虽然可以增强基体的E_b，但是低ε_r填料会降低聚合物ε_r，无法显著提升其储能密度[18-21]。因此，寻找一种新的改性方法来提高薄膜的储能性能具有重要意义。

为了解决上述问题，本工作提出了一种基于三维交联网状结构的PVDF基聚合物复合电介质薄膜。以高E_b商业化原材料聚(偏氟乙烯-三氟氯乙烯)(P(VDF-CTFE))为聚合物基体，经过简单的氢化和消去处理引入双键制备成新型含双键的聚(偏氟乙烯-三氟氯乙烯-三氟乙烯)(P(VDF-CTFE-TrFE-DB))，然后与纳米钛酸锶钡(BST)填料充分混合之后添加交联剂，经过高温热压交联成型之后得到柔性聚合物复合电介质薄膜coPVDF/BST。通过实验数据与仿真模拟研究三维交联网状结构对复合电介质薄膜微观形貌、结晶状态和介电储能性能的影响，结果表明在聚合物基体与填料双高ε_r的基础下，三维交联网状结构能够使填料充分分散于聚合物基体中，显著降低界面缺陷与漏电流，实现复合电介质薄膜机械强度与储能性能的协同优化提升，为PVDF基聚合物薄膜电介质的发展与应用提供重要科技支撑。

1　实验材料与方法

1.1　实验材料

P(VDF-CTFE)，纯度99%，VDF/CTFE=80/20(摩尔比)，购自东莞展阳高分子材料有限公司；四氢呋喃(THF)、四氢铝锂($LiAlH_4$，纯度97%)，均购自上海阿拉丁试剂；三乙胺(TEA)，纯度99%，购自化夏试剂；稀盐酸水溶液，纯度2%，购自山东茂瑞化工；丙酮，购自南京化学试剂。

1.2　制备步骤

1.2.1　P(VDF-CTFE-TrFE-DB)可交联聚合物的制备

通过商业化原材料P(VDF-CTFE)的部分氢化和消去反应合成含双键的基体(P(VDF-CTFE-TrFE-DB)，双键占比为5%左右)，具体实验过程如下。首先，向250 mL圆底烧瓶中加入5.0 g P(VDF-CTFE)，并加入200 mL除过水的THF溶液，充分搅拌待P(VDF-CTFE)全部溶解后，缓慢添加0.22 g强还原剂$LiAlH_4$粉末，继续反应24 h之后得到P(VDF-CTFE-TrFE)/THF混合溶液，随后继续加入4.5 mL的三乙胺溶液，充分搅拌混合在50 ℃条件下反应48 h，最后将反应溶液逐渐滴入500 mL的稀盐酸水溶液中析出絮状聚合物，经过丙酮溶解、离心、去离子水析出、真空45 ℃干燥之后得到目标产物P(VDF-CTFE-TrFE-DB)。

1.2.2　coPVDF/BST复合电介质薄膜的制备

如图1所示，将原始BST粉末与过氧化氢混合之后经过24 h的球磨处理，得到大小均匀、表面羟基化处理的OH-BST纳米颗粒。然后在20 mL的N,N-二甲基甲酰胺(DMF)溶剂中添加2 g P(VDF-CTFE-TrFE-DB)聚合物、0.06 g OH-BST与0.04 g过氧化苯甲酰(BPO)，经过充分搅拌混合之后形成均匀混合溶液，将其流延至10 cm×20 cm的水平玻璃板中，通过刮刀控制溶液的厚度，在经过70 ℃加热2 h充分除去溶剂之后转移至170 ℃的烘箱中加热4 h，最后迅速转移至零度冰水浴中处理，这个过程一方面是为了聚合物基体在BPO与高温作用下充分打开双键进行交联固化，另一方面是淬火抑制重结晶过程，有利于铁电聚合物薄膜机械强度的提升。最终得到柔性聚合物复合电介质薄膜coPVDF/BST-OH(3%，质量分数，下同)，按照该方法制备出BST-OH含量分别为6%、9%、12%、15%的复合薄膜，所有薄膜的厚度控制在20 μm左右。

