

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2018.07.021

10 kV 电缆附件中刀痕缺陷的局部放电趋势研究

赵学风¹, 倪 辉², 李 旭³, 林 涛³, 琚泽立¹,
蒲 路¹, 范明豪⁴, 邓军波⁵, 张冠军⁵

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710100; 2. 国网宁夏电力有限公司电力科学研究院, 银川 750002;
3. 国网陕西省电力公司, 西安 710000; 4. 国网安徽省电力公司电力科学研究院, 合肥 230022;
5. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验, 西安 710049)

摘要: 电缆附件的缺陷严重影响电网安全, 其在耐压试验和运行过程中呈现的局部放电特性具有重要的研究价值。文中以常见的刀痕缺陷的局部放电为研究重点, 将该缺陷分为2、3、4 mm深度环切刀痕和3 mm深度纵切刀痕。采用长时间加压监测缺陷的局部放电过程, 统计不同时间下缺陷的局部放电特征量, 绘制趋势图及谱图, 并从物理层面解释各种差异。试验结果表明: 刀痕缺陷的局部放电过程以刀痕的表面放电为开始, 然后演变为电树枝放电最终贯穿, 不同深度、不同位置的刀痕缺陷在击穿前会呈现相似的电树枝放电现象; 刀痕越深, 表面放电的影响越大; 纵切刀痕更易演化为电树枝放电致使在较短时间内击穿。

关键词: 电缆附件; 局部放电; 刀痕缺陷; PRPD谱图

Study on Partial Discharge Tendency of Knife Incision Defects in 10 kV XLPE Accessories

ZHAO Xuefeng¹, NI Hui², LI Xu³, LIN Tao³, JU Zeli¹, PU Lu¹,
FAN Minghao⁴, DENG Junbo⁵, ZHANG Guanjun⁵

(1. Research Institute of State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710100, China; 2. Power Research Institute of the State Grid Ningxia Power Company Limited, Yinchuan 750002, China; 3. State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710000, China; 4. Research Institute of State Grid Anhui Electric Power Company, Hefei 230022, China; 5. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment, Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The defects of cable accessories will seriously affect the safety of the grid, and the characteristics of partial discharge in voltage withstand test and operation process have important research value. This paper focused on knife incision defects divided into 2, 3, 4 mm annular knife incision defects and 3 mm vertical knife incision defect. Long time monitoring partial discharge of defects is used. Statistics on the partial discharge characteristics of defects at different time are counted. Trend diagrams and spectrum diagrams are drawn, and the differences are interpreted physically. Test results show that partial discharge of knife incision defects starts with the surface discharge and turns into electrical tree discharge and breaks down. Knife incision defects with different depth and location will show similar electrical tree discharge before breakdown. The deeper incision is the more surface discharge effects on defects. Vertical knife incision defect is more likely to evolve into electrical tree discharge and breaks down in a short time.

Key words: cable accessories; partial discharge; knife incision defects; PRPD pattern

0 引言

因出色的绝缘性能、机械性能及日益简便的生产工艺, XLPE 电缆在随着城市电网的发展而不断发挥着其传输电能的作用, 在逐步取代油纸绝缘电缆的同时, 也面临着诸多问题。其中由于安装工艺

的失误而导致的故障时有发生, 甚至出现诸如电缆头爆炸和电缆沟失火等严重事故^[1-2]。因此, 对电缆安装时的薄弱部位即电缆附件中可能出现的缺陷研究至关重要, 而缺陷在耐压试验和运行过程中的局部放电特性是研究重点^[3]。

目前, 对电缆附件中的缺陷研究主要针对诸如

收稿日期: 2018-01-05; 修回日期: 2018-03-16

基金项目: 国家电网公司科技项目(52120016036X)。

Project Supported by Science and Technology Program of State Grid Corporation(52120016036X)。

气隙、应力管(锥)错位、导体尖刺、金属微粒等典型缺陷^[4-6],一般将这些缺陷进行电场仿真^[7],计算缺陷中的电场分布,以及会对电缆在工频电压或振荡波电压下的局部放电特性进行对比^[8-9],更深一步会将其局部放电试验所得数据进行不同算法的模式识别^[10]。然而,电缆附件内缺陷的复杂性远超目前的研究,每种缺陷的局部放电差异性在物理层面上缺少探究,其局部放电的演化过程也缺少试验数据表征。

为此,文中研究电缆附件中最能表现内部气隙的刀痕缺陷,对于此缺陷,文[11]通过电缆附件老化平台,分析了刀痕缺陷的单个放电脉冲波形、放电频谱以及放电相位分布等特征;文[12]对电缆附件刀痕缺陷表面的形貌特征及表面电导率进行了探究。文中在前人的基础上进行位置及刀痕深度的细化,并采用长时间加压监测缺陷的局部放电过程,统计不同时间下缺陷的局部放电特征量,绘制趋势图及谱图,并对比不同程度刀痕缺陷,从物理层面解释各种差异。

