

DOI:10.12158/j.2096-3203.2020.04.019

# 绝缘纸中空间电荷效应的模拟研究

冀章, 李长云

(山东科技大学电气与自动化工程学院, 山东 青岛 266590)

**摘要:**为明晰空间电荷对油纸绝缘纸板中电场强度的畸变效应、纸板老化状态与空间电荷的作用机制,采用双极性载流子输运模型,对不同老化状态的绝缘纸板中的空间电荷特性进行数值模拟。对于同一老化状态下的绝缘纸板施加直流电压时,纸板中会出现同极性电荷积聚现象,且正极性电荷的分布范围较负极性显著变窄;随着加压时间的增加,纸板中的电场畸变率呈增大趋势。当绝缘纸板老化程度加深时,其陷阱密度和深度均会增加,致使空间电荷在纸板的近电极侧大量积聚,进而削弱纸板和电极边界处的电场强度,加剧纸板内部的场强畸变;且绝缘纸板老化愈严重,空间电荷对电场的畸变作用愈突出,使得绝缘纸板加速老化,容易诱发绝缘击穿故障。研究结果可为变压器油纸绝缘设计提供参考。

**关键词:**空间电荷;绝缘纸;双极性电荷输运模型;电场畸变;纸板老化

**中图分类号:**TM464

**文献标志码:**A

**文章编号:**2096-3203(2020)04-0134-09

## 0 引言

换流变压器内的电场较为复杂,既有交流电场,亦存在直流电场,在电、热和机械振动等因素作用下,绝缘纸性能逐渐下降。尤其在直流电场作用下,空间电荷积聚使绝缘纸中的电场分布严重畸变,容易引发局部放电通道,导致纤维素绝缘纸的早期破坏<sup>[1-2]</sup>。研究表明,空间电荷的积聚加速绝缘纸老化,且换流变中固有的极性反转现象更易引起空间电荷的积聚<sup>[3]</sup>,从而对换流变压器的油纸绝缘系统产生不利影响<sup>[4-5]</sup>。

现有研究绝缘纸老化的方法可分为2类:物理实验法<sup>[6-12]</sup>和数值模拟法。前者绝缘纸老化实验耗时较长,且实验中采用电声脉冲(pulsed electro-acoustic, PEA)法测量空间电荷时尚存在测量精度低等不足,因此应用受到限制;后者利用数值方法对绝缘纸内空间电荷的积聚及其诱发的介质内部场强畸变等现象进行分析,有助于深入理解空间电荷与绝缘纸老化间的作用机制,可为换流变绝缘系统的设计与运维等工作提供参考,备受研究者关注。

利用数值方法研究电介质内部空间电荷的动态特性时,常采用双极性电荷输运模型。文献<sup>[13]</sup>获得了聚丙烯内部空间电荷的分布特性,表明其内部空间电荷的非对称分布主要取决于电荷迁移率和脱陷势垒。文献<sup>[14]</sup>采用双极性电荷模拟了直流电场作用下高压直流电缆附件交界面上空间电

荷的输运与分布特性,但将双极性传输模型用于纤维素绝缘纸中空间电荷的数值模拟研究相对较少。文献<sup>[15-16]</sup>采用有限元法分别仿真了空间电荷在单层和多层油纸绝缘中界面处的积聚特性,研究表明,油隙与油浸纸板界面处积聚的电荷极性与油浸纸板另一侧积聚的电荷极性相反。文献<sup>[17-18]</sup>考虑了温度梯度下聚合物中的空间电荷运动特性。文献<sup>[19]</sup>用双极性载流子输运模型和粒子漂移扩散模型仿真了局部放电,但未能描述空间电荷对电介质内部电场的畸变机制。

为获得空间电荷对油纸绝缘系统内电场的畸变特性,文中基于双极性载流子输运的空间电荷动力学仿真模型,模拟一维空间电荷在绝缘纸中的输运过程。明晰空间电荷与绝缘纸老化之间的相互影响机制,进而改变表征绝缘纸老化状态的特征参量,获得不同老化程度下的绝缘纸中空间电荷所产生的电场强度分布。

## 1 绝缘纸板中载流子来源及输运模型

### 1.1 绝缘纸板中载流子来源

绝缘纸板为孔状结构,当其受潮或染污后会存在较多的杂质粒子。在外施电场作用下,杂质粒子或将发生电离,并随电场力作用向试样两侧迁移。同时,外加电场通过阳极和阴极的表面分别向绝缘纸板中注入自由电子和自由空穴,即空间电荷,且在电极附近积聚同极性电荷。因此,绝缘纸板中空间电荷的来源取决于其微观特性,此处暂不考虑由介质宏观慢极化而引起的空间电荷<sup>[20]</sup>。

由于绝缘纸板中存在的杂质及纸板自身结构

收稿日期:2020-01-08;修回日期:2020-02-18

基金项目:山东省重点研发计划资助项目(2019GGX1020-49);山东省自然科学基金资助项目(ZR2017MEE078)

等原因,其内部分布有陷阱,空间电荷在运动过程中或被陷阱俘获形成陷阱电荷,即入陷过程。为便于描述双极电荷在绝缘纸板内部的运动过程,假设材料中为单一陷阱能级,若陷阱电荷受能量激发,其将从陷阱中逃脱出来,即脱陷过程。实际上绝缘纸板内部及表面存在较多的陷阱,电荷注入介质后或被陷阱捕获,致使介质内部局部位置出现空间电荷积聚现象。同时,包括陷阱电荷在内的异极性电荷之间也会发生复合。载流子在材料内部的输运过程如图 1 所示, $S_0, S_1, S_2, S_3$  分别为入陷电子/入陷空穴、自由电子/入陷空穴、入陷电子/自由空穴、自由电子/自由空穴的复合系数。

