

直流电压下热老化对表面划伤交联聚乙烯电缆 局部放电特性的影响

王新^{1,2}, 金泱^{1,2}, 杨敏^{1,2}, 王启隆³, 黄小凡³, 陈向荣³

(1. 浙江浙能技术研究院有限公司, 浙江 杭州 311121; 2. 浙江省火力发电高效节能与污染物控制技术
研究重点实验室, 浙江 杭州 311121; 3. 浙江大学 电气工程学院, 浙江 杭州 310027)

摘要: 为了研究热老化对表面划伤交联聚乙烯(XLPE)电缆直流局部放电发展过程的影响, 本文采用实体 10 kV 电缆制作了表面划伤缺陷模型并进行不同时间的加速热老化处理, 利用脉冲电流法研究了直流电压下缺陷电缆的局部放电特性。基于缺陷电缆局部放电量随加压时间的变化, 提取出最大放电量、不同放电区间的平均放电量 and 放电重复率的统计图谱, 然后基于电荷运输理论提出了局部放电和电荷运输模型对缺陷电缆局部放电结果进行解释。结果表明: 缺陷电缆的局部放电起始电压随着老化时间的增加而增大, 其放电量-时间图谱呈现“梳齿”状放电特征; 随着热老化时间的增加, 缺陷电缆在 >100 pC 区间的平均放电量 and 放电重复率逐渐减小, 且其“梳齿”状放电特征在老化 21 天时彻底消失, 表现出局部放电的自愈性。热老化过程中 XLPE 划伤缺陷表面氧化产生了电荷陷阱, 由此产生了均匀密集的空间电荷层, 使缺陷内部电场下降, 从而削弱了缺陷电缆的局部放电。研究结果为 XLPE 电缆缺陷的直流局部放电研究提供了数据支撑。

关键词: 交联聚乙烯电缆; 表面划伤缺陷; 局部放电; 直流电压; 热老化

Effect of thermal ageing on partial discharge characteristics of surface scratched XLPE cables at DC voltage

WANG Xin^{1,2}, JIN Yang^{1,2}, YANG Min^{1,2}, WANG Qilong³, HUANG Xiaofan³, CHEN Xiangrong³

(1. Zhejiang Energy R&D Institute Co., Ltd., Hangzhou 311121, China; 2. Zhejiang Key Laboratory of Energy
Conservation & Pollutant Control Technology for Thermal Power, Hangzhou 311121, China; 3. College of
Electrical Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China)

Abstract: In order to investigate the impact of thermal ageing on the development of DC partial discharge of surface scratched cross-linked polyethylene (XLPE) cables, a surface scratched defect model was made using a physical 10 kV cable, and subjected to the accelerated thermal ageing treatments with different times. The partial discharge characteristics of defective cables under DC voltage were studied using the pulse current method. On basis of the variation of partial discharge with voltage applying time, the statistical charts of the maximum discharge capacity, average discharge capacity, and discharge repetition rate in different discharge intervals were extracted. Then based on the charge transport theory, partial discharge and charge transport models were proposed to explain the partial discharge results of defective cable. The results show that the initial partial discharge voltage of the defective cable increases with the increase of thermal ageing time, the discharge quantity-time spectrum shows "comb" discharge characteristics. As the thermal ageing time increases, the average discharge capacity and discharge repetition rate of the defective cable in the interval greater than 100 pC decrease gradually, and the "comb" discharge characteristics disappear completely after 21 days of ageing, demonstrating the self-healing ability of partial discharge. During thermal ageing, the surface oxidation of XLPE scratched defects produces charge traps, resulting in a uniform and dense space charge layer, which reduces the internal electric field of the defects and weakens partial discharge in defective cables. The research results provide data support for the study of DC partial discharge of XLPE cable defects.

Key words: XLPE cable; surface scratched defect; partial discharge; DC voltage; thermal ageing

基金项目: 浙江省自然科学基金重点项目(LZ22E070001);
浙江浙能技术研究院有限公司科技项目(JSYJY-SCFW-
2022-009)。

0 引言

随着风电、光伏等新能源的接入和用电需求的

增长,传统的交流配电网已经无法满足现代供电要求。相比之下,直流配电网具有输送容量大、线路成本低、线路损耗小、直流负荷接口技术简单等优势^[1-2]。国内外典型工程案例^[3-4]表明,将交流线路改为直流运行是一种能有效利用现有线路发展直流配电网的方法,其对于直流配电网的实现和电缆系统输送容量的提升具有重要意义^[5]。

目前,我国的交流配电网广泛采用交联聚乙烯(XLPE)绝缘电缆。然而,XLPE电缆在长期运行过程中难以避免地产生绝缘缺陷,这些缺陷在高电压下会引发局部放电现象,长期的局部放电会导致电缆绝缘劣化和老化^[6]。表面划伤缺陷是10 kV交流XLPE电缆的常见缺陷之一,一般由电缆中间接头施工、电缆敷设、自然外力破坏等因素所导致^[7-8]。局部放电测量是检测电缆绝缘状况和识别故障类型的常用方法^[9-10]。因此,测量XLPE电缆缺陷在长期热老化过程中的直流局部放电发展过程及其统计特征,对交流电缆改为直流运行后的绝缘状态研究十分关键。

