

引用格式:李岩,甄冠成,宋浩源,等.绝缘层温度对XLPE局部放电的影响特性[J].电力科学与技术学报,2024,39(6):260-268.

Citation: LI Yan, ZHEN Guancheng, SONG Haoyuan, et al. Influence characteristics of insulation layer temperature on partial discharge of XLPE[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 260-268.

## 绝缘层温度对 XLPE 局部放电的影响特性

李 岩<sup>1</sup>, 甄冠成<sup>1</sup>, 宋浩源<sup>1</sup>, 刘晓坤<sup>1</sup>, 梁雨薇<sup>1</sup>,  
乔俊杰<sup>1</sup>, 刘鑫月<sup>1</sup>, 王毛桃<sup>1</sup>, 翟志强<sup>2</sup>

(1. 华北电力大学电力工程系, 河北 保定 071003; 2. 保定天威保变电气股份有限公司, 河北 保定 071000)

**摘 要:** 交联聚乙烯 (cross-linked polyethylene, XLPE) 电缆是城市电网线路建设的首选。绝缘缺陷会导致局部放电, 影响电缆的绝缘性能甚至导致绝缘击穿、线路跳闸, 而且电缆在运行时处于不断地冷热循环中, 绝缘层温度会影响 XLPE 局部放电特性<sup>[1-2]</sup>。为了研究这一影响, 搭建针-板电极试验平台, 在不同温度下测量 XLPE 局部放电数据, 结果表明: 局部放电主要发生在工频周期的  $-10^{\circ}$ ~ $100^{\circ}$  及  $150^{\circ}$ ~ $265^{\circ}$  时, 呈“兔耳”状分布; 绝缘层温度升高会导致局部放电次数增多以及局部放电起始电压下降。利用 COMSOL-MATLAB 联合分析法建立带气隙的针-板结构模型, 对绝缘层温度影响下的局部放电现象进行仿真, 验证了上述试验结论, 说明了气隙的引入可以解释针-板电极中 XLPE 局部放电随绝缘层温度变化的规律, 而 XLPE 介电常数会随温度变化是导致局部放电起始电压降低的关键原因。本研究有助于探究 XLPE 局部放电受绝缘层温度影响的机理, 对电缆局部放电信号的分析及电缆状态评估有重要意义。

**关 键 词:** 交联聚乙烯电缆; 绝缘老化; 局部放电; 温度特性; 有限元分析; 局放检测

DOI: 10.19781/j.issn.1673-9140.2024.06.027 中图分类号: TM85 文章编号: 1673-9140(2024)06-0260-09

### Influence characteristics of insulation layer temperature on partial discharge of XLPE

LI Yan<sup>1</sup>, ZHEN Guancheng<sup>1</sup>, SONG Haoyuan<sup>1</sup>, LIU Xiaokun<sup>1</sup>, LIANG Yuwei<sup>1</sup>,  
QIAO Junjie<sup>1</sup>, LIU Xinyue<sup>1</sup>, WANG Maotao<sup>1</sup>, ZHAI Zhigang<sup>2</sup>

(1. Department of Electrical Engineering, North China Electric Power University, Baoding 071003, China;

2. Baoding Tianwei Baobian Electric Co., Ltd., Baoding 071000, China)

**Abstract:** Cross-linked polyethylene (XLPE) cables are the first choice for urban grid line construction. Insulation defects can lead to partial discharge, which affects the insulation performance of the cables and even leads to insulation breakdown and line tripping. At the same time, the cables undergo constant hot and cold cycles during operation, and the insulation layer temperature affects the partial discharge characteristics of XLPE. In order to study this effect, a pin-to-plane electrode experimental platform is set up to measure partial discharge data of XLPE at different temperatures, and the results show that partial discharge mainly occurs at  $-10^{\circ}$ ~ $100^{\circ}$  and  $150^{\circ}$ ~ $265^{\circ}$  of the frequency cycle, and its distribution looks like “rabbit ears”; an increase in the insulation layer temperature will lead to an increase in the number of partial discharges and a decrease in the initial voltage of partial discharges. The above experimental findings are verified by simulating the partial discharge phenomena under the influence of insulation layer temperature by using a joint COMSOL-MATLAB analysis to model the pin-to-plate structure with an air gap. The results show that the introduction of an air gap can explain the variation of partial discharge of XLPE with insulation layer temperature in the pin-to-plate electrode, and the variation of XLPE dielectric constant with temperature is the key reason for the decrease in the initial voltage of partial discharge. The results help to explore the mechanism of partial discharge of XLPE affected

收稿日期: 2023-04-13; 修回日期: 2023-08-30

基金项目: 中央高校基本科研业务费专项资金资助 (2022MS068, 20226932)

通信作者: 李 岩 (1985—), 男, 博士, 讲师, 主要从事电缆故障诊断、电缆仿真分析和绝缘等研究; E-mail: yanli@ncepu.edu.cn

by insulation layer temperature, which is important for the analysis of the partial discharge signal of cables and cable condition assessment.