1.3　测试与表征

电介质薄膜样品的化学组成与晶型结构由红外光谱仪(FT-IR，Nolay20)与X射线衍射仪(XRD，D8 VENTURE/QUEST)测量所得。陶瓷粒子的热失重性能由热重分析仪(PerkinElmer TGA 8000)表征所得。采用透射电子显微镜(TEM，Talos F200x)与场发式扫描电子显微镜(FE-SEM，Zeiss Gemini SEM)观测OH-填料、聚合物基体与复合材料薄膜样品的纵向截面微观形貌。材料的综合性能例如机械强度、击穿场强、介电常数与损耗、*D-E*电滞回线、储能性能等，分别通过万能试验机(WDW-50E)、耐压测试仪(CC2672E)、LCR测试仪(HIOKI WB6500 K)与铁电分析仪(TF Analyzer 2000)表征得到，所有电性能测试在室温下进行。为了增强薄膜样品的导电性，在电性能测试之前将薄膜两面分别通过真空磁控离子溅射仪(ETD-2000 MH)镀上厚度为30 nm圆形金电极。材料电性能的有限元仿真模拟在COMSOL Multi-

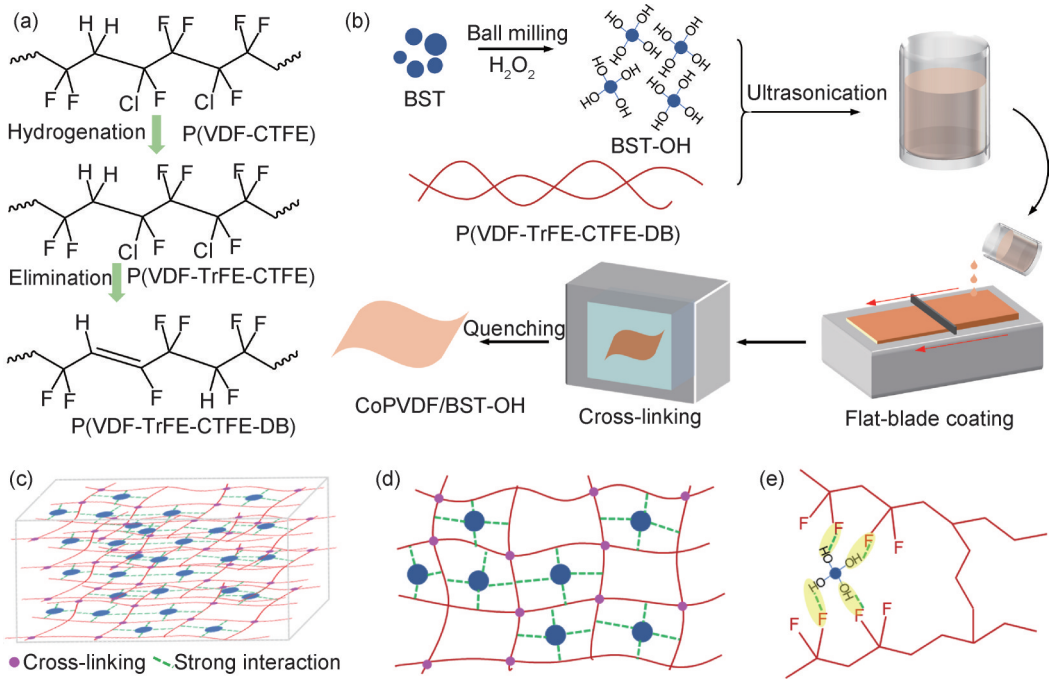


图1 聚合物改性(a),复合膜制备流程(b),三维网状交联结构复合材料结构(c)~(e)的示意图

Fig.1 Schematic representation of polymer modification(a), composite membrane preparation process(b), and 3D cross-linked structural composite structure(c)-(e)

physics 5.5b软件上完成,采用AC/DC电磁场下的二维稳态研究。

2 结果分析与讨论

2.1 BST陶瓷填料结构与形貌

原始BST陶瓷颗粒尺寸较大且分布不均,为了使其能够在聚合物基体中均匀分布且形成稳定的有机/无机界面,需对BST颗粒进行修饰改性。经过过氧化氢混合与球磨处理之后,BST表面附着一定数量的—OH(记作BST-OH)。图2(a)为BST与BST-OH的FT-IR数据对比图,3500 cm^{-1}附近主要为—OH的吸收峰,BST-OH中相对面积大的吸收峰表明—OH改性的成功[22-23]。图2(b)为BST与BST-OH在持续升高的温度下相对质量的对比示意图,BST-OH表面改性物质会在400 ℃高温下分解,所以BST-OH剩余相对质量较小,且两者之间质量差表面BST-OH表面改性剂的质量占总质量的5.5%。BST与BST-OH的微观形貌通过图2(c),(d)分别呈现出来,可以观察到BST的尺寸大多分布在500 nm~2 μm之间,而经过球磨处理之后BST-OH的尺寸大多为50~100 nm之间,且相对集中,小尺寸纳米填料能够在聚合物基体中形成纳米尺寸效应,有利于复合材料综合性能的提升[24]。

