

TiO₂ 形状对 TiO₂/PVDF 复合材料 介电性能影响的建模与仿真研究

单学文, 殷景华

(哈尔滨理工大学 理学院, 哈尔滨 150080)

摘要: TiO₂/PVDF 复合材料具有优异的高介电性能, 在高电压和储能绝缘领域有着广泛应用前景。采用有限元法对 TiO₂/PVDF 复合材料体系的结构和性能进行模拟与仿真研究, 通过建立二维和三维两种模型, 从电场强度、漏电流密度、体系能量密度分布角度系统地研究复合材料的击穿机理, 研究 TiO₂ 形状对复合材料介电性能的影响。研究表明, 掺杂 5 vol% TiO₂ 组分, 相比于球形 TiO₂/PVDF 复合材料, 线形 TiO₂/PVDF 复合材料的电场强度、漏电流密度、体系能量密度分布较为均匀, 畸变较小, 高电场强度、漏电流密度和能量密度区域明显减少, 材料表面最高电场强度、漏电流密度、能量密度分别降低了 1.42 倍、1.41 倍、2.01 倍, 材料内部平均电场强度、漏电流密度、能量密度分别降低了 1.25 倍、1.19 倍、1.52 倍。仿真结果表明线形 TiO₂/PVDF 复合材料有着更强的耐击穿能力, 为制备高介电性能新材料提供理论依据。

关键词: TiO₂/PVDF; 电场强度; 漏电流密度; 体系能量密度; 击穿; 建模与仿真

DOI: 10.15938/j.jhust.2022.01.016

中图分类号: TB383

文献标志码: A

文章编号: 1007-2683(2022)01-0121-07

Using Modeling and Simulation to Study the Influence of TiO₂ Shape on the Dielectric Properties of TiO₂/PVDF Composite

SHAN Xue-wen, YIN Jing-hua

(School of Sciences, Harbin University of Science and Technology, Harbin 150080, China)

Abstract: TiO₂/PVDF composite materials have excellent high dielectric properties and have wide application prospects in the fields of high voltage and energy storage insulation. In this paper, the finite element method was used to simulate the structure and performance of TiO₂/PVDF composite material system. By establishing two dimensional and three dimensional models, the breakdown mechanism of composite material was systematically studied from the perspectives of electric field intensity, leakage current density, and system energy density distribution, studying the influence of TiO₂ shape on the dielectric performance of composite material. The results of the research show that doping 5 vol% TiO₂ components, compared to the spherical TiO₂/PVDF composites, the linear TiO₂/PVDF composites system of electric field intensity, the leakage current density and energy density

收稿日期: 2020-11-14

基金项目: 国家自然科学基金(51777047).

作者简介: 单学文(1994—), 男, 硕士研究生.

通信作者: 殷景华(1957—), 女, 教授, 博士研究生导师, E-mail: yinjinghua1@126.com.

distribution is relatively uniform, the distortion of the three physical quantities is small, high electric field intensity, leakage current density and energy density area decreased significantly. On the surface of the composite, the highest electric field strength, leakage current density and energy density are reduced 1.42 times, 1.41 times, 2.01 times. From the inside of the composite, the average electric field strength, leakage current density and energy density are reduced respectively 1.25 times, 1.19 times, and 1.52 times. The simulation results show that linear TiO_2/PVDF composite has stronger breakdown resistance. This research can provide a theoretical basis for the preparation of new materials with high dielectric properties.

Keywords: TiO_2/PVDF ; electric field intensity; leakage current density; energy density distribution; breakdown; modeling and simulation

0 引 言

随着电子行业的快速发展,人们对电储能设备的需求日益增长,其中储能电容器凭借其快充快放及高储能密度的优势而受到越来越多的关注^[1-2],广泛应用于短时间需要大量能量的场合^[3-6],在小规模储能方面,特别是微电子领域,介质电容器由于其瞬时响应特性、高功率能量密和允许在高频下工作等优点,仍然占据着市场的主导地位^[7-9]。

