

## • 工艺技术 Technology •

DOI: 10.16410/j.issn1000-8365.2026.5240

## 制备工艺对 STTO/PVDF 复合材料结构及性能的影响

倪磊<sup>1</sup>, 马莹莹<sup>1</sup>, 常蓉<sup>1</sup>, 孟瑞希<sup>1</sup>, 林培鑫<sup>1</sup>, 钟宏<sup>2</sup>

(1. 长安大学材料科学与工程学院, 陕西西安 710018 2. 西北工业大学凝固技术全国重点实验室, 陕西西安 710072)

**摘要:** 为满足微电子领域对高性能柔性介电材料的需求, 以 $(\text{Sm}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.04}\text{Ti}_{0.96}\text{O}_2$  (STTO) 巨介电常数陶瓷为填料, 聚偏氟乙烯(PVDF)为基体, 通过热压法和流延法分别制备 STTO/PVDF 复合材料, 系统探索了制备工艺与材料组成对复合材料介电性能的协同调控作用。热压法制备的材料 PVDF 以  $\alpha$  相为主, 而流延法则形成  $\alpha$  与  $\beta$  两相共存结构。随着 STTO 含量增加, 两种材料均出现填料团聚与界面缺陷加剧的现象, 但流延法制备的样品展现出更优的致密性。在电学性能方面, 流延法制备的复合材料具有更高的击穿场强(235.3~97.7 kV/mm), 而热压法则在介电性能方面表现更佳, 可获得更高的介电常数(10.0~60.4)和更低的介电损耗(0.02~0.26)。本研究明确了两种制备工艺的优势特征, 热压法适用于高介电性能要求的应用场景, 流延法则更适合高击穿场强需求的领域。

**关键词:** STTO/PVDF 复合材料; 热压法; 流延法

中图分类号: TB33; TM22

文献标识码: A

文章编号: 1000-8365(2026)07-0814-07

## Effect of the Preparation Process on the Structure and Properties of the STTO/PVDF Composites

NI Lei<sup>1</sup>, MA Yingying<sup>1</sup>, CHANG Rong<sup>1</sup>, MENG Ruixi<sup>1</sup>, LIN Yuxin<sup>1</sup>, ZHONG Hong<sup>2</sup>

(1. School of Materials Science and Engineering, Chang'an University, Xi'an 710018, China; 2. State Key Laboratory of Solidification Processing, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

**Abstract:** To meet the demand for high-performance flexible dielectric materials in microelectronics, giant-dielectric  $(\text{Sm}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.04}\text{Ti}_{0.96}\text{O}_2$  (STTO) ceramics were employed as fillers, and polyvinylidene fluoride (PVDF) was used as the polymer matrix. STTO/PVDF composites with varying filler volume fractions were prepared via hot-pressing and tape-casting routes, with the aim of systematically investigating the synergistic effects of processing methods and material composition on the microstructure and dielectric properties of the composites. The hot-pressed composites predominantly contained  $\alpha$ -phase PVDF, whereas the tape-cast samples contained both  $\alpha$ - and  $\beta$ -phase crystals. With increasing STTO content, both types of composites display aggravated filler agglomeration and interfacial defects; however, the tape-cast samples demonstrate superior microstructural densification. The tape-cast composites achieve a relatively high breakdown strength, ranging from 235.3 kV/mm to 97.7 kV/mm, whereas the hot-pressed composites exhibit superior dielectric performance, with a higher dielectric constant(10.0~60.4) and lower dielectric loss (0.02~0.26). This work clarifies the distinct advantages of these two processing routes: hot pressing is more suitable for applications requiring high permittivity, whereas tape casting is preferable for insulation-critical scenarios requiring high breakdown strength.

**Key words:** STTO/PVDF composite materials; hot pressing method; casting method

随着能源需求的显著增长和微电子技术的迅猛发展, 电能存储技术面临着更严苛的性能要求。

在众多储能器件中, 聚合物介质电容器凭借其高充放电效率和优异储能密度, 能够满足电子设备小型

收稿日期: 2025-11-04

基金项目: 凝固技术全国重点实验室开放课题(SKLS202416)

作者简介: 倪磊, 1982 年生, 博士, 副教授。研究方向为功能材料合成与性能。Email: nilei@chd.edu.cn

通信作者: 钟宏, 1983 年生, 博士, 副教授。研究方向为金属凝固理论、定向凝固技术及精密铸造技术。

Email: zhonghong123@nwpu.edu.cn

引用格式: 倪磊, 马莹莹, 常蓉, 孟瑞希, 林培鑫, 钟宏. 制备工艺对 STTO/PVDF 复合材料结构及性能的影响[J]. 铸造技术, 2026, 47(7): 814-820.

NI L, MA Y Y, CHANG R, MENG R X, LIN Y X, ZHONG H. Effect of the preparation process on the structure and properties of the STTO/PVDF composites[J]. Foundry Technology, 2026, 47(7): 814-820.

