

金属化膜击穿与自愈性能研究

王健涛¹, 吴致远², 王昕劼¹, 钟少龙¹, 党智敏¹

(1. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084; 2. 华北电力大学电气与电子工程学院, 北京 102206)

摘要: 薄膜电容器凭借体积小、储能密度高、安全性好等优点,在直流输电、轨道交通、脉冲功率装置等方面具有重要应用。薄膜电容器常用介质材料包括双向拉伸聚丙烯(BOPP)薄膜和聚对苯二甲酸乙二醇酯(PET)薄膜,本文以两种介质薄膜为研究对象,通过真空蒸镀制备不同方阻的金属化膜,研究了金属层厚度对薄膜击穿强度和自愈性能的影响。两种聚合物的金属化膜都表现为:降低金属层厚度可在一定程度上提高薄膜的击穿强度,由于自愈能量具有统计性,其随电压升高增大,而高方阻薄膜的自愈能量更小,自愈性能更好。实验中也观察到重复自愈现象并对出现的原因做出了解释。
关键词: 薄膜电容器; 电极厚度; 击穿强度; 自愈能量

Study on Breakdown and Self-healing Performance of Metallized Film

WANG Jiantao¹, WU Zhiyuan², WANG Xinjie¹, ZHONG Shaolong¹, DANG Zhimin¹

(1. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Film capacitor has important applications in such fields as DC transmission, rail transit, pulse power device due to its small size, high energy storage density and good safety. The commonly used dielectric material of film capacitor includes biaxially oriented polypropylene (BOPP) films and polyethylene terephthalate (PET) films. In this paper, two types of dielectric films are taken as the research object, the influence of metal layer thickness on the breakdown strength and self-healing performance of the film are studied by vacuum evaporation to prepare metallized films with different square resistance. The metallized film of both polymers is manifested as that reducing the thickness of the metal layer can improve the breakdown strength of the film to a certain extent, and the self-healing energy is statistically significant and increases with the increase of voltage, while the self-healing energy of the high square resistance film is smaller and the self-healing performance is better. Repeated self-healing is also observed in the experiment with the occurred cause is explained.

Keywords: film capacitor; electrode thickness; breakdown strength; self-healing energy

0 引言

金属化薄膜电容器是将金属化的聚合物薄膜卷绕得到的电容器。相比传统油浸式电容器,金属化膜电容器可以避免绝缘油泄露的问题,噪声水平更低,体积和重量小于油浸式电容器,储能密度高,更好的满足柔性直流输电系统的空间和能量要求。金属化膜电容器凭借诸多优点,还广泛应用于电动汽车、轨道交通、国防武器等方面,对薄膜电容器和金属化膜的研究具有重要意义^[1-2]。

金属化膜具有自愈性能,能够提高电容器在高场强下的工作稳定性。当电容器场强升高时,电弱点位置首先发生击穿,形成放电通路,电荷流经放电通道产生的大量热使得电弱点附近的金属层气化,将电弱点电气隔离,电容器恢复到之前的电压水平,使得绝缘重新恢复^[3-5]。

金属化膜电容器最常用的介质材料是双向拉伸聚丙烯(biaxially oriented polypropylene, BOPP)薄膜,在常温下具有低损耗和较高的击穿电压。但高温下 BOPP 薄膜的性能会快速下降,因此更耐高温的聚对苯二

收稿日期:2023-10-17

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401504)。

甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET)薄膜也是常用的薄膜电容器材料^[6]。金属化膜电容器的电极材料一般为铝、锌或铝锌合金,厚度在 100 nm 以下^[7]。金属化膜电容器的核心在于金属化的聚合物薄膜,金属化膜的电学性能和自愈性能会直接影响卷绕后形成的电容器的性能。金属化膜则是由金属层、介质层以及界面组成的,对于金属化膜的调控最为直接的是金属层以及介质层的种类和厚度。因此本文通过搭建自愈性能测试平台,研究了金属层厚度对聚合物薄膜击穿性能和自愈性能的影响。

