

DOI: 10.14044/j.1674-1757.pcrpc.2024.01.010

基于原位测量的交直流复合电压对金属化膜自愈特性影响的研究

吴致远¹, 王卓容¹, 刘靖舟¹, 刘尚书¹, 仝殿杰¹, 齐红斌¹, 王建涛²,
党智敏², 王伟¹, 屠幼萍¹

(1. 华北电力大学高电压与电磁兼容重点实验室, 北京 102206; 2. 清华大学电机系, 北京 100084)

摘要: 干式直流金属化膜电容器由于其具有特殊的“自愈”特性,在投入使用前可通过“赋能”工艺去除电弱点,相比于箔式电容器,其工作电压更高,储能密度更大。为此,搭建了金属化膜自愈特性原位测试平台,研究了交直流叠加下金属化膜自愈特性的演变规律,分析了在温度、压强等复杂应力作用下,不同交直流复合电压对金属化膜自愈特性的作用机制。同时依据温度实验中发现的现象和得出的结论,搭建了自愈热力学模型,从热力学理论的角度上明确了焦耳热为自愈能量的主要来源,经过仿真计算后发现,热力学模型在 0.1 MPa 低压强下呈现很好的拟合效果,但在 10 MPa 高压强下误差较大。

关键词: 自愈特性; 原位测量; 交直流; 热力学模型

Research on Effects of Combined AC/DC Voltage on Self-healing Characteristics of Metallized Film Based on In-situ Measurements

WU Zhiyuan¹, WANG Zhuorong¹, LIU Jingzhou¹, LIU Shangshu¹, TONG Dianjie¹,
QI Hongbin¹, WANG Jiantao², DANG Zhimin², WANG Wei¹, TU Youping¹

(1. High Voltage and Electromagnetic Compatibility Laboratory, North China Electric Power University, Beijing 102206, China; 2. Department of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

Abstract: Dry DC metallized film capacitor exhibits special “self-healing” properties, allowing the elimination of electrical vulnerabilities through an “empowering” process prior to operation. Compared to foil capacitor, it offers higher operational voltages and greater energy storage density. For this purpose, the in-situ test platform of self-healing properties of metallized film is set up, the evolution of the self-healing of metallized film under the AC/DC superposition is studied, and the mechanism of different AC/DC composite voltage to the self-healing properties of metallized film is analyzed under the action of such stresses as temperature and pressure. At the same time, based on observed phenomena and derived conclusions from temperature experiments, a thermodynamic model for self-healing is set up. It is defined from the point of view of thermodynamic theory that the joule heating is the primary source of self-healing energy. It is found through simulation and calculation that the thermodynamic model exhibits very good fitting effect at low intensity of pressure (0.1 MPa), but shows notable error at high intensity of pressure (10 MPa).

Keywords: self-healing; in-situ testing; combined AC/DC; thermodynamic model

0 引言

近年来我国大力发展特高压直流输电,在交直流变电过程中需要大量换流阀^[1],其中干式直流电容

器是换流阀的核心组件,现今聚丙烯金属化膜为其常用介质材料,相较于箔式电容器^[2],金属化膜电容器由于其具有特殊的“自愈”特性,在投入使用前可通过“赋能”工艺去除电弱点,使其工作电压更高,

收稿日期:2023-08-31

基金项目:国家重点研发计划(2021YFB2401503)。

储能密度更大,目前美国聚丙烯金属化膜电容器储能密度达到 3 kJ/L^[3]。

现在国内对于介质材料研究较多,通过复合介质、梯度材料,表面改性工程等方法可以大大提高聚丙烯的储能密度和击穿场强。但是对于其后续工艺金属化及其自愈特性的研究较少,华中科技大学李化^[4]等人搭建金属化膜自愈测试平台,对自愈特性进行温度、压强、电压的分析测试,温度达到 80 ℃,压强在 1 MPa 以下,谐波为 100 V 有效值;孔中华^[5]等人通过对不同单一物理场变化对自愈特性进行实验验证总结出宏观自愈特性的影响规律;以上学者都研究了单一因素对自愈特性的影响,未考虑多应力共同作用下自愈特性的演变规律。但作为需要实际运行在电网下的器件,其必定是承受多应力的共同作用,且由于在电网运行下必然存在谐波,直流电容器并不止承受直流,还有谐波成分^[6]。所以,在复杂应力下交直流电压对自愈特性演变规律的研究就变得尤为重要,但是现今缺少微米级超薄膜自愈特性的原位

