BNQDs改性PES复合薄膜的聚集态及击穿强度研究

张文泰[1],吴俊峰[2]

(1.郑州经贸学院,河南 郑州 450000;2.黄河科技学院,河南 郑州 450063)

摘　要:采用溶剂热法制备氮化硼量子点(BNQDs),将其与聚醚砜(PES)复合,制备PES/BNQDs复合薄膜,探究BNQDs含量对PES/BNQDs复合薄膜聚集态结构、力学性能和击穿强度的影响。结果表明:制备的BNQDs平均粒径为39.7 nm。随着BNQDs含量的增加,PES/BNQDs复合薄膜的力学性能和宽温域内的击穿强度呈现先增后降的趋势。当BNQDs质量分数为0.10%时,PES/BNQDs-0.10的拉伸强度提升至103.4 MPa,较未添加BNQDs的薄膜提高32.1%。在室温和150 ℃条件下,PES/BNQDs-0.10的击穿强度分别为789.2 MV/m和658.5 MV/m,远优于未添加BNQDs的薄膜。研究结果为开发满足高温领域应用需求的新型聚合物绝缘薄膜提供参考。

关键词:氮化硼量子点;聚醚砜;聚集态结构;力学性能;击穿强度

中图分类号:TQ326.55　　**文献标志码**:A　　**文章编号**:1005-3360(2026)09-0044-05

DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2026.09.009

Study on Aggregation State and Breakdown Strength of BNQDs-modified PES Composite Films

ZHANG Wentai[1], WU Junfeng[2]

(1. Zhengzhou University of Economics and Business, Zhengzhou 450000, China;
2. Huanghe S & T University, Zhengzhou 450000, China)

Abstract: Boron nitride quantum dots (BNQDs) were synthesized via a solvothermal method and incorporated into polyethersulfone (PES) to fabricate PES/BNQDs composite films. The effects of BNQDs content on the aggregation structure, mechanical properties, and breakdown strength of the PES/BNQDs composite films were systematically investigated. The results showed that the average particle size of the synthesized BNQDs was 39.7 nm. With increasing BNQDs content, both the mechanical properties and the breakdown strength over a broad temperature range of the PES/BNQDs composite films exhibited a trend of first increasing and then decreasing. At a BNQDs mass fraction of 0.10%, the tensile strength of the PES/BNQDs-0.10 film reached 103.4 MPa, which was 32.1% higher than that of the film without BNQDs. The breakdown strengths of the PES/BNQDs-0.10 film at room temperature and 150 ℃ were 789.2 MV/m and 658.5 MV/m, respectively, significantly superior to those of the film without BNQDs. These findings provide a reference for the development of novel polymer insulating films suitable for high-temperature applications.

Keywords: BNQDs; PES; Aggregation structure; Mechanical properties; Breakdown strength

航空航天、新能源汽车、智能电网和5G通信等高新技术领域的快速发展,对能够在高温、强电场等极端工况下服役的聚合物绝缘薄膜提出更高要求[1-2]。然而,多数耐高温聚合物薄膜,如芳香族聚合物,虽然在室温下绝缘性能优异,但在高温下其束缚电子受热易成为自由电子,使漏电流密度指数上升,薄膜的绝缘性能和击穿强度显著劣

收稿日期Submitted date 2026-06-13;修回日期Revised date 2026-07-06;录用日期Accepted date 2026-08-10
基金项目:河南省科技攻关项目(262102240055);河南省科技攻关项目(252102110348)
联系人,winter19882010@126.com
引用本文:张文泰,吴俊峰.BNQDs改性PES复合薄膜的聚集态及击穿强度研究[J].塑料科技,2026,54(9):44-48.
Citation:ZHANG W T, WU J F. Study on aggregation state and breakdown strength of BNQDs-modified PES composite films[J]. Plastics Science and Technology, 2026, 54(9): 44-48.

