

等离子体处理技术增强 BOPP 薄膜的电性能

周希, 陈文雄, 潘萌, 张扬, 董丽杰

(武汉理工大学 材料科学与工程学院, 湖北 武汉 430070)

摘要: 双向拉伸聚丙烯 (BOPP) 具有极高的能量转换效率和超高的功率密度, 但低介电常数制约了其储能性能, 极大限制了 BOPP 电容器在能源存储、智能制造和航天航空等领域的进一步应用。采用氧等离子体处理工艺进行表面改性, 显著提升了 BOPP 薄膜表面的含氧基团数量和亲水性。系统探究了等离子体处理时间对表面改性 BOPP 薄膜电性能的影响。结果表明: 随着等离子体处理时间延长, 薄膜相对介电常数由 2.20 提升至 2.37; 当处理时间为 5 min 时, 薄膜的击穿强度提升至 $785.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 放电能量密度提升至 $6.78 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。该工作为高储能性能电介质薄膜的研制提供了新思路。

关键词: 等离子体处理; 聚丙烯; 介电性能; 击穿强度; 储能密度

中图分类号: TM215.3

文献标识码: A

DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2025.0036

引用格式: 周希, 陈文雄, 潘萌, 等. 等离子体处理技术增强 BOPP 薄膜的电性能 [J]. 电子元件与材料, 2025, 44(10): 1145-1152.

Reference format: ZHOU Xi, CHEN Wenxiong, PAN Meng, et al. Enhanced electrical properties of BOPP films by plasma treatment [J]. Electronic Components and Materials, 2025, 44(10): 1145-1152.

Enhanced electrical properties of BOPP films by plasma treatment

ZHOU Xi, CHEN Wenxiong, PAN Meng, ZHANG Yang, DONG Lijie

(School of Materials Science and Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

Abstract: Biaxially oriented polypropylene (BOPP) exhibits superior energy conversion efficiency and remarkable power density. However, its inherently low dielectric constant fundamentally limits its energy storage capacity, thereby impeding its applications in power storage systems, smart manufacturing, and aerospace engineering. In this study, oxygen plasma treatment was systematically employed to modify the surface of BOPP films, which effectively increased the number of oxygen-containing functional groups on the film surface and enhanced its hydrophilicity. Subsequently, the electrical properties of the modified BOPP films were comprehensively characterized, and the influence of plasma treatment time on these properties was quantitatively investigated. The results indicate that with the extension of plasma treatment time, the dielectric constant of BOPP films increased monotonically from 2.20 to 2.37. When the treatment time was 5 min, the breakdown strength and discharge energy density of the modified films reached $785.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ and $6.78 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$, respectively. This work provides a feasible and novel strategy for the development of dielectric films with high energy storage performance, laying a foundation for their broader application in the advanced energy storage scenarios.

Keywords: plasma treatment; polypropylene; dielectric properties; breakdown strength; energy density

聚合物薄膜电容器具有极高的能量转换效率和超高的功率密度, 在能源存储、智能制造和航天航空等领域发挥着至关重要的作用^[1-4]。随着电子电力系统向智能化、集成化和小型化方向快速发展, 薄膜电容

收稿日期: 2025-01-21

基金项目: 湖北省重点研发计划(2023BAB104)

通信作者: 张扬, 高级实验师, 博士, 研究方向为聚合物电介质材料。E-mail: wuhanzy@whut.edu.cn

董丽杰, 教授, 博士, 研究方向为先进复合材料。E-mail: dong@whut.edu.cn

器的功能化和多样化需求日益增加,对电介质材料提出了更高的要求^[5-6]。双向拉伸聚丙烯(BOPP)凭借其低介电损耗、高击穿电场和高充放电效率等优异特性,成为目前应用最广泛的商业化电介质薄膜材料^[7]。然而,商用BOPP的低介电常数严重限制了其储能性能,导致电容器体积增大,难以满足现代电子电力系统的发展需求^[8]。

为提升聚丙烯的介电储能性能,研究人员开展了大量探索性工作。使用功能填料填充聚合物基体是一种常见策略,通过填料与聚合物界面区域产生的深陷阱限制电荷传输,从而改善材料的介电储能性能^[9]。例如,Zhu等^[10]通过在聚丙烯中引入质量分数0.10%的镧系功能填料(WBG),复合膜在 $581.6 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场下具有 $7.05 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高储能密度和99.6%的超高能量转换效率。Zhang等^[11]利用挤出成型工艺将聚丙烯与极性缺电子分子8-羟基喹啉(8-HQ)熔融共混制备了电介质材料。8-HQ分子能够捕获高电场下注入的电荷从而抑制漏电流,并促进晶粒生长,使所制备的电介质薄膜表现出 $9.87 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高储能密度。此外,还可通过在聚合物分子链中引入极性基团来调控电介质材料的储能性能。例如,通过在聚丙烯上接枝具有含氟基团的甲基丙烯酸三氟乙酯(TFEMA)制备得到接枝聚合物PP-g-TFEMA,其在 $800 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 电场下的放电能量密度高达 $8.20 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$,能量转换效率超过90.0%^[12]。然而,聚合物复合材料的制备通常涉及复杂的化学试剂和繁琐的工艺流程,高性能电介质薄膜的制备难以通过当前薄膜材料的制造工艺实现。因此,如何基于现有工艺,开发一种简单、高效且环境友好的改性方法,以进一步提升BOPP的介电储能性能,仍是当前该领域研究中的挑战^[13-14]。