**Key words:** cross-linked polyethylene cable; insulation aging; partial discharge; temperature characteristic; finite element analysis; partial discharge detection

发生在交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆中的局部放电对于电缆状态的影响和评估具有重要意义。首先,局部放电会引起带电粒子冲击绝缘,使绝缘的局部温度升高,而且其产生的臭氧及氮的氧化物会侵蚀绝缘,破坏固体电介质的绝缘性能,最终导致绝缘失效;其次,局部放电行为与固体电介质的特性密切相关,因此局部放电监测经常用于诊断电力电缆的绝缘状态<sup>[1-3]</sup>。电缆温度随负荷变化,由于新型电力系统建设的持续推进,电缆负荷的波动性持续增强,温度对电缆绝缘局部放电的影响值得关注。为了更好地掌握局部放电发展规律,充分利用局部放电信息实现电缆状态评估,绝缘层温度影响下的局部放电机制成为研究热点。

目前,学者们已经提出了大量的局部放电模型。文献[4]基于电路原理将气体击穿等效为电容的充放电搭建模型。文献[5]提出了一种涉及自由电子供应、表面电荷衰减等放电前后物理过程的局部放电模型。还有学者提出基于有限元方法的局部放电仿真模型,主要分为电导模型<sup>[6]</sup>和静电模型<sup>[7]</sup>。由于空腔局部放电和介质阻挡放电具有相似性,最初为介质阻挡放电设计的建模方法也在2000年后被应用于局部放电模拟<sup>[8]</sup>。但是,上述模型只考虑了常温下局部放电的特性,没有考虑温度变化对局部放电的影响。

对此,有学者针对局部放电在温度影响下的数学模型进行了探究。文献[9]认为局部放电导致的电子电离会使绝缘层温度升高,在此基础上构建了包含温度变化的局部放电模型,仿真结果表明温度升高会导致局部放电发生次数增加。文献[10]提出了有球形空腔的局部放电数学模型,通过引入空腔中的压力参数对温度进行精准控制,在多个温度下对局部放电现象进行了分析,发现随着温度的升高,局部放电的电荷量增多。文献[11]建立了针-板电极数学模型模拟电缆绝缘中的场强集中区域,提出温度升高使绝缘电导率增大,电导率随温度的变化将改变绝缘中电场分布。仿真发现,随着温度的增高,放电重复率随之增加,平均放电量增大。

然而,上述研究都只限于仿真分析,缺少试验数据与仿真结果的对比。因此,需要试验测试不同绝缘层温度下的局部放电数据,同时建立仿真模型进行对比分析,以此充分论证局部放电的温度特性。

本文搭建了基于针-板电极的试验平台,观测不同绝缘层温度下局部放电的特性。基于COMSOL-MATLAB联合仿真对试验结果进行分析,证明本文所提模型可以解释试验测试结果。

## 1 局部放电试验

XLPE中的局部放电和电树是同步出现的,研究表明不同工况下实际XLPE电缆中电树枝形态与针-板电极得到的结果趋势相同<sup>[12]</sup>,因此制作针-板试样开展试验。本试验试样为某商用过氧化物XLPE绝缘材料,该材料主要用于220 kV及以下电缆绝缘。针-板试样的制备过程及局放采集装置的组成介绍如下。

### 1.1 电树枝试验的针-板试样制备

首先将绝缘料放入定制的模具中,设置硫化机温度为110℃,压强为15 MPa,保持30 min使XLPE绝缘材料充分交联,随后利用水冷将硫化机温度降至常温以防止试样冷缩变形,最终获得130 mm×20 mm×5.5 mm的XLPE样条。

将制备的样条放入特制的插针模具中,加热试样使之软化,随后将针电极插入制备好的XLPE试样中并保持针尖距离试样底部(地电极)2 mm,最后将试样降至常温,在样品下端粘贴接地铜箔胶带。

### 1.2 试验装置搭建

电树和局部放电观测平台如图1所示,平台中的调压器控制高压工频变压器电压,并将其经保护电阻接到试样上,用电容分压器测量电压。温控系统由油循环加热装置构成,通过控制加热及循环开关的通断达到控温目的。电树装置观测系统主要实现对电树的实时观测,包括:透射光源、镜头、显微镜、电荷耦合器件(charge-coupled device, CCD)视频系统及计算机,同时采用特高频局部放电检测模块实时采集局部放电信号传送至工控机。

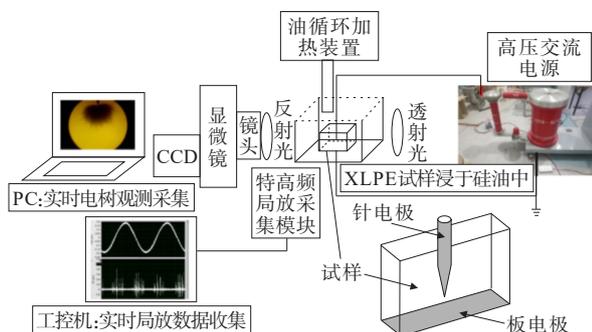


图1 电树和局部放电观测平台

Figure 1 Electric tree and partial discharge observation platform

### 1.3 试验过程

为了防止外界放电信号的耦合与干扰,整个试验过程均在屏蔽室内完成。本文利用制作好的样品进行试验,将针电极接至高压电源引出线,样品地电极(铜箔)与高压交流电源的地电极保持可靠连接,并使整个试样浸入二甲基硅油中,之后打开透射光电源,使光透过试样,将显微镜及CCD视频系统接入电脑中,通过调整移动试验平台捕获针尖处的图像,可观测电树生成及发展情况,通过工控机及特高频局部放电信号采集模块,可观测局部放电信号。试验利用逐级加压法,以工频电压4 kV作为起始施加电压,保持此电压30 s,若30 s内能够观测到电树枝的引发和局部放电信号,则认为该电压为电树/局部放电起始电压,若30 s后未出现电树/局部放电,则进行升压,每次升压幅度为1 kV,直至有电树枝/局部放电发生。

