第 52 卷 第 6 期：2588-2596 高电压技术 Vol.52, No.6: 2588-2596
2026 年 6 月 30 日 High Voltage Engineering June 30, 2026
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20250568

交直流复合电压下的金属化膜击穿及自愈特性

兰　靖[1,2]，李　化[1]，张国豪[1]，黄子钦[1]，林福昌[1]，蔡玲珑[3]
（1. 强电磁工程与新技术国家重点实验室(华中科技大学)，武汉 430074;
2. 国网杭州供电公司变电检修中心，杭州 310000；3. 广东电网公司电力科学研究院，广州 510080）

摘　要：金属化膜电容器应用作直流支撑电容器时，承受包含交流和直流分量的交直流复合电压波形，影响电容器击穿特性与自愈特性，进而直接影响其工作可靠性。该文以金属化聚丙烯薄膜为研究对象，搭建了交直流复合电压波形下金属化膜的击穿自愈平台，研究了交直流复合电压波形对金属化膜击穿及自愈特性的影响。研究表明：金属化膜击穿特性受交直流复合电压波形影响明显，表现为击穿相角的分布随交直流分量比例 k 增加而更加集中，且集中发生在交流电压峰值处；此外击穿电压随电压波形的交直流分量比例 k 增加而减小；交直流复合电压波形主要通过影响击穿特性从而影响自愈特性，而在相同击穿场强下自愈能量、自愈面积等自愈特征参数不受交直流分量比例 k 影响。

关键词：交直流复合电压波形；金属化膜；聚丙烯；击穿；自愈

Effect of Composite Voltage Waveform on Breakdown and Self-healing Characteristics of Metallized Film

LAN Jing[1,2], LI Hua[1], ZHANG Guohao[1], HUANG Ziqin[1], LIN Fuchang[1], CAI Linglong[3]
(1. State Key Laboratory of Advanced Electromagnetic Engineering and Technology(Huazhong University of Science and Technology), Wuhan 430074, China;
2. Substation Maintenance Center, State Grid Hangzhou Power Supply Co., Ltd., Hangzhou 310000, China;
3. Electric Power Research Institute, Guangdong Power Grid Corporation,Guangzhou 510080, China)

Abstract: Metallized film capacitors withstand the superimposed AC and DC voltage waveform when used as DC support capacitors, which affects the breakdown and self-healing characteristics of the capacitors, further directly impairs their reliability. This paper takes a 4μm-thick metallized polypropylene films as the research objects and constructs a breakdown and self-healing platform for metallized films under complex voltage waveforms. By controlling the ratio k of AC to DC components in the complex voltage, the influence of the complex voltage waveform on the breakdown and self-healing characteristics of the metallized film is studied. Research has shown that the breakdown characteristics of metalized films are significantly affected by the composite voltage waveform, manifested as a more concentrated distribution of breakdown phase angle with an increase in the proportion of AC/DC components k, and the breakdown concentration occurs at the peak of the AC voltage component. In addition, the breakdown voltage decreases as the proportion of the AC/DC components k in the composite voltage waveform increases. The AC-DC voltage waveforms mainly change the self-healing characteristic by affecting the breakdown characteristic. At the same breakdown voltages, self-healing characteristic parameters such as self-healing energy and self-healing area are not affected by the ratio of AC/DC components k.

Key words: AC-DC voltage waveform; metallized film; polypropylene; breakdown; self-healing

0　引言

金属化膜电容器独特的自愈性能使其具有较高的工作场强与可靠性[1-4]，常作为直流支撑电容器应用于柔性直流输电领域[5-9]。直流支撑电容器在工况条件下会承受谐波电压，导致电容器发热引起击穿场强下降[10]，进而直接影响金属化膜电容器的自愈性能[1,4]。以上问题为直流支撑电容器的可靠性带来了挑战，因此有必要研究电压波形对金属化膜自愈特性的影响。

金属化膜电容器通常是由蒸镀电极的聚丙烯

基金资助项目：南方电网公司科技项目(GDKJXM20222595(036100KK52222094))。
Project supported by Science and Technology Project of China Southern Power Grid (GDKJXM20222595(036100KK52222094)).

薄膜围绕芯轴卷绕后，在端面喷金制成[11]。薄膜在生产过程中会引入杂质或缺陷并形成电弱点。在外部电场作用下，电弱点处首先发生击穿并形成放电通道，击穿电流的焦耳热使金属电极蒸发电离，形成电弧。随电极蒸发面积增大，输入的电能不足以维持电弧燃烧，电弧收缩熄灭，绝缘恢复，这一过程即为“自愈”[12-15]。自愈特性以电容量损失为代价提高了电容器的可靠性，工程中通常以电容量下降 5%作为电容器失效的判据[16]，因此较大的自愈面积将导致电容器可靠性的显著下降。此外，较大的自愈能量会导致自愈失败的风险提高，甚至出现电容器烧结[16-19]。因此需要研究金属化膜的自愈能量、自愈面积等自愈特征参数来评估自愈性能[20-21]。

直流支撑电容器在工况下会承受直流叠加谐波的交直流复合电压波形。正常情况下，交直流复合电压波形中的交流分量远小于直流分量(不超过10%)，且主要交流分量主要为基波与二次谐波[22-23]。在上述交直流复合电压波形作用下，电容器局部发热将导致击穿性能劣化，进而影响自愈性能，降低运行可靠性。程璐等研究了交直流电场(交直流比例0.12~0.28)下金属化膜电容器元件的自愈电容量损失规律，但元件试验难以解耦击穿与自愈关联性进行研究[24]；劳斯佳等研究了交直流复合电压下温度与膜厚对 BOPP 薄膜击穿特性的影响，但分析数据时未控制交直流复合电压的比例[25]；华中科技大学团队先前对交直流电压下的 BOPP 薄膜击穿特性进行了深入研究，分析了交直流比例 0~1 范围内的击穿相角与场强变化规律[26]，但未进一步研究自愈特性。因此，有必要针对金属化膜击穿与自愈特性，考虑到实际工况，设计了交直流复合电压比例 0~0.6 范围内的薄膜试验，并解耦分析金属化膜的自愈特性。