交流局部放电测试作为一种交流电缆缺陷检测的有效方法,已经被广泛采用。然而,直流电缆的直流局部放电研究还处于初级阶段。杜浩等^[11]研究了气隙、尖刺和断口缺陷模型电缆的局部放电发展过程,并得到不同缺陷模型的局部放电指纹特征。祝曦等^[12]研究了直流电压下XLPE电缆绝缘电树枝化过程中的局部放电特性,发现局部放电强度随着温度的上升而增大。赵洋等^[13]基于有限元仿真研究了直流电缆附件界面气隙缺陷的局部放电阈值场强。唐炬等^[14]研究了电缆不同缺陷在不同电压幅值和极性下的直流局部放电特性,发现缺陷的指纹参数易受电压幅值和极性影响。杨丰源等^[15]基于人工神经网络方法提取了电缆缺陷在直流电压下的线性和非线性特征参数。电缆在实际运行过程中容易因人为或自然因素产生缺陷,而目前带缺陷电缆在热老化过程中的直流局部放电及其特征缺乏研究。

针对以上问题,本文对10 kV交流配电网XLPE绝缘电缆制作表面划伤缺陷,由于电缆的不同运行时间与不同热老化时间对应,对缺陷电缆进行不同时间的加速热老化,采用恒压法对未老化和不同老化时间的电缆实施直流局部放电测量,分析比较不同老化电缆的直流局部放电发展过程及其统计特

征,包括最大放电量、平均放电量 and 放电重复率,为缺陷XLPE绝缘电缆在热老化过程中的直流局部放电研究提供数据和理论支撑。

1 局部放电实验系统与电缆缺陷模型

1.1 直流局部放电测量系统

直流局部放电测量系统如图1所示,该系统包括调压器 T_1 、100 kV/50 Hz无局放试验变压器 T_2 (型号为YDTW-25/100)、高压硅堆D、100 kV/1.5 nF的滤波电容 C_0 、分压比为1 000:1的电阻分压器(R_1 和 R_2)、10 k Ω 保护电阻 R_0 、耦合电容 C_k 以及检测阻抗。高压硅堆D与滤波电容 C_0 组成半波整流电路,将交流电压转换为直流电压,其波纹系数为2.5%。100 kV/1 000 pF的耦合电容 C_k 用于耦合局部放电产生的脉冲电流信号,而检测阻抗Z用于分析检测回路。整个系统符合IEC 60270:2020标准要求,采用中心频率为250 kHz、检测带宽为300 kHz的Omicron MPD-600型局部放电测试仪进行测试,并经过持续 ± 50 kV实验电压下的耐压和局部放电测试。在测试中,系统的背景噪声低于20 pC。

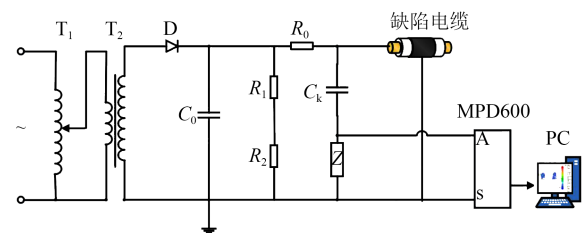


图1 直流局部放电测量系统

Fig.1 DC partial discharge measurement system

1.2 电缆缺陷模型

电缆运行期间出现故障的原因主要可分为外力破坏、电缆附件制造质量、电缆敷设安装质量和电缆本体制造质量^[16]。表面划伤缺陷是电缆安装、施工、运行过程中的常见绝缘缺陷。为此,本文设计模拟了电缆表面划伤缺陷的实验模型。

实验采用10 kV电压等级的3芯XLPE绝缘电缆,该型号为YJV22-8.7/10-3 \times 240 mm²,电缆导体半径为9.3 mm,XLPE绝缘厚度为6.0 mm,内半导体层厚度为0.4 mm,外半导体层厚度为0.8 mm,电缆样段长度为25 cm,其结构如图2(a)所示。制作缺陷时,先将电缆两端的半导体层剥离4.5 cm,露出XLPE绝缘材料,随后去除两端XLPE绝缘层2 cm,露出导体以方便套入均压球。对XLPE绝缘层和半导体层切面进行光滑处理,以避免断口毛刺放电和

沿面放电的发生。

在电缆模型缺陷的制作过程中,首先在电缆中间位置的半导体层和XLPE绝缘层表面制作出直径为10 mm、深度为4 mm的圆孔来模拟表面划伤缺陷,内半导体层未外露,如图2(b)所示;然后用绝缘胶带将缺陷表面均匀密封,以留存空气和模拟电缆缺陷的实际环境;最后将带缺陷的模型电缆放入25#号变压器油中,以保证局部放电仅发生在人为制造的表面划伤缺陷中。