近年来的一些研究表明,填料形状是影响复合材料介电性能的重要因素之一^[10-23]。虽然这些研究取得了一些新进展,但多是研究介电常数的提升,未能深入研究介电性能提升机理,很难为后续的传统实验研究提供理论指导。因此复合材料的模拟计算逐渐受到重视,目前复合材料的模拟计算主要分为相场法和有限元法^[24]。

Shen 等^[25]通过建立 $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ 相场模型,设计了一种 $\text{BaTiO}_3/\text{PVDF}$ 纳米复合材料的夹层微观结构,经计算,该储能密度是纯 PVDF 聚合物的 2.44 倍,考虑到实验测试各种微结构更昂贵,这项工作只是演示了一个开发计算模型和进行高通量计算以发现最佳微结构的例子,对新材料研究有一定指导作用。

Cai 等^[26]引入一种基于完全空间随机性(CSR)测试的量化方法以描述球形 BaTiO_3 在聚合物基体中的分布,通过有限元方法研究纳米粒子分布对复合材料介电性能的影响。结果表明,球形陶瓷纳米粒子的非均匀分布会加剧局部电场强度,该仿真计算对象为球形填料,无法对复杂填料形状建模,未能

进一步研究填料形状对复合材料介电性能影响。

通过模拟仿真计算,一方面可研究材料介电性能提升机理,另一方面可指导开发高储能密度复合材料,预测待研究复合材料性能,减少研发成本,缩小研发周期。

对于线性材料来说,提高储能能力的关键在于提升材料介电常数和击穿场强。通常策略是将聚合物材料的高击穿强度与无机填料的高介电常数结合,通过控制掺杂含量,使复合材料获得高介电常数的同时,提升其耐击穿能力,进而提升复合材料储能密度。

在聚合物选择方面,常用的复合材料聚合物基体有聚偏氟乙烯(PVDF)、聚酰亚胺(PI)、聚苯乙烯(PS)等。多数聚合物中化学键偶极矩较小,介电常数大都低于 4,但 PVDF 可以达到 12 左右^[27]。因此在聚合物基复合材料研究中,PVDF 基体应用较为广泛。

在无机填料选择方面,二氧化钛 TiO_2 是一种半导体材料,具有良好的化学稳定性,易于制备,工业应用较为广泛。二氧化钛具有非常高的介电常数,其介电常数与结构晶型有关。通常 450℃ 煅烧得到的二氧化钛为锐钛矿型,随着煅烧温度的升高,其晶型由锐钛矿型逐渐向金红石型转化。锐钛矿型二氧化钛介电常数约为 48,金红石型二氧化钛介电常数可达 114,将纳米 TiO_2 添加到聚合物中,能够有效提高复合材料介电常数。

本文基于 TiO_2/PVDF 复合材料体系,采用有限元法分别对球形和线形 TiO_2/PVDF 复合材料结构与性能进行模拟与仿真研究,从电场强度、漏电流密度和能量密度分布角度系统的研究复合材料击穿机

