

电-热-油耦合作用下聚丙烯薄膜老化特性研究

褚洋¹, 李志元¹, 崔宇馨¹, 程璐¹, 刘文凤¹, 盖斌², 贾华², 尤鸿茆²

(1. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049;

2. 西安高压电器研究院股份有限公司, 西安 710077)

摘要:油浸式电容器具有高可靠性、低成本等优点,广泛应用于电力系统中,承担无功补偿、滤波等作用。随着电力系统对电容器储能密度要求的提升,传统双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜的储能特性已逐渐无法满足需求;尽管高储能密度介质材料的研发取得了显著成果,但开发高性能油浸式电容器的前提在于揭示介质材料在油浸式电容器实际工况下的老化机理。因此,本文提出系统研究BOPP薄膜在电-热-油耦合条件下的老化特性。通过搭建电-热-油耦合老化实验平台,开展1 000 h的电热老化实验,获得了浸渍在苄基甲苯(M/DBT)中的BOPP薄膜试样。对老化前后BOPP薄膜开展红外光谱(FTIR)、差式扫描量热分析(DSC)、动态热机械分析(DMA)、直流击穿等测试。结果表明:浸渍剂小分子进入BOPP分子间隙,一方面起到柔顺分子链段的作用,分子链段运动活化能降低,另一方面电热油耦合作用破坏了分子链段的规整性,导致薄膜击穿场强降低了14.85%。该研究可为油浸式电容器介质材料和浸渍剂的开发提供数据支撑和理论基础。

关键词:油浸式电容器;聚丙烯;苄基甲苯;电热老化;绝缘性能

Study on Aging Characteristics of Polypropylene Film Under Electric-thermal-oil Coupling Condition

CHU Yang¹, LI Zhiyuan¹, CUI Yuxin¹, CHENG Lu¹, LIU Wenfeng¹, GAI bin², JIA Hua²,
YOU Hongpeng²

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China; 2. Xi'an High Voltage Apparatus Research Institute Co., Ltd., Xi'an 710077, China)

Abstract: Oil-immersed capacitors are widely used in power systems for reactive power compensation and filtering due to their advantages of high reliability and low cost. With the increasing demand of energy storage density of capacitors in power systems, the energy storage performance of traditional biaxially oriented polypropylene (BOPP) film has gradually been unable to meet the demand. Although the research of materials with high energy storage density has achieved remarkable results, yet the prerequisite for developing high property oil-immersed capacitors is to reveal the aging characteristics of dielectric materials in actual condition of oil-immersed capacitors. Therefore, in this paper a systematic study on the aging characteristics of BOPP film under electric-thermal-oil coupling condition is proposed. The electric-thermal aging experiment for 1000 hours is performed by way of setting up electric-thermal-oil coupling aging experimental platform and the BOPP film samples immersed in benzyl toluene impregnating agent (M/DBT) are obtained. Such tests as Fourier transform infrared spectrometer (FTIR), differential scanning calorimetry (DSC), dynamic thermomechanical analysis (DMA) and direct current breakdown are performed on the BOPP film before and after aging. The results show that small molecules of impregnating agent enter into the molecular gap of BOPP which, on the one hand, plays the role of softening molecular chain and reduces the activation energy of molecular chain segments and, on the other hand, the coupling effect of the electric-thermal-oil destroys

the regularity of molecular chain segment, resulting in the decrease of the breakdown strength of the films by 14.85%. The study provides data support and theoretical foundation for the development of dielectric materials and impregnating agent for oil-immersed capacitors.

Keywords: oil - immersed capacitors; polypropylene; M/DBT; electric and thermal aging; insulating properties

0 引言

随着国家经济的稳步发展和电力需求的日益攀升,我国特高压电网建设正迎来高速发展时期^[1-5]。作为电力系统的核心储能元件,油浸式电容器因其优异的绝缘性能被大规模应用,但其介质材料双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)薄膜的储能密度偏低($1\sim 2\text{ J/cm}^2$)导致设备体积庞大的问题日益凸显^[6-8]。近年来,已有大量研究通过设计聚合物复合电介质材料的组成结构,提高其介电特性或击穿场强,进而大幅提高其储能密度。在聚丙烯基体中掺杂无机填料已被证明可以有效提升复合材料的介电常数。研究人员在聚丙烯中掺杂 15 wt% 锆钛酸钡($\text{BaZr}_{0.2}\text{Ti}_{0.8}\text{O}_3$, 简称 BZT)得到 BZT/PP, 相对介电常数提高至 3.19^[9]; 掺杂 9 wt% 的氧化钛($\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2$)得到 $\text{Ti}_{0.87}\text{O}_2/\text{PP}$, 相对介电常数达到 3.27, 为纯 PP 的 1.5 倍^[10]; 在 PP 中加入 10 wt% 氧化铝(Al_2O_3)及 40% 钛酸钡(BT)得到的 $\text{Al}_2\text{O}_3/\text{BT}/\text{PP}$ 复合材料,其介电常数大幅提高至 18^[11]。此外,在聚丙烯侧链接枝高极性基团可以有效提升聚合物的储能特性^[12]。研究人员制备了接枝率为 5% 的甲基丙烯酸甲酯接枝聚丙烯薄膜,直流击穿场强达到 764 kV/mm, 储能密度达到 4.5 J/cm^2 ^[13]。进一步研究发现,低分子量的接枝基团可以改善复合材料的结晶特性从而进一步提高薄膜的击穿场强^[14]。研究人员合成了丙烯酸接枝聚丙烯(PP-g-AA),并掺杂 0.5 wt% ZrO_2 纳米粒子,制备了三元复合材料 PP/PP-g-AA/ ZrO_2 , 击穿场强提高了 12.2%, 即使在高温条件下,其储能密度仍维持在较高水平,是相同温度下纯聚丙烯的 60 倍^[15]。

