

金属化膜自愈过程的建模与仿真

齐红斌, 吴致远, 戴亚妮, 刘尚书, 刘靖舟, 王 伟

(华北电力大学 高电压与电磁兼容北京重点实验室, 北京 102206)

摘要:金属化聚丙烯膜电容器具有工作可靠性高、可自愈、低介质损耗等特点,然而其在工作过程中需要长期承受强直流电场和高温热场的联合作用,致使聚丙烯电介质薄膜内部容易积累空间电荷,导致其电气绝缘性能退化失效。本文搭建了金属化聚丙烯薄膜自愈模型,通过金属层蒸发模型研究不同自愈发展时间和外施电压下自愈点的自愈面积变化,并利用双极性载流子输运模型研究不同自愈发展时间、外施电压和温度下放电通道内的空间电荷密度变化,以此探究金属化薄膜自愈的微观机理。结果表明:金属化膜金属层蒸发面积与自愈发展时间呈现线性关系;随着外施直流电压和温度的升高,放电通道内部的电荷迁移过程加强,放电通道内部的电子和空穴更容易发生迁移并与相反极性的电荷发生复合;并且随着自愈过程的进行,注入放电通道中的电荷数量逐渐增多,电荷向放电通道两端迁移的行为加剧,造成放电通道内部的电势分布不均匀,放电通道内会发生电场畸变。

关键词:金属化膜电容器;空间电荷;自愈面积;聚丙烯;双极性载流子

Modeling and simulation on self-healing process of metallized film

QI Hongbin, WU Zhiyuan, DAI Yani, LIU Shangshu, LIU Jingzhou, WANG Wei

(Beijing Key Laboratory of High Voltage & Electromagnetic Compatibility, North China Electric Power University, Beijing 102206, China)

Abstract: Metallized polypropylene film capacitor has the characteristics of high reliability, self-healing, and low dielectric loss. However, it needs to withstand the combined action of strong direct current electric field and high temperature thermal field for a long time during the working process, which makes the space charge easy to accumulate inside the polypropylene dielectric film, resulting in the degradation of its electrical insulating properties. A self-healing model of metallized polypropylene film was established in this paper. The changes of self-healing area at the self-healing point under different self-healing development time and applied voltage were studied through the evaporation model of metal layer, and the changes of space charge density in the discharge channel under different self-healing development time, applied voltage, and temperature were studied by using the bipolar carrier transport model, so as to explore the microscopic mechanism of self-healing of metallized polypropylene film. The results show that there is a linear relationship between the evaporation area of metallized film and the self-healing development time. With the increase of the applied DC voltage and temperature, the charge migration process in discharge channel strengthens, and the electrons and holes in discharge channel are more likely to migrate and recombine with the charges of opposite polarity. With the self-healing process progresses, the charge amount injected into the discharge channel increases gradually, and the migration of charge to both ends of the discharge channel intensifies, resulting in uneven potential distribution in discharge channel and the electric field will distort in discharge channel.

Key words: metallized film capacitor; space charge; self-healing area; polypropylene; bipolar carrier

0 引言

电能存储是实现电能控制和转换的关键技术,在现代工业和国防领域中起着重要作用,其中高性能储能器件的开发是电能存储的基础^[1]。在目前广泛研究的储能器件中,金属化聚丙烯薄膜电容器具

有工作可靠性高、储能密度高等特点,是脉冲功率技术的关键器件,也是直流输电系统换流阀厅的关键设备之一^[2-3]。但金属化聚丙烯薄膜电容器在工作中要长期承受强直流电场、高温热场的联合作用,致使聚丙烯薄膜介质内部容易积累空间电荷,导致局部场强畸变^[4],使材料老化甚至发生击穿现象,最终导致其电气绝缘性能退化而失效。

基金项目:国家重点研发计划项目(2021YFB2401503)。

金属化聚丙烯薄膜电容器具备自愈能力,能够在发生击穿的情况下恢复绝缘并继续工作。因此,将金属化膜电容器应用在电力系统中,能够减少事故的发生,提高电力系统的安全可靠性^[5-6]。金属化膜电容器的自愈原理如图1所示,当电弱点处电介质被击穿时形成放电通道,大量电荷流经该通道形成较大电流并产生焦耳热,使得局部温度升高直至超过金属层的沸点,导致该点周围的金属层受热蒸发并不断外扩,随着蒸发面积的扩大,等离子体放电电弧在难以维持时将会熄灭,使电容器恢复绝缘并仍能继续正常工作^[7-8]。

章妙^[5]建立了金属化膜自愈过程的热学等效模型,能够定量分析自愈过程中金属层蒸发面积与电流焦耳热的关系,但模型忽略了铝层散发的辐射热损失和在铝层与聚丙烯膜之间的热扩散,将金属层蒸发过程分为了两个阶段:熔化阶段和气化阶段。根据此热学等效模型推导出的自愈面积理论计算值能反映实际值的变化趋势,即自愈能量与自愈面积呈现正相关。V BELKO等^[9]认为金属化膜的自愈过程可以表示为电容对内部有源电阻 R_{SH} 的放电,认为金属层的清除面积与金属化膜自愈过程中耗散的能量成正比。陈驰等^[10]基于双极性载流子输运模型从俘获系数和陷阱密度微观角度对交联聚乙烯试样中空间电荷的分布展开了研究分析,文中忽略了杂质的电离因素,假设由金属电极向交联聚乙烯试样内部注入全部的载流子。

目前对于金属化膜自愈过程的研究更多是针对宏观自愈特性的研究,例如金属化膜电容器的工作电压和层间压强对自愈特性的影响^[7,11-13],而对于金属化膜电容器自愈微观机理和自愈过程建模仿真的研究还不够深入和全面,尤其是对于自愈过程中放电通道的形成和发展更是鲜有报道。同时自愈性能作为金属化膜电容器最为重要的电气性能之一,对于微观角度自愈过程中金属层蒸发和放电通道形成的建模工作,以及如何从空间电荷密度的角度去解释放电通道的形成和发展等问题都还缺少研究论证。本文利用COMSOL仿真软件搭建金属化聚丙烯膜自愈时的金属层蒸发模型和放电通道模型,通过金属层蒸发模型研究不同条件下自愈点在自愈过程中的自愈面积变化,并利用双极性载流子输运模型研究放电通道内的空间电荷密度变化,以此探究金属化膜自愈的微观机理。