在局部放电测量前,将电缆样段放入烘箱中进行加速热老化处理,根据IEC 60216:2013相关要求,在135℃下对缺陷电缆分别进行7天、14天和21天的加速热老化,以模拟不同运行年限的表面划伤缺陷电缆。

1.3 局部放电测量和统计方法

实验前,首先需要确定缺陷电缆在直流电压下的局部放电起始电压(PDIV)。根据ASTM D 1868:2013相关要求,将每分钟出现超过1次的重复放电作为直流局部放电起始电压的判定标准。本文采用阶梯升压法^[17]来确定缺陷电缆的PDIV,如图3所示。具体实验过程如下:将电压缓慢升高至 $U_0=-5$ kV,然后以升压步长 $\Delta U=0.5$ kV、耐压时间 $\Delta t=10$ min进行加压,直到在持续的耐压时间 Δt 内检测到超过10个放电量大于20 pC的脉冲信号,记录此时的电压水平,即为缺陷电缆的局部放电起始电压。

检测缺陷电缆在不同老化时间下的局部放电信号特征是局部放电检测的核心问题之一。为此,本文在缺陷电缆模型的局部放电发展过程中,以每15 s为1个统计的时间区间,对该区间内的局部放电特征进行统计,如最大放电量、平均放电量、放电重复率。最大放电量为统计区间中所有放电量中的最大值,平均放电量为统计区间中放电量之和与放电次数的比值,放电重复率为统计区间中放电次数与统计时长的比值。另外,本文将放电幅值分为两个区间:50~100 pC和>100 pC,分别对两个幅值的放电区间进行平均放电量和最大放电量统计。

2 实验结果

2.1 电缆外观

不同老化时间的电缆外观如图4所示。从图4可以看出,对于未老化电缆,其XLPE绝缘为白色,且电缆全段笔直。而随着老化时间的增加,XLPE绝缘在老化7天时呈现暗黄色,在老化14天时变为褐色,在老化21天时趋于黑色,电缆样段逐渐变得

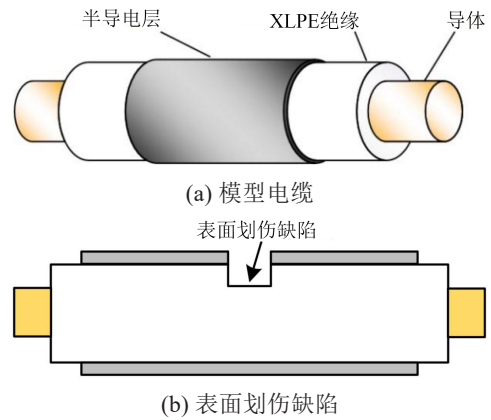


图2 模型电缆及其缺陷示意图

Fig.2 Schematic diagram of cable model and its defect

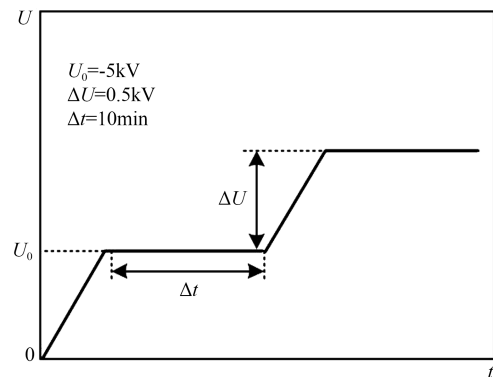


图3 阶梯升压法

Fig.3 Step-up voltage method

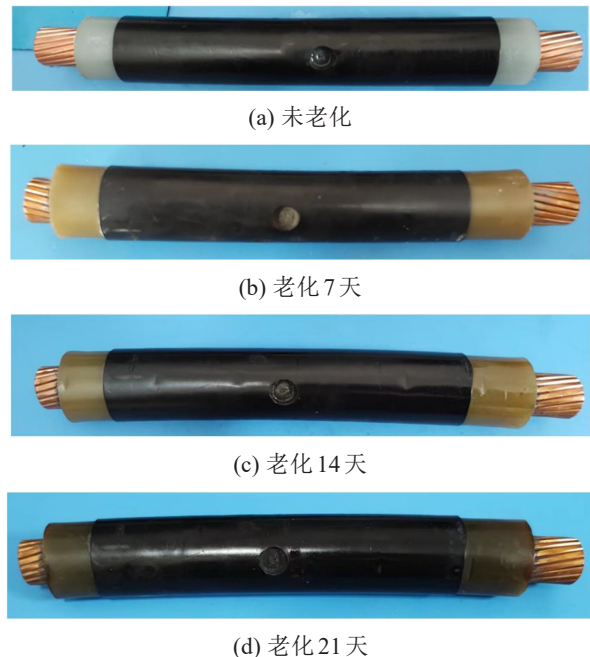


图4 不同老化时间的电缆外观

Fig.4 Appearance of cables under different ageing time

弯曲,呈弧状。XLPE绝缘颜色变化表明加速热老化使XLPE绝缘逐渐氧化,产生大量的羰基^[18],同时

使长分子链裂解,微观结构受到破坏;样段弯曲可能是由于XLPE绝缘软化,导体中的残余应力得以释放。

2.2 直流局部放电发展过程

未老化、老化7天、老化14天和老化21天的电缆PDIV分别为13.5、14.5、15.0、15.0 kV。为了获得稳定的局部放电,对不同老化天数的电缆施加17 kV正极性直流电压。在直流电压稳定后,记录不同老化天数电缆900 s内局部放电测量中的放电量-时间图谱如图5所示。

