第 52 卷 第 6 期：2545-2553 高电压技术 Vol.52, No.6: 2545-2553
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250668

支链结构对流延和双向拉伸聚丙烯薄膜介电储能特性的影响

于是乎[1]，刘培焱[2]，彭向阳[1]，周　彬[2]，李银格[1]，冯　阳[2]，李盛涛[2]
（1. 广东省电力装备可靠性重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院)，广州 510080;
2. 西安交通大学科技与教育发展研究院，西安 710049）

摘　要：聚丙烯(PP)作为薄膜电容器中的核心材料，接枝改性将对其性能产生显著影响。为了研究支链结构对 PP 结晶和介电储能特性的影响，采用固相接枝法接枝了马来酸酐(MAH)和聚醚酰亚胺(PEI)，并基于电容器薄膜生产工艺制备了流延膜和双向拉伸薄膜。结果表明，极性基团的引入能够充分提高 PP 的极性，使相对介电常数增加。同时，接枝改性引入的支链结构能够降低流延膜的晶面间距，而接枝 PEI 后的长支链结构则使 PP 分子缠结更加紧密，晶面间距保持最小。双向拉伸后，PP 分子链将解缠且排布更加有序，引起结晶度的上升，表现为直流击穿场强的增加。在拉伸应力下，接枝 PEI 后的长支链结构导致 PP 分子链缠结位点始终存在，引起分子链断裂，排布更加松散，因而晶面间距增大，直流击穿场强提升幅度较小。综合相对介电常数和直流击穿场强的变化情况，接枝 MAH 的双向拉伸薄膜表现出最优的储能特性，放电能量密度相较于 PP 提升了 29.8%，充放电效率始终保持在 90%以上。研究结果为 PP 接枝改性基团的选择提供了一定的指导。

关键词：支链结构；接枝改性；双向拉伸；晶面间距；直流击穿强度；储能特性

Impact of Branch Chain Structure on the Crystallization and Dielectric Energy Storage Properties of Polypropylene Film

YU Shihu[1], LIU Peiyan[2], PENG Xiangyang[1], ZHOU Bin[2], LI Yinge[1], FENG Yang[2], LI Shengtao[2]
(1. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd.), Guangzhou 510080, China;
2. Institute of Science, Technology and Education Development, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: As the core material in film capacitors, graft modification has a significant impact on the properties of polypropylene (PP). In order to study the influence of branched chain structure on the crystallization and dielectric energy storage properties of PP, maleic anhydride (MAH) and polyetherimide (PEI) were grafted by a solid-phase grafting method, and cast films and biaxial films were prepared based on the production process of capacitor films. The results show that the introduction of polar groups can enhance the polarity of PP and increase the dielectric constant. Meanwhile, the branched chain structure introduced by grafting modification can reduce the interplanar spacing of cast films, while the long branched chain structure after grafting PEI makes the entanglement of PP's molecule chains tighter and keeps the interplanar spacing at the minimum. After biaxial stretching, PP's molecular chains can untangle and be arranged more orderly, causing an increase in crystallinity, which is manifested as an increase in the DC breakdown strength. Under the tensile stress, the long branched chain structure after grafting PEI leads to the presence of entanglement sites in PP's molecular chains, causing them to break and the arrangement to loose. As a result, the interplanar spacing increases, which makes the increase of DC breakdown strength relatively small. Considering the variations of dielectric constant and DC breakdown strength, the biaxially oriented film grafted with MAH exhibits the optimal energy storage properties. Its discharge energy density is increased by 29.8% compared to PP, and the charge and discharge efficiency remains above 90%. This research provides a certain guidance for the selection of grafting modification groups for PP.

Key words: branched chain structure; grafting modification; biaxial stretching; interplanar spacing; DC breakdown strength; energy storage properties

基金资助项目：南方电网公司科技项目(030000KC23120110(GDKJXM20231538))。
Project supported by Science and Technology Project of CSG(030000KC23120110(GDKJXM20231538)).

0 引言

在现代电子设备以及动力系统不断向高性能、高效率方向迈进的背景下，各行各业对高性能储能材料的需求呈现出了与日俱增的态势。储能材料作为各类能量转换与存储系统的关键组成部分[1-2]，其性能的优劣直接关系到整个系统的运行效率和稳定性。在众多储能材料中，聚丙烯(polypropylene，PP)电介质材料因其独特的优势，在新能源汽车、航空航天、军事装备和电力系统等领域备受关注[3-4]。因此，开发具有优异介电性能的聚合物电介质，已成为当前科学研究的关键方向之一。

作为一种常见的聚合物材料，PP 凭借其击穿强度高、成本低廉和柔韧性好等诸多优点，在储能电容器领域得到了较为广泛的应用[5-7]。然而，PP 本身存在介电常数较低这一固有缺陷，这在很大程度上限制了其储能密度的提升，难以有效满足高性能电容器的要求[8-9]。为了突破这一局限，近年来，众多学者积极探索了多种提升 PP 介电性能的策略。其中，添加高介电常数填料是一种较为直接的方法，通过在 PP 基体中引入如金属氧化物、钛酸盐等具有高介电常数的无机填料，可以在一定程度上提高 PP 复合材料的介电常数[10-12]，从而增强其储能特性。然而，这种方法也可能带来一些负面影响，例如填料的团聚现象可能导致材料的机械性能下降，以及在高电场下可能引发局部放电等问题，从而影响材料的介电性能和长期稳定性[13-15]。此外，PP 的化学改性也是提升其介电性能的重要途径之一。化学改性可以通过改变 PP 分子链的结构和化学组成，调节其极性基团的数量和分布，进而提高介电常数。例如，采用等离子体处理、辐射接枝等方法可以在 PP 表面或分子链上引入具有极性的官能团，如羧基、羟基等，从而增强其电荷捕获能力，进而增强其电气性能[16-17]。然而，这类化学改性方法在实际应用中，往往面临着改性程度难以精确控制、改性后材料的长期稳定性差等问题，需要进一步深入研究和优化。