化、轻量化和高电压等要求,因而在电力系统、便携式电子设备及混合动力汽车等领域得到广泛应用<sup>[1-2]</sup>。然而,聚合物介电材料较低的介电常数( $<10$ )<sup>[3]</sup>,限制了储能密度的提升,难以满足先进电子器件的发展需求。

大量研究表明,将高介电常数的陶瓷填料(如  $\text{BaTiO}_3$ 、 $\text{Li}_{0.3}\text{Cr}_{0.1}\text{Ni}_{0.6}\text{O}$ 、 $\text{CaCu}_3\text{Ti}_4\text{O}_{12}$  等)引入聚合物基体内,借助两相协同效应,是获得高介电常数、低介电损耗和易加工介电材料的有效途径<sup>[4-6]</sup>。此类两相复合材料不仅结合了陶瓷填料的高介电常数和聚合物基体的高击穿场强和低介电损耗优势,还保留了良好的机械强度和柔韧性<sup>[3]</sup>。常见的聚合物基体包括环氧树脂、聚酰亚胺、聚丙烯、聚甲基丙烯酸甲酯、聚二甲基硅氧烷、聚偏氟乙烯(PVDF)等。其中, PVDF 因其较高的介电常数,低介电损耗,优异的热稳定性以及易于熔融加工等特点,成为陶瓷/聚合物复合材料的理想基体。尤其是 PVDF 的  $\beta$  相具有极性结晶结构,其 C-F 和 C-H 键的有效偶极矩强,表现出较高的自发极化强度,有助于实现更高的压电响应和介电常数,是获得高介电性能的关键。例如, Khumpaitool 等<sup>[7]</sup>采用机械混合和热压工艺制备了  $\text{Li}_{0.3}\text{Cr}_{0.1}\text{Ni}_{0.6}\text{O}$  (LCNO)/PVDF 复合材料,含量为 30% (质量分数)LCNO 的复合材料在 1 kHz 下介电常数为 59.27,是 PVDF 的 6 倍。Patel 等<sup>[8]</sup>报道了 CCTO/PVDF 复合薄膜,当 CCTO 的体积分数达到 60% 时,复合薄膜在 1 kHz 下的介电常数高达 152,同时介电损耗保持在较低水平约为 0.06。2022 年,Shan 等<sup>[9]</sup>利用有限元模拟法建立了线形和球形两种模型对  $\text{TiO}_2$ /PVDF 复合材料的介电性能进行模拟,当  $\text{TiO}_2$  的掺杂量为 5% (体积分数) 时,仿真结果表明线形  $\text{TiO}_2$ /PVDF 复合材料的电场强度,漏电流密度和体系的能量密度均匀,该体系的材料具有更高的耐击穿能力。2025 年,Chen 等<sup>[10]</sup>通过密度泛函理论和分子动力学模拟研究了界面应变  $\text{TiO}_2$ /PVDF 复合材料极性界面的形成,研究发现  $\text{TiO}_2$ /PVDF 界面因晶格失配造成 -2.2% 压缩应变,促进非极性  $\alpha$  相向  $\beta$  相转变,此应变工程使复合材料介电常数从 15 提升至 45,击穿场强高达 600 MV/m。本课题组前期研究了 Sm 和 Ta 共掺杂的  $(\text{Sm}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.04}\text{Ti}_{0.96}\text{O}_2$  (STTO) 巨介电常数陶瓷<sup>[11]</sup>,在室温 1 kHz 具有高介电常数 ( $1.6\times 10^5$ ) 与优异的温度稳定性。

目前,以 STTO 增强 PVDF 聚合物复合材料的相关研究较少,并且复合材料的性能受制备工艺、材料组成等多种因素影响。因此,本文以 STTO 巨介电常数陶瓷粉体为填料,PVDF 为基体,分别采用

热压法和流延法制备 STTO/PVDF 复合材料,系统探索制备工艺、材料组成对复合材料介电性能的协同调控作用,为高性能介电材料的设计与应用提供可行策略。

## 1 实验材料与方法

### 1.1 STTO 粉末制备

采用固相反应法制备  $(\text{Sm}_{0.5}\text{Ta}_{0.5})_{0.04}\text{Ti}_{0.96}\text{O}_2$  (STTO) 填料,根据化学计量比精确称量  $\text{TiO}_2$  (99.99%, 质量分数,下同)、 $\text{Ta}_2\text{O}_5$  (99.99%)、 $\text{Sm}_2\text{O}_3$  (99.99%) 原料。用乙醇球磨 8 h,将混合均匀的浆料放入温度为 1 100  $^{\circ}\text{C}$  的马弗炉煅烧 3 h 得到金红石相的 STTO 粉末。

### 1.2 STTO/PVDF 复合材料的制备

采用热压法制备 STTO/PVDF 复合块体。称取不同体积分数的 STTO (0%、10%、20%、30%、40%、50%) 和 PVDF 研磨均匀后,取适量混合粉末铺于热压机模具中,热压温度为 150  $^{\circ}\text{C}$ ,时间 20 min,得到直径为 12 mm,厚度为 0.8 mm 的圆片。