等离子体处理工艺可以简单地通过控制等离子体处理条件(气体类型、处理功率、处理持续时间和工作压强)调控聚合物表面化学键,从而实现聚合物表面的可定制性^[15]。因此,本文以商用BOPP薄膜为研究对象,通过氧等离子体处理工艺对其进行表面改性。通过控制处理时间,在薄膜表面引入含氧极性官能团,显著提升了其介电储能性能。实验结果表明,经氧等离子体处理的BOPP薄膜在保持高击穿电场和低介电损耗的同时,其放电能量密度得到显著提升。本工作采用的氧等离子体处理工艺具有步骤简单、无需化学试剂等优点,为高储能性能电介质薄膜的研究提供了新思路。

1 实验材料及方法

1.1 样品制备

采用厚度为 $6.7 \mu\text{m}$ 的BOPP薄膜,购自武汉欣申试化工科技有限公司。将薄膜裁剪为 $10 \text{ cm} \times 10 \text{ cm}$ 尺寸,然后用乙醇洗涤并烘干。将烘干后的BOPP薄膜置于赛奥特科技有限公司YZD08-2C型等离子体清洗机中,选择氧气为处理气体,设置处理功率为50 W,并将处理时间分别设置为0.5, 1, 3, 5, 10和20 min。

1.2 结构表征

(1) X射线光电子能谱(XPS)测试:采用美国Thermo, EscaLab 250Xi型X射线光电子能谱仪。

(2) 傅里叶红外光谱(FTIR)测试:采用美国Thermo, Nicolet 6700型红外光谱仪,测试范围为 $4000 \sim 400 \text{ cm}^{-1}$ 。

(3) X射线衍射(XRD)测试:采用德国Bruker, D8 Advance型X射线衍射分析仪,扫描速度为 $2(^{\circ}) \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(4) 差示扫描量热(DSC)测试:采用美国TA, DSC 2500型差示扫描量热仪,采用 N_2 为保护气,升温速率为 $5^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(5) 热重(TG)测试:采用德国NETZSCH, STA 449 F3 Jupiter型同步热分析仪,采用 N_2 为保护气,升温速率为 $5^{\circ}\text{C} \cdot \text{min}^{-1}$ 。

(6) 原子力显微镜(AFM)测试:采用美国VEECO, Nanoscope IV型原子力显微镜,扫描面积为 $10 \mu\text{m} \times 10 \mu\text{m}$ 。

1.3 介电性能测试

采用北京格微仪器有限公司GVC-2000P型磁控离子溅射仪将薄膜双面喷金,电极面积为 4.52 mm^2 。介电常数和介电损耗采用精密数字LCR表(Agilent, E4980A)室温测试,测试频率范围为 $100 \text{ Hz} \sim 2 \text{ MHz}$ 。由LCR表得到电容 C 数据,再通过下列公式计算介电常数(ϵ_r):

$$\epsilon_r = \frac{Cd}{\epsilon_0 S} \quad (1)$$

式中:真空介电常数 $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12} \text{ F} \cdot \text{m}^{-1}$; C 为薄膜样品测试所得电容值; d 为薄膜样品厚度; S 为样品电极面积。

1.4 击穿性能测试

采用华仪电子股份有限公司的7474型直流耐压测

试系统测试击穿强度, 电压上升速率为 $500 \text{ V} \cdot \text{s}^{-1}$ 。使用双参数 Weibull 分布对薄膜的击穿性能进行评估, 并通过下列公式计算出理论击穿场强:

$$P(E) = 1 - \exp[1 - (E / E_b)^\beta] \quad (2)$$

式中: $P(E)$ 表示累计击穿概率; E 表示测试所得外加电场强度; E_b 表示累计击穿概率为 63.5% 对应的击穿强度; β 表示用于评估数据分散性的形状参数^[16]。

1.5 储能性能测试

采用美国 Radiant 公司 Premier II 型铁电测试系统在室温下于硅油内测试样品在不同电场作用下的电位移-电场(D - E)回线, 通过对 D - E 回线积分计算储能密度:

$$U = \int_{D_{\min}}^0 E dD \quad (3)$$

式中: E 表示在两金属电极之间施加的电场强度; D_{\max} 表示在电场下样品的最大电位移。

1.6 力学性能测试

采用美国 Instron Corporation 公司 Instron 5967 型电子万能材料试验机以 $5 \text{ mm} \cdot \text{min}^{-1}$ 的拉伸速率、搭配 500 N 传感器测试力学性能。