然而,目前多数研究仅聚焦于干式电容器储能密度的提升,并未考虑到油浸式电容器在实际运行中面临的电、热、油多因子耦合作用,开发油浸式电容器专用高储能密度介质材料首先需要研究 BOPP 薄膜在实际工况下的老化特性。研究表明,在电场和浸渍剂共同作用下,BOPP 薄膜绝缘特性快速劣化,随着冲击电压次数的增多,油膜的绝缘电阻率持续降低,最终降低至未老化样品的 $1/3$ ^[16]。另外,本研究小组发现,浸渍条件下 BOPP 薄膜的老化特

性较为复杂。将 4 种 BOPP 薄膜浸渍在 80℃ 的苄基甲苯(mono & dibenzyl toluene, M/DBT)中开展 24 h 浸渍实验,发现浸渍后薄膜击穿场强出现不同程度的降低,但形状参数的增大反映出短时浸渍改善了薄膜结构的均匀性^[17]。为了进一步研究 BOPP 薄膜与 M/DBT 的相容性,将厚度为 10 μm 的 BOPP 薄膜分别浸渍 7 天和 28 天,薄膜的击穿场强分别提升了 0.7% 和 11.45%,同时形状参数也有不同程度的提升^[18]。然而目前针对电场、高温及浸渍剂的耦合作用研究较少,因此有必要开展油浸式电容器实际工况下 BOPP 薄膜的老化特性研究。

本文选择商用 BOPP 薄膜介质材料及浸渍剂 M/DBT 作为研究对象,分别进行热老化及电热老化实验。通过对比分析老化前后的 BOPP 薄膜微观形貌及电学特性的变化规律,阐明油膜绝缘系统的老化机理,为油浸式电容器介质材料及浸渍剂的结构优化设计提供理论依据。

1 实验设计

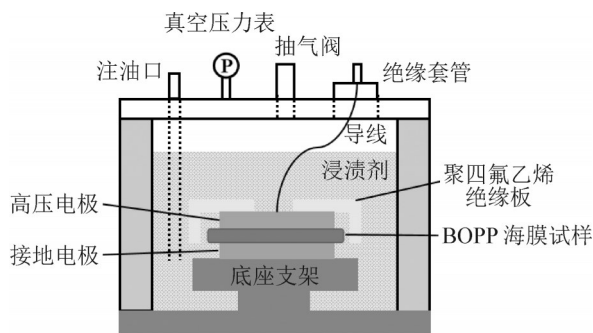
1.1 试样信息

本文选择一种由进口树脂经过双向拉伸工艺制备得到厚度为 12 μm 的 BOPP 薄膜,PP 树脂的灰分为 14 ppm,其熔融指数为 3.2 g/10 min,由正庚烷抽提法测定等规度为 98%,由凝胶色谱分析法测定其重均分子量为 3.61×10^5 。本文使用的油浸式电力电容器浸渍剂为 M/DBT,其型号为 JARYLEC C101,主要成分为苄基甲苯和二苄基甲苯。

1.2 老化试验设计

为了实现电-热-油耦合老化实验条件,自主设计搭建了如图 1 所示的电热老化平台,本文将 BOPP 薄膜置于 80℃ 的环境温度中持续承受直流电压作用,进行电热老化试验,取 1.7 倍油浸式电容器工作电场强度(即 $1.7E_w$,作用在薄膜介质上的直流电场强度为 100 kV/mm)。将 BOPP 薄膜裁剪成略大于电极的圆形试样,测试 BOPP 薄膜的厚度,计算得到老化实验过程中外施电压的大小 U 。老化时,将 BOPP 薄膜置于老化腔体后,抽真空至负压,通过压强差将绝缘液 M/DBT 注入腔体中,使得 BOPP 薄膜完全浸没在 M/DBT 中。实验电路图如

图2所示。与此同时,另取BOPP薄膜置于玻璃瓶中,加入M/DBT没过薄膜试样,同时放入烘箱中进行热老化实验。老化时间选择42 d,老化结束后将薄膜从腔体内取出,用无尘布蘸取无水乙醇擦拭干净薄膜表面残留的苄基甲苯,置于80℃干燥箱内24 h备用。