2.2 coPVDF/BST复合薄膜的组成结构与形貌分析

聚合物基体及其三维网状交联复合材料薄膜的组成结构与微观形貌通过XRD和SEM进行表征。图3(a)为coPVDF聚合物基体与一系列复合材料不同BST-OH陶瓷填料的XRD图,可以观察到所有薄膜样品均在2θ=20.1°、26.9°处出现典型的衍射峰,这对应于PVDF基聚合物的α晶型,随着BST含量的增加[25],在2θ=32.3°(110)、39.2°(111)、45.1°(200)、50.2°(210)处的衍射峰强度逐渐增加,这是典型钙钛矿结构BST陶瓷填料所带来的结果[22],也说明BST-OH纳米陶瓷的引入不会影响coPVDF聚合物基体组成与结构的显著变化。图3(b)~(d)分别为coPVDF聚合物基体、coPVDF/BST-OH(9%)与coPVDF/BST-OH(15%)复合薄膜横截面的微观形貌对比图,聚合物基体显示出典型的均匀结构,在引入9%的BST-OH填料之后,复合材料并未出现聚合物/陶瓷两相界面差异与相分离状态,而且BST-OH皆均匀分散在聚合物基体中,形成均一稳定的界面,这一方面是因为BST-OH经过双氧水球磨处理修饰一层富含—OH的物质,与聚合物有机相相容性好且能形成例如氢键等强相互作用力;另一方面聚合物基体交联网状结构能够有效防止陶瓷填料聚沉,促使均匀复合材料结构的形成。继续增加BST-OH含量会不可避免地出现过量陶瓷填料聚沉,聚合物/陶瓷两相界面相分离严重,不利于薄膜材料绝缘性能的提升。

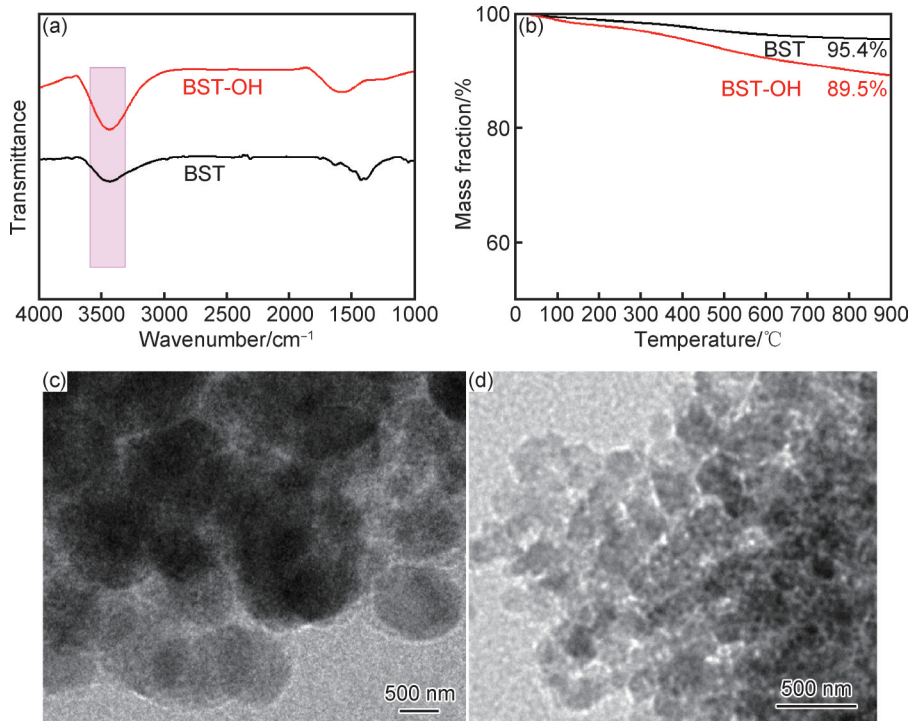


图2　BST陶瓷与BST-OH填料的FT-IR谱(a)，TGA图(b)及SEM图(c)，(d)

Fig.2　FT-IR spectra(a), TGA curves(b), and SEM images(c), (d) of BST and BST-OH fillers

