第 51 卷 第 5 期：2274-2284 高电压技术 Vol.51, No.5: 2274-2284
2025 年 5 月 31 日 High Voltage Engineering May 31, 2025
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20241411

多应力作用下不同材料结构金属化膜自愈特性

刘靖舟，吴致远，王致远，王　泽，刘尚书，王　伟
（华北电力大学高电压与电磁兼容北京市重点实验室，北京 102206）

摘　要：金属化膜电容器常采用聚丙烯薄膜作为介质材料，薄膜的自愈特性等物性特征是决定电容器综合性能的关键因素，研究金属化膜自愈特性的构效关系迫在眉睫。该文研究了多物理场下方阻、基膜厚度、镀层结构等薄膜结构参数对金属化膜自愈特性的影响，模拟了金属化膜在实际运行工况下发生自愈的过程，统计了不同种类金属膜实验后的自愈形貌，总结了不同材料特性金属化膜发生自愈时的自愈参数随物理场变化的规律并分析其自愈机理，初步建立了金属化膜结构参数与其自愈特性的关联关系。研究结果表明：金属层方阻在高温下对自愈过程影响更显著，高压强下方阻变化对于自愈过程的影响很小；聚丙烯薄膜厚度增加会加剧金属膜的自愈过程，基膜厚度提高至 5.8 μm 时薄膜自愈后表面出现明显炭化现象；以锌铝合金为表面电极的金属膜自愈损耗相较于纯铝金属膜更小，有利于延长电容器的使用寿命。论文研究可为国产金属化膜结构参数的设计优化提供理论参考。
关键词：金属化膜；自愈能量；聚丙烯薄膜；构效关系；自愈形貌；多应力

Self-healing Characteristics of Metallized Films with Different Material Structures Under Multi-stress Conditions

LIU Jingzhou, WU Zhiyuan, WANG Zhiyuan, WANG Ze, LIU Shangshu, WANG Wei
(Beijing Key Laboratory of High Voltage&EMC, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Metallized film capacitors often use polypropylene film as the dielectric material. The self-healing properties of the film are the key factors to determine the comprehensive performance of the capacitor. It is urgent to study the structure-activity relationship of the self-healing properties of metallized film. We studied the effects of film structural parameters such as the resistance under multiple physical fields, the thickness of the base film and the structure of the coating on the self-healing characteristics of the metallized film. The self-healing process of the metallized film under actual operating conditions was simulated, and the self-healing morphology of different kinds of metal films after experiments was calculated. Moreover, the self-healing parameters of metallized films with different material properties were summarized and the self-healing mechanism was analyzed. The relationship between the structural parameters of metallized films and their self-healing properties was established. The results show that the influence of metal layer square resistance on the self-healing process is more obvious at high temperatures, and the influence of the lower resistance change at high pressure is very small. With the increase of PP film thickness, the self-healing process of the metal film is aggravated, and the surface of the film is obviously charred when the thickness of the base film is increased to 5.8 μm. The self-healing loss of the metal film with zinc-aluminum alloy as the surface electrode is smaller than that of the pure aluminum metal film, which is conducive to extending the service life of the capacitor. The research in this paper can provide theoretical reference for the design and optimization of domestic metallized membrane structure parameters.
Key words: metallized film; self-healing energy; polypropylene film; structure-function relationship; self-healing morphology; multi-physics

0　引言

近年来我国越发重视柔性直流技术的发展，换流阀作为柔性直流系统的核心设备愈发得到重视[1]，而电容器作为换流阀中的核心部件，其质量的优劣及其研制过程的全链条国产化成为制约我国高压柔直输电工程的关键。目前使用范围最广的 2 类电容器包括干式金属化膜电容器和油浸箔式电容器[2]。金属化膜电容器因其可自愈、体积小、无漏油风险等优点，相较于箔式电容器在新能源行业得到了快速发展，目前在脉冲功率领域、新能源汽车领域都有着广泛的应用[3]。随着金属化膜电容器不断朝着

基金资助项目：国家重点研发计划(2021YFB2401503)。
Project supported by National Key R&D Program of China (2021YFB2401503).

高能量密度、高可靠性、小体积的方向发展，所需金属化膜(metal-lized polypropylene film，MPPF)的性能质量也水涨船高。目前工业上常采用双向拉伸聚丙烯薄膜(biaxially oriented polypropylene，BOPP)[4]作为介质薄膜，是将聚丙烯颗粒挤压形成片状材料后经纵横 2 个方向拉伸制成。薄膜在制造过程中不可避免地会引入杂质或晶格缺陷，进而形成电弱点。在施加一定等级的电压时，介质薄膜中的电弱点被击穿并释放大量焦耳热，其表面的金属电极受热蒸发并在电场作用下电离形成等离子体，当等离子体的注入能量低于临界值时，放电电弧熄灭，此时电弱点周围的金属层基本气化，相当于将击穿点隔离开来，金属膜整体绝缘性能重新恢复，这就是金属化膜电容器的自愈过程[5]。聚丙烯金属化膜是目前干式电容器最常用的薄膜材料，其聚丙烯基膜物性特征及其蒸镀质量的优劣是决定薄膜电容器综合性能最为关键的因素。

目前国内外学者对影响金属化膜自愈特性的因素进行了大量研究。Kammermaier 首先在 1989 年基于气体动力学提出自愈过程与电容器电容量及其工作电压的关系[6]。华中科技大学的李化团队分析并总结了金属化膜自愈特性随不同电压等级变化的规律[7]，通过仿真手段分析了金属化膜电容器在交流高压环境下电容器内部的温升效应并借此提出优化方案[8]。李志元研究了金属化膜在直流高场强作用下自愈失效的过程机理及其寿命预测[9]。李琦研究了金属电极与介质薄膜界面间的作用关系，建立了界面相互作用与金属化膜宏观电气性能之间的关联关系[10]。黄伟东通过对聚丙烯薄膜蒸镀工艺的研究，提出了改善电容器在极端环境下工作性能的方案[4]。以上研究均对电容器的工作性能及其金属化膜的自愈特性具有启发作用，但并未从金属膜自身材料特性出发对电容器用金属膜的自愈特性进行研究，金属层方阻大小、聚丙烯基膜厚度、蒸镀金属层的成分等材料特性都会影响其自愈过程，但目前针对材料结构参数对于金属化膜自愈特性影响的研究仍较少，生产工艺参数的设计仍采用“经验主义”的方式摸索前进，造成极大的资源浪费，如今金属化膜国产化生产亟需研究此类构效关系。

本文基于项目所探究的干式直流电容器运行的实际工况，采用浙江南洋科技有限公司生产的金属化聚丙烯薄膜进行自愈实验。利用薄膜自愈特性测试平台模拟电容器工作环境，选取不同材料特性的金属膜进行实验，对不同结构特性的金属化聚丙烯薄膜施加电、热、力 3 种应力，研究复杂多应力耦合下不同材料特性对于金属化膜自愈特性的影响规律，为国产金属化膜材料参数的优化提供理论参考。

