第 50 卷 第 1 期：348-358 高电压技术 Vol.50, No.1: 348-358
2024 年 1 月 31 日 High Voltage Engineering January 31, 2024
DOI: 10.13336/j.1003-6520.hve.20221932

交联聚乙烯直流电树枝降压阶段的局部放电特性

林国海[1]，张洪亮[1]，郑　喆[1]，王亚林[1]，周明瑜[2]，尹　毅[1]
（1. 上海交通大学电气工程系，上海 200240；2. 全球能源互联网欧洲研究院，柏林 DE-10623）

摘　要：电树枝是交联聚乙烯(XLPE)高压直流电缆的典型缺陷，有效检测电树枝对电缆绝缘状态评估至关重要。为此对含有电树枝的 XLPE 针-板绝缘试样进行直流局部放电实验，分析不同阶段下的局部放电特性以及电压参数对放电特性的影响。实验发现：含电树枝的试样在降压过程中会出现局部放电现象，不含电树枝的试样则不会放电；降压过程中的放电具有良好的重复性，对电树枝尺寸无明显影响，且放电脉冲极性与恒压阶段的相反。该实验现象表明利用降压阶段的局部放电检测，可为高压直流电缆电树枝的评估提供一种有益的尝试。此外，实验表明多次局部放电可能导致通道电导率增加，放电熄灭电压增大。不同电压参数下的降压阶段实验结果表明：更高的直流电压，合适的降压速率可以增加放电次数；针电极为负极性时平均放电量更高；恒压时长对放电特性没有显著影响。采用数值仿真分析了降压前后绝缘区域的电场分布，结果表明降压前期，泊松电场的衰减速率低于外施电场的衰减速率，使得针尖附近形成场强较高的反向电场，从而导致降压过程中的局部放电。
关键词：交联聚乙烯；直流电树枝；局部放电；空间电荷；绝缘诊断

Partial Discharge Characteristics of DC Electrical Tree in XLPE During Voltage Drop

LIN Guohai[1], ZHANG Hongliang[1], ZHENG Zhe[1], WANG Yalin[1], ZHOU Mingyu[2], YIN Yi[1]
(1. Department of Electrical Engineering, Shanghai Jiao Tong University, Shanghai 200240, China;
2. Global Energy Interconnection Research Institute Europe GmbH, Berlin DE-10623, Germany)

Abstract: The electrical tree is a typical defect of XLPE HVDC cables. Effective detection of the tree is of vital importance for the evaluation of cable insulation status. In this paper, DC partial discharge (PD) experiments were carried out on the XLPE insulation samples with electrical trees. The characteristics of PD at different stages and voltage parameters were analyzed. It is found that PD occurs in the samples with electrical tree defects during the DC voltage drop, while the samples without electrical trees have no PD. The polarity of the PD during the voltage drop is opposite to that in the constant voltage stage. The PD shows good repeatability and has a negligible effect on the tree size. The experiment shows that the PD detection in the voltage drop stage can provide a reference for the evaluation of the electrical tree of HVDC cables. In addition, the experiment shows that multiple PD may lead to the increase of tree conductivity and PD extinction voltage. The experimental results of different voltage parameters show that higher DC voltage and appropriate voltage reduction rate can increase the PD number. The average PD amplitude is higher when the needle electrode suffers negative voltage. Constant voltage duration time has a negligible effect on PD characteristics. Numerical simulation was used to analyze the electric field in the insulation during the voltage drop. The study shows that the attenuation rate of the Poisson electric field is lower than that of the applied electric field in the early stage, which results in the formation of a reverse electric field with high intensity around the needle tip, thus resulting in PD during the voltage drop.
Key words: XLPE; DC electrical tree; partial discharge; space charge; insulation diagnosis

0　引言

交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电力电缆凭借工作温度高，输送功率大等优点在高压直流输电工程中得到广泛应用[1-3]。然而，XLPE 电缆的生产过程中可能会引入气隙和杂质等缺陷，在外电场等因素的作用下，这些缺陷会导致电场集中，逐步产生局部放电现象，并伴随着电树枝的引发及生长，由此导致 XLPE 绝缘性能下降[4]。如果任由电树枝生长，将最终导致电缆击穿，从而严重影响高压直流电缆的运行安全[5-6]。

为此国内外学者对 XLPE 绝缘直流电树枝与局部放电进行了大量的研究，研究表明电树枝的生长

基金资助项目：国家电网公司总部科技项目(5500-202158298A-0-0-00)。
Project supported by Science and Technology Project of SGCC (5500-202158298A-0-0-00).

与温度和电压极性等因素密切相关。在室温或较低温下，电压幅值较低时直流电树枝生长主要出现在升压阶段，而恒压阶段生长速率缓慢，甚至难以观测到电树枝的生长[7-9]；而当电压进一步提高时，电树枝会在极短时间内生长至地电极进而击穿[10]。当温度升高到 50 ℃及以上时，研究表明在恒压下也能观测到电树枝逐渐向地电极生长，并伴随着局部放电，随着电树枝长度和宽度的增加，局部放电幅值也显著增大[11-12]。此外相同温度下，负极性时电树枝生长所需电压更高[10,13]。研究发现，当绝缘承受非恒定直流电压作用时，电树枝更容易引发与生长。王雅妮等发现试样周期性直流接地时，负极性下电树枝比正极性下更易引发[14]；刘英等则在类似的实验中发现直流电压的变化将促进电树枝的生长[7]。Saito Y 等针对 LDPE 开展了不同波形电场下的电树枝引发实验，实验表明直流接地电树枝和直流叠加交流电树枝的引发要比直流电树枝的引发容易[15]；郭沣等则在 XLPE 极性反转电压的直流电树枝生长特性实验中发现负极性电压施加时间占比大则极性反转电树枝的长度与宽度也相应大[16]。上述研究均表明快速变化的直流电场，即暂态直流电压比恒定直流电压更容易引发电树枝或者促进其生长，为此电缆直流电压试验的相关标准中规定，施加电压应当逐步升高，实验结束后应当通过适当的电阻来进行短路[17]。

尽管对直流或者直流极性周期变化下的电树枝已有较为系统的研究[18]，但是针对经直流恒压作用后，撤除电压(包括短路)时，绝缘的电压处于下降过程中的电树枝以及局部放电等现象的研究则鲜有报道。然而确有研究表明，直流电压的下降过程中有可能会引起绝缘缺陷的局部放电，Morshuis 等指出，在切断电源，绝缘处于降压过程时，会产生相反极性的局部放电，且在极性反转条件下这种现象会更明显[19]；彭维龙等对电缆接头内部主绝缘中的气隙典型缺陷模型进行了降压局部放电测试，发现此过程中的局部放电比恒压阶段更为活跃[20]。

但是上述的研究均以局部放电作为主要研究内容，并未涉及此过程中的电树枝行为的直接观测。如果试样中已经存在电树枝，降压过程中，电树枝是否会继续生长；降压过程产生的局部放电现象与电树枝之间的关联性；降压过程中的局部放电现象的物理机理，以及是否具有普遍性；这一现象是否具有为直流电缆运维和状态评估提供有效评估依据的可行性，都值得深入开展相关研究。为回答上述问题，本文选用含有不同尺寸的直流电树枝的 XLPE 针-板试样进行直流局部放电实验，对比分析了升压、恒压、降压阶段的局部放电特性，以及直流电压大小、极性、恒压时长、降压速率等条件的影响。并基于双极性载流子模型对针-板电极下空间电荷进行仿真，讨论了降压过程中空间电荷与电场对局部放电的影响。