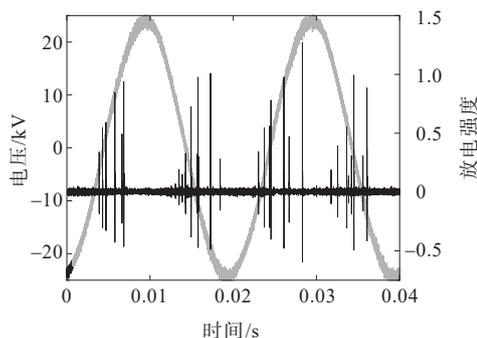
### 1.4 试验结果

通过试验发现,在没有起树时无局部放电信号,在起树时,马上出现局部放电信号,因此在具有针尖缺陷的电缆绝缘中,起树和局部放电信号的发生是同时的,起树电压和局部放电起始电压是相对应的,电树的引发和生长过程伴随着局部放电现象。图2展示了电树引发及电树起始时2个工频周期的局部放电信号。由图2可知,局部放电信号主要分布在第一及第三象限。

基于1 000个工频周期的放电信号,绘制出30℃下的局部放电相位谱图(phase resolved partial discharge, PRPD),如图3所示,并对放电的散点图进行了密度划分,密度大的呈浅色,密度小的呈深色。由图3可以发现,放电主要分布在 $-10^{\circ}\sim 100^{\circ}$ 及 $150^{\circ}\sim 265^{\circ}$ ,呈“兔耳”状。



(a) 电树引发



(b) 局部放电信号

图2 电树引发及局部放电信号

Figure 2 Electric tree initiation and partial discharge signals

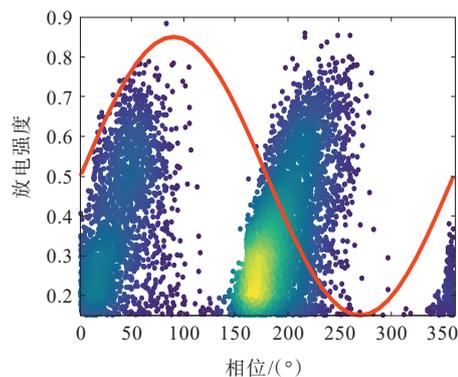


图3 局部放电PRPD谱图

Figure 3 PRPD spectrum of partial discharge

## 2 不同绝缘层温度下的局部放电测试

### 2.1 试验过程

为了探究绝缘层温度对局部放电过程的影响,分别在30℃、50℃、70℃及90℃下进行试验,测量局部放电起始电压。在相同条件下,每次的起始电压并不完全一致,因此参考文献[13],在每种温度情况下做10组试验。根据文献[14],利用威布尔分布对数据进行统计学处理,将产生局部放电概率为63.2%的电压作为该温度条件下的局部放电起始电压。

具体试验过程如下:首先将温控系统的测温传感器深入到油中贴近针电极附近,打开温控系统的加热及循环控制开关,使油温分布均匀,加热至指

定温度后停止,之后以 2 kV/s 的升压速度对样品施加电压,直至发生局部放电,每隔 1 s 以 2 MHz 的采样频率采集 2 个工频周期的局部放电信号,每隔 2 s 利用观测系统对电树的图像进行保存。

2.2 试验结果

多次试验后得到不同绝缘层温度下的局部放电起始电压,如图 4 所示。

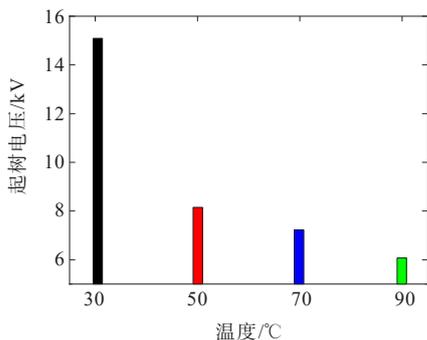


图 4 局部放电起始电压

Figure 4 Initial voltage of partial discharge

由图 4 可知,局部放电起始电压随绝缘层温度升高呈下降趋势。绝缘层温度为 30 °C 时起始电压为 15.09 kV,温度升高后起始电压分别为 8.15 kV (50 °C)、7.22 kV (70 °C)、6.07 kV (90 °C)。相比 30 °C 条件下,起始电压分别降低了 46.0%、52.2%、59.8%。

通过局部放电谱图对比了不同绝缘层温度的放电相位,发现温度升高后放电相位没有发生明显变化,与常温 30 °C 情况下一致,但温度升高后放电次数增多。图 5、6 分别以 50 °C 和 90 °C 时的 PRPD 谱图为例进行说明,与图 3 所示的 30 °C 结果相比,放电点密度增加,但相位基本不变。