本文搭建了交直流复合电压波形下的金属化膜击穿自愈平台，以 4 μm 厚的金属化聚丙烯薄膜为研究对象，结合实验结果分析了交直流复合电压波形对金属化膜击穿及自愈特性的影响。

1　金属化膜击穿与自愈实验

1.1　实验平台

本文搭建了交直流复合电压波形金属化膜击穿自愈平台，实验回路由直流电压输出模块、交流电压输出模块和薄膜击穿自愈平台组成。交直流复合电压中的直流、交流分量由对应输出模块控制。薄膜击穿自愈平台通过加热台控制温度条件，通过液压重物系统控制机械压强条件。实验回路如图 1 所示，其中 R_1=2 MΩ、R_2=20 kΩ 为限流电阻，C_1=0.1 μF 为稳压电容，C_2=1 μF 为隔直电容，R_3=100 Ω 为自愈限流电阻，R_4=1 Ω 为电流采样电阻，采用无感电阻，电阻精度在 0.01%内。C_s 为薄膜样品电容，由 4 μm 膜厚的两张单面金属化的聚丙烯薄膜叠置而成，叠置面积对应电容为 C_s 且为 32 cm^2，将金属电极面朝上以引出放置高压、低压电极。金属化膜电极为 10%铝含量的锌铝电极。电极方阻介于 35~45 Ω/□。

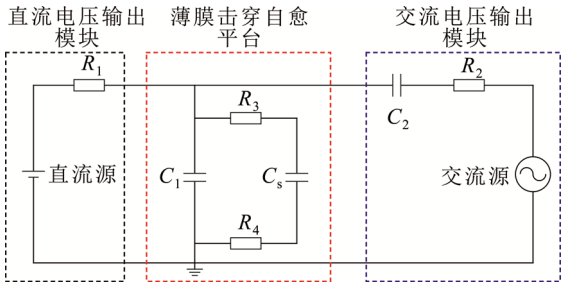


图 1　交直流复合电压波形金属化膜击穿自愈平台

Fig.1　Composite voltage waveform breakdown and self-healing platform

1.2　实验方法

薄膜击穿时的交直流复合电压波形如图 2 所示，薄膜击穿时承受的交直流复合电压波形 u 可以表示为：

$$u(t_b)=U_{dc}+U_{ac}\sin(2\pi f t_b+\varphi_0) \tag{1}$$

式中：t_b 为击穿时刻；U_{dc} 为薄膜承受的直流电压分量幅值；U_{ac} 为薄膜承受的交流电压分量幅值；f 为交流电压分量频率；φ_0 为交流电压分量相位。为分析交直流复合电压波形对薄膜自愈性能的影响，引入交直流分量的比例 k 描述交直流复合电压波形的特征，有：

$$k=U_{ac}/U_{dc} \tag{2}$$

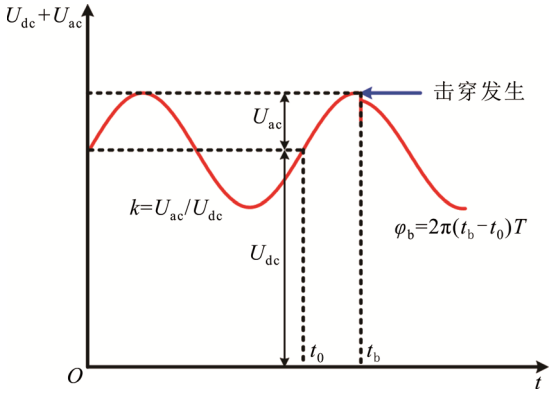


图 2　击穿时刻交直流复合电压波形

Fig.2　Composite voltage waveform at breakdown moment

交直流复合电压的交直流分量比例 k 越低，薄膜击穿时的交流分量越低，且在直流电压击穿情况下 k=0。实际工况中，直流支撑电容器承受的交流分量仅为直流分量的 10%，且交流分量频率以工频为主[22-23]，因此主要研究 k<1 时的薄膜击穿自愈情况，且交流电压频率 f 选定为 50 Hz。

为控制输出不同 k 值的交直流复合电压波形，本文采取输出固定有效值的交流电压叠加固定升压速率的直流电压的升压方式，测量交流电压 U_{rms} 分别为 0、200、400、600 V 时的薄膜击穿电压，并得到各个条件下的交直流复合电压波形的交直流分量比例 k 平均值。直流升压速率为 100 V/s，持续加压直至薄膜发生击穿，记录击穿自愈电压电流波形。实验中控制薄膜温度为 25 ℃，外施机械压强为 5 kPa。交直流复合电压波形如图 3 所示。

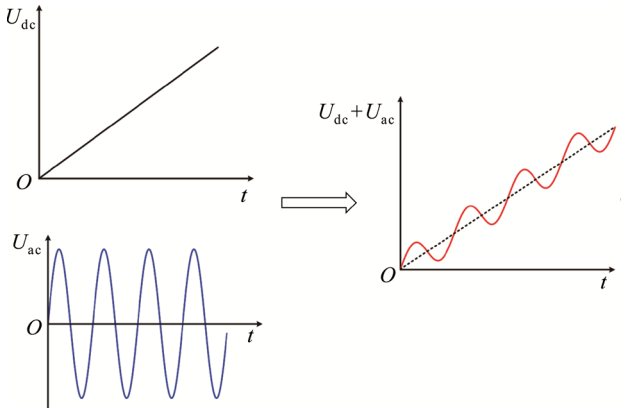


图 3 交直流复合电压波形

Fig.3 Composite voltage waveform

2 结果与讨论

2.1 击穿特性

不同交直流复合电压波形的 k 值如表 1 所示，每组条件下实验样本不少于 50 组。

表 1 交直流复合电压比例

Table 1 AC and DC voltage ratio

施加电压类型	$k=U_{ac}/U_{dc}$
DC	0
DC+200 V AC	0.13
DC+400 V AC	0.33
DC+600 V AC	0.60

注：交流电压为有效值。

与直流电压作用情况不同，交直流复合电压波形作用下金属化膜击穿时交流分量存在某一相角。为深入分析交直流复合电压对击穿的影响引入击穿相角 φ_b，并将其定义为击穿发生时刻 t_b 与该周期开始时刻 t_0 的相位差，即：