理,进而研究填料形状对复合材料介电性能的影响。

1 TiO₂/PVDF 复合材料仿真模型

1.1 模型简介

三维仿真模型如图 1 所示,模型尺寸为 100 nm × 100 nm × 100 nm,分散球体和圆柱体代表无机填料,其余空间代表基体。

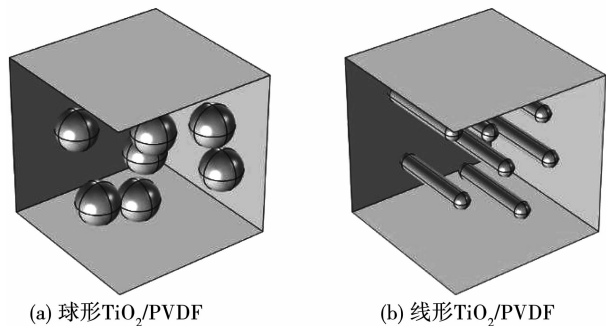


图 1 三维模型

Fig. 1 3D model

二维仿真模型如图 2 所示,模型尺寸为 100 nm × 100 nm,分散圆和类矩形代表无机填料,其余空间代表基体。

上极板加一终端 1 000 V,下极板接地,其余极板设置电绝缘。

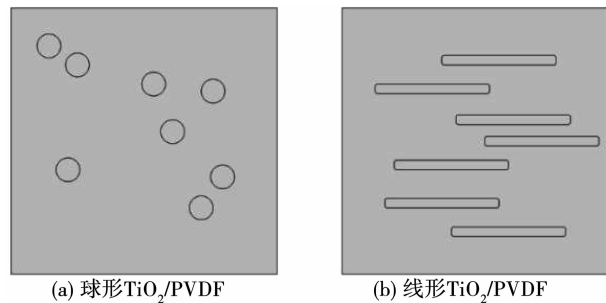


图 2 二维模型

Fig. 2 2D model

1.2 相关参数设定

选取 COMSOL 中 AC/DC 模块,采用电流守恒模型,感应效应忽略不计,“电流”接口用于计算介质中电场、电流与电势,Zhang 等^[28]提出陶瓷填料与聚合物基体之间存在过大的介电常数差,导致复合材料生成高电场强度区域,不均匀电场使复合材料击穿强度急剧下降,因此本研究选取介电常数较低的锐钛矿 TiO₂ 作为仿真对象,球形 TiO₂、线形

TiO₂ 和 PVDF 介电常数分别设置为 48、48、8.26,电导率分别设置为 10⁻¹⁰ S/m、10⁻¹⁰ S/m、10⁻¹⁵ S/m,其中球形 TiO₂ 直径 25 nm,线形 TiO₂ 长径比 1:6,长度为 60 nm。

Xu 等^[29]制备出不同组分球形 TiO₂/PVDF 复合材料,结果表明 5vol% 球形 TiO₂/PVDF 复合材料具有较高的介电强度,安等^[30]计算提出,5vol% 的掺杂量可获得一个较好的分散参数,因此,本研究选取的 TiO₂ 掺杂量为 5vol%。

1.3 球形 TiO₂/PVDF 复合材料建模与仿真

对球形 TiO₂/PVDF 复合材料的结构与性能进行有限元模拟研究,其表面电场、漏电流密度、能量密度分布如图 3 所示,并与纯 PVDF 进行对比。

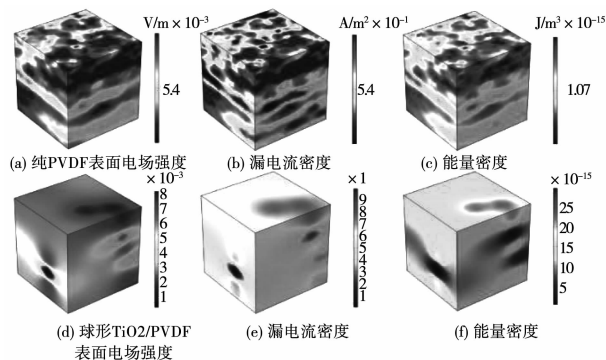


图 3 纯 PVDF 和球形 TiO₂/PVDF 表面的电场强度、漏电流密度和能量密度分布

Fig. 3 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density on the surface of pure PVDF and spherical TiO₂/PVDF

与纯 PVDF 相比,球形 TiO₂/PVDF 复合材料表面电场、漏电流密度、能量密度较为均匀,表明球形 TiO₂ 的加入,使复合材料表面电场、漏电流和能量重新排布,起到了匀化的作用。但匀化能力有限,材料表面依旧存在着较大的高电场、漏电流密度、能量密度区域,将对复合材料介电性能产生不利影响。

从电场分布来看,复合材料部分区域电场畸变较大。高电场区域与邻近低电场区域形成鲜明对比,较大的电压差易发生电击穿。

从漏电流分布来看,复合材料部分区域漏电流畸变较大,电场叠加会导致局部漏电流增加,维持材料表面放电形成沿面闪络,劣化材料。产生的大量焦耳热易造成材料热损失,加速击穿过程。