以上试验表明,绝缘层温度升高使局部放电起始电压降低,从而导致局部放电更易发生,放电次数也随之增多。

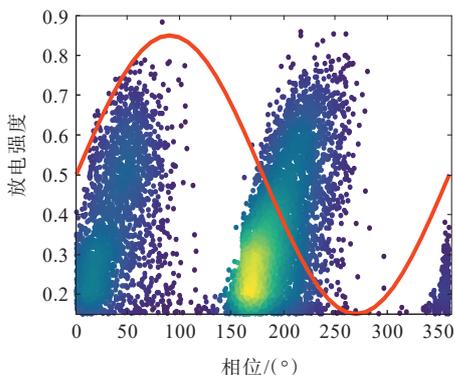


图 5 50 °C 时的 PRPD 谱图

Figure 5 PRPD spectra at 50 °C

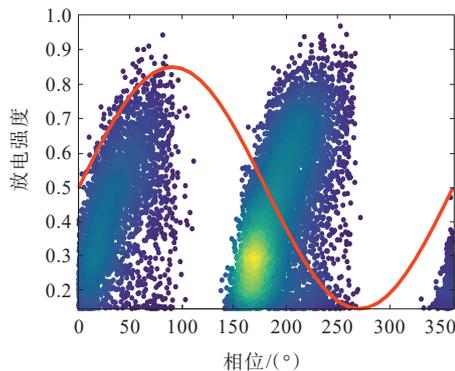


图 6 90 °C 时的 PRPD 谱图

Figure 6 PRPD spectra at 90 °C

3 绝缘层温度影响下的局部放电仿真分析

本文为了解释上述试验结果,搭建了局部放电仿真模型,通过 COMSOL-MATLAB 联合仿真方法对局部放电进行模拟。

3.1 有限元模型几何结构

采用商用有限元软件 COMSOL Multiphysics 构建的二维轴对称模型如图 7 所示,该模型由均质 XLPE 介电材料、半球形空腔和针尖组成,半球形空腔来自样片制备过程中不同材料的热致形变。绝缘材料采用厚度为 4 mm,直径为 10 mm 的 XLPE 材料。对称中心轴的半球形空腔直径为 0.04 mm。本仿真采用电流物理场,在针尖施加交流正弦电压,而下电极始终接地。XLPE 的相对介电常数设置为 1.85,电导率设置为  $1 \times 10^{-18}$  S/m。在 MATLAB 中调用 COMSOL 文件编写程序进行循环仿真。

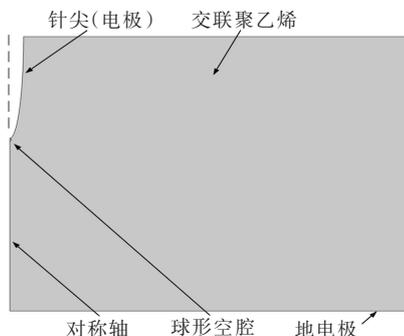


图 7 二维轴对称模型

Figure 7 Two-dimensional axisymmetric model

3.2 局部放电起始条件

局部放电的产生须满足 2 个条件:首先,空腔内的电场强度  $E_{cav}$  必须超过起始电场  $E_{inc}^{[15]}$ ;其次,必须存在初始自由电子以启动电离过程<sup>[16]</sup>。对于球形空腔, $E_{inc}^{[17]}$ 为

$$E_{\text{inc}} = \left( \frac{E}{p} \right)_{\text{cr}} p \left[ 1 + \frac{B}{(pl)^n} \right] \quad (1)$$

式中,  $E$  为电场强度;  $p$  为空腔内的气体压力;  $(E/p)_{\text{cr}}$  为当  $\alpha = \eta$  时的临界电场,  $\alpha$  为气体电离系数,  $\eta$  为气体附着系数;  $B, n$  为常数;  $l$  为平行于施加电场的空腔高度<sup>[18]</sup>。对于空腔内气体,  $(E/p)_{\text{cr}} = 4.2 \text{ V} \cdot \text{Pa}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ,  $B = 8.6 \text{ Pa}^{1/2} \text{m}^{1/2}$ ,  $n = 0.5$ <sup>[17]</sup>。

初始自由电子主要由表面电离和体积电离产生。空腔中单位时间内通过表面电离产生的自由电子数  $N_{\text{PD}}$ <sup>[18]</sup> 为

$$N_{\text{PD}} = N_{\text{es0}} \left| \frac{E_{\text{cav}}(t_{\text{PD}})}{E_{\text{inc}}} \right| \quad (2)$$

式中,  $E_{\text{cav}}(t_{\text{PD}})$  为上一次发生局部放电时空腔中的场强<sup>[18]</sup>;  $t_{\text{PD}}$  为上一次发生局部放电的时间;  $N_{\text{es0}}$  为当空腔内场强到达  $E_{\text{inc}}$  时每单位时间在空腔中产生的自由电子数量,  $N_{\text{es0}}$  分为值较高的  $N_{\text{es0H}}$  和值较低的  $N_{\text{es0L}}$  2 个取值。局部放电发生时, 若空腔中  $E_{\text{cav}}(t)$  电场的极性与前一次局部放电期间  $E_{\text{cav}}(t_{\text{PD}})$  的极性相同, 电子从空腔表面脱离的概率较低,  $N_{\text{es0}}$  取较低的值  $N_{\text{es0L}}$ 。若  $E_{\text{cav}}(t)$  和  $E_{\text{cav}}(t_{\text{PD}})$  的极性相反, 电子从空腔表面脱离的概率较高, 因此,  $N_{\text{es0}}$  取较高的值  $N_{\text{es0H}}$ <sup>[18]</sup>。

由表面电离得到的电子生成率  $N_{\text{es}}(t)$  随电场强度呈指数增长, 其定义<sup>[19]</sup> 为

$$N_{\text{es}}(t) =$$

$$N_{\text{PD}} \exp[-(t - t_{\text{PD}})/\tau_{\text{dec}}] \exp \left| \frac{E_{\text{cav}}(t_{\text{PD}})}{E_{\text{inc}}} \right| \quad (3)$$

式中,  $\tau_{\text{dec}}$  为有效电荷衰减时间常数;  $(t - t_{\text{PD}})$  为自上一次局部放电后经过的时间<sup>[19]</sup>。

初始自由电子也可以通过体积电离产生。由于体积电离导致的电子生成率定义为每单位时间通过体积电离在空腔中产生的自由电子的数量  $N_{\text{ev}}$ , 该值取决于空腔的半径和腔中的气压。因此, 单位时间  $t$  内的总电子生成率  $N_{\text{et}}(t)$  可以定义为由表面电离引起的电子生成率  $N_{\text{es}}(t)$  和由体积电离引起的电子生成率  $N_{\text{ev}}(t)$  的总和<sup>[20]</sup>:

$$N_{\text{et}}(t) = N_{\text{es}}(t) + N_{\text{ev}}(t) \quad (4)$$

需要注意的是, 对于尚未发生局部放电的空腔,  $N_{\text{et}}(t)$  仅取决于  $N_{\text{ev}}(t)$ <sup>[21]</sup>。

