

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.01.011

热-应力老化作用对电容器用 BOPP 薄膜绝缘性能的影响

宋家乐¹, 张添胤¹, 朱光宇², 赵亮³, 潘振³, 尹星力³, 陈向荣¹

(1. 浙江大学电气工程学院, 杭州 310027; 2. 国网辽宁省电力有限公司电力调度控制中心, 沈阳 110002;

3. 宁波市江北九方和荣电气有限公司, 浙江 宁波 315033)

摘要: 为了研究热-应力老化作用对电容器用双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)薄膜绝缘性能的影响, 本文对电容器用厚度为 7.8 μm 的 BOPP 薄膜进行 120 $^{\circ}\text{C}$ 下单向拉伸, 在应力分别为 0、10、20、40 N 下进行 168 h 的老化处理, 利用万能材料试验机测试了其拉伸应力应变特性, 在 85 $^{\circ}\text{C}$ 条件下测试了试样的电导率、介电常数和直流击穿等电气特性, 并通过热刺激去极化电流分析了热-应力老化作用对 BOPP 薄膜陷阱特性的影响。结果表明: 热-应力的老化作用导致 BOPP 薄膜电导率明显上升, 热的作用导致介电常数的下降, 单向应力的作用导致介电常数的上升。此外, 热刺激去极化电流测试结果表明, 热-应力老化作用导致 BOPP 薄膜中能级较深陷阱密度显著上升。上述结果表明, 热-应力老化作用导致电容器用 BOPP 薄膜电气性能下降, 应增强对其重视和研究。

关键词: BOPP 薄膜; 热老化; 单向应力; 绝缘性能; 陷阱特性

Influence of Thermal-stress Aging on Insulation Performance of BOPP Film for Capacitor

SONG Jiale¹, ZHANG Tianyin¹, ZHU Guangyu², ZHAO Liang³, PAN Zhen³,

YIN Xingli³, CHEN Xiangrong¹

(1. College of Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 2. Power

Dispatching Control Center of State Grid Liaoning Electric Power Co., Ltd., Shenyang 110002,

China; 3. Ningbo Jiangbei Gofront Herong Electric Co., Ltd., Zhejiang Ningbo 315033, China)

Abstract: For studying the influence of thermal-stress aging on dielectric performance of polypropylene film (biaxially oriented polypropylene, BOPP) for capacitor, the BOPP film with a thickness of 7.8 μm for capacitor is stretched down at 120 $^{\circ}\text{C}$ and is subjected to aging treatment at the stresses at 0, 10, 20 and 40 N respectively for 168 hours. The tensile stress-strain characteristics of it is tested by the universal material testing machine. Such electrical characteristics as electrical conductivity, dielectric constant and DC breakdown of the sample are tested at 85 $^{\circ}\text{C}$. The influence of the thermal-stress aging on the trap characteristics of BOPP film is analyzed by thermally stimulated depolarization current (TSDC) technique. The results show that the thermal-stress aging leads to significant increase of the electrical conductivity of BOPP films. Also, the thermal action leads to reduction of dielectric constant and the unidirectional stress causes the dielectric constant to increase. In addition, the TSDC test results show that the thermal-stress aging significantly increases the trap density and trap energy levels in BOPP film. The above-mentioned result shows that the thermal-stress aging leads to reduction of electrical performance of BOPP film, of which more attention and research shall be strengthened.

Keywords: BOPP film; thermal aging; unidirectional stress; insulation performance; trap characteristics

收稿日期: 2023-10-07

基金项目: 国家重点研发计划(2021YFB2401503)。

0 引言

随着电容器向小型化、轻型化的发展,国际先进电容器制造商于20世纪60年代研制出金属化聚丙烯薄膜电容器^[1]。双向拉伸聚丙烯(Biaxially oriented polypropylene, BOPP)薄膜因其优异的抗击穿特性(击穿场强可高达700 kV/mm),极低的介质损耗($\tan\delta \sim 10^{-4}$),被广泛应用于电力电子电容器、家用电器,高压直流输电换流阀内滤波、均压、电压支撑、辅助换流和阻尼缓冲用电容器和新能源汽车用直流母线电容器等领域^[2-4]。