由图5(a)可知,未老化电缆的直流局部放电发展过程呈现间歇性“梳齿”状放电的特点,即在两次高幅值的集中放电“齿”之间存在长时间的低幅值放电(放电幅值为20~50 pC),且集中“齿”状的幅值和低幅值放电的持续时间具有一定的随机性。这种放电情况与缺陷中的空间电荷行为有关,将在第3节中详细说明。由图5(b)可知,老化7天的电缆仍呈现间歇性“梳齿”状放电的特点,只出现了少量的高幅值放电,集中的“齿”状放电次数相比于未老化电缆明显减少,且“齿”状放电的频率也更低。由图5(c)和图5(d)可知,老化14天电缆的高幅值放电仅呈现少量的点状随机分布,且放电幅值更低;而老化21天的电缆未出现高幅值放电。

2.3 最大放电量和平均放电量

不同老化天数下缺陷电缆的最大放电量随加压时间的变化如图6所示。由图6可知,未老化电缆和老化7天电缆的高幅值最大放电量接近,但老化7天电缆的高幅值最大放电量明显小于未老化电缆,老化14天电缆的高幅值最大放电量大幅下降,但其出现的频率更大,而老化21天电缆未见高幅值的最大放电量。

为了进一步对不同幅值的放电量进行特征统计,本文对50~100 pC和>100 pC两个区间的放电量分别进行研究。缺陷电缆在50~100 pC和>100 pC放电区间的平均放电量随加压时间的变化如图7所示。由图7(a)可知,未老化电缆和老化7天电缆在50~100 pC区间的平均放电量接近;老化14天电缆在50~100 pC区间的平均放电量相对较小,但分布更为密集。由图7(b)可知,未老化电缆在>100 pC区间的高幅值平均放电量大于老化7天电缆和14天电缆;老化14天电缆在>100 pC区间仅统计出1次平均放电量,说明老化14天电缆的高幅值放

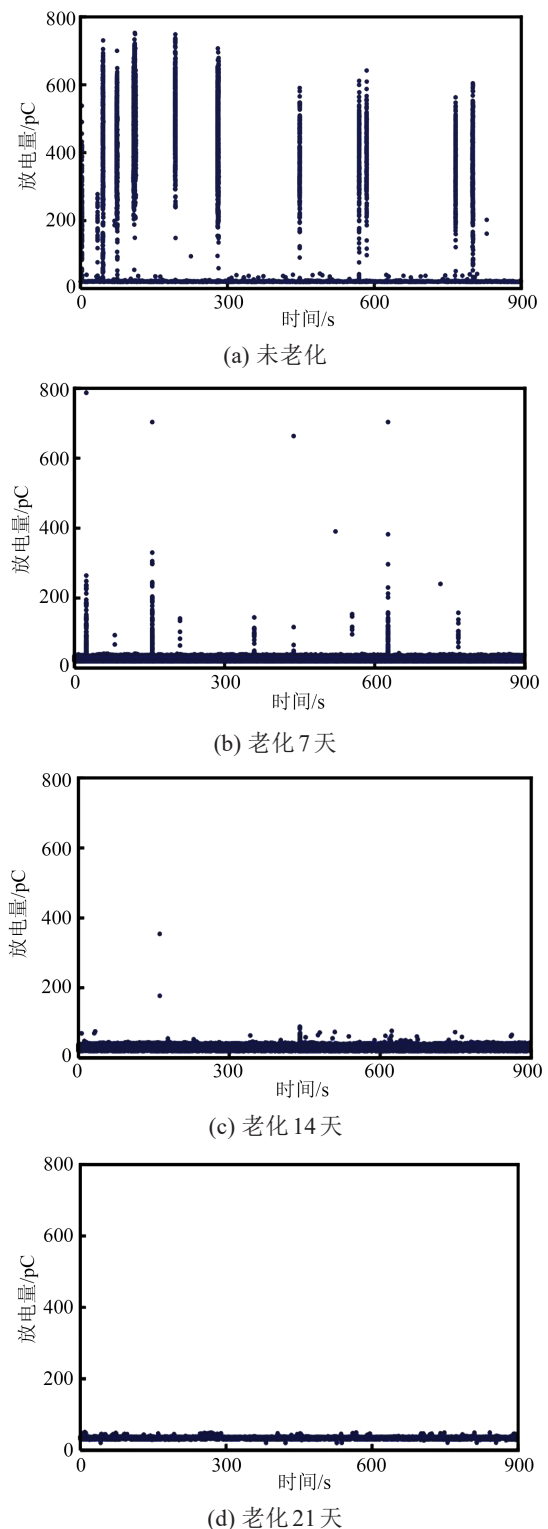


图5 不同老化时间下电缆局部放电的放电量-时间图谱
Fig.5 $Q-t$ patterns of partial discharge of cables under different ageing time