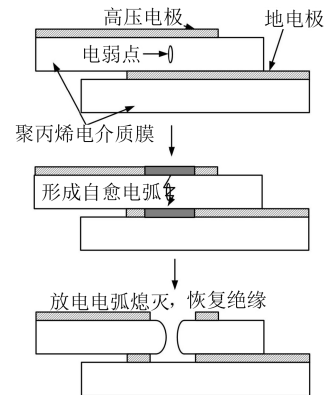


图1 金属化聚丙烯薄膜电容器自愈示意图

Fig.1 Self-healing diagram of metallized polypropylene film capacitor

1 金属化膜自愈模型的建立

1.1 强电场下的金属层蒸发

金属化膜电容器的自愈过程持续时间很短,为微秒级,并且自愈发生金属化膜电容器内部,不宜观察,因此在金属化膜自愈试验中采用两层金属化膜叠加的方式来近似替代金属化膜电容器的内部结构,两层金属层加中间的聚丙烯电介质材料构成一个电容器。金属化膜自愈试验是在上层金属化膜的金属电极上进行加压,当电场强度达到一定值时,电弱点处率先发生电离,由此产生的正负电荷在电场的作用下分别向两极移动^[14-15]。随着电场强度的增大,空间电荷的碰撞电离过程也会逐渐加剧,电子将具有足够的动能从金属表面逸出,在电极之间形成放电通道,将聚丙烯薄膜击穿并产生脉冲电流。当电流足够大时,金属层受到电流的焦耳热效应作用,随着温度的升高而被气化成金属蒸气,造成金属层蒸发^[16-18]。

金属化聚丙烯薄膜所蒸镀的金属层材料成分主要为铝,铝在2 600 K时达到沸点开始气化^[19],因此金属层的温度分布可以展现不同时刻金属层的蒸发面积,金属层的蒸发面积即为自愈点的自愈面积。在计算时,铝层散发的辐射热损失和在铝层与聚丙烯薄膜中的热扩散可以忽略,铝层受热蒸发公式如式(1)所示。

$$\left[4\pi^2\sigma_s d^2 \rho c_p r^2\right]^{-1} I(t)^2 = \frac{\partial T}{\partial t} \quad (1)$$

式(1)中: σ_s 表示金属铝的电导率, $\Omega \cdot \text{mm}^2/\text{m}$; ρ 表示金属铝的电阻率, $\Omega \cdot \text{mm}$; c_p 表示金属铝的比热容, $\text{J}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$; r 表示铝层的蒸发半径, mm ; d 表示金属层厚度, nm ; t 表示自愈发展时间, μs ; T 表示金属层温

度, $K: I(t)$ 表示流过金属层的电流, A。

1.2 聚丙烯电介质薄膜放电通道中的电荷输运

1.2.1 双极性载流子输运模型

本文通过双极性载流子输运模型来模拟聚丙烯电介质薄膜放电通道内部的电荷运动。双极性载流子输运模型认为材料中存在自由电子、自由空穴、陷阱电子和陷阱空穴4种类型的电荷^[20-22], 双极性特征表明材料内部载流子主要来自电极的注入, 即阳极注入空穴、抽出电子; 阴极注入电子、抽出空穴。双极性载流子输运模型如图2所示, 在外电场作用下, 放电通道内部的自由电子、自由空穴、陷阱电子和陷阱空穴4种载流子会在聚丙烯薄膜的表面聚集并向介质内部发生迁移、入陷、脱陷和复合^[21-24]。

1.2.2 载流子的注入、抽出和输运

当外施电场强度达到 100 MV/m 及以上时, 电荷的注入方式采用场致发射注入^[1]。在高电场作用下, 电荷注入势垒降低, 载流子容易获得比较高的能量去克服势垒注入到介质内部。阴极和阳极分别注入电子和空穴的电流密度方程如式(2)、式(3)所示。

$$J_{ic}(d, t) = \frac{me^3 E^2(d, t)}{8\pi h m_{oc} \phi_{ic}} \exp\left(-\frac{8\pi \sqrt{2m\phi_{ic}^3}}{3ehE(d, t)}\right) \quad (2)$$

$$J_{ih}(0, t) = \frac{me^3 E^2(0, t)}{8\pi h m_{oh} \phi_{ih}} \exp\left(-\frac{8\pi \sqrt{2m\phi_{ih}^3}}{3ehE(0, t)}\right) \quad (3)$$

式(2)~(3)中: J_{ic} 和 J_{ih} 分别为电子和空穴的注入电流密度; ϕ_{ic} 和 ϕ_{ih} 为电子和空穴的注入势垒; $E(0, t)$ 为 t 时刻阳极电场强度; $E(d, t)$ 为 t 时刻阴极电场强度; e 为电子电荷; h 为普朗克常数; m 为电子的静止质量; m_{oc} 和 m_{oh} 分别为电子和空穴的有效质量。

当载流子经由电极注入后, 在外施电场的作用下沿放电通道方向做迁移运动, 载流子需要克服一定的界面势垒, 最终才可以在对侧电极处抽出。利用抽出系数 C_e 和 C_h 分别表示界面对电子和空穴的阻挡, 电荷抽出方程如式(4)~(5)所示。

$$J_h(d, t) = C_h \cdot \mu_h \cdot q_{hu}(d, t) \cdot E(d, t) \quad (4)$$

$$J_e(0, t) = C_e \cdot \mu_e \cdot q_{eu}(0, t) \cdot E(0, t) \quad (5)$$

式(4)~(5)中: $J_e(0, t)$ 和 $J_h(d, t)$ 分别为电子和空穴抽出形成的电流密度; C_e 和 C_h 分别为电子和空穴在电极处的抽出系数; μ_e 和 μ_h 分别为电子和空穴载流子的迁移速率, $m^2/(V \cdot s)$; n_{eu} 和 n_{hu} 分别为电子和空穴载流子密度; $q_{eu}(0, t)$ 是 t 时刻阳极自由电子密度, C/m^3 ; $q_{hu}(d, t)$ 是 t 时刻阴极自由空穴密度, C/m^3 。