从体系能量分布来看,复合材料表面高能量密

度区域产生的焦耳热易熔断复合材料加速击穿过程。高漏电流的叠加会使该区域产生大量的焦耳热,导致局部能量密度提高。

1.4 线形 TiO₂/PVDF 复合材料建模与仿真

为了研究填料形状对复合材料介电性能的影响,对线形 TiO₂/PVDF 复合材料进行建模与仿真研究,其表面电场、漏电流密度、能量密度分布如图 4 所示。

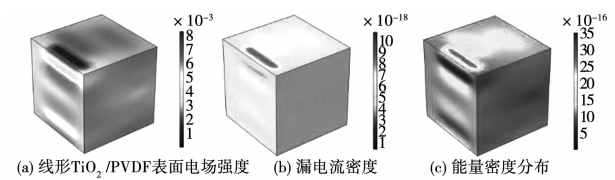


图 4 线形 TiO₂/PVDF 表面电场强度、漏电流密度和能量密度分布

Fig. 4 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density on the surface of linear TiO₂/PVDF

与球形 TiO₂ 相比,线形 TiO₂ 匀化 TiO₂/PVDF 复合材料表面电场、漏电流密度和能量密度作用更加明显,高电场、漏电流和能量密度区域明显减小,有利于提高 TiO₂/PVDF 复合材料介电性能。

对球形与线形 TiO₂/PVDF 复合材料表面电场、漏电流密度和能量密度进行数值计算,结果详见表 1。

表 1 两种复合材料表面最高电场、漏电流密度和能量密度
Tab. 1 The highest electric field, leakage current density and energy density on the surface of two kinds of composites

TiO ₂ /PVDF	球形	线形
电场强度/(V/m)	4.63×10^{-2}	3.27×10^{-2}
漏电流密度/(A/m ²)	4.64×10^{-17}	3.26×10^{-17}
能量密度/(J/m ³)	7.86×10^{-14}	3.91×10^{-14}

与球形 TiO₂/PVDF 复合材料相比,线形 TiO₂/PVDF 复合材料表面最大电场强度、漏电流密度和体系能量密度较小,分别降低了 1.42、1.41 和 2.01 倍。

2 TiO₂/PVDF 复合材料二维模型

在纳米复合材料中,填料与基体间的界面相互作用往往对纳米复合材料的介电性能产生较大影

响,为了进一步研究不同形状 TiO₂ 对 TiO₂/PVDF 复合材料介电性能的影响,建立垂直截面二维模型,尺寸与三维模型相似,参数设置基本相同,TiO₂ 掺杂量相同,分别对球形和线形 TiO₂/PVDF 复合材料内部结构与性能进行模拟与仿真研究。

2.1 球形 TiO₂/PVDF 建模与仿真

球形 TiO₂/PVDF 复合材料内部电场强度、漏电流密度和能量密度分布如图 5 所示。

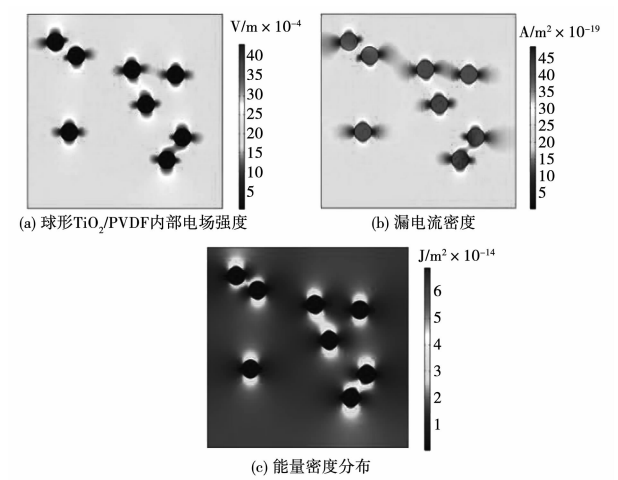


图 5 球形 TiO₂/PVDF 内部电场强度、漏电流密度和能量密度分布

Fig. 5 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density within spherical TiO₂/PVDF

随着球形 TiO₂ 填料的加入,TiO₂/PVDF 复合材料内部的电场、漏电流和能量密度发生畸变,复合材料内部畸变直接导致复合材料三维模型块体表面三种物理量发生畸变。