电较少;而老化21天电缆在50~100 pC和>100 pC区间内均无局部放电。

2.4 放电重复率

缺陷电缆在50~100 pC和>100 pC放电区间的

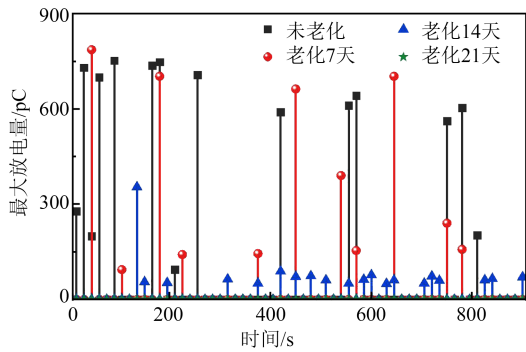
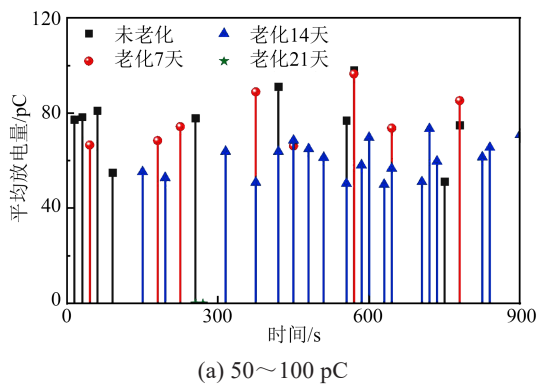
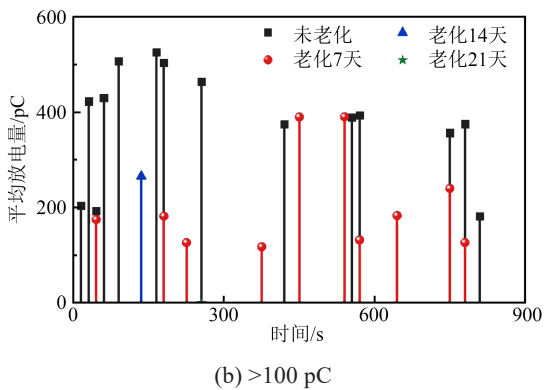


图6 不同老化时间下电缆的最大放电量

Fig.6 Maximum discharge magnitude of cables under different ageing times



(a) 50~100 pC

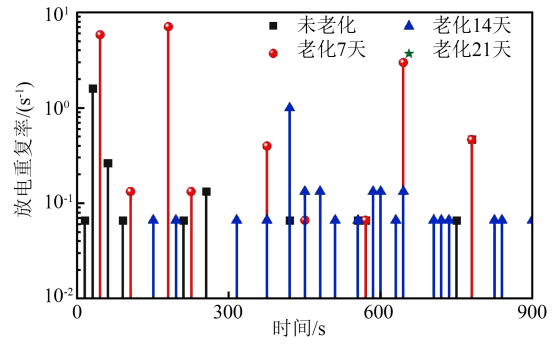


(b) >100 pC

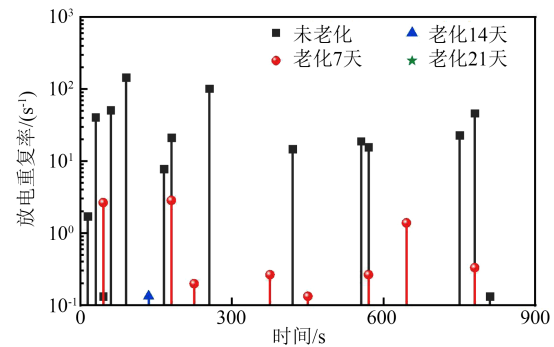
图7 不同局部放电幅值区间的平均放电量

Fig.7 Average discharge magnitude of different PD amplitude ranges

放电重复率随时间的变化如图8所示。由图8(a)可知,相比未老化电缆,老化7天电缆在50~100 pC区间的放电重复率更高,而老化14天电缆的放电重复率分布更为密集,即两次放电的间隔时间更短,放电分布更加均匀;未老化电缆和老化7天的电缆在50~100 pC区间的放电较为集中,表现为在单个时间区间内密集放电。由图8(b)可知,未老化电缆在>100 pC区间的放电重复率和放电密集度均高于老化7天电缆,而老化14天电缆仅在1个时间区间统计出较低的放电重复率。