$$\varphi_b = 2\pi\frac{t_b - t_0}{T} \tag{3}$$

式中：T 为交流分量周期。值得指出的是，由于直流电压分量的叠加作用，示波器读取到的 t_0 并不位于相邻周期峰值中点，从而导致击穿相角计算结果出现偏差。然而，由于升压速率较低，在一个工频周期内的电压变化仅为 2 V，仅占交流分量的 1%以下，因此计算偏差可以忽略。根据式(3)计算不同 k 值的交直流复合电压波形作用下的金属化膜击穿相角，得到的结果如图 4 所示。图 4 表明，不同交直流比例的交直流复合电压作用下的击穿相角均集中在 60°~120°之间，说明击穿基本发生在交流的峰值处，且比例 k 增加时，击穿相角分布更加集中在 90°附近。其中的一个重要原因是随交流分量增加，相同相角内的电压变化显著增加，导致击穿发生在更靠近峰值的相角。这说明击穿主要依赖于交直流复合电压的幅值。

不同 k 值下的平均击穿电压 U_b 与 k 的关系如图 5 所示。由图 5 可知，金属化膜的平均击穿电压 U_b 随交直流电压比例 k 增加而呈现略微下降趋势。当交直流电压比例 k 由 0 增加至 0.60 时，金属化膜的平均击穿电压 U_{bavg} 由 2 156.8 V 下降至 2106.0 V，下降了 2%。为进一步研究击穿场强特性，采用两参数 Weibull 分布分析电压波形对金属化膜击穿特性的影响。击穿电压的累积概率分布形式满足[27-29]：

$$F(U_b) = 1 - \exp(-(\frac{U_b}{\alpha})^{\beta}) \tag{4}$$

式中：U_b 为击穿电压；α 为尺度参数，也称为特征击穿电压；β 为形状参数，表征分散性。

累积击穿概率分布随交直流分量比例 k 变化的曲线如图 6 所示，分布参数如表 2 所示。由图表可知，随 k 值增大、交流分量增加，分布曲线略微左移，击穿场强略微下降。当 k 由 0 增加至 0.6 时，特征击穿电压 α 由 2 321.6 V 下降至 2 280.8 V，下降了 2%，这与平均击穿场强 U_{bavg} 的变化基本相符；β 由 9.9 下降至 7.5，下降了 32%，击穿分散性略有增加。在直流情况下，金属化膜的击穿主要由电弱点如机械损伤、杂质缺陷处的电场畸变引发的电击穿，而在交流分量作用下，聚丙烯的介质极化损耗增加，更易引起局部发热进而引起热击穿。因此随