1 自愈性能测试方法

金属化膜在自愈的过程中会发生短暂的介质击穿、等离子产生、金属受热蒸发以及最后电弧熄灭等多个现象^[8]。当发生自愈放电时,电弱点的位置形成通路和电弧,自愈电弧从形成到消失的过程中,导电通路的形成会消耗一定的能量,也就是自愈能量。薄膜自愈的成功概率主要由自愈能量的大小决定,当自愈能量过大时,可能造成薄膜受热分解的石墨层堆积,或多层薄膜烧结,放电通道连接,使得自愈不彻底导致自愈失败,电容器绝缘无法恢复。因此对于聚合物薄膜的自愈性能,一般通过分析其发生自愈时的自愈能量来描述其自愈性能。对于自愈能量的测量, Tortai 等人通过光测量法利用快速光电二极管测量自愈持续时间,但测量结果并不精确^[9]。Sassoulas 等人通过人工引入电弱点进行自愈实验,优点是便于观察自愈点的位置,提高自愈现象发生的概率,但与实际自愈过程存在差别^[10]。根据上面的分析,自愈能量主要由发生自愈时的电压电流以及自愈时间决定,因此本实验中采用电测量法测量自愈能量。

搭建如图 1 所示的自愈能量测试电路,其中: R_c 为保护电阻; C_0 为稳压电容; C_s 为样品膜电容; R_s 为 1 Ω 的采样电阻,通过 R_s 上的电压反映流经样品的电流。样品采用两张基本相同的金属化膜上下叠放如图 2 所示。将两张金属化膜错位叠放在一起,两边放上电极,则起到介电作用的是中间的公共区域。通过测量自愈发生时的电压电流波形,积分得到自愈能量。

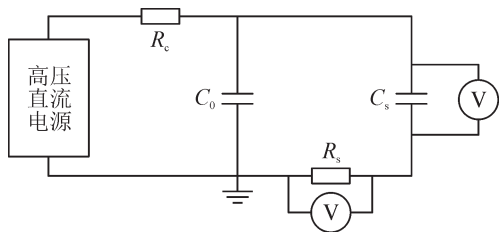


图1 自愈能量测试电路
Fig. 1 Test circuit of self-healing energy



图2 自愈测试平台样品薄膜放置示意图
Fig. 2 Schematic diagram of sample film placement on self-healing test platform

自愈成功的经典电压电流波形如图 3 所示。当金属化膜发生自愈放电时,电弱点处形成放电通道,产生电弧,电压开始降低同时电流急剧增大。当功率密度降低达到临界时,电弧难以维持逐渐熄灭^[11],电流开始降低同时电压慢慢升高,基本恢复到之前的电压水平,薄膜恢复绝缘能力。

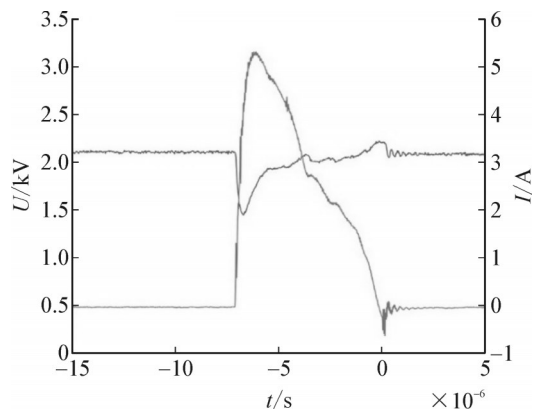


图3 自愈放电典型电压电流波形
Fig. 3 Typical voltage and current waveform of self-healing discharge

2 金属化膜特性表征

本文通过真空蒸镀的方式,制备了金属层厚度分别为 70 nm、80 nm 和 100 nm 的金属化 BOPP 和 PET 薄膜,对薄膜的方阻、直流击穿性能和自愈性能进行了测试。

2.1 薄膜方阻

方阻作为金属化膜的重要参数,影响薄膜的通路能力与自愈性能,首先对不同金属层厚度的介质薄膜方阻进行了测量,不同金属化膜的方阻见图 4。

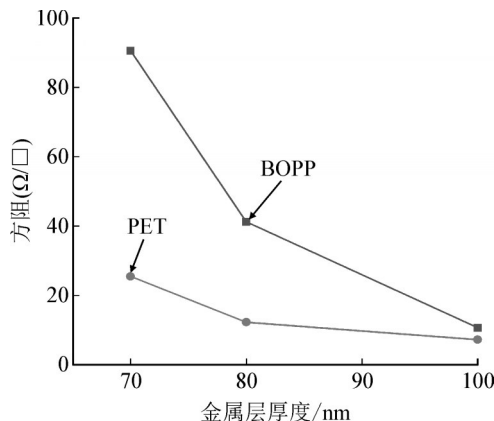


图4 方阻与电极厚度的关系
Fig. 4 Relationship between square resistance and electrode thickness