(a) 50~100 pC



(b) >100 pC

图8 不同局部放电幅值区间的放电重复率

Fig.8 Discharge repetition rate of different PD amplitude ranges

2.5 陷阱特性

试样的陷阱参数(陷阱能级和陷阱密度)可由式(1)和式(2)进行计算。

$$E_T = k_B T \ln \left[t \frac{(k_B T)^3}{6h^3 v^2} \right] \quad (1)$$

$$Q_s(t) = \frac{t \times j(t)}{q_e} = t \frac{\varepsilon_0 \varepsilon_r}{q_e d} \times \frac{dV(t)}{dt} \quad (2)$$

式(1)~(2)中: E_T 为陷阱能级; k_B 为波尔兹曼常数; T 为测试温度; h 为普朗克常量; v 为移动方向的正交平面处缺陷点周围的振动频率; $Q_s(t)$ 为陷阱电荷密度; $j(t)$ 为电流密度; ε_0 为真空介电常数; ε_r 为相对介电常数; d 为试样厚度; q_e 为元电荷量; $V(t)$ 为XLPE试样的表面电位; t 为时间。

未老化和老化21天XLPE试样的陷阱分布和提取的浅、深陷阱参数如图9所示。由图9可知,老化后电缆的浅陷阱密度减小,而深陷阱密度增大,表明浅陷阱向深陷阱转变,而且深、浅陷阱的能级增加,表明电缆绝缘老化后会产生更多的深陷阱。

3 分析与讨论

XLPE分子链在热老化过程中氧化产生大量羰基,这些极性的羰基表现为能级较深的化学陷阱,

可以有效捕获高能电荷^[19]。此外,在多次局部放电和热作用下,半导体层边缘毛刺容易发生烧蚀,从而变得光滑,使其在直流电压作用下的电场畸变减小。局部放电发生需要满足两个条件:①电场强度高于局部放电的起始场强;②存在初始自由电子^[20]。根据实验结果可知,缺陷电缆在热老化后,高幅值的平均放电量和放电重复率均明显下降,而低幅值放电的时间占比增加。本文基于电荷运输理论提出了表面划伤缺陷电缆在老化前后的局部放电模型以解释局部放电实验结果,如图10所示。

由图10(a)可知,对于老化前电缆,划伤缺陷中半导体层边缘较为粗糙,存在一些突起和毛刺,容易在直流电压下产生极高的电场,从而使缺陷中的空气电离,产生大量的空穴和电子,其中空穴容易通过半导体层流入大地,而电子被XLPE缺陷表面由羰基形成的电荷陷阱所捕获^[19],由气隙中的自由电子变为陷阱中的束缚电子,形成负极性空间电荷积聚层,在缺陷中产生与外施电场反方向的电场,使缺陷内部电场削弱,导致放电量减小,产生低幅值的局部放电量。在低幅值放电持续过程中,缺陷表面的负极性空间电荷向XLPE体内迁移,由陷阱中的束缚电子转换为XLPE中的自由电子,使缺陷中电场逐渐增大,当高于局部放电的临界场强并且出现初始自由电子时,高幅值的集中“齿”状放电再次发生,当“齿”状放电产生的负电荷在缺陷表面积聚到一定量时,缺陷电场再次被削弱,此时“齿”状放电之间的低幅值放电再次发生。上述过程在加压期间反复出现,从而使局部放电的 $Q-t$ 图呈“梳齿”状。

由图10(b)可知,对于老化后的电缆,缺陷半导体层边缘在之前的热作用和多次局部放电作用下,其半导体层边缘毛刺发生烧蚀,从而变得光滑,电场畸变程度减小,电离产生的自由空穴和电子数量更少,更难达到局部放电发生的条件,因此局部放电的起始电压增大。此外,XLPE分子链在热老化过程中氧化产生大量羰基,这些极性的羰基表现为能级较深的化学陷阱,大部分电离产生的电子被陷阱捕获,在缺陷表面形成均匀致密的负极性空间电荷层,使缺陷内的电场下降,导致高幅值放电量和放电重复率减小。这些陷阱中的束缚电子难以在短时间内向XLPE体内迁移形成自由电子,导致低幅值放电的持续时间更长。随着电缆老化时间的