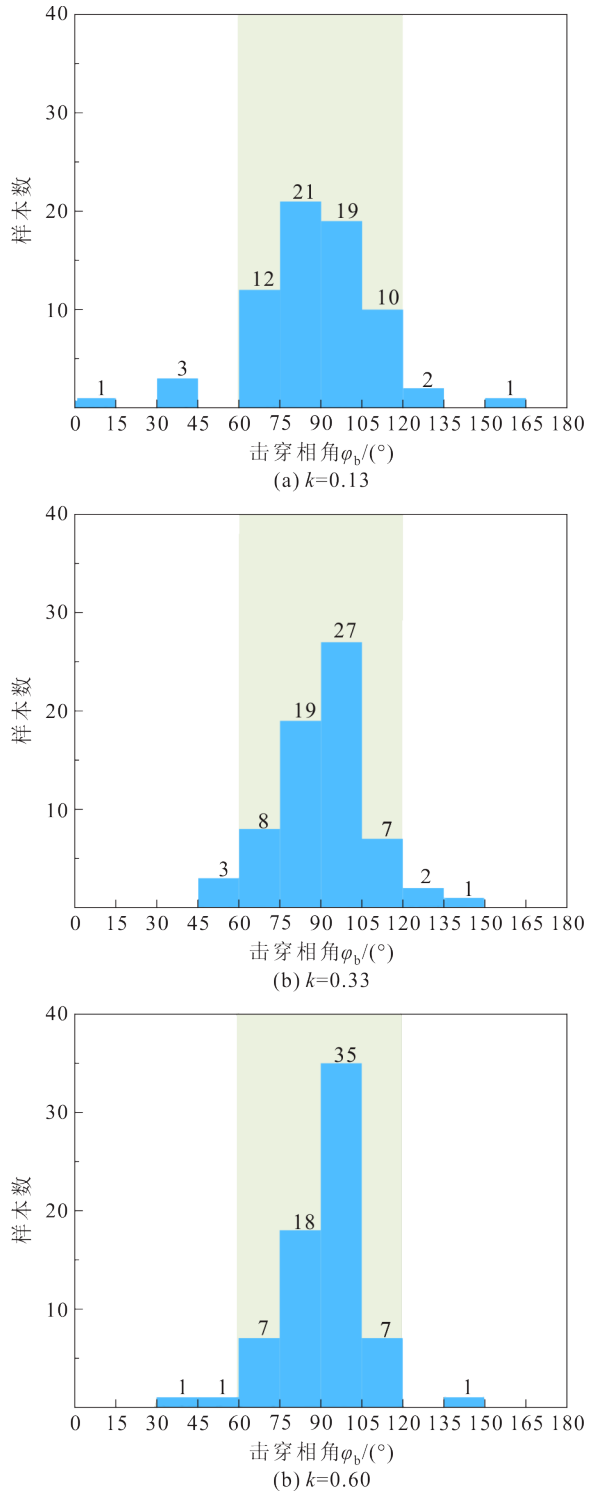


图 4　击穿相角 φ_b 与 k 的关系

Fig.4　Relationship between the breakdown phase angle φ_b and the ratio k

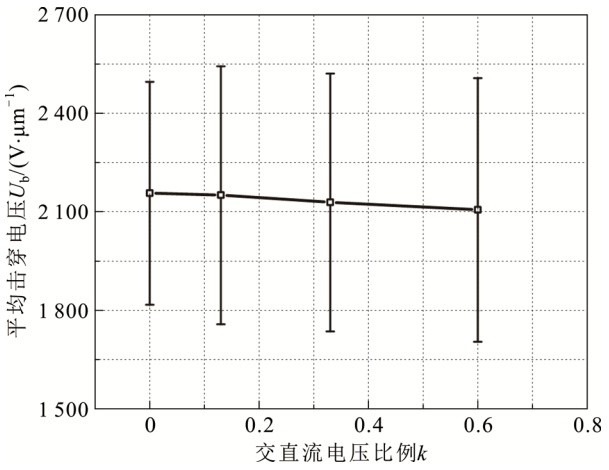


图 5　平均击穿电压 U_b 与 k 的关系

Fig.5　Relationship between the average breakdown voltage U_b and the ratio k

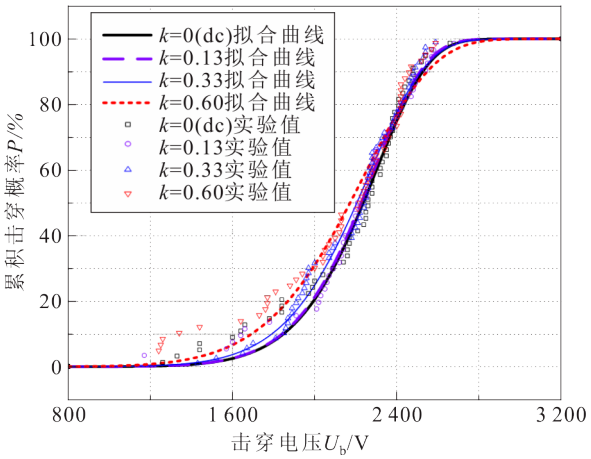


图 6　累积击穿概率分布与 k 的关系

Fig.6　Relationship between the cumulative breakdown probability distribution and the ratio k

表 2　击穿分布参数随 k 的关系

Table 2　Relationship between breakdown distribution parameters and the ratio k

k	α/V	β
0	2 321.6	9.9
0.13	2 310.4	9.9
0.33	2 296.4	9.1
0.60	2 280.8	7.5

k 值增加，击穿机制同时出现电弱点的电击穿与热击穿，且热击穿引起的低场击穿概率逐渐增加，导致击穿场强发生下降，同时击穿分散性增加。考虑金属化膜的电导损耗与极化损耗，可将交直流电压下的发热功率 P 表示为：

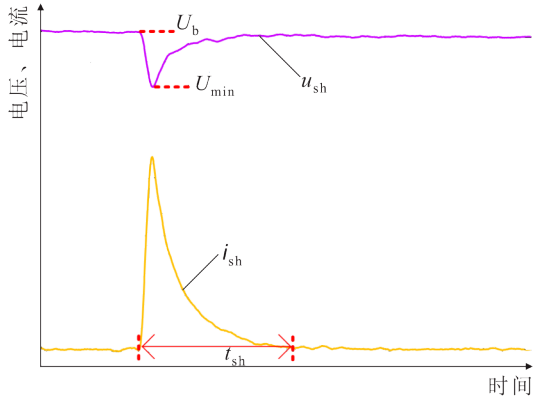
$$P=\frac{U_{dc}^2}{R_0}+U_{ac}^2 2\pi fC\tan\delta \tag{5}$$

式中：U_{dc}、U_{ac} 分别表示直流、交流电压分量；R_0 表示泄漏电阻；C 表示电容量；tanδ 表示介质损耗角；聚丙烯的 tanδ=2×10^{-4}。以试验中面积为 32 cm^2

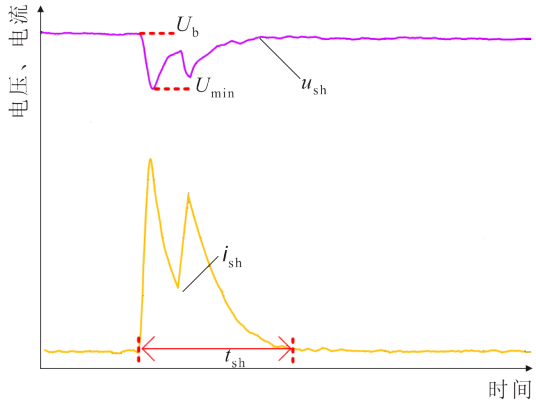
的薄膜试样为例，聚丙烯电导率取 10^{-15} S/m，R_0=1.25×10^{11} Ω，C=15.6 nF。假设击穿电压均为 3 000 V，则 k 为 0、0.6 时发热功率分别为 7.2×10^{-5} W 与 1.3×10^{-3} W。可见随 k 增加，金属化膜发热显著增加，热击穿发生概率随之增加，进而导致击穿场强下降与分散性增加。

2.2 自愈特性

交直流复合电压波形作用下的单次典型自愈电压电流波形如图 7 所示，图中 u_{sh} 为自愈电压波形，i_{sh} 为自愈电流波形曲线。击穿发生时，薄膜两端电压由击穿电压 U_b 迅速下降到最低值，再恢复至略低于 U_b 的电压，自愈过程结束。整个自愈过程的持续时间 t_{sh} 为数微秒。