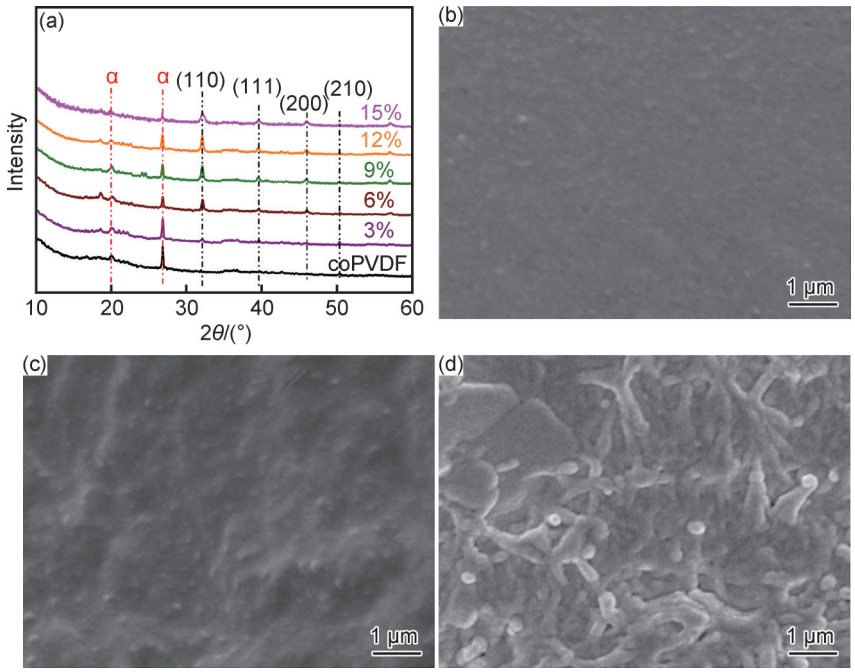


图3　coPVDF/BST-OH复合薄膜的XRD谱(a)及coPVDF聚合物基体(b)、coPVDF/BST-OH(9%)(c)与coPVDF/BST-OH(15%)(d)SEM图

Fig.3　XRD spectra of coPVDF/BST-OH composite film(a), SEM images of coPVDF polymer matrix(b), coPVDF/BST-OH(9%)(c), and coPVDF/BST-OH(15%)(d)

2.3　coPVDF/BST-OH复合薄膜的击穿场强性能

由电介质储能密度公式$U_e=0.5\varepsilon_0\varepsilon_r E_b^2$可以发现$U_e$与$E_b^2$成正比关系，所以增强$E_b$能够显著提升材料的储能密度。图4(a)是coPVDF聚合物基体及其三维网状交联结构复合材料薄膜coPVDF/BST-OH击穿场强的Weibull分布图，所有薄膜的击穿场强均分布在较窄的范围内，这表明实验所测的E_b值准确性高。原始coPVDF聚合物基体的E_b值为270 MV/m，在经

过交联和引入表面富含—OH和BST-OH陶瓷填料之后形成均一稳定的复合结构体系，复合材料E_b随BST-OH的增加而升高，在9%时coPVDF/BST-OH复合薄膜的E_b值达到最高为424 MV/m。继续添加BST-OH之后复合薄膜的耐击穿性能开始下降，这是因为过多的BST-OH会破坏三维交联网状结构，并且会带来过多的界面缺陷，导致载流子迁移与漏电流剧增，最终致使E_b值降低。研究发现聚合物基复合电介质薄膜一般都遵循Stark-Garton模型，即其E_b与杨氏模量Y满足关系：$E_b=0.6[Y/(\varepsilon_0\varepsilon_r)]^{0.5}$，可以看出$E_b$与$Y$呈正相关[26]。图4(b)为实验测得所有样品的杨氏模量Y与击穿场强E_b的关系对比图，可以发现聚合物及复合电介质材料E_b与Y的变化规律相似，在9%的BST-OH填充含量时，coPVDF/BST-OH复合薄膜的E_b与Y均达到最大值，这也是三维交联网状结构提升材料机械强度的结果。