(a) 老化平台设计图



(b) 老化平台实物图

图1 电热老化平台示意图
Fig. 1 Schematic diagram of electric-thermal aging platform

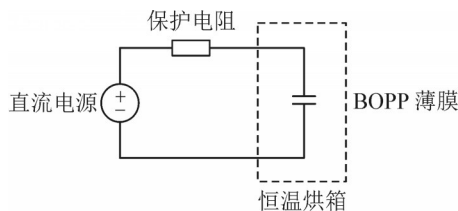


图2 电热老化试验电路图
Fig. 2 Electric-thermal aging test circuit diagram

1.3 测试方法

首先采用Bruker VERTEX70型红外光谱仪,在反射模式下测试BOPP薄膜的傅里叶红外光谱(fourier transform infrared spectroscopy, FTIR),分析老化前后薄膜化学官能团的变化,实验选择的波数范围为4 000~400 cm^{-1} ;采用梅特勒公司METTLER TOLEDO TGA/DSC3+至尊型同步热分析仪,在氮气保护环境以10 K/min的速率从室温升至800℃,分析BOPP薄膜的高温分解状态,从而得到其成分变化情况;使用D8 ADVANCE型X射线衍射仪对薄膜样品进行结晶性能表征,测定其晶体结构;采用DSC 822型差示扫描量热仪(DSC)测试BOPP的热学特性,将质量为20 mg的样品置于标准铝坩埚内,在氮气氛围下以10℃/min从40℃加热至220℃,保温3 min

后再以10℃/min的速度降至室温,表征分析BOPP样品熔融及结晶情况;采用DMA/SDTA861e型动态热机械分析仪测试非晶区分子链段运动特性,测试温度选择为-20℃~60℃,升温速率为2.5℃/min,测试频率分别为1、5、10、20 Hz;采用NOVOCONTROL公司concept 80型宽频介电阻抗谱仪测试薄膜在老化前后的介电特性,测试所采用的外施电压为1 V交流信号,测试频率为 10^{-1} ~ 10^5 Hz;通过BDJC-100 kV电压击穿试验仪测试所有薄膜试样的击穿场强,升压速率设置为500 V/s,每种试样测试30个击穿点。

2 结果与讨论

2.1 FTIR红外光谱分析

为了探究电-热-油耦合作用对BOPP官能团的影响,开展了FT-IR实验,结果如图3所示。

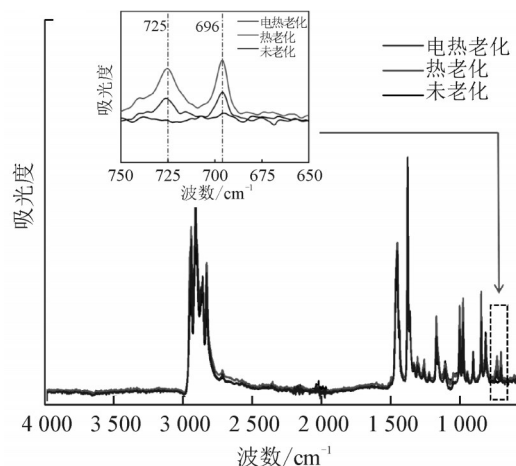


图3 BOPP薄膜试样的FTIR图
Fig. 3 FTIR spectra of BOPP film samples

3种试样均呈现典型的聚丙烯特征峰,其中3 000~2 800 cm^{-1} 波数范围内出现的吸收峰对应聚丙烯分子中主链上大量分布的C-H的伸缩振动峰;1 500~1 350 cm^{-1} 处的吸收峰对应于C-H弯曲振动峰;在1 020~880 cm^{-1} 处出现的特征峰,对应于PP分子链中甲基的摇摆振动峰。从图3可以看出,老化后的试样在725 cm^{-1} 及696 cm^{-1} 处出现了新的特征峰,对应M/DBT分子中-CH₂的面内摇摆振动峰及-CH的面外弯曲振动峰^[9],两处的特征峰强度均较弱,这说明老化后,仅少量浸渍剂小分子进入BOPP分子间隙。另外,热老化后的薄膜在这两处特征峰的强度明显强于电热老化,说明在外电场的作用下,相较于热老化,M/DBT浸渍量更少。

2.2 热重分析

为了进一步测试表征BOPP试样中苄基甲苯的含量,对老化前后样品进行热重实验分析,结果如

图 4(a)、(b)所示,同时,将原始曲线对时间或温度求一阶导数得到热重微分曲线,即 DTG 曲线,分析 DTG 曲线可以清晰地观察每阶段始终最快的温度,进而分析其热稳定性变化情况,如图 4(c)所示。