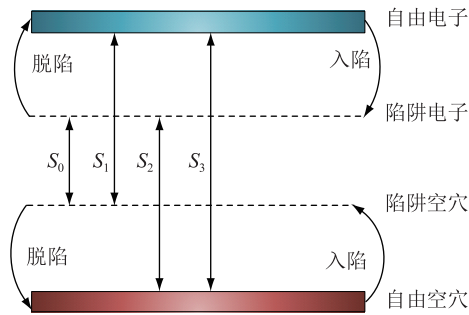


图 1 绝缘纸内部载流子的运动过程

Fig.1 Transportation of internal bipolar charge within insulation paper

假设施压前在试样中不存在离子,即电极注入是空间电荷的唯一来源。当电极界面电场  $E < 100$  kV/mm 时,认为电荷注入符合肖特基定理<sup>[21]</sup>。

$$j_z(x, t) = AT^2 e^{-\phi_z/k_B T} \times \left[ e^{q/k_B T} \sqrt{\frac{qE_z(x, t)}{4\pi\epsilon_0\epsilon_r}} - 1 \right] \quad z = e, h \quad (1)$$

式中: $j_e(x, t), j_h(x, t)$  分别为自由电子和自由空穴的注入电流密度; $A$  为理查德森常数,取值  $1.2 \times 10^6$  A·m<sup>-2</sup>·K<sup>-2</sup>;  $T$  为开尔文温度; $\phi_e, \phi_h$  分别为电子和空穴在绝缘纸中的注入势垒; $k_B$  为玻尔兹曼常数,取值  $1.380 6 \times 10^{-23}$  J·K<sup>-1</sup>;  $q$  为电子电荷量,取值  $1.6 \times 10^{-19}$  C;  $E_e(x, t), E_h(x, t)$  分别为阴极和阳极处的电场强度; $\epsilon_0, \epsilon_r$  分别为真空和相对介电常数。

## 1.2 空间电荷输运模型

对空间电荷效应进行数值模拟时,首先需将绝缘介质内部的非电荷传导输运引起的各类载流子浓度变化量的总和视为源项,记为  $S(x, t)$ 。绝缘介质内部的非电荷传导包括空间电荷的入陷、脱陷及复合等过程,自由电子、自由空穴、陷阱电子和陷阱空穴 4 类载流子的源项表达式分别为:

$$S_{eu}(x, t) = -B_e n_{eu} (1 - n_{et}/N_{0,et}) + n_{et} v e^{-\phi_{ue}/k_B T} - S_1 n_{eu} n_{ht} - S_3 n_{eu} n_{hu} \quad (2)$$

$$S_{hu}(x, t) = -B_h n_{hu} (1 - n_{ht}/N_{0,ht}) + n_{ht} v e^{-\phi_{uh}/k_B T} - S_2 n_{et} n_{hu} - S_3 n_{eu} n_{hu} \quad (3)$$

$$S_{et}(x, t) = B_e n_{eu} (1 - n_{et}/N_{0,et}) + n_{et} v e^{-\phi_{ue}/k_B T} - S_2 n_{et} n_{hu} - S_0 n_{et} n_{ht} \quad (4)$$

$$S_{ht}(x, t) = B_h n_{hu} (1 - n_{ht}/N_{0,ht}) + n_{ht} v e^{-\phi_{uh}/k_B T} - S_1 n_{eu} n_{ht} - S_0 n_{et} n_{ht} \quad (5)$$

式中: $n_{eu}, n_{hu}$  分别为自由电子和自由空穴密度; $n_{et}, n_{ht}$  分别为陷阱电子和陷阱空穴密度; $N_{0,et}, N_{0,ht}$  分别为电子陷阱和空穴陷阱的最大密度; $B_e, B_h$  分别为自由电子和自由空穴被深陷阱捕获的系数; $v$  为陷阱电子和陷阱空穴的脱陷率; $\phi_{ue}, \phi_{uh}$  分别为电子脱陷和空穴脱陷势垒。

绝缘介质内部的电荷传输过程可由式(6)一式(8)描述。其中,传输方程(6)用于确定忽略扩散过程时载流子的瞬时电流密度;连续性方程(7)用于求解各种载流子的密度;泊松方程(8)用于求解总体的电场分布。

$$j_z(x, t) = n_z(x, t) \mu_z E(x, t) \quad z = e, h \quad (6)$$

$$\frac{\partial n_z(x, t)}{\partial t} + \frac{\partial j_z(x, t)}{\partial x} = S(x, t) \quad z = e, h \quad (7)$$

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

式中: $n_e, n_h$  分别为电子和空穴的电荷密度; $\mu_e, \mu_h$  分别为自由电子和自由空穴的迁移率; $E$  为电场强度; $S(x, t)$  为考虑电荷入陷、脱陷、复合等所有物理过程的源项; $\rho$  为所有载流子密度的代数和计算得到的净电荷密度,如式(9)所示。

$$\rho = n_{eu} + n_{et} + n_{hu} + n_{ht} \quad (9)$$

## 2 空间电荷效应的数值模拟

单极性模型仅对载流子中的电子或空穴的输运状况进行计算,忽略了电子和空穴的复合过程。随着测量技术的发展,人们发现电介质内部同时存在电子和空穴,且自由/入陷电子和自由/入陷空穴间存在不同的复合过程。因此需要采用双极性载流子输运模型,联合偏微分方程组研究电子和空穴的迁移、入陷、脱陷和复合等过程,进而获得空间电荷效应对绝缘纸内部电荷的作用机制。

### 2.1 绝缘纸板的加压模型

绝缘纸板加压模型如图 2 所示,单层绝缘纸板上侧加直流高压,下侧为接地极。因绝缘纸板厚度远小于其长度和宽度,故针对其厚度方向进行研究时,可将模型在绝缘纸板厚度方向上抽象为一维模型,其上下两侧的边界条件不变。取绝缘纸板厚度为 1 mm,为保证计算精度,网格剖分采用定制方式,

最大单元大小为  $0.5 \mu\text{m}$ , 剖分单元为 200 个。仿真对绝缘纸板逐渐加压到 60 min, 得到电势、空间电荷和电场强度随时间的瞬时变化趋势。

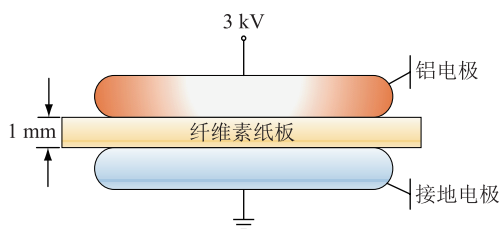


图2 绝缘纸板加压模型

Fig.2 Model of insulation paper with applied voltage

### 2.2 数值模拟参数设置

文中的研究材料为纤维素绝缘纸, 参考文献 [13]、[22] 和 [23] 中给出的聚合物仿真参数, 对绝缘纸中的空间电荷特性进行定性分析。仿真主要参数如表 1 所示。其中, 因实际工作中所用单层绝缘纸板相对较薄, 高压电极接 3 kV 的直流电压, 接地极电压为 0, 温度为 293 K。