当满足  $E_{\text{cav}} \geq E_{\text{inc}}$  时, 定义局部放电发生的概率  $L(t)$  取决于  $N_{\text{et}}(t)$  和无局部放电期间的时间步长  $t_0$ <sup>[7,8,14]</sup>, 如下:

$$L(t) = \begin{cases} N_{\text{et}}(t) \cdot t_0, & E_{\text{cav}} \geq E_{\text{inc}} \\ 0, & E_{\text{cav}} < E_{\text{inc}} \end{cases} \quad (5)$$

通过  $L(t)$  对初始自由电子是否能达到局部放电的条件进行判断<sup>[20-21]</sup>。当  $E_{\text{cav}} \geq E_{\text{inc}}$  时, 将  $L(t)$  与  $R(0 \sim 1)$  均匀分布的随机数) 进行比较, 只有当  $L(t) > R$  时, 局部放电才会发生。当  $E_{\text{cav}} < E_{\text{inc}}$  时, 局部放电发生概率为 0。

### 3.3 局部放电过程模拟

空腔电导率是影响腔内电场分布的主要因素, 当满足上述局部放电起始条件后, 空腔电导率将随着局部放电的发生而增大, 导致空腔内电压降低<sup>[22]</sup>, 可表示为

$$\sigma_c = \sigma_{\text{cav0}} \exp \left( \left| \frac{U_{\text{cav}}}{U_{\text{inc}}} \right| + \left| \frac{I_{\text{cav}}}{I_{\text{cri}}} \right| \right) \quad (6)$$

式中,  $\sigma_{\text{cav0}}$  为气体电导率;  $U_{\text{cav}}$  为与空腔电场  $E_{\text{cav}}$  相对应的空腔电压;  $U_{\text{inc}}$  为与起始电场  $E_{\text{inc}}$  相对应的起始电压;  $I_{\text{cav}}$  为通过空腔的传导电流;  $I_{\text{cri}}$  为雪崩的临界电流<sup>[15,22]</sup>。

空腔电导率有上限值  $\sigma_{\text{c,max}}$ , 可以计算<sup>[22]</sup> 如下:

$$\sigma_{\text{c,max}} = \frac{\alpha e^2 N_e \lambda_e}{m_e c_e} \quad (7)$$

$$N_e = \frac{q_{\text{max}}}{\frac{4}{3} \pi e r^3} \quad (8)$$

式(7)、(8)中,  $c_e$  为电子热运动速度;  $\lambda_e$  为电子的平均自由程;  $\alpha$  为与电子能量分布和平均自由程相关的系数;  $r$  为空腔半径;  $e$  和  $m_e$  分别为基本电荷及其质量;  $q_{\text{max}}$  为通过测量结果确定的最大电荷量, 取值为  $2000 \text{ pC}$ <sup>[23]</sup>。空腔电导率相关参数取值<sup>[22]</sup> 如表 1 所示。

表 1 空腔电导率相关参数取值

Table 1 Related parameters of cavity conductivity

$\alpha$	$\lambda_e/\mu\text{m}$	$c_e/(\text{ms}^{-1})$	$e/\text{C}$	$m_e/\text{kg}$
0.85	4	$3 \times 10^{18}$	$1.602 \times 10^{-19}$	$9.109 \times 10^{-31}$

局部放电过程中产生的电荷可以通过几种方式衰减, 如离子漂移引起的电荷中和、电荷衰减和表面传导<sup>[23]</sup>, 其中, 后者被视为主导效应。表面电导率  $\sigma_s$ <sup>[24]</sup> 为

$$\sigma_s = \sigma_{s0} \exp \left( \alpha_1 \left| \frac{E_{\text{cav}}(t)}{E_{\text{inc}}} \right| \right) \quad (9)$$

式中,  $\sigma_{s0}$  为初始表面电导率, 取值为  $1 \times 10^{-18} \text{ S} \cdot \text{m}^{-1}$ ;  $\alpha_1$  为表面导电性的相关系数, 取值为  $10 \text{ mm/kV}$ <sup>[24]</sup>。

### 3.4 局部放电结束条件

电导率的增加导致空腔内电场强度降低, 直到电场衰减到局部放电终止的临界场强, 称为终止电场  $E_{\text{ext}}$ 。终止电场可以由测量得到的最小放电电量确

定,本文取  $E_{ext}$  为  $1 \text{ kV/mm}^{[25]}$ 。

### 3.5 建模流程

局部放电建模流程如图 8 所示。首先通过有限元模型获得电场分布,以评估局部放电发生要求,仿真持续进行直到满足 2 个局部放电发生条件的时刻。在局部放电发生的时间内,空腔及其表面的导电性增强,空腔内场强降低,再次通过有限元方法计算电场强度,判断局部放电是否结束。由于局部放电的时间极短(纳秒级),因此采用变步长仿真方法,局部放电发生时,时间步长设置为纳秒级;局部放电结束后,时间步长设置为微秒级。通过 MATLAB 设定相关判据实现对局部放电开始(结束)的判定并自动改变步长。仿真设置最大时长,当到达设定的最大时长时结束仿真程序。