测试平台和测试数据^[7],我国干式直流电容器产业链上亟需此类原位测量数据来检验其器件可靠性。

本文搭建了微米级薄膜自愈特性测试平台,可实现复杂应力下自愈特性的原位测量,实现了电、热、力 3 种应力的自由叠加。自愈实验以换流阀中电容器实际运行条件为基准,3 种应力共同施加,研究多应力下交直流对自愈特性的影响规律,同时提出自愈热力学理论模型,并进行实验验证。

1 自愈特性原位测试平台

测试平台主要有 3 种应力施加,电场、温度场、机械应力 3 种。

1.1 电场

由于存在交直流叠加,为使得高额交流分量能大量通过试样,而不会从稳压电容中流走,本实验电路设计增加了谐振分路, $u_{c0}(t)$ 和 $i_{c0}(t)$ 分别是实验测得的自愈电压和自愈电流, $i_d(t)$ 是自愈发生时稳压电容提供的电流。实验平台电路拓扑图见图 1。

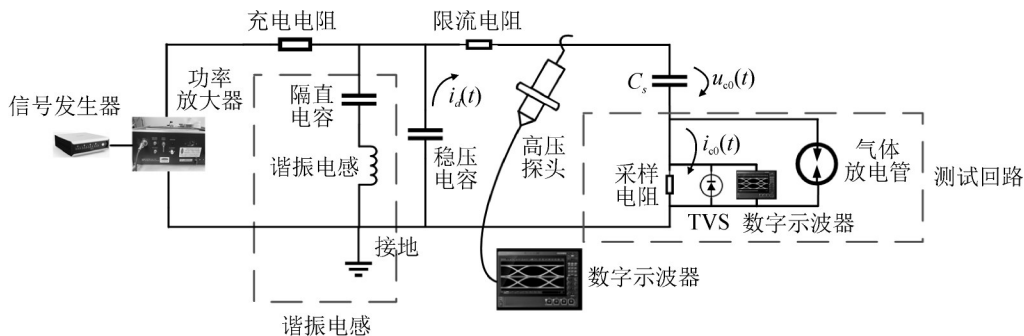


图1 实验平台电路拓扑图
Fig. 1 Circuit topology of experimental platform

1.2 温度和机械应力

温度的施加主要是通过油浴加热板贴合薄膜试样,基于热传导来实现,工字夹具向薄膜施压及自制绝缘夹具往两侧拉伸来模拟层间压强和卷绕张力。实验平台温度和机械力场图见图 2。原位自愈特性测试平台实物图见图 3。

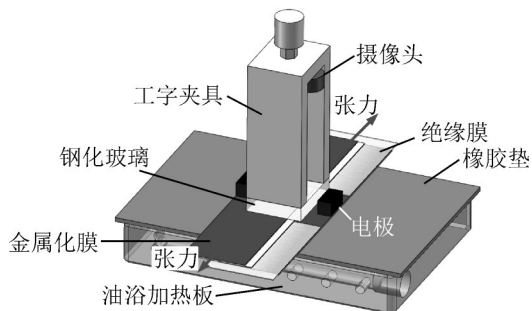


图2 实验平台温度和机械力场
Fig. 2 Temperature and mechanical force field of experimental platform



图3 实验平台实物图
Fig. 3 Physical diagram of experimental platform

1.3 原位自愈特性测试实验方法

3种应力施加顺序为卷绕张力-温度-层间压力-电场。将薄膜如图3摆放方式在平台上摆放好,用夹具夹住所有试品双向拉伸,达到指定张力后固定夹具。随后开启油浴循环器,加热15 min后,用热电偶测量下层薄膜上表面和玻璃板上表面温度,当温差小于1℃时,认为温度已稳定。控制万能拉力机横梁,通过工字夹具向薄膜施加指定压强,最后通过信号发生器配合功率放大器施加交直流复合电压。