根据图4可知,同种电介质薄膜的方阻随着电极厚度的增加而下降,相同电极厚度下,不同电介质薄膜表现出不同的方阻大小,BOPP薄膜方阻要高于PET薄膜。这种差异随着电极厚度降低而愈发显著。

方阻用于表征金属镀层的厚度,蒸镀金属层越薄方阻越大。而在同种金属层厚度下,不同聚合物薄膜的方阻并不相同,这是因为当金属层厚度很低,并与介质薄膜接触时,整张金属化膜的方阻就不再只与金属电极厚度相关。Dong Q等人的研究指出,当金属电极连续时,薄膜方阻与薄膜表面峰谷粗糙度有关,粗糙度越大,方阻越大。铝原子蒸发后在聚合物表面成膜的过程中,成膜效果与聚合物的表面能有关,PET薄膜表面能高于BOPP薄膜,PET薄膜的表面上铝原子更容易形成成核点位,使得金属电极更加光滑^[12]。因此在相同金属层厚度下,BOPP薄膜的方阻高于PET薄膜,随着电极厚度增加,粗糙度影响效果降低,电极厚度影响更显著,电极厚度越大,不同介质薄膜的方阻差异性越低。

2.2 击穿性能

对样品进行击穿测试,直流电压下不同薄膜击穿场强的 Weibull 分布如图5所示。

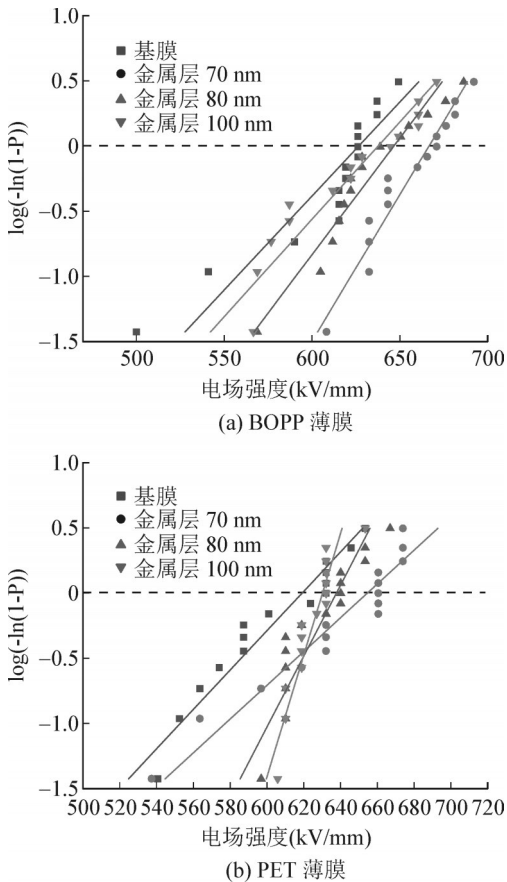


图5 不同金属化膜击穿场强 Weibull 分布
Fig. 5 Weibull distribution of breakdown strength for different metallized films

比较不同样品的击穿强度发现,不同金属层厚度的金属化膜,击穿场强随着电极厚度的降低而提高,耐压能力也得到提升。相比基膜的 70 nm、80 nm 和 100 nm 电极的 BOPP 薄膜的击穿场强分别提高了 6.52%、3.07%和 1.62%,3 种电极厚度的 PET 薄膜的击穿场强也分别有 6.09%、3.20% 和 1.81%的提高。

自愈放电时,金属化膜通过蒸发电弱点附近金属电极的方式,将电弱点电气隔绝,提高薄膜的耐压能力。在电弱点面积一定时,电极清除体积与电极厚度成正比,金属层厚度低的薄膜需要更小的能量即可完成电弱点的隔离,自愈过程更容易成功。因此金属层厚度低的薄膜表现出更高的电气强度。