化[3]。因此，抑制高温下聚合物薄膜内部漏电流的形成是优化其高温击穿强度的关键[4]。XU等[5]将1,3,5-三(4-氨基苯氧基)苯(TAB)作为交联剂引入羧基封端的聚酰胺酸溶液，制备交联聚酰亚胺薄膜。结果表明：该交联薄膜的击穿强度显著优于非交联聚酰亚胺。LIU等[6]将氨基化氮化硼纳米片(fBNNSs)引入聚甲基丙烯酸甲酯(PMMA)后发现，因fBNNSs的高绝缘特性，所制备的fBNNSs/PMMA复合薄膜的击穿强度提升至500 MV/m。BIAN等[7]将聚醚酰亚胺(PEI)与聚醚萘酰胺(PEENA)共混，制备PEI-PEENA复合薄膜。研究发现，PEI与PEENA分子链间形成了氢键，该复合薄膜在150 ℃下的击穿强度最高达596 MV/m。上述研究为优化聚合物的高温击穿强度提供参考。

聚醚砜(PES)是一种典型的芳香族聚合物，其分子链中醚键(—O—)和砜基(—SO_2—)赋予了PES材料优异的热学稳定性和绝缘性能，广泛应用于电气绝缘、轨道交通及航空航天领域。然而，在高温下内部漏电流显著增大，导致PES薄膜的击穿强度劣化[8]。氮化硼量子点(BNQDs)是纳米级氮化硼材料，具有优异的绝缘性能，同时在与聚合物复合过程中，能够基于量子尺寸效应形成电子陷阱，从而捕获薄膜内部的自由电子[9]。

因此，为了优化PES高温下的击穿强度，本研究采用溶剂热法制备BNQDs，将BNQDs与PES复合制备PES/BNQDs复合薄膜，探究BNQDs含量对PES/BNQDs薄膜聚集态结构、力学性能和宽温域内击穿强度的影响，以期为开发能够满足高温、强电场等极端工况应用要求的聚合物绝缘薄膜提供参考。

1 实验部分

1.1 主要原料

PES，E6020P，德国巴斯夫股份有限公司；氮化硼(BN)，1~2 μm，阿拉丁试剂(上海)有限公司；N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)，分析纯，上海凌峰化学试剂有限公司；聚四氟乙烯滤膜，0.22 μm，天津市津腾实验设备有限公司。

1.2 仪器与设备

傅里叶变换红外光谱仪(FTIR)，Nicolet 6700，美国Thermo Fisher公司；场发射扫描电子显微镜(SEM)，S4800，日本日立公司；场发射透射电子显微镜(TEM)，JEM-F200，日本电子株式会社；X射线衍射仪(XRD)，D8ADVANCE，德国布鲁克公司；电子试验机，Model 44，美特斯工业系统(中国)有限公司；击穿强度仪，CS9916BX，南京长盛仪器有限公司；离心机，H2500R-2，湖南湘仪实验室仪器开发有限公司。

1.3 样品制备

1.3.1 氮化硼纳米片(BNNSs)和BNQDs的制备

采用液相超声剥离法制备BNNSs。将1 g BN分散于100 mL DMAc中，超声4 h，得到BN分散液。将BN分散液在3 500 r/min下离心15 min，保留上清液。采用0.22 μm微孔的聚四氟乙烯滤膜对上清液进行过滤处理，得到BNNSs。

采用溶剂热法制备BNQDs[9]。将制备的BNNSs分散于DMAc中，超声1 h，得到前驱体悬浮液。将悬浮液转移至反应釜中，240 ℃下反应24 h，在此条件下BNNSs逐渐形成量子点。将裂解的BNNSs放入离心机中，8 000 r/min离心20 min，收集上清液，采用0.22 μm微孔的聚四氟乙烯滤膜对上清液进行抽滤处理，得到BNQDs分散液，将所得BNQDs分散液于120 ℃下干燥，得到BNQDs。

1.3.2 PES/BNQDs复合薄膜的制备

将BNQDs分散于DMAc中，超声0.5 h后加入PES，在80 ℃下搅拌8 h，得到PES/BNQDs复合溶液，在真空条件下脱泡24 h。将PES/BNQDs复合溶液涂覆于干净的玻璃基材上，在120 ℃下干燥8 h，得到PES/BNQDs复合薄膜。根据BNQDs的质量分数(0、0.05%、0.10%、0.15%、0.20%)将其分别命名为PES/BNQDs-0、PES/BNQDs-0.05、PES/BNQDs-0.10、PES/BNQDs-0.15和PES/BNQDs-0.20。图1为PES/BNQDs复合薄膜的制备流程。