1.7 亲水性测试

采用盛鼎精密仪器有限公司 CSCDIC-100 型接触角测量仪对等离子体处理薄膜进行亲疏水性测试。测量时, 将去离子水水滴悬挂于针头, 下移针头使其与薄膜接触, 水接触角测量的结果取固液界面的平均角度。

2 结果与讨论

2.1 结构与形貌

不同等离子体处理时间 BOPP 膜的 XPS 谱图如图 1 所示。图 1(a) 中, 在约 532 eV 处的 O 1s 峰强度随等离子体处理时间的增加先增强, 后趋于稳定。由图 1(b) 和图 1(c) 可知, 等离子体处理会在 BOPP 薄膜表面诱导形成含氧极性基团, 其中 C-OH/C-O-C 和 O-C=O 的含量随着等离子体处理时间的增加先增加, 后趋于稳定, 如图 2 所示。等离子体处理导致薄膜表面部分共价键断裂形成高化学活性的自由基, 从而将氧原子引入分子链中, 生成 C-OH/C-O-C 和 O-C=O 等极性官能团^[13]。

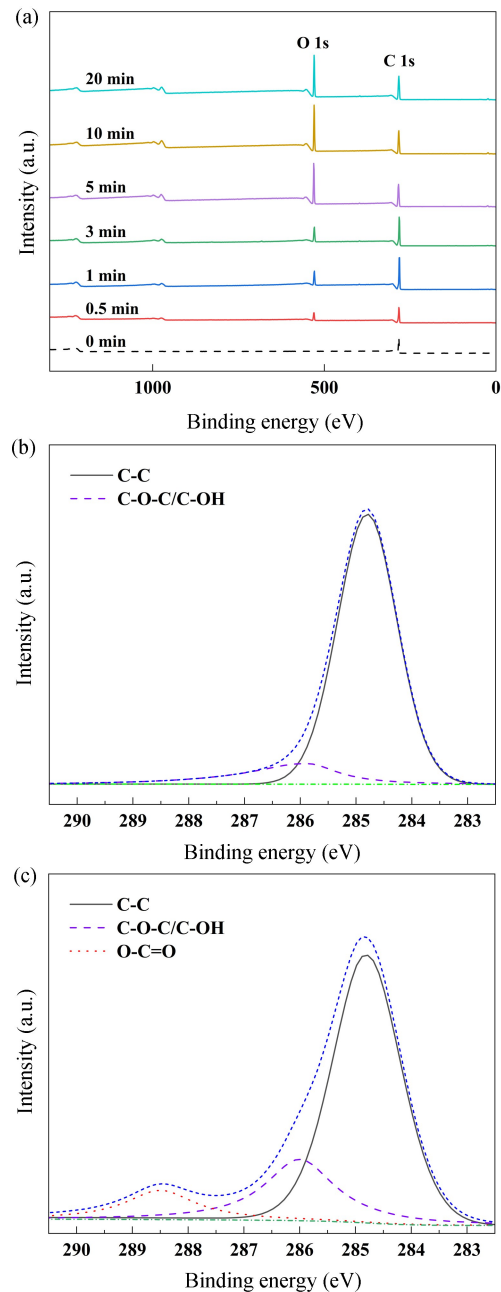


图 1 (a) 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 XPS 全谱图; (b) BOPP 薄膜的 C 1s 谱图和 (c) 等离子体处理 5 min 的 BOPP 薄膜的 C 1s 谱图

Fig. 1 (a) XPS full spectra of BOPP films with different plasma treatment time; C 1s spectra of (b) BOPP films and (c) plasma treated BOPP films for 5 min

如图 3 所示, 在 1715 cm^{-1} 处检测到较弱吸收峰, 表明在未经等离子体处理的 BOPP 薄膜中存在极少的 C=O。随着等离子体处理时间的增加, C=O 键对应的 1715 cm^{-1} 峰位吸收峰强度先增强, 后减弱。不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 XRD 图谱对比如图 4 所

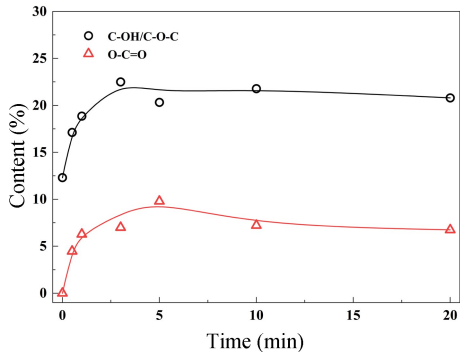


图2 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜含氧基团的含量
 Fig. 2 Content of O-containing groups of BOPP films with different plasma treatment time

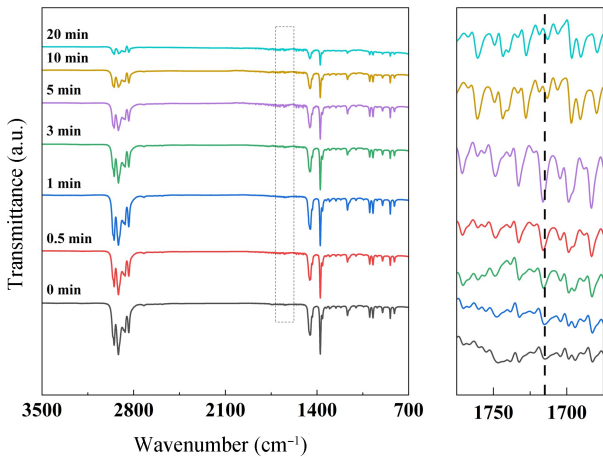


图3 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的红外光谱
 Fig. 3 FTIR spectra of BOPP films with different plasma treatment time