1 试验方案

1.1 试验回路

文中采用基于脉冲电流法的交流电压局部放电检测方法见图1^[13-15]。

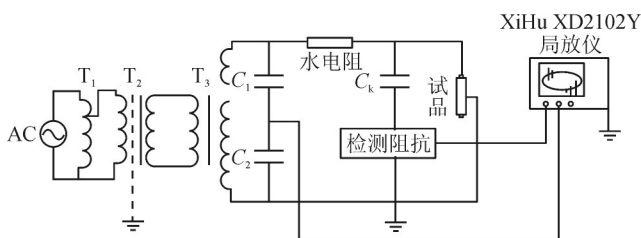


图1 局部放电测试回路

Fig. 1 Partial discharge test circuit

测量系统中,自耦调压器、隔离变压器、无局放高压试验变压器分别为 T_1 、 T_2 、 T_3 。试验变压器的额定电压 $U_N=100$ kV,额定功率为 $S_N=10$ kVA,100 kV以下局部放电量小于5 pC。耦合电容 $C_k=400$ pF。采集系统为西湖电子XD2102Y局部放电检测仪,采样频率为10 MS/s,可长时间监测并记录局部放电量的变化,该研究将所得试验数据存入PC机中进行统计分析。

1.2 实验试品

该研究采用YLV22 8.7/10 kV短电缆试品进行试验,电缆绝缘层厚度4.5 mm,电缆一端按照实际情况安装10 kV 1号型冷缩附件,并根据试验目的在附件中预置缺陷;另一端为非缺陷端,采用装有硅油的电缆试验终端,可保证35 kV内有效阻止非缺陷处局部放电的干扰^[16]。

10 kV XLPE电缆终端与接头通常在安装现场完成制作。在剥离紧贴于交联聚乙烯绝缘层的外半导体层过程中,首先需用电工刀在半导体层截断处进行环切,再从环切处沿轴向进行纵切,完成上述两个步骤才可将半导体层剥离。由于处理现场复杂以及安装人员技术所限,进刀深度难以控制,常会在交联聚乙烯绝缘层上留下环切和纵切两类刀痕。刀痕在附着于电缆附件后形成空隙,在电场的作用下会产生局部放电。而半导体层截断处电场的畸变加剧此缺陷的放电强度^[17]。

文中设计4种刀痕缺陷见图2,分别为紧贴于半导体层断口处的环切刀痕,深度为2、3、4 mm,以及从半导体断口处起始的30 mm长3 mm深的纵切刀痕。

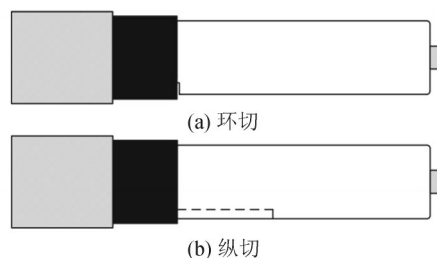


图2 环切刀痕缺陷

Fig. 2 Annular knife incision defect

1.3 试验步骤

首先采用电压升降法确定各类缺陷在交流高压下的局放起始电压 $PDIV$,然后从低于 $PDIV$ 值开始加压,对刀痕缺陷进行长时间耐压与局部放电监测试验,分别以 U_0 、 $1.7U_0$ 、 $2.5U_0$ 、 $3.5U_0$ 为耐压梯度^[18-19],且在一种电压梯度下持续保持低强度的局部放电水平时再加压进行高一电压梯度的耐压试验,直至击穿。

2 试验结果与分析

依据试验方案,对不同电缆附件缺陷进行局部放电测试,获得局部放电量与相位的数据,对此数据进行统计,绘制PRPD谱图,计算一段时间间隔内所施电压正负半周下的平均放电量与放电重复率,其中,PRPD谱图为累计的500个工频周期数据。

2.1 环切深度2 mm刀痕缺陷

该缺陷在 U_0 (8.7 kV)下无局部放电信号,局放起始电压 $PDIV=15.7$ kV。升压至 $2.5U_0$ 进行耐压与局放监测同步试验,在1 h后局放平稳,升压至 $3.5U_0$ 继续进行耐压与局放监测同步试验。在155 min后电缆击穿,降压后观察电缆外部整体没有损坏痕迹,将电缆附件解体,在环切刀痕处有长轴为8 mm短轴为6 mm的椭圆状灼烧黑洞见图3,灼烧痕迹环绕附近区域。