在众多提升 PP 介电性能的策略中，接枝 PP 的合成方法展现出较大的潜力。接枝改性是通过在 PP 主链上引入功能基团或其他单体，形成具有特殊结构和性能的接枝共聚物[18]。这种接枝共聚物不仅保留了 PP 原有的优良特性，还能通过接枝的功能基团显著改善其介电性能。马来酸酐(maleic anhydride，MAH)、苯乙烯(styrene，St)和甲基丙烯酸甲酯(methyl methacrylate，MMA)等接枝基团已被广泛应用于提高 PP 与其他材料的界面相容性和介电储能特性[13-14,19]。接枝不同的基团会导致 PP 的支链结构出现差异，这对 PP 的结晶和介电储能特性将产生不同的影响，然而目前关于相关方面的研究仍然较少。功能单体的引入对聚丙烯拉伸过程中分子链排布的影响尚不明确，长短支链结构对聚丙烯介电储能特性的影响仍待研究。基于此，本研究聚焦于支链结构对 PP 薄膜性能的影响机制，通过在 PP 主链上引入不同支链长度的极性基团(马来酸酐和聚醚酰亚胺)，系统探究支链结构在不同加工工艺下(流延和双向拉伸)对 PP 薄膜结晶特性(如晶面间距、结晶度)以及介电储能特性(包括相对介电常数、直流击穿场强、放电能量密度和充放电效率)的作用规律，旨在填补这一研究领域的空白，为 PP 接枝改性优化提供理论依据和技术指导。

1 实验准备

1.1 原料

PP(型号 HC300BF)作为基体材料，其余原料有：MAH、BPO、间苯二胺、4,4’-(4,4’-异丙基二苯氧基)二酞酸酐、N,N-二甲基乙酰胺(DMAc)、二甲苯和丙酮。

1.2 试样制备

PP 接枝 MAH(PP-*g*-MAH)合成：采用固相接枝法制备 PP-*g*-MAH。取 32 g PP 粒料置于体积比 1:1 的二甲苯和丙酮溶液中，并加入 0.112 g 的 BPO 和 0.64 g 的 MAH。105 ℃至 120 ℃的温度范围能有效保持引发剂 BPO 的活性，有利于生成更多的自由基，同时该温度可以保证接枝单体的活性，使接枝反应顺利进行。因此，将上述原料搅拌均匀后，向反应器中充入氮气，并在避光(BPO 遇光易分解)、105 ℃的条件下搅拌反应 3 h。反应结束后，用无水乙醇反复清洗接枝产物并进行抽滤，在 80 ℃烘箱中真空干燥 8 h 后得到 PP-*g*-MAH 粒料备用。该过程的反应式如图 1 所示。

PP 接枝 PEI(PP-*g*-PEI)合成：首先进行聚醚酰



图 1 PP-*g*-MAH 的接枝反应式

Fig.1 Grafting reaction scheme of PP-*g*-MAH

亚胺(PEI)的合成。以间苯二胺和 4,4’-(4,4’-异丙基二苯氧基)二酞酸酐为原料，在 DMAc 中充分搅拌，合成端氨基 PEI。在此基础上，以 DMAc 为溶剂，分别加入摩尔比 1.02:0.98 的间苯二胺和 4,4’-(4,4’-异丙基二苯氧基)二酞酸酐，以保证 4,4’-(4,4’-异丙基二苯氧基)二酞酸酐能够被充分反应，生成足够多的端氨基的 PEI。PP-*g*-PEI 的制备同样采用固相法。将 5 g PP-*g*-MAH、4.5 mmol 的端氨基 PEI 分别加入界面剂二甲苯中，搅拌均匀后，向反应器中充入氮气，并在 80 ℃下反应 3 h。反应结束后，用无水乙醇反复清洗接枝产物并进行抽滤，在 80 ℃烘箱中真空干燥 8 h 后得到 PP-*g*-PEI 粒料备用。该反应式如图 2 所示。

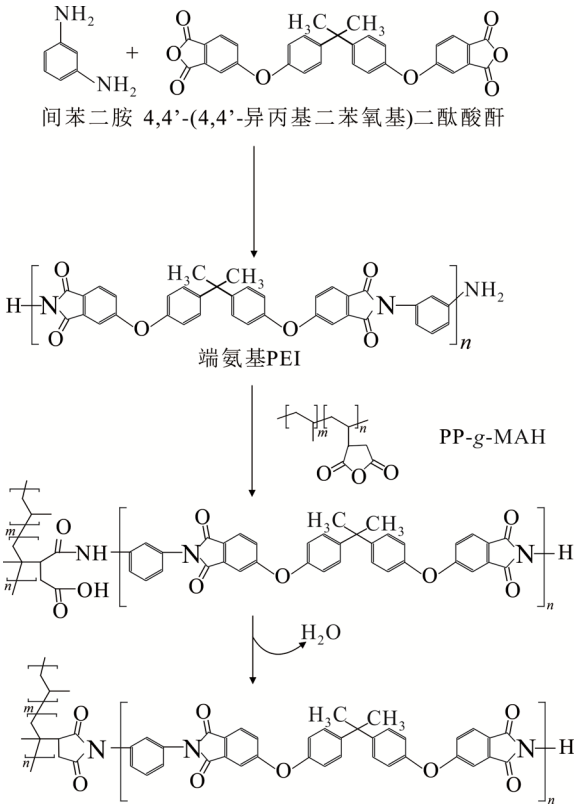


图 2 PP-*g*-PEI 的接枝反应式

Fig.2 Grafting reaction scheme of PP-*g*-PEI

薄膜制备：基于电容器薄膜的制备工艺流程，首先按照 9:1 的质量比，在桌面流延机中加入 PP 和接枝改性粒料，采用 2 300 目滤网、保持螺杆转速 65 r/min、热辊转速 2.5 m/min 进行熔融挤出，以调控流延膜的厚度为 100 μm。在此基础上，采用双向拉伸设备制备薄膜。保持保温温度 160 ℃、保温时间 60 s、拉伸倍率 2.5×2.5，得到 10 μm 左右的薄膜。根据接枝改性粒料的不同，分别将流延膜命名为 PP、PP-M 和 PP-E，双向拉伸薄膜命名为 BOPP、BOPP-M 和 BOPP-E。

1.3 实验方法

在结构表征方面，采用 Thermo Electron Nicolet iN10 型傅里叶红外光谱(FTIR)仪，表征接枝改性前后粒料的特征基团变化。测试选择透射模式，扫描波数范围为 500~4 000 cm^{-1}，扫描次数为 32 次。采用 D8 ADVANCEA25 型 X 射线衍射(XRD)仪，表征接枝改性对流延膜和双向拉伸薄膜结晶特性的影响，衍射角 2θ 测试范围为 5°~35°。