采用流延法制备 STTO/PVDF 复合薄膜。称取不同体积分数的 STTO (0%、10%、20%、30%、40%、50%) 和 PVDF,将 PVDF 和 STTO 粉末加入到适量  $\text{N,N}$ -二甲基甲酰胺(DMF)溶剂中,在 60  $^{\circ}\text{C}$  水浴搅拌 6 h,得到乳白色混合浆料。随后将适量浆料流延在玻璃基板上,置于 70  $^{\circ}\text{C}$  的加热台上,直至 DMF 溶剂完全蒸发,得到复合薄膜。厚度约为 50~80  $\mu\text{m}$ 。

### 1.3 表征

采用 X 射线衍射仪表征分析填料以及复合材料的物相和晶体结构。X 射线发射源为 Cu 靶,X 射线光管的工作电压和电流分别为 40 kV 和 40 mA,  $2\theta$  为  $10^{\circ}$ ~ $80^{\circ}$ 。采用扫描电镜表征分析填料的形貌、复合材料的微观结构。采用透射电镜表征分析改性前后填料的微观结构。复合材料的介电频谱( $20\sim 10^6$  Hz)通过阻抗分析仪获取;其直流击穿场强则通过耐压测试仪(0.1~10 kV)测定,并采用双参数威布尔分布对击穿数据进行了可靠性评估。

## 2 实验结果及讨论

### 2.1 不同制备工艺对 STTO/PVDF 复合材料结构的影响

图 1a 和 b 分别是热压法和流延法制备的  $x\text{STTO/PVDF}$  复合材料( $x=0\%\sim 50\%$ )XRD 谱。可以看出两种制备工艺所得的 PVDF 晶体结构截然不同,热压法制备的 PVDF 只存在  $\alpha$  相,而流延法制备的 PVDF 同时存在  $\alpha$  相和  $\beta$  相。当  $x=0$  时,热压法制备的 PVDF 在  $2\theta=17.7^{\circ}$ 、 $19.9^{\circ}$  和  $26.6^{\circ}$  的衍射峰分别对应  $\alpha$  晶型



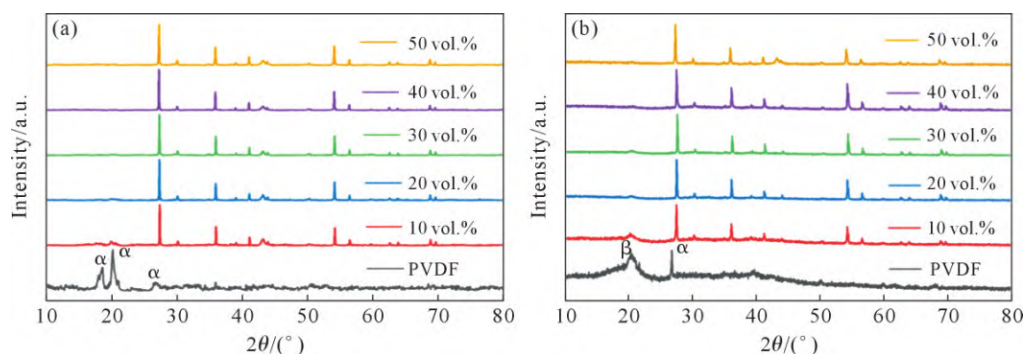


图1  $x$ STTO/PVDF 复合材料( $x=0\%$ ~ $50\%$ )XRD 谱:(a) 热压法;(b) 流延法

Fig.1 XRD patterns of the  $x$ STTO/PVDF composites ( $x=0$  vol.%~ $50$  vol.%): (a) hot pressing method; (b) casting method

的(100)、(020)和(021)晶面;而流延法制备的 PVDF 在  $2\theta=20.6^\circ$  处的衍射峰对应  $\beta$  晶型的(110)晶面,在  $2\theta=26.8^\circ$  处衍射峰对应  $\alpha$  晶型的(120)晶面<sup>[10]</sup>,这一差异主要源于 PVDF 作为热塑性聚合物,其晶型会因制备条件的不同而发生转变。在流延法制备的复合材料中,随着 STTO 含量增加, $\alpha$  相衍射峰明显减弱,这是由于 STTO 和 PVDF 聚合物的正偶极子( $-\text{CH}_2$ )形成了强偶极相互作用,促使聚合物链以全反式结构排列,诱导了  $\alpha$ - $\beta$  相变<sup>[12-13]</sup>。此外两种工艺制备的复合材料中均发现,PVDF 特征峰强度随 STTO 含量增加而变弱,这归因于 STTO 中较重原子对入射 X 射线的散射比聚合物中较轻原子更强<sup>[14]</sup>。同时,STTO 填料加入破坏了 PVDF 分子链的规整性,降低结晶度,峰强随之降低。

图 2a~e 为热压法制备的复合材料断面照片,STTO 颗粒分散在整个 PVDF 基体中,随着 STTO 含量增加,STTO 和 PVDF 界面数量增多,团聚现

象加剧,界面孔隙增多。从图 3a~e 流延法制备复合材料的表面照片中可见,PVDF 呈现球晶结构,STTO 填料均匀分散在 PVDF 基体中,由于流延法中溶剂蒸发和无机填料的易团聚性,所有样品均存在少量孔洞和填料分布不均现象,且随 STTO 含量增加而加剧。

