

基于材料和电场分布的不同电缆缺陷的 震荡波表征效果研究

苑吉河¹, 杨 阳¹, 张 曦¹, 黄华勇¹, 汪先进², 周 凯²

(1. 国网重庆市电力公司南岸供电分公司, 重庆 400000; 2. 四川大学电气工程学院, 四川 成都 610065)

摘 要:为理解振荡波电压法对电缆不同缺陷的测试结果, 该文从电场角度分析振荡波对电缆界面和内部缺陷的表征效果。首先, 在实验室搭建振荡波试验平台对人工制作的刀痕、外半导搭接不良 2 种缺陷进行局部放电测试; 然后, 通过起始放电电压(PDIV)与局部放电相位谱图(PRPD)初步分析振荡波对 2 种缺陷的激发特征; 进而利用有限元仿真软件对 2 种缺陷进行三维电场仿真, 以缺陷的不同尺寸表示现场缺陷的多样性, 并从缺陷处的电场畸变情况解释 2 种缺陷的放电特征。试验和仿真结果表明: 内部缺陷类的刀痕缺陷由于硅脂填充的影响难以被振荡波电压法检测出来, 而界面缺陷类的外半导搭接不良缺陷具有较好的表征效果。

关 键 词:振荡波; 电场仿真; 局部放电; 界面缺陷; 内部缺陷

DOI:10.19781/j.issn.1673-9140.2020.04.006 中图分类号:TM831 文章编号:1673-9140(2020)04-0042-07

Detective effect of oscillation on different defects of cable from the perspective of materials and electric field

YUAN Jihe¹, YANG Yang¹, ZHANG Xi¹, HUANG Huayong¹, WANG Xianjin², ZHOU Kai²

(1. Nanan Power Supply Branch of Chongqing Electric Power Co., Ltd., Chongqing 400000, China;

2. College of Electrical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China)

Abstract: The effect of the oscillating wave on the interfacial and internal defects of cable from the perspective of the electric field is studied in order to understand the test results of the oscillating wave voltage method for different defects in cables. Firstly, an oscillating wave test platform is set up to partial discharge tests the artificial defective models including longitudinal knife defects and external semiconductor lap defects. Then, the excitation characteristics of oscillation wave are analyzed primarily by PDIV and PRPD. Furthermore, the electric field distribution of cables with defects are simulated by utilizing a finite element simulation software in three-dimension. Artificial defects with different sizes are fabricated to represent the diversity of the defect site and the characteristics of defective discharges are explained by the electric field distortion at the defects. Experimental and simulation results show that: it is hard to detect the internal defects due to the filling of hard grease by using the oscillation wave voltage method, whereas interfacial defects of poor connection of outer semiconductor has better characterization results.

Key words: oscillation wave; electric field simulation; partial discharge; interface defects; internal defects

振荡波电压法因其具有对试样损伤小、能够带动大容量试品的优势,近年来被广泛应用于中低压长电缆诊断测试中^[1]。同时,该方法与时域反射法(time domain reflection, TDR)相结合能够实现对电缆局部缺陷的有效定位^[2-3]。近年来,振荡波局部放电测试技术已成为国内电力行业的热门话题之一。

目前,国内外振荡测试技术发展较为成熟,相应的实验设备已应用于电力电缆离线测试中^[4],国内的学者对于振荡波测试技术也开展过较多研究。例如,国内有人对 10 kV 交联聚乙烯(XLPE)电缆中间接头制作了外半导体层尖端、外半导体层气隙、高电位金属尖端、应力锥搭接过长 4 种缺陷模型,研究发现了这 4 种缺陷在振荡波与工频电压下不同的局部放电特征^[5]。另有国内研究者对 10 kV 交联聚乙烯电缆终端制作了外半导体层过长、无倒角、倒角不齐 3 种缺陷模型,实验和仿真结果表明:振荡波电压法对外半导体层各类缺陷的灵敏度不同,对倒角不整齐类缺陷最灵敏^[6]。已有的研究成果主要集中在振荡波对各种界面类缺陷局部放电特征的研究上。然而,像横向和纵向刀痕、主绝缘打磨不平整等这类内部缺陷,在电缆终端安装制作过程中,主绝缘层表面通常会充分涂抹硅脂以起到均匀电场、抑制局部放电的作用。因此,在电缆投运初期,即使电缆内部存在这类缺陷,在硅脂的作用下也难以被检测出来。大量实验也发现^[7],局部放电测试对绝缘内部的缺陷问题表征不明显,而振荡波电压由于能量较小,其测试效果更值得深入研究和报道^[8-9]。界面和内部这 2 类缺陷如何从电场和材料配合的角度考虑其局放的激发效果,是目前亟待研究的问题。