在性能测试方面，采用 Novocontrol Concept 80 型宽频介电谱仪，测试双向拉伸薄膜在交流扰动信号下的介电响应。测试频率为 10^{-1}~10^{6} Hz，测试电压均方根值为 1 V。为了保证试样与电极接触紧密，对薄膜表面进行喷金处理。薄膜上下表面喷金圆直径分别为 22 mm 和 25 mm。采用型直流击穿电源测试流延膜和双向拉伸薄膜的直流击穿强度，测试升压速率为 1 000 V/s。为了保证测试结果的有效性，各个薄膜试样测试 10 次以上。采用 Polyk FER-RO20B 型铁电测试设备，表征双向拉伸薄膜的储能特性，测试时施加单极性三角波电压，频率为 100 Hz。直流击穿、铁电测试均在硅油中进行，测试温度为 25 ℃(室温)和 80 ℃。

2 实验结果

2.1 FTIR 结果分析

采用 FTIR 谱图探究 PP 接枝前后分子结构的变化，以验证 PP 是否成功接枝 MAH 与 PEI。从图 3 中可以看出，PP-*g*-MAH 在 1 746.3 cm^{-1} 处出现环酸酐 C═O 对称伸缩振动峰[20]，表明 PP 成功接入了 MAH，引入了羰基极性基团。而 PP-*g*-PEI 的红外谱图相较于 PP-*g*-MAH，原有的环酸酐 C═O 对称

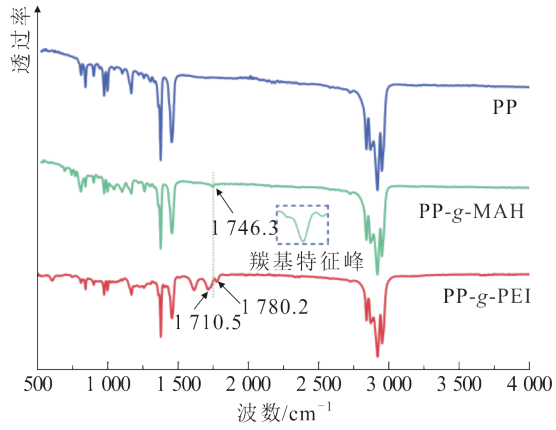


图 3 FTIR 红外光谱图

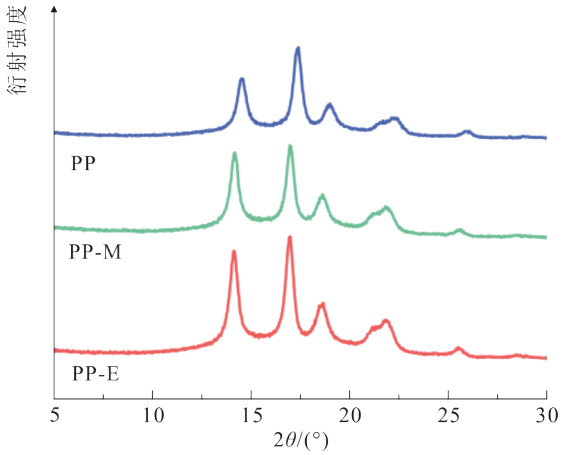
Fig.3 Fourier-transform infrared (FTIR) spectrum

伸缩振动峰发生消失，在 1 780.2 cm^{-1} 与 1 710.8 cm^{-1} 处出现了新的峰值。据文献[21-22]可知，1 710.8 cm^{-1} 对应酰胺基团上的 C═O 对称伸缩振动峰，这表明反应过程中羰基的谱带发生了变化。

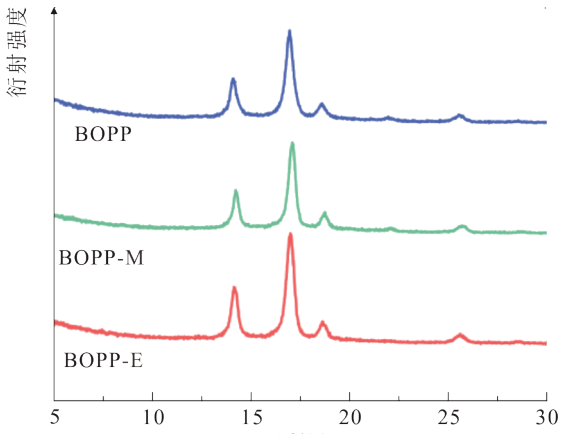
结合图 2，PP-*g*-MAH 接枝 PEI 的过程之中，MAH 上的 C—O 单键会被打开，并与 PEI 上的端氨基相结合形成酰胺中间体，该中间产物极不稳定，内部基团反应脱水后形成 PEI 接枝物，在这过程中原有的环酸酐 C═O 转变成了酰胺中 C═O，该过程与红外谱图结果相对应，表明 PP 在接枝 MAH 的基础上，成功接枝了 PEI。

2.2 XRD 结果分析

接枝改性前后流延膜和双向拉伸薄膜的 XRD 谱图如图 4 所示。图中各个衍射峰代表 PP 结晶区的不同晶面，而衍射峰下方的凸起区域则表示 PP 内部的无定形区。可以看出，双向拉伸后凸起区域的面积显著减小，说明双向拉伸可以促进 PP 分子链的有序排布，进而提升其结晶度。



(a) 流延膜XRD测试结果



(b) 双向拉伸膜XRD测试结果

图 4 XRD 谱图

Fig.4 The XRD pattern

晶面间距是指在晶体结构中，相邻两个平行晶面之间的距离。利用布拉格衍射方程可以求得不同材料的晶面间距，计算式如式(1)所示[23]。

$$d=\frac{n\lambda}{2\sin\theta} \tag{1}$$

式中：d 为晶面间距，nm；n 为衍射阶数，此处为 1 阶；t 为时间；λ 为常量，取 0.154 nm；θ 为衍射角。

对 17°附近的(040)晶面进行计算，结果如表 1 所示。对于流延膜，PP、PP-M、PP-E 三者的晶面间距依次减少，这是因为 PP-*g*-MAH 以及 PP-*g*-PEI 支链的引入，导致 PP 分子链上出现了较长的支链，这些支链的加入导致分子链分布更加紧密，片晶堆砌更加致密[24]。对于双向拉伸薄膜而言，BOPP-M 与 BOPP-E 呈现出不同的现象。PP-M 在双向拉伸后，晶面间距减小，这是因为 PP-*g*-MAH 的支链较短，PP 分子链之间的缠结现象较少，双向拉伸的过程中，分子链的解缠结充分，取向后的分子链排列更加规整，片晶进一步致密堆砌，因此晶面间距更小[25]。而 PP-*g*-PEI 作为一种长支链结构，在双向拉伸过程中解缠结不充分，缠结点在拉伸过程中依然存在，将会阻碍分子链的定向排布。在拉伸应力作用下，分子链发生断裂并产生更多分子短链，从而使分子链排布松散，在晶体结构中引入缺陷，导致晶面间距变大[26]。