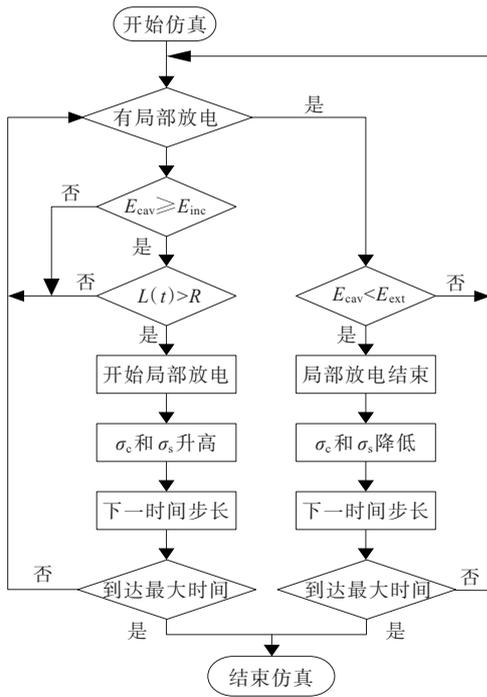


图 8 局部放电建模流程

Figure 8 Partial discharge modeling process

### 3.6 仿真结果

图 9 展示了施加 50 Hz 交流正弦电压时局部放电  $\varphi$ - $q$ - $n$  谱图,纵坐标表示局部放电产生的电荷量,圆点数量对应局部放电发生的次数。从图 9 可以清楚地看到“兔耳”形状,当空腔中的电压极性在前后 2 次局部放电之间变化时,式(2)中的  $N_{es0}$  取较大的值  $N_{esOH}$ ,表面电离产生的自由电子数增多,使得下一次局部放电发生的概率增大,从而导致局部放电的相位分布呈“兔耳”形状。

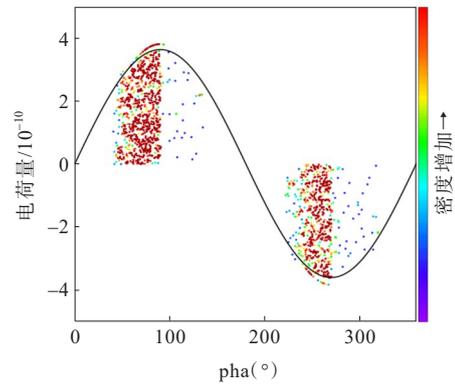


图 9 局部放电  $\varphi$ - $q$ - $n$  谱图

Figure 9  $\varphi$ - $q$ - $n$  spectrum of partial discharge

### 3.7 绝缘层温度对局部放电的影响仿真

绝缘层温度的变化会引起材料参数的变化,同时还会对空腔内的气压产生影响,从而影响局部放电的起始电压。但由于材料在热应力作用下产生的气泡内部气压极低,可以认为极低气压的空腔内部放电起始电压恒定<sup>[26]</sup>,因此只需要考虑温度变化对材料参数的影响。

利用介质损耗测试仪测量不同温度下 XLPE 的相对介电常数,如表 2 所示,可见温度升高会导致 XLPE 的相对介电常数降低。

表 2 不同温度下 XLPE 的相对介电常数

Table 2 Relative dielectric constant of XLPE at different temperatures

温度/°C	相对介电常数
30	2.34
50	2.08
70	1.77
90	1.73

### 3.8 仿真结果及分析

改变材料的相对介电常数以体现绝缘层温度变化对材料的影响,通过 COMSOL-MATLAB 联合仿真模拟不同温度下的局部放电现象。仿真分析了 4 个温度下空腔内的电场强度,如图 10 所示。

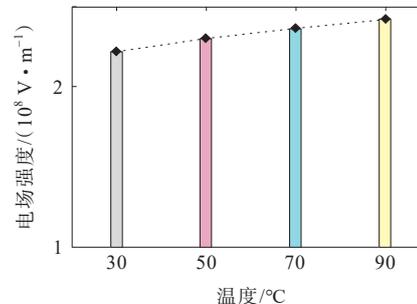


图 10 空腔内的电场强度

Figure 10 Electric field strength in cavity

根据图10所示的COMSOL仿真可得,空腔内电场强度随XLPE的相对介电常数降低呈上升趋势,这将导致空腔内电场强度更快地达到局部放电起始电场,从而在较低的施加电压下触发局部放电。

为了分析图10结果,建立有限元模型等效电容如图11所示,空腔电容分成了与针尖直接接触的 $C_{q1}$ 和与针尖没有直接接触的 $C_{q2}$ 。XLPE电容分成了与针尖直接接触的 $C_{m1}^*$ 、靠近地电极的 $C_{m2}$ 和余下部分 $C_{m3}^*$ 。搭建模型等效电路如图12所示, $C_{q1}$ 和图11中 $C_{m1}^*$ 等效后的 $C_{m1}$ 组成了并联结构, $C_{q2}$ 和 $C_{m2}$ 组成了串联结构,同时与图11中 $C_{m3}^*$ 等效后的 $C_{m3}$ 并联。