1　实验方法

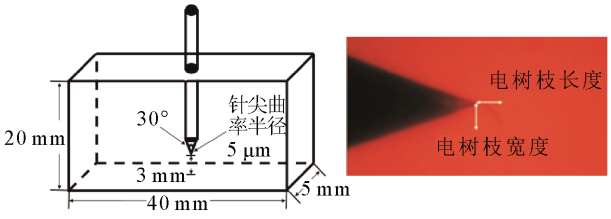
1.1　样品制备

以超净 XLPE 电缆料 LS 4258 为研究对象，制备用于电树枝实验的针-板电极试样。两种材料分别经过混料，压片，切片，插针，脱气等步骤后，得到 40 mm×20 mm×5 mm 的样片，如图 1(a)所示[21]。针电极采用曲率半径 5 μm 的锰钢针，针尖距试样底部 3 mm。

由于电树枝在直流电场下难以引发，因此使用交流电场引发电树枝。引发时观测到针尖处出现电树枝则立即停止加压，引发的电树枝在偏光显微镜下如图 1(b)所示，其中电树枝长度定义为针尖投影的角平分线所在直线方向上针尖到电树枝末端的距离。电树枝的宽度定义为垂直于电树枝长度方向上电树枝末端之间的最长距离。

1.2　实验与观测系统

电树枝与局部放电检测系统如图 2 所示。交流电压经高压硅堆整流，稳压电容和保护电阻滤波后得到直流电压。为了排除实验系统自身的放电干扰，测试回路中电源为 100 kV 无局部放电变压器，经局部放电检测装置的检测，所有接线均排除了电晕放电的可能。试样放置在变压器油中，以防止沿面放电并便于观察。使用卤素灯与工业显微镜 CCD 配合对电树枝的形态进行实时观测，同时使用脉冲电流法与 HFCT 对局部放电进行同步测量，其中脉冲电流法检测灵敏度为 0.1 pC，频带为 10 kHz~1 MHz，



(a) 样品示意图　　(b) 交流引发的电树枝图像

图 1　样品结构图

Fig.1　Sample configuration

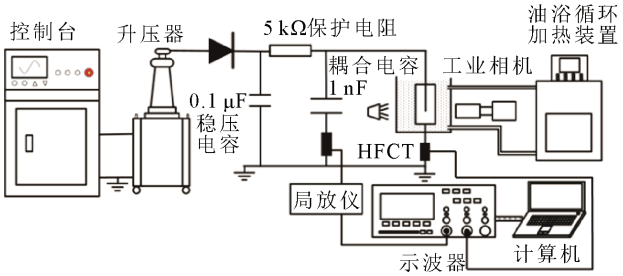
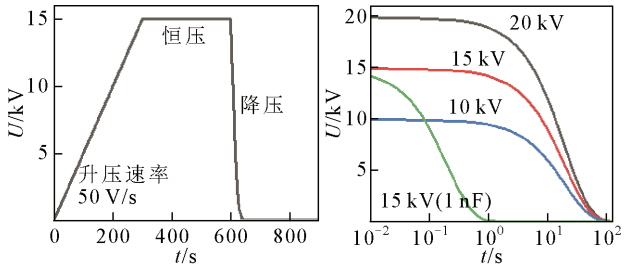


图 2 直流电树枝与局部放电实验电路

Fig.2 Experiment circuit of DC electrical tree and PD



(a) 加压方式示意图 (b) 降压过程示意图

图 3 直流电树枝实验的加压方式

Fig.3 Applied voltage in the DC tree experiment

HFCT 频带为 1~100 MHz。局部放电采集方式为脉冲电流信号触发检测。经脉冲源校准，50 pC 脉冲对应脉冲电流法的响应为 200 mV。选择不含电树枝的试样测试直流电压条件下的背景噪声，结果表明，大部分背景噪声幅值约为 40 mV(10 pC)，最大值为 72 mV(18 pC)。为确保能明显区分放电信号与噪声，设定触发阈值为 100 mV(25 pC)。

1.3 实验方案

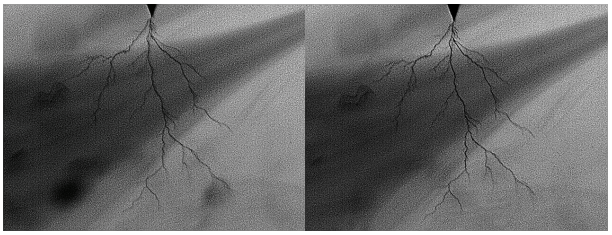
选用从未引发到有明显电树枝的试样进行直流实验。加压方式如图 3(a)所示，具体包括升压、恒压、降压、短路 4 个过程。为尽量避免升压与恒压过程中的电树枝生长，实验温度为 25 ℃，升压速率为 50 V/s。电压升至目标电压后保持 5 min，随后切断高压电源，则针电极电压在 100 nF 稳压电容作用下指数下降，时间常数约为 20 s，降压阶段持续 200 s，并通过电压监控确认试样上的电压降至零，随后再将试样接地 1 h 以充分释放试样中的空间电荷，记录实验过程电树枝形貌变化与局部放电。

为研究加压方式对降压局部放电特性的影响，对试样采用不同加压过程，具体参数如表 1 所示。研究变量包括恒压阶段电压大小与极性，恒压时长以及降压速率。通过选用不同电容值的稳压电容以获得不同的降压速率，降压曲线如图 3(b)所示，使用 1 nF 稳压电容时降压速率显著提高。

表 1 不同加压方式列表

Table 1 Table of the applied voltage parameter

研究变量	恒压电压/kV	恒压时长/min	稳压电容/nF
基准实验	15	5	100
改变恒压电压	±10 ±15 ±20	5	100
改变恒压时长	10	1 5 20	100
	15	1 5 20	100
	20	1 5 20	100
改变降压速率(稳压电容)	15	5	1 100



(a) 实验前电树枝图像 (b) 实验后电树枝图像

图 4 S0 电树枝图像

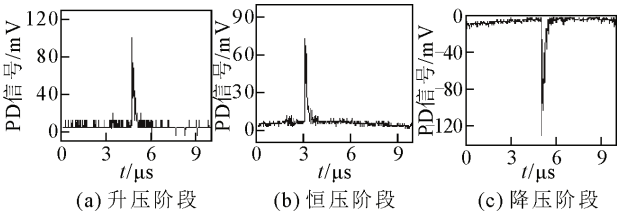
Fig.4 Electrical tree image of S0

2 实验结果

2.1 直流电树枝降压期间的局部放电特性

选择一个已严重劣化的试样进行实验，其电树枝长度为 1.57 mm，宽度为 1.02 mm，记为 S0。按照表 1 中的基准实验加压方式进行多次重复实验。累计实验 17 次，图 4 为 S0 实验前后电树枝的图像，对比图 4(a)—(b)可知实验前后电树枝尺寸没有变化。