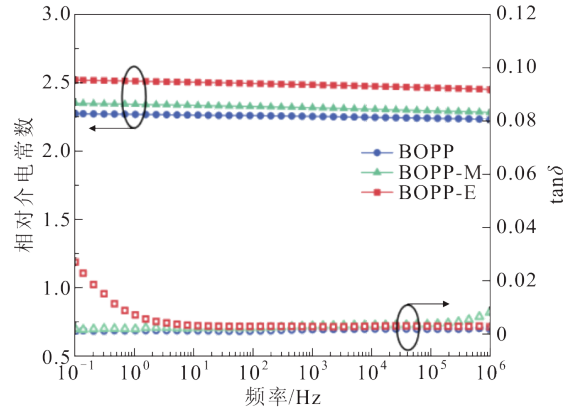
表 1 晶面间距计算结果

Table 1 The *d*-spacing values

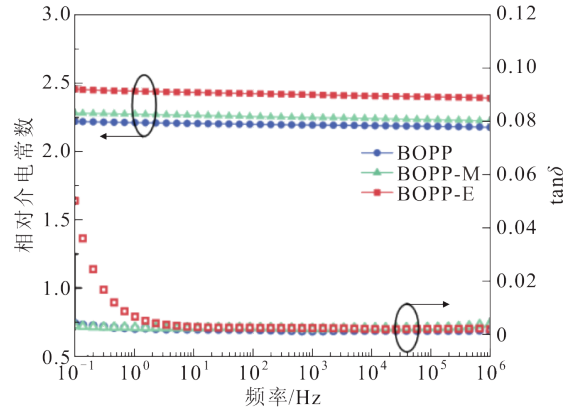
工艺	样品编号	晶面间距/nm
流延膜	PP	0.523 4
	PP-M	0.519 7
	PP-E	0.509 6
双向拉伸膜	PP	0.520 9
	PP-M	0.517 9
	PP-E	0.522 2

2.3 宽频介电谱结果分析

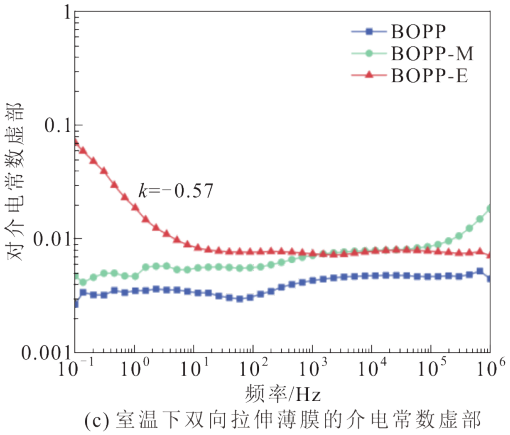
室温下 BOPP、BOPP-M、BOPP-E 的宽频介电谱如图 5 所示。结果表明，MAH 与 PEI 的引入可以提高 PP 的介电常数。MAH 与 PEI 上具有 C═O 等极性基团，在电场作用下，这些极性分子会顺着电场方向排列，形成偶极子。偶极子的转向极化能够有效增强材料的极化程度，从而提高相对介电常数。在低频情况下，PP-*g*-PEI 长支链的引入一定程度上增大了材料的介电损耗。相较于 PP-*g*-MAH，PP-*g*-PEI 的长支链结构使 PP 分子链间的运动更加复杂，包括分子链的伸展、蜷缩以及主链与支链之



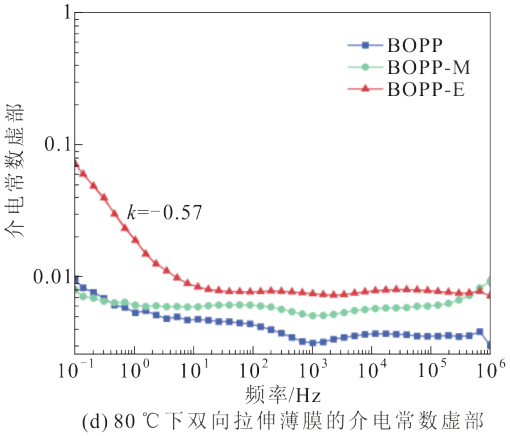
(a) 室温下双向拉伸薄膜的宽频介电谱



(b) 80 ℃下双向拉伸薄膜的宽频介电谱



(c) 室温下双向拉伸薄膜的介电常数虚部



(d) 80 ℃下双向拉伸薄膜的介电常数虚部

图 5 双向拉伸薄膜宽频介电谱

Fig.5 Broadband dielectric spectrum of the biaxially oriented film

间的相对运动等[27]。结合图 5(c)和 5 (d)可知，在低频区，BOPP-E 的介电常数虚部增大。对其斜率进行分析，发现斜率仅为–0.57，说明在低频下的损耗增大不是由电导损耗引起，而是由极性基团的转向极化占据主导作用[28]。当温度上升至 80 ℃时，分子热运动增加，松弛时间减小，引起 BOPP-E 内部极性基团的转向极化增强，介电损耗进一步增大。

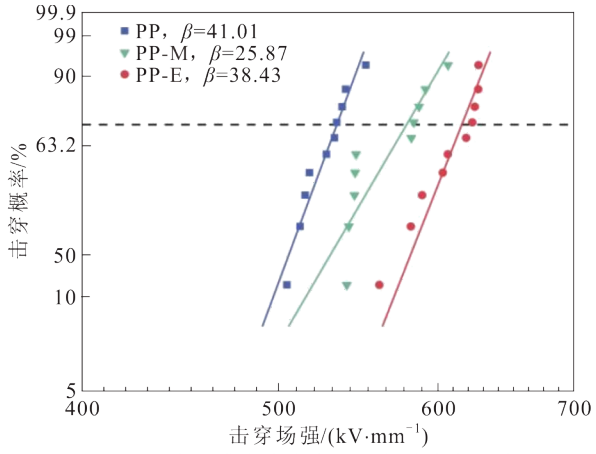
2.4 直流击穿特性

采用双参数威布尔分布对接枝改性前后流延膜和双向拉伸薄膜的直流击穿场强进行分析。其函数如式(2)所示[29-30]。

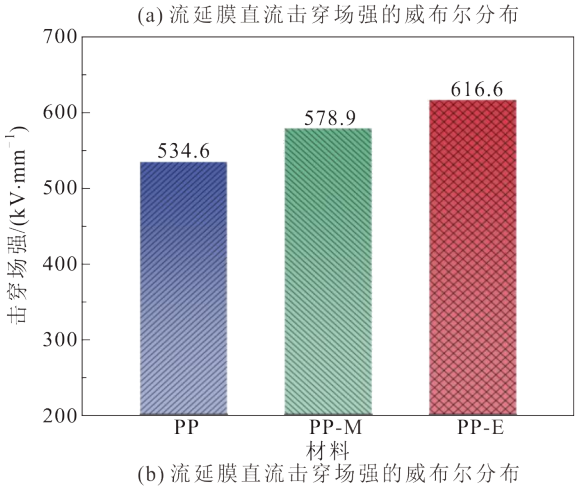
$$P(E_b;\alpha;\beta)=1-\exp\left(-\left(\frac{E_b}{\alpha}\right)^{\beta}\right) \tag{2}$$