(a) 单次自愈



(b) 连续自愈

图 7 典型自愈电压电流波形

Fig.7 Typical voltage and current waveforms during self-healing process

除单次自愈外，连续自愈也较为常见。连续自愈指的是连续发生一次以上自愈的现象，通常第二次或更多次自愈发生在同个自愈点。在第一次自愈结束后交直流复合波形电压回升的过程中，由于交直流复合电压高于第一次自愈的沿面绝缘电压，导致第二次击穿自愈发生。第二次自愈的电压下降与电流上升较第一较小，消耗的能量也较小。也有少数连续自愈现象存在多个自愈点。单次与连续自愈通常受自愈过程中的能量影响明显。当自愈过程中的能量较大，自愈作用强烈时，去金属化电极区域较大，在电压回升过程中不易发生二次自愈。统计不同交直流分量比例 k 的交直流复合电压作用下发生的单次、连续自愈次数，得到的结果见表 3。

表 3 单次、连续自愈占比与 k 的关系

Table 3 Relationship between proportion of single and continuous self-healing and the ratio k

k	单次自愈占比/%	连续自愈占比/%	显著性检验(卡方检验)
0	71.7	28.3	p=0.734>0.05
0.13	69.1	30.9	
0.33	70.2	29.8	
0.60	73.7	26.3	

根据表 3 结果，由卡方检验得到的结果为 p=0.734>0.05，因此交直流复合电压波形交直流分量比例 k 对单次自愈与连续自愈发生次数占比无明显作用规律。这初步说明自愈过程消耗能量与交直流复合电压波形无关，仍需要对金属化膜的自愈特性进行深入分析。

通常引入自愈特征参数表征金属化膜的自愈特性。自愈特征参数包括自愈能量、自愈面积，这两者直接反映了自愈强烈程度与对电容器性能劣化作用的程度。为研究交直流复合电压波形对金属化膜自愈特性的影响，需要研究自愈能量、自愈面积等自愈特征参数的变化特性。在后文的研究中，主要单次自愈。

(1)自愈能量

自愈能量指金属化膜在自愈过程中，用于金属电极蒸发、薄膜分解以及空间耗散等部分能量的总和。通常用自愈能量衡量自愈的强烈程度。较大能量的自愈将导致更多的电容量损失、薄膜劣化以及局部发热，导致电容器的可靠性下降。定义自愈过程消耗的能量 W_{sh} 为自愈时间 t_{sh} 内自愈电压 u_{sh} 与自愈电流 i_{sh} 乘积的积分，有：

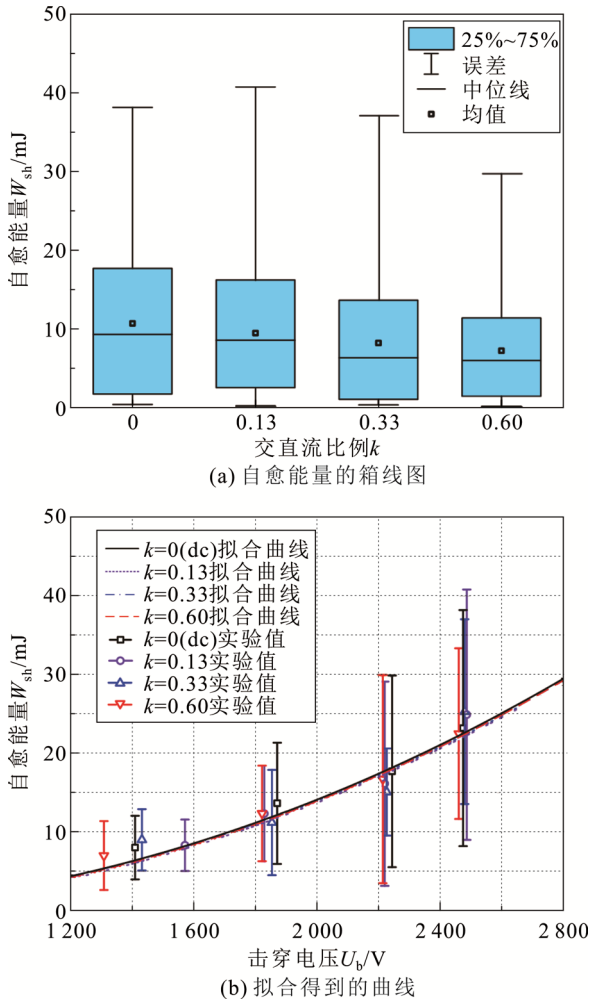
$$W_{sh}=\int_0^{t_{sh}} u_{sh}i_{sh}\mathrm{d}t \tag{6}$$

自愈能量的箱线图如图 8(a)所示。由图可知，自愈能量 W_{sh} 的分布随 k 的增加而向低值方向移动。值得指出的是，由于击穿电压是自愈特性的影响因素之一，因此在分析交直流复合电压波形对金属化膜自愈特性时，需要在控制击穿电压基本相同。按

照击穿电压将自愈数据划分为 4 个区间，计算得到在不同电压波形作用下，每个区间内的平均自愈能量随击穿电压的变化曲线如图 4 所示。由图可知，在不同 k 值电压作用下，随着击穿电压的增加，金属化膜的自愈能量不断增加。有学者指出，自愈能量 W_{sh} 和击穿电压 U_b 满足关系：

$$W_{sh}=a_1U_b^{b_1} \tag{7}$$

式中：a_1 和 b_1 分别为系数，且 b_1 通常在 2~6 之间[17]。系数 a_1、b_1 与 k 的关系如表 4 所示。采用式(6)进行拟合，得到的曲线如图 8(b)所示。



(a) 自愈能量的箱线图

(b) 拟合得到的曲线

图 8　自愈能量 W_{sh} 与 k 的关系

Fig.8　Relationship between the self-healing energy W_{sh} and the ratio k

由图可知，自愈能量随击穿电压变化的关系符合幂指数关系，且指数项 b_1 均在 2.1 左右，与文献参考值相符。金属化膜的自愈能量随击穿电压增加而明显增加，以直流电压作用时情况为例，当击穿电压由 1 407 V 增加至 2 475 V 时，平均自愈能量由 8.0 mJ 增加至 23.4 mJ，增加了 1.9 倍。