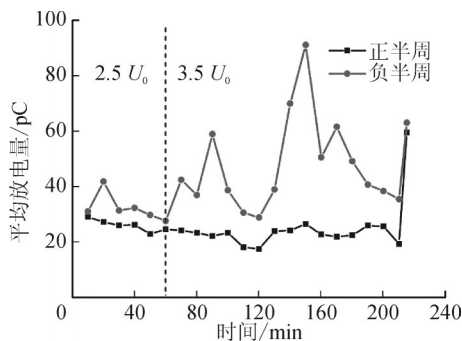
对耐压时监测的局放数据进行统计,见图4。



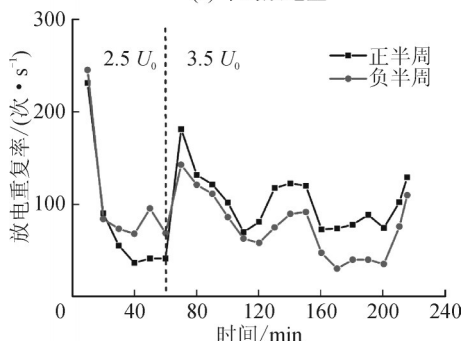
图3 环切2 mm刀痕缺陷击穿图

Fig. 3 Breakdown diagram of 2 mm deep annular knife incision defect

从图4可以看出,在 $2.5U_0$ 时,平均放电量一直比较平稳,但是放电重复率在耐压初期较大,短时间内急剧下降并保持一定数值范围内,并且在施压起点至下降期正负半周的放电重复率都比较接近,随后负半周的放电重复率较高于正半周的。当 $2.5U_0$ 向 $3.5U_0$ 过渡后,正半周的平均放电量还处于 $2.5U_0$ 下的状态且较为稳定,负半周的平均放电量在 $3.5U_0$ 时有明显的上升,且在90 min和150 min处有两个高峰。在击穿的最后时刻,正负半周的平均放电量都有急剧增高的情况。对于放电重复率,在 $2.5U_0$ 时基本以负半周的高于正半周的数值为主,而升压至 $3.5U_0$ 后,正半周的放电重复率却超过了负半周的。整体看放电重复率随电压升高而增加,在同一电压下,随时间进行波动式的下降,在击穿前有所上升。



(a) 平均放电量



(b) 放电重复率

图4 环切2 mm刀痕缺陷放电趋势图

Fig. 4 Discharge trend chart of 2 mm deep annular knife incision defect

2.2 环切深度3 mm刀痕缺陷

该缺陷在 U_0 (8.7 kV)下无局放信号,局放起始电

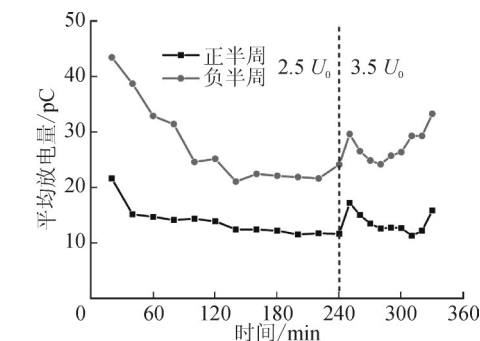
压 $PDIV=12.6$ kV,升压至 $1.7U_0$ 进行耐压1 h,升压至 $2.5U_0$ 进行持续耐压与局放监测同步试验,总共进行4 h并且局部放电平稳,升压至 $3.5U_0$ 继续进行耐压与局放监测同步试验。在91 min后电缆击穿,降压后观察电缆外部整体没有损坏痕迹,将电缆附件解体,在环切刀痕处有长轴为8 mm短轴为5 mm的椭圆状灼烧黑洞见图5,灼烧痕迹环绕附近区域。



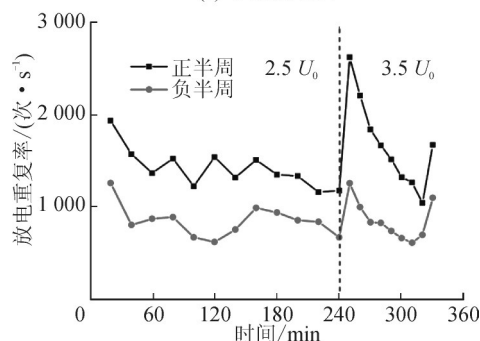
图5 环切3 mm刀痕缺陷击穿图

Fig. 5 Breakdown diagram of 3 mm deep annular knife incision defect

对于耐压时局放数据进行统计处理见图6。从图6可以看出,正负半周的平均放电量在 $2.5U_0$ 下随着时间缓慢下降,最终达到一种稳定的状态,而对应的放电重复率也呈现出小幅上下波动,其在起始阶段的数值都较整个4 h耐压阶段大。当施加电压上升至 $3.5U_0$,放电重复率急剧增大后又缓慢下降,后趋于 $2.5U_0$ 的平稳状态。平均放电量在电压升高时小幅增长又缓慢下降。两个参量都在最后的击穿前阶段上升,但是其值并未达到整个耐压试验的最大值。