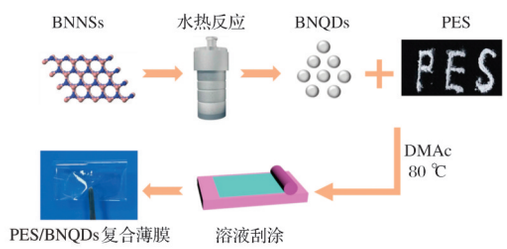


图1 PES/BNQDs复合薄膜的制备流程

Fig.1 Preparation process of PES/BNQDs composite films

1.4 性能测试与表征

TEM测试：将BNQDs分散在乙醇中，超声10 min，滴于超薄碳膜上进行表征分析。

FTIR测试：采用傅里叶变换红外光谱仪进行结构分析，波数范围3 500~500 cm^{-1}。

XRD测试：采用X射线衍射仪对PES/BNQDs-0、PES/BNQDs-0.10、PES/BNQDs-0.20复合薄膜的聚集态结构进行表征，管电压40 kV，管电流40 mA，扫描范围5°~90°，波长0.154 nm。

SEM测试：在真空条件下，对断面进行喷金处理，采用场发射扫描电子显微镜对断面微观形貌进行表征。

力学性能测试：依据GB/T 1040.3—2006，采用电子试验机在室温条件下进行测试，试样宽度10 mm，初始标距20 mm，拉伸速率50 mm/min。

击穿强度测试：采用击穿强度仪分别在室温和150 ℃条件下对材料进行击穿强度测试。每个样品分别测试12次，采用Weibull分布拟合得到击穿强度。

电子结构分析：采用Gaussview 5.0和Gaussian 09 W计算BNQDs和PES的电子结构和能级分布[10-11]。

2 结果与讨论

2.1 BNNSs、BNQDs和PES/BNQDs的结构表征

图2为BNNSs、BNQDs和PES/BNQDs的结构表征结

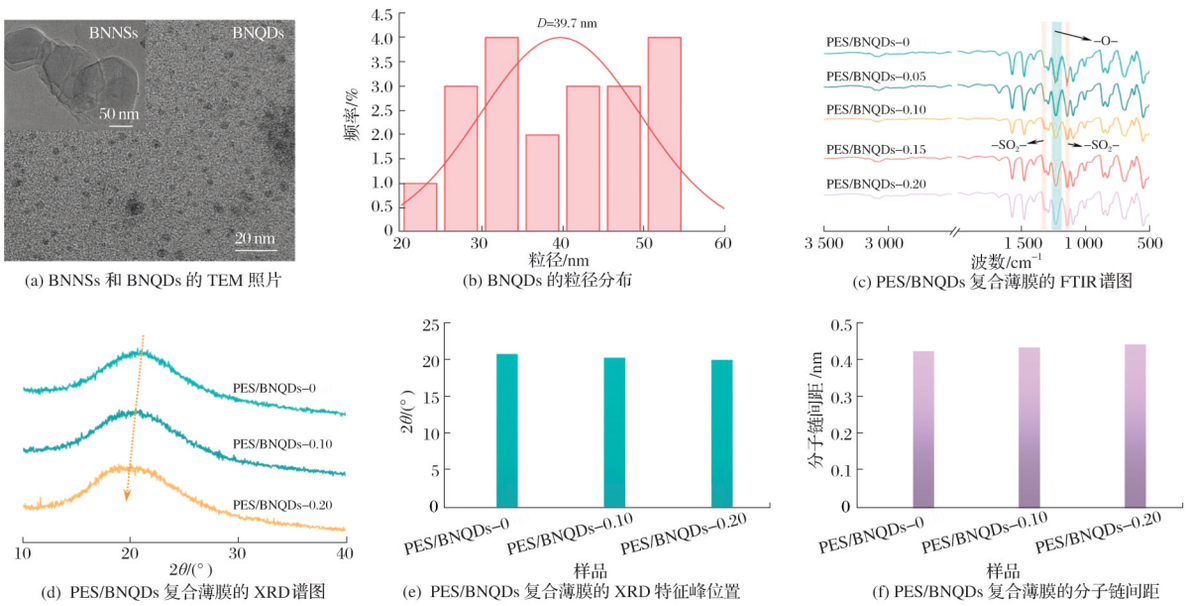
果。从图2a可以看出，BNNSs为明显的二维片状形貌；BNQDs为明显的纳米粒子形貌。从图2b可以看出，所制备的BNQDs平均粒径为39.7 nm。从图2c可以看出，1 320 cm^{-1}和1 143 cm^{-1}处对应PES中—SO_2—的吸收峰；1 228 cm^{-1}处对应PES中—O—的吸收峰[12]。在FTIR谱图中未观察到BNQDs的吸收峰。一方面是由于BNQDs的含量过低；另一方面是由于BNQDs的特征峰主要位于1 370 cm^{-1}和780 cm^{-1}，与PES中化学基团的特征峰重合[13]。从图2d可以看出，3种薄膜的XRD谱图均呈现宽且弱的弥散峰，这表明BNQDs的引入并没有破坏PES的聚集态结构。随着BNQDs含量的增加，复合薄膜的特征峰逐渐向左移动，这表明BNQDs对PES的分子链间距产生影响。从图2e可以看出，PES/BNQDs-0、PES/BNQDs-0.10和PES/BNQDs-0.20的特征峰分别位于20.9°、20.4°和20.1°。