## 2.2 不同制备工艺对 STTO/PVDF 复合材料性能的影响

图 4 是热压法和流延法制备  $x$ STTO/PVDF( $x=0\sim 50\%$ )复合材料的 Weibull 分布,击穿场强  $E_b$  和形状因子  $\beta$ 。所有复合材料的形状因子均大于 1,表明击穿数据分布集中、离散性小, $E_b$  的可靠性高。图 4b 和 d 显示,流延法制备纯 PVDF 的  $E_b$  值( $235.3$  kV/mm)高于热压法制备纯 PVDF 的  $E_b$  值( $169.0$  kV/mm),且两种工艺下制备的复合材料  $E_b$  值均随 STTO 含量增加而显著下降。 $E_b$  的下降主要归因于高含量 STTO 填料引发的多重界面与结构缺陷。随着填料含

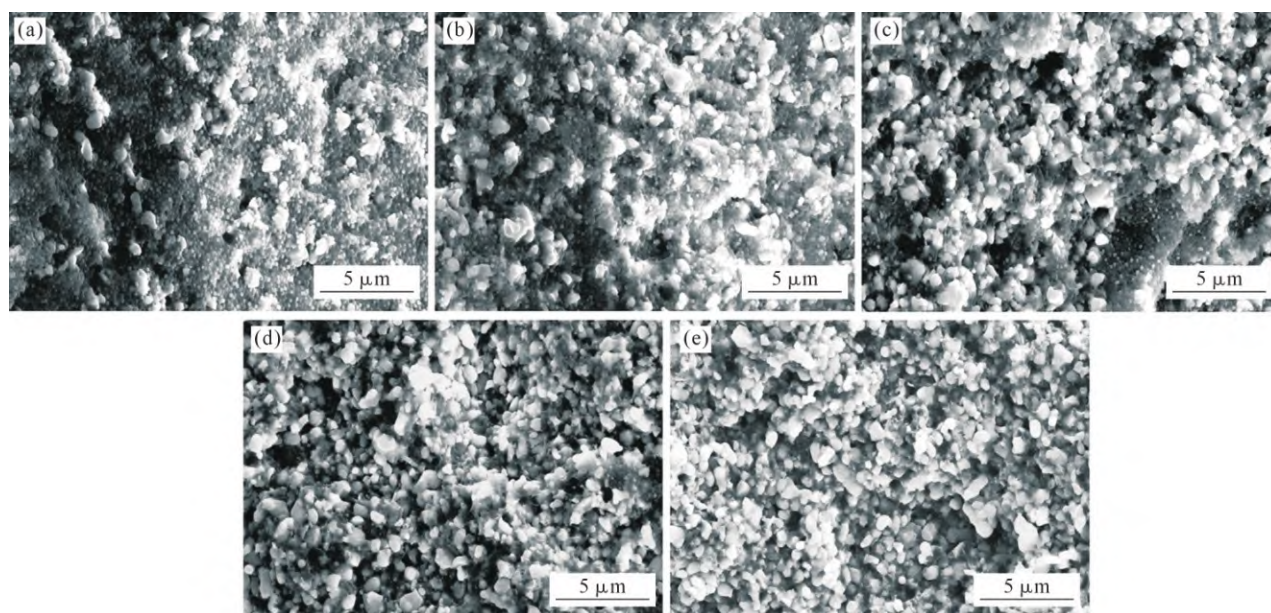


图2  $x$ STTO/PVDF( $x=10\%$ ~ $50\%$ )复合块体断面 SEM 照片:(a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%; (e) 50%

Fig.2 SEM images of the fractured surfaces of the  $x$ STTO/PVDF ( $x=10$  vol.%~ $50$  vol.%) composite bulk materials: (a) 10 vol.%; (b) 20 vol.%; (c) 30 vol.%; (d) 40 vol.%; (e) 50 vol.%