(a) 平均放电量



(b) 放电重复率

图6 环切3 mm刀痕缺陷放电趋势图

Fig. 6 Discharge trend chart of 3 mm deep annular knife incision defect

2.3 环切深度4 mm 刀痕缺陷

该缺陷局放起始电压 $PDIV=3.8$ kV, 在整组试验中最低, 当电压缓慢升至 5 kV 后随即击穿, 降压后观察电缆外部整体没有损坏痕迹, 将电缆附件解体, 在环切刀痕处有直径为 1 mm 的击穿点见图 7, 灼烧痕迹较少。

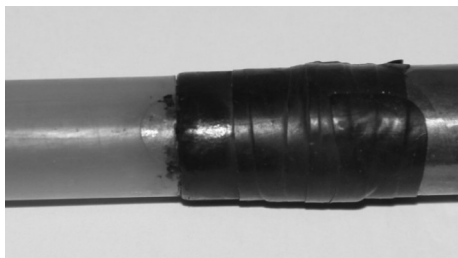


图7 环切4 mm 刀痕缺陷击穿图

Fig. 7 Breakdown diagram of 4 mm deep annular knife incision defect

2.4 纵切深度3 mm 刀痕缺陷

该缺陷在 $U_0(8.7$ kV) 下无局放信号, 局放起始电压 $PDIV=17.2$ kV, 升压至 $2.5U_0$ 进行连续耐压与局放监测同步试验, 在 111 min 后电缆击穿, 降压后观察电缆外部整体没有损坏痕迹, 将电缆附件解体, 在纵刀痕处有直径为 4 mm 的灼烧黑洞见图 8, 且灼烧中心距离半导体带截断处为 8 mm, 灼烧痕迹环绕附近区域。



图8 纵切3 mm 刀痕缺陷击穿图

Fig. 8 Breakdown diagram of 3 mm deep vertical knife incision defect

纵切 3 mm 刀痕缺陷放电趋势图($2.5U_0$)见图 9。由图 9 的趋势图形可以看出, 正负半周的平均放电电量起始时有小幅上升, 后下降, 并且趋于平稳, 在最终击穿时也未达到整个过程的最高水平。对于放电重复率, 最初施加电压时是负半周的高于正半周的, 后在 10 min 内正半周的放电重复率就超过负半周, 并一直保持此种状态。放电重复率的整体趋势是平稳, 甚至在最后即将击穿也没有显著增高。

2.5 各刀痕缺陷的比较与分析

由前面 4 节可以看出, 在长时间高幅值的耐压下, 缺陷都最终在刀痕处击穿, 但其局部放电的特性在不同深度下表现不同。见表 1, 环切刀痕其随着刀痕深度的增加, 其局放起始电压也在降低, 而

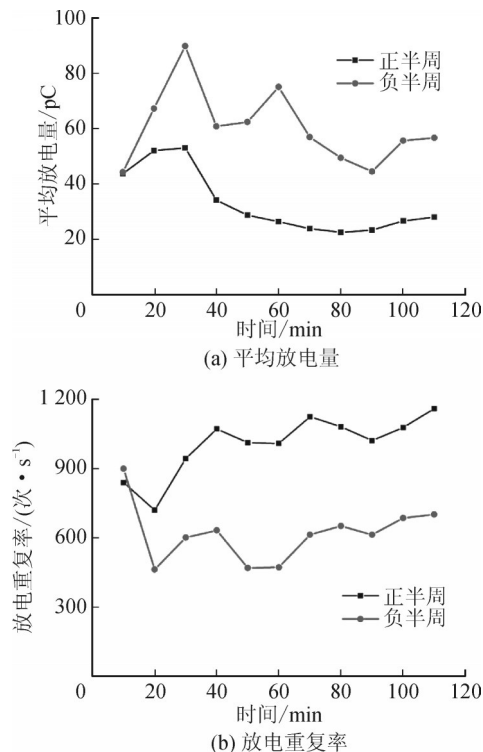


图9 纵切3 mm 刀痕缺陷放电趋势图($2.5U_0$)

Fig. 9 Breakdown diagram of 3 mm deep vertical knife incision defect($2.5U_0$)