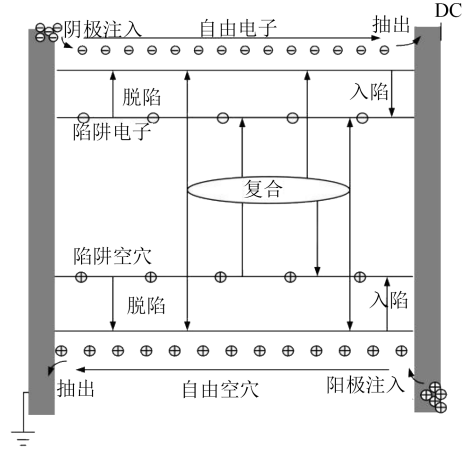


图2 双极性载流子输运模型

Fig.2 Bipolar carrier transport model

当载流子经由电极注入到聚丙烯薄膜后, 可以使用对流-扩散方程描述载流子在聚丙烯薄膜放电通道内部的迁移, 如式(6)所示; 使用电流连续方程描述空间电荷在放电通道内部的分布情况, 如式(7)所示; 使用泊松方程描述放电通道内部电场的变化, 如式(8)所示。以上3个方程用于指导聚丙烯薄膜放电通道内部的电荷输运行为^[21-25]。

$$J_a(x, t) = q_a(x, t) \mu_a E(x, t) - D_a \nabla q_a(x, t) \quad (6)$$

$$\frac{\partial q_a(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial J_a(x, t)}{\partial t} = S_a(x, t) \quad (7)$$

$$\frac{\partial E(x, t)}{\partial t} = \frac{q_v}{\epsilon_0 \epsilon_r} \quad (8)$$

式(6)~(8)中: $J_a(x, t)$ 表示单位体积内的电流密度, 其中 a 代表电荷种类, 分别为自由电子、自由空穴、入陷电子和入陷空穴, A/m^2 ; $q_a(x, t)$ 为单位体积内电荷量密度, C/m^3 ; $S_a(x, t)$ 为各类电荷粒子源项; $E(x, t)$ 为聚丙烯薄膜内部 x 位置处于 t 时刻的电场强度, kV/mm ; q_v 表示聚丙烯薄膜内部中的空间电荷密度, C/m^3 ; ϵ_0 为真空介电常数; ϵ_r 为相对介电常数; D_a 代表扩散系数; μ_a 为各类电荷粒子的迁移率, $m^2/(V \cdot s)$ 。

在电荷迁移的过程中, 电荷会经历入陷、脱陷和复合过程, 并导致各类电荷密度发生变化。式(9)~(12)描述了自由电子源项 S_{eu} 、自由空穴源项 S_{hu} 、陷阱电子源项 S_{et} 和陷阱空穴源项 S_{ht} 的变化。

$$S_{eu} = -R_1 \cdot q_{ht} \cdot q_{eu} - R_3 \cdot q_{hu} \cdot q_{eu} - B_e \cdot q_{eu} \cdot \left(1 - \frac{q_{et}}{q_{oet}}\right) + \Gamma_e \cdot q_{et} \quad (9)$$

$$S_{hu} = -R_2 \cdot q_{et} \cdot q_{hu} - R_3 \cdot q_{hu} \cdot q_{eu} - B_h \cdot q_{hu} \cdot \left(1 - \frac{q_{ht}}{q_{ohh}}\right) + \Gamma_h \cdot q_{ht} \quad (10)$$

$$S_{\text{ct}} = -R_2 \cdot q_{\text{hu}} \cdot q_{\text{ct}} - R_0 \cdot q_{\text{ht}} \cdot q_{\text{ct}} + B_c \cdot q_{\text{eu}} \cdot \left(1 - \frac{q_{\text{ct}}}{q_{0\text{ct}}}\right) - \Gamma_c \cdot q_{\text{ct}} \quad (11)$$

$$S_{\text{ht}} = -R_1 \cdot q_{\text{ht}} \cdot q_{\text{eu}} - R_0 \cdot q_{\text{ht}} \cdot q_{\text{ct}} + B_h \cdot q_{\text{hu}} \cdot \left(1 - \frac{q_{\text{ht}}}{q_{0\text{ht}}}\right) - \Gamma_h \cdot q_{\text{ht}} \quad (12)$$

式(9)~(12)中: R_0 、 R_1 、 R_2 和 R_3 分别为不同状态下电子与空穴之间的复合系数; B_c 和 B_h 为自由电子和自由空穴的入陷系数; Γ_c 和 Γ_h 为陷阱电子和陷阱空穴的脱陷系数; $q_{0\text{ct}}$ 和 $q_{0\text{ht}}$ 为电子和空穴的陷阱密度。

式(13)和式(14)描述了已经入陷的电子和空穴脱离陷阱、恢复自由迁移行为的能力; q_{eu} 、 q_{hu} 、 q_{ct} 和 q_{ht} 分别表示单位体积内自由电子、自由空穴、入陷电子和入陷空穴。

$$D_c(x, t) = v \cdot \exp\left(\frac{-\Psi_{\text{ct}}}{k_B T}\right) \quad (13)$$

$$D_h(x, t) = v \cdot \exp\left(\frac{-\Psi_{\text{ht}}}{k_B T}\right) \quad (14)$$

式(13)~(14)中: D_c 和 D_h 为脱陷系数,代表已经入陷的电子和空穴脱离陷阱、恢复自由迁移行为的能力; v 为陷阱电子和陷阱空穴的逃逸频率; Ψ_{ct} 和 Ψ_{ht} 为陷阱电子和陷阱空穴的脱陷势垒; T 为温度,K。