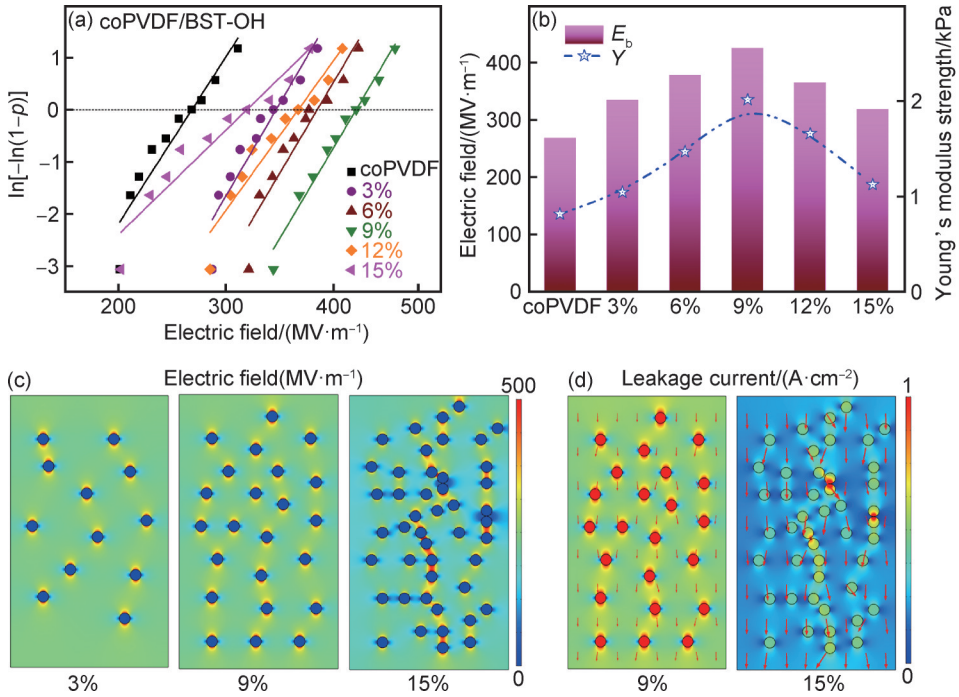


图4 coPVDF/BST-OH复合薄膜的击穿场强(a)与杨氏模量(b)的对比关系及不同BST-OH复合材料的相场模拟图(c)，(d)

Fig.4 coPVDF/BST-OH composite films with E_b(a) *versus* Young's modulus(b), and phase field simulations of different BST-OH composites(c), (d)

为了进一步揭示BST-OH含量在提升复合材料薄膜耐击穿性能方面的机理，图4(c)，(d)为在COMSOL软件中有限元模拟出的不同BST-OH含量复合电介质的相场模拟图，材料与复合材料结构与实验数据保持一致。在电场中，高介电常数的BST-OH填料承担更低的电场强度而显示出蓝色调，而coPVDF基体刚好相反，因为两者介电常数的差异，电场在聚合物/填料界面处突变而出现电场畸变现象，过多的电场畸变会增大漏电流并形成击穿通道，最终导致复合电介质材料过早的击穿。在BST-OH含量超过9%之后，模拟发现复合材料中漏电流剧增并形成偏红色的电场通道，这会导致E_b的降低，模拟结果与实验数据保持一致。

2.4 coPVDF/BST复合薄膜的介电性能

图5为coPVDF聚合物基体及其三维网状交联复合材料薄膜coPVDF/BST-OH的介电性能与频率的关系图。如图5(a)所示，所有电介质薄膜的介电常数(ε_r)均随着频率的升高而降低，这与PVDF基聚合物的变化规律相同。高ε_r的BST-OH陶瓷填料的填充会显著增强复合薄膜材料的ε_r，提升幅度与填料含量成正比，例如9%的BST-OH可以将1 kHz时ε_r从10.7提升至15.3，这与高介电常数陶瓷填料复合材料的串并联模型预期的结果一致[23]。图5(b)表明了coPVDF与coPVDF/BST-OH的介电损耗($\tan\delta$)随频率变化的关系，聚合物复合材料的$\tan\delta$主要源自于低频率($\approx10^2$ Hz)区的离子电导、界面极化和高频率($\approx10^6$ Hz)区的介电弛豫作用。与聚合物基体coPVDF相比，引入本征$\tan\delta$更大的BST填料则导致聚合物复合材料的$\tan\delta$升高。低含量(<9%)的BST-OH由于可以与交联聚合物基体形成均一稳定的三维网状交联结构，能够有效抑制电场中载流子迁移，使$\tan\delta$的增加并不明显，继续增加填料含量时，增强的界面极化占据主导地位，复合材料的$\tan\delta$又会增加，不利于复合材料介电储能性能的提升。

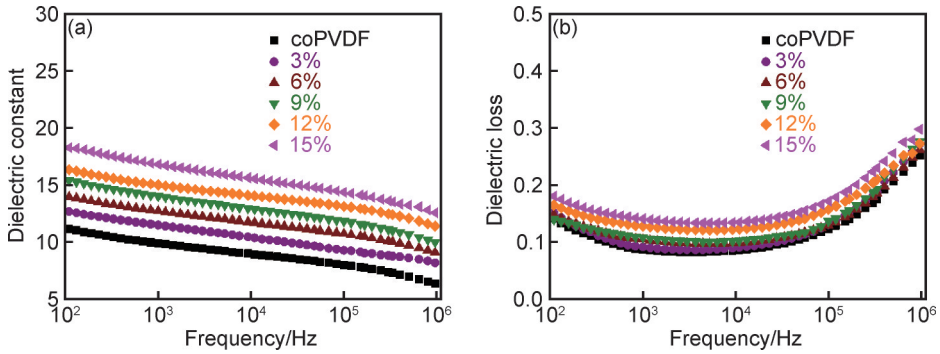


图 5　coPVDF/BST-OH 复合薄膜的介电常数(a)与介电损耗(b)图

Fig.5　Dielectric constant(a) and dielectric loss(b) plots of coPVDF/BST-OH composite films