击穿阶梯内的耐压时间也显著减小。为了解释这种现象, 文中对刀痕缺陷随时间变化的局放过程加以推测见图 10。在刀痕缺陷局部放电的初期, 其放电的主要形式为刀痕气隙内的表面放电, 此时, 绝缘层并未形成电树, 而靠近半导体带端口处的刀痕气隙内电场畸变受到应力锥的抑制, 又由于这部分气隙面积大, 表面较为粗糙, 因此难以发生常规固体绝缘局放研究中的小气隙放电^[20], 反而发生的是从应力锥至绝缘层处的表面放电, 其表现为放电电量较大, 环切 3 mm 刀痕缺陷 PRPD 谱图见图 11, 如图 11 中, 环切 3 mm 刀痕缺陷各放电阶段相比, 初始阶段 PRPD 谱图中大幅值脉冲较多。并且随着刀痕深度的增加, 其表面放电位置越靠近线芯的高压端, 于是局放起始电压就越低。

在放电持续了一段时间并且电场达到一定数值后, 会在刀痕与 XLPE 绝缘的交界处形成电树枝, 此时刀痕气隙内的粗糙处由于前期的表面放电而烧灼光滑, 表面放电减少, 刀痕的放电向绝缘层的电树枝放电过渡, 放电较为平缓, 见图 11(b)、(c)。在长时间电场的作用下, 电树枝最终生长至线芯处, 于是贯穿绝缘层并引起应力锥至线芯的大电流, 烧灼绝缘层, 出现黑洞如图 5 等。而由于刀痕深度的增加, 绝缘层的长度相对减小, 于是电树形成至最终贯穿的时间也减少。

表 1 各刀痕缺陷的局部放电参数统计

Table 1 Partial discharge statistical parameters of knife incision defects

刀痕类型	PDIV/kV	击穿电压 ($U_0=8.7\text{ kV}$)	击穿阶梯内耐 压时间/min	击穿前			
				平均放电量/pC		放电重复率/(次·s ⁻¹)	
				正半周	负半周	正半周	负半周
环切 2 mm 深	15.7	$3.50U_0$	155	59.4	62.9	128.9	109.6
环切 3 mm 深	12.6	$3.50U_0$	91	15.7	33.1	1 672.1	1 096.6
环切 4 mm 深	3.8	$0.57U_0$	<1	8.7	4.9	80.2	195.9
纵切 3 mm 深	17.2	$2.50U_0$	110	28.0	56.7	1 157.8	700.8