式中：P 为击穿概率，%；E_b 为直流击穿场强的实测值，kV/mm；β 为形状参数，表示实测数据的分散性，β 值越大，威布尔分布曲线越陡峭，数据离散性越小[31-33]；

以 α 作为衡量直流击穿场强的标准，得到流延膜直流击穿场强的威布尔分布如图 6 所示。



(a) 流延膜直流击穿场强的威布尔分布



(b) 流延膜直流击穿场强的威布尔分布

图 6 流延膜的直流击穿特性

Fig.6 The DC breakdown strength of cast films

可以看出，当引入质量分数 10% PP-*g*-MAH 和 PP-*g*-PEI 后，流延膜的直流击穿场强分别提升至 578.9 kV/mm 和 616.6 kV/mm，相较于 PP 提升了 8.3%和 15.3%。这充分说明了接枝改性的有效性。作为极性基团，接枝 MAH 和 PEI 能够向 PP 中引入深陷阱，阻碍载流子的移动，从而在一定程度上提升流延膜的直流击穿强度[19]。结合 XRD 测试结果，PP-M 和 PP-E 的晶面间距减小，说明其分子链排布更加紧密，片晶堆砌更加致密，因此直流击穿强度增加。

双向拉伸薄膜的直流击穿特性如图 7 所示。结合 XRD 测试结果可知，相较于流延膜，双向拉伸能够使 PP 的分子链定向排布并增强有序性，从而提高结晶度，使击穿场强进一步提升[26,34]。在室温下，BOPP-M 的直流击穿场强增加至 719.7 kV/mm，相较于 BOPP 提升了 2.7%，而 BOPP-E 的直流击穿场强下降至 681.0 kV/mm。当温度升高至 80 ℃时，双向拉伸薄膜的直流击穿场强呈下降趋势。此时 BOPP-M 的直流击穿场强仍能保持 561.6 kV/mm，相较于 BOPP 提升了 11.6%。

双向拉伸薄膜的直流击穿特性变化同样与双向拉伸薄膜的晶面间距密切相关。双向拉伸后，BOPP-M 的晶面间距进一步减小，因而直流击穿场强增加，而 BOPP-E 由于产生了更多的分子短链，导致分子链排布松散，晶面间距上升，因此直流击穿场强下降。

2.5 储能特性

作为薄膜电容器中的核心材料，测试薄膜的储能特性十分重要。对接枝前后的双向拉伸薄膜进行铁电测试，如图 8 所示。BOPP、BOPP-M 和 BOPP-E 的电滞回线斜率依次增加，这与宽频介电谱的测试结果相符。

对双向拉伸薄膜的放电能量密度和充放电效率进行分析，如图 9 所示。可以看出，测试电场强度的最大值基本与直流击穿场强一致。此外，随着测试电场强度的增加，双向拉伸薄膜的放电能量密度增大，充放电效率不断降低。

在室温下，BOPP-M 的放电能量最高，在 700 kV/mm 下达到 5.62 J/cm^3，相较于 BOPP 提升了 9.1%，充放电效率始终能够保持在 90%以上。而 BOPP 与 BOPP-E 的放电能量密度较低，且充放电效率下降明显；在 80 ℃下，双向拉伸薄膜的充放电效率相较于室温下明显上升。这是由于温度升高引起 PP 分子链运动加剧，载流子更容易充入和释放[35]。而双向拉伸薄膜的放电能量密度明显降低，但 BOPP-M 仍能保持在 3.57 J/cm^3，相较于 BOPP 提升了 29.8%。BOPP-M 最大的放电能量密度则主要归因于其相对介电常数的提升和最高的直流击穿场强。