图 5 反映了不同阶段 HFCT 检测到的典型放电



(a) 升压阶段 (b) 恒压阶段 (c) 降压阶段

图 5 各个阶段 HFCT 典型局部放电波形

Fig.5 Typical PD signal of HFCT at different stages

信号波形。在各个阶段内，所有局部放电的极性保持一致。而在各个阶段之间，升压阶段与恒压阶段

局部放电极性相同。而在降压阶段，尽管该过程中外施电压极性始终不变，但是其放电脉冲的极性与前两个阶段的相反。

图 6 反映了 S0 在升压阶段的局部放电特性。由于单次实验中放电次数较少，综合 17 次实验的 *Q-t* 图可获得升压期间的放电图谱，以反映放电量随时间变化的规律，如图 6(a)所示。图 6(a)表明升压期间检测到放电的最低电压为 6 kV，放电量 28 pC。在电压接近 15 kV 时，最大放电量为 226 pC，最小放电量为 42 pC。随着电压的升高，局部放电的幅值呈增大趋势，但也存在幅值较小的放电。图 6(b)反映了各次实验升压期间的放电次数与平均放电量，其中有 4 次没有检测到放电。单次实验中放电次数最多为 3 次，平均放电量最高可达 182 pC，17 次实验一共检测到 21 次放电。

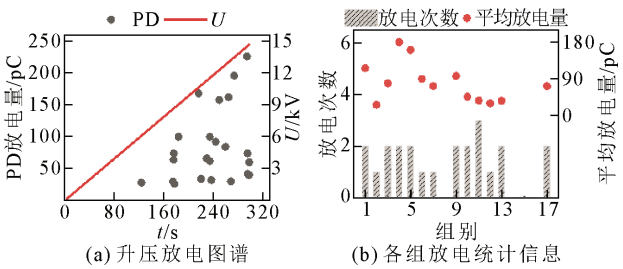
恒压期间局部放电图谱如图 7(a)所示。恒压期间最大放电量为 105 pC，随着恒压过程的进行，放电幅值呈下降趋势，且放电主要集中在恒压阶段前期，后期放电次数较少。图 7(b)反映了各次实验恒压期间的放电次数与平均放电量，其中 7 次实验没有放电。各次实验中最多放电次数为 8 次，平均放电量最大为 80 pC，17 组实验一共检测到 29 次放电。

图 8(a)反映了降压期间局部放电特性。随着降压过程的发展，局部放电幅值呈现增大趋势，与此同时放电间隔逐渐增大。最早的放电出现在 6.6 s，最晚的放电在 65.4 s。当电压降至 0 V 后，局部放电现象结束。各次实验放电次数，平均放电量如图 8(b)所示。所有实验均检测到局部放电信号，单次试验最少放电次数为 3 次，最多为 6 次。平均放电量最小为 53 pC，最大为 108 pC。17 组实验累计检测到 65 次局部放电。

图 9 反映了各个阶段的放电次数与平均放电量的统计结果。图 9(a)表明升压与恒压阶段平均放电次数均不足 2 次，且恒压阶段放电次数波动较大。而降压阶段平均局部放电次数达 3.7 次，波动较小。图 9(b)表明恒压阶段平均放电量小于升压与降压阶段，而升压阶段平均放电量波动较大。降压阶段平均放电量最大且波动最小。因此，降压阶段的局部放电现象最明显，波动小，可重复性高。

2.2　降压期间不同尺寸的电树枝的局部放电特性

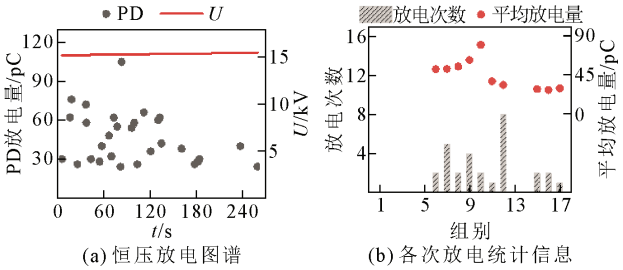
本文选取多个 XLPE 针-板试样，引发电树枝后进行直流电树枝生长实验，待生长至一定长度后停止加压，从而获得含有不同尺寸直流电树枝缺陷的



(a) 升压放电图谱　(b) 各组放电统计信息

图 6　升压阶段直流电树枝局部放电特性

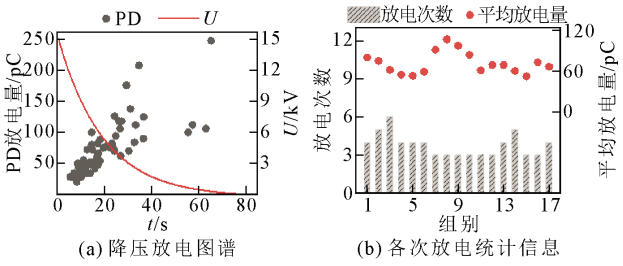
Fig.6　PD of the DC tree under rising voltage



(a) 恒压放电图谱　(b) 各次放电统计信息

图 7　恒压阶段直流电树枝局部放电特性

Fig.7　PD of the DC tree at constant voltage



(a) 降压放电图谱　(b) 各次放电统计信息

图 8　降压阶段直流电树枝局部放电特性

Fig.8　PD of the DC tree during the voltage drop

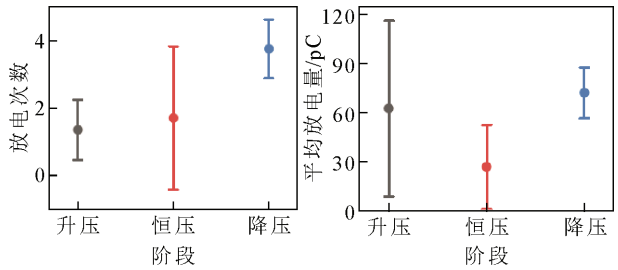


图 9　不同阶段局部放电统计参数对比

Fig.9　Comparison of PD parameters at different stages

试样。试样的电树枝图像及尺寸如图 10 所示，分别记作 S1—S6。S1 为未引发电树枝试样，针尖处无气隙。其中 S2、S3 为刚引发的电树枝，电树枝尺寸较小。从 S1 至 S6，电树枝均为枝状，长度宽度逐渐增大，代表电树枝老化程度逐渐加深。