该文首先在实验室制作中间接头刀痕和外半导体层不良 2 种缺陷来模拟现场的 2 种缺陷,然后搭建振荡波测试平台分别对这 2 种缺陷进行局放检测,进一步利用有限元仿真软件建立不同尺寸缺陷的三维仿真模型,从电场畸变后缺陷内最大电场强度 E_{\max} 研究不同尺寸的 2 种缺陷在振荡波作用下的表征效果。

1 振荡波局放检测试验

1.1 试验原理

振荡波电压法的基本思路是利用电缆等值电容

与电感线圈的串联谐振原理,其原理电路如图 1 所示。

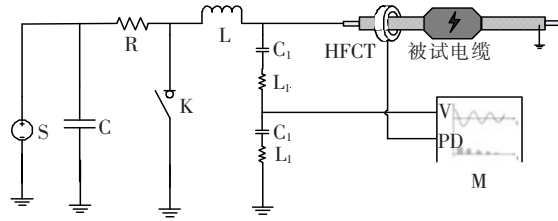


图 1 振荡波电压法原理示意

Figure 1 The schematic of oscillation wave voltage method

在高压开关 K 闭合前,高压直流电源 S 通过限流电阻 R、谐振电感 L 向被试电缆等效电容充电。当充电电压达到预定电压值时,高压开关 K 迅速闭合,在谐振电感 L 和被试电缆组成的串联谐振回路上产生衰减的振荡电压波。衰减的振荡波电压在多次极性变换过程中,电缆缺陷处会激发出局部放电信号,然后通过套在电缆首端的高频电流传感器(high frequency current transformer, HFCT)测量局部放电信号。

1.2 试验设计

实验中使用自主设计的振荡波测试系统,试验现场如图 2 所示。试验电缆采用长 500 m 铝芯 XLPE 绝缘钢带铠装聚氯乙烯护套三相电力电缆,型号为 YJLV22,规格为 $3 \times 25 \text{ mm}^2$,额定电压 8.7 kV/15 kV。实验电缆对地等效电容为 86.4 nF,谐振电感为 68 H, LC 谐振频率公式为

$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{LC}} \quad (1)$$

由式(1)计算得知, $f = 65.7 \text{ Hz}$,振荡波电压的波形与频率均满足 IEC 60270^[10]标准对试验电压特性的要求。

在三相电缆的 250 m 处分别人工制作中间接头,其中两相带有局部缺陷,一相预设纵向刀痕缺陷,另一相预设外半导体层搭接缺陷,无缺陷相作为对照。纵向刀痕缺陷位于主绝缘表面,沿电缆径向长、宽、深分别为 40、0.2、1 mm,在模拟制作中间接头过程中,剥离外半导体层时不慎将刀尖划进 XLPE 层里形成的主绝缘气隙缺陷。外半导体层搭接缺陷,即中间接头半导管与原电缆外半导体层之间存在沿电缆径向约 5 mm 宽的环形气隙,模拟制作中