在电容器制造过程中需将聚丙烯薄膜卷绕成圆柱状,在此过程中由于不可抗力因素的存在常导致聚丙烯薄膜存在横向拉伸应力^[5-6],在金属化薄膜电容器工作过程中电场力的作用引起的机械应力使得端部发热,而热效应造成的薄膜径向收缩将导致拉伸应力进一步增大,并形成皱褶。由此可知,金属化薄膜电容器服役过程中需长期承受强电场、高温热场和应力场的共同作用^[7]。

因此,为了研究热场和应力场共同作用下BOPP薄膜的电气特性演变规律,本文采用自建的多物理场老化实验平台开展BOPP薄膜老化试验,并在85℃条件下研究其介电常数、电导率、击穿等电气特性,通过热刺激去极化电流(thermally stimulated depolarization currents, TSDC)分析其陷阱特性,获得热场和应力场老化作用导致BOPP薄膜电气特性演变的机理。

1 试样、老化平台和测试平台

1.1 试样制备

试验样品采用宁波大东南万象科技有限公司提供的厚度为7.8 μm、型号为H-MP的电容器用聚丙烯薄膜。未处理的试样命名为BOPP-wcl,处理后的试样按处理温度、拉伸应力和处理时间进行命名,其中TD代表横向拉伸,MD代表纵向拉伸。

1.2 老化试验平台

采用如图1所示实验室自研的多物理场老化实验平台开展老化特性研究。将试样裁剪为宽度25 cm,长度20 cm的矩形。试验前,使用无水乙醇清洗试样表面,将试样放入上下电极之间,利用夹具将其夹紧,并施加单向拉伸应力及老化温度,温度设定为120℃,拉伸应力设定为0、10、20和40 N,老化时间7 d。

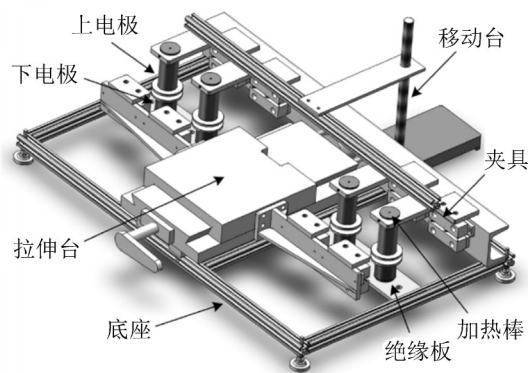


图1 多物理场老化实验平台

Fig. 1 Multi physical field aging experimental platform

1.3 拉伸应力-应变特性测试

采用德国Zwick公司生产的Zwick/Roell Z020万能材料试验机对BOPP薄膜的应力-应变特性进行测试,试样长度20 mm,宽度2 mm,预载应力0.02 N,测试速度5 mm/min,每种试样测试5次取平均值计算弹性模量,试样制作过程中可能存在细小裂痕,因此选取5个试样的最大断裂应力和断裂应变作为参考。

1.4 电导率测试

采用三电极法测试各BOPP试样电导电流,测试温度为85℃,电场强度分别为30 MV/m、60 MV/m、90 MV/m和120 MV/m,测量前用酒精擦拭试样表面,测量其厚度后将其放置在三电极之间,并置于恒温箱内,设置所需测试温度并等待温度达到稳定值,对试样进行30 min加压极化,测量记录该过程中的电流值,取加压极化过程中的最后10个电流的平均值作为该试样电导电流测试值。为保证实验结果的重复性,每种试样测试3次取平均值,并根据式(1)计算电导率。

$$\sigma = \frac{J}{E} = \frac{Id}{SU} \quad (1)$$

式中: σ 为电介质材料的直流电导率; J 为单位面积流过的电导电流; E 为施加的电场强度, I 为电导电流, S 为电极与试样接触的面积, d 为试样的厚度, U 为外施电压。

1.5 介电特性和TSDC测试

采用德国生产的Novocontrol Concept 80宽频宽温介电谱仪测试各BOPP试样的介电常数和热刺激去极化电流,测试前首先用无水乙醇擦拭试样表面,待试样干燥后测量其厚度,随后对试样两面分别进行离子溅射喷金,然后将喷金后的试样放置在铜电极之间进行测量,测试频率范围为1~10⁶ Hz。TSDC测试过程首先将试样加热至70℃,并在3×10⁷ V/m

正极性电场下极化 15 min;然后以 20 ℃/min 的冷却速度将温度降低至-50 ℃;随后将试样短路 3 min;最后以 5 ℃/min 的速度将试样升温至 150 ℃,升温过程实时记录试样的泄漏电流,测试的温度为 25±1 ℃,湿度不超过 30%,每个试样测试 3 次。