此外,在复合材料内部,高电场和高能量密度区域主要分布在 TiO₂/PVDF 复合材料沿电场方向的 TiO₂ 界面处,高漏电流密度区域主要分布在填料内部和沿电场方向的 TiO₂ 界面处。

从电场分布来看,局部电场沿外电场方向聚集在相邻 TiO₂ 附近,形成超高电场区域,如果相邻的 TiO₂ 沿电场方向形成通道或团簇,则会进一步加强局部电场,甚至彼此搭接形成导电通路,从而降低 TiO₂/PVDF 复合材料的击穿场强。

从漏电流分布来看,复合材料内部的漏电流集中分布在填料内部与界面,如果填料形成团簇,则局部的漏电流密度会进一步提高,焦耳热增加,从而熔

化绝缘材料并加速击穿进程。

从体系能量分布来看,在复合材料内部高能量区域分布在球形 TiO₂ 填料沿电场方向的界面处,当填料发生团簇时,界面处的高能量相互叠加,会导致该处能量密度得到进一步提升,造成热损失增加^[31]。

为了直观研究复合材料截面处电场、漏电流和能量密度分布,对球形 TiO₂/PVDF 复合材料内部电场、漏电流和能量密度进行后期处理,结果如图 6 所示

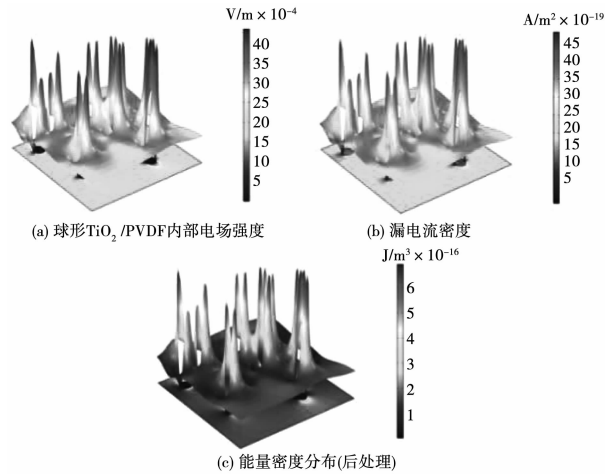


图 6 球形 TiO₂/PVDF 内部电场强度、漏电流密度和能量密度分布(后处理)

Fig. 6 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density inside spherical TiO₂/PVDF (post treatment)

以电场分布为例,电场分布经过后处理表面尖峰越小,电场分布越均匀。尖峰越宽,高电场区域越大。尖峰越多,高电场区域越多。

球形 TiO₂/PVDF 复合材料后处理表面尖峰较大,说明复合材料内部电场、漏电流和能量分布不均匀。尖峰较宽且较多,说明复合材料内部高电场、漏电流和能量密度区域较大且数量较多,对复合材料介电性能产生不利影响。