1 实验平台及方法

本文实验选取的试样来自浙江南洋科技有限公司生产的同批次金属化聚丙烯薄膜，可排除金属层蒸镀工艺对于金属膜自愈特性的影响。考虑到实际工况下换流阀中电容器的运行情况非常复杂，对金属化膜同时施加电-热-力等应力，对不同材料特性的金属化膜在多应力作用下的自愈特性进行实验。电压参数以干式直流电容器的额定直流工作电压 2.8 kV 为基准、以 0.5 kV 为间隔设置 5 个等距电压等级：1.8、2.3、2.8、3.3、3.8 kV。直流电压升压速率参考《GB/T 13542.2—2021 电气绝缘用薄膜第 2 部分：试验方法》[11]测试标准并结合预实验测试结果取为 500 V/s。由于在实际电力系统的各个环节都可能产生波形畸变的谐波[12]，考虑实际工况中存在交流电压施加产生谐波的情况，本实验电路中添加了谐振电路，谐波含量按 10%含量的 1 次谐波、3%含量的 2 次谐波和 1%含量的 3 次谐波混合叠加的方式施加。实验电路拓扑图如图 1 所示，其中 u_{sh} 和 i_{sh} 分别为薄膜发生自愈时所读取到的自愈电压和自愈电流；i_d 为流经稳压电容的电流；C_0 为待测金属化膜样品，电容值为 10~20 nF。

金属化膜发生自愈时的自愈电压和自愈电流波形可从图 1 中的数字示波器观察到。单次自愈发生时的典型自愈波形如图 2 所示。

金属化膜自愈时消耗的能量称为自愈能量，自愈能量过高时，击穿点电弧不能快速熄灭，可能导致电容器介质薄膜击穿[13]。因此自愈能量是衡量自愈成功与否的关键参数，自愈能量的高低间接体现了电容器发生自愈后电容量损失的快慢[14]。自愈能量和电压之间存在一个近似的幂指数关系，Belko

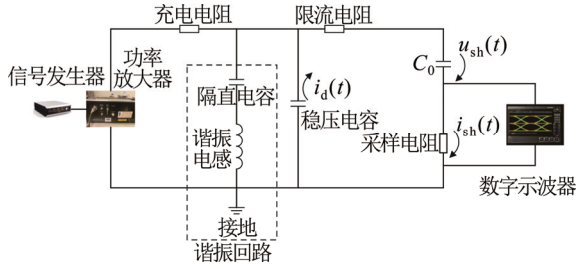


图 1 实验电路拓扑图

Fig.1 Topology diagram of experimental circuit

团队认为自愈能量近似为自愈电压的6.1次方左右[15]，李浩原的研究结果则认为幂指数在2.4~2.7次方之间，具体的幂指数取决于具体的工作条件及金属化膜自身的结构特性[16]。通常自愈能量 W 由自愈电压 U 与自愈电流 I 关于自愈持续时间 t_0 的函数积分得出，即：

$$W(t)=\int_0^{t_0}U(t)I(t)\mathrm{d}t \tag{1}$$

参考国标[17]和李化团队的研究[8]，考虑到过高的温度不仅会导致介质材料绝缘性能急剧恶化，增大电容器发生故障的概率[18]，还可能加剧电介质老化，导致电介质的击穿场强下降[19]，因而需选取合适的运行温度。为减小实验误差，将试样与金属加热板间铺垫硅胶片和聚酰亚胺薄膜，做好绝缘的同时确保试样能够均匀受热。

金属化膜在绕制成电容器的过程中除了会受到沿轴方向的拉伸力外，也会受到由外向内的层间压力[16]。对电容器实际拆解后发现电容器外层发生自愈的概率远高于内层，即层间压强越大发生自愈概率越小，对金属膜施加不同压强来模拟实际电容器绕轴的各个位置所受到的层间压强。

2 实验结果与分析

2.1 方阻对自愈特性的影响

金属化膜总体来说比较薄，直接测量其金属镀层的厚度难度较大，目前一般通过测量金属层的方阻值来间接反映金属层的厚度[20]。计算金属层方阻的计算式为：

$$R=\rho\frac{L}{W_0 d} \tag{2}$$

式中：R 为金属化膜的电阻值；W_0 和 L 分别为金属化膜的宽度和长度；ρ 为镀层金属的电阻率；d 为金属层的厚度。方阻是金属层本身的一种性质，其大小与金属材料的电阻率成正比，与蒸镀金属层的厚度成反比，是研究金属化膜自愈特性必不可缺的因素之一。不同方阻大小金属膜在工况下的自愈波形如图3所示。由图3可知，金属层方阻的减小会使自愈电流峰值增大，加剧金属膜的自愈过程。

自愈波形反映了自愈的整个过程，起弧时间是指峰值电流的10%到90%，代表着自愈发展过程中对薄膜破坏的这一过程。熄弧时间是指峰值电流的90%到10%，代表着金属膜自愈的恢复阶段。起弧时间越长，说明对薄膜破坏作用时间越长。熄弧时间越长，说明从击穿到绝缘恢复所需要的时间越长。选取不同方阻MPPF自愈点各50个并取其自愈参数平均值，其起弧时间和熄弧时间统计如表1所示。

由表1可知，不同方阻MPPF发生自愈时的起弧时间在误差范围内基本相同，而熄弧时间相差很大，说明方阻大小的改变主要影响绝缘恢复阶段，而对薄膜破坏阶段的影响较小。整体来看，金属膜方阻越小，流经自愈点的电流越大，即单次自愈对薄膜造成的破坏越大，电容器电容损耗速率越高。

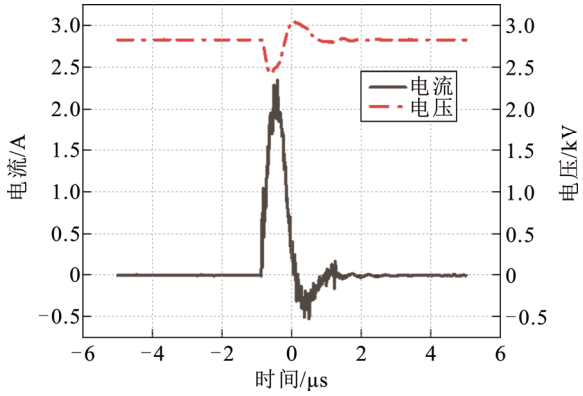


图2 典型自愈波形

Fig.2 Typical self-healing waveform

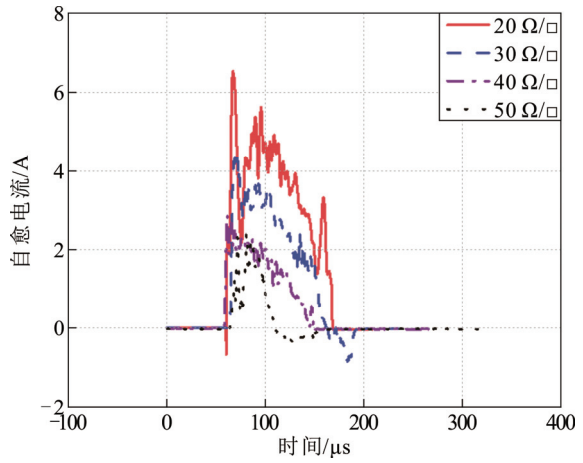


图3 不同方阻大小金属膜自愈电流波形

Fig.3 Self-healing current waveform of metal film with different square resistances