1.6 直流击穿强度测试

击穿测试系统符合 GB/T 1408.1-2016 标准,采用球-柱电极测试聚丙烯试样直流电压下的击穿电场,其中球电极直径 20 mm,柱电极直径 25 mm。实验过程中电极置于盛有变压器油的玻璃容器中,通过加热绝缘油,测试试样在 85 ℃下的击穿电压。测试时的加压方式采用匀速升压,升压速率为 0.5 kV/s,对每种试样进行 15 次有效测试并记录击穿电压值,采用双参数威布尔分布进行对测试结果进行概率统计分析。

2 实验结果

2.1 应力-应变曲线

表 1 为不同条件下 BOPP 薄膜应力应变特性,可以看出 BOPP 薄膜的横向弹性模量和断裂应力约为纵向的 2 倍,120 ℃ 温度老化作用导致 BOPP 薄膜的纵向弹性模量略有降低,断裂应力和断裂伸长率变化不大。因实际工况下 BOPP 薄膜的应力多为纵向,本文后续所施加的应力方向均为纵向。

表 1 应力应变特性 Table 1 Stress and strain characteristics					
试样	弹性模量 E_{mod} MPa	断裂应力 F_{Break} MPa	断裂伸长率 dL/%	最大应力 F_{max} MPa	F_{max} 时 dL/%
wcl-TD	4 957	256	18.4	256	18.4
wcl-MD	2 722	124	104.8	124	104.8
120-0-7-MD	2 638	125	101.7	125	101.6

2.2 电导率特性

图 2 为老化前后各 BOPP 试样在 85 ℃下的直流电导率随电场强度变化曲线,从图 2 中可以看出在 85 ℃下各 BOPP 试样的直流电导率随外加电场强度的升高而明显增大。

对比老化前后各试样的电导率可以看出,热场单独作用下 BOPP 薄膜在电场强度低于 90 MV/m 时电导率明显增加,但在电场强度高于 90 MV/m 下电导率几无变化。结果表明,热场和应力场的共同作用导致各电场强度下 BOPP 薄膜的电导率明显增大,且施加应力越大 BOPP 薄膜电导率越大。分析可知,热和单向应力的老化作用都将导致 BOPP 薄膜电导率的上升。

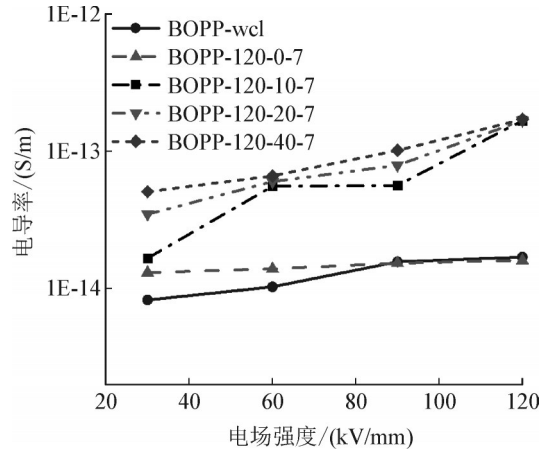


图 2 BOPP 试样直流电导率随电场强度变化曲线(85℃)
Fig. 2 Variation curve of DC conductivity of BOPP sample with electric field strength (at 85 °C)