2 实验结果分析和自愈模型

为了更符合换流阀中支撑电容器的实际运行情况,测量的数据更符合原位自愈特性,电压参数设定参考了中国长江三峡公司的仿真数据^[8],实验将直流

DC设为2.8 kV,交流分量采用1st、2nd、3rd 3种谐波等比共同混合的方式,分别为100:15:1,即直流不变,3种交流分量各自占交流总量的比例不变,改变总交流量占直流的比例,本实验设定总交流量占直流比例为1%、5%、10%、15%、20% 5种。实验选取自愈点为交直流混合电压峰值附近的自愈点,对照实验组选取相同电压值下纯直流自愈点, $DC_{mix} + AC_{mix} = DC$,在相同电压等级下进行表征对比。

2.1 交直流和层间压强的影响

面积、能量和交直流种类的关系见图4。从图4实验结果中可以看到在0.1 MPa的低压强下,自愈能量和面积都随着电压的升高而升高,能量分布于2~10 mJ,面积分布于2~10 mm²。当电压的值相同时,相比于交直流混合,纯直流下的自愈能量略微高于交直流复合,且随着交流含量的升高而升高。

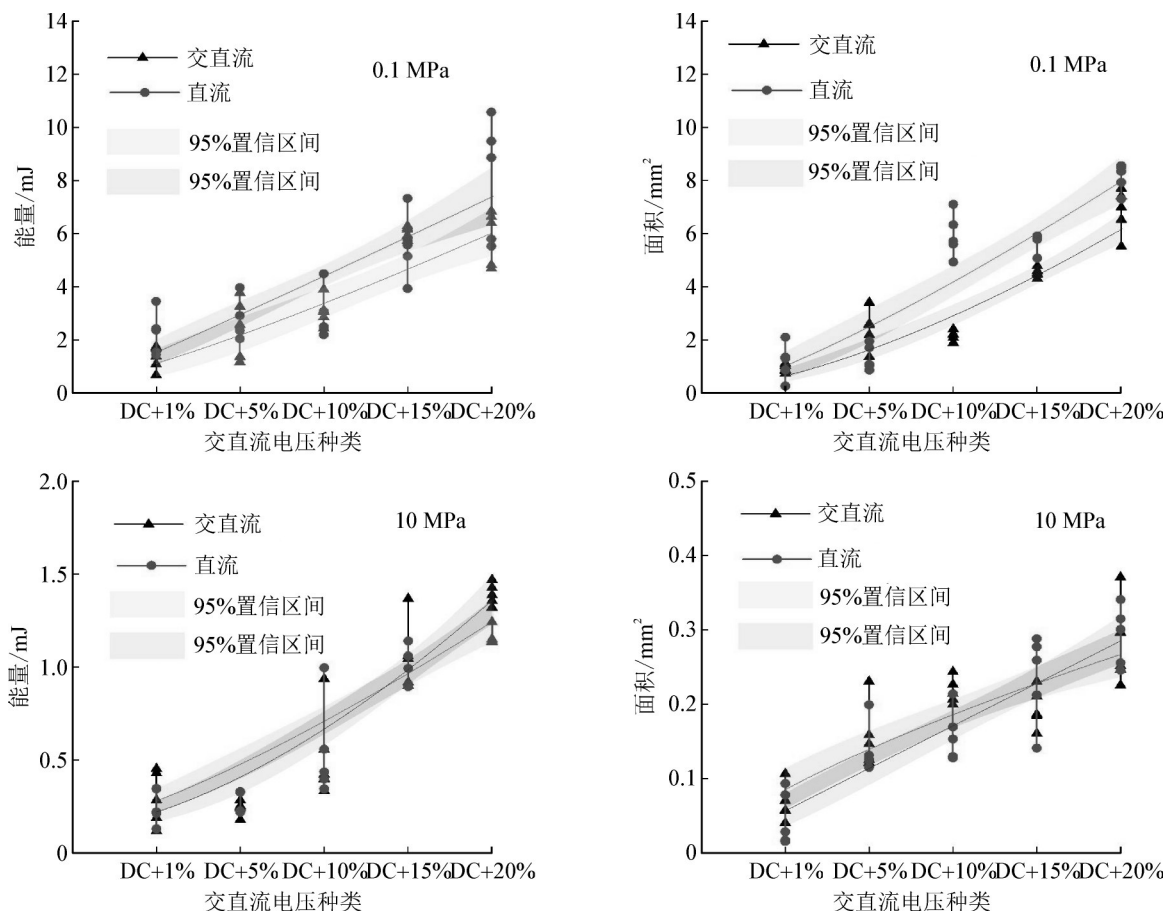


图4 面积、能量和交直流种类的关系
Fig. 4 Relationship among area, energy and AC-DC class

但是拟合曲线在数值上相差的最高值为5%,且由于自愈能量与面积存在强线性关系,自愈面积的值同样反映出在相同的电压值下,纯直流比交直流混合面积略大的特性,在交流含量最高的20%时,拟合曲线差值达到10%。这可以用界面电子注入的理论来解释^[9],由于金属化膜存在纳米级金属