基于Bragg公式计算PES/BNQDs复合薄膜的分子链间距[14]。Bragg公式为：

$$2d\sin\theta=n\lambda \quad (1)$$

式(1)中：d为分子链间距，nm；θ为布拉格角，(°)；n为衍射级数，取1；λ为波长，0.154 nm。

从图2f可以看出，PES/BNQDs-0、PES/BNQDs-0.10和PES/BNQDs-0.20的分子链间距分别为0.425、0.435、0.443 nm。其原因在于纳米级BNQDs插入PES分子链间，使分子链间距增大。同时，BNQDs在溶剂热反应过程中，表面形成极性基团羟基(—OH)和氨基(N—H)，能够减弱PES分子链间的相互作用[15]。



(a) BNNSs和BNQDs的TEM照片 (b) BNQDs的粒径分布 (c) PES/BNQDs复合薄膜的FTIR谱图

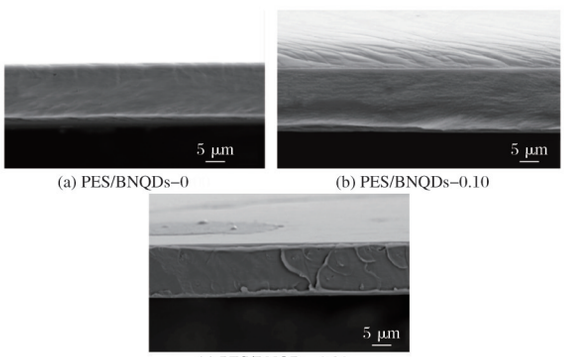
(d) PES/BNQDs复合薄膜的XRD谱图 (e) PES/BNQDs复合薄膜的XRD特征峰位置 (f) PES/BNQDs复合薄膜的分子链间距

图2 BNNSs、BNQDs和PES/BNQDs复合薄膜的结构表征

Fig.2 Structural characterization of BNNS, BNQDs and PES/BNQDs composite films

2.2 PES/BNQDs复合薄膜的SEM分析

图3为PES/BNQDs复合薄膜的横截面SEM照片。



(a) PES/BNQDs-0 (b) PES/BNQDs-0.10 (c) PES/BNQDs-0.20

图3 PES/BNQDs复合薄膜的横截面SEM照片

Fig.3 Cross-section SEM images of PES/BNQDs composite films

从图3可以看出，PES/BNQDs-0横截面平整致密，结构均匀连续，形貌呈现脆性断裂。PES/BNQDs-0.10具有与PES/BNQDs-0相似的横截面形貌，表面光滑平整。这表明当BNQDs含量较低时，能够均匀地分散在PES基体中，不会破坏PES的完整结构。然而，当BNQDs含量较高时，PES/BNQDs-0.20横截面粗糙，伴有明显的褶皱结构。其原因在于高含量的BNQDs会在PES基体中形成团聚效应，两相界面间形成微缺陷，在液氮中脆断时局部应力集中，导致横截面变粗糙[16]。