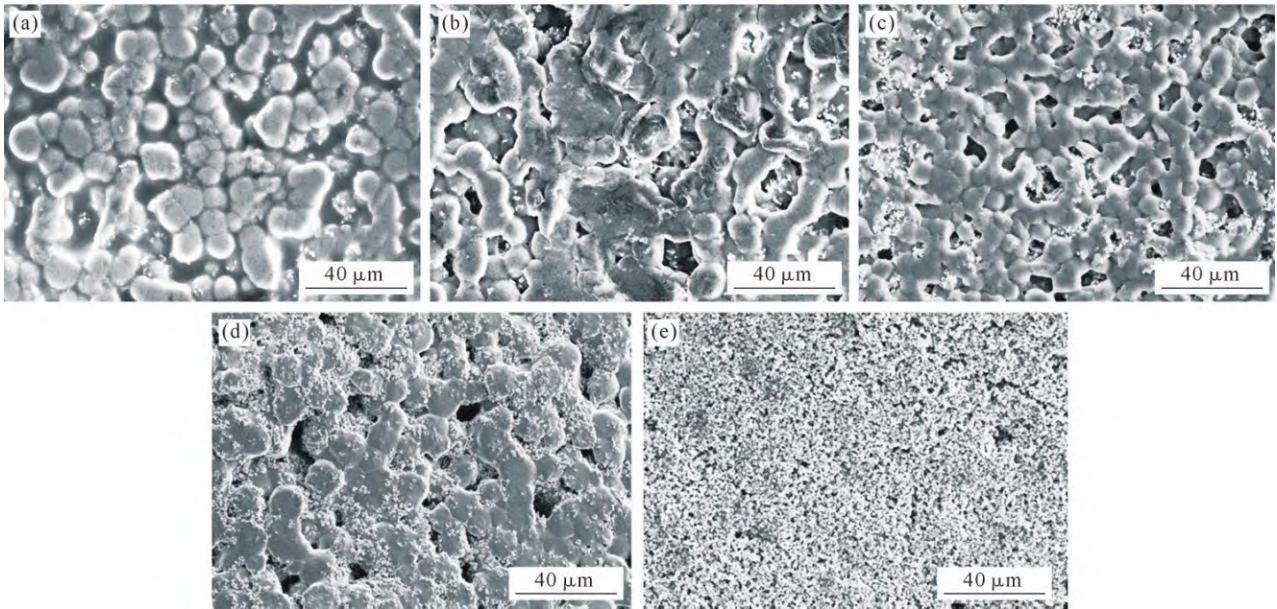


图3  $x$ STTO/PVDF( $x=10\%\sim 50\%$ )复合薄膜的表面 SEM 照片:(a) 10%; (b) 20%; (c) 30%; (d) 40%; (e) 50%  
Fig.3 Surface SEM images of the  $x$ STTO/PVDF ( $x=10\text{ vol.}\%\sim 50\text{ vol.}\%$ ) composite film materials: (a) 10 vol.%; (b) 20 vol.%; (c) 30 vol.%; (d) 40 vol.%; (e) 50 vol.%

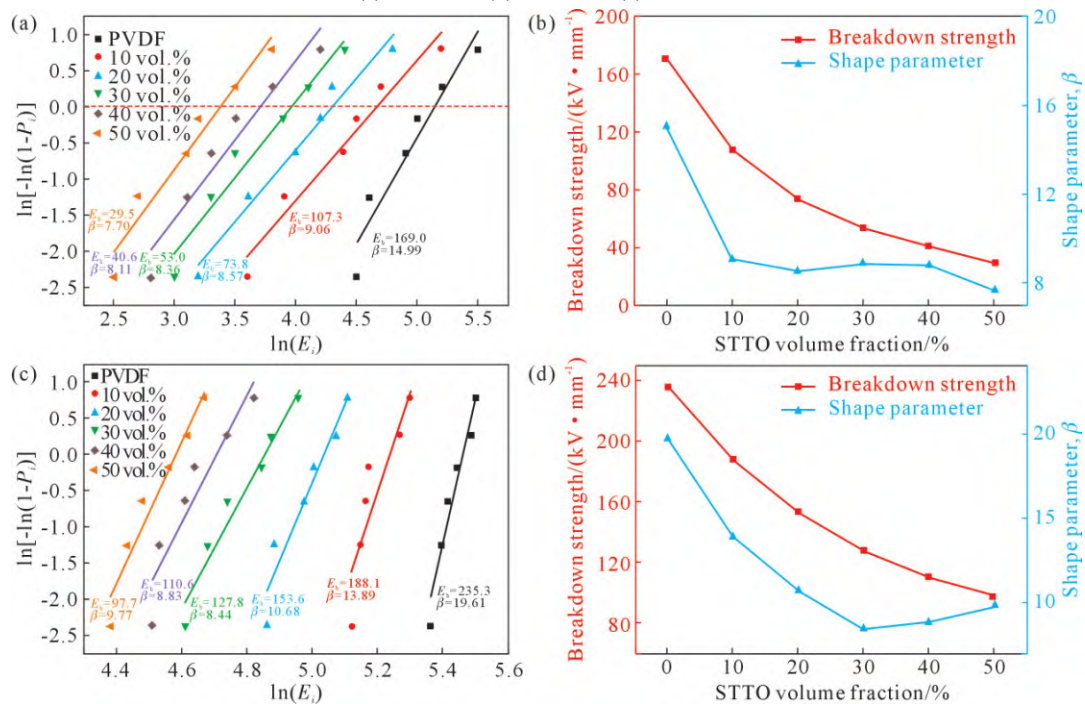


图4  $x$ STTO/PVDF( $x=0\%\sim 50\%$ )复合材料的 Weibull 分布,击穿场强和形状因子:(a, b) 热压法; (c, d) 流延法  
Fig.4 Weibull distributions, breakdown field strengths and shape factors of the  $x$ STTO/PVDF ( $x=0\text{ vol.}\%\sim 50\text{ vol.}\%$ ) composite materials: (a, b) hot pressing method; (c, d) casting method