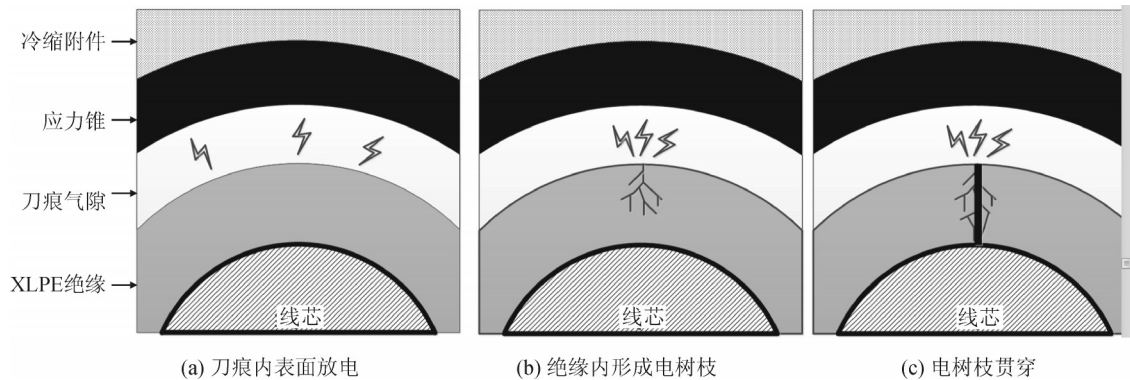


图 10 刀痕缺陷放电演变过程示意图

Fig. 10 Diagram of discharge evolution process in knife incision defects

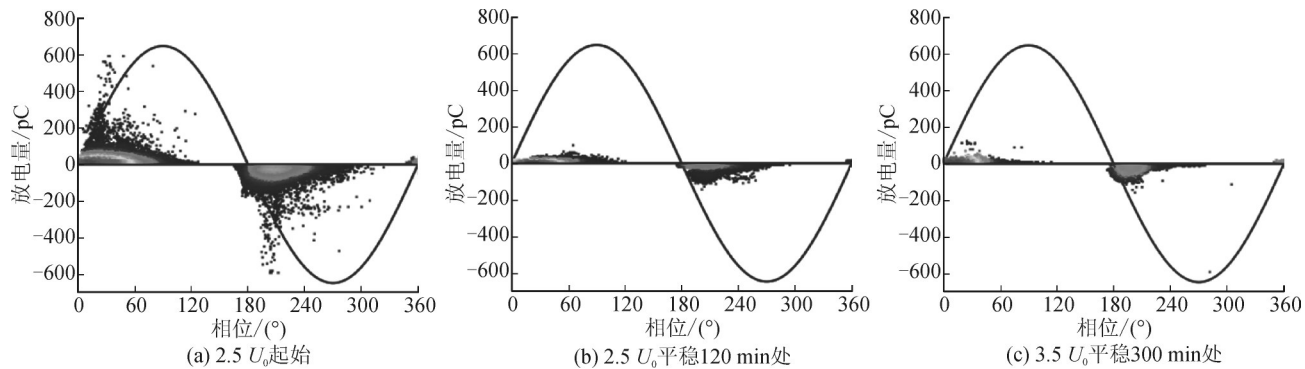


图 11 环切 3 mm 刀痕缺陷 PPRD 谱图

Fig. 11 PPRD pattern of 3 mm deep annular knife incision defect

对于环切深度 4 mm 的刀痕,其绝缘层宽度已经很小,其在局放起始电压下如图 12 所示的 PPRD 谱图为典型的表面放电形式,并且在升至 5 kV 后不到 1 min 就即击穿,即电树枝形成便贯穿,这也证实了上面对刀痕放电的解释。此外,随着刀痕深度的增加,最终击穿后形成的黑洞面积也越小,依据图 10,这一现象是由于黑洞的形成受到电树枝的影响,而由其他学者^[21]的实测可知电树枝形如扇形,当刀痕深度浅时,绝缘层内形成的电树枝外围轮廓会越大,当贯穿流经大电流后,电树枝被烧灼的面积就会越大。

对于同是深度为 3 mm 的环切刀痕与纵切刀痕相比,纵切刀痕的局放起始电压明显增高,这是由于在刀痕区域,半导体层断口处的电场畸变最严重,而环切刀痕就处于此畸变处,相比纵切刀痕,其

所受高畸变电场的面积大,因此更容易在低电压下就发生以表面放电为主的局放。而从两者的放电趋势图可以看出,虽然环切刀痕 3 mm 深的局放起始电压低,但是在 $2.5U_0$ 耐压下经历了 240 min 都未击穿,反而纵切刀痕在 110 min 时就击穿,这是由于纵切刀痕气隙所处的区域电场畸变小,表面放电远少于环切刀痕,这与二者的放电重复率也相吻合。当表面放电少时,同样绝缘层宽度以及一定的电场作用下,电树枝的增长更加快速,即环切刀痕的过多表面放电反而泄放了更多的电场能量。

此外,刀痕缺陷击穿前 PPRD 谱图见图 13,3 组刀痕缺陷在击穿前表现的 PPRD 谱图较为相似,都表现为所施电压过零点附近密集的小放电量脉冲以及间歇的大放电量脉冲,验证该研究认为的刀痕缺陷在最终击穿前会形成相似的电树枝放电。

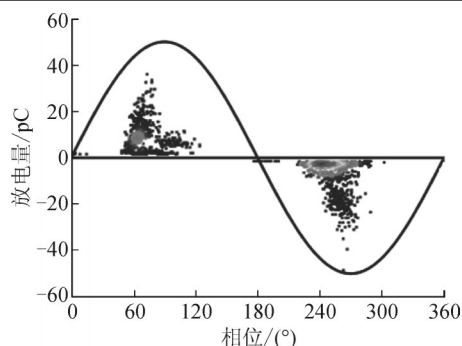


图12 环切4 mm刀痕缺陷PDIV下PRPD谱图

Fig. 12 PRPD pattern of 4 mm deep annular knife incision defect on PDIV

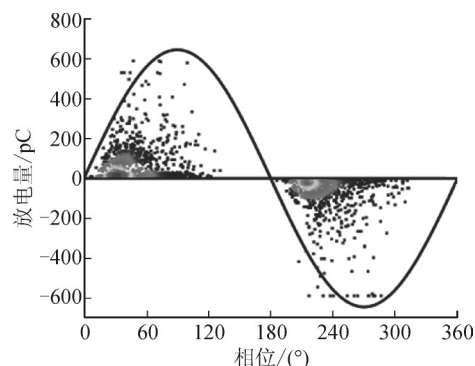
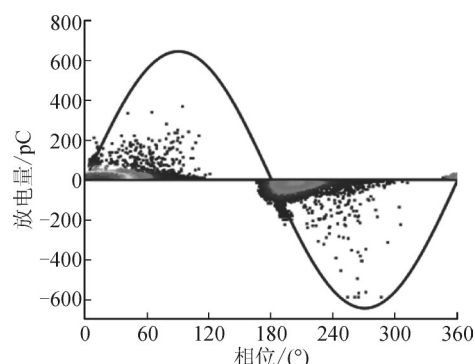
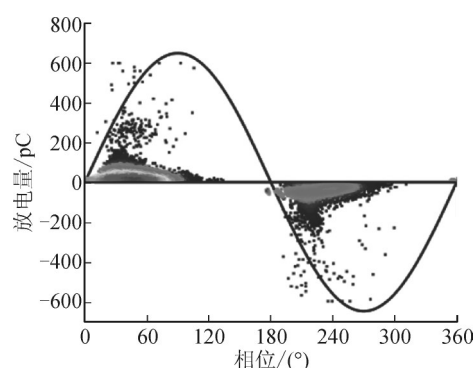
(a) 环切2 mm刀痕击穿前(3.5 U_0)(b) 环切3 mm刀痕缺陷击穿前(3.5 U_0)(c) 纵切3 mm刀痕缺陷击穿前(2.5 U_0)