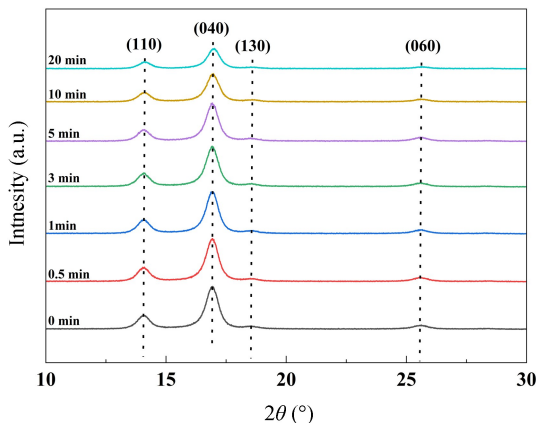


图4 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 XRD 图谱
 Fig. 4 XRD patterns of BOPP films with different plasma treatment time

示, 等离子体处理时间少于 5 min 时, BOPP 膜的晶面特征峰强度与位置无明显变化, 说明短时间的等离子

体处理并未影响 BOPP 的结晶结构。然而, 等离子体处理时间超过 5 min 后, α 晶的(040)晶面衍射峰强度明显降低。这是由于长时间的等离子体处理可能导致 BOPP 表面局部过热, 使其发生热降解或热氧化, 而热降解产生的低分子量物质可能干扰结晶过程^[17-18]。

如图 5(a)所示, DSC 曲线表明 BOPP 薄膜经等离子体改性处理后, 其熔融温度由 172 °C 下降至 168 °C。这是因为等离子体高能粒子轰击导致 BOPP 薄膜表层部分共价键断裂, 从而使分子量降低并导致链段迁移率提升, 最终降低材料熔点^[19]。图 5(b)的 TG 分析表明, 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的最大热失重温度稳定在 360 °C, 说明经等离子体处理后, 薄膜仍具有优异的热稳定性。

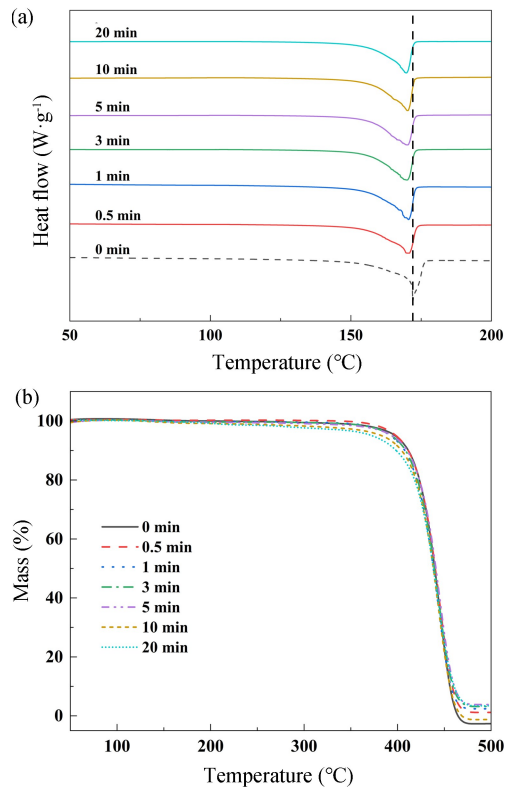


图5 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 (a) DSC 曲线和 (b) TG 曲线对比
 Fig. 5 The comparison of (a) DSC and (b) TG curves of BOPP films with different plasma treatment time

图 6 为不同等离子体处理时间下 BOPP 薄膜的 AFM 图。从图 6(a)可以看出, 未处理的 BOPP 薄膜表面形貌较为光滑平整, 且无明显缺陷。经等离子体处理后(图 6(b~d)), BOPP 薄膜表面受到刻蚀而形成均匀的沟壑结构, 且随着处理时间的增加逐渐加深, 这

是因为等离子体高能粒子轰击引发的表面降解。BOPP 薄膜表面的平均粗糙度 (R_a) 随着处理时间的增加先增大后趋于稳定, 如图 7 所示。等离子体放电技术能够均匀处理薄膜表面, 不会对表面电荷分布产生较大影响, 且有利于提升薄膜材料的粘附性能, 进而提高金属层的附着力。然而, 薄膜表面粗糙度过高可能促进电荷载流子的注入和空间电荷的积累而导致局部电场增强, 从而增加其击穿风险, 因此需要合理控制等离子体处理的时间^[20]。