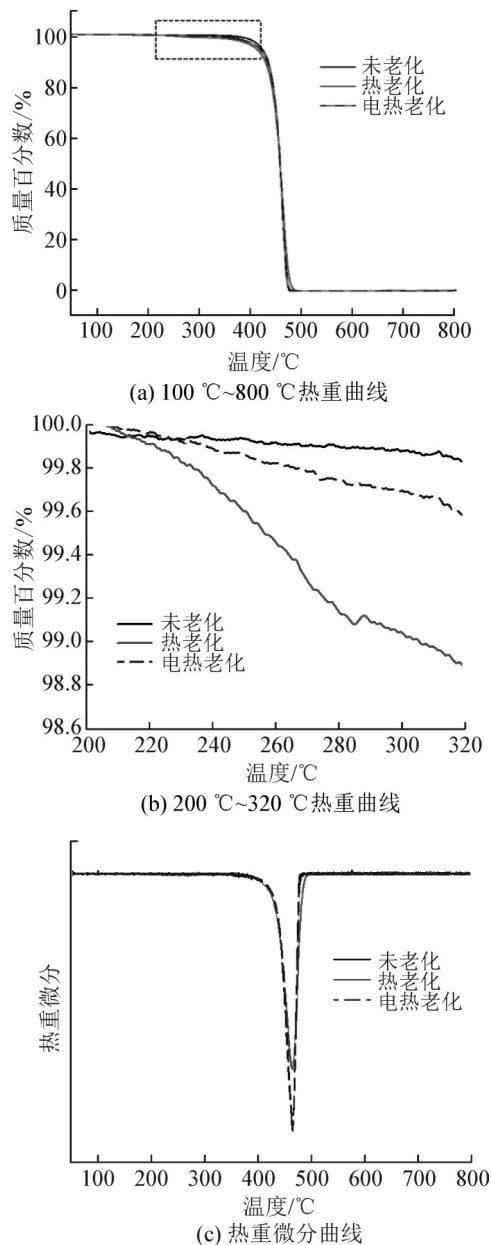


图 4 老化前后 BOPP 薄膜试样的热重曲线及热重微分曲线
Fig. 4 Thermogravimetric curves of BOPP film samples before and after aging

从图中可以看出,浸渍于 M/DBT 中的热老化及电热老化样品均在 220 °C 左右出现一个新的热分解阶段,这一温度与 M/DBT 的沸点(280 °C)接近,故此阶段为 M/DBT 浸渍剂分解阶段。在 405 °C 附近 BOPP 薄膜开始出现明显失重现象,并且在 460 °C 附近失重速率达到最大。处于结合态的浸渍剂分子由于其与聚丙烯分子间的相互作用力,会导致热分解速率降低。实验结果显示,热老化试样热分解

速率明显低于电热老化试样,说明热老化 BOPP 试样中浸渍剂的含量相对较高,这与 FTIR 所观察到的结果一致。出现该结果可能是由于当电压作用于弹性模量较小的电介质材料时,正负电极之间的静电吸引力表现为对电介质的挤压力,从而导致电热老化后的 BOPP 薄膜浸渍量更少^[20]。

2.3 结晶特性

作为一种典型的半结晶高分子材料,聚丙烯的结晶行为会随老化过程发生变化。本文结合 X 射线衍射分析和差示扫描量分析,系统考察了 BOPP 薄膜在老化过程中的结晶过程的演变规律。

图 5 为老化前后 BOPP 薄膜试样的 XRD 曲线,所有试样均在 14.0°、16.8°、18.5°处出现 3 个特征峰,分别为 α 晶的 3 个晶面,这表明薄膜在老化过程中保持了稳定的 α 晶型结构。本文进一步通过 Debye-Scherrer 公式计算得到片晶尺寸(Δ)^[21],公式为

$$\Delta = \frac{K\lambda}{FWHM \cos \theta} \quad (1)$$

式中: K 为 Scherrer 形状因子,其值为 0.89; λ 为 X 射线波长,取值为 0.154 06 nm; θ 为 Bragg 角; $FWHM$ 为 16.8° 对应的衍射峰(040)的半峰高宽度。计算得到未老化、热老化及电热老化试样的片晶尺寸分别为 14.19 nm、14.63 nm、14.69 nm。老化后薄膜的片晶尺寸均有所提高,这主要是由于聚丙烯薄膜在高温作用下发生重结晶过程,聚丙烯这类半结晶聚合物中,无定形区的分子链排布相对较为杂乱,处于热力学亚稳态,这部分分子链具有自发向有序晶态转变的倾向。在高温作用下,不规则排布的分子链获因能量积累而发生旋转,无定形区逐渐向结晶区转变,并排布在固有晶区周围,最终表现为片晶尺寸的增加^[22]。

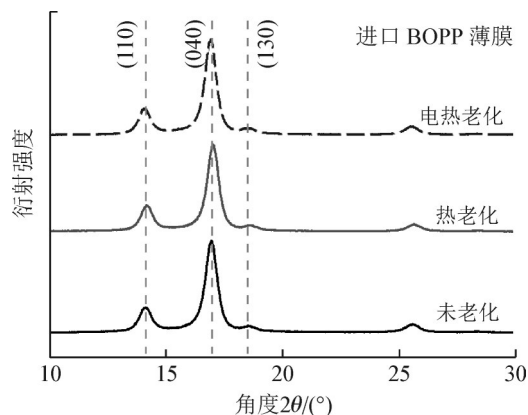


图 5 老化前后 BOPP 薄膜试样的 XRD 图
Fig. 5 XRD images of BOPP films before and after aging

采用 DSC 研究了薄膜老化过程中的熔融和结晶行为变化,并基于式(2)定量分析了结晶度演变规律。老化前后 BOPP 薄膜试样的熔融及结晶过程

的 DSC 曲线如图 6 所示,表 1 为 3 种试样的片晶尺寸、熔融温度、结晶温度及结晶度。

$$X_c(\%) = \frac{\Delta H}{\Delta H_i} \times 100\%$$

(2)

式中: $X_c(\%)$ 为聚合物的结晶度; ΔH 为熔融曲线积分得到的熔融热焓,单位为 J/g; ΔH_i 为聚丙烯 α 晶体 100% 结晶的熔融焓,取 209 J/g。