表 1 模型仿真主要参数

Table 1 Main parameters of model simulation

参数	数值	含义
$U/\text{kV}$	3	直流电压
$\epsilon_r$	3.01	相对介电常数
$\epsilon_0/(\text{F}\cdot\text{m}^{-1})$	$8.854\times 10^{-12}$	真空介电常数
$B_e/\text{s}^{-1}$	0.1	电子入陷系数
$B_h/\text{s}^{-1}$	0.2	空穴入陷系数
$\phi_{ue}/\text{eV}$	1.17	电子脱陷势垒
$\phi_{uh}/\text{eV}$	1.27	空穴脱陷势垒
$\varphi_e/\text{eV}$	1.35	电子注入势垒
$\varphi_h/\text{eV}$	1.2	空穴注入势垒
$N_{0,e}/(\text{C}\cdot\text{m}^{-3})$	100	电子密度
$N_{0,h}/(\text{C}\cdot\text{m}^{-3})$	100	空穴密度
$\mu_e/[\text{m}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}]$	$2\times 10^{-14}$	电子迁移率
$\mu_h/[\text{m}^2\cdot(\text{V}\cdot\text{s})^{-1}]$	$1\times 10^{-14}$	空穴迁移率
$S_0/[\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{C})^{-1}]$	$1\times 10^{-5}$	复合系数
$S_1/[\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{C})^{-1}]$	$1\times 10^{-5}$	复合系数
$S_2/[\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{C})^{-1}]$	$1\times 10^{-5}$	复合系数
$S_3/[\text{m}^3\cdot(\text{s}\cdot\text{C})^{-1}]$	0	复合系数
$F_0/(\text{C}\cdot\text{mol}^{-1})$	96 485	法拉第常数
$\nu/\text{s}^{-1}$	$6.0\times 10^{12}$	陷阱逃脱系数

## 3 数值模拟结果与分析

### 3.1 绝缘纸板电荷密度分析

#### 3.1.1 绝缘纸板中的电势分布

采用表 1 参数对图 2 模型进行数值模拟, 考虑空间电荷效应时, 绝缘纸板中电势分布如图 3 所示。

选择的绝缘纸厚度为 1 mm, 横坐标为 0 处表示阴极位置, 横坐标为 1 处表示阳极位置。

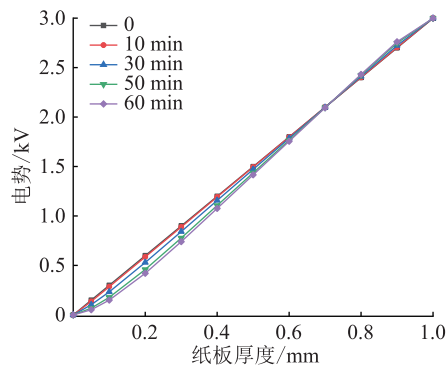


图 3 绝缘纸板的瞬时电势分布

Fig.3 Instantaneous potential distribution in the board

由图 3 可知, 空间电荷使绝缘纸板靠近电极侧电势发生偏移。加压时间由 0 分别增至 10 min, 30 min, 50 min, 60 min, 纸板厚度 0.04 mm 处的电势由 0.12 kV 分别减小为 0.11 kV, 0.08 kV, 0.05 kV, 0.04 kV。且随着加压时间增加, 靠近阴极处电势逐渐减小, 靠近阳极处电势逐渐增大, 说明空间电荷的存在使得阳极电势升高、阴极电势降低, 且阴极侧电势的变化较阳极侧显著。

#### 3.1.2 绝缘纸板中电荷密度分布

图 4、图 5 分别给出了阴极侧自由电子和阳极侧自由空穴的密度分布。由图 4 可知, 随着加压时间增加, 靠近阴极处绝缘纸板的电荷密度呈幂指数规律变化。当加压时间由 0 分别增至 10 min, 30 min, 50 min, 60 min 时, 纸板厚度 0.05 mm 处自由电子的密度由 0 分别变为  $-0.07 \text{ C}/\text{m}^3$ ,  $-0.19 \text{ C}/\text{m}^3$ ,  $-0.27 \text{ C}/\text{m}^3$ ,  $-0.31 \text{ C}/\text{m}^3$ 。表明随着加压时间增加, 阴极表面自由电子密度逐渐增大。加压 60 min 时, 绝缘纸板边界处的自由电子密度达到  $-0.44 \text{ C}/\text{m}^3$ 。加压 10 min 时, 纸板厚度 0.17 mm 处自由电子的密度为 0, 原因为自由电子从靠近阴极表面移动到此位置过程中发生了入陷和复合等过程。同样, 加压时间从 10 min 增至 30 min, 50 min, 60 min 时, 自由电子浓度变为 0 的位置从 0.17 mm 分别增至 0.31 mm, 0.41 mm, 0.49 mm。表明随着加压时间增加, 介质内自由电子密度在介质近阴极侧分布的范围越来越广; 加压时间愈长, 阴极注入介质的自由电子数量越多, 沿绝缘纸板厚度方向中间部分移动的范围也会越来越广。

由图 5 可知, 靠近阳极侧绝缘纸板中的空穴密度也呈指数规律增加, 且加压时间愈长, 同一位置的空穴密度愈大。如在纸板厚度为 0.95 mm 处, 加压时间由 0 分别增至 10 min, 30 min, 50 min, 60 min