间接头过程中半导管与电缆本体外半导体层搭接不良,而在外半导体层形成环形气隙缺陷。纵向刀痕缺陷和外半导搭接缺陷制作实物如图3所示。

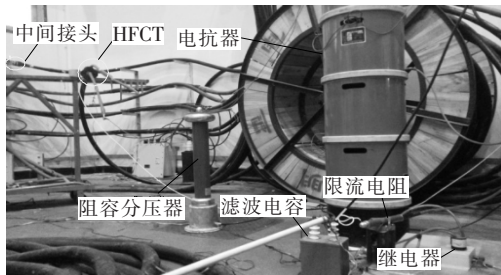


图2 试验平台

Figure 2 Experimental platform

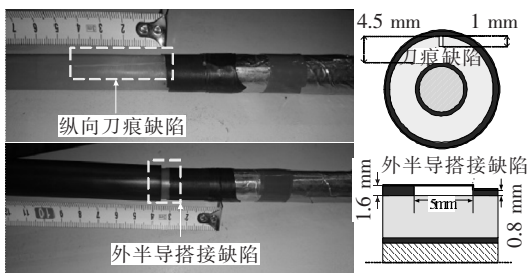


图3 2种缺陷的制作过程

Figure 3 Production process of two defects

1.3 试验结果及分析

在电压为0时测量系统的环境噪声,环境噪声幅值约为20 pC。通过对制作的外半导搭接缺陷进行检测试验,得知其局部放电起始电压(partial discharge initiation voltage, PDIV)为 $1.4U_0$ (U_0 为额定电压),单次放电波形如图4所示。单次放电的入射波与反射波相隔 $3\mu\text{s}$ 左右,可计算得到缺陷位置为250m处与实际缺陷位置相吻合。

在 $2U_0$ 电压等级下测得100组数据,绘制局部放电相位谱图(phase resolved partial discharge, PRPD),如图5所示。可知,外半导体层搭接不良缺陷放电主要集中在一、三象限,一、三象限的放电次数相差明显,但一象限放电量要明显高于三象限。局部放电激发特征在一、三象限出现了明显的不对称性。

外半导搭接缺陷局部放电是一种典型的表面放电,由于外半导界面缺陷中空气介质具有较低的相对介电常数,而介电常数的突变会导致分界面附近电场发生畸变。在 $1.4U_0$ 时,外半导搭接缺陷气隙内的电场已达到空气的击穿场强,进而开始发生局部放电。

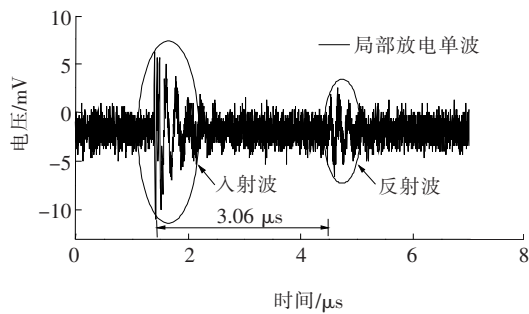


图4 外半导搭接不良缺陷单次放电波形

Figure 4 Partial discharge waveform of poor connection of outer semiconductor

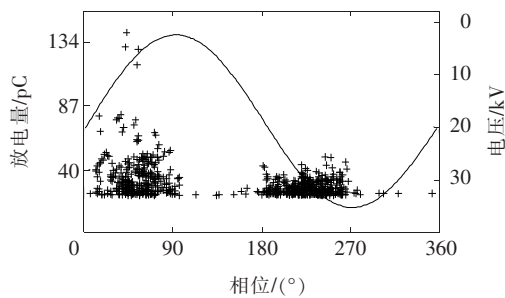


图5 外半导体层搭接缺陷的PRPD

Figure 5 PRPD of poor connection of outer semiconductor

通过对制作的纵向刀痕缺陷进行检测试验,结果发现刀痕缺陷在行业标准^[11]规定的 $2U_0$ 电压下仍未检测到局部放电信号。其原因推测是在实际制作中间接头时XLPE绝缘层表面硅脂填入刀痕气隙中,增加了刀痕中的绝缘性能,使得刀痕缺陷更难以放电。