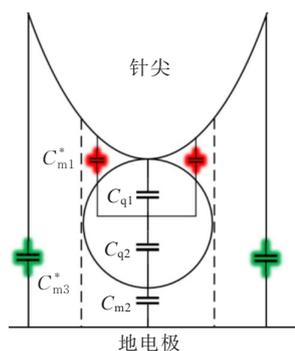


图11 模型等效电容

Figure 11 Equivalent capacitance of model

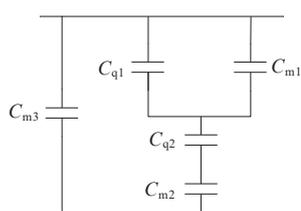


图12 模型等效电路

Figure 12 Equivalent circuit of model

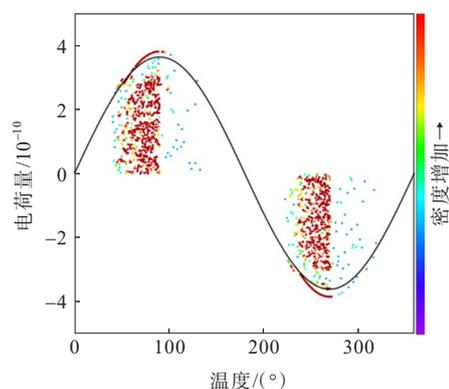
在图12中,借鉴局部放电“三电容”模型<sup>[13]</sup>,等效电容大小关系为 $C_{m3} \gg C_{m1} \gg C_{q1} (C_{q2}) \gg C_{m2}$ 。由于 $C_{m1} \gg C_{q1}$ ,在 $C_{m1}$ 与 $C_{q1}$ 的并联电路中可以忽略 $C_{q1}$ ,即可以看作 $C_{m1}$ 与 $C_{q2}$ 、 $C_{m2}$ 串联。当XLPE的相对介电常数降低时, $C_{m1}$ 与 $C_{m2}$ 的值会随之减小,同时 $C_{q1}$ 和 $C_{q2}$ 的值不变。根据电容分压计算,这将导致 $C_{q1}$ 与 $C_{m1}$ 的并联电路两端电压增大,从而使与针尖直接接触的部分空腔电场强度增大,与图10中仿真得到的结果一致。

将图10所示的仿真结果与图4的试验结果对比,图10中的电场强度随着温度的升高而增加,即

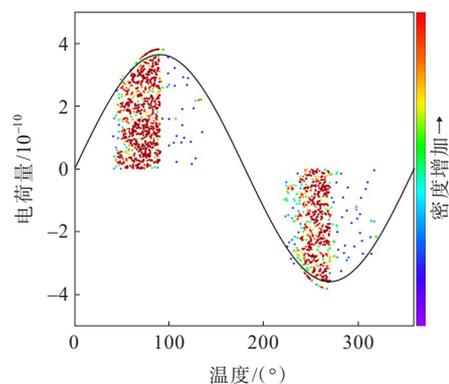
更容易引发放电,因此更高的绝缘温度对应更低的局部放电起始电压,与图4的试验结果一致。

仿真得到了不同绝缘层温度的局部放电数据,统计了50℃及90℃下局部放电的放电次数和放电量并绘制了 $\varphi$ - $q$ - $n$ 谱图,如图13所示。相较于50℃的谱图中,90℃谱图中局部放电分布在 $-10^\circ \sim 100^\circ$ 及 $150^\circ \sim 265^\circ$ 的散点面积增大,表明局部放电次数随温度升高而增多。

将图13所示的仿真结果与图5、6的试验结果对比,可以发现仿真与试验结果一致,绝缘层温度升高使放电次数增多。



(a) 50℃



(b) 90℃

图13 50℃和90℃下局部放电 $\varphi$ - $q$ - $n$ 谱图

Figure 13  $\varphi$ - $q$ - $n$  spectra of partial discharge at 50℃ and 90℃

## 4 结语

本文搭建了针-板电极局部放电观测及数据采集平台,测量了不同绝缘层温度下局部放电数据,利用COMSOL-MATLAB联合仿真方法构建了局部放电的数学模型,对观测到的局部放电现象进行分析,得到如下结论。

1) XLPE 试样中局部放电现象的产生主要受起始电场和电子生成率影响。放电相位主要分布于一、三象限,呈“兔耳”状。随着绝缘层温度升高,局部放电起始电压降低,放电次数增加。

2) 本文搭建了带空腔的COMSOL-MATLAB联合仿真模型,实测了不同温度下的XLPE相对介电常数,发现温度升高会导致该参数降低,基于测试数据仿真空腔内的电场,发现场强随绝缘层温度升高而增强,造成升温后局部放电起始电压降低且次数增多,解释了本文试验现象。

#### 参考文献:

- [1] PAN C, WU K, DU Y, et al. Comparison of Sato's equation and Pedersen's theory to obtain gas discharge current[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(3):1690-1698.
- [2] PAN C, TANG J, SONG W B, et al. Investigation of cavity PD physical processes at DC voltage by simulation[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering,2018,13(10):1376-1383.
- [3] 杨朝锋,王敏,赵胜男,等.基于深度学习融合的高压电缆局部放电诊断算法研究[J].高压电器,2023,59(11):65-73.  
YANG Chaofeng, WANG Min, ZHAO Shengnan, et al. Research on partial discharge diagnosis algorithm for high voltage cable based on deep learning fusion method [J]. High Voltage Apparatus,2023,59(11):65-73.
- [4] WANG L, CAVALLINI A, MONTANARI G C, et al. Evolution of PD patterns in polyethylene insulation cavities under AC voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19(2): 533-542.
- [5] ILLIAS H A, TUNIO M A, MOKHLIS H, et al. Determination of partial discharge time lag in void using physical model approach[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(1): 463-471.
- [6] NIEMEYER L. A generalized approach to partial discharge modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,1995,2(4):510-528.
- [7] ILLIAS H, CHEN G, LEWIN P L. Partial discharge behavior within a spherical cavity in a solid dielectric material as a function of frequency and amplitude of the applied voltage[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2011,18(2):432-443.
- [8] FORSSEN C, EDIN H. Partial discharges in a cavity at variable applied frequency part 2: measurements and modeling[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2008,15(6):1610-1616.
- [9] ILLIAS H A, CHEN G, LEWIN P L. The influence of spherical cavity surface charge distribution on the sequence of partial discharge events[J]. Journal of Physics D: Applied Physics,2011,44(24):245202.
- [10] NYAMUPANGEDENGU C, JANDRELL I R. Partial discharge spectral response to variations in the supply voltage frequency[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2012,19(2):521-532.
- [11] PAN C, WU K, MENG Y P, et al. The effect of discharge area variation on stochastic characters of PD magnitude [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):217-226.
- [12] 吴勇,袁军芳,严波,等.一起基于特高频法的电缆局部放电带电检测与定位案例分析[J].电线电缆,2017(6):28-31.  
WU Yong, YUAN Junfang, YAN Bo, et al. A case study of cable partial discharge live detection and location based on UHF method[J]. Wire & Cable,2017(6):28-31.
- [13] FINIS G, CLAUDI A. On the dielectric breakdown behavior of silicone gel under various stress conditions [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2007,14(2):487-494.
- [14] ILLIAS H A, CHEN G, LEWIN P L. Comparison between three-capacitance, analytical-based and finite element analysis partial discharge models in condition monitoring [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2017,24(1):99-109.
- [15] KUMARA S, SERDYUK Y V, GUBANSKI S M. Surface charge decay on polymeric materials under different neutralization modes in air[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2011, 18(5): 1779-1788.
- [16] PAN C, CHEN G, TANG J, et al. Numerical modeling of partial discharges in a solid dielectric-bounded cavity: a review[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2019,26(3):981-1000.
- [17] PAN C, WU K, DU Y, et al. The effect of surface charge decay on the variation of partial discharge location[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation,2016,23(4):2241-2249.
- [18] MAHDIPOUR M, AKBARI A, WERLE P. Charge concept in partial discharge in power cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2017,24(2):817-825.