1.3 仿真参数设置

利用COMSOL仿真软件中的电磁热耦合模块,对金属化聚丙烯薄膜自愈过程中的金属层蒸发部分进行建模仿真,考虑到击穿点半径和自愈点半径的比值极小,研究时将自愈点的形状视为圆盘形。在放电通道内进行空间电荷分布仿真时,由于金属层热辐射散热能量和金属层对聚丙烯介质的热传导可以忽略不计^[5],可以将聚丙烯薄膜放电通道看作一个绝热圆柱体,考虑到实际试样中聚丙烯薄膜厚度最大只有6 μm ,放电通道半径与聚丙烯薄膜厚度的比值非常小。因此,在研究聚丙烯薄膜厚度方向上的放电通道内空间电荷特性时,建立沿聚丙烯薄膜厚度方向的一维仿真模型,将自愈实验数据中的自愈电压时变函数作为放电通道内所施加的直流电压,厚度为6 μm ,其中0 μm 处为阳极,6 μm 处为阴极。本文选取的仿真参数如表1所示。

2 结果与讨论

2.1 自愈发展时间对金属层蒸发面积的影响

在外施直流电压为3 kV的情况下,随着施压时间的推移,金属化聚丙烯薄膜的金属层逐渐气化蒸发。图3为不同自愈发展时间金属化聚丙烯薄膜的

表1 空间电荷仿真参数设置

Table 1 Parameter setting for the simulation of space charge

参数	数值	参数	数值
$\sigma_s/(\Omega\cdot\text{mm}^2/\text{m})$	0.026	$\mu_c/(\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s}))$	2×10^{-14}
$\rho/(\Omega\cdot\text{mm})$	2.83×10^{-5}	$\mu_h/(\text{m}^2/(\text{V}\cdot\text{s}))$	1×10^{-14}
$c_p/(\text{J}/\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$	0.88×10^3	$B_{e/h}/(\text{s}^{-1})$	0.1,0.1
$\varphi_{ie/h}/\text{eV}$	1.295, 1.300	C_c	0.7
$R_0/(\text{m}^3/(\text{C}\cdot\text{s}))$	1×10^{-5}	C_h	0.9
$R_1/(\text{m}^3/(\text{C}\cdot\text{s}))$	1×10^{-5}	$q_{0\text{euht}}/(\text{C}/\text{m}^3)$	100
$R_2/(\text{m}^3/(\text{C}\cdot\text{s}))$	1×10^{-5}	ϵ_r	2.3
$R_3/(\text{m}^3/(\text{C}\cdot\text{s}))$	0	T/K	298
$v/(\text{s}^{-1})$	6×10^{12}	$\Psi_{\text{ct,ht}}/\text{eV}$	0.90, 0.90

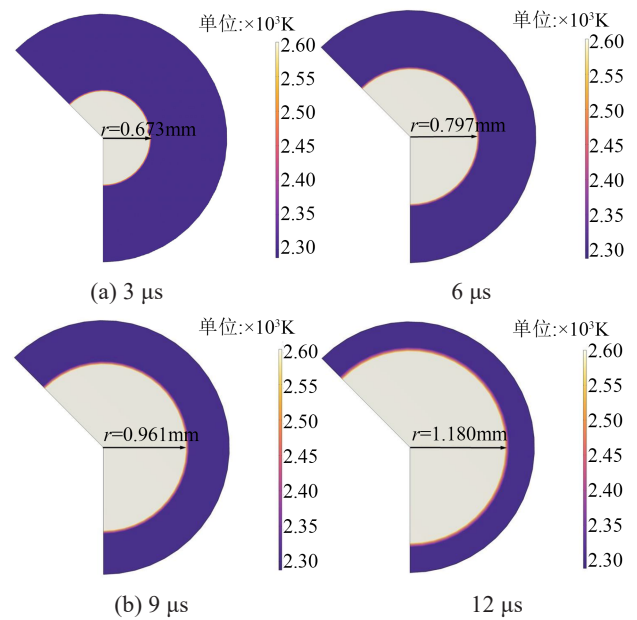


图3 不同自愈发展时间金属化聚丙烯薄膜表面温度分布

Fig.3 Surface temperature distribution of metallized polypropylene film with different self-healing development time

表面温度分布,图中浅灰色部分代表温度大于2 600 K,是金属层蒸发面积,即自愈点的自愈面积。从图3可以看出,在自愈发展时间为3、6、9、12 μs 时,金属层的蒸发半径分别为0.673、0.797、0.961、1.180 mm。

图4为金属层蒸发面积随自愈发展时间的变化规律,随着自愈过程的发展,电流脉冲的热作用使得金属化薄膜的金属层承受大量的焦耳热,金属层受热蒸发,自愈面积会逐渐扩大。从图4可以看出,自愈面积的发展在整个自愈过程中是较为平稳的,与自愈发展时间基本呈现线性关系。

2.2 外施直流电压对金属层蒸发面积的影响

利用COMSOL仿真软件设置外施直流电压分

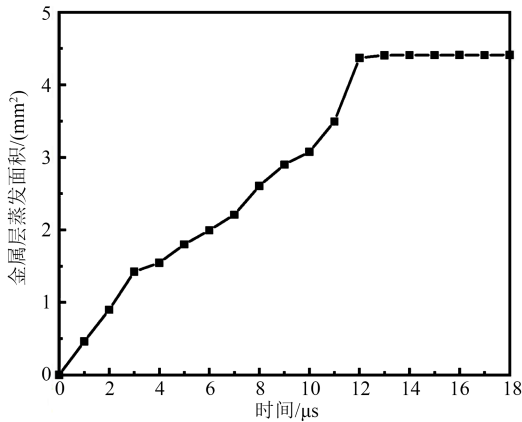


图4 自愈发展过程中的金属层蒸发面积变化

Fig.4 Change of evaporation area of metal layer in the process of self-healing development

别为2.0、2.5、3.0、3.5 kV，随着施压时间的推移，金属化聚丙烯薄膜的金属层逐渐气化蒸发，根据仿真结果中金属化膜表面的温度分布，可以得到自愈完成后金属层的蒸发面积，结果如图5所示。从图5可以看出，在外施直流电压为2.0、2.5、3.0、3.5 kV时，自愈结束后金属层的蒸发半径分别为0.885、1.040、1.169、1.280 mm。