2 电场仿真

通过上述的振荡波局放测试试验,能够从实验的角度看出振荡波电压法易于检测出外半导体层搭接不良缺陷,而对纵向刀痕缺陷的测试效果不足。为了进一步分析振荡波作用下外半导体层搭接不良缺陷和纵向刀痕缺陷内部的电场畸变情况,利用多源物理场COMSOL Multiphysics有限元分析软件仿真出缺陷及周围的电场分布情况,并从电场的角度解释2种缺陷在振荡波下的表征效果。

2.1 模型搭建

利用COMSOL软件对电缆建立三维电场模型,其中电缆本体部分长40mm,中间接头部分长60mm,2种缺陷的仿真模型如图6所示。缆芯表

面电势设置为试验电压,电缆外半导体层外表面设置为地电位,仿真频率设为谐振频率 65 Hz,四面体网格极端细化剖分模型。各材料的电导率、相对介电常数等参数^[12]如表 1 所示。

首先,利用 2 类缺陷的起始放电电压统一表达检测时缺陷在振荡波下的表征效果,此时仿真时的缺陷尺寸与实验室制作的缺陷尺寸一致,仿真电压与缺陷起始放电电压一致,其中刀痕缺陷设置为 $2U_0$ 。然后,为了满足现场缺陷的多样性,刀痕和外半导搭接不良缺陷设计多种尺寸,以统计不同尺寸大小的同种缺陷在振荡波下的表征效果。

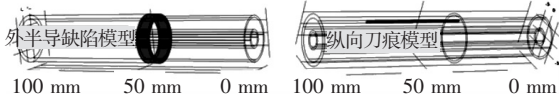


图 6 2 种缺陷模型

Figure 6 Two defect models

表 1 电场仿真材料相关参数

Table 1 The related parameters of electric field simulation materials

材料	电导率/(S/m)	相对介电常数	厚度/mm
铝芯	3.774×10^7	1	2.82
内外半导体层	2	100	0.80
XLPE	1×10^{-18}	2.3	4.50
接头半导体管	5	100	1.60
气隙	2.3×10^{-14}	1	—
硅胶	2×10^{-9}	5	—

2.2 外半导缺陷仿真结果及分析

在电压等级为 $1.4U_0$ 下,外半导搭接缺陷轴向截面图的电场分布如图 7 所示,可以看出,在外半导体层缺陷气隙内部电场强度显著增大,其中在外半导体层截断处的 2 个角落存在严重的电场畸变。由于空气气隙的击穿场强远低于 XLPE 材料,缺陷内的放电开始于空气气隙,因此,讨论气隙电场时以气隙内电场强度最大值 E_{max} 为参数。

沿图 7 的 XLPE 主绝缘与外半导体层的分界面上 0.01 mm 的轴向(图 7 虚线)电场强度如图 8 所示。可以看出,缺陷内部场强最大值靠近电缆本体半导体层截断处,由于仿真模型中存在曲率半径极小的尖端,导致了仿真中的电场强度较现场实验的缺陷电场偏大。另外,由于电势在气隙两端的外半导体层截断位置集中降落至地电位,所以气隙靠近更薄的原电缆外半导体层截断位置的电场更强,整个

气隙电场强度最大值 E_{max} 也出现在该位置(图 7 中 A 处),即此处是最容易发生局部放电的地方。

为了理清不同气隙缺陷参数与缺陷电场之间的关系,改变仿真模型中的气隙宽度并计算电场进行讨论。由于过长(大于 10 mm)的外半导气隙的最大电场强度 E_{max} 变化不明显,故仿真中气隙宽度取值范围设定为 0~10 mm,取值间隔为 0.5 mm。气隙缺陷内电场强度最大值 E_{max} 出现在气隙内,其中在 $1U_0$ (8.7 kV) 下 E_{max} 与气隙宽度的关系如图 9 所示。

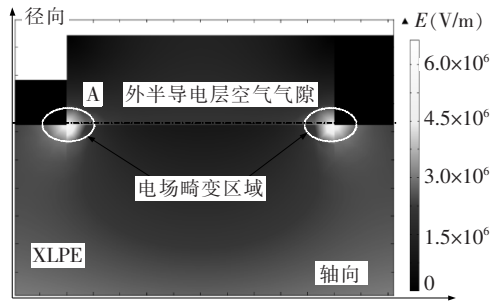


图 7 外半导搭接缺陷轴向截面电场强度

Figure 7 Axial cross-section electric field strength of poor connection of outer semiconductor