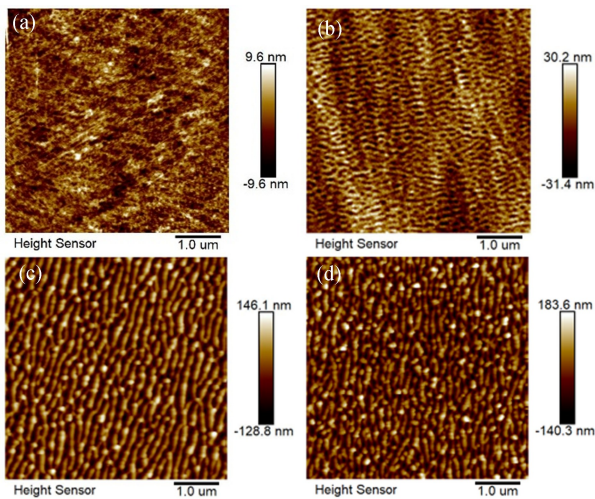


图 6 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 AFM 图。(a) 0 min; (b) 0.5 min; (c) 3 min; 和 (d) 5 min

Fig. 6 AFM images of BOPP films with different plasma treatment time. (a) 0 min; (b) 0.5 min; (c) 3 min; (d) 5 min

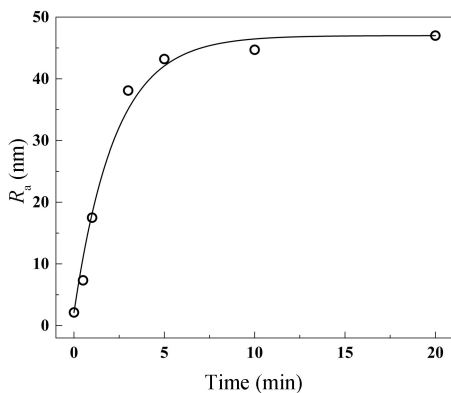


图 7 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的表面粗糙度

Fig. 7 Surface roughness of BOPP films with different plasma treatment time

如图 8 所示, 静态水接触角测试显示, BOPP 薄膜表面的亲水性在等离子体处理后发生显著改变。随着等离子体处理时间的增加, BOPP 薄膜表面润湿性

发生显著变化, 从 BOPP 的 88.8° 降低到处理时间 20 min 时的 28.2° , 降幅达 68.2%, 表明薄膜亲水性增加。这种亲水性改变归因于等离子体处理在 BOPP 表面同时引入了含氧极性基团 ($-\text{OH}$ 、 $\text{C}=\text{O}$ 等) 和纳米级沟壑结构。在一定范围内, 聚合物表面亲水性的增加和表面附着力的提高, 有利于提高金属层和聚合物之间的粘附强度^[21-22]。

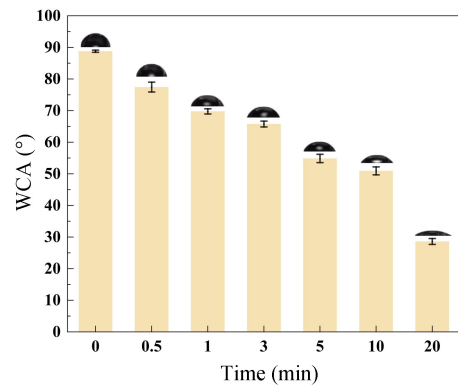


图 8 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的水接触角

Fig. 8 Water contact angles of BOPP films with different plasma treatment time

2.2 介电储能性能

等离子体处理时间对 BOPP 薄膜介电性能的影响如图 9 所示。从图 9(a) 可知, 经等离子体处理后 BOPP 薄膜的介电常数有所提高, 且介电损耗保持在较低水平。如图 9(b) 所示, 当等离子体处理时间增加到 20 min 时, 在 1 kHz 下的相对介电常数从 2.20 增加到 2.37, 增加了 7.7%。这是由于 $\text{C}-\text{OH}/\text{C}-\text{O}-\text{C}$ 和 $\text{O}-\text{C}=\text{O}$ 在外加电场下促进了取向极化, 从而增强了聚合物电介质的极性^[23-24]。等离子体处理会使 BOPP 的介电损耗略有提高, 这源于外加电场下偶极取向的摩擦, 但在 1 kHz 时, BOPP 薄膜的介电损耗均低于 0.002。等离子体处理后的 BOPP 薄膜介电常数和介电损耗随频率的升高未发生明显变化, 表明薄膜具有良好的频率稳定性。

图 10(a) 为不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的电击穿强度 Weibull 分布。不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的形状参数 β 值均大于 19, 表明测试数据具有优异的可靠性。随着等离子体处理时间的增加, BOPP 薄膜的击穿强度先增大后减小。在等离子体处理时间为 5 min 时, 击穿强度提升至 $785.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 较未处理的 BOPP 薄膜 ($708.1 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$) 提升了 11%。