2.5　coPVDF/BST-OH 复合薄膜的储能性能

前期结果发现 coPVDF/BST-OH(9%)具有最高的击穿场强 E_b 与较高的介电常数 ε_r，说明它会具有最高的储能密度。为了探究 coPVDF/BST-OH 复合电介质薄膜的储能性能，对聚合物基体 coPVDF 与 coPVDF/BST-OH(9%)的电滞回线进行了表征，如图 6(a)，(b)所示是两者的电滞回线(D-E)图，可以观察到复合材料与 PVDF 基体一样均呈经典弛豫铁电的 D-E 图，但是一方面 BST-OH 的引入能够提升介电常数 ε_r 与击穿场强 E_b，coPVDF/BST-OH(9%)显示较高的最大极化值(P_{max})；另一方面三维网状交联复合结构能够形成均一稳定状态，有效限制聚合物基体中铁电弛豫现象，进而降低其剩余极化值(P_r)，因此可以在图 6(c)中显示高达 10.4 J/cm³ 的储能密度，相较于原始聚合物基体(3.9 J/cm³)提升了 167%。图 6(d)为 BST 陶瓷、coPVDF 聚合物基体与 coPVDF/BST-OH 复合电介质薄膜的综合介电性能对比图，图形面积越大代表该性能越优，可以发现 BST 陶瓷的 ε_r 高而 E_b 低，而聚合物刚好相反，通过聚合物改性与填料制备得到三维网状交联聚合物复合结构，能够显著提升其介电储能性能。

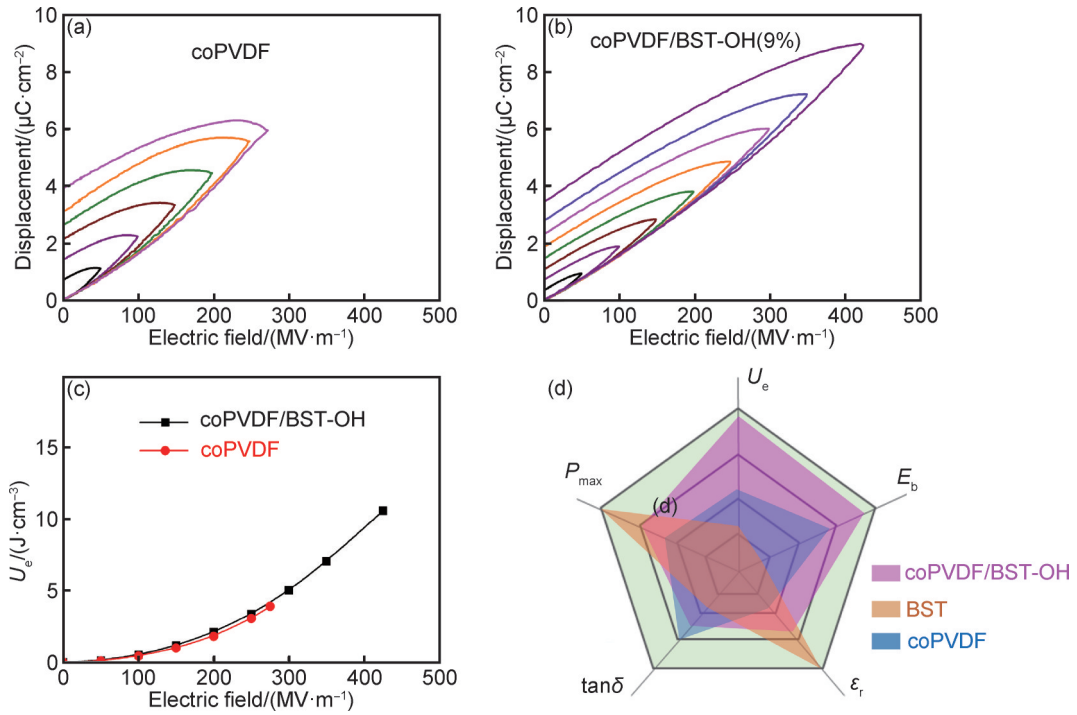


图 6　coPVDF 与 coPVDF/BST-OH(9%)的电滞回线(a)，(b)与储能密度(c)图及其综合介电储能性能雷达图(d)