表1 不同方阻MPPF自愈时间平均值

Table 1 Average self-healing time of MPPF with different sheet resistances

方阻大小/(Ω·□$^{-1}$)	起弧时间/μs	熄弧时间/μs
20	4.04	98.04
30	2.80	82.80
40	7.76	61.88
50	5.76	31.20

但这仅是单一工况下方阻对自愈特性的影响，为探究多应力综合作用下不同方阻大小金属膜的自愈特性，故选取 20、45 、70 ℃作为不同方阻大小金属膜发生自愈时的温度对照参数，分别施加 0.2、10、30 MPa 以模拟绕制好的电容器的外层、中层和内层所受层间压强，对多应力作用下方阻对自愈特性的影响进行实验并分析。

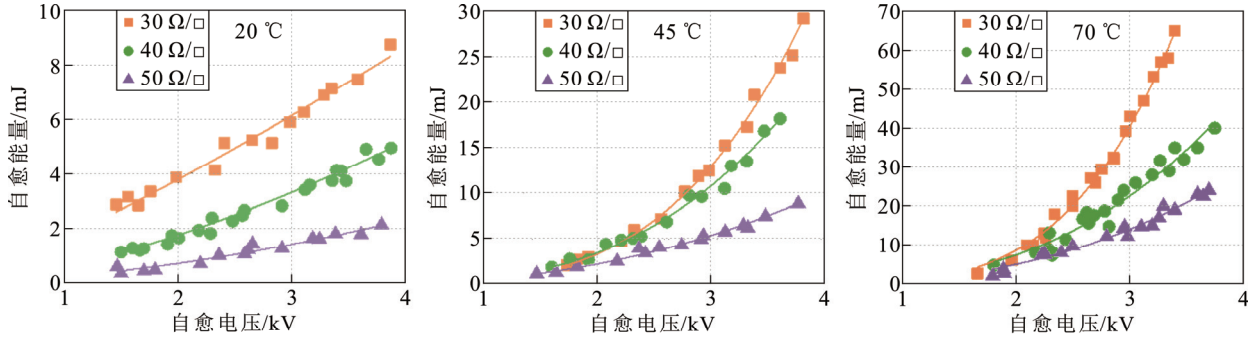
本组实验选用金属层方阻大小分别为 30、40、50 Ω/□的金属化膜进行对照实验，不同方阻金属膜在不同温度和压强下的自愈能量随电压等级变化趋势如图 4 所示。

图 4(a)是当压强为 0.2 MPa 时，不同环境温度作用下、不同方阻大小金属化膜自愈能量和外施电压等级间的关系，模拟电容器外层发生自愈的情况；图 4(b)是当环境温度为 45 ℃时，不同压强作用下、不同方阻大小金属化膜自愈能量和外施电压等级间的关系，模拟在普通工作温度下电容器外层、中层和内层金属膜的自愈情况。

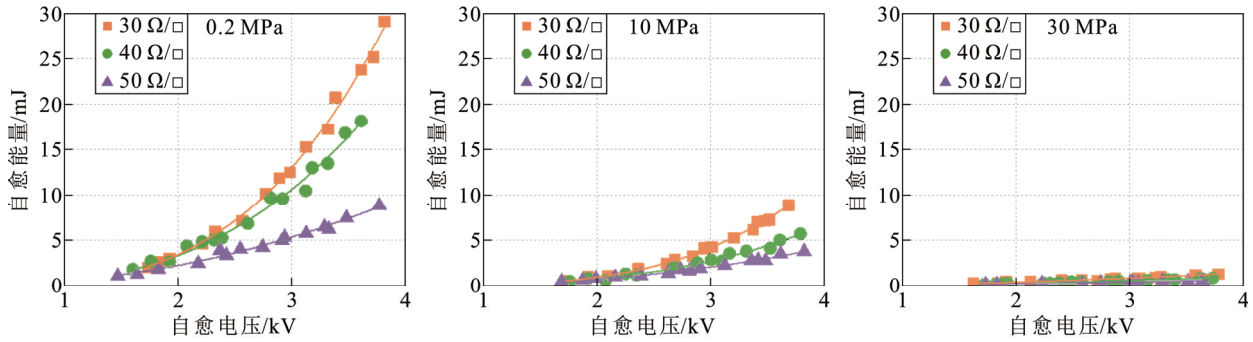
金属膜在相同电压等级、不同温度下发生自愈后的形貌如图 5 所示。

随着外加温度升高，自愈形貌面积明显增大，图 5 表明温度的升高会加剧 MPPF 自愈的剧烈程度。图 4(a)能反映不同方阻大小的金属膜在不同温度下的自愈过程。由图 4(a)可知，自愈能量随电压等级的升高平稳增长。表 2 是 20 ℃下 MPPF 自愈能量与电压等级关系的拟合曲线幂指数。

由表 2 可知，自愈能量-电压的关系曲线近乎线性，这意味着在这个电压区间内，自愈能量与外加



(a) 不同温度下不同方阻金属化膜发生自愈



(b) 不同压强下不同方阻金属化膜发生自愈

图 4　不同工况下不同方阻 MPPF 的自愈能量和电压关系

Fig.4　Relationship between self-healing energy and voltage level under different MPPF with different sheet resistance in various operating conditions

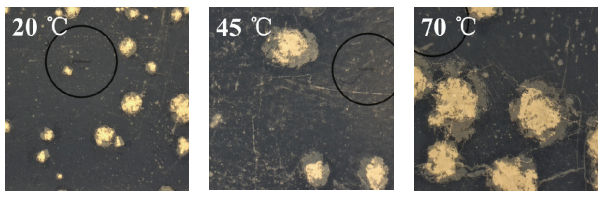


图 5　不同温度作用下金属膜自愈形貌

Fig.5　Self-healing morphology of MPPF under different temperatures

表 2　20 ℃下不同方阻 MPPF 自愈能量-电压拟合曲线幂指数

Table 2　Power index of MPPF self-healing energy-voltage fitting curve under different sheet resistances at 20 ℃

方阻/(Ω·□$^{-1}$)	拟合曲线幂指数
30	1.219 151
40	1.157 044
50	1.172 511

电压间的关系较为稳定。同时分析发现，MPPF 自愈能量与金属层方阻成反比。1.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 2.78 mJ，50 Ω/□金属膜自愈能量为 0.45 mJ；3.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 7.37 mJ，50 Ω/□金属膜的自愈能量为 1.85 mJ，约为前者的 1/4。

在 45 ℃工作温度下，自愈能量和电压等级间的关系开始呈现非线性关系，这表明当环境温度上升时，MPPF 自愈能量随电压升高的增长趋势更加迅猛，自愈程度更加剧烈。当电压等级较低时，不同方阻金属膜对应的自愈能量变化不明显，1.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 2.01 mJ，50 Ω/□金属膜的自愈能量为 1.74 mJ，2 者相差不大；电压等级升高后方阻对自愈能量的影响较大，例如在 3.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 22.67 mJ，50 Ω/□金属膜的自愈能量为 7.54 mJ，约为前者的 1/3。