在研究电树枝尺寸的影响时，恒压电压幅值选择 10、15 kV，恒压时长为 5 min，使用 100 nF 稳

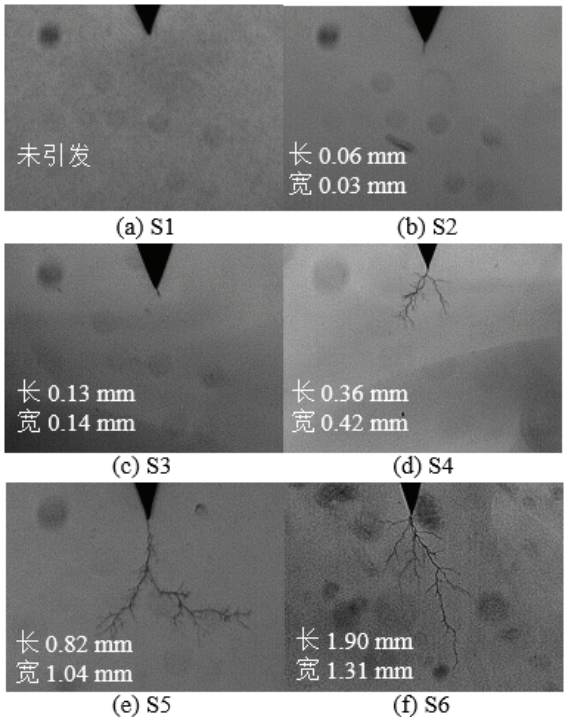


图 10 不同尺寸直流电树枝图像

Fig.10 Figure of the electrical trees at different sizes

压电容。实验前后所有试样的电树枝尺寸均没有发生变化。图 11 反映了含有不同尺寸的电树枝的试样在直流电压下降期间的实验结果。其中图 11(a)反映了不同电压下，各个试样在降压期间的放电次数。实验表明，除 S1 之外，其余试样均在降压期间产生了局部放电。当电压为 10 kV 时，S1—S4 均只检测到 1 次放电，S5 则有 3 次放电。当电压升高至 15 kV，除 S4 其余试样放电次数均有所增加，S6 的放电次数最多，为 4 次。这说明电树枝尺寸越大，恒压阶段电压越高，降压期间的放电次数可能越多。图 11(b)反映了不同电压下，各个试样在降压期间的平均局部放电量。10 kV 时，对于 S2—S6，随着电树枝尺寸的增大，平均放电量呈现先下降后上升的趋势，S2 的平均放电量为 94 pC，S4 的平均放电量只有 30 pC。当电压升高至 15 kV 时，平均放电量仍表现出相同的变化趋势。此时 S2 的平均放电量仅 91 pC，但仍为所有试样中最大。S3—S6 的放电量则均有所增大，其中 S3 增幅最大，从 30 pC 增加至 70 pC。

上述结果表明，当 XLPE 针-板试样含有直流电树枝缺陷时，在直流电压下降过程中，会产生局部放电。降压前后电树枝尺寸不变化。无树试样则不会有局部放电。随着电树枝尺寸的增大，放电次数

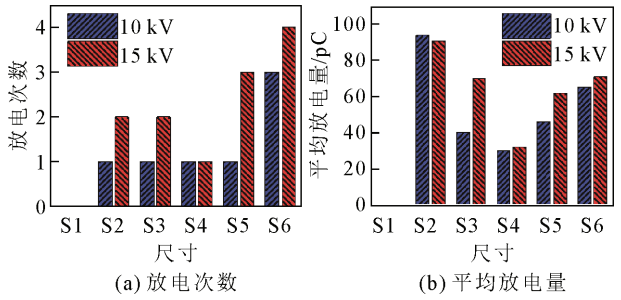


图 11 不同尺寸直流电树枝降压期间局部放电

Fig.11 PD characteristics of the electrical tree of different sizes during DC voltage drop

有增加趋势。当外施电压升高时，局部放电的次数与平均放电量呈现出增大的趋势。

2.3 不同加压方式对直流降压局部放电的影响

仍以 S0 为实验对象，根据表 1 研究恒定电压大小，恒压时间长短以及降压速率对降压期间局部放电的影响，结果如图 12—图 14 所示。

图 12 反映了不同电压下降压期间的局部放电次数与平均放电量，横坐标的电压表示恒压阶段施加在试样两端的电压。各个电压条件下降压过程中均检测到了局部放电。正极性条件下，随着电压幅值的增加，放电次数从 1 次增加到 7 次，平均放电量从 37 pC 增加到 96 pC。负极性条件下，随着电压幅值的增加，放电次数从 1 次增加到 5 次，平均放电量从 62 pC 增加到 83 pC。为进一步研究电压极性对局部放电特性的影响，对试样 S0 在−15 kV 下同样进行 17 次重复实验，放电次数与平均放电量统计结果如图 12(b)所示。结果表明，负极性下放电次数与正极性下无明显差异，而平均放电量更大。

图 13 反映了不同恒压时长下降压期间的局部放电特性。当电压相同时，恒压时长从 1 min 增加至 20 min，放电次数与平均放电量基本保持稳定，无明显波动。当电压为 15、20 kV 时，恒压从 5 min 增加至 20 min 时，降压期间的放电次数与平均放电量反而略有下降。

图 14 反映了快速降压(稳压电容 1 nF)条件下的局部放电实验结果。在本文的快速降压情况下，外施电压在 1 s 左右即接近 0 V。在两次实验中，均只检测到了 1 次放电，放电量分别为 38、74 pC。放电次数明显少于慢速降压(稳压电容 100 nF)时的情况。

3 数值仿真

3.1 仿真模型及方法

为探究降压期间绝缘材料内部空间电荷及电

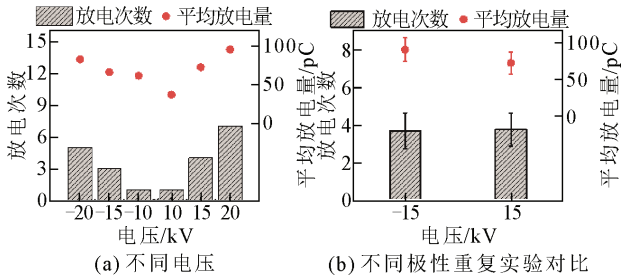


图 12　不同电压下降压放电特性

Fig.12　PD characteristics at different voltage

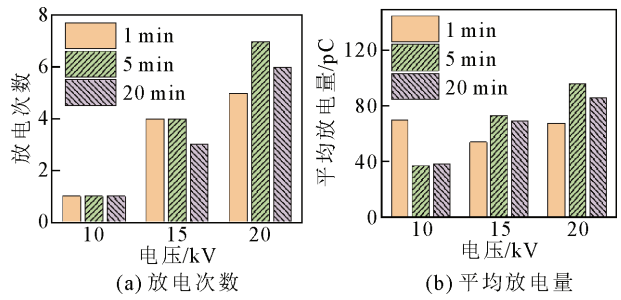


图 13　不同恒压时长的降压局部放电特性

Fig.13　PD characteristics at different constant voltage duration during the voltage drop

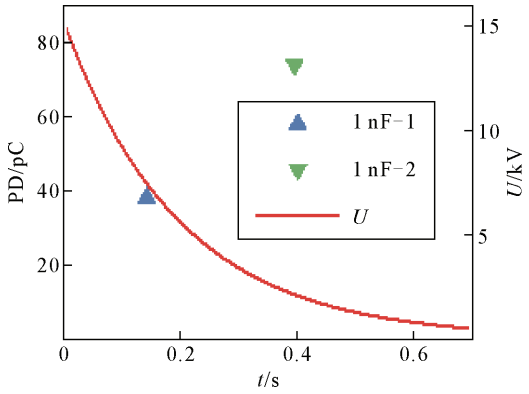


图 14　快速降压条件下的降压局部放电特性

Fig.14　PD characteristics at rapid voltage drop condition

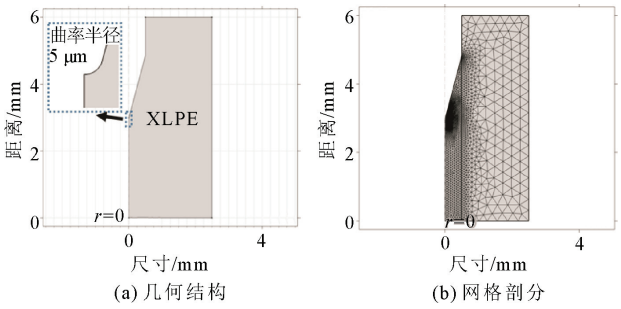


图 15　针-板电极仿真结构

Fig.15　Simulation structure of the needle-plate electrode

场的变化过程，本文使用双极性载流子输运模型对试样进行建模仿真。电荷输运主要包含电荷注入、传输、扩散、入陷、脱陷、复合和抽出等过程[21]。

本文模型与参数在文献[12]的基础上，对降压期间空间电荷注入与抽出边界条件进行补充：当电场方向从电极指向电介质，空穴注入电介质，电子从电介质流出；当电场方向从电介质指向电极，电子注入电介质，空穴从电介质流出。使用肖特基公式描述空穴与电子的注入过程[22]：

$$J=AT^2\exp\left(-\frac{w_i}{kT}\right)\exp\left(\frac{e}{kT}\sqrt{\frac{eE}{4\pi\varepsilon}}\right) \tag{1}$$