表 4　系数 a_1、b_1 与 k 的关系

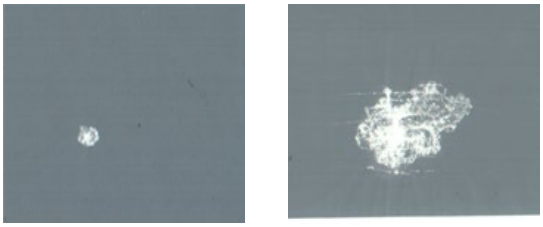
Table 4　Relationship between coefficients a_1, b_1 and the ratio k

k	$a_1/10^{-6}$	b_1	拟合优度 R^2
0	1.47	2.12	0.978
0.13	1.58	2.11	0.979
0.33	1.45	2.12	0.969
0.60	1.36	2.13	0.976

击穿与自愈的关系自愈能量关于击穿电压的变化曲线基本重合，且 k 在 0~0.6 的范围内变化时，系数 a_1 的变化不超过 7%，说明自愈能量不受交直流复合电压比例 k 影响，而主要取决于击穿电压的大小。这是因为自愈过程的持续时间 t_{sh} 仅为数微秒，而交流分量的变化周期在毫秒量级，远大于 t_{sh}。由于实际工况中 k<1，电压波形无过零点，因此不存在电弧极性反转问题。假设 t_{sh}=1 μs，交流电压分量为 600 V(k=0.6)，自愈过程中交流分量的最大变化为 0.18 V。因此可以近似认为自愈过程中薄膜承受直流电压，此时自愈能量 W_{sh} 主要受击穿电压 U_b 大小影响，而不受电压波形影响。

(2)自愈面积

自愈面积指的是自愈过程结束后，金属化膜在击穿点附近存在去金属化电极区域的面积，该区域的大小反映了自愈导致的电容量损失。典型的自愈点形态如图 9 所示。当自愈能量较小时，自愈点呈现为规整的圆形；当自愈能量较大时，自愈点边缘呈现放射状与放电痕迹。大自愈能量下的自愈点面积显著增加，自愈导致的电容量损失更大，且更加容易损伤薄膜，造成自愈点附近薄膜的绝缘性能下降，电容器更易发生失效。



(a) 小能量自愈点　　(b) 大能量自愈点

图 9　典型自愈点形态

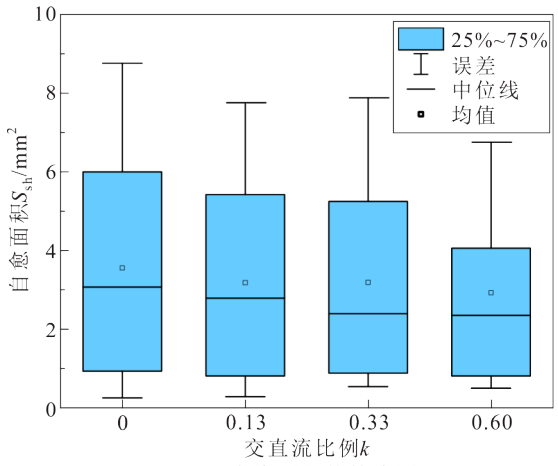
Fig.9　Morphology of typical self-healing sites

将去金属化电极区域面积记为自愈面积 S_{sh}，其反映了自愈对电容量下降的影响。采用图像识别软件测量薄膜的自愈面积 S_{sh}。自愈面积的箱线图如图

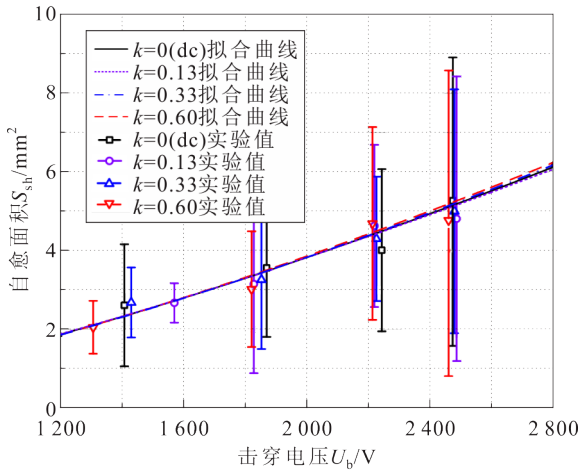
10(a)所示。由图可知，自愈面积 S_{sh} 的分布随 k 的增加而向低值方向移动。同样地，按照击穿电压将自愈数据划分为 4 个区间，得到在交直流复合电压波形作用下每个区间内的平均自愈面积随击穿电压的变化曲线如图 10(b)所示。有学者指出，自愈面积 S_{sh} 和击穿电压 U_b 应近似满足线性关系[18]，然而当自愈较为强烈时自愈面积 S_{sh} 和击穿电压 U_b 的对应关系会有所变化，主要与自愈过程中的能量流向相关。根据实验结果，自愈面积 S_{sh} 和击穿电压 U_b 的关系符合幂指数关系，即：

$$S_{sh} = a_2 U_b^{b_2} \tag{8}$$

式中，a_2 和 b_2 分别为系数。系数 a_2、b_2 与 k 的关系如表 5 所示。采用式(8)数据进行拟合，得到曲线如图 10(b)所示。



(a) 自愈面积的箱线图



(b) 平均自愈面积随击穿电压的变化

图 10 自愈面积 S_{sh} 与击穿电压 U_b 的关系

Fig.10 Relationship between the self-healing area S_{sh} and the breakdown voltage U_b

由图 10 可知，自愈面积 S_{sh} 随击穿电压 U_b 的变化关系符合幂指数关系。金属化膜的自愈面积随击穿电压增加而明显增加，以直流电压作用时情况为例，当击穿电压由 1 407 V 增加至 2 475 V 时，平均自愈面积由 2.61 mm^2 增加至 5.27 mm^2，增加了 1.0 倍。

表 5 系数 a_2、b_2 与 k 的关系

Table 5 Relationship between coefficients a_2, b_2 and the ratio k

k	$a_2/10^{-5}$	b_2	拟合优度 R^2
0	9.19	1.39	0.991
0.13	11.30	1.37	0.994
0.33	7.83	1.42	0.964
0.60	7.57	1.42	0.992