当外界温度升至 70 ℃时，MPPF 自愈能量的数量级相较于 45 ℃下明显增大，1.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 5.61 mJ，50 Ω/□金属膜的自愈能量为 3.91 mJ；3.5 kV 下 30 Ω/□金属膜的自愈能量为 65.77 mJ，50 Ω/□金属膜的自愈能量为 19.65 mJ，约为 45 ℃下 MPPF 自愈能量的 3 倍。由图 4(a)可知，在电容器外层，温度和方阻对于金属膜自愈过程影响巨大，尤其是在高电压等级下，环境温度的上升使得自愈过程对于薄膜的破坏程度上升，加强了自愈过程的剧烈程度[21]。

从图 4(b)可以看出，在低压强情况下，方阻对于自愈能量的影响依旧呈现一个较明显的负关联关系，但随着压强的增大，电压对金属膜自愈过程的影响降低，3 个对照组的自愈能量在各个电压等级下的差距缩小。当压强等级提高到 30 MPa 时，各组自愈能量无明显区别。表 3 是 30 MPa 下不同方阻大小 MPPF 自愈能量随电压等级变化的拟合曲线幂指数。

可以看到，当压强升高至 30 MPa 时，不同方阻 MPPF 自愈能量与电压等级之间的关系近似呈线性，即伴随金属膜受到的层间压强逐渐增大，方阻对于电容器自愈特性的影响逐渐减小。在电容器芯轴附近，方阻和电压对自愈过程的影响已经非常小，此时压强是影响自愈过程的主要因素。MPPF 在承受外加电压时会由于电弱点被击穿产生的热效应而使得金属层受热蒸发并在表面形成等离子体。金属层表面受到的高压强会使得金属蒸气离子化所需的自持能量阈值更高，等离子体更难维持，放电电弧

表 3 30 MPa 下不同方阻 MPPF 自愈能量-电压拟合曲线幂指数

Table 3 Power index of MPPF self-healing energy-voltage fitting curve for different sheet resistances at 30 MPa

方阻/(Ω·□$^{-1}$)	拟合曲线幂指数
30	1.079 763
40	1.076 453
50	1.063 461

持续时间缩短进而导致自愈过程时间缩短，自愈电流减小，单次自愈发生的自愈能量也随之减小[5]。

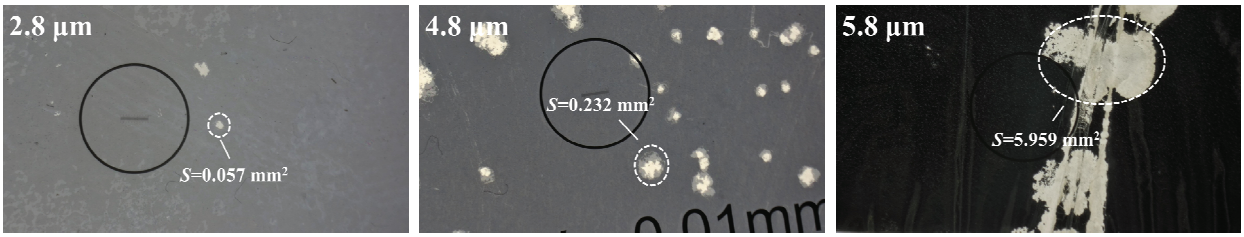
2.2 基膜厚度对自愈特性的影响

本组实验选用聚丙烯基膜厚度分别为 2.8、4.8、5.8 μm 的金属膜进行实验。环境温度设定为 45 ℃，压强设置为 0.2 MPa，不同膜厚大小 MPPF 在不同电压等级下的自愈形貌如图 6 所示。

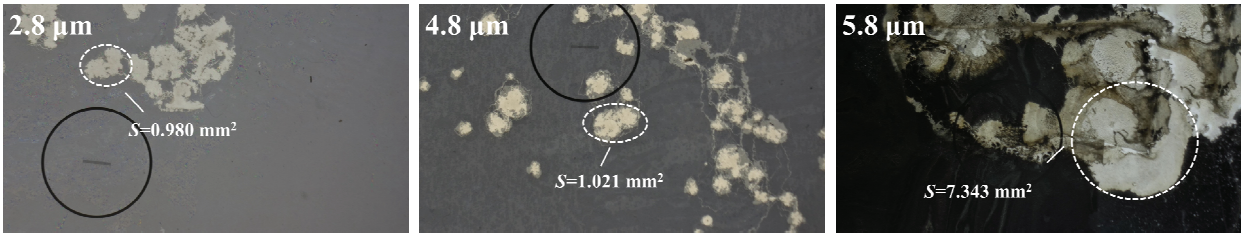
图 6 是 3 种基膜厚度的 MPPF 在不同电压等级下的自愈形貌，从左至右基膜厚度依次递增，图中 *S* 为薄膜表面自愈区域面积大小。可以看到同种金属膜在较低电压等级发生自愈时，自愈区域面积更小，自愈形貌更加规则，自愈点的数量较少且较为零散地独立分布在金属膜上。随着电压等级的提升，自愈点的数量明显增多，自愈区域形貌愈发不规则，各个自愈区域通过细丝状的放电通道相连引起更大面积的金属电极蒸发[22]，因此金属薄膜电容器在高压环境下持续工作的容量衰减速率更高，使用寿命会更短[9]。

对于不同厚度的金属化膜，在 1.8 kV 电压等级下发生自愈时，基膜厚度从 2.8 μm 增加到 5.8 μm，自愈面积增大，自愈形貌更不规则；在 2.8 kV 乃至 3.8 kV 下，自愈区域面积更大，自愈形貌不规则程度上升，5.8 μm 金属膜自愈后出现了明显的碳化区域。为了研究不同膜厚 MPPF 的自愈形貌特性，利用 MATLAB 图像处理技术，对金属膜发生自愈后的形貌进行分析。自愈形貌处理过程如图 7 所示。

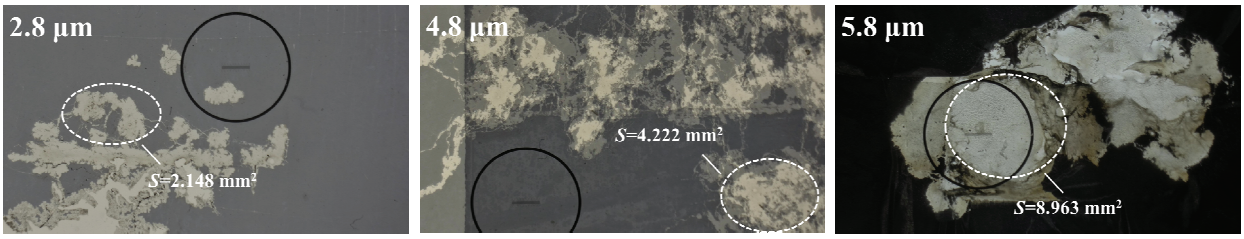
图 7 是对金属膜自愈后的形貌进行处理的过程，首先对原始自愈形貌进行灰度处理，以便识别自愈区域。灰度处理后，进一步提取出边界。基于一系列边界线，可以计算出可定量分析自愈形态的分数维数。分形维数是一项用于描述复杂图形不规则性的数学工具，可以用来表征自愈形貌的不规则程度。图 6 中各工况下自愈形貌的分形维数如表 4 所示。