层和有机聚合物介质的界面,交直流混合电压对界面电子存在抽出和注入的现象,这会对材料的本征结构造成破坏^[10],致使交直流环境下材料出现了“劣化”特性^[11],尤其是到了20%的交流值的情况下,这种“劣化”特性更加明显,导致自愈能量和面积的下降。

到了10 MPa的高压强下,自愈能量和面积大

幅减小,交直流影响几乎不体现,同电压值下交直流混合和纯直流在拟合曲线上几乎没有区别,这说明机械压强的施加减弱了电压的影响,自愈的演变规律出现了变化。

0.1 MPa 下面积和能量关系见图 5-6。当压强为 0.1 MPa 时,面积和能量呈正相关见图 5,且从拟合曲线上看,不论直流还是交直流混合,面积与能量都有很强的线性关系这从以往的文献也能看出,李化团队^[12]的研究成果证明 $S \propto W_{sh}$,这和本文在低压强下的的研究结果相同。

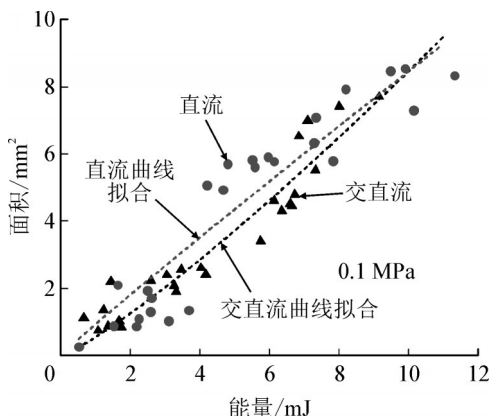


图5 0.1 MPa 下面积和能量关系

Fig. 5 Relationship between area and energy at 0.1 MPa

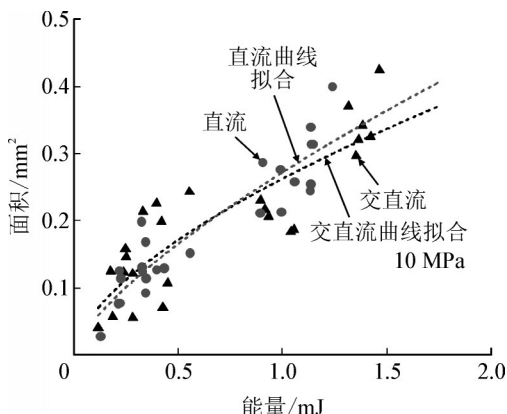


图6 10 MPa 下面积和能量关系

Fig. 6 Relationship between area and energy at 10 MPa

将能量和面积联系起来,可以看出不论在 0.1 MPa 的低压强下还是 10 MPa 的高压强下,自愈能量和面积始终呈现非常强的线性关系,这说明自愈能量决定了自愈面积的大小,而自愈面积又决定着金属化膜电容器的电容大小,决定着器件的使用寿命^[13],因此,对于电容器使用寿命的研究,应着重于自愈能量的构成和自愈行为的动态行为模式。

2.2 自愈热力学模型

建立金属化膜自愈特性的热力学模型需要先明确自愈行为的能量来源^[14],自愈的产生是由击穿

引发的电弧电流的焦耳热所决定的,故以金属层为建模对象^[15],建立热通量模型,以反应在微秒级动作下的演变过程,模型结构示意图见图 7。

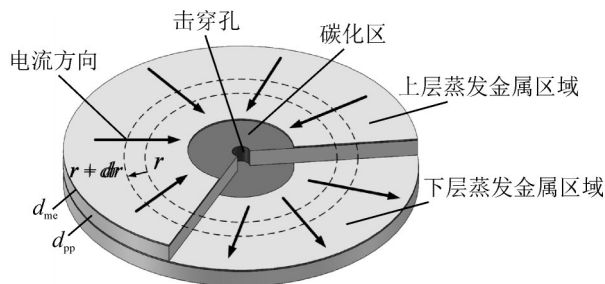


图7 自愈热力学模型

Fig. 7 Thermodynamic model of self-healing

d_{me} 和 d_{pp} 分别是金属层厚度和聚丙烯厚度,当电流流过时会有趋肤效应,趋肤深度公式为

$$\delta = (\tau / \pi \sigma_{Al}^s \mu)^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