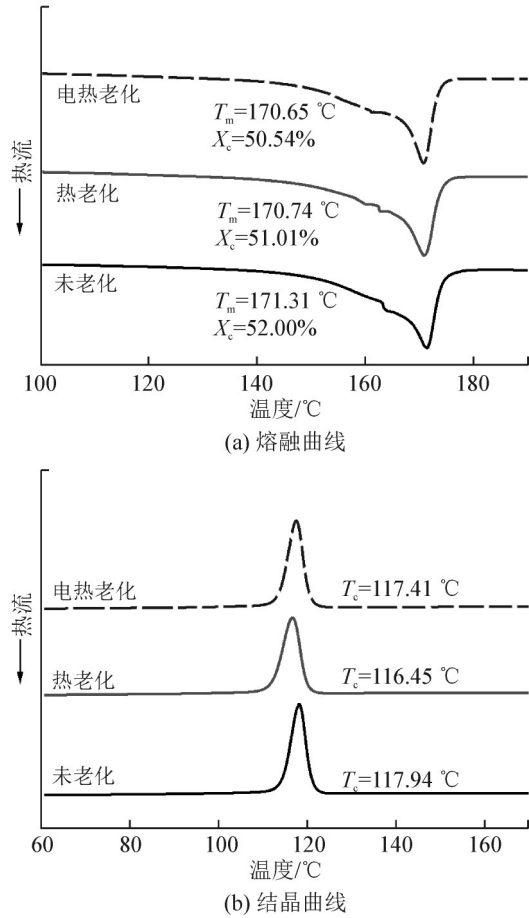


图6 老化前后 BOPP 薄膜试样的熔融曲线及结晶曲线
Fig. 6 DSC images of BOPP films before and after aging

表 1 老化前后 BOPP 薄膜试样的结晶参数

Table 1 Crystallization parameters of BOPP films before and after aging

老化条件	熔融 温度/℃	结晶 温度/℃	结晶度/%	片晶 尺寸/nm
未老化	171.31	117.94	52.00	14.19
热老化	170.74	116.45	51.01	14.63
电热老化	170.65	117.41	52.54	14.69

由图 6 及表 1 可以看出,老化前后 BOPP 薄膜的熔融温度基本保持不变,表明老化条件对熔融温度影响不大,这一参数主要取决于聚丙烯树脂及拉伸工艺;老化后结晶温度及结晶度降低,热老化试样相较于电热老化出现了更显著的降幅,这可能与 M/DBT 分子进入 BOPP 分子链间空隙有关,一方面,苄基甲苯作为小分子物质分散在聚丙烯中,占

据自由体积,减少分子链的接触机会,从而降低成核密度,延缓结晶过程;另一方面,苄基甲苯的分子结构可能插入到聚丙烯分子链段之间,破坏链段的规整性,使其形成有序结构更加困难。

2.4 非晶区分子链段运动特性

为研究 BOPP 薄膜的非晶区分子链段运动特性,对 3 种样品进行了动态热机械分析测试,见图 7,图 7(a)为 1 Hz 条件下损耗模量的温度谱。

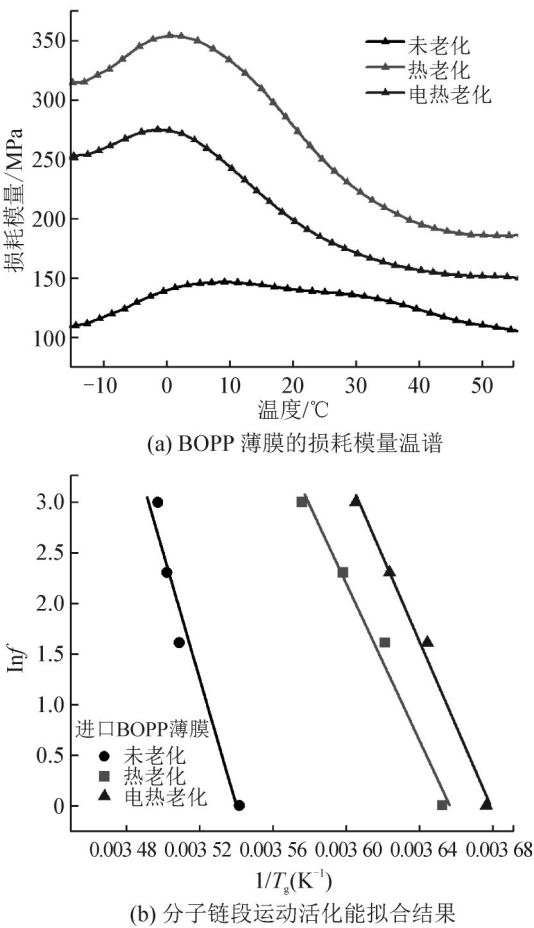


图7 老化前后 BOPP 薄膜试样的分子链段运动特性
Fig. 7 Molecular segment motion properties of BOPP films before and after aging

从图中可以看出,损耗模量在 0~10 ℃ 范围内出现一个峰值,这一特征温度称为玻璃化转变温度(T_g)。当温度高于 T_g 时,聚丙烯薄膜非晶区处于高弹态,分子链可以发生相对位移,随着温度的降低,代表非晶区向玻璃态转变,当温度降低至 T_g 以下时,分子链被冻结。老化后,薄膜的 T_g 降低,意味着非晶区分子链间的相互作用更弱,分子链段吸收更少的能量即可发生位移,这表明 M/DBT 分子进入分子间隙后,起到柔顺分子链的作用。