式中：J 为电流密度；A 为理查德逊常数；k 为玻耳兹曼常数；w_i 为注入势垒；e 为元电荷；ε 为 XLPE 介电常数；T 为温度；E 为电场。

本文模型几何结构如图 15(a)所示，针尖曲率半径 5 μm，针尖与地电极距离 3 mm。为准确计算针尖附近电场，经多次尝试，采用如图 15(b)所示的网格剖分方式。针尖附近网格较密，最小单元大小 0.05 μm，完整域包含 8924 个域单元与 424 个边界单元。

仿真过程为对针电极施加如图 3(a)所示的直流电压，以 50 V/s 速率升压至 20 kV/−20 kV 后保持 300 s，随后进行时间常数为 20 s 的指数降压，降压过程持续 500 s。本文主要关注降压阶段试样内空间电荷与电场的时空变化特性。

3.2　降压期间无电树试样空间电荷与电场仿真结果

本文所用模型为二维轴对称模型，在对称轴上，沿轴方向的电场分量 E_z 的大小与电场模的大小相等。为便于表示降压过程中电场方向的变化，仿真结果使用 E_z 表示对称轴上的总电场。

图 16 反映了降压过程中不同极性下针-板模型对称轴上的空间电荷与电场变化趋势。图 16(a)为正极性下对称轴上电荷密度随时间的变化曲线。降压前针电极附近有大量在升压及恒压期间注入的同极性空间电荷。降压开始后，针电极处空间电荷密度逐渐下降。从 19 s 开始，针电极处变为负电荷积累，且电子的浓度与注入深度不断增大。在第 41 s 针电极处空间电荷密度达到峰值 64.8 C/m³，此后试样内部电荷被不断复合，浓度持续下降。

图 16(b)反映了正极性下对称轴上总电场 E_z 的时空变化特性。降压前由于同极性空间电荷的注入，针尖处总电场最大值为−232 kV/mm。随着外施电压的下降，针尖附近总电场迅速下降，在第 8 s 发生了方向反转。随后电场继续增大，在第 34 s，反向

电场达到峰值 293 kV/mm。

图 16(c)—16(d)则反映了−20 kV 条件下的仿真结果。与正极性的相比，负极性条件下降压前针尖电场幅值更小，但降压过程中针尖场强峰值更大。这是由于参数设定中电子的注入势垒比空穴略低，迁移率比空穴高，使得外施电压相同时，电子的注入与迁移速率更大。虽然数值大小存在差异，但是负极性下同样出现了异极性电荷注入，针尖电场反向的过程。

进一步分析降压阶段针尖处空间电荷与电场的变化过程，如图 17 所示。其中图 17(a)反映了针尖处空穴、电子、空间电荷密度随时间变化的过程。降压过程的前 14 s，只有少量电子注入，空穴电荷密度 8.90 C/m^3，电子电荷密度只有−0.77 C/m^3。随后电子电荷密度开始迅速增加，空穴电荷密度在抽出，复合等作用下迅速下降，在第 32 s，空穴电荷密度仅剩 4.85 C/m^3，电子电荷密度达到峰值−70.85 C/m^3，随后电子电荷密度开始下降。

图 17(b)反映了针尖处电场随时间变化曲线。根据电场叠加原理，绝缘区域的电场由外施电压 U 形成的电场 E_U，XLPE 内的空间电荷形成的电场 E_ρ 叠加而成。降压前，E_U 为−790 kV/mm，此处负号表示电场方向从针电极指向地电极。E_ρ 为 552 kV/mm，电场方向指向针电极。随着外施电压的下降，E_U、E_ρ 也相应随之下降。然而在前 35 s，当 E_U 下降了 81.7%时，E_ρ 只下降了 19.3 %(106 kV/mm)。由于两者的衰减速度不同，直接导致了针尖附近形成了反向电场，峰值为 300.89 kV/mm，比降压前更高。图 16(c)—16(d)则反映了−20 kV 条件下的仿真结果。同样由于电子的迁移率更高，因此，与正极性的相比，负极性条件下降压初期 E_ρ 衰减速率更大，在第 34 s 时，E_ρ 变化了 118 kV /mm，比正极性的大。

综上所述，在直流电压指数衰减期间，由于外施电场衰减速率高于泊松电场的衰减速率，针尖附近泊松电场占比不断增大，最终表现为反向电场的形成。随着降压过程的进行以及异极性空间电荷的注入，净空间电荷密度下降，反向电场逐渐减小。

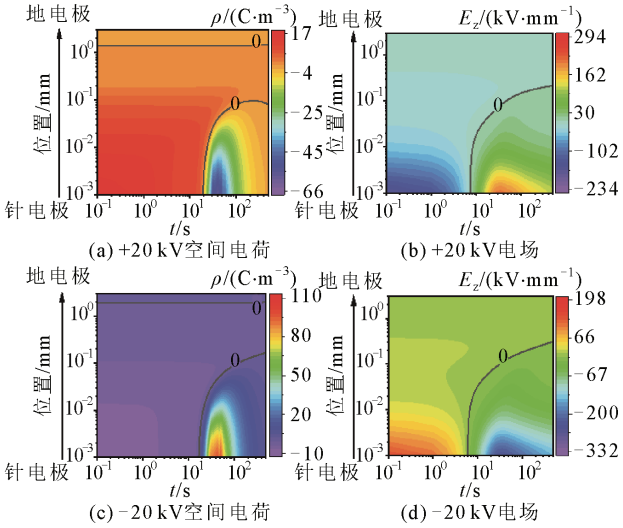


图 16 降压阶段空间电荷与电场的分布

Fig.16 Distribution of space charge and electric field during DC voltage drop

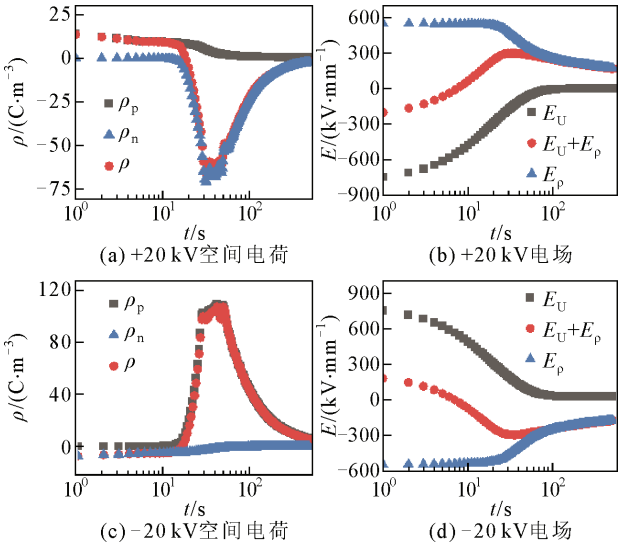


图 17 降压期间针尖处空间电荷与电场的仿真结果

Fig.17 Simulation results of space charge and electric field at the needle tip during DC voltage drop