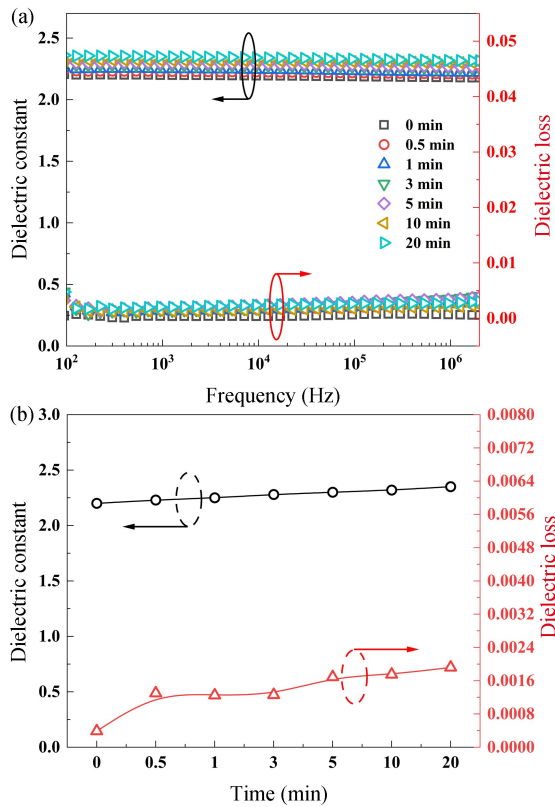


图9 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 (a) 不同频率下和 (b) 1 kHz 下的介电常数与介电损耗
 Fig. 9 Dielectric constant and dielectric loss (a) at different frequencies and (b) at 1 kHz of BOPP films with different plasma treatment time

根据机电击穿机理, 当外加电场引起的库仑力超过聚合物的屈服力时会发生击穿, 因此, 具有高杨氏模量的薄膜材料抵抗该库仑力的能力更强^[25]。如图 10 (b) 所示, 随着等离子体处理时间的增加, BOPP 薄膜的杨氏模量先增加后减小, 从 BOPP 的 1773 MPa 增加到等离子体处理时间 5 min 的 2169 MPa, 然后降低到等离子体处理时间 20 min 的 1525 MPa。这是因为含氧极性基团的引入使聚丙烯分子链之间形成了一定的交联网络结构, 从而提升了 BOPP 薄膜的杨氏模量^[26-28]。较短时间的等离子体处理有助于提升 BOPP 薄膜的击穿性能, 但是长时间的等离子体处理会使分子链降解而导致力学性能下降, 从而影响薄膜的击穿性能^[29-30]。

由图 10 (c) 可知, 在室温 $100 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$ 下, BOPP 薄膜经等离子体处理后漏电流密度从 $5.4 \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$ 降低至 $1.4 \times 10^{-9} \text{ A} \cdot \text{cm}^{-2}$, 降低了约 4 倍。这可能是由于等离子体处理引入的含氧极性基团在 BOPP 薄膜中形成了深陷阱, 从而阻碍了载流子的传输, 这有利于提升薄膜的击穿强度^[14]。

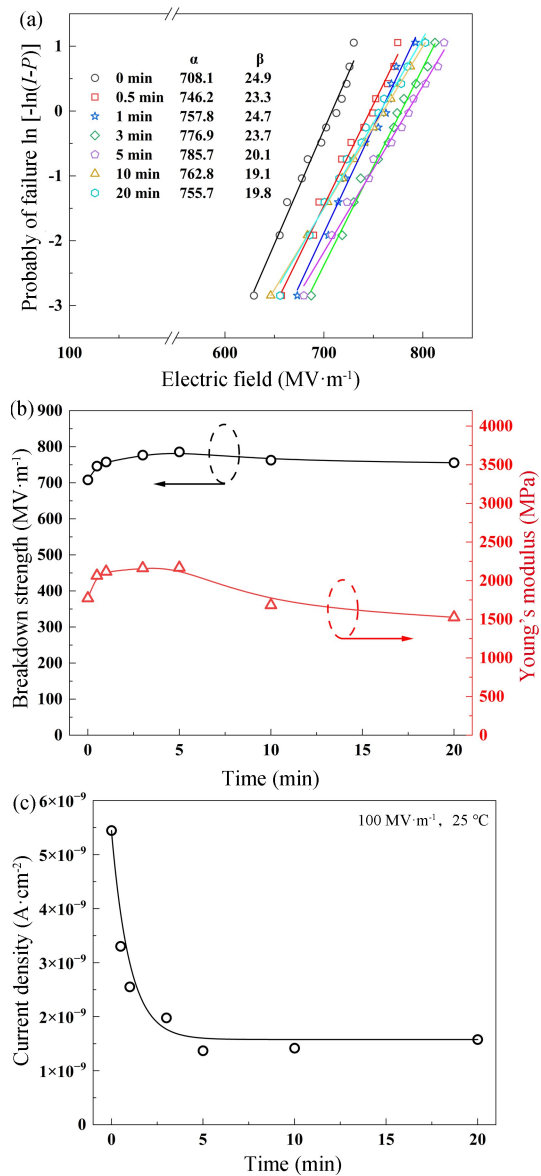


图 10 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 (a) Weibull 击穿强度, (b) 击穿强度和杨氏模量, (c) 漏电流密度
 Fig. 10 (a) Weibull breakdown strength, (b) breakdown strength and Young's modules, and (c) leakage current density of BOPP films with different plasma treatment time