Fig.6　Plots of electrical hysteresis lines(a), (b) and energy storage density(c) of coPVDF and coPVDF/BST-OH(9%), and their Radar chart of comprehensive dielectric energy storage performance(d)

3　结论

(1)通过改性 PVDF 基聚合物、引入高介电陶瓷 BST-OH 填料与交联成型成功制备了复合电介质薄膜 coPVDF/BST-OH，该薄膜呈现三维交联网状结构，BST-OH 皆均匀分散在聚合物基体中，形成均一

稳定的界面。

(2)结合实验测试与仿真模拟发现,聚合物基体交联网状结构能够有效防止陶瓷填料聚沉,改善陶瓷填料分散的均匀性,进一步促使形成均匀复合材料结构,提升复合薄膜的机械强度与绝缘性能。

(3)复合薄膜 coPVDF/BST-OH 在 9% 的 BST-OH 含量下,其储能性能较优,ε_r=15.3、E_b=424 MV/m、U_e=10.4 J/cm^3。

参考文献

[1] 张源朔,闵道敏,高梓巍,等.聚丙烯纳米复合电介质的陷阱分布特性与储能性能提升研究[J].电气技术,2023,24(9):11-19.
ZHANG Y S,MIN D M,GAO Z W,et al.Study on trap distribution characteristics and energy storage performance improvement of polypropylene nanocomposites[J].Electrical Engineering,2023,24(9):11-19.

[2] 张冠军,李文栋,刘哲,等.介电功能梯度材料在电气绝缘领域的研究进展[J].中国电机工程学报,2017,37(14):4232-4245.
ZHANG G J,LI W D,LIU Z,et al.Research progress on dielectric functionally graded materials for electrical insulation[J].Proceedings of the CSEE,2017,37(14):4232-4245.

[3] 刘文凤,刘标,程璐.高储能聚合物电介质材料研究进展[J].高电压技术,2023,49(3):1046-1054.
LIU W F,LIU B,CHENG L.Research progress of high energy storage dielectric polymer materials[J].High Voltage Engineering,2023,49(3):1046-1054.

[4] 查俊伟,黄文杰,杨兴,等.本征耐高温电极化储能聚合物电介质研究进展[J].高电压技术,2023,49(3):1055-1066.
ZHA J W,HUANG W J,YANG X,et al.Research progress of intrinsic high temperature polymer dielectrics with high energy storage by electric polarization[J].High Voltage Engineering,2023,49(3):1055-1066.

[5] 巩艺.高储能密度BOPP基复合介电薄膜的制备及性能研究[D].北京:北京化工大学,2023.
GONG Y.Preparation and properties of BOPP-based composite dielectric films with high energy density[D].Beijing:Beijing University of Chemical Technology,2023.

[6] 郑宇锋,江汉红.高压脉冲储能电容器特性分析[J].海军工程大学学报,2016,28(增刊1):44-49.
ZHENG Y F,JIANG H H.Characteristic analysis of high voltage pulse storage capacitor[J].Journal of Naval University of Engineering,2016,28(Suppl 1):44-49.

[7] LUO B C,SHEN Z H,CAI Z M,et al.Superhierarchical inorganic/organic nanocomposites exhibiting simultaneous ultrahigh dielectric energy density and high efficiency[J].Advanced Functional Materials,2021,31(8):2007994.

[8] 谢兵,蔡金峡,王铜铜,等.高储能密度聚合物基多层复合电介质的研究进展[J].无机材料学报,2023,38(2):137-147.
XIE B,CAI J X,WANG T T,et al.Research progress of polymer-based multilayer composite dielectrics with high energy storage density[J].Journal of Inorganic Materials,2023,38(2):137-147.

[9] LI W,LIANG R R,WU C R,et al.Ceramic-polymer nanocomposites design for energy storage capacitor applications[J].Advanced Materials Interfaces,2022,9(32):2201257.

[10] 殷之文.电介质物理学[M].2版.北京:科学出版社,2003.
YIN Z W.Dielectric physics[M].2nd ed.Beijing:Science Press,2003.

[11] 张子琦,程璐,刘文凤.核-壳结构纳米复合电介质储能特性研究进展[J].绝缘材料,2022,55(5):1-9.
ZHANG Z Q,CHENG L,LIU W F.Progress on energy storage characteristics of nanocomposite dielectrics with core-shell structure[J].Insulating Materials,2022,55(5):1-9.

[12] 查俊伟,郑明胜,党智敏.铁电聚合物基纳米复合电介质储能材料研究进展[J].高电压技术,2017,43(7):2194-2203.
ZHA J W,ZHENG M S,DANG Z M.Research progress of ferroelectric polymer-based composites with high energy density[J].High Voltage Engineering,2017,43(7):2194-2203.