本模型以常用金属材料铝为模型参数, σ_{Al}^s 为金属层铝的电导率, τ 为自愈持续时间, μ 为铝的磁导率,当 τ 取 $1 \mu s$ 时,电流的趋肤深度可达 $10 \mu m$,远远超过金属层的厚度 ($10 nm$),所以在金属层中电流密度是一个关于仅关于半径 r 的函数,即在同一半径下电流是均匀的。金属层辐射散热公式为

$$Q_r \sim e_r \sigma_{SB} S_{SH} \tau (T^4 - T_0^4) \quad (2)$$

式中: e_r 为金属铝的发射率; T_0 为初始温度; T 为材料所处温度; σ_{SB} 为玻尔兹曼常数,热辐射散热能量 Q_r 远小于自愈能量 W_{SH} ,故忽略不计,所以自愈热力学模型公式为

$$k_{pp} \nabla^2(T) - h [d_{me} \rho_{Al} C_p]^{-1} (T - T_0) + [4\pi^2 \sigma^s d_{me}^2 \rho_{Al} C_p r^2]^{-1} I^2(t) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (3)$$

式中: k_{pp} 为聚丙烯传热系数; h 为对外界散热系数; d_{me} 为金属层厚度; ρ_{Al} 为金属铝密度; C_p 为金属铝热容; r 为积分假设圆环半径; $I(t)$ 为自愈电流。

金属层传导传热半径公式为

$$r \cong (k_{me} \tau)^{1/2} \quad (4)$$

式(4)是一个关于时间 τ 的函数, τ 在本文中定义为自愈持续时间,铝的导热系数 $k_{me} = 8.61 \times 10^{-5} m^2 \cdot s^{-1}$,自愈持续时间 τ 约为 $10 \mu s$,计算出传热半径约为 $100 \mu m$,这个传热半径相较于自愈半径 (mm 级别)而言可略去,故自愈热力学模型中金属层的热传导忽略不计,聚丙烯介质的热传导由于聚丙烯的导热系数为 $k_{pp} = 1.2 \times 10^{-7} m^2 \cdot s^{-1}$,远远小于金属层的传热速度,故聚丙烯的热传导忽略不计。

金属层对外界泄漏散热,这是热力学模型的第

二项^[16],此项对外散热为自愈现象结束后对外界的热量流失, h 为空气散热系数约为 $100 \text{ J} \cdot (\text{sm}^2\text{k})^{-1}$, d_{me} 约为 100 nm , $\rho_{\text{Al}} C_p$ 约为 $2.38 \times 10^6 \text{ J} \cdot (\text{sm}^2\text{k})^{-1}$,但是作用时长时间需要约为 $200 \mu\text{s}$,远远长于自愈持续时间(数十微秒),故忽略不计。以上对模型的修改,最终将自愈热力学模型简化为只有焦耳热的产生和消耗,公式为

$$\left[4\pi^2 \sigma^s d_{\text{me}}^2 \rho_{\text{Al}} C_p r^2\right]^{-1} I^2(t) = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (5)$$

模型计算如下,可得

$$\left[4\pi^2 \sigma_{\text{Al}}^s d_{\text{me}}^2 \rho_{\text{Al}} C_p\right]^{-1} \int_0^{t_m} I^2(t) dt = (T_m^* - T_0) r^2 \quad (6)$$

式中: C_p^s 和 ρ_{Al}^s 为固态铝密度和热容, T_m 为铝熔点,第一阶段由于需要考虑金属从固态到液态的相变潜热,故提出等效液化温度 $T_m^* : T_m^* = T_{\text{Al}} + L_m / C_p^s$ ^[17], L_m 是金属从固态到液态相变潜热, T_0 是初始温度, t_m 是金属层由固态转化为液态的时间, σ_{Al}^s 是一个固态铝电导率,是一个关于温度的函数,表达式为

$$\sigma_{\text{Al}}^s(T) = \sigma_{\text{Al}}^s(T_0) [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (7)$$