图13 刀痕缺陷击穿前PRPD谱图

Fig. 13 PRPD pattern of knife incision defect before breakdown

3 结论

文中通过4种含有人工典型刀痕缺陷的10 kV

电缆附件局部放电的趋势及PRPD谱图对比研究,得出以下结论:

1)不同深度、不同位置的刀痕缺陷的局部放电趋势具有明显区别,在今后的研究中不能以一种方式代表;

2)刀痕缺陷的局部放电过程以刀痕的表面放电为开始,然后演变为电树枝放电最终贯穿,不同深度、不同位置的刀痕缺陷在击穿前会呈现相似的电树枝放电现象;

3)刀痕越深,表面放电的影响越大,表现为平均放电量少而放电重复率高;

4)纵切刀痕所产生的电场畸变小,表面放电相对同样深度的环切刀痕小,但更易演化为电树枝放电致使在较短时间内击穿。

参考文献:

- [1] 杜伯学,马宗乐,霍振星,等. 电力电缆技术的发展与研究动向[J]. 高压电器,2010,46(7):100-104.
DU Boxue, MA Zongle, HUO Zhenxing, et al. Recent research status of techniques for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2010,46(7):100-104.
- [2] 章铭杰,周 雁. XLPE电力电缆局部放电在线测试的现状与探讨[J]. 电线电缆,2012(4):35-38.
ZHANG Mingjie, ZHOU Yan. Present situation of XLPE power cable partial discharge on-line detection and discussion[J]. Electric Wire & Cable, 2012(4):35-38.
- [3] KHAN A A, KHAN Y, MALIK N, et al. Online partial discharge detection in the presence of single and multiple defects in underground power cables[C]//International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis. Jeju, Korea. [s.n.], 2014:790-793.
- [4] JIANG Yun, MIN Hong, LUO Junhua, et al. Partial discharge pattern characteristic of HV cable joints with typical artificial defect[C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference. Chengdu, China; [s.n.], 2010:1-4.
- [5] 姜 芸, 闵 红, 罗俊华, 等. 中压交联聚乙烯电缆接头人工缺陷局部放电特性[J]. 华东电力, 2010, 38(10): 1627-1629.
JIANG Yun, MIN Hong, LUO Junhua, et al. Partial discharge property of artificial detects at medium pressure cross linking polyethylene cable joints[J]. East China Electric Power, 2010, 38(10): 1627-1629.
- [6] 常文治. 电力电缆中间接头典型缺陷局部放电发展过程的研究[D]. 北京:华北电力大学, 2013.
CHANG Wenzhi. Study on development of typical partial discharges in power cables joint[D]. Beijing: North China Electric Power University, 2013.
- [7] 刘 英, 苏 宇, 李文沛, 等. 10 kV XLPE电缆接头的电