(a) 1.8 kV 下金属膜自愈



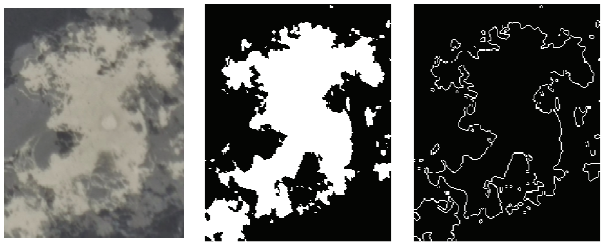
(b) 2.8 kV 下金属膜自愈



(c) 3.8 kV 下金属膜自愈

图 6　不同电压等级下不同膜厚金属膜发生自愈后的形貌

Fig.6　Morphology of metallized films with different thicknesses after self-healing under different voltage levels



(a) 原始形貌　(b) 灰度处理　(c) 边界提取

图 7　MPPF 自愈形貌处理过程

Fig.7　Processing procedure for MPPF self-healing morphology

表 4　不同基膜厚度 MPPF 自愈形貌分形维数

Table 4　Fractal dimension of MPPF self-healing morphology for different base film thicknesses

电压等级/kV	不同基膜厚度下自愈形貌的不规则程度		
	2.8 μm	4.8 μm	5.8 μm
1.8	1.093 5	1.104 4	1.204 3
2.8	1.205 2	1.281 7	1.296 9
3.8	1.311 5	1.321 9	1.437 9

可以看到，MPPF 自愈形貌的分形维数随电压等级的提升而增大，同时介质膜厚度的增加也使得其明显增大。分形维数的增大意味着自愈形貌的不规则程度加深，这表明在电容器工作过程中，外加电场的增强和基膜厚度的增加都会加剧金属膜自愈过程的剧烈程度。

3 种不同膜厚金属膜在温度为 45 ℃、压强 0.2 MPa 工作环境下的自愈能量和自愈电流随电压等级变化的关系如图 8 所示。

从图 8 中可以看到，随着电压等级的提高，MPPF 的自愈能量随之提高。同时基膜厚度的增加提高了金属膜自愈时的剧烈程度。在 1.4 kV 下 2.8 μm 金属膜刚刚出现自愈现象，5.8 μm 金属膜的自愈能量为 19.62 mJ；在 2.8 kV 电压等级下，2.8 μm 金属膜的自愈能量为 7.24 mJ，5.8 μm 金属膜的自愈能量为 59.43 mJ，是前者的 8 倍左右。

表 5 反映了图 8 中不同基膜厚度的金属膜自愈能量随电压等级变化的拟合曲线幂指数。可以看到，当基膜厚度从 2.8 μm 增大至 5.8 μm 时，拟合曲线

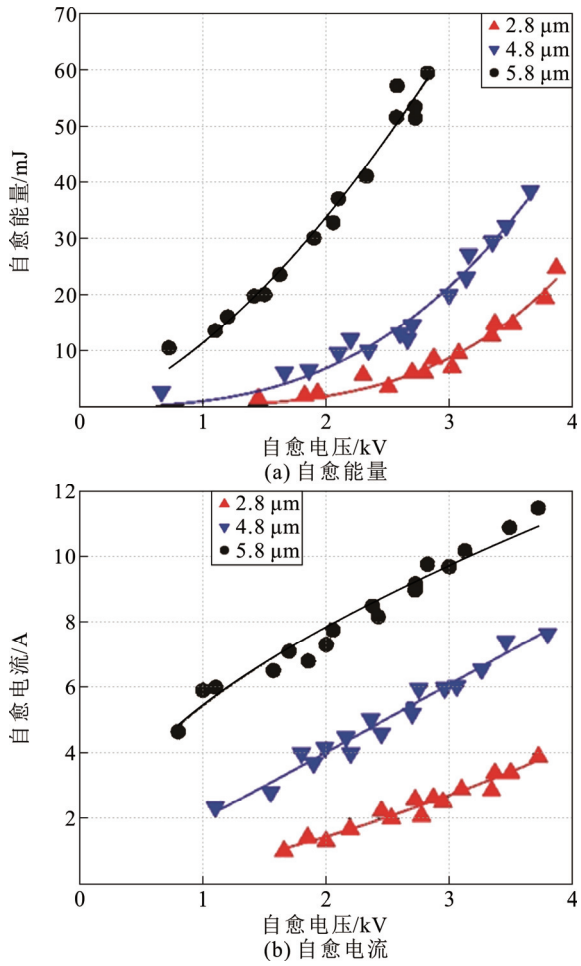


图 8 不同膜厚 MPPF 自愈能量和电压等级关系

Fig.8 Relationship between self-healing energy and voltage level with different film thicknesses

的线性程度反而降低，这表明 MPPF 自愈能量对外加电压的敏感程度降低。

图 8 还反映了自愈电流与施加电压之间的关系。自愈电流的峰值不但体现了自愈对于金属化膜的破坏程度，同时也表征着电容器在实际工况运行中对于电力系统的扰乱程度。由图 8(b)可知，聚丙烯基膜越厚，自愈电流越大，对金属膜发生自愈时的破坏作用也就越大。

在拉膜过程中，如果介质薄膜拉得过厚，会造成薄膜的结晶度不够，取向度降低，非晶区区域增多，膜中的缺陷也增多；若介质膜过薄，则会导致分子链运动速度过快，也会影响结晶过程和取向度[23]。在拉膜过程中还易出现颈缩和断膜的现象，故需要控制成品薄膜在合适厚度范围之内。本次实验所用金属膜介质薄膜厚度分别为 2.8、4.8、5.8 μm，都在 10 μm 以下，其厚度处于合适范围之内。对该批次 MPPF 采用差示扫描量热法(differential scanning calorimetry，DSC)测试其结晶度，如图 9 所示。

表 5 不同膜厚 MPPF 自愈能量-电压拟合曲线幂指数

Table 5 Power index of MPPF self-healing energy-voltage fitting curve for different film thicknesses

基膜厚度/μm	拟合曲线幂指数
2.8	1.582 62
4.8	2.828 17
5.8	3.808 57

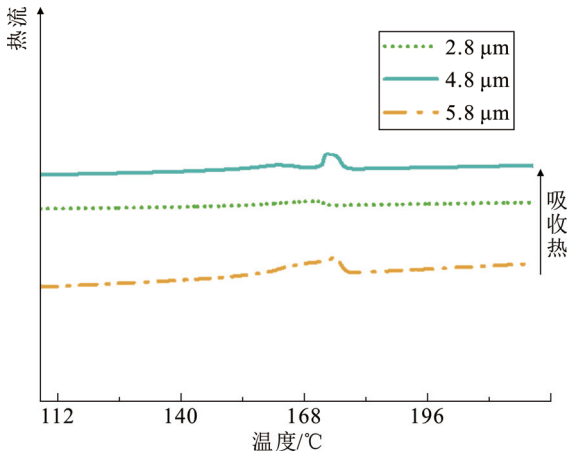


图 9 不同膜厚 MPPF 结晶度

Fig.9 Crystallinity of MPPF with different film thickness

3 种金属膜的热流曲线如图 9 所示，经计算，其结晶度按基膜厚度从小到大排列依次为 50.29、51.27 和 50.09。作为一批合格的商业膜，其制造工艺成熟，结晶度在误差允许范围内大致相同，即“缺陷”的分布基本相同。在相同缺陷密度的情况下，BOPP 越厚，基膜内缺陷越多，此时在强电场作用下，空间电荷大量积聚，引起场强发生畸变；同时，缺陷间的电场会相互作用导致更大的电场畸变。缺陷在电场作用下被击穿产生大量自愈点，自愈电流随之增大，通道电流增加，产生更多的焦耳热，金属膜表面出现大面积的碳化，薄膜电容器自愈性能下降[24-25]。