量增加,颗粒团聚与界面孔洞增多,加之 STTO 本身的不规则形貌,共同导致局部电场严重畸变。电荷在填料“尖端”聚集,且电场强度高度集中于介电常数较低的聚合物区域,形成电缺陷中心,从而显著降低了复合材料的实际击穿强度<sup>[15-19]</sup>。如表 1 所示,在相同 STTO 含量下,流延法制备的复合材料  $E_b$  显著高于热压法。例如,当 STTO 体积分数为 40% 时,流延薄膜的  $E_b$  (110.6 kV/mm) 为热压块体 (40.6 kV/mm) 的 2.7 倍。在整个填料范围 (0~50%) 内,热压样品  $E_b$  介

表1 不同制备工艺击穿场强

Tab.1 Breakdown strength under different preparation processes

| STTO (vol.%) | Breakdown field strength/(kV · mm <sup>-1</sup> ) |                |
|--------------|---------------------------------------------------|----------------|
|              | Hot pressing method                               | Casting method |
| 0            | 169.0                                             | 235.3          |
| 10           | 107.3                                             | 188.1          |
| 20           | 73.8                                              | 153.6          |
| 30           | 53.3                                              | 127.8          |
| 40           | 40.6                                              | 110.6          |
| 50           | 29.7                                              | 97.7           |

于 169.0~29.5 kV/mm, 而流延样品  $E_b$  保持在 235.3~97.7 kV/mm 的较高水平。这一差异主要源于流延薄膜厚度小、填料分散更均匀, 有效抑制了电树枝的发展; 而热压样品厚度大、脆性高, 致使其击穿性能进一步恶化。

图 5 为热压法和流延法制备  $x$ STTO/PVDF ( $x=0\%\sim 50\%$ ) 复合材料的介电性能随频率变化曲线。结果显示, 两种工艺所制备 STTO/PVDF 复合材料的介电常数均随频率增大而下降, 介电损耗均随频率的增大呈先降后升趋势。在  $20\sim 10^4$  Hz 低频区间, 介电常数和损耗下降显著, 这主要源于 Maxwell-Wagner-Sillars 界面极化滞后于交流电场的频率<sup>[19]</sup>; 当频率升高至  $10^4\sim 10^6$  Hz 时, 复合材料的介电损耗急剧上升, 这可归因于非晶-晶界面的移动及 PVDF 分子链的微布朗运动引发晶体链段局部重排, 偶极子翻转相较于频率变化出现了延迟<sup>[20-21]</sup>。

表 2 对比了室温 1 kHz 下不同工艺制备的  $x$ STTO/PVDF ( $x=0\%\sim 50\%$ ) 复合材料介电常数和介电损耗。两种工艺所制备复合材料的介电常数均随 STTO 填料含量增加而增大, 这归因于 STTO 填料自身的高介电常数及其与 PVDF 基体间增强的 Maxwell-Wagner-Sillars 界面极化效应的共同作用<sup>[22-23]</sup>。此外, 两种工艺制备的复合材料的介电损耗也均随 STTO 含量增大逐渐增大。这可能来源于由于填料与 PVDF 产生更多的接触界面, 空间电荷积累产生更大的介

表2 室温 1 kHz 时不同工艺制备的  $x$ STTO/PVDF ( $x=0\%\sim 50\%$ ) 复合材料介电常数和介电损耗

Tab.2 Dielectric constant and dielectric loss of the  $x$ STTO/PVDF ( $x=0$  vol.%~50 vol.%) composites prepared via different processes at 1 kHz and room temperature

| STTO (vol.%) | hot pressing method |              | casting method |              |
|--------------|---------------------|--------------|----------------|--------------|
|              | $\varepsilon'$      | $\tan\delta$ | $\varepsilon'$ | $\tan\delta$ |
| 0            | 10.0                | 0.02         | 8.0            | 0.04         |
| 10           | 16.0                | 0.04         | 11.4           | 0.08         |
| 20           | 23.3                | 0.12         | 17.8           | 0.15         |
| 30           | 36.6                | 0.16         | 19.9           | 0.22         |
| 40           | 46.1                | 0.20         | 26.5           | 0.26         |
| 50           | 60.4                | 0.26         | 35.9           | 0.33         |

电损耗。在相同 STTO 含量下, 热压复合材料具有更高的介电常数, 并且其介电损耗低于流延薄膜, 表明热压工艺在实现高介电常数的同时, 具有更优的介电调控能力。两种工艺在调控复合材料介电与击穿性能方面各有侧重: 热压法凭借更强的界面极化效应, 更有利于获得高介电常数; 而流延法因样品厚度更薄、填料分散较为均匀, 在相同 STTO 含量下具有更高的击穿场强, 更适用于对绝缘强度要求高的应用场景。

### 3 结论

(1) 热压法制备的复合材料中 PVDF 以  $\alpha$  相为主, 而流延法制备的复合材料中  $\alpha$  相和  $\beta$  相共存。随 STTO 含量增加, 两种复合材料中填料团聚与界