2.2 线形 TiO₂/PVDF 建模与仿真

线形 TiO₂/PVDF 复合材料内部电场、漏电流和能量密度分布的模拟仿真结果如图 7 所示。

线形 TiO₂ 使 TiO₂/PVDF 复合材料内部电场、漏电流和能量分布发生畸变,只在填料两端存在少量异常高电场、漏电流和能量密度区域。

与球形 TiO₂ 相比,线形 TiO₂ 填料表面电场、漏

电流和能量密度分布较为均匀,线形 TiO₂ 因其特殊结构和取向,具有相同填充量下的较大比表面积,能够大范围匀化电场,减少电场畸变。

为了进一步观察截面处的电场、漏电流和能量密度分布,对球形 TiO₂/PVDF 复合材料内部电场、漏电流和能量密度进行后期处理,结果如图 8 所示。

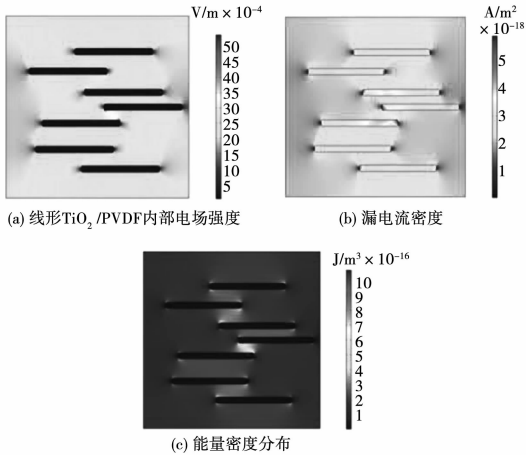


图 7 线形 TiO₂/PVDF 内部电场强度、漏电流密度和能量密度分布

Fig. 7 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density within linear TiO₂/PVDF

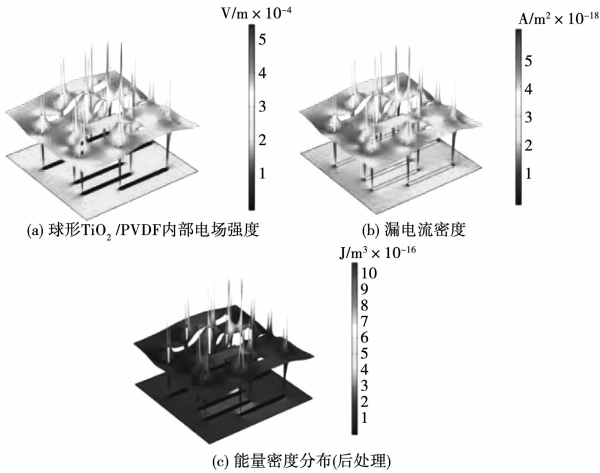


图 8 线形 TiO₂/PVDF 内部电场强度、漏电流密度和能量密度分布(后处理)

Fig. 8 Distribution of electric field intensity, leakage current density and energy density inside linear TiO₂/PVDF (post treatment)

与球形 TiO₂/PVDF 复合材料相比,线形 TiO₂/PVDF 复合材料的电场、漏电流和能量密度后处理

表面尖峰较小,说明复合材料内部电场、漏电流和能量分布较为均匀。尖峰较细且较少,说明复合材料内部高电场、漏电流和能量密度区域较小且数量较少,因此,线形 TiO₂/PVDF 复合材料有着更强的耐击穿能力。

对球形与线形 TiO₂/PVDF 复合材料内部平均电场、漏电流密度和能量密度进行数值计算,结果见表 2。

表 2 两种复合材料内部平均电场、漏电流密度和能量密度
Tab. 2 The average electric field, leakage current density and energy density in the two composites

TiO ₂ /PVDF	球形	线形
电场强度/(V/m)	3.24×10^{-3}	2.59×10^{-3}
漏电流密度/(A/m ²)	3.53×10^{-18}	2.97×10^{-18}
能量密度/(J/m ³)	3.74×10^{-16}	2.21×10^{-16}

与球形 TiO₂/PVDF 复合材料相比,线形 TiO₂/PVDF 复合材料内部平均电场强度、漏电流密度和能量密度较小,分别降低了 1.25、1.19 和 1.52 倍。

3 结 论

纳米复合材料的电场、漏电流以及体系能量分布会影响复合材料的耐击穿能力,本文采用有限元法,通过建立二维和三维两种模型,分别对相同掺杂量的球形、线形 TiO₂/PVDF 复合材料表面及内部的电场强度、漏电流密度以及能量密度进行模拟与仿真。研究表明,线形 TiO₂/PVDF 能够显著改善并匀化局部电场、漏电流密度和体系能量密度,与球形 TiO₂ 相比,线形 TiO₂ 具有相同填充量的最大比表面积和取向度,垂直于电场方向的更大比表面积使得 TiO₂/PVDF 对 Z 轴电场的均匀分布影响最小,造成的电场畸变最小。只在填料尖端存在少量高电场,若能够降低其尖端的曲率,则线形 TiO₂ 在避免界面高电场区域的产生和匀化电场方面能够展现更大的优势,从而提高 TiO₂/PVDF 纳米复合材料的耐击穿能力,使复合材料的储能密度得到有效提升。

参 考 文 献:

[1] CHU B, ZHOU X, REN K, et al. A Dielectric Polymer with High Electric Energy Density and Fast Discharge Speed[J]. Science, 2006, 313(5785): 334.