式中: α 是系数,其值为 $5 \times 10^{-3} \text{ K}^{-1}$,为简化计算将电阻率定为 T_0 至 T_m 的均值记为 $\overline{\sigma_{\text{Al}}^s}$ 。

第二阶段为金属从液态到气态的过程,公式为

$$\left[4\pi^2 \sigma_{\text{Al}}^l d_{\text{me}}^2 \rho_{\text{Al}} C_p^l\right]^{-1} \int_{t_m}^{\tau} I^2(t) dt = (T_v^* - T_m^*) r^2 \quad (8)$$

式中: C_p^l 和 ρ_{Al}^l 为液态铝密度和热容; t_m 为液化铝的时间; T_v 为液态铝的气化温度,由于有金属相变,必然存在有潜热,因此等效的气化温度为 T_v^* , $T_v^* = T_m + L_v / C_p^l$, L_v 是金属从液态到气态的潜热,同理,液态金属铝的电导率公式为

$$\sigma_{\text{Al}}^l(T) = \sigma_{\text{Al}}^l(T_m) [1 + \beta(T - T_m)] \quad (9)$$

为简化计算,液态下金属铝的电导率取 T_m 至 T_v 的均值,记为 σ_{Al}^l 。

将等式进行变换如下:

$$r^2 = \frac{\left[4\pi^2 \sigma_{\text{Al}}^l d_{\text{me}}^2 \rho_{\text{Al}} C_p^l\right]^{-1} \int_{t_m}^{\tau} I^2(t) dt}{T_v^* - T_m^*} \quad (10)$$

$$\int_{t_m}^{\tau} I^2(t) dt = \int_0^{\tau} I^2(t) dt - \int_0^{t_m} I^2(t) dt \quad (11)$$

自愈面积 S_{SH} 表达式为

$$S_{\text{SH}} = \pi r^2 = \pi \frac{\left[4\pi^2 \sigma_{\text{Al}}^l d_{\text{me}}^2 \rho_{\text{Al}} C_p^l\right]^{-1} \int_0^{\tau} I^2(t) dt}{T_v^* - T_m^* + \frac{\sigma_{\text{Al}}^l \rho_{\text{Al}}^l C_p^l}{\sigma_{\text{Al}}^s \rho_{\text{Al}}^s C_p^s} (T_m^* - T_0)}$$

由最终表达式可知 S_{SH} 最终是关于 $\int_0^{\tau} I^2(t) dt$ 的一个正相关函数,模型所有参数取值罗列见表 1。

表 1 模型参数
Table 1 Model parameter

参数	取值
d_{me}/m	10×10^{-9}
d_{pp}/m	5.8×10^{-6}
$\sigma_{\text{Al}}^s(T_0)/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	3.5×10^7
$\sigma_{\text{Al}}^l(T_m)/(\text{S} \cdot \text{m}^{-1})$	0.6×10^7
$\mu/(\text{B} \cdot \text{H}^{-1})$	1
e_r	0.02
T_0/K	298
$\sigma_{\text{SB}}/\text{k}_\text{B}$	1.3×10^{-23}
$k_{\text{pp}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	1.2×10^{-7}
$h/\text{J} \cdot (\text{S} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{K})^{-1}$	100
$k_{\text{me}}/(\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1})$	8.6×10^{-5}
$C_p^s/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	880
$\rho_{\text{Al}}^s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2702
T_m/K	933
$L_m/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	3.9×10^5
α/K^{-1}	5×10^{-3}
β/K^{-1}	4.6×10^{-4}
$C_p^l/\text{J} \cdot (\text{kg} \cdot \text{K})^{-1}$	1 086
$\rho_{\text{Al}}^l/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-3})$	2 373
T_v/K	2 740
$L_v/(\text{J} \cdot \text{kg}^{-1})$	1×10^7