[13] TONG Y Z,LI C N,WEI C,et al.Achieving low dielectric loss and high energy density of polyimide composite dielectric film:inhibiting the formation of conductive path in both macro-microscales[J].Journal of Materials Science,2022,57(14):7225-7238.

[14] 段广宇,胡凤英,吴齐,等.柔性PMIA复合电介质的制备及其储能特性[J].精细化工,2023,40(7):1447-1453.
DUAN G Y,HU F Y,WU Q,et al.Preparation and energy storage performance of flexible poly(m-phenyleneisophthalamide) dielectric composites[J].Fine Chemicals,2023,40(7):1447-1453.

[15] SARKARAT M,RAJAGOPALAN R,ZHANG S H,et al.Enhanced mechanical stability of high temperature ultra-thin glass/polymer composite dielectrics[J].Materials Letters,2017,208:10-13.

[16] 丁嘉乐.耐高温聚合物基全有机复合电介质的制备及高温储能性能研究[D].长春:吉林大学,2023.
DING J L.Preparation of high temperature resistant polymer-based all-organic composite dielectric and its high temperature energy storage performance[D].Changchun:Jilin University,2023.

[17] GUO M F,JIANG J Y,SHEN Z H,et al.High-energy-density ferroelectric polymer nanocomposites for capacitive energy storage:enhanced breakdown strength and improved discharge efficiency[J].Materials Today,2019,29:49-67.

[18] 朱金麟,钱璐洁,朱杰.纳米复合电介质材料的研究进展[J].胶体与聚合物,2019,37(2):95-98.
ZHU J L,QIAN L J,ZHU J.Research progress of nanocomposite dielectric materials[J].Chinese Journal of Colloid & Polymer,2019,37(2):95-98.

[19] 张慧,衡婷婷,房正刚,等.高储能陶瓷/聚偏氟乙烯复合电介质的研究进展[J].复合材料学报,2021,38(7):2107-2122.
ZHANG H,HENG T T,FANG Z G,et al.Research progress of high-energy-density ceramic/poly(vinylidene fluoride) composite dielectrics[J].Acta Materiae Compositae Sinica,2021,38(7):2107-2122.

[20] CHEN Q,SHEN Y,ZHANG S H,et al.Polymer-based dielectrics with high energy storage density[J].Annual Review of Materials Research,2015,45:433-458.

[21] 李巍,梁日然,杨玲妮,等.聚合物-陶瓷纳米复合材料在电介质

储能应用中的研究进展[J].材料工程,2023,51(8):12-22.
LI W, LIANG R R, YANG L N, et al. Research progress in polymer-ceramic nanocomposites for dielectric energy storage applications [J]. Journal of Materials Engineering, 2023, 51 (8): 12-22.

[22] 易志辉.BST/PVDF电介质复合材料的结构设计与储能性能研究[D].西安:陕西科技大学,2023.
YI Z H. Structural design and energy storage performance of BST/PVDF dielectric composite materials [D]. Xi'an: Shaanxi University of Science & Technology, 2023.

[23] WANG J, XIE Y C, LIU J J, et al. Towards high efficient nanodielectrics from linear ferroelectric P(VDF-TrFE-CTFE)-g-PMMA matrix and exfoliated mica nanosheets [J]. Applied Surface Science, 2019, 469: 437-445.

[24] 黄子钦,李化,林福昌,等.聚合物薄膜储电性能研究[J].电力电子技术,2021,55(10):15-18.
HUANG Z Q, LI H, LIN F C, et al. Study on the electrical storage performance of polymer film [J]. Power Electronics, 2021, 55 (10): 15-18.

[25] 胡进.聚偏氟乙烯基纳米复合电介质的制备及储能性能研究[D].大连:大连理工大学,2022.
HU J. Preparation and energy storage properties of poly(vinylidene fluoride)-based nanocomposite dielectrics [D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2022.

[26] 朱荧科.聚偏氟乙烯基聚合物电介质及新型多层结构介电复合材料的制备与性能研究[D].上海:上海交通大学,2020.
ZHU Y K. Preparation and properties of poly(vinylidene fluoride)-based polymer dielectrics and novel layered dielectric composites [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2020.

收稿日期:2024-04-11;**录用日期**:2024-06-23

通讯作者:戴小明(1982—),男,高级工程师,主要从事船舶工艺技术研究,联系地址:广东省广州市黄埔区长洲社区长洲街188号中船黄埔文冲船舶有限公司(510715),E-mail:daixm180@163.com

(本文责编:齐　新)