自愈面积关于自愈能量的变化曲线基本重合，说明相同击穿电压下，自愈面积不受交直流电压比例 k 影响。这是因为自愈面积与自愈能量紧密相关，而如前文所述自愈能量与交直流复合电压波形无关，因此容易预见自愈面积随击穿电压的变化曲线几乎不受 k 影响。此外，系数 b_2 普遍小于系数 b_1，即当击穿电压升高时自愈能量相较于自愈面积的增大程度更为显著。这说明自愈能量中的耗散能量比例有所增加，而用于金属电极蒸发能量比例相应减小。

为进一步研究交直流复合电压波形对金属化膜自愈特性的影响，按照自愈能量将自愈数据划分为 4 个区间，得到在交直流复合电压波形作用下每个区间内的平均自愈面积随自愈能量的变化曲线如图 4 所示。由图可知，在不同 k 值电压作用下，随着自愈能量的增加，金属化膜的自愈面积不断增加。有学者指出，在较大自愈能量下，自愈面积 S_{sh} 和自愈能量 W_{sh} 满足关系[18]：

$$S_{sh} = a_3 W_{sh}^{b_3} = \frac{a_2}{a_1^{b_2/b_1}} W_{sh}^{b_2/b_1} \tag{9}$$

采用式(7)、式(8)的拟合结果，得到的 a_1 和 b_1 如表 6 所示。

自愈面积 S_{sh} 随自愈能量 W_{sh} 的变化关系符合幂指数关系，如图 11 所示。金属化膜的自愈面积随自愈能量增加而明显增加，以直流电压作用时情况为例，当自愈能量由 1.8 mJ 增加至 51.9 mJ 时，自愈面积由 1.17 mm^2 增加至 8.94 mm^2，增加了 6.6 倍。

自愈面积关于自愈能量的变化曲线基本重合，且 k 在 0~0.6 的范围内变化时，系数 a_2 的变化不超过 7%，说明自愈面积主要取决于自愈能量的大小，即受击穿电压影响更明显而非电压波形。这是因为金属电极蒸发消耗的能量占自愈能量的 50%以

上[15]，且金属电极蒸发能量直接与自愈面积相关，而自愈能量已被观测到与交直流复合电压波形无关。此外，与自愈面积随击穿电压的变化曲线相互印证，当自愈能量较大时，自愈中耗散的能量增多而用于金属电极蒸发的能量减少，因此自愈面积 S_{sh} 随自愈能量 W_{sh} 的变化关系符合幂指数关系，且指数项 b_2<1。

表 6　系数 a_3、b_3 与 k 的关系

Table 6　Relationship between coefficients a_2, b_3 and ratio k

k	a_3	b_3
0	0.65	0.66
0.13	0.67	0.65
0.33	0.64	0.67
0.60	0.64	0.67

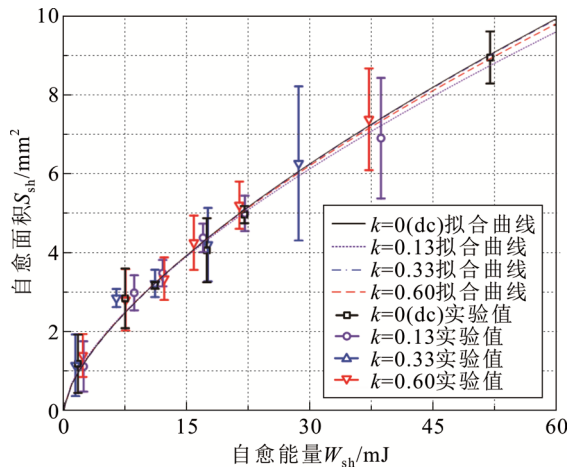


图 11　自愈面积 S_{sh} 与自愈能量 W_{sh} 的关系

Fig.11　Relationship between self-healing area S_{sh} and self-healing energy W_{sh}

3　结论

1）交直流复合电压波形对金属化膜的击穿特性有明显影响，表现为击穿电压随交直流分量比例 k 增加呈现减小的趋势，原因在于交流分量对热击穿发生的促进。对于直流支撑电容器，应当优化电容器结构与材料以减少热损耗导致的温升影响，从而提高电容器在交直流复合电压下的可靠性。

2）交直流复合电压波形主要通过影响击穿特性来影响自愈特性。原因在于自愈时间远小于交流分量周期，相同击穿电压下金属化膜的自愈能量、面积与交直流分量比例 k 无关，但 k 更高时更易发生击穿自愈，导致电容器可靠性下降。

参考文献　References

[1] 朱一昕，楼顺凯，雷乔舒，等. 高压全膜电力电容器热学数值模拟及实验研究[J]. 广东电力，2023，36(4)：57-63.
ZHU Yixin, LOU Shunkai, LEI Qiaoshu, et al. Numerical simulation and experimental study on high-voltage full-film power capacitor thermodynamics[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(4): 57-63.

[2] 刘淑军，郭铸，黄伟煌，等. 海上风电柔性直流输电系统新型电压-频率控制策略[J]. 广东电力，2022，35(10)：12-19.
LIU Shujun, GUO Zhu, HUANG Weihuang, et al. New voltage/frequency control strategy in offshore wind power VSC-HVDC transmission system[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(10): 12-19.

[3] SANDSTRÖM G Ö, TINGSTRÖM J. Management of radical innovation and environmental challenges: development of the DryQ capacitor at ABB[J]. European Journal of Innovation Management, 2008, 11(2): 182-198.

[4] 李维维，高琪，芦锋. 柔性直流输电工程用直流支撑电容器的开发探讨[J]. 电力电容器与无功补偿，2017，38(3)：95-98.
LI Weiwei, GAO Qi, LU Feng. Discussion on the development of DC-link capacitor for flexible HVDC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2017, 38(3): 95-98.