2.3 PES/BNQDs复合薄膜的力学性能分析

表1为PES/BNQDs复合薄膜的力学性能。从表1可以看出，随着BNQDs含量的增加，PES/BNQDs复合薄膜的拉伸强度和弹性模量呈先升后降的趋势。PES/BNQDs-0.10的拉伸强度和弹性模量分别为103.4 MPa和1 328.0 MPa，较PES/BNQDs-0分别提升32.1%和28.1%。原因是BNQDs经溶剂热处理后，在其表面形成—OH、N—H等极性基团。当BNQDs含量较低时，复合薄膜能够与PES分子链中的—SO_2—基团形成氢键/偶极相互作用，此时BNQDs作为“纳米增强相”能够有效传递外界应力[17]。此外，引入BNQDs能够增加PES的分子链间距，有助于PES分子链段在受力时发生相互滑移，从而提高拉伸强度

和弹性模量。然而，当BNQDs质量分数超过0.10%时，PES/BNQDs复合薄膜的拉伸强度和弹性模量呈下降趋势。其原因在于过量的BNQDs在PES基体中发生团聚现象，使两相界面处形成微缺陷，降低界面结合力，降低力学性能[18]。

表1 PES/BNQDs复合薄膜的力学性能

Tab.1 Mechanical properties of PES/BNQDs composite films

单位：MPa

样品	拉伸强度	弹性模量
PES/BNQDs-0	78.3±3.1	1 037.0±33.2
PES/BNQDs-0.05	85.9±4.6	1 154.0±52.7
PES/BNQDs-0.10	103.4±3.2	1 328.0±25.1
PES/BNQDs-0.15	98.4±5.3	1 227.0±37.4
PES/BNQDs-0.20	89.3±6.5	1 105.0±58.9

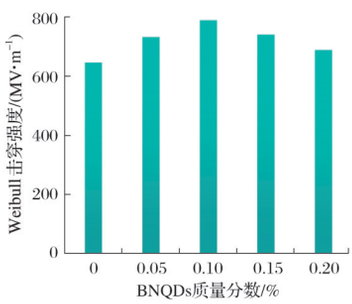
2.4 PES/BNQDs复合薄膜的击穿强度分析

为了分析PES/BNQDs复合薄膜在室温和150 ℃下的击穿强度，本研究选用双参数Weibull分布函数来拟合击穿测试结果[19]，Weibull分布函数的计算公式为：

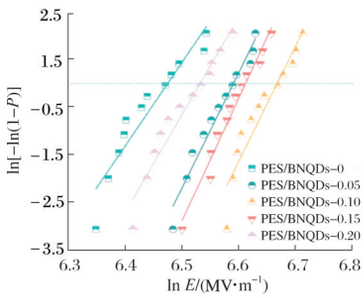
$$P = 1 - \exp\left[-\left(\frac{E}{E_b}\right)^{\beta}\right] \quad (2)$$

式(2)中，P为击穿概率，%；E为样品实验测试的击穿强度，MV/m；E_b为样品在63.2%击穿概率时的击穿强度，MV/m；β为威布尔参数，β值越高，击穿强度数据的可靠性越好。

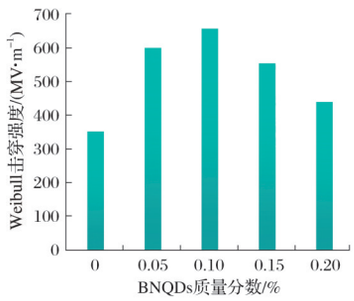
图4为PES/BNQDs复合薄膜的Weibull击穿强度及其分布。从图4可以看出，随着BNQDs含量的增加，PES/BNQDs复合薄膜的击穿强度先增加后减小。在室温下PES/BNQDs-0.10的击穿强度提升至789.2 MV/m，较PES/BNQDs-0.0提高22.1%。其原因在于BNQDs的引入能够增大PES的分子链间距，抑制PES分子结构中π-π共轭效应及分子内电荷转移复合物(CTC)的形成[20]。与室温下对比发现，在150 ℃下，PES/BNQDs复合薄膜的Weibull击穿强度均明显下降。PES/BNQDs-0.10在150 ℃下的Weibull击穿强度降至658.5 MV/m，较室温时下降16.6%。高温下PES/BNQDs复合薄膜击穿强度下降的原因如下：一方面PES分子链段运动能力增强，增加了电子运动的平均自由程[20-21]；另一方面薄膜内部被束缚的电子吸收热能成为自由电子，进而使薄膜的绝缘性能下降[22]。