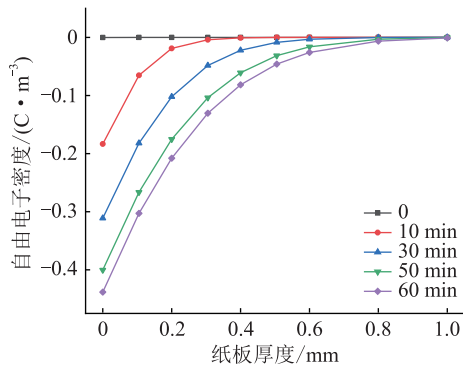


图4 阴极表面自由电子的电荷密度

Fig.4 The charge density of free electrons at the cathode surface

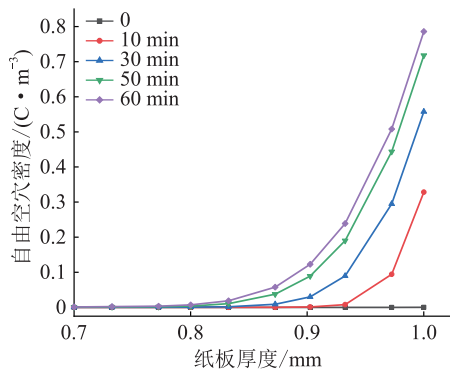


图5 阳极表面自由空穴的电荷密度

Fig.5 Charge density of free holes on the surface of anode

时,空穴密度从0分别增至  $0.02 \text{ C/m}^3$ ,  $0.16 \text{ C/m}^3$ ,  $0.28 \text{ C/m}^3$ ,  $0.34 \text{ C/m}^3$ ,且电荷密度越来越大。加压60 min时,边界处的电荷密度达到  $0.8 \text{ C/m}^3$ 。当加压时间分别增至10 min,30 min,50 min,60 min时,自由空穴密度不为0的起始位置分别为0.92 mm,0.85 mm,0.8 mm,0.76 mm。表明加压时间增加,自由空穴在阳极附近的分布范围越来越广,而电极处注入的电子和空穴发生了同极性积聚。

图6为绝缘纸板在  $3 \text{ kV/mm}$  外施直流电场作用60 min内的净电荷密度分布特性。一方面,在外施电压作用下,电极表面不断向纸板中注入电荷,在其两侧会出现大量的空间电荷积聚现象。另一方面,空间电荷在电场作用下向纸板内部迁移和扩散。此过程中,空间电荷会被陷阱俘获,或从陷阱中逃逸,并释放出一定的能量,亦或与异极性电荷发生复合形成中性粒子且发出光子。随着加压时间延长,空间电荷分布最终达到平衡,经过一段时间后,阳极表面电荷密度稳定在  $0.8 \text{ C/m}^3$ ,阴极表面的电荷密度稳定在  $-0.46 \text{ C/m}^3$ 。

### 3.1.3 绝缘纸板中电势和电荷分布结果分析

比较图3—图6可知,自由电子和空穴对纸板

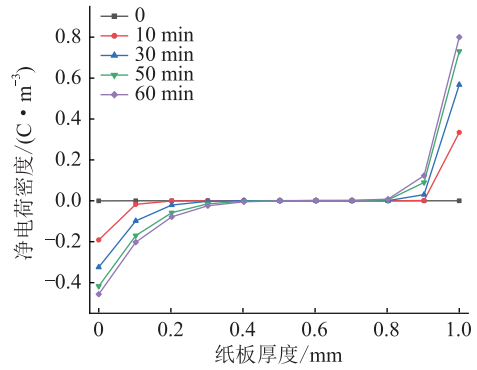


图6 净电荷密度分布

Fig.6 Net charge density distribution

中电势分布和电荷密度的影响不同。图3中,绝缘纸板在阴极侧  $0 \sim 0.67 \text{ mm}$  的电势均发生变化,而在阳极侧  $0.67 \sim 1 \text{ mm}$  发生变化。图4中,加压60 min时,在阴极侧纸板中自由电子密度在  $0 \sim 0.4 \text{ mm}$  即  $0.4 \text{ mm}$  的厚度范围内不为0,而图5中的空穴密度仅在  $0.8 \sim 1 \text{ mm}$  即  $0.2 \text{ mm}$  厚度范围内不为0。分析原因为参数设置中电子迁移率是空穴迁移率的2倍,迁移率增大,电荷在纸板两侧的分布范围也增大,表明迁移率是导致空间电荷和电场呈非对称分布的重要影响参数,这一规律与文献[13]所得结论相同。

由图4、图5可知,绝缘纸板阴极侧自由电子密度和阳极侧自由空穴密度并不相同。以加压时间30 min为例,图4中阴极侧自由电子的密度最大值(绝对值)约为  $0.31 \text{ C/m}^3$ ,而图5中阳极侧空穴的密度最大值约为  $0.55 \text{ C/m}^3$ 。其原因为:一方面,自由电子的入陷系数取值为空穴入陷系数的2倍,表明被陷阱俘获的空间电荷中,自由电子数目远大于空穴数目,使得阴极空间电荷密度低于阳极电荷密度;另一方面,空穴的注入势垒和脱陷势垒均大于电子的对应值,由文献[13]可知,空穴脱陷势垒增大将导致阳极电荷密度增大而阴极电荷密度减小,且空穴注入势垒的增加也会增加阳极电场幅值而降低阴极电场最大值。

将图6所示空间净电荷密度分布在时间轴上进行数据拉伸,可得图7的空间电荷密度分布。比较加压60 min和加压30 min,阴极边界处的电子密度(绝对值)变小,阳极边界处的空穴密度变大,且电子和空穴的分布范围较30 min时有明显扩大。可见,随着加压时间的延长,同极性电荷积聚越来越明显,空间电荷大都分布在绝缘纸板两侧,中间部分电荷密度基本为0。