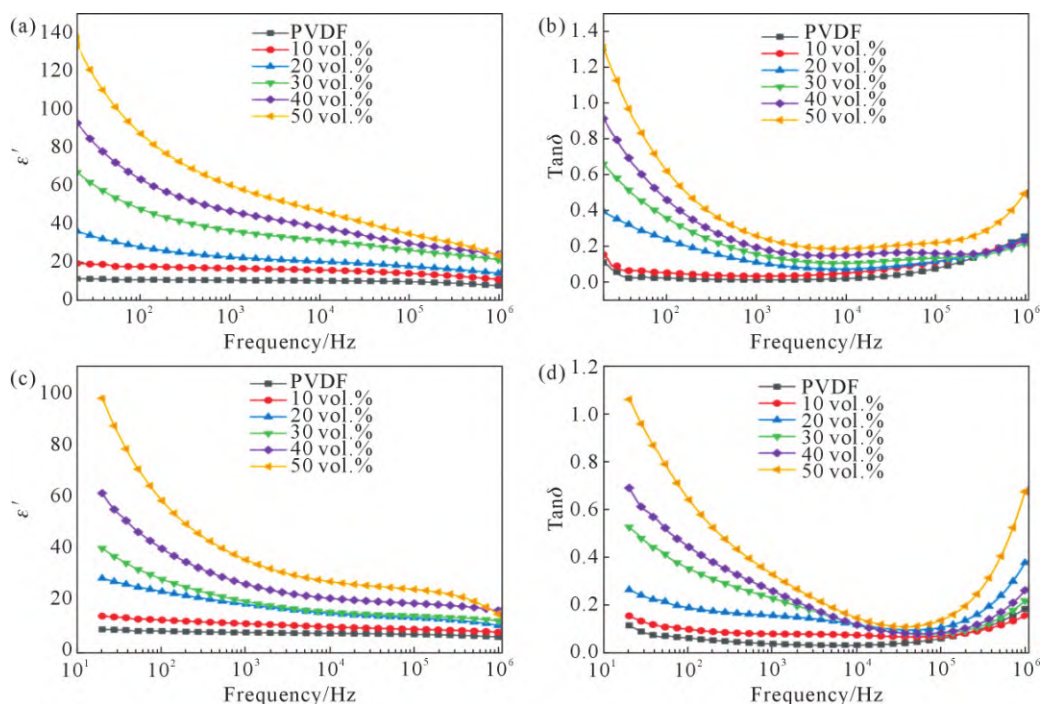


图 5  $x$ STTO/PVDF ( $x=0\%\sim 50\%$ ) 复合材料的介电性能随频率的变化曲线: (a, b) 热压法; (c, d) 流延法

Fig.5 Variations in the dielectric properties of the  $x$ STTO/PVDF ( $x=0$  vol.%~50 vol.%) composite materials with frequency: (a, b) hot pressing method; (c, d) casting method



面空洞均有所加剧。

(2)两种复合材料的击穿场强均随STTO含量增加而下降,但在相同STTO含量下,流延法制备的复合材料表现出更优的击穿性能(235.3~97.7 kV/mm),显著高于热压法制备的材料(169.0~29.5 kV/mm)。

(3)在介电性能方面,两种复合材料介电常数均随STTO含量增大而增大。热压法制备的复合材料展示出更高的介电常数(10.0~60.4)和更低的介电损耗(0.02~0.26)。