- 场模拟方法研究[J]. 高压电器, 2016, 52(4): 30-35.
- LIU Ying, SU Yu, LI Wenpei, et al. Research on electrical field simulation of 10 kV cable joints[J]. High Voltage Apparatus, 2016, 52(4): 30-35.
- [8] 张 龙, 王笑棠, 黄晨曦, 等. 不同频率振荡波电压下 XLPE 电缆局部放电特性的研究[J]. 高压电器, 2015, 51(11): 128-133.
- ZHANG Long, WANG Xiaotang, HUANG Chenxi, et al. Characteristics of partial discharge in XLPE cable under damped AC voltage with different frequencies[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(11): 128-133.
- [9] 张 龙, 黄晨曦, 张 伟, 等. 交流和振荡波电压下 XLPE 电缆典型缺陷局部放电特性研究[J]. 高压电器, 2015, 51(8): 43-48.
- ZHANG Long, HUANG Chenxi, ZHANG Wei, et al. Characteristics of partial discharge on typical defects of XLPE cable under AC voltage and damped AC voltage[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(8): 43-48.
- [10] 张 强. 电力电缆局部放电检测与模式识别的研究[D]. 天津: 天津大学, 2007.
- ZHANG Qiang. Study on PD detection and pattern recognition for power cables[D]. Tianjin: Tianjin University, 2007.
- [11] 周 凯, 李旭涛, 黄华勇, 等. 电缆终端安装刀痕缺陷的局部放电特性分析[J]. 电力系统保护与控制, 2013(10): 104-110.
- ZHOU Kai, LI Xutao, HUANG Huayong, et al. Analysis of partial discharge characteristics for installing cutting defects in cable terminations[J]. Power System Protection and Control, 2013(10): 104-110.
- [12] 吴 科, 马春亮, 周 凯, 等. 10 kV 电缆终端绝缘气隙缺陷的局部放电及缺陷表面烧蚀特征[J]. 绝缘材料, 2015(7): 38-43.
- WU Ke, MA Chunliang, ZHOU Kai, et al. Partial discharge and surface ablation characteristics of air gap defects in 10 kV cable termination[J]. Insulation Materials, 2015(7): 38-43.
- [13] 邱昌容, 王乃庆. 电工设备局部放电及其测试技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 1994.
- QIU Changrong, WANG Naiqing. Partial discharge and measurement technology of the electrical equipments[M]. Beijing: China Machine Press, 1994.
- [14] 张 荣, 杨 旭, 孙 倩. 直通式电缆接头局部放电测量方法研究[J]. 高压电器, 2015, 51(10): 174-180.
- ZHANG Rong, YANG Xu, SUN Qian. Research of the PD measurement method for straight through cable joint[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(10): 174-180.
- [15] 周 涛, 曾祥君. 交联聚乙烯电缆局部放电脉冲高灵敏度检测方法研究[J]. 高压电器, 2013, 49(5): 26-30.
- ZHOU Tao, ZENG Xiangjun. Study on high sensitivity detection of partial discharge pulse in XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(5): 26-30.
- [16] 孔德武. 交联聚乙烯电缆的试验终端[J]. 电线电缆, 1993(6): 32-37.
- KONG Dewu. Test termination of XLPE cables[J]. Electric Wire & Cable, 1993(6): 32-37.
- [17] 刘 蓉, 李继胜, 田维坚, 等. XLPE 电力电缆典型缺陷局部放电测量与分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 44-50.
- LIU Rong, LI Jisheng, TIAN Weijian, et al. Measurement and analysis of partial discharge on typical defects in XLPE power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 44-50.
- [18] 陈志平, 邱太洪, 李国伟, 等. XLPE 电缆终端耐压局放方法研究及实际故障诊断案例分析[J]. 高压电器, 2015, 51(2): 73-77.
- CHEN Zhiping, QIU Taihong, LI Guowei, et al. Study of partial discharge detection method of XLPE cable terminates during AC withstand voltage test and analysis of real fault diagnosis cases[J]. High Voltage Apparatus, 2015, 51(2): 73-77.
- [19] 额定电压 1 kV($U_m=1.2$ kV)到 35 kV($U_m=40.5$ kV)挤包绝缘电力电缆及附件 第 2 部分: 额定电压 6 kV($U_m=7.2$ kV)到 30 kV($U_m=36$ kV)电缆: GB/T 12706.2—2008[S]. 北京: 中国标准出版社, 2008.
- Power cables with extrude insulation and their accessories for rated voltages from 1 kV($U_m=1.2$ kV) up to 35 kV($U_m=40.5$ kV)—Part 2: Cables for rated voltage from 6 kV($U_m=7.2$ kV) up to 30 kV($U_m=36$ kV): GB/T 12706.2—2008[S]. Beijing: China Standard Press, 2008.
- [20] ILLIAS H A, CHEN G, LEWIN P L. Measurement of partial discharge activities within two artificial spherical voids in an epoxy resin[C]//Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena. Cancun, Mexico: [s.n.], 2011: 489-492.
- [21] 陈仕军, 叶 笛, 刘华麟, 等. 不同生长阶段下电树枝放电的时频特征分析[J]. 高压电器, 2013, 49(3): 49-52.
- CHEN Shijun, YE Di, LIU Hualin, et al. Analysis on time-frequency characteristics of electrical tree discharge in different growth stages[J]. High Voltage Apparatus, 2013, 49(3): 49-52.

赵学风(1983—), 女, 高级工程师, 博士, 主要从事高压电力电缆运维、故障检测、诊断工作。

倪 辉(1989—), 男, 工程师, 硕士, 主要从事高电压试验、电力设备状态检测工作。