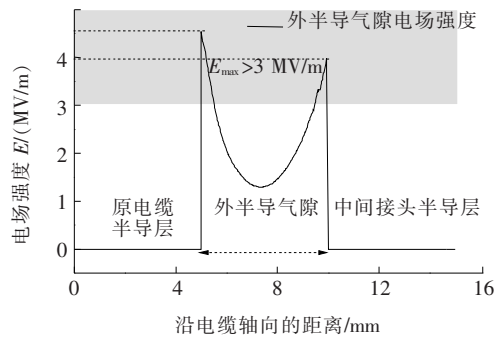


图 8 $1.4U_0$ 电压下绝缘层与半导体层分界面以上的电场强度
Figure 8 The electric field strength above the interface between the insulating and the semiconducting layers under $1.4U_0$

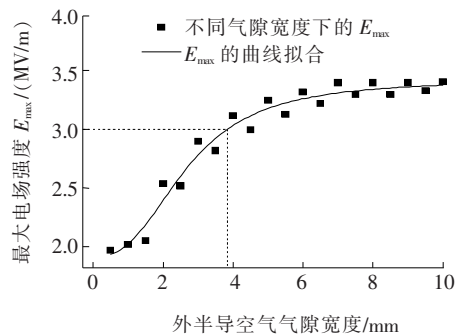


图 9 在 U_0 下 E_{max} 与外半导空气气隙宽度的关系
Figure 9 The relationship between E_{max} and air gap width of the external semiconductor lap defect under U_0

从图9中可以看出, E_{\max} 的总体趋势是随气隙宽度的增大而增大。在气隙宽度较小(小于 1.5 mm)时,气隙内部最大电场强度 E_{\max} 较小,且增加缓慢,其原因是空气气隙很窄,半导体层相对介电常数很高,两侧的半导体层起到了均匀电场的作用,导致 E_{\max} 较小;在气隙宽度为 1.5~5 mm 时,气隙内部 E_{\max} 迅速增大,其原因是随着气隙变宽两侧半导体层均匀电场的作用被削弱,而气隙角落畸变电场的影响逐渐突显出来。其中,在宽度约为 4 mm 时,达到空气的击穿场强 3 MV/m;在气隙宽度为 5~8 mm 时,气隙内部最大电场强度 E_{\max} 缓慢增加,这是由于气隙宽度更大,气隙角落畸变电场的影响逐渐达到极限,在宽度为 8 mm 之后, E_{\max} 保持稳定而不再增加。

2.3 刀痕缺陷仿真结果及分析

为研究纵向刀痕中充满空气与填充硅脂在电场方面的异同,在行业标准^[1]规定的 $2U_0$ 电压下进行电场仿真。当充满空气或填充硅脂时,刀痕缺陷径向截面的电场分布如图 10 所示,刀痕缺陷沿电缆径向的电场强度分布如图 11 所示。