将参数代入模型计算,并选取两种层间压强对应实验数值进行对比,见图 8-9。

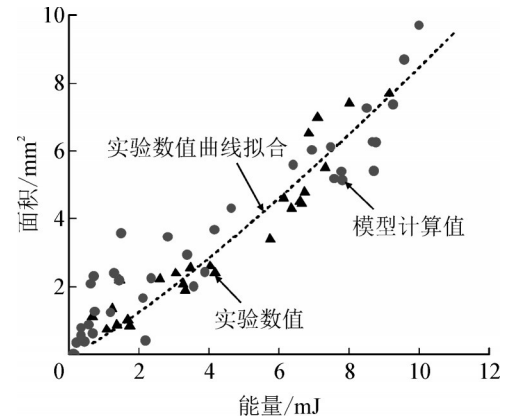


图 8 0.1 MPa 下实验与模型计算
Fig. 8 Experimental and model calculation at 0.1 MPa

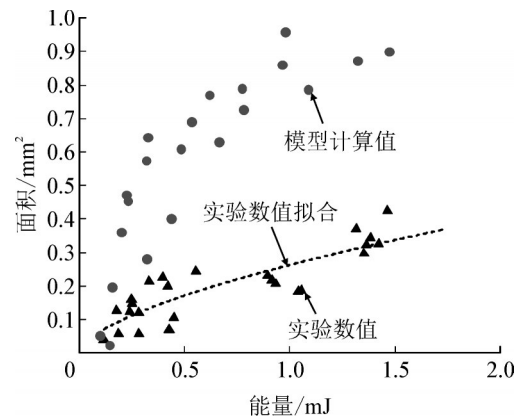


图 9 10 MPa 下实验与模型计算
Fig. 9 Experimental and model calculation at 10 MPa

通过上图结果可知,本文建立的自愈热力学模型在低压强下与实验结果相吻合,基本服从线性正比关系,印证了模型的可靠性,并从自愈热力学行为上证明在低压强下自愈的面积主要由焦耳热决定^[18-20]。但是在10 MPa高压强下,模型仿真结果与实验偏差较大,且模型不符合能量与面积的线性关系,这说明在高压强下自愈面积与焦耳热的关系出现了变化,压强的施加影响了焦耳热^[21-26],并进一步影响到自愈的行为模式,导致自愈面积和能量的关系出现了变化,后续需要考虑高压强下自愈模型的改进。