- [19] SHAHSAVARIAN T, SHAHRTASH S M. Modelling of aged cavities for partial discharge in power cable insulation[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2015,9(6):661-670.
- [20] HE M, HAO M, CHEN G, et al. Numerical modelling on partial discharge in HVDC XLPE cable[J]. COMPEL-the International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2018,37(2):986-999.
- [21] ILLIAS H A, TUNIO M A, BAKAR A H A, et al. Partial discharge phenomena within an artificial void in cable insulation geometry: experimental validation and simulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016,23(1):451-459.
- [22] GOUDA O E, ELFARSKOURY A A, ELSINNARY A R, et al. Investigating the effect of cavity size within medium-voltage power cable on partial discharge behaviour[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2018,12(5):1190-1197.
- [23] ILLIAS H, CHEN G, LEWIN P L. Modeling of partial discharge activity in spherical cavities within a dielectric material[J]. IEEE Electrical Insulation Magazine, 2011,27(1):38-45.
- [24] NASR ESFAHANI A, SHAHABI S, KORDI B. Partial discharge detection and identification at low air pressure in noisy environment[J]. High Voltage, 2021, 6(5): 850-860.
- [25] 庞圣养. 交联聚乙烯电缆局放检测技术综述[J]. 电力安全技术, 2021,23(10):17-21+25.
- PANG Shengyang. Overview on partial discharge detection technology for XLPE cable[J]. Electric Safety Technology, 2021,23(10):17-21+25.
- [26] 辛文成, 姚森敬, 陈浩敏, 等. 计及电磁模态高频信号的局部放电模式识别方法[J]. 电力科学与技术学报, 2022, 37(6):108-115.
- XIN Wencheng, YAO Senjing, CHEN Haomin, et al. Pattern recognition of UHF signals in partial discharge considering electromagnetic model[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2022,37(6):108-115.

(上接第 250 页 Continued from page 250)

- DENG Huiqiong, ZHANG Xiaofei, ZENG Fangan, et al. Orderly charging and discharging scheduling strategy of electric vehicle based on dynamic TOU price[J]. Journal of Hebei University of Science and Technology, 2022, 43(3):240-248.
- [20] 陈嘉德, 徐海博, 孙瑞雪, 等. 基于多时段动态电价的电动汽车有序充电策略优化[J]. 东北电力技术, 2023, 44(2):40-46.
- CHEN Jiade, XU Haibo, SUN Ruixue, et al. Strategy optimization of electric vehicles orderly charging based on multi period dynamic electricity price[J]. Northeast Electric Power Technology, 2023, 44(2):40-46.
- [21] 万玉良, 尚国政, 刘蒙聪, 等. 考虑源荷不确定性的分时电价动态修正机制研究[J]. 太阳能学报, 2022, 43(11): 493-500.
- WAN Yuliang, SHANG Guozheng, LIU Mengcong, et al. Research on dynamic correction mechanism of time-of-use electricity price considering uncertainty of source and load[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2022, 43(11): 493-500.
- [22] XUE W L, ZHAO X, LI Y, et al. Research on the optimal design of seasonal time-of-use tariff based on the price elasticity of electricity demand[J]. Energies, 2023, 16(4): 1625.
- [23] 舒印彪, 张智刚, 郭剑波, 等. 新能源消纳关键因素分析及解决措施研究[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(1):1-9.
- SHU Yinbiao, ZHANG Zhigang, GUO Jianbo, et al. Study on key factors and solution of renewable energy accommodation[J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(1): 1-9.
- [24] 白雪岩, 樊艳芳, 刘雨佳, 等. 考虑可靠性及灵活性的风光储虚拟电厂分层容量配置[J]. 电力系统保护与控制, 2022, 50(8):11-24.
- BAI Xueyan, FAN Yanfang, LIU Yujia, et al. Wind power storage virtual power plant considering reliability and flexibility tiered capacity configuration[J]. Power System Protection and Control, 2022, 50(8):11-24.
- [25] 于德新, 田秀娟, 杨兆升. 基于改进 FCM 聚类的交通控制时段划分[J]. 华南理工大学学报(自然科学版), 2016, 44(12):53-60.
- YU Dexin, TIAN Xiujuan, YANG Zhaosheng. Division of traffic control periods based on improved FCM clustering[J]. Journal of South China University of Technology (Natural Science Edition), 2016, 44(12): 53-60.