### 3.2 空间电荷对绝缘纸板中电场强度的畸变作用

根据前述电势边界条件,结合仿真所得空间电

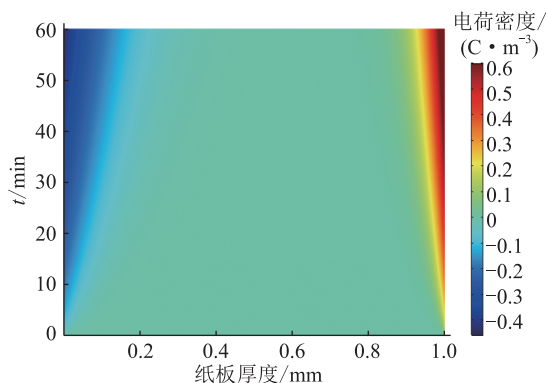


图7 空间电荷密度分布

Fig.7 Distribution of space charge density

荷密度,求解式(8)所示的泊松方程,得到图8的绝缘纸板内电场强度分布。

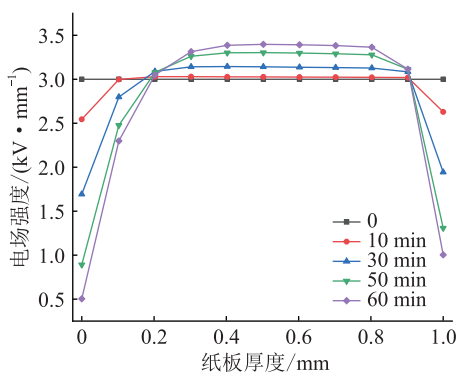


图8 电场强度分布

Fig.8 Electric field strength distribution

由图8可以看出,加压时间固定时,纸板厚度方向上的电场强度呈增加—稳定—降低的变化规律;加压时间增加时,纸板同一位置处的电场强度畸变程度加大。例如在纸板厚度0.02 mm处,当加压时间由0分别增至10 min,30 min,50 min,60 min时,电场强度由3 kV/mm分别变为2.72 kV/mm,2.01 kV/mm,1.31 kV/mm,0.97 kV/mm。在初始加压时刻,纸板中的电场强度等于外施直流电场的强度(3 kV/mm),随着加压时间增加,阴极积聚负极性电荷,使绝缘纸靠近阴极处的电场强度逐渐减小,原因为同极性电荷积聚削弱边界处的电场强度。

在绝缘纸板中部,其场强随加压时间的增加而明显增大。如在纸板厚度0.5 mm处,对应于加压时间0,10 min,30 min,50 min,60 min 电场强度分别为3 kV/mm,3.03 kV/mm,3.14 kV/mm,3.30 kV/mm,3.39 kV/mm。可见,由于空间电荷的存在,绝缘纸板中的电场强度发生了畸变。为便于描述,定义场强畸变率为:

$$D_e = \frac{E_{\max} - E_{\text{ave}}}{E_{\text{ave}}} \times 100\% \quad (10)$$

式中: $E_{\max}$ , $E_{\text{ave}}$ 分别为纸板中的最大场强和平均场强。根据式(10)计算纸板厚度0.5 mm处不同加压时间下的 $D_e$ ,如表2所示。可见,随着加压时间的延长,绝缘纸板中部的 $D_e$ 逐渐增大,当加压时间为60 min时,其最大值为13.0%。

表2 场强畸变率与时间的关系

Table 2 Relationship between time and electric field distortion

t/min	$D_e/\%$	t/min	$D_e/\%$
10	1.0	50	10.0
30	4.7	60	13.0

## 4 不同老化程度下绝缘纸聚合度与介电常数关系

### 4.1 绝缘纸板的老龄化特征量

绝缘纸板的聚合度和抗拉强度是表征绝缘老化程度的最可靠的判据。文献[24]研究表明,机-热协同老化作用要大于热老化作用,且机械振幅越大,纤维素的聚合度和抗拉强度下降越明显。或者说,不同老化程度下,绝缘纸的活化能和聚合度等化学特性也会发生一定变化<sup>[25]</sup>。

通常,绝缘材料活化能的变化影响其在直流系统中的非线性电导率,而聚合度与绝缘材料的相对介电常数有一定联系。根据文献[26]中对不同老化程度下纤维素绝缘纸频域介电谱特性的研究发现,随老化时间的增加,介损因数下降,说明其介电常数下降。在此变化趋势下,利用文献[26]中的数据,通过数据拟合得到绝缘纸板的聚合度差值与其相对介电常数的复合指数关系,如式(11)所示。

$$\varepsilon_r = 7e^{-6x^2} - 0.0021x + 2.8348 \quad (11)$$

式中: $\varepsilon_r$ 为绝缘纸板的相对介电常数; $x$ 为未老化时初始聚合度 $D_0$ 与老化时间 $t$ 后的聚合度 $D_t$ 之差<sup>[27]</sup>,即 $x=D_0-D_t$ 。式(11)表示 $\varepsilon_r$ 为其聚合度的函数,因此, $\varepsilon_r$ 也可作为表征绝缘纸板老化状态的特征量。采用文献[24]中给出的不同老化状态下纤维素绝缘纸聚合度,结合式(11)求得对应的 $\varepsilon_r$ ,见表3。

表3 聚合度与相对介电常数的关系

Table 3 Relationship between the degree of polymerization and the relative permittivity

老化时间/d	聚合度 $D$	$\varepsilon_r$
2	1 164	2.700 3
4	1 045	2.450 5
6	832	2.003 4
8	719	1.765 9
10	599	1.513 9

表3表明 $\epsilon_r$ 随老化时间的增加而降低,进一步验证了选取 $\epsilon_r$ 作为其老化特征量的可行性。

#### 4.2 不同老化状态下绝缘纸板中的空间电荷效应

选取表3中老化时间为2 d,6 d,10 d时的 $\epsilon_r$ ,并取加压时间为30 min,求得绝缘纸中的电场分布如图9所示。

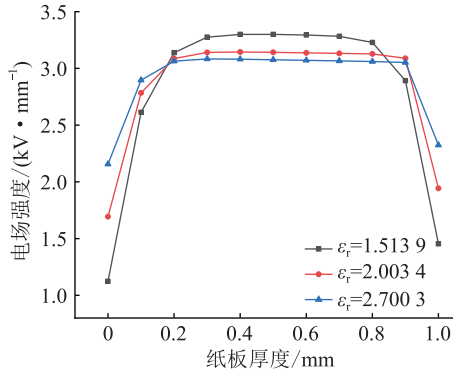


图9 绝缘纸老化程度与电场强度的关系

Fig.9 Relationship between insulating paper aging degree and electric field strength

由图9可知,随着 $\epsilon_r$ 减小,绝缘纸板靠近两电极侧的电场强度均出现畸变,且 $\epsilon_r$ 愈小,畸变愈严重。如在纸板厚度0.05 mm处,当 $\epsilon_r$ 由2.700 3分别变为2.003 4,1.513 9时,电场强度则由2.60 kV/mm分别变为2.38 kV/mm,2.03 kV/mm。靠近阳极侧的电场强度亦呈此规律。为分析其原因,进一步仿真得到加压30 min 纸板中净电荷密度的分布情况,如图10所示。