根据 Arrhenius 方程,样品的 T_g 与测试频率 f 之间存在如式(3)所示的关系^[23],并根据该式可以拟

合得到 $\ln f$ 与 $1/T_g$ 的 Arrhenius 曲线,如图 7(b)所示。

$$\ln f = \ln f_0 - \frac{\Delta H}{RT_g} \quad (3)$$

式中: $\ln f_0$ 为常数; ΔH 为分子链段运动活化能; R 为理想气体常数,一般取 $8.314 \text{ J}/(\text{mol} \cdot \text{K})$; T_g 为玻璃化转变温度。

通过拟合结果,计算得到未老化、热老化、电热老化 3 种试样的分子链段运动活化能,分别为 5.38 eV 、 3.34 eV 、 3.6 eV ,老化后活化能显著降低,主要是由于 M/DBT 作为小分子物质进入 BOPP 分子间隙中,起到了顺滑分子链段的作用,增强了分子链段的运动能力。相较于电热老化试样,热老化后的 BOPP 薄膜浸渍剂含量更高,因此其分子链段运动活化能更低。

2.5 电学性能测试

2.5.1 介电特性

在外加电场的作用下,高聚物内部电荷沿外电场方向产生宏观偶极矩,出现极化现象,BOPP 薄膜的相对介电常数及介电损耗是决定其在油浸式电容器应用的关键参数。本文在 25°C 条件下,未老化、热老化、电热老化 3 种试样的介电常数和介质损耗因数随频率的变化曲线,图 8 为 BOPP 薄膜在 $10^{-1} \sim 10^5 \text{ Hz}$ 的介电频谱。从图中可以看出,BOPP 薄膜的介电常数在老化前后几乎保持不变,均处于 2.2 左右,且均呈现随频率增加而缓降的变化规律,这是由于聚丙烯在生产制造过程中加入了抗氧化剂等小分子极性物质,在低频下存在少量松弛极化^[24-26]。老化后的 BOPP 薄膜并没有出现新的损耗峰,表明老化过程中没有产生新的极化形式,但介质损耗角正切略微下降,损耗峰向高频方向移动,这可能是由于浸渍剂分子进入到 BOPP 分子内部的自由体积后,分子链段在更低的能量下即可发生位移,因此在更高频下可以完成极化过程,产生相应的损耗。

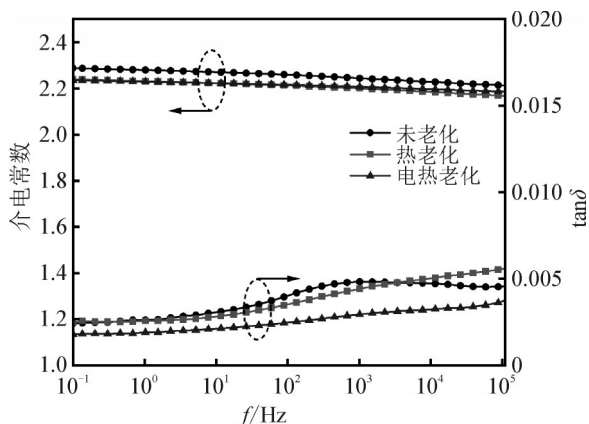


图8 老化前后BOPP薄膜试样的介电频谱
Fig. 8 Dielectric spectrum of BOPP film before and after aging

2.5.2 直流击穿场强

BOPP 薄膜的耐压特性是决定电容器介质可靠性的关键指标,显著影响器件的服役寿命。本文采用式(4)所示的双参数威布尔分布模型对 BOPP 薄膜的直流击穿场强实验数据进行了统计分析。图 9 为老化前后 BOPP 薄膜直流击穿实验结果的威布尔分布图,其特征击穿场强和形状参数如图 10 所示。

$$P(E) = 1 - \exp[-(E/\alpha)^\beta] \quad (4)$$

式中: $P(E)$ 为击穿概率; E 为实际测试得到的击穿场强数据; α 为尺度参数,一般代表击穿概率为 63.2% 时所对应的击穿场强; β 为形状参数,代表数据的分散性, β 越大,表示试样击穿强度的分散性越小,分布较为集中,击穿强度可靠性越高。

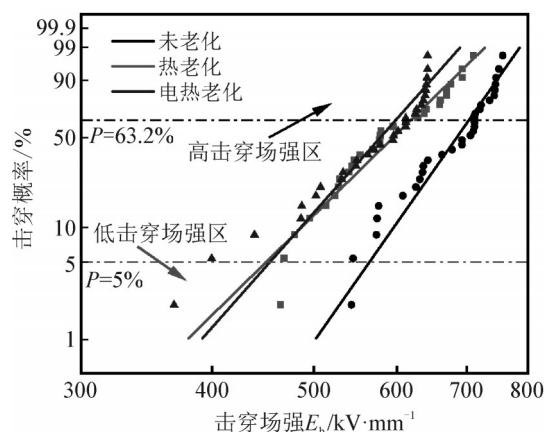


图9 老化前后BOPP薄膜试样击穿场强的威布尔分布图
Fig. 9 Weibull distribution of breakdown strength of BOPP film before and after aging