2.3 介电特性

在 30 ℃ 和 85 ℃ 下测试老化前后各 BOPP 试样的相对介电常数,测试结果见图 3。

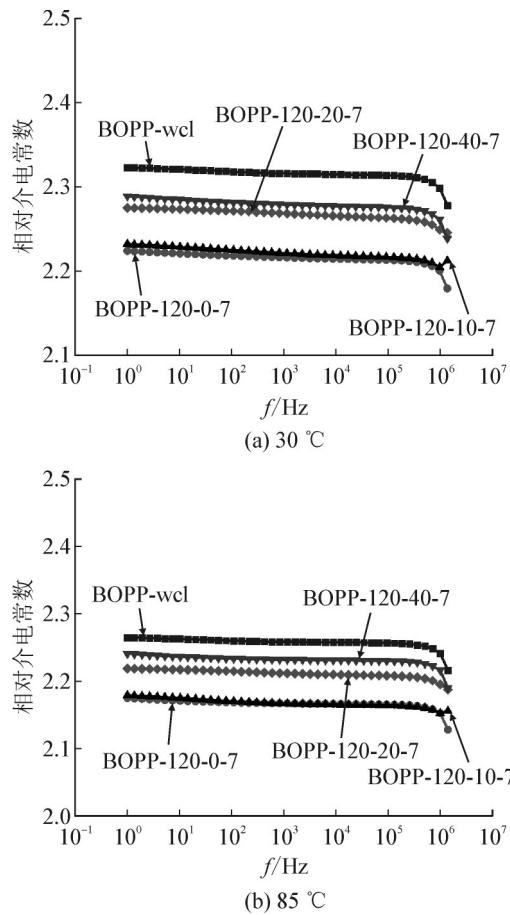


图 3 相对介电常数
Fig. 3 Relative dielectric constant

从图 3 可以看出热场单独作用时老化试样介电常数最低,30 ℃、1 kHz 下仅为 2.216,相较于未处理的 BOPP 试样下降 4.3%;单向应力的老化作用导致 BOPP 薄膜介电常数上升,且 BOPP 薄膜的介电常

数与施加应力成正相关。此外,介电常数在 85℃ 与 30℃ 条件下表现出相同的变化趋势,热场单独作用下 BOPP 试样介电常数在频率为 1 kHz 条件下仅为 2.167,相比未处理试样在同一温度下降低 4.1%。由此可知,高温老化作用导致聚丙烯薄膜的介电常数明显降低,而单向应力的增大提高了 BOPP 的介电常数。

2.4 直流击穿特性

图 4 为 85℃ 下老化前后各 BOPP 试样直流击穿场强的威布尔分布(置信度为 99.9%)。

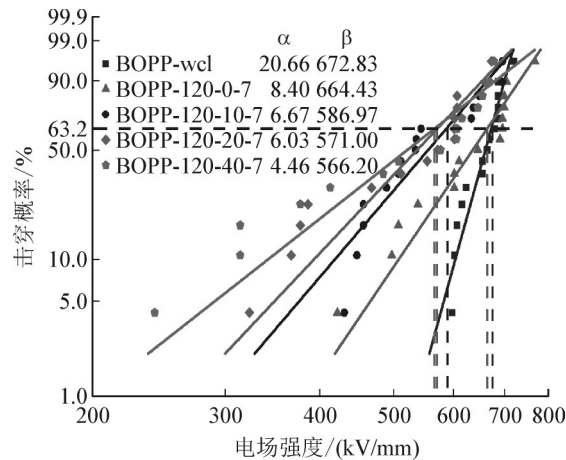


图4 直流击穿场强的威布尔分布
Fig. 4 Weibull distribution of DC breakdown strength

从图 4 分析易得,热场老化单独作用导致额定工作温度下 BOPP 薄膜击穿曲线的形状参数明显下降,但击穿场强变化不大;而热-应力的共同作用导致额定工作温度下 BOPP 薄膜击穿强度和形状参数均明显下降,相较于未处理试样,BOPP-120-40-7 试样击穿场强下降 15.8%。结果表明,热场老化作用导致聚丙烯薄膜击穿场强数据分散度增加,而单向应力的老化作用导致聚丙烯薄膜击穿电压显著下降,两种应力老化作用对 BOPP 薄膜的长期工作特性提出更高要求。

2.5 热刺激去极化电流

图 5 为老化前后各 BOPP 试样的热刺激去极化电流曲线。从图 5 可以看出 BOPP 试样的去极化热刺激电流表现为明显的双峰特性,较高的老化温度对低温峰影响较小,但引起高温的峰值电流明显增大。此外,单向应力的作用导致两个峰的峰值电流都明显增大,且随施加单向应力的增大而增大。结果表明,热和应力的老化作用对薄膜内部结构影响较大,造成内部结构与陷阱特性的差异,导致各试样的热刺激去极化电流差异较大。