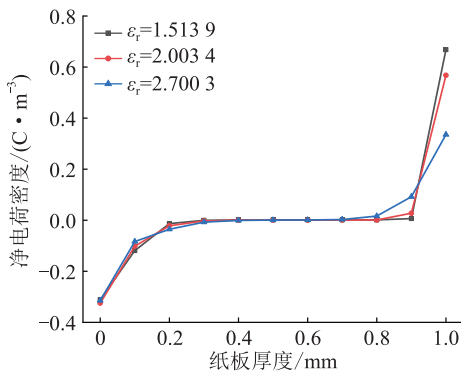


图10 绝缘老化程度与空间电荷之间的关系

Fig.10 Relationship between insulating paper aging degree and net space charge concentration

由图10可知,随着 $\epsilon_r$ 减小,在纸板相同位置处,绝缘纸阴极侧的电荷密度逐渐增加,电荷密度越大,其对绝缘纸板边界处的场强削弱越严重。同样随着 $\epsilon_r$ 的减小,阳极侧积聚的正电荷量逐渐增加,其对边界处的场强削弱程度增加,导致阳极侧的场强也随 $\epsilon_r$ 的减小而减小。结合图9可知,绝缘纸板

中部的场强随 $\epsilon_r$ 的减小是增加的,其原因为绝缘纸板老化越严重,靠近电极的两侧积聚的同极性电荷就越多,电荷积聚使边界处的场强削弱,进而使得绝缘纸板内侧场强增大。

#### 4.3 绝缘纸板老化与空间电荷间的作用机制

纸板老化过程中,将伴随其内部纤维素出现分叉、孔洞和断裂等现象<sup>[12]</sup>。这些物理变化或诱发纸板中的浅陷阱变为深陷阱;或使自由电荷入陷成为陷阱电荷(如陷阱电子和陷阱空穴),从而使得自由电荷更易被陷阱俘获;或致纸板中陷阱电荷增加,亦即由电极注入到纸板中的空间电荷等容易积聚于纸板的近电极侧,从而诱发纸板中的电场畸变。绝缘纸板老化越严重,其中陷阱密度或陷阱电荷的数量增加将越明显,纸板中电场畸变也越严重<sup>[28]</sup>。

从图9可看出,同一老化状态下绝缘纸近电极侧的电场强度 $E_e, E_h$ 低于中间部分的电场强度 $E_m$ ,原因为同极性空间电荷对纸板近电极侧电场强度的削弱效应。绝缘纸板中出现同极性电荷积聚时,其电场分布如图11所示。图11中, $E_m$ 方向由高压电极指向接地极,绝缘纸板两侧积聚的同极性电荷越多, $E_e, E_h$ 将越大,从而 $E_m$ 越大,同极性空间电荷对纸板近电极侧电场的削弱作用使得绝缘纸板外部击穿电压升高。

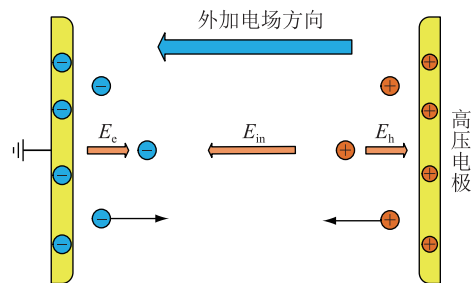


图11 同极性电荷分布

Fig.11 Schematic diagram of homopolar charge distribution

从微观角度分析,较高的场强促使绝缘纸板产生新的陷阱,捕获自由电荷形成陷阱电荷,而新形成的陷阱电荷也有一定几率逃脱陷阱的束缚再次变为自由电荷。电荷入陷、脱陷的过程均会释放和转移能量,同时陷阱电荷与异极性的自由电荷相复合产生中性粒子亦会使陷阱密度降低。随着绝缘纸板老化程度加深,纸板中不断地产生新陷阱,重复上述的电荷入陷、脱陷及复合过程,这种循环过程所释放出的能量累积至一定值,可能诱发局部放电并加速试样击穿。因此,在高场强下,绝缘纸板中空间电荷积聚量将增多,导致内部场强畸变,伴随纸板老化程度加重,空间电荷积聚效应愈发显



著,纸板中电场畸变也更为严重,进而又会进一步加速绝缘纸老化。

## 5 结论

文中采用双极性电荷输运模型,纳入了电子和空穴等载流子的迁移、入陷、脱陷、复合等物理过程,对绝缘纸板内的电场畸变机制效应进行了研究,对绝缘纸设计中抑制载流子迁移、减少空间电荷积聚范围、减缓绝缘纸老化具有一定的指导意义。得出以下结论:

(1) 外加电压作用下,由电极注入绝缘纸板中的同极性电荷会出现积聚现象,积聚位置为纸板的靠近电极侧,且因为负电荷具有较大的迁移率,使其积聚范围明显大于正电荷的积聚范围。随着加压时间的延长,上述积聚现象呈加重趋势。

(2) 随着绝缘纸板老化程度的加重,介质内部陷阱密度及陷阱深度增加,使得空间电荷更易被陷阱俘获且较难逃逸,微观上表现为纸板近电极侧空间电荷的积聚量呈增加趋势,导致纸板两侧电场强度被削弱的程度大,从而使绝缘纸的外部击穿电压升高。