2.3 不同金属电极对自愈特性的影响

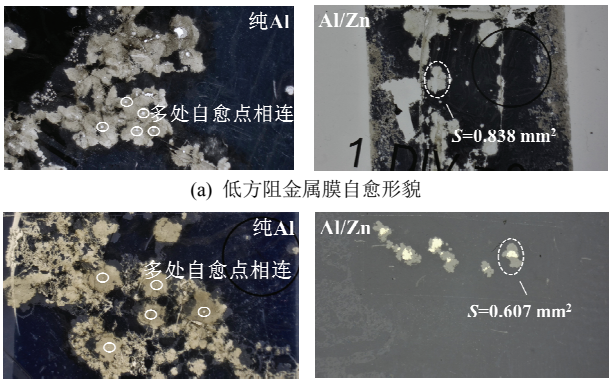
本组实验选用纯铝和锌铝复合金属作为金属层的金属化膜进行实验，其中复合金属层按照铝-锌-铝的方式进行蒸镀。考虑到方阻对金属化膜自愈特性的影响因素[12]，分别研究低方阻和高方阻情况下不同金属电极对金属化膜自愈特性的影响。

由图 10 可知，不论是在低方阻还是高方阻情况下，采用纯铝作为金属层的金属膜发生自愈后可明显看到多个自愈点，且各自愈点自愈区域相连形成大片自愈区域，而以锌铝合金作为金属层的金属

膜发生自愈时自愈区域面积更小且相对独立。低方阻和高方阻下自愈参数与自愈电压的关系如图 11、12 所示。

对比图 11 和图 12 可知，方阻大小的改变仅仅只影响薄膜自愈的剧烈程度，而不改变不同金属电极薄膜的自愈机理。从图 11、12 一系列图中可以看到，选用锌铝合金作为表面金属层的金属化膜的自愈能量/电流/面积/持续时间在各电压等级均低于选用纯铝金属层的金属膜，例如图 11 中，在 2 kV 的工作电压下，金属层为纯铝的 MPPF 自愈能量为 33.56 mJ，采用锌铝复合金属为电极层的 MPPF 自愈能量为 10.14 mJ，远低于前者。在实际工程应用中，这是金属化膜电容器能够实现更长使用寿命的体现。实验结果表明，在薄膜表面蒸镀金属的选择上，锌铝合金比起纯铝更有利于延长金属化膜电容器的寿命，提高电容器工作的可靠性。

电极层厚度的降低可以有效提高 MPPF 的自愈能力，但在交流电压作用下，过薄的金属电极更易断裂，金属膜的通流能力有一定程度的损失[26-27]。在方阻值相同的情况下，Zn 电极的厚度是 Al 电极的 2 倍有余，使得电极层能够承担负荷更大的电流，加强了金属膜的通流能力。对于铝-锌-铝结构的复



(a) 低方阻金属膜自愈形貌

(b) 高方阻金属膜自愈形貌

图 10 低/高方阻下不同镀层结构金属膜自愈形貌

Fig.10 Self-healing morphology of metallized films with different coating structures under low/high sheet resistance

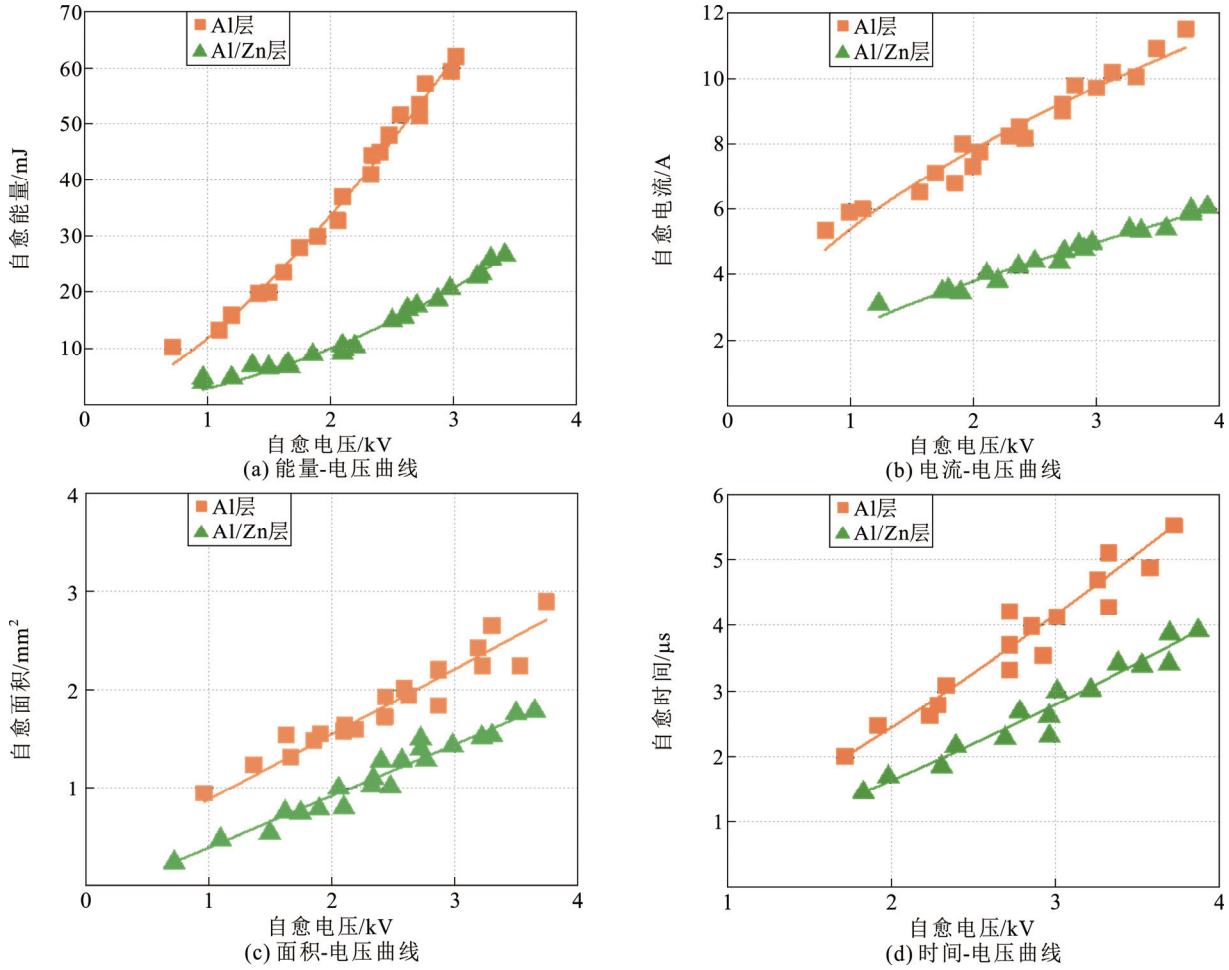


图 11 低方阻不同镀层结构金属膜自愈参数和电压等级关系

Fig.11 Relationship between self-healing parameters and voltage levels of metal films with different coating structures with low square resistance