[5] WANG H, LISERRE M, BLAABJERG F. Toward reliable power electronics: challenges, design tools, and opportunities[J]. IEEE Industrial Electronics Magazine, 2013, 7(2): 17-26.

[6] 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.

[7] 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.

[8] 王开正，孔德照，何渝霜，等. 自愈式金属化膜电容器微结构演变分析及仿真[J]. 高电压技术，2024，50(10)：4581-4590.
WANG Kaizheng, KONG Dezhao, HE Yushuang, et al. Microstructure evolution analysis and simulation of self-healing metallized film capacitor[J]. High Voltage Engineering, 2024, 50(10): 4581-4590.

[9] 杨煜，吕敬，王潇，等. 双馈风电场柔直并网系统的近工频振荡分析与抑制[J]. 高电压技术，2025，51(2)：593-604.
YANG Yu, LÜ Jing, WANG Xiao, et al. Analysis and suppression of near fundamental-frequency oscillation in DFIG-based wind farm connected with MMC-HVDC transmission system[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 593-604.

[10] NAGAO M, KIMURA T, MIZUNO Y, et al. Detection of Joule heating before dielectric breakdown in polyethylene films[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1990, 25(4): 715-722.

[11] QIN S S, MA S L, BOGGS S A. The mechanism of clearing in metalized film capacitors[C]//Proceedings of 2012 IEEE International Symposium on Electrical Insulation. San Juan, USA: IEEE, 2012: 592-595.

[12] BELKO V O, EMELYANOV O A. Self-healing in segmented metallized film capacitors: experimental and theoretical investigations for engineering design[J]. Journal of Applied Physics, 2016, 119(2): 024509.

[13] KAMMERMAIER J, RITTMAYER G, BIRKLE S. Modeling of plasma-induced self-healing in organic dielectrics[J]. Journal of Ap-

plied Physics, 1989, 66(4): 1594-1609.

[14] HEYWANG H. Physical and chemical processes in self-curing plastic capacitors[J]. Colloid and Polymer Science, 1976, 254: 138-147.

[15] SASSOULAS P O, GOSSE B, GOSSE J P. Self-healing breakdown of metallized polypropylene[C]//Proceedings of the 2001 IEEE 7th International Conference on Solid Dielectrics. Eindhoven, Netherlands: IEEE, 2001: 275-278.

[16] 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.

[17] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI N, Dominance of Joule effect in self-healing of capacitors with metallized film technology[C]//Proceedings of the Second International Workshop on Electrical Conduction, Convection and Breakdown in Fluids. Grenoble, France, 2000: 79-82.

[18] TORTAI J H, BONIFACI N, DENAT A, et al. Diagnostic of the self-healing of metallized polypropylene film by modeling of the broadening emission lines of aluminum emitted by plasma discharge[J]. Journal of Applied Physics, 2005, 97(5): 053304.

[19] SHAW D G, CICHANOWSKI S W, YIALIZIS A. A Changing capacitor technology-failure mechanisms and design innovations[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation, 1981, EI-16(5): 399-413.

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

[21] SHAW D G, CICHANOWSKI S W, NEWCOMB G R, et al. Electrical properties and aging mechanisms in metallized polypropylene film capacitors[C]//1982 IEEE International Conference on Electrical Insulation. Philadelphia, USA: IEEE, 1982: 27-34.

[22] KOLAR J W, ROUND S D. Analytical calculation of the RMS current stress on the DC-link capacitor of voltage-PWM converter systems[J]. IEE Proceedings-Electric Power Applications, 2006, 153(4): 535-543.

[23] TANG Y, CHEN M J, RAN L. A compact MMC submodule structure with reduced capacitor size using the stacked switched capacitor architecture[J]. IEEE Transactions on Power Electronics, 2016, 31(10): 6920-6936.

[24] 程璐，李志元，王镜然，等. 高压直流电场与谐波耦合作用下金属化膜电容器失效研究[J]. 中国电机工程学报，2023，43(22)：8955-8964.
CHENG Lu, LI Zhiyuan, WANG Jingran, et al. Mechanism study on the failure of metalized film capacitor under HVDC field superimposed harmonics[J]. CSEE Journal of Power and Energy Systems, 2023, 43(22): 8955-8964.

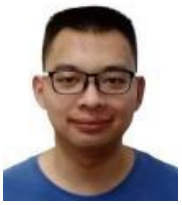
[25] 劳斯佳，何樱，唐勇，等. 交直流复合电压下温度和膜厚对金属化膜击穿特性影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2020，41(4)：12-17.
LAO Sijia, HE Ying, TANG Yong, et al. Study on the influence of temperature and film thickness on breakdown characteristic of metallized films under AC-DC composite voltage[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4): 12-17.

[26] 张国豪，李化，黄子钦，等. 交直流电压比例对金属化膜击穿特性的影响研究[J]. 电力电容器与无功补偿，2023，44(2)：55-60.
ZHANG Guohao, LI Hua, HUANG Ziqin, et al. Study on the effect of AC/DC voltage ratio on breakdown characteristics of metallized film[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2023, 44(2): 55-60.

[27] RYTÖLUOTO I, LAHTI K, KARTTUNEN M, et al. Large-area dielectric breakdown performance of polymer films-part i: measurement method evaluation and statistical considerations on area-dependence[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(2): 689-700.

[28] RYTÖLUOTO I, LAHTI K. Effect of film thickness and electrode area on the dielectric breakdown characteristics of metallized capacitor films[C]//Nordic Insulation Symposium. Trondheim, Norway, 2011: 33-38.

[29] BAIN L J. Statistical analysis of reliability and life-testing models: theory and methods[M]. New York, USA: Marcel Dekker: 1978.



兰　靖
2000—，男，硕士生
研究方向为高电压与绝缘技术
E-mail: jinglan@hust.edu.cn

LAN Jing



李　化(通信作者)
1979—，女，博士，教授，博导
研究方向为高电压与绝缘技术
E-mail: leehua@hust.edu

LI Hua
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期　2025-04-21　在线出版日期　2025-09-28　　编辑　曹昭君