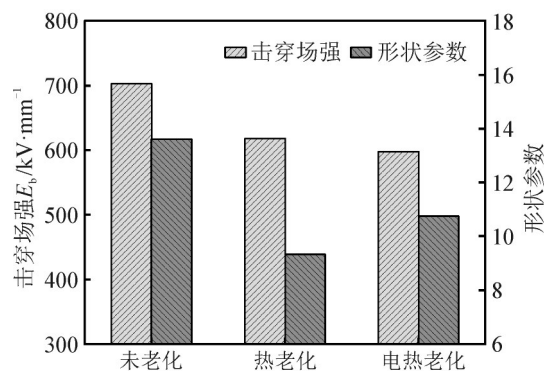


图10 老化前后BOPP薄膜试样直流击穿参数
Fig. 10 DC breakdown parameters of BOPP films before and after aging

热老化后 BOPP 薄膜击穿场强为 $618.71 \text{ kV}/\text{mm}$,相较于原始试样降低了 11.97%,苯基甲苯分子进入分子链间隙中,形成局部聚集,引入更多的陷阱中心,捕获电荷,导致局部电场集中,引发击穿;而电热老化后薄膜击穿场强进一步降低至 $598.46 \text{ kV}/\text{mm}$,相较于原始试样降低了 14.85%,电应力的持续作用

会进一步削弱分子链段相互作用,促进分子链段运动并扩大自由体积,有利于电子的注入和传输,当电荷能量积累到较小的能量时便会发生雪崩击穿,从而使击穿场强降低。实验结果表明,这两个过程在与高温作用下重结晶过程的竞争中占主导因素,因此尽管老化过程中 BOPP 薄膜结晶度提升,但其击穿场强仍降低。

值得注意的是,在低击穿场强区,老化后的 BOPP 薄膜击穿场强均在 400~500 kV/mm 之间,聚丙烯的电弱点主要位于非晶区,而老化过程首先影响非晶区,从而使得老化后 BOPP 薄膜存在更多的电弱点,即弱点变得更弱^[27-29]。虽然老化后薄膜的击穿场强仍维持在较高水平,但是电弱点的增加会直接影响到电容器的使用寿命。

3 结语

本文研究了 BOPP 薄膜在电-热-油耦合作用下的老化特性。结果表明,在外加电场的作用下,正负电极之间的静电吸引力表现为对电极间电介质的挤压力,导致电热老化后 BOPP 薄膜中浸渍剂含量低于热老化试样。M/DBT 小分子物质进入 BOPP 分子链段之间的空隙中,一方面起到柔顺分子链段的作用,分子链段运动活化能由 5.38 eV 降低至 3.34 eV,导致介质损耗角正切峰值向高频方向移动;另一方面电-热-油耦合作用破坏聚丙烯结晶结构,导致结晶温度及结晶度小幅降低,最终表现为电热老化薄膜试样的击穿场强由 702.83 kV/mm 大幅降低至 598.46 kV/mm。

参考文献

- [1] LI Hua, LI Zhiwei, XU Zhijian, et al. Electric field and temperature dependence of electrical conductivity in biaxially oriented polypropylene films[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2014, 42(11): 3585-3591.
- [2] XIONG Jie, WANG Xin, ZHANG Xiao, et al. How the biaxially stretching mode influence dielectric and energy storage properties of polypropylene films[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2021, 138(11): 50029.
- [3] ZHANG Chuansheng, REN Chenhua, FENG Yu, et al. Evolution characteristics of DC breakdown for biaxially oriented polypropylene films[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(3): 1188-1196.
- [4] LI Zhen, HAN Yongsan, MIN Daomin, et al. Investigation of temperature dependent DC breakdown mechanism of EP/TiO₂ nanocomposites[J]. Applied Physics Letters, 2022, 121(5): 35-43.
- [5] LI Jianying, ZHOU Fusheng, MIN Daomin, et al. The energy distribution of trapped charges in polymers based on isothermal surface potential decay model[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(3): 1723-1732.
- [6] 郑明胜, 钟少龙, 裴家耀, 等. 改性聚丙烯薄膜电容器制备工艺和性能研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(10): 1-5.
ZHENG Mingsheng, ZHONG Shaolong, PEI Jiayao, et al. Research on preparation process and properties of modified polypropylene film capacitors[J]. Insulating Materials, 2022, 55(10): 1-5.
- [7] 谢兵, 蔡金峡, 王铜铜, 等. 高储能密度聚合物基多层复合电介质的研究进展[J]. 无机材料学报, 2023, 38(2): 137-147.
XIE Bing, CAI Jinxia, WANG Tongtong, et al. Research progress of polymer-based multilayer composite dielectrics with high energy storage density[J]. Journal of Inorganic Materials, 2023, 38(2): 137-147.
- [8] 于海生, 王瑶, 邓元. 聚丙烯/氮化硼纳米片复合薄膜的制备及介电储能性能研究[J]. 功能材料, 2020, 51(7): 7141-7147.
YU Haisheng, WANG Yao, DENG Yuan. Preparation of polypropylene/BNNSs composite films and studies on their dielectric and energy storage properties[J]. Journal of Functional Materials, 2020, 51(7): 7141-7147.
- [9] 张子琦, 刘宏博, 马宇威, 等. 锆钛酸钡/聚丙烯纳米复合介质的电学性能及储能特性研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(12): 61-68.
ZHANG Ziqi, LIU Hongbo, MA Yuwei, et al. Electrical properties and energy storage characteristic of Barium Zirconate Titanate/polypropylene Nanocomposites[J]. Insulating Materials, 2022, 55(12): 61-68.
- [10] TIAN Wenchao, YAN Fei, CAI Cailing, et al. Freeze-drying and hot-pressing strategy to embed two-dimensional Ti_{0.87}O₂ monolayers in commercial polypropylene films with enhanced dielectric properties[J]. Journal of Advanced Ceramics, 2021, 10(2): 368-376.
- [11] YAO Junlong, HU Li, ZHOU Min, et al. Synergistic enhancement of thermal conductivity and dielectric properties in Al-O-/BaTiO₃-/PP composites[J]. Materials, 2018, 11(9): 1536.
- [12] 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.
- [13] LI Junluo, WANG Shaojie, ZHU Yujie, et al. Biaxially oriented films of grafted-polypropylene with giant energy density and high efficiency at 125 °C[J]. Journal of Materials Chemistry, 2023, 11(20): 10659-10668.