2.3 自愈性能

金属化薄膜的自愈现象实质是电弱点发生击穿放电后被隔离清除的过程,由于聚合物薄膜在生产拉伸以及真空蒸镀的过程中的随机性,薄膜内部存在耐压能力不同的电弱点,因此金属化膜会在不同的电压等级下发生不同程度的自愈放电现象。实验中设定样品两端的升压速率为 50 V/s,将不同厚度不同电介质的聚合物薄膜按照图2所示摆放,金属层的一面均朝上放置,电极分别放在上下两张膜的边缘金属部分,以便模拟中间介质层在上下都含有纳米级金属层时的情况。实验中测量到部分自愈波形如图6所示,部分自愈形貌如图7所示。

根据图6中的电压电流波形所示,当电弱点无法承受电压,发生击穿放电时,电压迅速下降,同时电流提高到较大值,随后电弧熄灭,电流下降接近零,绝缘恢复,整个自愈过程持续时间一般为数微秒。图7为某次自愈后显微镜下的自愈形貌,其中(a)为上层膜,(b)为下层膜。可以看到,由于放电通路的形成伴随大量的热效应,上下层金属化膜的金属电极都有区域蒸发清除,上层介质薄膜发挥绝缘作用承受电压,电弱点位置形成明显的放电通道。金属化膜的自愈过程是一个带有热量传递的迅速放电过程,热量的产生会导致金属的蒸发和电介质的化学变化等多种影响,在单次自愈过程中,金属化膜会发生电介质击穿,电弧产生,电极蒸发等多个物理化学变化,这是一个具有随机性的过程,每次自愈的电极清除形状具有不确定性^[7]。

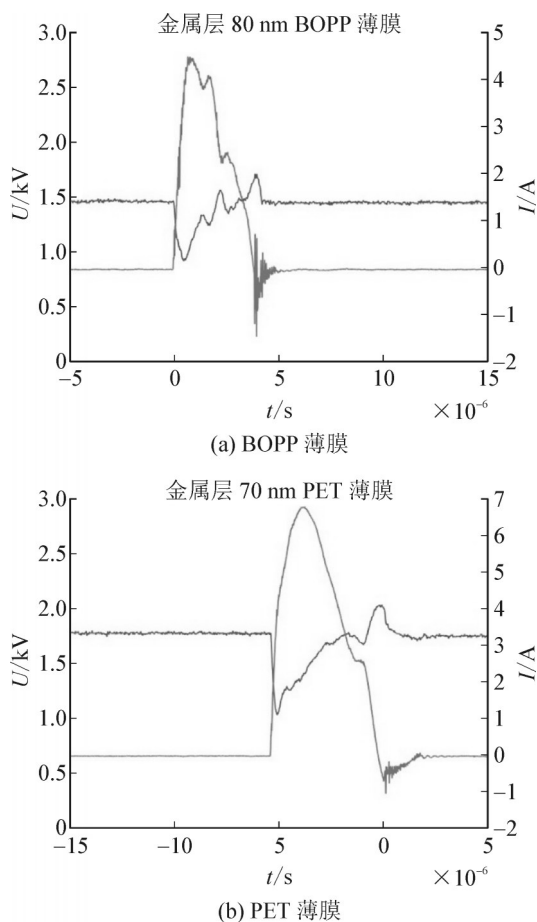


图6 自愈能量测试电压电流波形
Fig. 6 Voltage and current waveform in the test of self-healing energy