从图5(d)可以看出，外施直流电压为3.5 kV时，自愈点的金属层蒸发半径为1.280 mm，与图6所展示在加压3.5 kV实验条件下测得的金属层蒸发半径为1.400 mm的自愈点的自愈面积相差很小，验证了本次仿真的有效性和模型的可行性。

2.3 自愈发展时间对金属化薄膜放电通道内空间电荷分布的影响

在金属电极上施加3.5 kV直流电压后，正负电荷克服电极界面势垒，分别由阳极和阴极注入聚丙烯薄膜放电通道内部，空间电荷开始在放电通道内部聚集，图7反映了不同自愈发展时间下聚丙烯薄膜放电通道内空间电荷密度的变化规律。

从图7可以看出，放电通道两端积聚的空间电荷密度随着自愈发展时间增加而逐渐增大。当聚丙烯薄膜厚度大于0.33 μm ，或小于5.67 μm 时，其内部的空间电荷密度为0 C/m^3 。这是因为电荷在放电通道内部进行迁移运动的过程中，通道内的电荷发生了入陷和脱陷，或者与异性电荷发生复合形成了中性粒子。随着电荷迁移距离增加，聚丙烯薄膜中间部分的陷阱数量大幅减少，电荷的入陷和脱陷行为为减弱，异性电荷之间的复合行为占据主导。

将图7中放电通道阴极和阳极附近的电荷

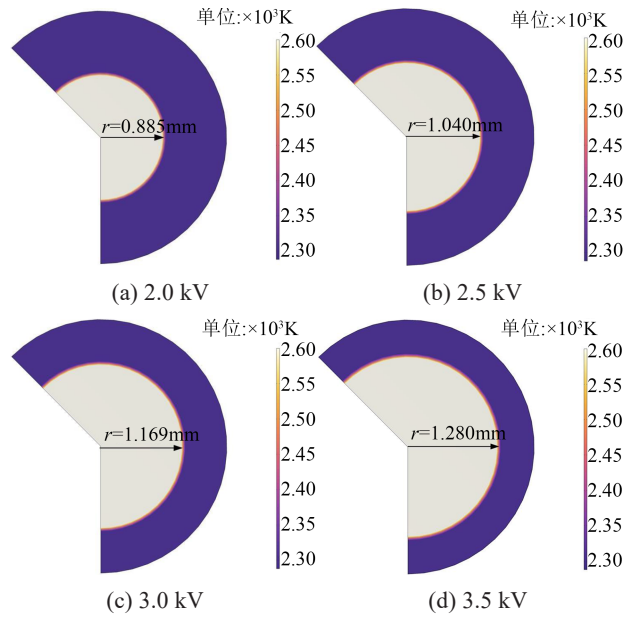


图5 不同外施直流电压下金属化聚丙烯薄膜表面温度分布

Fig.5 Surface temperature distribution of metallized polypropylene film under different DC voltages

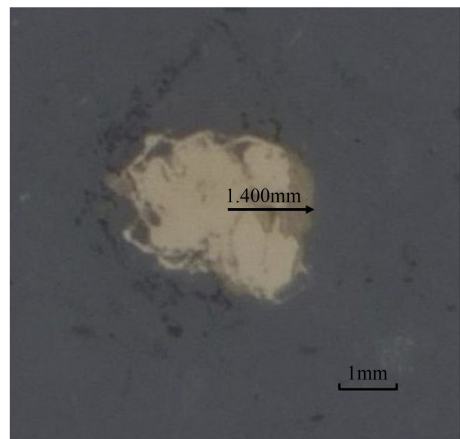


图6 外施电压为3.5 kV时的自愈点形貌

Fig.6 Self-healing point morphology at 3.5 kV of voltage

分布图局部放大。如图8和图9所示，正极性电荷在聚丙烯电介质薄膜放电通道内部主要在阳极处聚集，其分布情况与负极性电荷类似。当自愈发展时间由0 μs 增至3、6、9、12 μs 时，聚丙烯薄膜放电通道阴极边界处聚集的负极性电荷密度由0 C/m^3 分别增至-1.315、-2.267、-3.183、-4.461 C/m^3 ，放电通道阳极边界处聚集的正极性电荷密度分别为1.272、2.221、3.305、4.319 C/m^3 。

从图8和图9还可以看到，当自愈发展时间在3、6、9、12 μs 时，负极性电荷密度分别在放电通道内部5.782、5.668、5.571、5.495 μm 处达到稳定状态，与此同时正极性电荷在放电通道内部0.235、0.307、

0.480、0.562 μm 处达到稳定状态。

2.4 外施直流电压对金属化薄膜放电通道内空间电荷分布的影响

当外施直流电压为 2.0、2.5、3.0、3.5 kV 且自愈

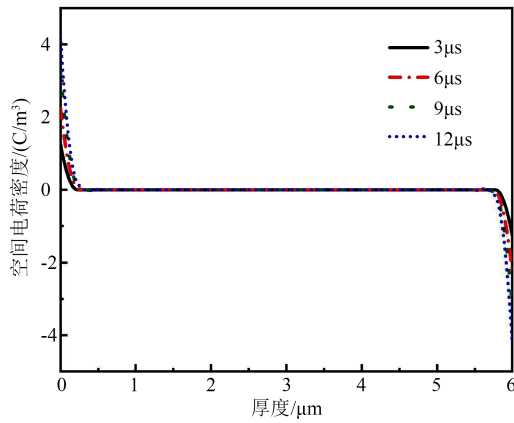


图7 不同自愈发展时间放电通道内部的空间电荷分布
Fig.7 Space charge distribution in discharge channel with different self-healing development time

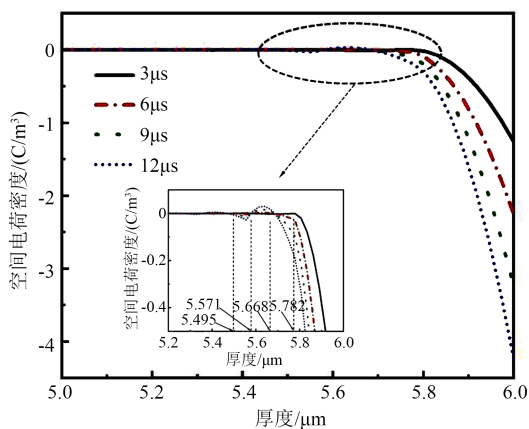


图8 不同自愈发展时间放电通道内负极性空间电荷分布
Fig.8 Negative space charge distribution in discharge channel with different self-healing development time