图 11 为不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的储能性能。如图 11 (a) 所示, 等离子体处理后的 BOPP 薄膜表现出更高的电位移。例如, 当等离子体处理时间为 5 min 时, BOPP 的最大电位移 (D_{max}) 为 $1.79 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$, 是未处理 BOPP 膜 ($1.38 \mu\text{C} \cdot \text{cm}^{-2}$) 的 1.3 倍。值得注意的是, BOPP 薄膜经等离子体处理后的剩余电位移 (D_r) 无明显增大, 且 η 保持在 95.0% 以上。图 11 (b) 总结了不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的储能密度和储能效率随电场强度的变化情况。在 Weibull 击穿

强度下, 等离子体处理时间为 5 min 的 BOPP 薄膜的储能密度为 $6.78 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$, η 为 95.4%, 相较于未经处理的 BOPP 薄膜的储能密度 ($4.92 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$), 提升约 37.8%。

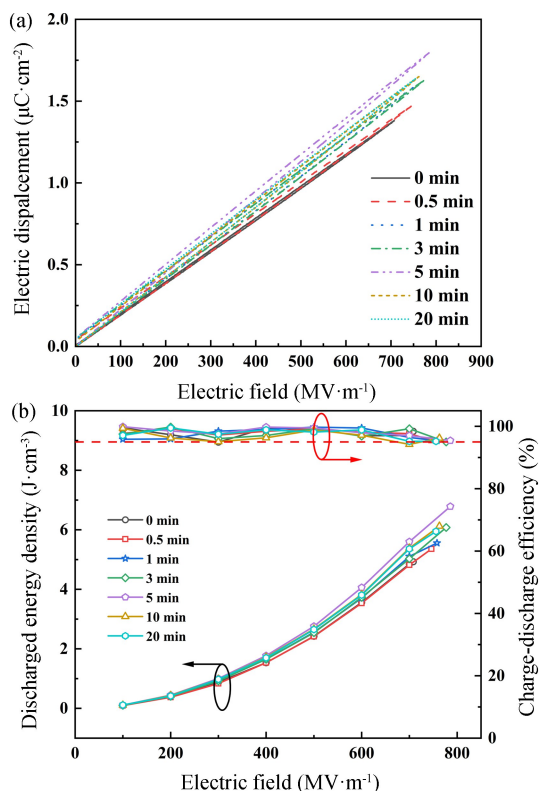


图 11 不同等离子体处理时间 BOPP 薄膜的 (a) Weibull 击穿强度下的 $D-E$ 曲线和 (b) 放电能量密度和储能效率随电场的变化

Fig. 11 (a) $D-E$ loops at Weibull breakdown strength and (b) the electric field-dependent discharge energy density and energy storage efficiency of BOPP films with different plasma treatment time

3 结论

BOPP 薄膜经等离子体处理后, 其介电常数和击穿性能均得到了提高, 并保持了较低的介电损耗。当等离子体处理时间为 5 min 时, BOPP 薄膜的击穿强度提升至 $785.7 \text{ MV} \cdot \text{m}^{-1}$, 并具有 $6.78 \text{ J} \cdot \text{cm}^{-3}$ 的高能量密度和 95.4% 的充放电效率。等离子体处理在薄膜表面形成的含氧极性官能团提供了深陷阱, 阻碍了电荷迁移。该方法不涉及化学溶剂, 可直接应用于商用 BOPP 薄膜, 为高储能性能电介质薄膜的研制提供了新途径。

参考文献:

- [1] 成桑, 李雨抒, 梁家杰, 等. 介电高分子及其纳米复合材料的电容储能应用 [J]. 高分子学报, 2020, 51(5): 469-483.
- [2] Chen J, Zhou Y, Huang X, et al. Ladderphane copolymers for high-temperature capacitive energy storage [J]. Nature, 2023, 615(7950): 62-66.
- [3] Li Q, Chen L, Gadinski M R, et al. Flexible high-temperature dielectric materials from polymer nanocomposites [J]. Nature, 2015, 523(7562): 576-579.
- [4] Yang M, Guo M, Xu E, et al. Polymer nanocomposite dielectrics for capacitive energy storage [J]. Nature Nanotechnology, 2024, 19(5): 588-603.
- [5] He Q, Sun K, Shi Z, et al. Polymer dielectrics for capacitive energy storage: From theories, materials to industrial capacitors [J]. Materials Today, 2023, 68: 298-333.
- [6] Tan D Q. Review of polymer-based nanodielectric exploration and film scale-up for advanced capacitors [J]. Advanced Functional Materials, 2020, 30(18): 1808567.
- [7] Liang Y, Xu J, Sun W, et al. Sulfonyl manipulation for enhancing energy storage of flexible epoxy based capacitive films [J]. Chemical Engineering Journal, 2024, 484: 149458.
- [8] Feng Q K, Zhong S L, Pei J Y, et al. Recent progress and future prospects on all-organic polymer dielectrics for energy storage capacitors [J]. Chemical Reviews, 2022, 122(3): 3820-3878.
- [9] Li H, Ai D, Ren L, et al. Scalable polymer nanocomposites with record high-temperature capacitive performance enabled by rationally designed nanostructured inorganic fillers [J]. Advanced Materials, 2019, 31(23): 1900875.
- [10] Zhu X, Chen W, Pan M, et al. Enhanced energy storage properties of polypropylene through crystallization modulation [J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(8): 4808-4817.
- [11] Ma D, Hou J, Zhang G, et al. Significantly enhancing the energy-storage properties of polypropylene films by physically manipulating their permittivity and crystalline behavior with polar organic molecules [J]. Advanced Functional Materials, 2025, 35(37): 2418631.
- [12] Li W, Wang Q, Zhang G, et al. Ultrahigh energy density achieved at high efficiency in dielectric capacitors by regulating α -phase crystallization in polypropylene films with fluorinated groups [J]. Advanced Functional Materials, 2024, 34: 2410959.
- [13] Huang B, Yu J, Dong J, et al. Improving charge storage of biaxially-oriented polypropylene under extreme electric fields by excimer UV irradiation [J]. Advanced Materials, 2024, 36: 2311713.
- [14] Wang Y, Bao Z, Ding S, et al. γ -ray irradiation significantly enhances capacitive energy storage performance of polymer dielectric films [J]. Advanced Materials, 2024, 36(16): 2308597.
- [15] Leroux F, Campagne C, Perwuelz A, et al. Polypropylene film chemical and physical modifications by dielectric barrier discharge plasma treatment at atmospheric pressure [J]. Journal of Colloid and

- Interface Science, 2008, 328(2): 412–420.
- [16] Li L, Cheng J, Cheng Y, et al. Significantly enhancing the dielectric constant and breakdown strength of linear dielectric polymers by utilizing ultralow loadings of nanofillers [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2021, 9(40): 23028–23036.
- [17] Zhang L, Zhou Y, Mo Y, et al. Dielectric property and charge evolution behavior in thermally aged polyimide films [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2018, 156: 292–300.
- [18] Chi Q, Wang Y, Zhang C, et al. Electrothermal aging of all-organic PEI/ITIC composite films for dielectric energy storage [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation*, 2024, 31(2): 772–778.
- [19] Jamalzadeh M, Ngendahimana T, Sobkowicz M J. Correlating color with free radical concentration in irradiated poly (ethylene terephthalate) [J]. *Polymer*, 2024, 312: 127656.
- [20] Song G, Wang Y, Tan D Q. A review of surface roughness impact on dielectric film properties [J]. *IET Nanodielectrics*, 2022, 5(1): 1–23.
- [21] Gong L, Xiang L, Zhang J, et al. Fundamentals and advances in the adhesion of polymer surfaces and thin films [J]. *Langmuir*, 2019, 35(48): 15914–15936.
- [22] Tanaka K, Stossel M, Jiang H, et al. Engineering the interface: Effects of interfacial adhesion and substrate thickness on the ductility of polymer-supported metal films [J]. *Experimental Mechanics*, 2022, 62(1): 49–58.
- [23] Zha J W, Tian Y, Zheng M S, et al. High-temperature energy storage polyimide dielectric materials; Polymer multiple-structure design [J]. *Materials Today Energy*, 2023, 31: 101217.
- [24] Liu J, Li M, Zhao Y, et al. Manipulating H-bonds in glassy dipolar polymers as a new strategy for high energy storage capacitors with high pulse discharge efficiency [J]. *Journal of Materials Chemistry A*, 2019, 7(33): 19407–19414.
- [25] Palumbo F, Wen C, Lombardo S, et al. A review on dielectric breakdown in thin dielectrics: Silicon dioxide, high-k, and layered dielectrics [J]. *Advanced Functional Materials*, 2020, 30(18): 1900657.
- [26] Chung T. Functionalization of polypropylene with high dielectric properties: Applications in electric energy storage [J]. *Green and Sustainable Chemistry*, 2012, 2: 29–37.
- [27] Deng J, Bai R, Zhao J, et al. Insights into the correlation of cross-linking modes with mechanical properties for dynamic polymeric networks [J]. *Angewandte Chemie International Edition*, 2023, 62(37): e202309058.
- [28] Yang Z, Yang Y, Liang H, et al. Robust liquid crystal semi-interpenetrating polymer network with superior energy-dissipation performance [J]. *Nature Communications*, 2024, 15(1): 9902.
- [29] Jamalzadeh M, Sobkowicz M J. Review of the effects of irradiation treatments on poly(ethylene terephthalate) [J]. *Polymer Degradation and Stability*, 2022, 206: 110191.
- [30] Huang X, Zhang S, Zhang P, et al. Autonomous indication of electrical degradation in polymers [J]. *Nature Materials*, 2024, 23(2): 237–243.