4 分析与讨论

4.1 降压期间含电树枝缺陷试样的局部放电机理

当直流电压施加在针-板试样上时，针电极会有大量同极性空间电荷注入，从而削弱针尖电场[23-24]。3.2 节的仿真结果表明，降压前空间电荷在针尖处形成的电场强度可达 500 kV/mm，削弱作用显著。

对于无电树缺陷的试样，当外施电压指数衰减时，由于降压初期泊松电场的衰减速率小于外施电场的衰减速率，因此可能在针尖附近形成场强较高的反向电场。虽然该电场不足以导致 XLPE 的局部击穿，但如果针尖附近存在击穿场强较低的区域如电树枝通道，则有可能在降压过程中发生局部放电。

对于含有电树枝缺陷的试样，还要考虑电树枝通道内的电荷形成的电场 E_g，则电树枝通道内总电

场 E_{ch} 应由 E_U、E_ρ、E_g 叠加而成。即：

$$E_{ch} = E_U + E_\rho + E_g \tag{2}$$

其中 E_g 与 E_ρ 都可以看作是对外施电场 E_U 的响应，起到削弱针尖场强，增加其他区域场强的作用。因为气隙中载流子的迁移率远高于固体电介质中空间电荷的迁移率[12]，可认为 E_g 的响应速度明显大于 E_ρ 的响应速度。

参考典型直流局部放电时缺陷处电压变化过程[25-26]，绘制恒压及降压过程中电树枝通道内电场变化示意图，如图 18 所示，E_{min} 表示能引起电树枝局部放电的最小电场，E_{res} 为局部放电结束后的残余电场。根据局部放电的形成条件[27-28]，只有当通道内局部场强超过 E_{min} 时，才有可能产生放电，不妨设为定值；残余电场可认为与放电阈值场强呈正比 [27]，也设置为定值。

恒压阶段，由于 E_ρ 对外部电压变化的响应速率较慢，只要电树枝不生长，则认为其主要影响因素仍为 E_U，E_{ch} 的变化主要是由于 E_g 变化导致的。若 E_{ch} 不足以引起电树枝通道放电，则 E_g、E_{ch} 为定值；若 E_{ch} 能导致通道放电，则 E_g、E_{ch} 应呈现近似周期性变化的过程。

而在降压阶段，首先假设气隙内没有放电。此时，E_U 迅速下降，E_g 随之变化，近似认为同步下降。由于 E_ρ 衰减速度慢，此时这就有可能导致：

$$E_U + E_\rho + E_g > E_{min} \tag{3}$$

即反向电场大于放电阈值电场，若通道中存在足够的初始电子，则会局部放电。由于反向电场区域仅在针尖附近形成，因此放电仅局限于在针尖附近的电树枝，也只有含有电树枝的试样才能检测到降压局部放电。同时，尽管降压过程中 E_U 极性没有改变，E_{ch} 的反向仍使得局部放电脉冲的极性发生了改变。此外，由于放电区域位于针尖附近，因此降压前后电树枝尺寸不会变化。结合图 16(b)、16(d)仿真结果可知，随着降压过程的进行，反向电场区域会逐渐增大，且负极性时的区域比正极性的大，因此放电量呈增大趋势，且负极性时的平均放电量更大。

4.2　多次测试降压局部放电对电树枝的影响

对 2.2 中降压局部放电图谱数据进行进一步处理，变量示意图见图 19。记 U_0 为降压前的电压。假设一次降压过程中有 n 次局部放电，记 t_i 为第 i($1 \le i \le n$)次放电时刻，记 U_i 为 t_i 时刻试样两端的电压。则 t_n 为放电熄灭时刻，U_n 为放电熄灭电压。统计相邻放电的电压差 $U_{i-1}-U_i$ 与放电熄灭电压 U_n。

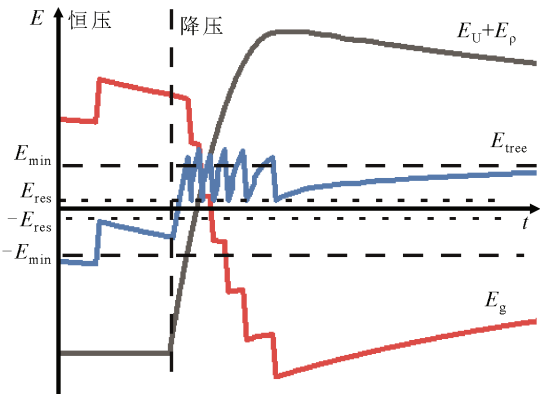


图 18　直流局部放电电树枝通道电场变化过程

Fig.18　Electric field change process in DC electrical trees

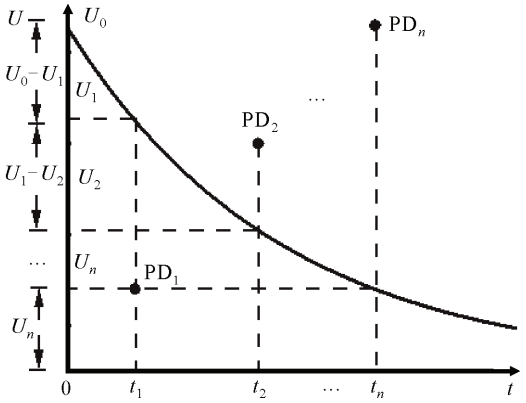


图 19　统计变量示意图

Fig.19　Schematic diagram of statistical variables

对于 2.2 节的 17 次实验，初次放电的电压差数据 U_0-U_1 有 17 个，后续放电的电压差数据 U_i-U_{i+1} ($1 \le i \le n-1$)有 48 个，放电熄灭电压数据 U_n 有 17 个，这些数据的箱线图见图 20(a)。结果表明 U_0-U_1 与 U_i-U_{i+1} 各自均有较好的稳定性。而 U_0-U_1 的平均值为 5.7 kV，明显高于 U_i-U_{i+1} 的平均值 2.4 kV。即初次放电的电压差明显高于后续放电的电压差，两者之间存在明显差异的原因是降压期间产生局部放电首先需要形成反向电场，而后续放电只需外施电压变化形成放电所需电压差，这与 4.1 节的分析一致。

根据图 20(a)，放电熄灭电压 U_n 存在两种情况。第 1 种是熄灭电压接近于 0 V；第 2 种是熄灭电压在 2~4 kV 之间，略大于 U_i-U_{i+1} 的平均值，理论上 U_n 还足以形成引起一次局部放电的电压差，即还能产生一次局部放电。列举 17 次实验的 U_n 与 $U_{n-1}-U_n$ 如图 20(b)所示，可知第 1 种的情况出现在第 1、2、3、7 次这 4 次实验中。根据上述现象有如下推测：当同一试样内产生多次局部放电，放电会导致通道内无序石墨碳堆积，使得通道电阻率下降，进而对

局部放电有抑制[29-30]。在实验中的体现则是 U_i-U_{i+1} 逐渐增大，放电次数略有下降。注意到，第 7 次实验中放电 $U_{n-1}-U_i$ 为 5.9 kV，显著大于 U_i-U_{i+1} 的平均值 2.4 kV，即可认为局部放电也受到了抑制，因此实验 7 也应当纳入第 2 类情况。即熄灭电压接近于 0 V 的情况仅出现在前 3 次实验中，而从第 4 次实验开始，电树枝通道导电性能发生了明显变化，使得放电熄灭电压增大，放电次数比之前略有下降。