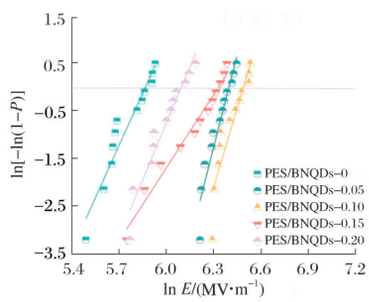
(a) 室温下Weibull击穿强度



(b) 室温下击穿强度的Weibull分布



(c) 150 ℃下Weibull击穿强度

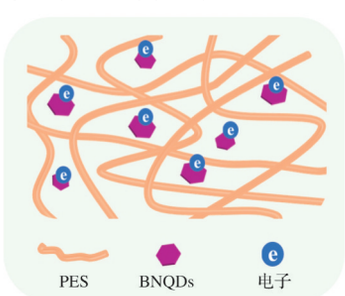


(d) 150 ℃下击穿强度的Weibull分布

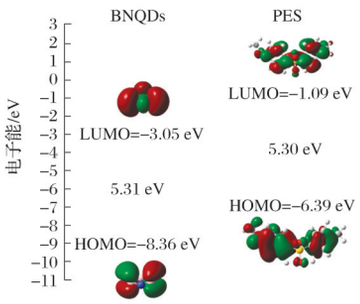
图4 PES/BNQDs复合薄膜的Weibull击穿强度及其分布

Fig.4 Weibull breakdown strength and its distribution of PES/BNQDs composite films

为了进一步分析BNQDs优化PES击穿强度的内在机制，本研究通过密度泛函理论(DFT)计算BNQDs和PES的禁带宽度。图5为PES/BNQDs复合薄膜击穿强度的内在机制。从图5可以看出，BNQDs与PES在界面处形成电子陷阱，可有效捕获高温下形成的自由电子，从而抑制电子迁移形成漏电流[23-24]。经计算可知，BNQDs和PES的带隙分别为5.31 eV和5.30 eV，远超过3.00 eV。这表明BNQDs和PES均有优异的绝缘性能，能够有效抑制电子从价带跃迁至导带形成自由电子，进一步说明了BNQDs与PES复合能够制备具有高击穿强度的绝缘薄膜[25]。



(a) PES/BNQDs复合薄膜内部电子传导



(b) BNQDs和PES的禁带宽度

注:图5b中,LUMO为最高占据分子轨道,HOMO为最低未占据分子轨道。

图5 PES/BNQDs复合薄膜击穿强度的内在机制

Fig.5 Internal mechanism of breakdown strength of PES/BNQDs composite films

3 结论

本研究采用溶剂热法制备BNQDs,将BNQDs与PES复合制备PES/BNQDs复合薄膜,探究BNQDs含量对PES/BNQDs复合薄膜聚集态结构、力学性能和击穿强度的影响。结果表明:BNQDs的引入能够增加PES/BNQDs复合薄膜的分子链间距,同时抑制分子结构中π-π共轭效应以及CTC的形成。PES/BNQDs复合薄膜在室温和150 ℃下的最大击穿强度分别为789.2 MV/m和658.5 MV/m,远优于PES薄膜。此外,BNQDs和PES的带隙分别为5.31 eV和5.30 eV,具有优异的绝缘性能。研究结果为制备具有高击穿强度的PES/BNQDs复合薄膜提供参考。

参考文献

[1] WANG T Y, MAO J, ZHANG B Y, et al. Polymeric insulating materials characteristics for high-voltage applications[J]. Nature Reviews Electrical Engineering, 2024, 1(8): 516-528.

[2] REN L C, GUO H C, KANG L, et al. Lightweight, electrical insulating, and high thermally conductive all-polymer composites with reinforced interfaces[J]. Composites Science and Technology, 2023, 240: 110080.

[3] XIE Z L, FAN L, LI H, et al. Recent trends in all-organic polymer dielectrics for high-temperature electrostatic energy storage capacitors [J]. Progress in Polymer Science, 2025, 164: 101957.

[4] LUO H, WANG F, GUO R, et al. Progress on polymer dielectrics for electrostatic capacitors application[J]. Advanced Science, 2022, 9(29): 2202438.

[5] XU A, ZHOU J L, YAN C F, et al. Significantly enhanced energy storage performance of polyimide dielectrics at high temperatures via manipulating crosslinked density[J]. Journal of Energy Storage, 2024, 86: 111209.

[6] LIU F H, LI Q, LI Z Y, et al. Poly(methyl methacrylate)/boron nitride nanocomposites with enhanced energy density as high temperature dielectrics[J]. Composites Science and Technology, 2017, 142: 139-144.