### 参考文献:

- [1] WANG Z, KANG J T, WU D, XUE Y, YI Z H. Antiferroelectric AgNbO<sub>3</sub>@KH550 doped PVDF/PMMA composites with high energy storage performance[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2024, 45(2): 2300485.
- [2] SANG X D, LI X J, ZHANG D D, ZHANG X L, WANG H P, LI S S. Improved dielectric properties and energy-storage densities of BaTiO<sub>3</sub>-doped PVDF composites by heat treatment and surface modification of BaTiO<sub>3</sub>[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2022, 55(21): 215501.
- [3] PRATEEK, THAKUR V K, GUPTA R K. Progress on ferroelectric polymer-based nanocomposites for high energy density capacitors: Synthesis, dielectric properties, and future aspects[J]. Chemical Reviews, 2016, 116(7): 4260-4317.
- [4] YANG X Y, RAN C N, ZHANG Y, YE L, ZHANG J J, MA S D. Dielectric and energy storage properties of coupling agent modification of BT-PVDF nanocomposite films[J]. Journal of Electronic Materials, 2023, 52: 6968-6974.
- [5] CHENG J J, DENG W, REN Y Y, QU K X, LI G A. Enhanced dielectric permittivity and breakdown strength of poly(vinylidene fluoride) nanocomposites containing core-shell BaTiO<sub>3</sub>@TiO<sub>2</sub> nanofibers[J]. Journal of Materials Science: Materials in Electronics, 2022, 33: 2667-2676.
- [6] GAO L, GAO Z W, XIAO Q Q, WANG X. Influence of copper calcium titanate nanoparticles designed with hierarchical interface structure on dielectric polarization and strength of polyvinylidene fluoride nanocomposites[J]. Progress in Organic Coatings, 2023, 184: 107877.
- [7] KHUMPAITOO B, UTARA S. Preparation and characterization of Li<sub>0.30</sub>Cr<sub>0.10</sub>Ni<sub>0.60</sub>O/polyvinylidene fluoride composites with high dielectric constants[J]. Ceramics International, 2017, 43(S1): S274-S279.
- [8] PATEL P K, RANI J, YADAV K L. Effective strategies for reduced dielectric loss in ceramic/polymer nanocomposite film[J]. Ceramics International, 2021, 47(7): 10096-10103.
- [9] 单学文, 殷景华. TiO<sub>2</sub>形状对TiO<sub>2</sub>/PVDF复合材料介电性能影响的建模与仿真研究[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2022, 27(1): 121-127.  
SHAN X W, YIN J H. Using modeling and simulation to study the influence of TiO<sub>2</sub> Shape on the dielectric properties of TiO<sub>2</sub>/PVDF composite[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2022, 27(1): 121-127.
- [10] CHEN Y L, HAN C Q, ZHOU Y, YANG T N, CHEN X, LI L, YUAN Z, WANG K, ZHANG B, LU W C, CHEN L Q, LIU Y, BERNHOLC J, WANG Q. Strain-induced polar interfaces in ferroelectric polymer nanocomposites[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35: 2421825.
- [11] 方露. TiO<sub>2</sub>基巨介电常数陶瓷的掺杂改性研究[D]. 西安: 长安大学, 2023.  
FANG L. Study on doping modification of TiO<sub>2</sub>-based giant dielectric constant ceramics[D]. Xi'an: Chang'an University, 2023.
- [12] PADURARIU L, HORCHIDANN, CIOMAGA C E, CURECHERIU L P, LUKACS V A, STIRBU R S, STOIAN G, BOTE A M, FIOREA M, MARALOIU V A, PINTILIE L, ROTARU A, MITOSERIU L. Influence of ferroelectric filler size and clustering on the electrical properties of (Ag-BaTiO<sub>3</sub>)-PVDF sub-percolative hybrid composites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2023, 15(4): 5744-5759.
- [13] GEBREKRSTOS A, MUZATA T S, RAY S S. Nanoparticle-enhanced  $\beta$ -phase formation in electroactive PVDF composites: A review of systems for applications in energy harvesting, EMI shielding, and membrane technology[J]. ACS Applied Nano Materials, 2022, 5(6): 7632-7651.
- [14] VIJATOVIC PETROVIC M, CORDERO F, MARCADELLI E, BRUNENGO E, ILIC N, GALASSI C, DESPOTOVIC Z, BOBIC J, DZUNUZOVIC A, STAGNARO P, CANU G, CRACIUN F. Flexible lead-free NBT-BT/PVDF composite films by hot pressing for low-energy harvesting and storage[J]. Journal of Alloys and Compounds, 2021, 884: 161071.
- [15] WANG S T, SUN J, TONG L, GUO Y M, WANG H, WANG C C. Superior dielectric properties in Na<sub>0.35%</sub>Ba<sub>99.65%</sub>Ti<sub>99.65%</sub>Nb<sub>0.35%</sub>O<sub>3</sub>/PVDF composites[J]. Materials Letters, 2018, 211: 114-117.
- [16] WANG Y U, TAN D Q, KRAHN J. Computational study of dielectric composites with core-shell filler particles[J]. Journal of Applied Physics, 2011, 110(4): 044103.
- [17] YANG M Z, REN W B, GUO M F, SHEN Y. High-energy-density and high efficiency polymer dielectrics for high temperature electrostatic energy storage: A review[J]. Small, 2022, 18(50): 2205247.
- [18] YANG Y, DANG Z M, LI Q, HE J L. Self-healing of electrical damage in polymers[J]. Advanced Science, 2020, 7(21): 2002131.
- [19] WANG Z, WANG T, WANG C, XIAO Y J, JING P P, CUI Y F, PU Y P. Poly(vinylidene fluoride) flexible nanocomposite films with dopamine-coated giant dielectric ceramic nanopowders, Ba(Fe<sub>0.5</sub>Ta<sub>0.5</sub>)O<sub>3</sub>, for high energy-storage density at low electric field[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2017, 9(34): 29130-29139.
- [20] JIANG X B, ZHAO X J, PENG G R, LIU W P, LIU K, ZHAN Z J. Investigation on crystalline structure and dielectric relaxation behaviors of hot pressed poly(vinylidene fluoride) film[J]. Current Applied Physics, 2017, 17(1): 15-23.
- [21] CELEBI H, DURAN S, DOGAN A. The effect of core-shell BaTiO<sub>3</sub>@SiO<sub>2</sub> on the mechanical and dielectric properties of PVDF composites[J]. Polymer-Plastics Technology and Materials, 2022, 61(11): 1191-1203.
- [22] MOHANTY H S, RAVIKANT, KUMAR A, KULRIYA P K,

THOMAS R, PRADHAN D K. Dielectric/ferroelectric properties of ferroelectric ceramic dispersed poly (vinylidene fluoride) with enhanced  $\beta$ -phase formation[J]. Materials Chemistry and Physics, 2019, 230: 221-230.

[23] RAO Y, QU J M, MARINIS T, WONG C P. A precise numerical

prediction of effective dielectric constant for polymer-ceramic composite based on effective-medium theory[J]. IEEE Transactions on Components and Packaging Technologies, 2000, 23 (4): 680-683.

(责任编辑:杨浩雪)