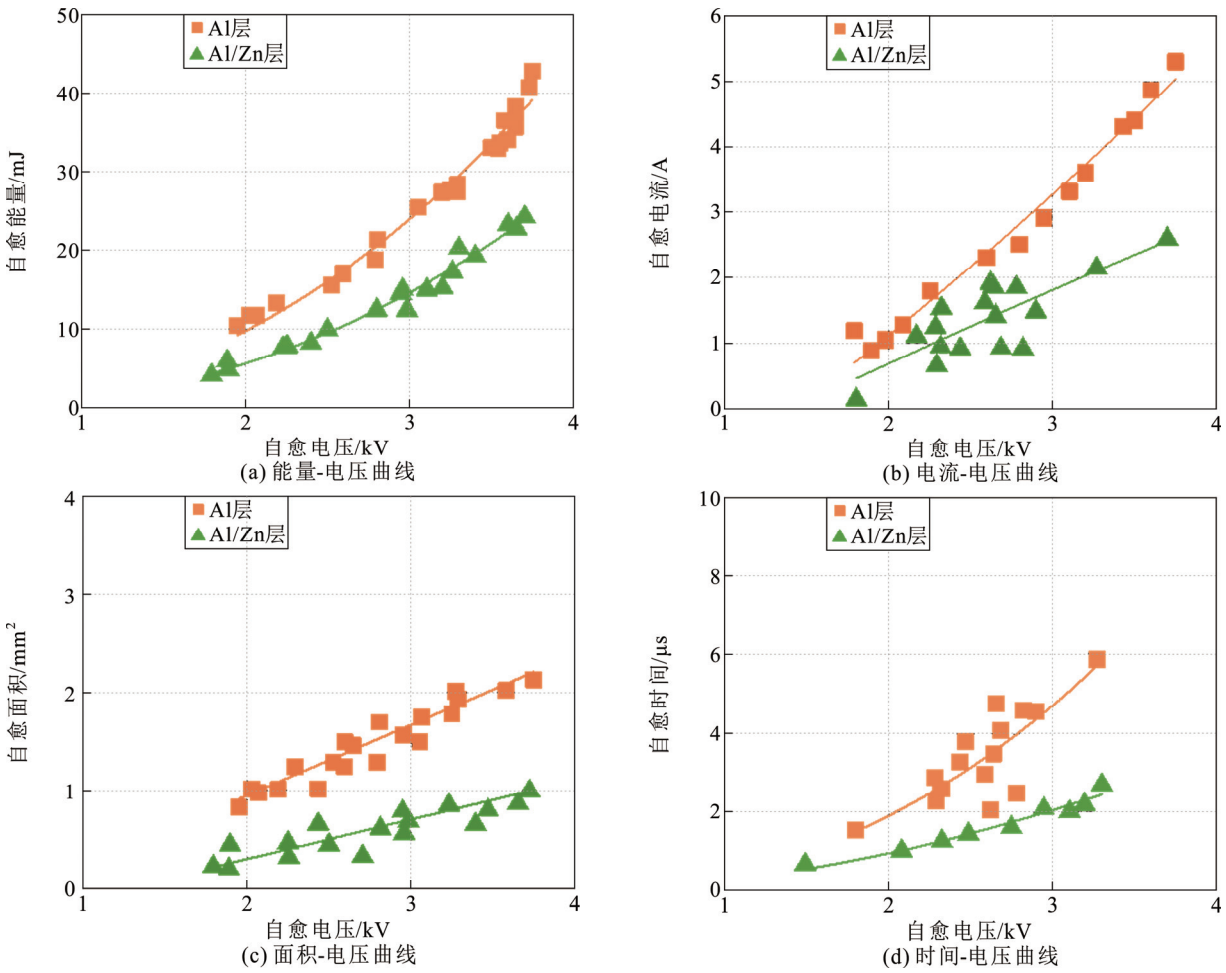


图 12 高方阻不同镀层结构金属膜自愈参数和电压等级关系

Fig.12 Relationship between self-healing parameters and voltage levels of metal films with different coating structures with high square resistance

合电极层，锌的加入有效提升了金属电极的通流能力；同时，铝作为最内层与聚丙烯结合得更好，作为最外层可以生成一层致密的氧化铝薄膜来保护内部不被氧化，提高金属膜的击穿场强[28]。

从金属膜的自愈机理看，锌的加入提高了维持电极表面等离子体能量密度的阈值，使放电电弧更容易熄灭，有效降低了电容器发生自愈时的电容损耗。从宏观物理角度来说，金属膜的自愈过程就是表面金属镀层气化的过程，可以近似将金属层气化所需能量视作自愈能量。在镀层厚度相同的情况下，由于铝升华所需要的能量比锌更高[29]，故锌铝金属层的气化能量比纯铝金属层气化所需能量更低，金属膜的自愈能量更低，电容器的电容损耗速率更小。

3 结论

1）方阻大小主要影响金属化膜自愈过程中的绝缘恢复阶段。在电容器外层，温度和方阻是影响金属膜自愈的关键因素。随着金属膜受到的层间压强逐渐增大，方阻对于电容器自愈特性的影响逐渐减小。在电容器芯轴附近，方阻和电压对自愈过程的影响已经非常小，此时压强是影响自愈过程的主要因素。

2）基膜厚度的增加会提高 MPPF 自愈的剧烈程度，扩大金属膜自愈面积并使其形貌愈发不规则，甚至出现明显的碳化现象。同时基膜厚度的增加会降低金属膜对于外加电压的敏感程度。

3）采用纯铝作为金属层的金属化膜发生自愈后会出现多个自愈点相连引起大片金属电极蒸发；选用锌铝合金作为表面电极的 MPPF 单次自愈时的电容损耗更小，更有利于延长电容器的工作寿命。

参考文献 References

[1] 高剑剑，刘卓锟，李国强，等. 国内柔性直流换流阀与阀控系统综述[J]. 电网技术，2024，48(9)：3890-3902.

GAO Jianjian, LIU Zhuokun, LI Guoqiang, et al. A review of flexible DC converter valves and valve base controller in China[J]. Power System Technology, 2024, 48(9): 3890-3902.

[2] 李 琦，李曼茜. 高温聚合物薄膜电容器介电材料评述与展望[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3105-3123.
LI Qi, LI Manxi. High-temperature polymer dielectrics for film capacitors: review and prospect[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3105-3123.

[3] 储松潮，黄云锴，潘焱尧，等. 柔性直流输电用电力电子电容器的测试与工程应用[J]. 电力电容器与无功补偿，2019，40(1)：59-64.
CHU Songchao, HUANG Yunkai, PAN Yanyao, et al. Testing and engineering application of power electronic capacitor for flexible HVDC[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2019, 40(1): 59-64.

[4] 黄伟东. 电容器用金属化聚丙烯薄膜制造工艺改进研究[J]. 电子元件与材料，2017，36(7)：52-55，61.
HUANG Weidong. Research on improving the manufacturing process of metalized polypropylene film for capacitors[J]. Electronic Components & Materials, 2017, 36(7): 52-55, 61.