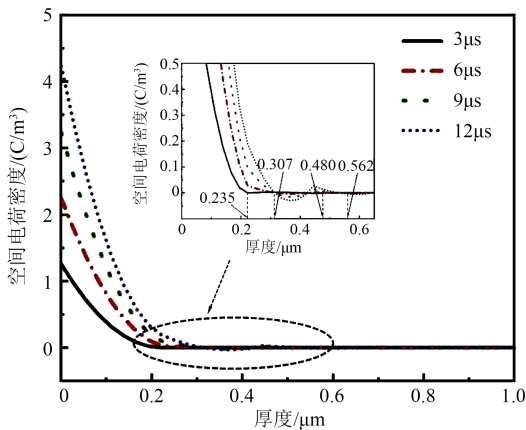


图9 不同自愈发展时间放电通道内正极性空间电荷分布
Fig.9 Positive space charge distribution in discharge channel with different self-healing development time

发展时间为 12 μs 时,放电通道内部空间电荷分布仿真结果如图 10 所示。从图 10 可以看出,随着金属电极上施加的直流电压增大,放电通道内部积聚的空间电荷密度随之增大,但是空间电荷的极性未发生改变。

对图 10 中放电通道阴极和阳极附近的局部放大,如图 11 和图 12 所示。当外施直流电压由 2.0 kV 增至 2.5、3.0、3.5 kV 时,放电通道阴极边界处聚集的负极性电荷密度由 -0.343 C/m^3 分别增加至 -0.685 、 -1.907 、 -4.581 C/m^3 ,放电通道阳极边界处聚集的正极性电荷密度由 0.387 C/m^3 分别增加至 0.571 、 1.823 、 4.519 C/m^3 。随着外施直流电压的增大,放电通道内部的负极性电荷密度分别在 5.538 、 5.526 、 5.392 、 $5.328 \mu\text{m}$ 处达到稳定状态,正极性电荷密度分别在 0.343 、 0.436 、 0.548 、 $0.645 \mu\text{m}$ 处达到稳定状态。

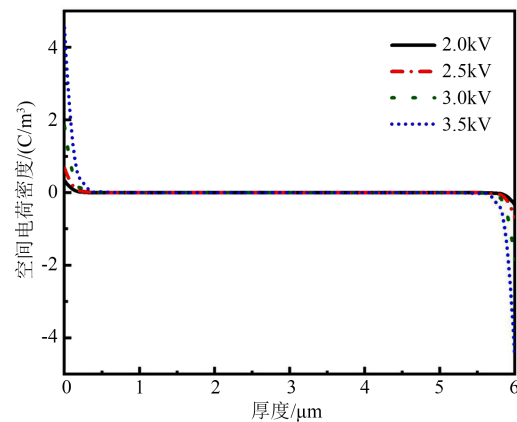


图10 不同外施直流电压下放电通道内部的空间电荷分布
Fig.10 Space charge distribution in the discharge channel under different applied DC voltages

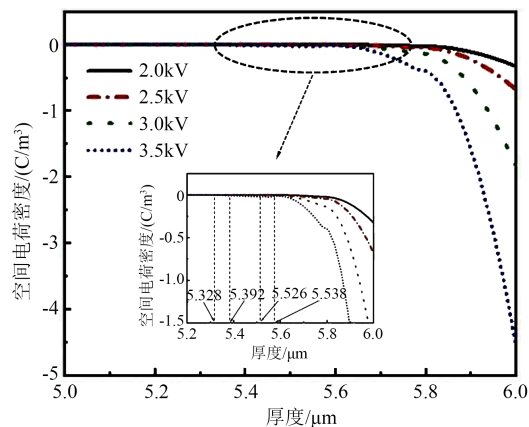


图11 不同外施直电压下放电通道内负极性空间电荷分布
Fig.11 Negative space charge distribution in the discharge channel under different applied DC voltages

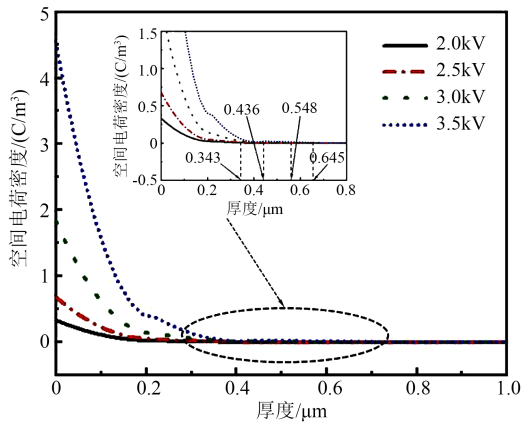


图 12 不同外施直流电压下放电通道内正极性空间电荷分布

Fig.12 Positive space charge distribution in the discharge channel under different applied DC voltages

对比图 11 和图 12 可以发现,外施直流电压越大,当电压减小时,两电极附近的电荷密度下降幅度越大。在同一自愈发展时间下,随着外施电压的增加,金属化薄膜放电通道内各处积累的空间电荷量也相应增加。分析原因如下:随着外施直流电压的增大,加快了异性电荷的复合行为,同时电压的升高使得两电极肖特基发射的电子和空穴均有所增加,放电通道内发生电荷的复合、迁移之后,残留的电荷也会增多。

2.5 温度对高电场下金属化薄膜放电通道内空间电荷分布的影响

当外施直流电压为 3.5 kV、自愈发展时间为 12 μs 时,不同温度下聚丙烯薄膜放电通道内部空间电荷分布的仿真结果如图 13 所示。从图 13 可以看出,温度对放电通道内部空间电荷的迁移行为影响显著,温度越高,放电通道阴极和阳极处聚集的空间电荷越密集。