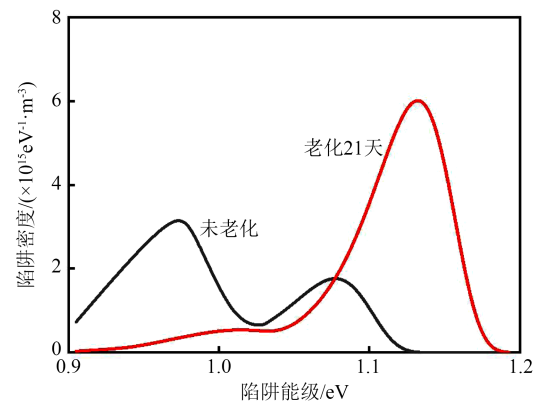


图9 未老化和老化21天试样的陷阱分布

Fig.9 Trap distributions of XLPE samples without ageing and with 21 day ageing

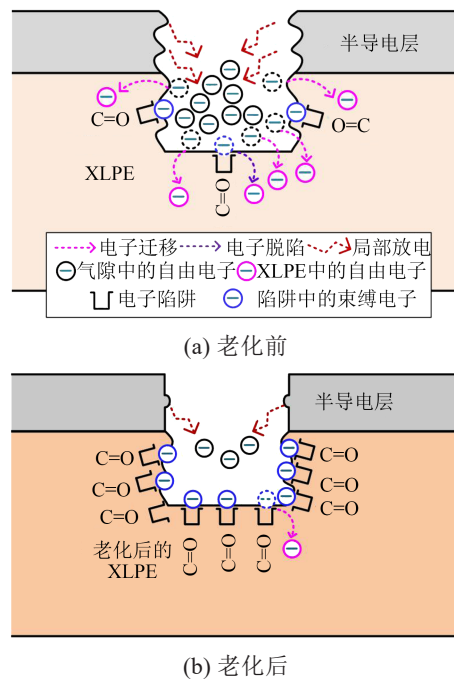


图10 缺陷电缆老化前后的局部放电与电荷运输模型

Fig.10 Partial discharge and charge transport models of cable with defects before and after ageing

增加,高幅值放电量和放电重复率进一步减小直至消失,并且低幅值放电的持续时间进一步增加,“梳齿”状放电特征不再明显。当老化时间增加至21天时,“梳齿”状放电彻底消失并且未见大于50 pC的放电量。随着热老化时间的增加,缺陷电缆表现出一定的局部放电自愈性。

4 结论

(1)随着老化时间的增加,表面划伤缺陷电缆的局部放电起始电压逐渐增大,未老化、老化7天、老化14天和老化21天电缆的局部放电起始电压分

别为 13.5、14.5、15.0、15.0 kV。

(2)未老化、老化 7 天和老化 14 天缺陷电缆的 $Q-t$ 图谱呈间歇性“梳齿”状放电特征,在集中的高幅值“齿”状放电之间存在较长时间的低幅值放电,这与 XLPE 缺陷表面空间电荷的积聚和消散有关;而老化 21 天缺陷电缆没有表现出“梳齿”状放电特征且未出现大于 50 pC 的放电量。

(3)缺陷电缆在 >100 pC 放电区间的平均放电量 and 放电重复率随着热老化时间的增加而减小,而低幅值放电的持续时间增加。缺陷电缆在热老化过程中表现出局部放电自愈性,当交流改为直流运行的 10 kV 电缆出现表面划伤缺陷时,其直流局部放电在长期运行中会逐渐缓和。