- [14]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.
- [15]LIU Wenfeng, LIU Hongbo, CHENG Lu, et al. Enhanced energy storage performance in polypropylene-acrylic acid grafted polypropylene-ZrO₂ ternary nanocomposites[J]. Journal of Physics D-Applied Physics, 2023, 56(24): 244001.
- [16]赵凯林.电力电容器中油膜绝缘电老化与热老化的介电响应特性研究[D].重庆:重庆大学,2021.
- [17]马宇威,程璐,刘宏博,等.双向拉伸聚丙烯薄膜聚集态结构与击穿特性的关联[J].绝缘材料,2023,56(1):1-7.
MA Yuwei, CHENG Lu, LIU Hongbo, et al. Correlation between aggregation structure of biaxially oriented polypropylene and its breakdown property[J]. Insulating Materials, 2023, 56(1): 1-7.
- [18]LI Yanzhi, ZHOU Yihan, XING Zhaoliang, et al. Compatibility investigations of natural ester for capacitor application [C]//2024 IEEE 14th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials (ICPADM). [S. l.]: IEEE, 2024: 214-217.
- [19]李鹏,孔令杰,高显振,等.二苯基甲苯的合成表征及热稳定性能的研究[J].润滑油,2013,28(6):40-44.
LI Peng, KONG Lingjie, GAO Xianzhen, et al. Synthesis and characterization of dibenzyl-toluene and study on its thermal stability[J]. Lubricating Oil, 2013, 28(6): 40-44.
- [20]钟力生.工程电介质物理与介电现象[M].西安:西安交通大学出版社,2013.
- [21]NISHINO T, MATSUMOTO T, NAKAMAE K. Surface structure of isotactic polypropylene by X-ray diffraction[J]. Polymer Engineering & Science, 2000, 40(2): 336-343.
- [22]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.
- [23]CHENG Lu, LIU Wengfeng, LIU Hongbo, et al. Evolution of dielectric relaxation under elevated electric field of polypropylene-based films[J]. Journal of Physics D - Applied Physics, 2020, 53(44): 445502.
- [24]钟少龙,方立龙,王昕劼,等.金属化薄膜电容器元件电-磁-热耦合特性仿真研究[J].电力电容器与无功补偿, 2025, 46(3): 51-60.
ZHONG Shaolong, FANG Lilong, WANG Xinjie, et al. Simulation of electric-magnetic-thermal coupling characteristics of metallized film capacitor elements[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(3): 51-60.
- [25]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.
- [26]STAMM M. Introduction to physical polymer science[J]. Macromolecular Chemistry and Physics, 2006, 207(8): 787-787.
- [27]左强林,雷乔舒,严浩,等.浅议直流支撑电容器中的空间电荷问题[J].电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 23-28.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu, YAN Hao, et al. Discussion on space charge in DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 23-28.
- [28]左强林,雷乔舒.电容器不同介质结构直流和交流试验电压比值的理论研究[J].电力电容器与无功补偿, 2025, 46(1): 29-34.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Theoretical study on DC-AC test voltage ratio of different dielectric systems in capacitor [J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2025, 46(1): 29-34.
- [29]程璐,漆乐俊,姚成,等.电热老化对聚丙烯薄膜形态及击穿特性的影响[J].电力电容器与无功补偿, 2015, 36(6): 69-72.
CHENG Lu, QI Lejun, YAO Cheng, et al. Influence of electric-thermal aging on BOPP film morphology and breakdown performance[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(6): 69-72.

作者简介:

褚洋(2001—),男,硕士研究生,主要从事油浸式电容器介质材料老化特性的研究工作。E-mail: chuyangpp@stu.xjtu.edu.cn。

李志元(1999—),男,博士研究生,主要从事电介质储能材料的研究工作。E-mail: atlantis@stu.xjtu.edu.cn。

崔宇馨(2001—),女,硕士研究生,主要从事电介质储能材料的研究工作。E-mail: cuiyuxin@stu.xjtu.edu.cn。

程璐(1988—),女,副教授,主要从事储能与绝缘介质材料研究、电容器状态评价方法的研究工作。E-mail: chenglu@xjtu.edu.cn。

刘文凤(1982—),女,教授,主要从事高电压绝缘技术、绝缘与功能电介质材料应用基础的研究工作。E-mail: liuwenfeng@xjtu.edu.cn。