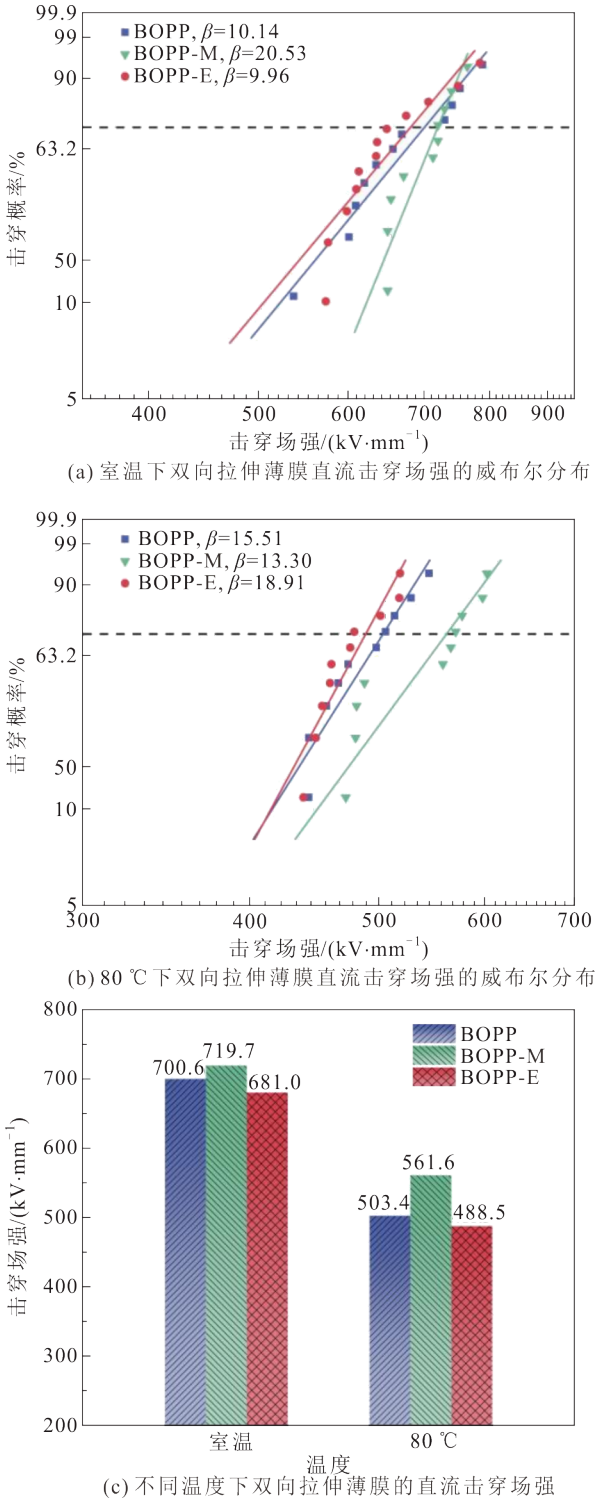
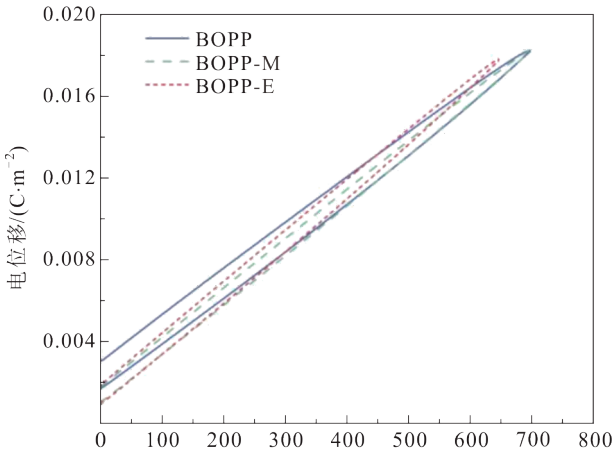
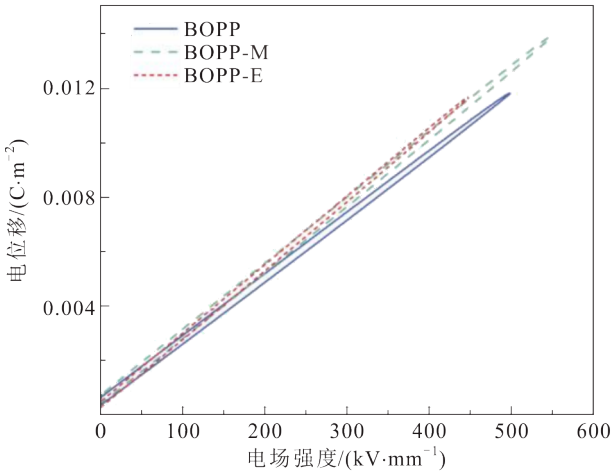


图 7 双向拉伸薄膜的直流击穿特性

Fig.7 The DC breakdown strength of biaxially oriented films



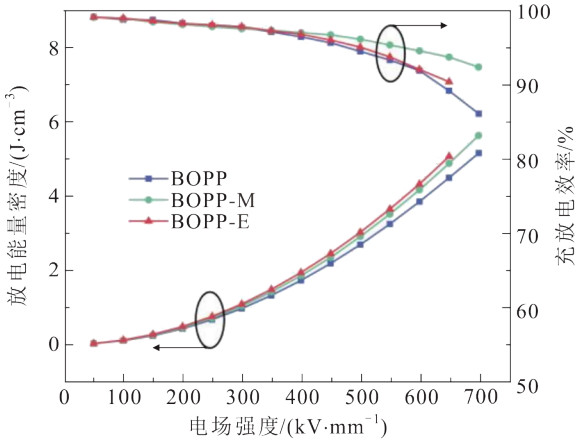
(a) 室温下材料的电滞回线



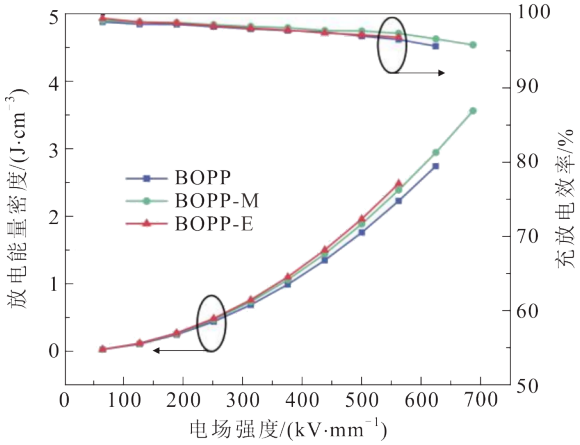
(b) 80 ℃下材料的电滞回线

图 8 双向拉伸薄膜的电滞回线

Fig.8 Hysteresis loop of biaxially oriented films



(a) 室温下双向拉伸薄膜的放电能量密度和充放电效率



(b) 80 ℃下双向拉伸薄膜的放电能量密度和充放电效率

图 9 双向拉伸薄膜的储能特性

Fig.9 Energy storage properties of biaxially oriented films

3 讨论

作为一种半结晶聚合物，接枝前后 PP 的介电储能特性变化主要归因于接枝基团的极性和支链结构对结晶特性的影响。首先，MAH 和 PEI 的引入能够增加 PP 的极性并引入深陷阱，表现为相对介电常数的增加和直流击穿场强的上升。其次，在不同的加工步骤下，PP-*g*-MAH 和 PP-*g*-PEI 对 PP 结晶特性的影响差异明显。对于流延膜，质量分数 10% PP-*g*-MAH 和 PP-*g*-PEI 的引入能够增强 PP 分子链之间的缠结作用，使片晶堆砌更加致密，晶面间距减小。由于 PP-*g*-PEI 的长支链结构，使得 PP 分子链的缠结更加复杂，结晶结构更加致密，因此其晶面间距最小，直流击穿场强最高。对于双向拉伸薄膜，拉伸应力会使 PP 分子链解缠并定向排布，因而其分子链排列更加规整，片晶能够进一步堆砌，晶面间距趋于减小。然而 PP-*g*-PEI 的长支链由于缠结复杂，在拉伸应力下无法充分解缠，缠结位点始终存在，导致 PP 分子链的有序性降低。此外，当拉伸应力过大时，缠结的 PP 分子链将会发生断裂而产生更多的分子短链，导致 PP 分子链排布更加松散，晶面间距增加，同时晶体结构中将会产生更多缺陷，表现为直流击穿场强的明显降低。综合相对介电常数和直流击穿场强的变化，使 BOPP-M 在室温和 80 ℃下的储能特性出现明显提升，而 BOPP-E 的储能特性则发生明显下降。