[5] TORTAI H J, 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.

[6] KAMMERMAIER J, RITTMAYER G, BIRKLE S. Modeling of plasma-induced self-healing in organic dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 1989, 66(4): 1594-1609.

[7] 李 化，章 妙，林福昌，等. 金属化膜电容器自愈理论及规律研究[J]. 电工技术学报，2012，27(9)：218-223，230.
LI Hua, ZHANG Miao, LIN Fuchang, et al. Study on theory and influence factors of self-healing in metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(9): 218-223, 230.

[8] 李 化，陈麒任，李浩原，等. 交流高压金属化膜电容器温升特性和优化设计[J]. 高压电器，2018，54(1)：1-8.
LI Hua, CHEN Qiren, LI Haoyuan, et al. Temperature rise characteristic and design optimization of AC high voltage metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus, 2018, 54(1): 1-8.

[9] 李志元，王镜然，徐 哲，等. 直流电压作用下金属化膜电容器的自愈特性及寿命预测[J]. 高电压技术，2023，49(7)：2929-2937.
LI Zhiyuan, WANG Jingran, XU Zhe, et al. Self-healing characteristics and life prediction of metallized film capacitor under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7): 2929-2937.

[10] 董 琦，李浩林，党智敏. 电容器用高方阻金属化薄膜电极设计、解析与性能调控[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45(1)：128-139.
DONG Qi, LI Haolin, DANG Zhimin. Design analysis and performance regulation of high square resistance metallized dielectric film electrode for capacitor[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 128-139.

[11] 中华人民共和国国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 电气绝缘用薄膜 第 2 部分：试验方法：GB/T 13542.2—2021[S]. 北京：中国标准出版社，2021.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Plastic films for electrical purposes-part 2: methods of test: GB/T 13542.2—2021[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2021.

[12] 方 田，李 化，黄 想，等. 工频叠加谐波电压下温度对全膜电容器绝缘介质击穿特性的影响[J]. 高压电器，2022，58(9)：142-148.
FANG Tian, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Influence of temperature on the dielectric breakdown characteristics of foil-film capacitor under AC superimposed harmonic voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 142-148.

[13] 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.

[14] REED C W, CICHANOWSKIL S W. The fundamentals of aging in HV polymer-film capacitors[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1994, 1(5): 904-922.

[15] BEL'KO V O, BONDARENKO P N, EMEL'YANOV O A. The dynamic characteristics of self-healing processes in metal film capacitors[J]. Russian Electrical Engineering, 2007, 78(3): 138-142.

[16] 李浩原. 应用于电力系统的干式金属化膜电容器性能研究[D]. 武汉：华中科技大学，2016.
LI Haoyuan. Research on performance of dry type metallized film capacitors applied in power system[D]. Wuhan, China: Huazhong University of Science and Technology, 2016.

[17] 中华人民共和国国家市场监督管理总局，中国国家标准化管理委员会. 标称电压 1000 V 以上交流电力系统用并联电容器 第 1 部分：总则：GB/T 11024.1—2019[S]. 北京：中国标准出版社，2019.
State Administration for Market Regulation, National Standardization Administration. Shunt capacitors for AC power systems having a rated voltage above 1 000 V-part 1: general: GB/T 11024.1—2019[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2019.

[18] 马乃兵. 干式高压并联电容器的技术特点分析[J]. 电力电容器，2002(2)：7-10.
MA Naibing. Analysis of the technical characteristics for the dry-type high-voltage shunt capacitor[J]. Power Capacitor Reactive Power Compensation, 2002(2): 7-10.

[19] QIN S, HO J, RABUFFI M, et al. Implications of the anisotropic thermal conductivity of capacitor windings[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011, 27(1): 7-13.

[20] 储松潮，陈翠华，黄云锴，等. 影响金属化薄膜电容器充放电性能的镀膜方阻分析[C]//陕西省电网节能与电能质量技术学会 2018 年年会暨电能质量综合治理技术研讨会. 昆明：陕西省电网节能与电能质量技术学会，2018：9.
CHU Songchao, CHEN Cuihua, HUANG Yunkai, et al. Analysis on the evaporating factors affecting the charge and discharge performance of the metallized film capacitor[C]//Shaanxi Electric Power Quality and Saving Technical Society 2018 Annual Meeting and Power Quality Comprehensive Management Technology Seminar. Kunming, China: Shaanxi Electric Power Quality and Saving Technical Society, 2018: 9.

[21] 刘尚书，吴致远，仝殿杰，等. 多物理场作用下的金属化膜自愈特性试验[J]. 高电压技术，2024，50(12)：5424-5434.
LIU Shangshu, WU Zhiyuan, TONG Dianjie, et al. Experiment of self-healing properties of metallized films under multiple physical fields[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(12): 5424-5434.

[22] LI H Y, LI H, LI Z W, et al. T pattern fuse construction in segment metallized film capacitors based on self-healing characteristics[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(6): 945-951.

[23] 王雨橙，李 化，王哲豪，等. 结晶度对金属化膜电容器保压性能的影响[J]. 高电压技术，2022，48(9)：3643-3650.
WANG Yucheng, LI Hua, WANG Zhehao, et al. Voltage maintaining performance of metallized film capacitors based on crystallinity regulation[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(9): 3643-3650.

[24] BELKO V O, GLIVENKO D, EMELYANOV O, et al. Current pulse polarity effect on metallized film capacitors failure[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2017, 45(6): 1020-1025.

[25] 查俊伟，黄文杰，杨 兴，等. 本征耐高温电极化储能聚合物电介

质研究进展[J]. 高电压技术，2023，49(3)：1055-1066.
ZHA Junwei, HUANG Wenjie, YANG Xing, et al. Research progress of intrinsic high temperature polymer dielectrics with high energy storage by electric polarization[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 1055-1066.

[26] SLENES K M, WINSOR P, SCHOLZ T, et al. Pulse power capability of high energy density capacitors based on a new dielectric material[J]. IEEE Transactions on Magnetics, 2001, 37(1): 324-327.

[27] CHU B J, ZHOU X, REN K L, et al. A dielectric polymer with high electric energy density and fast discharge speed[J]. Science, 2006, 313(5785): 334-336.

[28] 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.

[29] 左强林，雷乔舒. 从物理过程分析镀层不同金属含量对金属化膜自愈能量的影响[J]. 电力电容器与无功补偿，2024，45 (1)：116-120.
ZUO Qianglin, LEI Qiaoshu. Analysis on influence of different metal contents of coating layer on self-healing energy of metallized film from physical process[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2024, 45(1): 116-120.



刘靖舟
1999—，男，硕士生
主要从事先进电工材料方面的研究工作
E-mail:13637846187@163.com

LIU Jingzhou



吴致远(通信作者)
1998—，男，博士生
主要从事先进电工材料方面的研究工作
E-mail: 120222101031@ncepu.com

WU Zhiyuan
Ph.D. candidate
Corresponding author



王　伟
1960—，男，博士，教授，博导
主要从事高电压实验技术、先进电工材料方面的研究工作
E-mail: wwei@ncepu.edu.cn

WANG Wei
Ph.D., Professor

收稿日期　2024-08-30　修回日期　2025-01-26　　编辑　程子丰