[7] BIAN R T, LIAO P Y, ZHOU C Y, et al. Enhancing high-temperature capacitive performance of polyetherimide composites through hydrogen bonding[J]. Journal of Power Sources, 2025, 640: 236817.

[8] ZHANG Y, GONG Z, WANG S H, et al. Excellent energy storage performance of layered polyethersulfone dielectric composite at elevated temperatures[J]. Journal of Energy Storage, 2026, 148: 120093.

[9] LIU Q Q, HU C F, WANG X M. One-pot solvothermal synthesis of water-soluble boron nitride nanosheets and fluorescent boron nitride quantum dots[J]. Materials Letters, 2019, 234: 306-310.

[10] MANZETTI S, LU T. The geometry and electronic structure of aristolochic acid: Possible implications for a frozen resonance[J]. Journal of Physical Organic Chemistry, 2013, 26(6): 473-483.

[11] 段广宇, 胡凤英, 王亚兵, 等. 芳纶纳米纤维基复合薄膜的制备及介电击穿强度[J]. 精细化工, 2025, 42(7): 1501-1508.

[12] 周振君, 张宁, 王临江, 等. 连续纤维增强聚醚砜复合材料制备及性能研究[J]. 复合材料科学与工程, 2020(3): 70-74.

[13] MISHRA S, JENA B K. Review and perspectives on multifunctional applications of hexagonal boron nitride nanosheets and quantum dots in energy conversions[J]. Energy & Fuels, 2025, 39(9): 4119-4150.

[14] DUAN G Y, HU F Y, ZHANG R N, et al. Preparation of a novel cross-linked polyetherimide with enhanced breakdown strength and high-temperature energy storage performance[J]. High Voltage, 2023, 8(3): 630-639.

[15] LI Y F, WANG T H, ZHAO J Q, et al. Quantum-confined boron nitride quantum dots-polyimide composites achieve exceptional dielectric strength, energy density, and thermal dissipation at ultralow loading[J]. Advanced Functional Materials, 2026, 36(23): e19408.

[16] WU W Z, LI Z H, LIN G Q, et al. Additive manufacturing of continuous BF-reinforced PES composite material and mechanical and wear properties evaluation[J]. Journal of Materials Science, 2022, 57 (27): 12903-12915.

[17] HAN J Y, GAO W, SHAO L J, et al. High-temperature energy storage properties of polyetherimide composites with tailored boron nitride quantum dots[J]. Nanotechnology, 2025, 36(20): 205601.

[18] REVABHAI P M, SINGHAL R K, BASU H, et al. Progress on boron nitride nanostructure materials: Properties, synthesis and applications in hydrogen storage and analytical chemistry[J]. Journal of Nanostructure in Chemistry, 2023, 13(1): 1-41.

[19] 张志成, 张美荣. 耐高温聚合物基储能电介质材料的研究进展[J]. 高电压技术, 2024, 50(6): 2309-2318.

[20] DUAN G Y, HU F Y, HE Y R, et al. Polymer dielectrics enabled by molecular engineering design and charge trap regulation for high-temperature energy storage[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2026, 14(1): 548-559.

[21] YU X, XU X, YANG R, et al. Enhanced high-temperature capacitive energy storage in PMIA-based dielectric films by tailoring a short-range ordered conformation[J]. Journal of Materials Chemistry A, 2025, 13(20): 14646-14654.

[22] SONG B, REN M, LIU Y J, et al. Tailoring the electron free path in an ultra-lightweight gas-solid composite insulation system for high dielectric strength[J]. Composites Part B: Engineering, 2024, 278: 111429.

[23] YADAV A, KUMAR M, SHARMA A. Advances in boron nitride nanostructures: From h-BN to BN nanotubes and quantum dots for energy applications[J]. CrystEngComm, 2025, 27(38): 6250-6273.

[24] ZENG T, MENG L, CHENG L, et al. Scalable hybrid films of polyimide-animated quantum dots for high-temperature capacitive energy storage utilizing quantum confinement effect[J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(16): 2419278.

[25] SONG J H, QIN H M, QIN S Y, et al. Alicyclic polyimides with large band gaps exhibit superior high-temperature capacitive energy storage [J]. Materials Horizons, 2023, 10(6): 2139-2148.