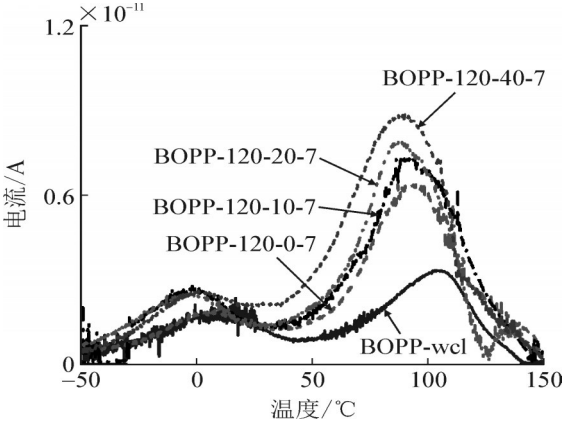


图5 BOPP试样的TSDC曲线
Fig. 5 TSDC curve of BOPP samples

3 讨论

为分析热和单向应力老化作用对聚丙烯薄膜电气性能的影响,通过 TSDC 曲线对 BOPP 试样内部的陷阱特性进行分析计算。BOPP 薄膜的陷阱能级可根据式(2)和式(3)获得^[10]。

$$I=A\exp\left[-\left(\frac{E_A}{kT}\right)-\frac{1}{B\tau}\int_{T_0}^T\exp\left(-\frac{E_A}{k_Bt}\right)dt\right]$$
 (2)

$$N_t=\frac{1}{bed}\int_{T_0}^T I(t)dt$$
 (3)

式中: T 为绝对温度; k 为玻尔兹曼常数; E_A 为陷阱能级圈闭的能量深度; A 和 B 为常数; τ 为载流子弛豫时间; T_0 为初始温度; N_t 是陷阱密度; b 是实验升温速度(5℃/min); d 是样品厚度。根据式(2)–(3)通过曲线拟合方法计算出老化前后各 BOPP 试样的陷阱特性如下表 2 所示。

表2 计算陷阱能级
Table 2 Calculated trap energy levels

试样 种类	低温峰(α 峰)			高温峰(γ 峰)		
	峰温/ ℃	陷阱 深度 E_A /eV	陷阱密度 N_t /mm ⁻³	峰温/ ℃	陷阱 深度 E_A /eV	陷阱密度 N_t /mm ⁻³
wcl	10.0	0.226	1.832×10 ¹⁵	104	0.606	2.195×10 ¹⁵
120-0-7	6.0	0.241	1.705×10 ¹⁵	93.0	0.538	4.757×10 ¹⁵
120-10-7	-2.6	0.207	2.603×10 ¹⁵	91.0	0.538	5.452×10 ¹⁵
120-20-7	-3.8	0.206	2.610×10 ¹⁵	87.6	0.541	5.812×10 ¹⁵
120-40-7	0.2	0.218	2.623×10 ¹⁵	88.2	0.545	6.751×10 ¹⁵

聚丙烯薄膜中的结晶和非晶区域对电容器在应用过程中的绝缘性能有直接影响^[11]。热老化会刺激聚合物中的化学反应,从而导致分子链断裂,导致其长度和重量降低^[12]。此外,热老化致使薄膜的部分非晶相转变为晶相,杂质和低分子量物质从老化薄膜中的大块材料中被排斥。因此,随着晶相的增

加,膜表层杂质和低分子物质的数量也随之增加^[13]。由于非晶区熔点低,因此易受到高温影响引起离子跳变,激活非晶相中的电流传导机制^[14]。由此可知,BOPP薄膜热老化后电导率的显著增大归因于定向非晶相的弛豫和离子浓度的增加^[15]。

单向拉伸应力影响 BOPP 绝缘性能的机理可分为两个方面:一方面在应力长期作用下试样表面微孔增大或微孔间的介质被破坏导致多个微孔结合转变为空隙,导致 BOPP 薄膜绝缘性能下降^[16]。另一方面应力作用引起 BOPP 薄膜内部有机物聚合分子的一些化学键和交联键直接断裂或处于断裂趋势^[7],形成化学陷阱,造成陷阱密度的增加和击穿强度降低^[17],而 TSDC 的测试和陷阱密度的计算结果证实了这一推论。

4 结语

本文研究了 120℃ 温度、单向应力分别为 0、10、20 和 40 N 共同作用 168 h 后电容器用 BOPP 薄膜的理化特性和介电特性,通过陷阱特性的计算分析了热和单向应力老化作用导致其电气特性改变的机理,得出如下结论:

1) 热和单向拉伸应力的老化作用导致 BOPP 薄膜直流电导率明显提升,相对介电常数略有下降,热场老化作用导致 BOPP 薄膜击穿曲线形状参数明显降低,热和 40 N 单向拉伸应力的老化作用导致 BOPP 薄膜直流击穿场强下降 15.8%,形状参数进一步下降,出现 314.1kV/mm,342.4 kV/mm 等较低的直流击穿场强;