### 参考文献:

- [1] 李长云,刘亚魁. 直流偏磁条件下变压器铁心磁化特性的 Jiles-Atherton 修正模型[J]. 电工技术学报,2017,32(19): 193-201.  
LI Changyun, LIU Yakui. Modified Jiles-Atherton model of transformer iron core magnetization characteristics with DC bias [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2017, 32(19): 193-201.
- [2] 张文峰,李英,周丹,等. 变压器绝缘击穿试验的油色谱分析[J]. 广东电力,2018,31(8):69-74.  
ZHANG Wenfeng, LI Ying, ZHOU Dan, et al. Oil chromatography analysis for transformer insulation breakdown [J]. Guangdong Electric Power, 2018, 31(8): 69-74.
- [3] 魏新劳,聂洪岩,陈庆国,等. 极性反转电压下油纸绝缘系统中电场分布[J]. 电机与控制学报,2010,14(11):27-30.  
WEI Xinlao, NIE Hongyan, CHEN Qingguo, et al. Analysis of electrical field on oil-paper insulation system under polarity reversal voltage [J]. Electric Machines and Control, 2010, 14(11): 27-30.
- [4] 廖瑞金,杨丽君,郑含博,等. 电力变压器油纸绝缘热老化研究综述[J]. 电工技术学报,2012,27(5):1-12.  
LIAO Ruijin, YANG Lijun, ZHENG Hanbo, et al. Reviews on oil-paper insulation thermal aging in power transformers [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2012, 27(5): 1-12.
- [5] 杨丽君,廖瑞金,孙会刚,等. 变压器油纸绝缘热老化特性及特征量研究[J]. 电工技术学报,2009,24(8):27-33.  
YANG Lijun, LIAO Ruijin, SUN Huigang, et al. Investigation on properties and characteristics of oilpaper insulation in transformer during thermal degradation process [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2009, 24(8): 27-33.
- [6] 周远翔,黄猛,戴超,等. 不同含水量油纸绝缘热老化过程中的空间电荷特性研究[J]. 高电压技术,2015,41(6): 1921-1928.  
ZHOU Yuanxiang, HUANG Meng, DAI Chao, et al. Effect of moisture on space charge characteristics of oil-paper insulation during thermal aging [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(6): 1921-1928.
- [7] 周远翔,戴超,黄猛,等. 电老化过程中直流电场对油纸绝缘空间电荷特性的影响[J]. 高电压技术,2016,42(12): 3861-3867.  
ZHOU Yuanxiang, DAI Chao, HUANG Meng, et al. Effect of DC electric field on space charge characteristics of oil-paper insulation in electrical aging process [J]. High Voltage Engineering, 2016, 42(12): 3861-3867.
- [8] 魏艳慧,穆海宝,朱明晓,等. 空间电荷对不同老化状态油纸绝缘击穿特性的影响[J]. 高电压技术,2015,41(9): 3066-3072.  
WEI Yanhui, MU Haibao, ZHU Mingxiao, et al. Influence of space charge on breakdown characteristics of oil-paper insulation with different aging status [J]. High Voltage Engineering, 2015, 41(9): 3066-3072.
- [9] 廖瑞金,李伟,杨丽君,等. 变压器油纸绝缘介质在直流电场中的空间电荷输运特性[J]. 高电压技术,2011,37(5): 1057-1065.  
LIAO Ruijin, LI Wei, YANG Lijun, et al. Space charge transport properties of oil-paper insulation materials under DC field used in transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(5): 1057-1065.
- [10] 周远翔,田冀焕,王云杉,等. 变压器油纸绝缘系统中的空间电荷现象[J]. 高电压技术,2011,37(3):520-527.  
ZHOU Yuanxiang, TIAN Jihuan, WANG Yunshan, et al. Space charge phenomenon in oil-paper insulation system of power transformer [J]. High Voltage Engineering, 2011, 37(3): 520-527.
- [11] 刘云鹏,刘贺晨,钟平,等. 直流电老化对 160 kV 直流电缆材料空间电荷分布特性的影响分析[J]. 绝缘材料,2017,50(3):37-42.  
LIU Yunpeng, LIU Hechen, ZHONG Ping, et al. Study on impact of DC electrical ageing on space charge distribution of 160 kV DC cable materials [J]. Insulating Materials, 2017, 50(3): 37-42.
- [12] 彭兆伟,关永刚,张灵,等.  $\beta$ 成核剂含量对等规聚丙烯电导电流和空间电荷特性的影响[J]. 电工技术学报,2019,34(7):1527-1535.  
PENG Zhaowei, GUAN Yonggang, ZHANG Ling, et al. Influence of  $\beta$ -nucleating agent content on conduction current and space charge characteristics in isotactic polypropylene [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2019, 34(7): 1527-1535.