对图 13 中放电通道阴极和阳极附近的电荷分布图局部放大,如图 14 和图 15 所示。在高电场下温度从 20℃ 升高到 25、30、35、40℃ 时,放电通道阴极边界处的负极性电荷密度从 -1.660 C/m³ 分别增加至 -2.843、-4.809、-7.884、-12.842 C/m³,放电通道阳极边界处的正极性电荷密度从 1.639 C/m³ 分别增加至 2.842、4.815、7.935、12.843 C/m³。与此同时随着温度的升高,放电通道内部的负极性电荷密度分别在 5.492、5.425、5.373、5.338、5.250 μm 处达到稳定状态,正极性电荷密度分别在 0.495、0.537、0.591、0.648、0.699 μm 处达到稳定状态。

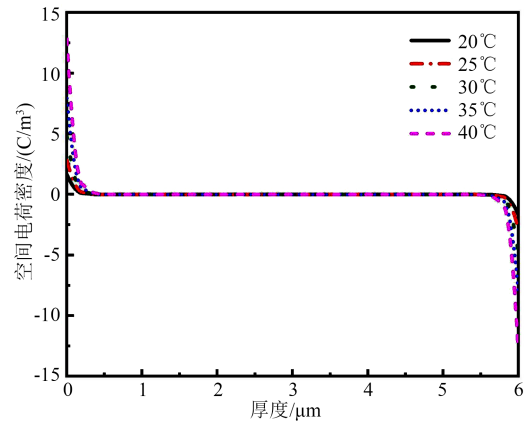


图 13 不同温度下放电通道内部的空间电荷分布

Fig.13 Space charge distribution in the discharge channel at different temperatures

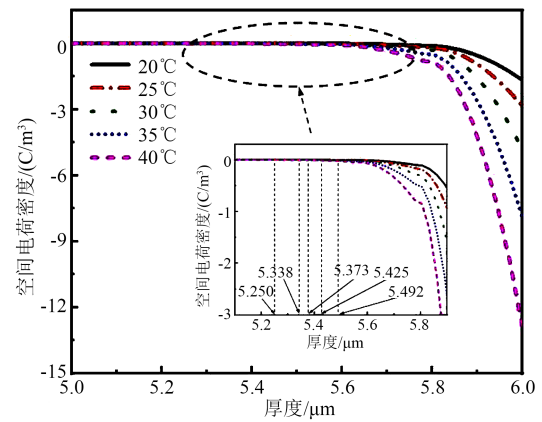


图 14 不同温度下放电通道内负极性空间电荷分布

Fig.14 Negative space charge distribution in the discharge channel at different temperatures

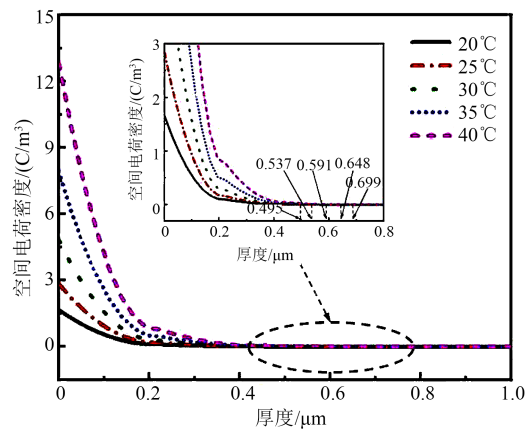


图 15 不同温度下放电通道内正极性空间电荷分布

Fig.15 Positive space charge distribution in the discharge channel at different temperatures

对比图 14 和图 15 发现,温度越高,两电极附近的电荷聚集密度越大,说明放电通道内部的电荷迁移过程受到温度的作用明显加强,放电通道内

部的电子和空穴更容易发生迁移并与相反极性的电荷发生复合。分析原因如下:温度升高使得陷阱的捕获能力加强,导致放电通道的电荷在完成复合、迁移行为之后,积聚于阳极和阴极附近的相同极性电荷有所增加。

3 结论

(1)本文展示了一个完整自愈过程中金属化聚丙烯薄膜金属层蒸发面积随自愈时间的变化,二者呈现出线性关系,表明金属化聚丙烯薄膜自愈过程的发展速度是比较稳定的,这对于微观下金属化膜自愈过程的研究具有重要意义。

(2)随着外施直流电压和温度的升高,在同一自愈发展时间下,两电极附近的电荷聚集密度随之增大,放电通道内部的电荷迁移过程明显加强,放电通道内部的电子和空穴更容易发生迁移并与相反极性的电荷发生复合。

(3)随着自愈过程的进行,注入聚丙烯电介质薄膜放电通道中的电荷数量会逐渐增多,电荷向放电通道两端迁移的行为也会加剧,正负电荷密度分别会在放电通道内距离阳极和阴极更深处的位置达到稳定。与此同时由于放电通道内部空间电荷的复合、聚集与迁移,造成放电通道内部的电势分布不均匀,放电通道内会发生电场畸变。