2) 热和单向拉伸应力的共同作用导致 BOPP 内部能级在 0.5 eV 附近的陷阱密度显著提升。电气特性的改变归因为热和单向应力长期作用导致的分子链断裂和结晶度变化。

参考文献

- [1] 叶润峰,裴家耀,郑明胜,等. 高介电聚丙烯基纳米复合薄膜介电及储能性能抗老化特性[J]. 电工技术学报, 2020, 35(16): 3529-3538.
YE Runfeng, PEI Jiayao, ZHENG Mingsheng, et al. Anti-aging characteristics of dielectric and energy storage of high dielectric polypropylene based nanocomposite films [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(16): 3529-3538.
- [2] 刘光辉,佟辉,徐菊,等. 新能源汽车用直流母线电容器关键功能材料研究进展[J]. 电工电能新技术, 2019, 38(3): 63-73.
LIU Guanghui, TONG Hui, XU Ju, et al. Progress in key functional materials of DC-link bus capacitors for renewable energy vehicles[J]. Advanced Technology of Electrical Engineering and Energy, 2019, 38(3): 63-73.
- [3] 孙晓武. 直流支撑电容器温升影响因素研究[J]. 电气技术, 2020, 21(4): 76-79.
SUN Xiaowu. Study on the factors affecting the temperature rise of DC link capacitor[J]. Electrical Engineering, 2020, 21(4): 76-79.
- [4] 王子建,严飞,侯智剑,等. 高压全膜电容器热稳定性试验条件下的温度场特性[J]. 电工技术学报, 2016, 31(17): 207-216.
WANG Zijian, YAN Fei, HOU Zhijian, et al. Thermal field characteristics of high voltage film capacitors in thermal stability test[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2016, 31(17): 207-216.
- [5] 陶德旺. 薄膜横向拉伸中断膜原因分析[J]. 电力电容器, 2005(3): 39-40.
TAO Dewang. Reasons analysis of the film break age in transverse orientation pulling[J]. Power Capacitor, 2005(3): 39-40.
- [6] 储松潮. 电容器用双向拉伸聚丙烯薄膜打滑试验研究[J]. 电力电容器, 2003(1): 38-43.
CHU Songchao. Study on the slipping of BOPP film for capacitor[J]. Power Capacitor, 2003(1): 38-43.
- [7] 彭倩,吴广宁,张星海,等. 机械应力对聚丙烯薄膜局部放电性能的影响[J]. 高电压技术, 2008, 34(6): 1261-1266.
PENG Qian, WU Guangning, ZHANG Xinghai, et al. Influence of mechanical stress on polypropylene film partial discharge[J]. High Voltage Engineering, 2008, 34(6): 1261-1266.
- [8] SCHLARB A K, SUWITANINGSIH D N, KOPNARSKI M, et al. Supramolecular morphology of polypropylene filled with nanosized silica[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2014, 131(1): 15-29.
- [9] RAN Z Y, DU B X, XIAO M, et al. Effect of crystallization regulation on the breakdown strength of metallized polypropylene film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2021, 28(1): 175-182.
- [10] LEI Q, WANG X, FAN Y. A new method of auto-separating thermally stimulated current[J]. Journal of Applied Physics, 1992, 72(9): 4254-4257.
- [11] ZOGRAFI G, NEWMAN A. Interrelationships between structure and the properties of amorphous solids of pharmaceutical interest[J]. Journal of Pharmaceutical Sciences, 2017, 106(1): 5-27.
- [12] BENDJAOUAHDOU C, BENSAD S. Aging studies of a polypropylene and natural rubber blend[J]. International Journal of Industrial Chemistry, 2018, 9(4): 345-352.