- [13] 钟小燕,郑跃胜,缪希仁,等. 直流电场下聚合物空间电荷分布的极性效应[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6693-6701.  
ZHONG Xiaoyan,ZHENG Yuesheng,MIAO Xiren,et al. Polarity effect of polymer space charge distribution under DC electric field [J]. Proceedings of the CSEE, 2016, 36 ( 24 ): 6693-6701.
- [14] 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):1449-1449.  
LI Jin,LIANG Hucheng,DU Boxue,et al. Numerical simulation of interface charge behaviors between EPDM/LDPE for HVDC cable accessory insulation based on the bipolar charge transport model[J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1449-1449.
- [15] JIN S,RUAN J J,DU Z Y,et al. Charge Transport simulation in single-layer oil-paper insulation[J]. IEEE Transactions on Magnetics,2016,52(3):1-4.
- [16] 郝建,黄博,CHEN George,等. 空间电荷在多层结构油纸绝缘混合体系的积聚规律及其对电场分布的影响[J]. 高电压技术,2017,43(6):1973-1979.  
HAO Jian,HUANG Bo,CHEN George,et al. Space charge accumulation behavior of multilayer structure oil-paper insulation and its effect on electric field distribution [J]. High Voltage Engineering,2017,43(6):1973-1979.
- [17] 侯帅,惠宝军,傅明利,等. 交联聚乙烯挤出绝缘高压直流电缆全工况运行考核及温度梯度下空间电荷测量[J]. 高电压技术,2018,44(5):1467-1474.  
HOU Shuai,HUI Baojun,FU Mingli,et al. Performance evaluation for XLPE extruded insulation HVDC cable and space charge measurement under operating condition with temperature difference [J]. High Voltage Engineering,2018,44(5):1467-1474.
- [18] 秦司晨,屠幼萍,陈冰莹,等. 不同温度下环氧树脂空间电荷特性仿真研究[J]. 高压电器,2018,54(5):144-149.  
QIN Sichen,TU Youping,CHEN Bingying,et al. Simulation of space charge characteristics of epoxyresin at different temperatures [J]. High Voltage Apparatus,2018,54(5):144-149.
- [19] 姚俊严,李斯盟,李清泉,等. 正直流电压下油纸绝缘针板电极局放流注仿真研究 [J]. 高压电器,2018,54(11):194-199.  
YAO Junyan,LI Simeng,LI Qingquan,et al. Simulation of partial discharge streamer of needle plate electrode for oilpaper insulation under positive DC voltage [J]. High Voltage Apparatus,2018,54(11):194-199.
- [20] 孙云龙,李忠华,索长友. 电导非线性对 HVDC 电缆绝缘空间电荷动态过程的影响 [J]. 电机与控制学报,2019,23(7):27-37.  
SUN Yunlong,LI Zhonghua,SUO Changyou. Effect of nonlinear conductivity on dynamic process of space charge in HVDC cable insulation [J]. Electric Machines and Control,2019,23(7):27-37.
- [21] 吴建东. 低密度聚乙烯纳米复合介质中电荷输运的实验研究和数值模拟 [D]. 上海:上海交通大学,2012.  
WU Jiandong. Charge transport investigation in low-density polyethylene/silica nanocomposite based on experiment and numerical simulation [D]. Shanghai:Shanghai Jiao Tong University,2012.
- [22] BANDA M E,MALEC D,CAMBRONNE J P. Partial discharge risk under space charges generation and transport effects [C]//COMSOL Conference. Lausanne,Switzerland,2018:1-6.
- [23] JOY Y. Bipolar charge transport model of insulator for HVDC applications [C]//COMSOL Conference. Seoul, South Korea, 2015:1-8.
- [24] 李长云,王铮. 机-热协同作用下绝缘纸机械性能的劣化机理 [J]. 电工技术学报,2018,33(21):5090-5097.  
LI Changyun,WANG Zheng. The degradation mechanism of insulation paper mechanical properties with mechanical-thermal synergy [J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2018,33(21):5090-5097.
- [25] 段宗超,吴广宁,高波. 油纸绝缘频域介电谱特性与聚合度的关联影响规律研究 [J]. 电网技术,2014,38(10):2881-2887.  
DUAN Zongchao,WU Guangning,GAO Bo. Study of linkage effects between degree of polymerization and frequency domain dielectric spectroscopy characteristics of oil-paper insulation [J]. Power System Technology,2014,38(10):2881-2887.
- [26] 李长云,郝爱东. 机-热协同老化对纤维素绝缘纸频域介电谱特性的影响 [J]. 电工技术学报,2019,34(17):3705-3712.  
LI Changyun,HAO Aidong. Influence of the mechanical-thermal aging on the frequency-domain dielectric spectroscopy of cellulose insulation paper [J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(17):3705-3712.
- [27] 刘玲,汪林娜. 变压器油纸绝缘频域介电谱特性的研究与应用 [J]. 自动化与仪器仪表,2016(10):77-79.  
LIU Ling,WANG Linna. Study and application of frequency domain dielectric spectrum characteristics of oil-paper insulation for transformers [J]. Automation and Instrumentation, 2016(10):77-79.
- [28] 唐超. 油纸绝缘介质的直流空间电荷特性研究 [D]. 重庆:重庆大学,2010.  
TANG Chao. Studies on the DC space charge characteristics of oil-paper insulation materials [D]. Chongqing:Chongqing university,2010.

---

作者简介:



冀章

冀章(1994),男,硕士在读,研究方向为高电压与绝缘技术(E-mail:17852026060@163.com);

李长云(1974),男,博士,副教授,研究方向为高压/柔性直流输电、能源互联网中的绝缘技术。



## Simulation of space charge effect in insulating paper

Ji Zhang, Li Changyun

(College of Electrical Engineering and Automation, Shandong University of Science and Technology, Qingdao 266590, China)

**Abstract:** In order to clarify the distortion effect of space charge on the electric field intensity of insulation paperboard and the effect mechanism of degradation degree of paperboard and space charge, the bipolar carrier transport model is adopted to simulate characteristics of space charge in insulation paperboard with different degradation degree. When DC voltage is applied in the insulation paperboard with the same aging condition, the mono-polar charge accumulates in the paperboard, and the distribution range of positive polarity charge is significantly narrower than negative polarity. When the applied voltage time increases, the electric field distortion rate in paperboard also increases. When the degradation degree of insulation paperboard deepened, both the trap density and trap depth increase, resulting in a large amount of space charge accumulate in the paperboard adjacent both electrode sides, which further weakens the electric field intensity at the boundary of the paperboard and the electrode, and intensifies the field intensity distortion inside the paperboard. Moreover, the more serious the deterioration of insulation paperboard, the more prominent the distortion effect of space charge on the electric field. The degradation of paperboard is accelerated. On the other hand, the breakdown fault of paperboard is prone to be induced. The conclusions provide reference for the design of oil-paper insulation.

**Keywords:** space charge; insulation paper; bipolar charge transport model; electric field distortion; paperboard aging

(编辑 吴楠)

(上接第 119 页)

## Location and capacity selection method of EV charging stations considering transportation convenience and distribution network capacity

XU Jingzhou<sup>1</sup>, GE Leijiao<sup>2</sup>, YANG Changhai<sup>3</sup>, ZHANG Weiya<sup>1</sup>

(1. State Grid Nanjing Power Supply Company of Jiangsu Electric Power Co., Ltd., Nanjing 210019, China;

2. School of Electrical Information and Engineering, Tianjin University, Tianjin 300072, China;

3. State Grid Gansu Electric Power Company Economic Research Institute, Lanzhou 730050, China)

**Abstract:** Considering large-scale electric vehicle (EV) use is limited by transportation convenience and distribution network acceptance capacity, a location and capacity optimization planning method of EV charging stations is proposed. Firstly, the Monte-Carlo method is applied to analyze the load demand characteristics of EV connected to distribution network under two different scenarios of orderly charging and disordered charging. Secondly, a location and capacity optimization model of EV charging station is proposed, considering the transportation convenience and capacity of distribution network, and the particle swarm and Voronoi method are used to solve the model. The location selection of EV charging stations is determined, and the number of charging piles in each EV charging station is optimized. Finally, a case of the northern urban area verifies the rationality of the proposed optimization planning model, so as to provide reference for the planning and construction of EV charging stations in China.

**Keywords:** distribution network; electric vehicle (EV); charging station; optimization planning; particle swarm

(编辑 吴楠)