参考文献 References

- [1] MOK K T, WANG M H, TAN S C, et al. DC electric springs-a technology for stabilizing DC power distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Electronics,2017,32(2):1088-1105.
- [2] 江道灼,郑欢. 直流配电网研究现状与展望[J]. 电力系统自动化, 2012,36(8):98-104.
JIANG D Z, ZHENG H. Research status and developing prospect of DC distribution network[J]. Automation of Electric Power Systems,2012,36(8):98-104.
- [3] LIU Y, CAO X L, FU M L. The upgrading renovation of an existing XLPE cable circuit by conversion of AC line to DC operation [J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2017,32(3):1321-1328.
- [4] 刘英,曹晓珑,何子兰,等. 现役交流 XLPE 电缆配电线路改为直流运行的技术方案及实例分析[J]. 中国电机工程学报,2016,36(1):96-103.
LIU Y, CAO X L, HE Z L, et al. Technical scheme and case study of the uprating renovation of existing XLPE cables from AC distribution system to DC operation[J]. Proceedings of the CSEE, 2016,36(1):96-103.
- [5] 于竞哲,苏宜靖,周浩,等. 10 kV 交流 XLPE 电缆改为直流运行的温度场和电场仿真分析[J]. 高电压技术,2017,43(11):3653-3660.
YU J Z, SU Y J, ZHOU H, et al. Simulation analysis of temperature field and electric field for 10 kV AC XLPE cable in DC operation[J]. High Voltage Engineering,2017,43(11):3653-3660.
- [6] 康强,顾霄,徐阳,等. 直流局部放电检测技术综述[J]. 南方电网技术,2015,9(10):69-77.
KANG Q, GU X, XU Y, et al. Review of partial discharge detection under DC voltage[J]. Southern Power System Technology, 2015,9(10):69-77.
- [7] 余英,薛荣,黄荣辉,等. 10 kV 电缆振荡波局放测试的理论分析与试验研究[J]. 高压电器,2014,50(7):88-93,105.
YU Y, XUE R, HUANG R H, et al. Theoretical and experimental study on partial discharge test of 10 kV cable with oscillating voltage[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(7):88-93,105.
- [8] 黄光磊,李喆,杨丰源,等. 直流交联聚乙烯电缆泄漏电流试验特性研究[J]. 电工技术学报,2019,34(1):192-201.
HUANG G L, LI Z, YANG F Y, et al. Experimental research on leakage current of DC cross linked polyethylene cable[J]. Transactions of China Electrotechnical Society,2019,34(1):192-201.
- [9] 沙彦超,周远翔,聂德鑫,等. 直流电压作用下油纸绝缘局部放电发展不同阶段的理化特性[J]. 高电压技术,2014,40(1):80-86.
SHA Y C, ZHOU Y X, NIE D X, et al. Partial discharge process in transformer oil and electrical insulation paper under DC stress [J]. High Voltage Engineering,2014,40(1):80-86.
- [10] 杨丰源,许永鹏,郑新龙,等. 直线下交联聚乙烯电缆局部放电的试验特性研究[J]. 中国电机工程学报,2016,36(24):6702-6710.
YANG F Y, XU Y P, ZHANG X L, et al. Test research on DC partial discharges of cross linked polyethylene cable[J]. Proceedings of the CSEE,2016,36(24):6702-6710.
- [11] 杜浩,关弘路,陈向荣,等. 直流电压下交联聚乙烯电缆典型缺陷局部放电特性[J]. 高电压技术,2021,47(2):555-563.
DU H, GUAN H L, CHEN X R, et al. Partial discharge characteristics of typical defects in XLPE cable under DC voltage[J]. High Voltage Engineering,2021,47(2):555-563.
- [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):2416-2427.
ZHU X, LIN G H, ZHANG H L, et al. Characteristics of partial discharge during electrical treeing in XLPE under DC voltage [J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(6):2416-2427.
- [13] 赵洋,魏思芸,马宪伟,等. ±320 kV 直流电缆终端界面气隙缺陷的直流局放试验电压确定方法[J]. 绝缘材料,2023,56(3):61-69.
ZHAO Y, WEI S Y, MA X W, et al. Determination method of DC partial discharge test voltage for air gap defects at interface of ±320 kV DC cable termination[J]. Insulating Materials,2023, 56(3):61-69.
- [14] 唐炬,宋文斌,潘成,等. 高压直流 XLPE 电缆局部放电指纹参数优化提取[J]. 高电压技术,2019,45(9):2806-2817.
TANG J, SONG W B, PAN C, et al. Optimal extraction of partial discharge fingerprint parameters of HVDC XLPE cable[J]. High Voltage Engineering,2019,45(9):2806-2817.
- [15] 杨丰源,许永鹏,钱勇,等. 相关分析技术在直流电压下 XLPE 电缆局部放电信号特征提取与筛选中的应用[J]. 电网技术,2018, 42(5):1653-1660.
YANG F Y, XU Y P, QIAN Y, et al. Application of correlation analysis techniques in feature extraction and selection for DC partial discharge signals of XLPE cables[J]. Power System Technology,2018,42(5):1653-1660.
- [16] 司文荣,李军浩,袁鹏,等. 直流下油中局部放电脉冲波形测量与特性分析[J]. 西安交通大学学报,2008,42(4):481-486.
SI W R, LI J H, YUAN P, et al. Measurement and analysis for pulse current shapes of partial discharge in oil under DC voltage [J]. Journal of Xi'an Jiaotong University,2008,42(4):481-486.
- [17] 杜浩,关弘路,玉林威,等. 直流电压下 10 kV 交联聚乙烯电缆气

- 隙缺陷局部放电特性研究[J]. 浙江电力, 2019, 38(9): 74-80.
- DU H, GUAN H L, YU L W, et al. Investigation of partial discharge characteristics of void defects in 10 kV XLPE cable under DC voltage[J]. Zhejiang Electric Power, 2019, 38(9): 74-80.
- [18] 孙建宇, 陈绍平, 沙菁斐, 等. 电缆用交联聚乙烯热老化寿命评估和预测[J]. 电机与控制学报, 2022, 26(6): 31-39.
- SUN J Y, CHEN S P, SHA J J, et al. Evaluation and prediction of thermal aging life of XLPE for cables[J]. Electric Machines and Control, 2022, 26(6): 31-39.
- [19] 单秉亮, 李舒宁, 程俊华, 等. XLPE 配电网热老化段和集中性缺陷的辨识与定位[J]. 中国电机工程学报, 2021, 41(23): 8231-8241.
- SHAN B L, LI S N, CHENG J H, et al. Distinguishing and locating thermal aging segments and concentration defects in XLPE [J]. Proceedings of the CSEE, 2021, 41(23): 8231-8241.
- [20] 李春阳, 赵洪, 韩宝忠, 等. 电压稳定剂对交联聚乙烯直流绝缘性能的影响[J]. 中国电机工程学报, 2018, 38(23): 7071-7079, 7141.
- LI C Y, ZHAO H, HAN B Z, et al. Effect of voltage stabilizer on the DC insulation properties of XLPE[J]. Proceedings of the CSEE, 2018, 38(23): 7071-7079, 7141.

收稿日期: 2023-07-21; 修回日期: 2023-08-30。

作者简介:

王新(1968-), 男(汉族), 黑龙江虎林人, 高级工程师, 主要从事高压电气设备状态检测及评估技术应用的研究。