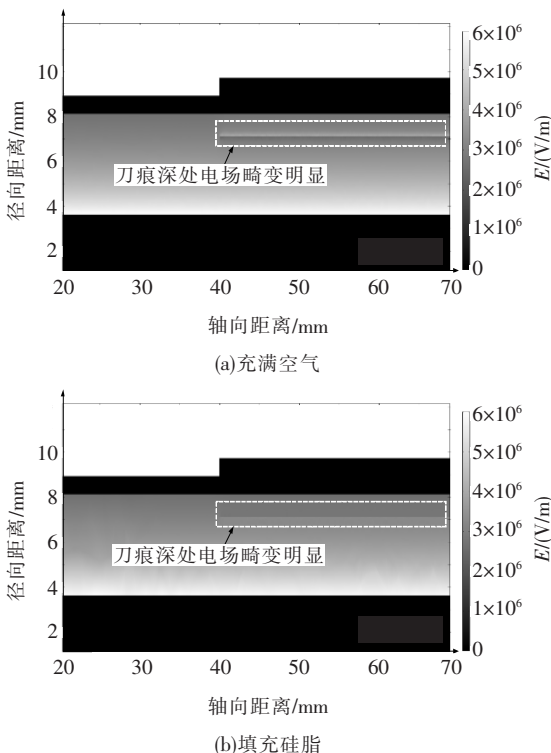


图 10 $2U_0$ 电压下纵向刀痕缺陷径向截面电场分布

Figure 10 Radial section electric field distribution of the longitudinal knife defect under $2U_0$.

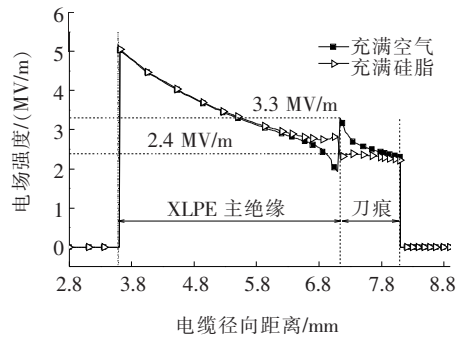


图 11 $2U_0$ 电压下纵向刀痕缺陷的径向电场强度分布

Figure 11 Radial electric field strength along the longitudinal knife defect under $2U_0$.

从图 10、11 可以看出,沿刀痕缺陷径向由里到外电场强度逐渐减小,在刀痕最深处为场强最大值。在 $2U_0$ 电压下,若刀痕缺陷中充满空气,则已达到放电条件;若刀痕缺陷中填充硅脂,刀痕缺陷内部的相对介电常数改变,内部电场强度有所降低,使 $2U_0$ 电压下并未达到放电条件。由图 11 还可知,硅脂的作用明显降低了缺陷内部的电场强度,缺陷周围的 XLPE 主绝缘承受较高场强。

在交变电场中,电介质的电场强度分布与其相对介电常数 ϵ_r 成反比,在电缆附件完成初期,主绝缘表面均匀涂抹硅脂,此时刀痕内部主要填充物质为硅脂,硅脂的相对介电常数 $\epsilon_r \approx 5$,XLPE 的 $\epsilon_r \approx 2.3$,在硅脂与 XLPE 的界面上 ϵ_r 突然增大,电场将更集中在相对介电常数较小的 XLPE 材料内部,硅脂内部并不是整个电缆的电场最弱点。XLPE 材料的击穿场强较高,电场强度的小幅增加不足以使其材料内部发生局部放电,同时,分布在硅脂内的电场也难以达到硅脂的击穿场强(通常在 23~28 MV/m)。因此,刀痕缺陷在有硅脂的情况下难以发生局部放电现象。

然而,在较长一段时间的热、电气应力和环境应力等一系列综合因素的影响后,包裹于电缆绝缘层的硅橡胶等绝缘材料握力下降,会导致空气、水分等弱绝缘介质的渗入以及硅脂等绝缘介质的流失与干涸,刀痕缺陷内部将出现部分气隙空穴甚至整体充满空气。空气的相对介电常数为 $\epsilon_r \approx 1$,在 XLPE 的交界面 ϵ_r ,电场将集中分布在气隙内部,而气隙的击穿场强远低于 XLPE 和硅脂材料,因此气隙内部将极易发生局部放电。这与大量研究者发现刀痕缺陷初始阶段难以放电,而后期剧烈放电的发展规

律是吻合的^[13]。

为了理清不同的气隙缺陷参数与缺陷电场之间的关系,改变仿真模型中刀痕缺陷的深度并计算电场进行讨论。由于刀痕缺陷中 E_{\max} 在靠近缆芯的缺陷介质与 XLPE 的分界面,即刀痕最深处, E_{\max} 的值不受刀痕长度的影响,仿真中刀痕的长度设为固定值 40 mm,一般刀痕的宽度很小,设为固定值 0.2 mm,刀痕的深度一般不可控,设定取值范围为 0~2 mm,取值间隔为 0.1 mm。在 $2U_0$ 电压下气隙缺陷内电场强度最大值 E_{\max} 与刀痕深度的关系如图 12 所示。