3 结语

1)在0.1 MPa压强、相同电压等级下,直流电压下的自愈能量和面积比交直流混合的自愈能量和面积略大,差值随着交流含量的升高而升高。

2)在10 MPa压强下,由于机械应力的介入,自愈能量和面积大幅减小,且电压种类的影响可忽略不计。

3)不论在0.1 MPa下还是10 MPa下,自愈面积和自愈能量存在非常强的线性正相关性。

4)自愈热力学模型在0.1 MPa下有非常好的仿真结果,但是在10 MPa高压强下和实验测量数据相差很较大,对于在高压强下的自愈模型仍需要改进。

参考文献

- [1] 雷万钧,刘进军,吕高泰,等.大容量电力电子装备关键器件及系统可靠性综合分析与评估方法综述[J].高电压技术,2020,46(10):3353-3361.
LEI Wanjun, LIU Jinjun, LYU Gaotai, et al. Review of reliability comprehensive analysis and evaluation methods for key components and system of large capacity power electronic equipment[J]. High Voltage Engineering, 2020, 46(10):3353-3361.
- [2] ZHANG Y, FENG Q, ZHONG S, et al. Theoretical connection from the dielectric constant of films to the capacitance of capacitors under high temperature[J]. High Voltage, 2023.
- [3] 戴志辉,刘宁宁,何永兴,等.基于直流滤波环节暂态能量比的高压直流线路纵联保护[J].电工技术学报,2020,35(9):1985-1998.
DAI Zhihui, LIU Ningning, HE Yongxing, et al. A pilot protection for HVDC transmission lines based on the ratio of DC filter link transient energy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(9):1985-1998.
- [4] LI Z, LI H, QIU T, et al. Reliability criterion of film capacitor based on moisture diffusion in encapsulation[J]. High Voltage, 2023, 8(6):1242-1252.
- [5] 何晓靓,高琪,刘水平,等.大容量柔性直流输电工程用直流支撑电容器技术研究[J].电力电容器与无功补偿,2020,41(4):81-85.
HE Xiaoliang, GAO Qi, LIU Shuiping, et al. Study on DC support capacitor technology for high power flexible DC transmission project[J]. Power Capacitor & Reactive Power Compensation, 2020, 41(4):81-85.
- [6] 杜一鸣,潘亮,祝令瑜,等.金属化膜电容器交流和直流电压劣化特性分析[J].电力工程技术,2020,39(6):151-158.
DU Yiming, PAN Liang, ZHU Lingyu, et al. AC and DC voltage degradation characteristics of metallized film capacitors[J]. Jiangsu Electrical Engineering, 2020, 39(6):151-158.
- [7] 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.
- [8] TORTAI J H, BONIFACI N, DENAT A, et al. Self-healing of aluminium metallized polypropylene films: a spectroscopic investigation[C]//Proceedings of 2002 IEEE 14th International Conference on Dielectric Liquids. ICDL 2002 (Cat. No. 02CH37319). [S. l.]: IEEE, 2002:190-193.
- [9] LAHTI K, RYTÖLUOTO. 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: a Publication of the IEEE Dielectrics and Electrical Insulation Society, 2015, 22(2):689-700.
- [10] KAMMERMAIER J, RITTMAYER G, BIRKLE S. Modeling of plasma-induced self-healing in organic dielectrics[J]. Journal of Applied Physics, 2020, 39(6):151-158.
- [11] LI Zhiwei, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime improvement of metallized film capacitors by inner pressure strengthening[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2013, 41(10):3063-3068.
- [12] 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 lifetime prediction of metallized film capacitors under DC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(7):2929-2937.
- [13] CHEN Yaohong, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Effect of interlayer air on performance of dry-type metalized film capacitor in DC, AC and pulsed applications[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(4):1301-1306.
- [14] LI Hua, CHEN Yaohong, LIN Fuchang, et al. The capacitance loss mechanism of metallized film capacitor under

- pulsed discharge condition[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(6):2089-2094.
- [15] LI Haoyuan, LI Hua, LI Zhiwei, et al. Temperature dependence of self-healing characteristics of metallized polypropylene film[J]. Microelectronics Reliability, 2015, 55(12): 2721-2726.
- [16] LI Zhiwei, LI Hua, HUANG Xiang, et al. Temperature rise of metallized film capacitors in repetitive pulse applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2015, 43(6): 2038-2045.
- [17] 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, 2023.
- [18] LI Zhiwei, LI Hua, LIN Fuchang, et al. Lifetime investigation and prediction of metallized polypropylene film capacitors[J]. Microelectronics Reliability, 2013, 53(12): 1962-1967.
- [19] 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.
- 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.
- [20] 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.
- [21] WANG Tianyu, LIU Cheng, LI Dayu, et al. Nano ZnO/epoxy coating to promote surface charge dissipation on insulators in DC gas-insulated systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(4): 1322-1329.
- [22] WANG Tianyu, LI Xiaofen, ZHANG Boya, et al. Basic reason for the accumulation of charge on the surface of polymer dielectrics[J]. Science China Materials, 2022, 65(10): 2884-2888.
- [23] WANG T Y, LI X F, JIE Z, et al. Polymer dielectrics with outstanding dielectric characteristics via passivation with Oxygen atoms through C-F vacancy carbonylation[J]. Nano Letters, 2023, 23(18): 8808-8815.
- [24] WANG Tianyu, LI Xiaofen, LIU Shuming, et al. Self-assembled wide bandgap nanocoatings enabled outstanding dielectric characteristics in the sandwich-like structure polymer composites[J]. Nano Converge, 2022, 9(1): 55.
- [25] WANG Tianyu, ZHANG Guixin, LI Dayu, et al. Mxene-doped epoxy resin to suppress surface charge accumulation on insulators in a DC gas-insulated system[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2020, 27(3): 939-946.
- [26] YANG Zhihui, HU Penghao, WANG Sijiao, et al. Effect of nano-fillers distribution on the nonlinear conductivity and space charge behavior in SiC/PDMS composites[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(3): 1735-1742.

作者简介:

吴致远(1998—),男,博士生,研究方向为金属化膜电容器。E-mail: 120222101031@ncepu.edu.cn。

党智敏(1969—),男,教授,研究方向为先进能源电工材料与器件。

王伟(1969—),男,教授,研究方向为高电压与绝缘技术。