4.3 外施电压条件对降压局部放电的影响

关于恒压阶段 U_0 的大小的对比实验表明，增大电压幅值可以提高平均放电量，增加放电次数。根据图 18，显然有：

$$U_0=(U_0-U_1)+\sum_{i=1}^{n-1}(U_i-U_{i+1})+U_n\approx \overline{(U_0-U_1)}+(n-1)\overline{(U_i-U_{i+1})}+\overline{U_n} \tag{4}$$

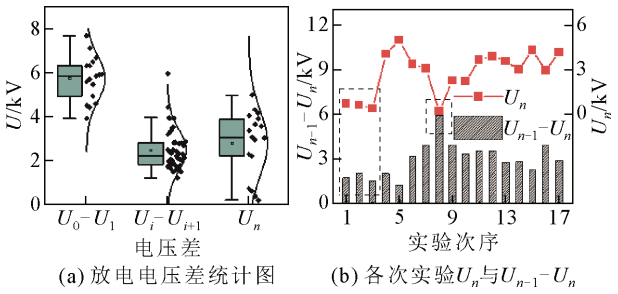
根据图 20(a)的结果，U_0-U_1、U_i-U_{i+1}、U_n 稳定性均较好，可使用平均值近似替代。假定不同电压下 U_0-U_1、U_i-U_{i+1}、U_n 仍不变，则随着 U_0 的增大，放电次数 n 也会相应增大。

而对于不同极性的 U_0，恒压阶段都会注入同极性空间电荷，根据 4.1 节的分析，在降压过程中会形成反向电场，进而导致局部放电。对 2.3 节中−15 kV 条件下的测试结果进行相同的统计分析，如图 21 所示。为便于比较，图 21 中采用绝对值表示。统计结果表明，此时 U_0-U_1 的平均值为 7.9 kV，高于+15 kV 的，而 U_i-U_{i+1} 的平均值只有 2.3 kV，与 +15 kV 的接近。这可能是由于降压初期电子迁移率较高，E_ρ 下降速率也快，使得 E_U 需要更大的变化以形成放电所需场强。

关于恒压时长的实验表明，在恒压时长为 1~20 min 的情况下，降压期间局部放电特性接近，这表明此恒压时长区间内空间电荷分布的变化不足以对放电特性产生显著影响。因此，进行降压局部放电测试时可以选择较短的恒压时长。

关于降压速率的实验表明，快速降压条件下，放电次数会减少。这一现象可从局部放电条件分析，放电的产生需要局部场强超过起始击穿场强且空间中产生足够数量的初始电子[27]。在快速降压条件下，初始电子的产生时间与电树枝放电后的电荷消散时间已不可忽略，因此局部放电次数明显减少。

上述分析表明，增大外施电压幅值与适当的降压速率能增加降压期间的局部放电次数。恒压阶段时长对于降压期间局部放电的结果影响较小，因此实验中可以适当缩短恒压阶段的时长。



(a) 放电电压差统计图 (b) 各次实验U_n与$U_{n-1}-U_n$

图 20 降压局部放电的统计分析

Fig.20 Statistical analysis of PD during voltage drop

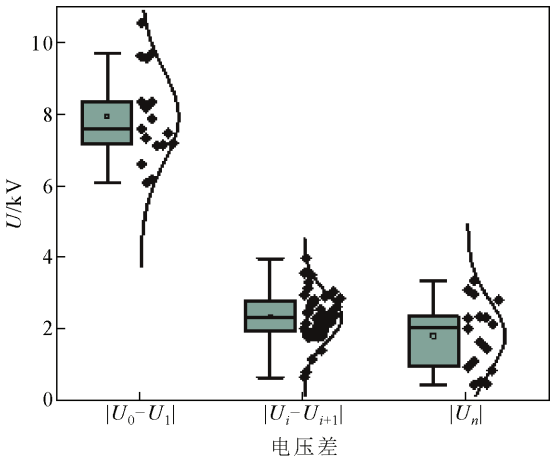


图 21 −15 kV 下降压局部放电统计分析

Fig.21 Statistical analysis of PD during voltage drop under −15 kV

5 结论

1）含有电树枝的试样，在直流电压下降阶段将产生局部放电，且放电脉冲极性与恒压阶段的相反，这一现象可为判断电树枝的存在提供参考。

2）与升压和恒压阶段相比，在慢速降压条件下，降压阶段放电次数与平均放电量的稳定性更好，实验具有可重复性。随着电压下降，局部放电幅值逐渐增大，且进行多次实验时，局部放电可能导致放电区域的通道电导率增加，放电熄灭电压增大。

3）提高直流电压以及选择适当的降压速率可增加降压期间的局部放电次数，负极性下平均放电量会增大，而恒压时长的变化则对降压局部放电特性没有显著影响。显著提高电压的下降速率时，放电次数会减少。

4）仿真结果表明，当外施电压下降时，针尖

附近外施电场的下降速率大于泊松电场的下降速率，从而形成较强的反向电场。对于存在电树枝通道的试样，其绝缘性能较弱，从而产生局部放电。因为放电发生在针尖附近区域，所以降压前后电树枝尺寸不会发生变化。

参考文献　References

[1] 杜伯学，李忠磊，杨卓然，等. 高压直流交联聚乙烯电缆应用与研究进展[J]. 高电压技术，2017，43(2)：344-354.
DU Boxue, LI Zhonglei, YANG Zhuoran, et al. Application and research progress of HVDC XLPE cables[J]. High Voltage Engineering, 2017, 43(2): 344-354.

[2] 陈铮铮，赵　鹏，李震宇，等. 评价直流电缆绝缘材料电性能的有效方法[J]. 高电压技术，2021，47(10)：3558-3565.
CHEN Zhengzheng, ZHAO Peng, LI Zhenyu, et al. Effective method for evaluating the electrical properties of DC cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(10): 3558-3565.

[3] 刘　英，张博剑，高　鑫. 高压 XLPE 电缆线路状态评估综合体系的建立及应用[J]. 高电压技术，2022，48(11)：4437-4444.
LIU Ying, ZHANG Bojian, GAO Xin. Establishment and application of a comprehensive system for condition assessment of HV XLPE cable lines[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(11): 4437-4444.

[4] ISHIBASHI A, KAWAI T, NAKAGAWA S, et al. A study of treeing phenomena in the development of insulation for 500 kV XLPE cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1998, 5(5): 695-706.

[5] 郭　洋，王雅妮，乐彦杰，等. XLPE 与 MgO/XLPE 纳米复合材料周期性直流接地电树枝与交流电树枝的温度特性[J]. 高电压技术，2018，44(5)：1459-1466.
GUO Feng, WANG Yani, LE Yanjie, et al. Temperature characteristics of periodically grounded DC tree and AC tree in XLPE and MgO/XLPE Nano-composite insulation[J]. High Voltage Engineering, 2018, 44(5): 1459-1466.

[6] 李盛涛，郑晓泉. 聚合物电树枝化[M]. 北京：机械工业出版社，2006：196-205.
LI Shengtao, ZHENG Xiaoquan. Electrical treeing in polymers[M]. Beijing, China: China Machine Press, 2006: 196-205.