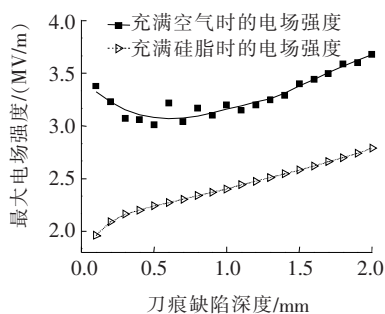


图 12 在 $2U_0$ 下 E_{\max} 与纵向刀痕缺陷深度的关系
Figure 12 Relationship between E_{\max} and depth of longitudinal knife defects under $2U_0$

从图 12 中可以看出,当刀痕缺陷里充满空气时,随刀痕深度的增加,缺陷内 E_{\max} 先减小后增加。其中,在刀痕缺陷的深度极小(0~0.1 mm)时,缺陷气隙里具有很高的电场强度,其原因是极薄的空气气隙导致电场的严重畸变;而随着气隙深度的增加(0.1~0.5 mm),空气区域扩大,畸变程度减弱,电场逐渐分布均匀, E_{\max} 减小;而随着气隙深度进一步加大(0.5~2 mm), E_{\max} 逐渐增加,这是因为,随着气隙越深,缆芯表面极高的场强将影响到缺陷气隙内的电场强度。

当刀痕缺陷里填充硅脂时,随刀痕深度的增加,缺陷内 E_{\max} 先迅速增加然后缓慢增加,在刀痕深度为 0~2 mm 时, E_{\max} 较小。分析原因:刀痕缺陷内硅脂的相对介电常数 $\epsilon_r \approx 5$,大于主绝缘 XLPE 的相对介电常数,在刀痕较浅时,硅脂的作用大大削弱了刀痕所带来的影响, E_{\max} 很小;随着刀痕的加深(0.5~2 mm)硅脂带来的影响被迅速削减,缆芯表面极高的场强起主要作用,使 E_{\max} 继续增加,但增加速度稍缓。尽管如此, $2U_0$ 电压下硅脂内的电场

强度仍远未达到硅脂的击穿场强,说明电缆附件在有硅脂作用下难以通过局部放电激发出来。

对比刀痕缺陷充满空气和填充硅脂,可知硅脂的作用大大降低了缺陷内部的电场强度,特别是在缺陷极浅时。当空气气隙较浅时,由于硅脂的作用在运行初期不易检测到局部放电,但是随着运行时间延长,缺陷里的硅脂全部流失,并逐渐充满空气。这样会导致电场强度大大增加,即使是非常微小的刀痕缺陷也会引起强烈的局部放电,这成为了实际工作中的绝缘薄弱点,因此,在实际制作中间接头时应当尽力避免这类缺陷。

3 结语

该文通过对 XLPE 电缆中间接头 2 种局部缺陷的振荡波局放测试试验以及有限元电场仿真,得出结论:

1) 振荡波电压对于界面缺陷类的外半导搭接不良缺陷表征效果更好,其原因是缺陷气隙导致介电常数的突变,使外半导截断处附近局部场强增大,致使缺陷内空气放电;

2) 绝缘层表面涂抹的硅脂降低了缺陷气隙内的电场强度,使电场最强点集中在 XLPE 材料内部,同时提高了界面的击穿场强,使硅脂起到了抑制初期刀痕缺陷局部放电的作用;

3) 随着刀痕中硅脂的流失,缺陷中出现了气隙,此时电场最强点集中在气隙内部,气隙内部极易发生局部放电,因此,刀痕缺陷后期发展迅速并且能够检测到局部放电现象。

参考文献:

- [1] 陆国俊,熊俊,李光茂,等. 振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电模式识别研究[J]. 高压电器,2017,53(2): 95-100.
LU Guojun, XIONG Jun, LI Guangmao, et al. Pattern recognition of XLPE cable partial discharge under oscillating voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2017, 53(2): 95-100.
- [2] 刘震宇,刘振英,范贺明. 基于 EMD-ICA 的高压电缆局部放电信号去噪研究[J]. 电力系统保护与控制,2018, 46(24): 83-87.
LIU Zhenyu, LIU Zhenying, FAN Heming. Study on

- signal de-noising of high voltage cable partial discharge based on EMD-ICA[J]. *Power System Protection and Control*, 2018, 46(24): 83-87.
- [3] 杜荣林,李明德,王瑞琪,等. XLPE 电缆半导体层对局部放电传播特性的影响分析[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(2): 152-157.
- DU Ronglin, LI Mingde, WANG Ruiqi, et al. Influence of XLPE cable semiconducting layer on the propagation property of partial discharge [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(2): 152-157.
- [4] Frank J, Gulski E, Johan J S, et al. Application of advanced PD diagnostics for condition based maintenance of MV power cable systems [C]//IEEE International Symposium on Electrical Insulation, Anaheim, CA, USA, 2000.
- [5] 王有元,王亚军,熊俊,等. 振荡波电压下 10 kV 交联聚乙烯电缆中间接头的局部放电特性[J]. *高电压技术*, 2015, 41(4): 1068-1074.
- WANG Youyuan, WANG Yajun, XIONG Jun, et al. Partial discharge characteristics of 10 kV XLPE cable intermediate joint under oscillatory wave voltage [J]. *High Voltage Technology*, 2015, 41(4): 1068-1074.
- [6] 刘刚,阮班义. 基于振荡波测试系统的 10 kV XLPE 电缆终端半导体层缺陷检测效果分析[J]. *华东电力*, 2011, 39(8): 1294-1298.
- LIU Gang, RUAN Banyi. Analysis of detected on semi-conductive layer with defects of 10 kV XLPE cable terminals based on oscillating wave test system [J]. *East China Electric Power*, 2011, 39 (8): 1294-1298.
- [7] 杨引虎,罗建勇,韦远涛,等. 分布式电缆局部放电在线监测系统的研制[J]. *智慧电力*, 2018, 46(3): 91-94.
- YANG Yinhu, LUO Jianyong, WEI Yuantao, et al. Development of distributed on-line PD monitoring system for cables [J]. *Smart Power*, 2018, 46(3): 91-94.
- [8] 潘荣超,刘念,周凯,等. 振荡电压波作用下电缆局部放电的仿真分析[J]. *电测与仪表*, 2013, 50(8): 10-13+67.
- PAN Rongchao, LIU Nian, ZHOU Kai, et al. Simulation analysis of XLPE cables' partial discharge by using oscillating voltage wave [J]. *Electrical Measurement & Instrumentation*, 2013, 50(8): 10-13+67.
- [9] 陈岩,袁新平,等. 基于电流源型变流器的新型海上风电场组网系统[J]. *电力科学与技术学报*, 2017, 32(3): 29-37.
- CHEN Yan, ZHONG Xinping. A new offshore wind farm network system based on current source converter [J]. *Journal of Electric Power Science and Technology*, 2017, 32(3): 29-37.
- [10] IEC 60270—2000. High-voltage test technique: partial discharge measurements [S].
- [11] DL/T 1575—2016. 6~35 kV 电缆振荡波局部放电测量系统 [S].
- [12] Zhou K, Huang M, Tao W, et al. A possible water tree initiation mechanism for service-aged XLPE cables: Conversion of electrical tree to water tree [J]. *IEEE Transactions on Dielectrics & Electrical Insulation*, 2016, 23(3): 1854-1861.
- [13] 万利,周凯,李旭涛,等. 以电场特征理解电缆终端气隙的局部放电发展机理[J]. *高电压技术*, 2014, 40(12): 3709-3716.
- WAN Li, ZHOU Kai, LI Xutao, et al. Toward understanding development mechanism of partial discharge in air gap defects in cable termination by analysis of electric field characteristics [J]. *High Voltage Engineering*, 2014, 40(12): 3709-3716.