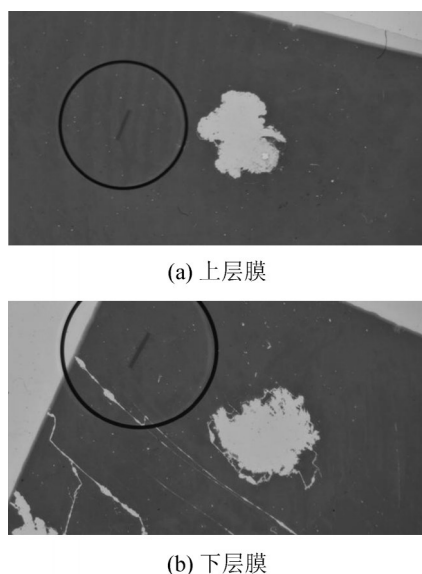


图7 金属化膜自愈形貌
Fig. 7 Self-healing morphology of metallized film

为了分析金属层厚度对薄膜自愈性能的影响,对每次自愈过程的电压电流波形进行积分,计算得到单次自愈的自愈能量。由于电弱点耐压能力不

一致和金属层厚度的不均匀,自愈现象的发生和自愈能量的大小具有随机性,将不同电压下观察的多次自愈现象和计算的自愈能量进行统计得到结果见图8。

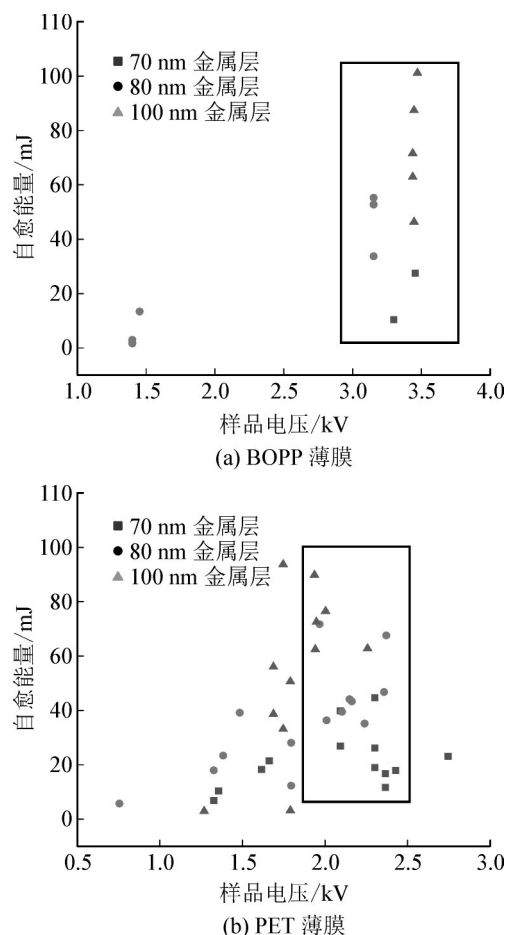


图8 金属化膜自愈能量分布
Fig. 8 Self-healing energy distribution of metallized film

根据图8自愈能量的分布可以发现,首先对于单张金属化膜,单次自愈能量与自愈电压正相关,表现为散点图中样品电压越高,自愈能量越向更高值集中,即电压等级越高,自愈能量均值越高。其次对于同种聚合物薄膜,金属层厚度越大,自愈能量越大。由于不同薄膜发生自愈放电概率较大的电压值不同,因此分别关注BOPP薄膜在3.3 kV左右以及PET薄膜在2.3 kV左右的自愈能量分散点(如散点图中黑色方框内的点)。同种聚合物金属化膜在相同的电压等级下,金属层越厚,方阻越低的薄膜,自愈能量越向高数值分布,平均值越大。

自愈过程释放的能量主要用于蒸发电弱点附近的金属电极,因此金属化膜单次自愈的能量大小与电弱点的形状和大小、金属电极的厚度有关。在不考虑压强和温度的影响下,相同电弱点大小时方

阻越低的金属化膜需要清除更多的金属电极,而电压等级提高时,电弱点的数量和面积也会随之增加,因此需要更高的自愈能量。金属化膜卷绕成电容器后,自愈能量过高时容易造成多层膜的烧结导致自愈失败,绝缘无法恢复^[13],因此目前实际的金属化膜电容器也经常采用增大薄膜方阻即减小电极厚度的方法降低电容器的自愈能量,提高电容器在高场强下的工作可靠性。但是金属化膜发方阻过高时,电容器的热效应会更严重,加速电容器的热老化损伤^[14-17],因此根据金属化膜制备电容器时需要确定合适的方阻范围。

除了比较便于辨认观察的较为理想的单张聚合物薄膜单次自愈的电压电流波形外,实验中还观察到如图9所示的自愈放电波形。这种自愈波形的特点是,在前一次发生自愈放电后,电流逐渐归零,电压逐渐恢复的过程中,再次出现电流的增大和电压的降低现象,经过一次或多次重复之后最终电压恢复为工作电压,绝缘重新恢复。在一次长时间电流较大的过程中,会出现几次电流的局部尖峰,与单次自愈比较类似,这种现象称为薄膜的连续自愈现象。Belko, V.等人在对PP和PET电容器进行自愈实验时也观测到类似的现象,并根据电流峰出现的次数分为单次自愈、重复自愈以及多次自愈^[18]。