4 结论

1）接枝改性能够降低流延膜的晶面间距。引入 PP-*g*-PEI 的长支链结构则能够使 PP 分子缠结更加紧密，片晶堆砌更加致密，晶面间距减小；在拉伸应力作用下，PP 分子链将解缠并有序排布，使结晶度增加，晶面间距进一步减小。由于 PP-*g*-PEI 的长支链结构，导致拉伸过程中缠结位点始终存在。当拉伸应力过大时，缠结的 PP 分子链将会断裂，

排布更加松散，导致晶面间距增大。

2）极性基团的引入能够充分提高 PP 的极性，使其相对介电常数增大，而结晶度和晶面间距的改变则会直接引起直流击穿场强的变化。双向拉伸后，更加有序的分子链排布使薄膜的结晶度显著提升，因此双向拉伸薄膜的直流击穿场强高于流延膜。由于支链结构的影响，BOPP-M 的晶面间距减小，BOPP-E 的晶面间距增加，因而 BOPP-M 的直流击穿场强最高，最终表现出最优的储能特性。

参考文献 References

[1] 冯阳，渠广昊，李盛涛. 氢键调控提升聚硫脲介电储能特性[J]. 中国电机工程学报，2024，44(9)：3360-3370.
FENG Yang, QU Guanghao, LI Shengtao. Regulation of hydrogen bonding interactions for improving dielectric energy storage characteristics of polythioureas[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3360-3370.

[2] 冯阳，渠广昊，李盛涛. 淬火温度对聚硫脲介电储能特性影响的分子动力学模拟[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2363-2373.
FENG Yang, QU Guanghao, LI Shengtao. Molecular dynamics simulations on the effect of quenching temperature on the dielectric energy storage characteristics of polythiourea[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2363-2373.

[3] 王柯，刘刚，孟森，等. 国产料聚丙烯电容膜的研发进展[J]. 高电压技术，2025，51(5)：2234-2245.
WANG Ke, LIU Gang, MENG Sen, et al. Research and development progress of domestic polypropylene capacitor film[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(5): 2234-2245.

[4] WANG J Q, GUO H X, HUANG X H, et al. Stretching-regulated homogenization of lamellae thickness in biaxially oriented polypropylene capacitor films, and its effect on breakdown strength[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2025, 46(4): 2400760.

[5] 湛海涯，信建伟，王忠辉. 电力电容器用聚丙烯薄膜微观结构对性能的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2025，46(1)：45-51.
ZHAN Haiya, XIN Jianwei, WANG Zhonghui. Research on influence of microstructure of polypropylene film of power capacitor on its performance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 45-51.

[6] 黄传兵，祝志东，邓兆敬. 电容器薄膜用聚丙烯树脂的发展现状[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：27-34.
HUANG Chuanbing, ZHU Zhidong, DENG Zhaojing. Development status of polypropylene resin for capacitor film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 27-34.

[7] 刘强，邢照亮，周昌浩，等. 电容器用 BOPP 薄膜及其专用树脂研究进展[J]. 绝缘材料，2023，56(4)：1-6.
LIU Qiang, XING Zhaoliang, ZHOU Changhao, et al. Research progress of BOPP film and its special resin for capacitor[J]. Insulating Materials, 2023, 56(4): 1-6.

[8] ZHANG C, ZHAO Y T, YE H, et al. The effect of temperature on the energy storage performance of BOPP film[J]. Materials Letters, 2025, 386: 138230.

[9] 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 Wenfeng, LIU Biao, CHENG Lu. Research progress of high energy storage dielectric polymer materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1046-1054.

[10] XIE H R, LUO H, PEI Z T, et al. Improved discharge energy density and efficiency of polypropylene-based dielectric nanocomposites utilizing $BaTiO_3$@TiO_2 nanoparticles[J]. Materials Today Energy, 2022, 30: 101160.

[11] ZHU X D, CHEN W X, PAN M, et al. Enhanced energy storage properties of polypropylene through crystallization modulation[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2024, 6(8): 4808-4817.

[12] ZHOU Y, YUAN C, LI C Y, et al. Temperature dependent electrical properties of thermoplastic polypropylene nanocomposites for HVDC cable insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2019, 26(5): 1596-1604.

[13] YANG X, ZHAO H, LI C Y, et al. Improved wide-temperature-range insulation properties of block polypropylene by UV-irradiated co-grafting of maleic anhydride and 4-*tert*-butylstyrene[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2023, 5(1): 247-258.

[14] 李忠磊，赵帅，殷一凡，等. 基于化学接枝改性的聚丙烯电缆绝缘性能强化方法研究进展及展望[J]. 绝缘材料，2025，58(3)：1-14.
LI Zhonglei, ZHAO Shuai, YIN Yifan, et al. Research progress and prospects on performance enhancement of polypropylene cable insulation based on chemical grafting modification[J]. Insulating Materials, 2025, 58(3): 1-14.

[15] 程璐，刘宏博，刘标，等. 三元复合聚丙烯电介质材料性能调控研究进展[J]. 高电压技术，2024，50(6)：2332-2343.
CHENG Lu, LIU Hongbo, LIU Biao, et al. Recent research improvements in ternary polypropylene dielectric materials[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(6): 2332-2343.

[16] ZHONG S Y, LIU X M, ZHENG S, et al. Achieving high energy storage capability of polypropylene films through clean electron beam irradiation induced grafting strategy[J]. ACS Applied Polymer Materials, 2025, 7(1): 247-257.

[17] HUANG B D, YU J C, DONG J, et al. Improving charge storage of biaxially-oriented polypropylene under extreme electric fields by excimer UV irradiation[J]. Advanced Materials, 2024, 36(52): 2311713.

[18] 罗兵，李君洛，王少杰，等. 接枝聚丙烯电容薄膜的高温储能特性[J]. 中国电机工程学报，2024，44(9)：3371-3377.
LUO Bing, LI Junluo, WANG Shaojie, et al. High temperature energy storage characteristics of grafted polypropylene capacitor film[J]. Proceedings of the CSEE, 2024, 44(9): 3371-3377.

[19] ZHOU Y, HU J, DANG B, et al. Mechanism of highly improved electrical properties in polypropylene by chemical modification of grafting maleic anhydride[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2016, 49(41): 415301.

[20] 陈淼灿，刘涛，赵玲，等. 非水滴定和傅立叶红外光谱在聚丙烯马来酸酐接枝物表征中的应用[J]. 功能高分子学报，2005，18(2)：334-339.
CHEN Miaocan, LIU Tao, ZHAO Ling, et al. Application of non-aqueous titration and FTIR spectroscopy in the characterization of maleic anhydride-functionalized polypropylene[J]. Journal of Functional Polymers, 2005, 18(2): 334-339.