参考文献 References

- [1] 李婉茹. 金属化薄膜电容器用聚丙烯高场电荷输运特性研究[D]. 北京:北京交通大学,2020.
LI W R. Study on high field charge transport characteristics of polypropylene for metallized film capacitors[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University,2020.
- [2] 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):87-91,95.
WANG X, WANG Z M, XU M L, et al. Study on effect of temperature on self-healing characteristics of metallized film under AC voltage[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation, 2018,39(3):87-91,95.
- [3] 王荀,陈伟,徐梦蕾,等. 金属化膜电容器元件自愈失败过程研究[J]. 电力电容器与无功补偿,2018,39(4):54-58.
WANG X, CHEN W, XU M L, et al. Research on self-healing failure of metallized film capacitor components[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation,2018,39(4):54-58.
- [4] 高鹏,赵傲,王钟颖,等. 聚丙烯材料在电力电缆应用中的研究进展[J]. 绝缘材料,2023,56(8):1-10.
GAO P, ZHAO Q, WANG Z Y, et al. Research progress in the application of polypropylene materials in power cables[J]. Insulating Materials,2023,56(8):1-10.
- [5] 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.
ZHANG M. Research on self-healing characteristics of metallized film capacitors[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2012.
- [6] TORTAI J H, DENAT A, BONIFACI M. Self-healing of capacitors with metallized film technology: experimental observations and theoretical model[J]. Journal of Electrostatics, 2001, 53(2): 159-169.
- [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 H, ZHANG M, LIN F C, et al. Research on self-healing theory and law of metallized film capacitors[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2012,27(9):218-223,230.
- [8] 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 H, YI B S, LI L, et al. Study on breakdown and self-healing characteristics of polypropylene film for DC supported capacitors [J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation,2019,40(3):79-83.
- [9] BELKO V, EMELYANOV O, IVANOV I. The experimental investigation and numerical simulation of self-healing in metallized film capacitors[C]//2016 IEEE International Conference on Dielectrics. Montpellier, France:IEEE,2016.
- [10] 陈驰,李佳兴,王霞,等. 交联聚乙烯试样中空间电荷输运特性的数值模拟[J]. 高电压技术,2023,49(1):311-320.
CHEN C, LI J X, WANG X, et al. Numerical simulation of space charge transport characteristics in crosslinked polyethylene samples[J]. High Voltage Engineering,2019,49(1):311-320.
- [11] RITAMAKI M, RYTOLUOTO I, LAHTI K, et al. Large-area approach to evaluate DC electro-thermal ageing behavior of BOPP thin films for capacitor insulation systems[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017, 24(2): 826-836.
- [12] KUIK M, KOSTER L J A, WETZELAER G A H, et al. Trap-assisted recombination in disordered organic semiconductors[J]. Physical Review Letters,2011,107(25):256805.
- [13] 王佳昕,李化,王哲豪,等. 金属化膜电容器电极边缘电场畸变研究[J]. 高压电器,2022,58(3):29-36.
WANG J X, LI H, WANG Z H, et al. Research on electric field distortion at electrode edge of metallized film capacitor[J]. High Voltage Apparatus,2022,58(3):29-36.
- [14] LI Z W, LI H, HUANG X, et al. Temperature rise of metallized film capacitors in repetitive pulse applications[J]. IEEE Transactions on Plasma Science,2015,43(6):2038-2045.
- [15] 尹婷,严飞,王子建,等. 高压自愈式电容器典型交流工况下温度场分析及优化设计[J]. 高电压技术,2016,42(12):3996-4004.
YIN T, YAN F, WANG Z J, et al. Temperature field analysis and

- optimal design of high voltage self-healing capacitors under typical AC conditions[J]. High Voltage Engineering,2016,42(12):3996-4004.
- [16] WALGENWITZ B, TORTAI J H, BONIFACI N, et al. Self-healing of metallized polymer films of different nature[C]//Proceedings of the 2004 IEEE International Conference on Solid Dielectrics. Toulouse, France:IEEE,2004.
- [17] 李进,梁虎成,杜伯学,等.基于双极性载流子运输模型的高压直流电缆附件绝缘EPDM/LDPE界面电荷的数值模拟[J].高电压技术,2018,44(5):1443-1449.
- LI J, LIANG H C, DU B X, et al. Numerical simulation of EPDM/LDPE interface charge of high voltage DC cable attachment insulation based on bipolar carrier transport model[J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1443-1449.
- [18] 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 H Y, YIN T, YAN F, et al. Calculation of plate heating for metallized film capacitors[J]. Power Capacitors and Reactive Power Compensation,2015,36(5):37-40.
- [19] LOWELL J. Absorption and conduction currents in polymers: a unified model[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,1990,23(2):205-210.
- [20] 金煜知,宋柯,任文军,等.极性反转条件下基于双极性载流子-离子混合运输模型的XLPE空间电荷特性研究[J].绝缘材料,2023,56(6):66-72.
- JIN Y Z, SONG K, REN W J, et al. Study on space charge characteristics of XLPE based on bipolar carrier-ion mixed transport model under polarity reversal conditions[J]. Insulating Materials,2019,56(6):66-72.
- [21] 刘道生,赵亚辉,王广康,等.基于双极性载流子运输模型的聚酰亚胺薄膜空间电荷数值模拟[J].绝缘材料,2022,55(7):56-63.
- LIU D S, ZHAO Y H, WANG G K, et al. Numerical simulation of space charge in polyimide films based on bipolar carrier transport model[J]. Insulating Materials,2019,55(7):56-63.
- [22] 蔡姝娆,高梓巍,纪民尊,等.聚丙烯载流子运输与能量积累调制直流击穿威布尔分布特性仿真研究[J].电气工程学报,2021,16(2):50-59.
- CAI S Y, GAO Z W, JI M Z, et al. Simulation of DC breakdown Weibull distribution characteristics for carrier transport and energy accumulation modulation in polypropylene[J]. Journal of Electrical Engineering,2019,16(2):50-59.
- [23] 赵亚辉.强电场下聚酰亚胺薄膜表面电荷与空间电荷特性研究[D].赣州:江西理工大学,2022.
- ZHAO Y H. Study on surface and space charge characteristics of polyimide films under strong electric field[D]. Ganzhou: Jiangxi University of Science and Technology,2022.
- [24] 刘晓鹏,董曼玲,邓虎威,等.空气间隙击穿后放电通道内的气体运动特性[J].电工技术学报,2021,36(13):2667-2674.
- LIU X P, DONG M L, DENG H W, et al. Gas motion characteristics in discharge channel after air gap breakdown [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,36(13):2667-2674.
- [25] 宋柯,王伟,钱定冬,等.杂质浓度梯度下XLPE空间电荷与电场分布特性仿真研究[J].绝缘材料,2023,56(4):40-47.
- SONG K, WANG W, QIAN D D, et al. Simulation of space charge and electric field distribution of XLPE under impurity concentration gradient[J]. Insulating Materials,2019,56(4):40-47.

收稿日期:2023-08-09;修回日期:2023-09-14。

作者简介:

齐红斌(1999-),男(汉族),河北邢台人,硕士生,主要从事高电压与绝缘技术的研究;

王伟(1960-),男(汉族),北京人,教授,主要从事高电压与绝缘技术的研究。