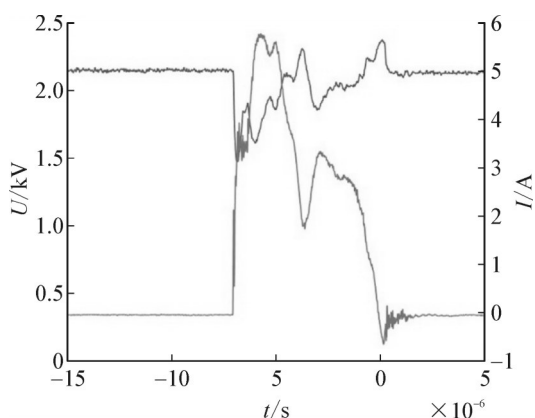


图9 连续自愈波形图

Fig. 9 Waveform of continuous self-healing process

发生连续自愈有多种原因,一方面,薄膜内部存在多个电弱点,其中可能存在击穿电压相近的薄弱点,当薄膜承受的电压达到一定程度时,可能会存在多个电弱点发生几乎同步的自愈现象,由于自愈放电的持续时间为微秒级,因此测量样品的电流波形可能出现第1次自愈未结束便发生第2次自愈的情况。另一方面,当某个电弱点发生自愈放电时,周围大量电荷会向电弱点涌入,造成周围出现较大的电流密度,在较大电流和温度升高的情况

下,可能导致电弱点附近薄弱的位置发生自愈放电,表现为电流未下降到零便重新升高以及薄膜电极清除部分连接,如图9所示。多次自愈不仅会导致电极面积进一步的减少,更严重的可能发生同一位置上下层的聚合物薄膜击穿形成通道,导致电容器内部的烧结以及丧失绝缘能力。因此目前也有通过设计安全膜,将金属电极分块的做法避免电弱点附近的多次自愈,以提高电容器的使用可靠性^[19-21]。

3 结语

本文针对干式电容器用金属化膜,研究了金属层厚度对薄膜击穿特性和自愈特性的影响,结论如下:

1)金属化膜电极越薄,方阻越高,同种电介质薄膜的击穿场强越高。高方阻金属化膜的电极更容易在自愈时清除完全,自愈失败或薄膜贯穿碳化的概率降低,介质薄膜更能够工作在极限工作场强下;

2)高方阻薄膜在一定的电压等级下具有更低的自愈能量,而电压等级越高,薄膜的自愈能量也会越大。电极更薄,方阻更高的金属化膜在高场强下的自愈能量更低,自愈过程更容易成功,电容器在高电压下的工作稳定性也会得到提升。在设计金属化膜参数结构时也要考虑连续自愈的现象,避免发生自愈失败或电容量的大幅降低,减少电容器使用寿命。

参考文献

- [1] BARSHAW E J, WHITE J, CHAIT M J, et al. High energy density (HED) biaxially-oriented poly-propylene (BOPP) capacitors for pulse power applications[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2007, 43(1): 223-225.
- [2] 张合. 弹药发展对引信技术的需求与推动[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(3): 1-5.
- [3] ZHANG He. Development of ammunition for the demand and promotion of fuze technology[J]. Journal of Sichuan Ordnance, 2018, 39(3): 1-5.
- [3] 章妙. 金属化膜电容器自愈特性研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2012.
- [4] XIN Dai, FUCHANG Lin, JIN Li, et al. Influence factors for the self-healing of metallized polypropylene capacitors [C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 00CH37132). [S. l.]: IEEE, 2000: 461-465 vol. 2.
- [5] FAN Benhui, ZHOU Mingyu, ZHANG Chong, et al. Polymer-based materials for achieving high energy density film capacitors[J]. Progress in Polymer Science, 2019, 97: 101143.
- [6] 刘泳斌, 曹均正, 黄金魁, 等. 金属化膜电容器可靠性研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(1): 53-58.
- [6] LIU Yongbin, CAO Junzheng, HUANG Jinkui, et al. Study