[7] 刘　英，曹晓珑. 直流电压下交联聚乙烯电缆绝缘中电树枝的生长特性研究[J]. 西安交通大学学报，2014，48(4)：41-46，126.
LIU Ying, CAO Xiaolong. Growth characteristics of electrical trees in XLPE cable insulation under DC voltage[J]. Journal of Xi'an Jiaotong University, 2014, 48(4): 41-46, 126.

[8] HAMMARSTRÖM T J Å, BENGTSSON T, GUBANSKI S M. Partial discharge characteristics of electrical treeing in XLPE insulation exposed to voltages of different rise times[C]// Proceedings of 2017 International Symposium on Electrical Insulating Materials. Toyohashi, Japan: IEEE, 2017: 407-410.

[9] ZHU X, WU J D, WANG Y L, et al. Characteristics of electrical tree defect during the growth period in high-voltage DC cable under stepped DC voltage[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2019, 13(15): 3195-3201.

[10] 李演达. 高压直流电缆中电树枝引发和生长特性[D]. 保定：华北电力大学，2019：38-39.
LI Yanda. Electrical tree initiation and growth properties in HVDC cables[D]. Baoding, China: North China Electric Power University, 2019: 38-39.

[11] 王雅妮，张　帅，任品顺，等. 不同温度下 XLPE-SIR 异质绝缘的交/直流电树枝及局部放电特性[J]. 中国电机工程学报，2023，43(18)：7334-7344.
WANG Yani, ZHANG Shuai, REN Pinshun, et al. AC/DC electrical tree and partial discharge characteristics of XLPE-SIR heterogeneous insulation at different temperatures[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(18): 7334-7344.

[12] 祝　曦，林国海，张洪亮，等. 直流电压下 XLPE 电树枝化过程中的局部放电特性[J]. 中国电机工程学报，2022，42(6)：2416-2426.
ZHU Xi, LIN Guohai, ZHANG Hongliang, et al. Characteristics of partial discharge during electrical treeing in XLPE under DC voltage[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(6): 2416-2426.

[13] 赵　鑫，韩　涛，马婷婷，等. 交直流叠加电压下硅橡胶内电树枝特性[J]. 高电压技术，2021，47(9)：3173-3180.
ZHAO Xin, HAN Tao, MA Tingting, et al. Characteristics of electrical tree in silicone rubber under DC superimposed with AC voltage[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(9): 3173-3180.

[14] 王雅妮. 高压直流电缆绝缘中的周期性直流接地电树枝特性研究[D]. 上海：上海交通大学，2018.
WANG Yani. Characteristics of periodic grounded DC tree in high voltage direct current cable insulation[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2018.

[15] SAITO Y, FUKUZAWA M, NAKAMURA H. On the mechanism of the tree initiation[C]// Proceedings of 1976 IEEE International Conference on Electrical Insulation. Montreal, Canada: IEEE, 1976: 209-212.

[16] 郭　洋. 直流与极性反转电场下直流电缆绝缘中电树枝生长特性研究[D]. 上海：上海交通大学，2019.
GUO Feng. Study on growth characteristics of electrical tree in DC cable insulation under DC and polarity reversal electric field[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2019.

[17] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局，中国国家标准化管理委员会. 电线电缆电性能试验方法　第 14 部分：直流电压试验：GB/T 3048.14—2007[S]. 北京：中国标准出版社，2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Test methods for electrical properties of electric cables and wires-part 14: DC voltage test: GB/T 3048.14—2007[S]. Beijing, China: Standards Press of China, 2008.

[18] LIU Ying, CAO Xiaolong. Electrical tree growth characteristics in XLPE cable insulation under DC voltage conditions[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2015, 22(6): 3676-3684.

[19] MORSHUIS P H F, SMIT J J. Partial discharges at DC voltage: their mechanism, detection and analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2005, 12(2): 328-340.

[20] 彭维龙，陶诗洁，孙　璐，等. XLPE 交流电缆在直流电压下的局部放电检测技术研究[C]//浙江省电力学会 2020 年度优秀论文集. 北京：中国电力出版社，2021：164-169.
PENG Weilong, TAO Shijie, SUN Lu, et al. Research on partial discharge detection technology of XLPE AC cable under DC voltage[C]//Zhejiang Electric Power Society 2020 Excellent Paper Collection. Beijing, China: China Electric Power Press, 2021: 164-169.

[21] 彭苏蔓，祝　曦，吴建东，等. 温度和电场对 XLPE 与纳米 MgO/XLPE 电树枝生长过程中局部放电特性的影响[J]. 中国电机工程学报，2020，40(12)：4033-4042.
PENG Suman, ZHU Xi, WU Jiandong, et al. Effect of temperature and electric field on partial discharge characteristics in XLPE and

Nano-MgO/XLPE during electrical tree growth[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(12): 4033-4042.

[22] ZHANG Y X, ZHOU Y X, WU C, et al. Charge transport dynamics and the effects on electrical tree degradation under DC voltages in thermally aged silicone rubber[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 2020, 53(41): 415501.

[23] ZHU X, YIN Y, PENG S M, et al. Mobility-limited charge injection in cross-linked polyethylene under extra high electric field[J]. High Voltage, 2021, 6(5): 782-792.

[24] 李光道. 极不均匀直流电场聚合物空间电荷与电树枝仿真实验研究[D]. 上海：上海交通大学，2017.
LI Guangdao. Simulation and experimental study on electrical tree and space charge distribution under non-uniform electric field in polymer insulation[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

[25] FROMM U, GULSKI E. Statistical behaviour of internal partial discharges at DC voltage[C]// Proceedings of 1994 4th International Conference on Properties and Applications of Dielectric Materials. Brisbane, Australia: IEEE, 1994: 670-673.

[26] 杨丰源. 高压直流电缆局部放电特征分析及辨识技术研究[D]. 上海：上海交通大学，2018.
YANG Fengyuan. Study on partial discharge characteristic analysis and recognition of high voltage DC cables[D]. Shanghai, China: Shanghai Jiao Tong University, 2017.

[27] GUTFLEISCH F, NIEMEYER L. Measurement and simulation of PD in epoxy voids[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 2(5): 729-743.

[28] 赵智大. 高电压技术[M]. 3 版. 北京：中国电力出版社，2013：86.
ZHAO Zhida. High voltage technique[M]. 3rd ed. Beijing, China: China Electric Power Press, 2013: 86.

[29] 陈向荣，徐 阳，刘 英，等. 交联聚乙烯电缆绝缘材料中电树枝的导电特性研究[J]. 物理学报，2012，61(8)：416-425.
CHEN Xiangrong, XU Yang, LIU Ying, et al. Study on conducting characteristics of electrical trees in cross-linked polyethylene cable insulation[J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(8): 416-425.

[30] CHAMPION J V, DODD S J. An approach to the modelling of partial discharges in electrical trees[J]. Journal of Physics D: Applied Physics, 1998, 31(18): 2305-2314.



林国海
1998—，男，硕士生
研究方向为聚合物绝缘材料性能
E-mail: linguohai@sjtu.edu.cn

LIN Guohai



尹 毅(通信作者)
1972—，男，博士，教授，博导
研究方向为聚合物绝缘材料和技术、高电压工程和电力系统在线检测等
E-mail: yiny@sjtu.edu.cn

YIN Yi
Ph.D., Professor
Corresponding author

收稿日期 2022-11-21 修回日期 2023-09-27 编辑 曹昭君