[2] KARDEN E, PLOUMEN S, FRICKE B, et al. Energy Storage Devices for Future Hybrid Electric Vehicles[J]. Journal of Power Sources, 2007, 168(1): 2.

[3] THAKUR V K, GUPTA R K. Recent Progress on Ferroelectric Polymer-based Nanocomposites for High Energy Density Capacitors: Synthesis, Dielectric Properties, and Future Aspects[J]. Chemical reviews, 2016, 116(7): 4260.

[4] KIMURA T, SAITOU R, KUBO K, et al. High-power-density Inverter Technology for Hybrid and Electric Vehicle Applications[J]. Hitachi Review, 2014, 63(2): 41.

[5] GUO M, HAYAKAWA T, KAKIMOTO M, et al. Organic Macromolecular High Dielectric Constant Materials: Synthesis, Characterization, and Applications[J]. The Journal of Physical Chemistry B, 2011, 115(46): 13419.

[6] MCNAB I R. PulsedPower for Electric Guns[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1997, 33(1): 453.

[7] LI Q, LIU F, YANG T, et al. Sandwich-structured Polymer Nanocomposites with High Energy Density and Great Charge - discharge Efficiency at Elevated Temperatures[J]. Proceedings of the National Academy of Sciences, 2016, 113(36): 9995.

[8] LI Q, CHEN L, GADINSKI M R, et al. Flexible High-Temperature Dielectric Materials from Polymer Nanocomposites[J]. Nature, 2015, 523(7562): 576.

[9] PAN Z, YAO L, ZHAI J, et al. Interfacial Coupling Effect in Organic/inorganic Nanocomposites with High Energy Density[J]. Advanced Materials, 2018, 30(17): 1705662.

[10] LIU S H, XUE S X, ZHANG W Q, et al. Enhanced Dielectric and Energy Storage Density Induced by Surface-modified BaTiO₃ Nanofibers in Poly (Vinylidene Fluoride) Nanocomposites[J]. Ceramics International, 2014, 40(10): 15633.

[11] XU N, ZHANG Q, YANG H, et al. In-situ Preparation of Hierarchical Flower-like TiO₂/carbon Nanostructures as Fillers for Polymer Composites with Enhanced Dielectric Properties[J]. Scientific Reports, 2017, 7(1): 1.

[12] FENG Y, LI WL, HOU Y F, et al. Enhanced Dielectric Properties of PVDF-HFP/BaTiO₃-nanowire Composites Induced by Interfacial Polarization and Wire-shape[J]. Journal of Materials Chemistry C, 2015, 3(6): 1250.

[13] LUO H, WU Z, ZHOU X F, et al. Enhanced Performance of P (VDF-HFP) Composites Using Two-dimensional BaTiO₃ Platelets and Graphene Hybrids[J]. Composites Science and Technology, 2018, 160(26): 237.

[14] WANG S J, QU P, LI C, et al. Hydrothermal Synthesis of Dendritic BaTiO₃ Ceramic Powders and Its Application in BaTiO₃/P (VDF-TrFE) Composites[J]. International Journal of Applied Ceramic Technology, 2017, 14(5): 969.

[15] PENG X H, LIU X L, QU P, et al. Enhanced Breakdown Strength and Energy Density of PVDF Composites by Introducing Boron Nitride Nanosheets[J]. Journal of Materials Science: Ma-