(下转第 101 页)

- DU Baixue, RAN Zhaoyu, LIU Haoliang, et al. Research progress of dielectric properties and improvement methods of polypropylene film for dry-type capacitor[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(5): 1363-1374.
- [7] KURIMSKY J, KOSTEREC M, VARGOVÁ B. Breakdown voltage of polypropylene film during C and thermal ageing [C]//2017 18th International Scientific Conference on Electric Power Engineering(EPE). [S.l.]: IEEE, 2017: 1-4.
- [8] KONG Zhonghua, LIN Fuchang, JANG Yi, et al. Study of temperature rise of metallized capacitors applied in repetitive pulse[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2009, 16(4): 1100-1105.
- [9] 赵晨. 谐波影响下电力电容器及其串联电抗器的多物理场研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2021.
- [10] YI Bosi, LI Hua, JIANG Haoyu, et al. Breakdown behavior of metallized BOPP film under the DC superimposed harmonic condition[C]//2019 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena(CEIDP). [S.l.]: IEEE, 2019: 797-800.
- [11] 岳国华, 杜志叶, 孟圣淳, 等. 基于电热耦合的干式直流电容器温升分布不均匀特性分析及优化[J]. 高电压技术, 2022, 48(12): 4915-4924.
- YUE Guohua, DU Zhiye, MENG Shengchun, et al. Analysis and optimization of non-uniform temperature rise distribution of dry-type DC capacitor based on electro-thermal coupling[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(12): 4915-4924.
- [12] RL SPYKER, NELMS, RM. Classical equivalent circuit parameters for a double-layer capacitor. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2000, 36(3): 829-836TDK. Film Capacitors[EB/OL].
- [13] HO J, JOW T R. High field conduction in biaxially oriented polypropylene at elevated temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(3): 990-995.
- [14] FRENKEL J. On pre-breakdown phenomena in insulators and electronic semi-conductors[J]. Physical Review, 1938, 54(8): 647.
- [15] LI J, WANG S, ZHU Y, et al. Biaxially oriented films of grafted-polypropylene with giant energy density and high efficiency at 125 °C[J]. Journal of Materials Chemistry a, 2023, 11(20): 10659-10668.
- 作者简介:**
- 赵子轩(1996—), 男, 博士, 主要从事电介质材料绝缘及储能特性的研究。
- 佟宇晶(1997—), 女, 博士, 主要从事电介质材料绝缘及储能特性的研究。
- 张心桐(1998—), 男, 硕士, 主要从事电介质材料绝缘特性表征方法的研究。
- 屠幼萍(1966—), 女, 教授, 主要从事电力系统过电压及保护、电力系统电磁环境与保护、电介质材料介电特性、高压新技术的研究。E-mail: typ@ncepu.edu.cn.
-
- (上接第87页)
- [13] UMEMURA T, ABE K, AKIYAMA K, et al. Thermal-aging behavior of BOPP films[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1987, EI-22(6): 735-743.
- [14] J H O. High field conduction in biaxially oriented polypropylene at elevated temperature[J]. IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation, 2012, 19(3): 990-995.
- [15] AZIZ S B, WOO T J, KADIR M F Z, et al. A conceptual review on polymer electrolytes and ion transport models[J]. Journal of Science Advanced Materials and Devices, 2018, 3(1): 1-17.
- [16] 刘付德, 王新生, 杨百屯, 等. 聚丙烯薄膜的电老化动力学研究[J]. 自然科学进展, 1992(1): 48-54.
- LIU Fude, WANG Xinsheng, YANG Baitun, et al. Study on electrical aging kinetics of polypropylene film[J]. Progress in Natural Science, 1992(1): 48-54.
- [17] 李忠华, 尹毅, 朱军, 等. 聚合物绝缘电热联合老化的陷阱理论和实验验证[J]. 中国电机工程学报, 1999(2): 70-74.
- LI Zhonghua, YIN Yi, ZHU Jun, et al. Trap theory of combined aging under electrical and thermal stress in polymers and its test verification[J]. Proceedings of the CSEE, 1999(2): 70-74.
- 作者简介:**
- 宋家乐(1998—), 男, 博士研究生, 主要从事电介质薄膜材料绝缘测试技术, 绝缘结构优化和多物理场仿真等。E-mail: sjl1998@zju.edu.cn.
- 张添胤(2000—), 男, 博士研究生, 主要从事交联聚乙烯材料绝缘测试技术。
- 朱光宇(1997—), 男, 硕士, 主要从事电力系统及其自动化和高压技术。
- 赵亮(1985—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器设计及研发工作。
- 潘振(1986—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器的研发、工艺工作。
- 尹星力(1999—), 男, 工程师, 主要从事电力电容器的研发、工艺工作。
- 陈向荣(1982—), 男, 教授, 通信作者, 主要从事先进电气材料与高压绝缘测试技术, 先进电力装备与新型电缆系统, 高压新技术等先进高压输电新技术的前沿基础和应用研究。