[21] 金盈，曾广赋，朱丹阳，等. 聚酰胺酸结构及其亚胺化的红外光谱分析[J]. 应用化学，2011，28(3)：258-262.
JIN Ying, ZENG Guangfu, ZHU Danyang, et al. Analysis of structure and imidization of poly (amic acid) using FTIR spectroscopy[J]. Chinese Journal of Applied Chemistry, 2011, 28(3): 258-262.

[22] 于是乎，余欣，聂章翔，等. 110 kV 电缆终端缺陷导致 XLPE 绝缘变色的性能分析[J]. 广东电力，2019，32(12)：81-88.
YU Shihu, YU Xin, NIE Zhangxiang, et al. Performance analysis of XLPE discoloration caused by 110 kV cable terminal defects[J].

Guangdong Electric Power, 2019, 32(12): 81-88.

[23] 胡建民，王蕊，王春婷，等. 晶体 X 射线衍射模型和布拉格方程的一般推导[J]. 大学物理，2015，34(3)：1-2.
HU Jianmin, WANG Rui, WANG Chunting, et al. X ray diffraction model of crystal and general derivation of Bragg equation[J]. College Physics, 2015, 34(3): 1-2.

[24] 徐晓梅，郑晓婷，刘晶如，等. 支链长度及支化程度对聚苯乙烯流变行为的影响[J]. 高分子材料科学与工程，2015，31(4)：78-82.
XU Xiaomei, ZHENG Xiaoting, LIU Jingru, et al. Influence of branch length and branching level on rheological behaviors of branching polystyrene[J]. Polymer Materials Science & Engineering, 2015, 31(4): 78-82.

[25] 刘轶，刘跃军，崔玲娜，等. 双向拉伸工艺对尼龙 6 薄膜的微观结构与宏观性能的影响[J]. 塑料工业，2020，48(6)：35-42.
LIU Yi, LIU Yuejun, CUI Lingna, et al. Effect of biaxial stretching process on microstructure and macro properties of nylon 6 film[J]. China Plastics Industry, 2020, 48(6): 35-42.

[26] 周一涵，李志元，程璐，等. 双向拉伸聚丙烯薄膜分子链有序性调控及其对储能特性的影响[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5415-5423.
ZHOU Yihan, LI Zhiyuan, CHENG Lu, et al. Regulation of molecular chain order of biaxially oriented polypropylene films and its effect on energy storage characteristics[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5415-5423.

[27] 吴茗，殷爽渤，段敏芝，等. 受限态高分子的微观动力学与流变学行为研究进展[J]. 高分子通报，2025，38(2)：333-353.
WU Ming, YIN Shuangbo, DUAN Minzhi, et al. Progress on dynamics and rheology behavior of confined polymers[J]. Polymer Bulletin, 2025, 38(2): 333-353.

[28] FENG Y, HASEGAWA Y, SUGA T, et al. Tuning conformational h-bonding arrays in aromatic/alicyclic polythiourea toward high energy-storable dielectric material[J]. Macromolecules, 2019, 52(22): 8781-8787.

[29] 李银格，常柏源，余欣，等. 不同温度及厚度下非交联聚乙烯电缆绝缘材料工频交流击穿表现[J]. 广东电力，2024，37(9)：65-71.
LI Yinge, CHANG Baiyuan, YU Xin, et al. Performance of non-cross-linked polyethylene cableinsulation at different temperatures and thicknesses in terms of AC breakdown at power frequency[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(9): 65-71.

[30] 彭向阳，姚驰，余欣，等. 硅烷接枝聚丙烯的直流电性能与陷阱机制[J]. 高电压技术，2023，49(11)：4480-4489.
PENG Xiangyang, YAO Chi, YU Xin, et al. DC electrical properties and trap mechanism of silane-grafted polypropylene[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(11): 4480-4489.

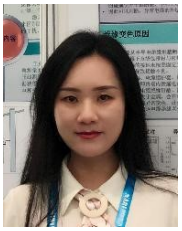
[31] 冯阳，张硕，周彬，等. 计及陷阱演变的高介电芳香族聚脲老化特性及机理[J]. 物理学报，2025，74(8)：087701.
FENG Yang, ZHANG Shuo, ZHOU Bin, et al. Aging characteristics and mechanism of high-dielectric aromatic polyureas considering trap evolutions[J]. Acta Physica Sinica, 2025, 74(8): 087701.

[32] ZHONG C Z, FENG Y, ZHOU B, et al. Tuning interfacial characteristics of epoxy composites towards simultaneous high thermal and dielectric properties[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2025, 226(4): 2400260.

[33] 刘宏博，程璐，徐哲，等. 热老化对电容器用聚丙烯薄膜结构及电学性能的影响[J]. 绝缘材料，2023，56(2)：96-103.
LIU Hongbo, CHENG Lu, XU Zhe, et al. Influence of thermal ageing on structure and electrical properties of polypropylene film for capacitors[J]. Insulating Materials, 2023, 56(2): 96-103.

[34] 卢洪超，徐萌，权慧，等. 双向拉伸过程中聚丙烯薄膜结构与性能的演变[J]. 塑料工业，2023，51(9)：82-87，155.
LU Hongchao, XU Meng, QUAN Hui, et al. Evolution of polypropylene film structure and properties during biaxial stretching[J]. China Plastics Industry, 2023, 51(9): 82-87, 155.

[35] 李君洛，孟礼，刘雨杭，等. 熔融接枝聚丙烯薄膜的接枝工艺与高温储能特性[J]. 绝缘材料，2025，58(4)：1-8.
LI Junluo, MENG Li, LIU Yuhang, et al. Grafting technology and high temperature energy storage characteristics of polypropylene film by melt grafting[J]. Insulating Materials, 2025, 58(4): 1-8.



于是乎
1990—，女，博士，高工
主要从事高压电缆及输电材料设计、性能评价及设备试验技术研究
E-mail: yush0913@163.com

YU Shihu
Ph.D.
Senior engineer



冯　阳
1992—，女，博士，助理教授，硕导
主要从事电介质理论及应用、高分子结构与性能的关系、储能电介质方面的研究工作
E-mail: fengyang@xjtu.edu.cn

FENG Yang
Ph.D.



李盛涛(通信作者)
1963—，男，博士，教授，博导
主要从事电介质理论及应用、电气功能材料及器件、极端条件下的绝缘材料和绝缘技术等方面的研究工作
E-mail: sli@mail.xjtu.edu.cn

LI Shengtao
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-07-01　在线出版日期　2025-12-02　　编辑　曹昭君