- terials in Electronics, 2018, 29(19): 16799.
- [16] CHEN S S, HU J, GAO L, et al. Enhanced Breakdown Strength and Energy Density in PVDF Nanocomposites with Functionalized MgO Nanoparticles[J]. RSC Advances, 2016, 6(40): 33599.
- [17] TANG H, LIN Y, ANDREWS C, et al. Nanocomposites with Increased Energy Density Through High Aspect Ratio PZT Nanowires[J]. Nanotechnology, 2010, 22(1): 015702.
- [18] JIANG C, ZHANG D, ZHOU K, et al. Significantly Enhanced Energy Storage Density of Sandwich-structured (Na_{0.5} Bi_{0.5})_{0.93} Ba_{0.07}TiO₃/P(VDF-HFP) Composites Induced by PVP-modified Two-dimensional Platelets[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2016, 4(46): 18050.
- [19] TANG H, ZHOU Z, SODANO H A. Relationship Between Ba-TiO₃ Nanowire Aspect Ratio and The Dielectric Permittivity of Nanocomposites[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2014, 6(8): 5450.
- [20] GUO N, DIBENEDETTO S A, TEWARI P, et al. Nanoparticle, Size, Shape, and Interfacial Effects on Leakage Current Density, Permittivity, and Breakdown Strength of Metal Oxide-polyolefin Nanocomposites: Experiment and Theory[J]. Chemistry of Materials, 2010, 22(4): 1567.
- [21] TANG H, SODANO H A. High Energy Density Nanocomposite Capacitors Using Non-ferroelectric Nanowires[J]. Applied Physics Letters, 2013, 102(6): 063901.
- [22] ZHU Y, YAO H, JIANG P, et al. Two-dimensional High-k Nanosheets for Dielectric Polymer Nanocomposites with Ultrahigh Discharged Energy Density[J]. The Journal of Physical Chemistry C, 2018, 122(32): 18282.
- [23] ZHU C, YIN J, LI J, et al. Enhanced Energy Storage of Polyvinylidene Fluoride-based Nanocomposites Induced by High Aspect Ratio Titania Nanosheets[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2020: 50244.
- [24] 朱新丰, 曲鹏, 彭晓晗, 等. 有限元法研究填料形貌与介电常数对无机/有机介电复合材料介电性能的影响[J]. 复合材料学报, 2019, 36(12): 2887.
- ZHU Xinfeng, QU Peng, PENG Xiaohan, et al. Study on The Influence of Filler Morphology and Dielectric Constant on The Dielectric Properties of Inorganic/organic Dielectric Composites by Finite Element Method[J]. Acta Composite Materials, 2019, 36(12): 2887.
- [25] SHEN Z H, WANG J J, LIN Y, et al. High-throughput Phase-Field Design of High-energy-density Polymer Nanocomposites[J]. Advanced Materials, 2018, 30(2): 1704380.
- [26] CAI Z, WANG X, LUO B, et al. Dielectric Response and Breakdown Behavior of Polymer-ceramic Nanocomposites: The Effect of Nanoparticle Distribution[J]. Composites Science and Technology, 2017, 145: 105.
- [27] 徐诺心. TiO₂/聚合物复合材料的设计、制备与介电性能研究[D]. 杭州: 浙江大学, 2017.
- [28] ZHANG X, SHEN Y, ZHANG Q, et al. Ultrahigh Energy Density of Polymer Nanocomposites Containing BaTiO₃@TiO₂ Nanofibers by Atomic-scale Interface Engineering[J]. Advanced Materials, 2015, 27(5): 819.
- [29] XU N X, HU L, ZHANG Q L, et al. Significantly Enhanced Dielectric Performance of Poly (Vinylidene Fluoride-co-hexafluoropylene)-based Composites Filled with Hierarchical Flower-like TiO₂ Particles[J]. ACS Applied Materials & Interfaces, 2015, 7(49): 27373.
- [30] 安宁丽, 方长青. PVDF/TiO₂ 纳米复合薄膜的电学性能研究[J]. 西安理工大学学报, 2014, 30(3): 288.
- AN Ningli, FANG Changqing. Study on The Electrical Properties of PVDF/TiO₂ Nanocomposite Films[J]. Journal of Xi'an University of Technology, 2014, 30(3): 288.
- [31] JI W, DENG H, SUN C, et al. Nickel Hydroxide as Novel Filler for High Energy Density Dielectric Polymer Composites[J]. Composites Science and Technology, 2019, 172: 117.

(编辑: 王 萍)