- development on the reliability of metallized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 53-58.
- [7] QIN Shanshan, MA Shilei, BOGGS S A. The mechanism of clearing in metalized film capacitors[C]//2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. [S. l.]: IEEE, 2012: 592-595.
- [8] 李化, 李智威, 黄想, 等. 金属化膜电容器研究进展[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(2): 1-4.
LI Hua, LI Zhiwei, HUANG Xiang, et al. Research progress on metallized film capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(2): 1-4.
- [9] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [10] SASSOULAS P O, GOSSE B, GOSSE J P. Self-healing breakdown of metallized polypropylene[C]//ICSD'01. Proceedings of the 2000 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics (Cat. No. 01CH37117). [S. l.]: IEEE, 2001: 275-278.
- [11] ZHANG Guohao, LI Hua, LAN Jing, et al. Study on the dynamic process and extinguishing criterion of metallized film self-healing arc[C]//2023 IEEE Electrical Insulation Conference (EIC). [S. l.]: IEEE, 2023: 1-4.
- [12] DONG Q, ZHONG S I, FENG Q K, et al. Preparation and properties of different dielectric films with Al metal electrode[J]. Iet Nanodielectrics, 2022, 5(3/4): 125-131.
- [13] 李浩原, 尹婷, 严飞, 等. 金属化膜电容器极板发热计算[J]. 电力电容器与无功补偿, 2015, 36(5): 37-40.
LI Haoyuan, YIN Ting, YAN Fei, et al. Calculation for electrode heating of metalized film capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2015, 36(5): 37-40.
- [14] 王荀, 王召盟, 徐梦蕾, 等. 交流电压条件下温度对金属化膜自愈特性影响规律研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2018, 39(3): 87-91.
WANG Xun, WANG Zhaomeng, XU Menglei, et al. Study on the effect of temperature on self-healing properties of metallized film under AC voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2018, 39(3): 87-91.
- [15] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N. Predominance of joule heating effect on the electrode destruction due to a self-healing of a metallized film[C]//2000 Annual Report Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (Cat. No. 00CH37132). [S. l.]: IEEE, 2000: 674-677.
- [16] 李化, 易博思, 李露, 等. 直流支撑电容器用聚丙烯膜击穿和自愈特性研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2019, 40(3): 79-83.
LI Hua, YI Bosi, LI Lu, et al. Study on breakdown and self-healing properties of polypropylene film for DC-link capacitors[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(3): 79-83.
- [17] 劳斯佳, 何樱, 唐勇, 等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 12-17.
LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on the influence of temperature and film thickness on breakdown characteristic of metallized films under AC-DC composite voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 12-17.
- [18] BELKO V, IVANOV I, PLOTNIKOV A, et al. Energy characteristics of self-healing process in metallized film capacitors [J]. E3S Web Conf(France), 2019, 140: 02006.
- [19] IVANOV I O, GLIVENKO D Y, HOJAMOV A A. Characteristics of self-healing processes in metallized film capacitors with all-over and segmented electrodes [J]. 2022 Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), 2022: 1013-6
- [20] 李兆林, 陈松, 卢有盟, 等. 金属化膜和金属化T型安全膜在直流支撑电容器中的对比试验研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 18-24.
LI Zhaolin, CHEN Song, LU Youmeng, et al. Comparison test study of metallized film and T-type metallized safety film for DC-link capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 18-24.
- [21] 严飞, 李化, 陈伟, 等. 金属化安全膜结构设计方法研究[J]. 电力电容器与无功补偿, 2020, 41(4): 7-11.
YAN Fei, LI Hua, CHEN Wei, et al. Study on structure design method of metallized safety film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 7-11.

作者简介:

王健涛(2000—),男,博士研究生,研究方向为金属化薄膜电容器。E-mail:vanbasten2022@126.com。

吴致远(1998—),男,博士研究生,研究方向为金属化膜电容器。

王昕劼(1999—),男,博士研究生,研究方向为薄膜电容器。

钟少龙(1988—),男,助理研究员,研究方向为有机介质薄膜电容器介电特性与破坏机理。

党智敏(1969—),男,教授,研究方向为先进能源电工材料与器件。