

DOI: 10.12158/j.2096-3203.2024.01.019

高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测实验

高建, 张浩然, 张可, 李建英

(西安交通大学(电工材料电气绝缘全国重点实验室), 陕西 西安 710049)

摘要: 高压电缆缓冲层烧蚀故障是近年来频发的电缆故障类型,而目前的烧蚀缺陷检测手段难以满足存量电缆的检测需求。为此,文中首次研究基于铝护套内表面粗糙度的高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的超声检测方法。首先,开展潮湿条件下的缓冲层烧蚀模拟实验,并对烧蚀后的铝片进行激光共聚焦显微镜测试以及电化学阻抗谱分析,发现随着烧蚀时间的增加,铝片的表面粗糙度逐渐增大,同时铝片表面的腐蚀程度逐渐加深,对应的缓冲层烧蚀缺陷逐渐加重,表明铝片的表面粗糙度与潮湿条件下缓冲层的烧蚀程度存在关联。其次,对烧蚀后的铝片开展超声检测实验,并通过相邻超声回波信号的幅值比推算出铝片腐蚀面的粗糙度,与实验测得的粗糙度具有相同的变化趋势。文中结果表明超声检测可用于检测缓冲层烧蚀缺陷的严重程度,为高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测方法的应用奠定了研究基础。

关键词: 高压电缆;缓冲层烧蚀;超声检测;电化学腐蚀;粗糙度;反射系数

中图分类号: TM215.1

文献标志码: A

文章编号: 2096-3203(2024)01-0174-07

0 引言

高压电缆线路是城市电网安全供电系统的重要组成部分,然而近年来高压电缆频繁发生缓冲层烧蚀故障,主要集中于皱纹铝护套结构的高压电缆^[1-6]。据不完全统计,2017年—2022年,国内主要城市因高压电缆缓冲层烧蚀缺陷引发的电缆本体绝缘击穿故障比例超过80%,造成了巨大的经济损失。且现阶段存量电缆中仍有大量潜伏性缺陷未被检出,给电缆线路的安全稳定运行带来了极大隐患^[7-11]。因此,开展高压电缆缓冲层烧蚀缺陷检测技术的研究具有重要意义。

国内已针对高压电缆缓冲层烧蚀缺陷检测技术开展了相关研究。文献[12]通过X射线成像检测到了高压电缆缓冲层烧蚀缺陷,并通过电缆解体验证了X射线检测的可靠性。然而,X射线成像受电缆敷设环境影响较大,且会对人体造成较高的损伤。文献[13]采用宽频阻抗谱检测到了高压电缆缓冲层烧蚀缺陷,但仅能粗略判断电缆中烧蚀故障的位置,无法进行精准定位。文献[14]研究了高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的局部放电检测技术,能够检出电缆中的部分烧蚀缺陷,但在缓冲层电阻率较高、缓冲层与铝护套间隙较大等情况下均无法检测到局部放电信号。可以看出,上述方法的准确度、可操作性以及推广度均难以满足现阶段存量电缆缓冲层烧蚀缺陷检测的需求,因此亟需开展缓冲层

烧蚀缺陷检测方法的深入研究。

超声检测技术是一种无损检测的重要手段,可以有效检出电力设备内部的多种缺陷^[15-20],有望成为潜在的电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法。目前已有少数学者开展了相关方面的研究。文献[21]基于气隙放电导致缓冲层烧蚀缺陷的理论,开展了高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声信号特征研究,发现在波纹铝护套波谷处产生较为强烈的放电时,通过超声技术检测该信号具有可行性。

大量缓冲层烧蚀缺陷的机理研究表明,缓冲层在潮湿条件下的烧蚀过程中会引发电化学反应,腐蚀皱纹铝护套与缓冲层的接触面^[22-24],导致电缆皱纹铝护套内表面的形貌特征发生变化。若能检出电缆皱纹铝护套内表面的形貌特征变化,即可推断出电缆内部是否存在缓冲层受潮条件下的烧蚀缺陷,并准确定位烧蚀缺陷的位置,有效弥补现有检测技术的不足,提升高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的检出能力。然而,目前尚无基于铝护套内表面形貌特征的高压电缆缓冲层烧蚀缺陷检测研究。

基于当前研究现状,文中首次对基于铝护套内表面粗糙度的高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的超声检测方法进行了研究。首先,开展了潮湿条件下缓冲层烧蚀模拟实验,通过激光共聚焦显微镜以及电化学阻抗谱测试研究了烧蚀过程中铝片表面粗糙度与烧蚀严重程度之间的关联。其次,对烧蚀后的铝片开展了超声检测研究,并基于超声检测波形推算出了铝片内表面粗糙度的变化,推算结果与铝片的实际粗糙度变化相对应,并可用于判断缓冲层烧蚀的严重程度。文中结果为开发高压电缆缓冲层烧蚀缺

收稿日期:2023-08-21;修回日期:2023-11-03

基金项目:国家自然科学基金资助项目(U2066204);国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-353-XG)

陷的超声检测技术提供了研究基础。

1 实验方法

1.1 烧蚀模拟实验

采用商用缓冲层材料、电工铝片以及半导体屏蔽材料开展烧蚀模拟实验,试样厚度分别为 2 cm、2 cm、1 cm,尺寸均为 3 cm×3 cm。向缓冲层试样中均匀注入 1 mL 蒸馏水,模拟潮湿条件下的缓冲层状态。采用砂纸将电工铝片表面打磨光滑,并反复擦拭去除其表面的污垢。将处理好的试样按图 1 所示置于电极之间,模拟实际电缆中的缓冲层结构,其中,铝片与缓冲层的蓬松棉侧相接触。对电极两端施加 10 V 交流电压^[1],开展潮湿条件下缓冲层的烧蚀模拟。烧蚀时间分别持续 5 min、2 h、6 h,以模拟不同的烧蚀严重程度。

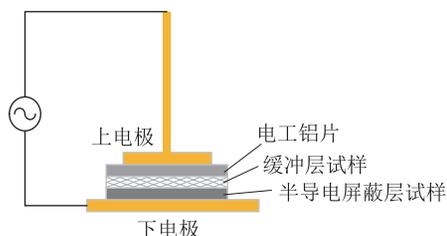


图 1 缓冲层烧蚀模拟实验示意

Fig.1 Schematic diagram of the simulated ablation experiment of buffer layer

1.2 激光共聚焦显微镜实验

采用 OLYMPUS-OLS5100 型激光共聚焦显微镜对铝片试样表面粗糙度进行测试,透镜倍数为 20,视窗尺寸为 640 μm×640 μm。

1.3 电化学阻抗谱实验

采用 PRINCETON-PARSTAT MS 电化学工作站对不同烧蚀程度下的铝片试样进行测试。实验采用三电极系统,铝片试样为工作电极,对电极采用铂电极,参比电极为饱和甘汞电极,电解质溶液为质量分数 0.1% 的聚丙烯酸钠阻水粉溶液。测试频率范围为 10⁻¹~10⁵ Hz,交流电压幅值为 10 mV。

1.4 超声检测实验

采用 OLYMPUS-OMNI SCAN X3 型超声探测仪对铝片试样进行检测,测试模式为幅值扫描,检测频率为 7.5 MHz。超声探头测试面的直径为 1 cm,楔块直径为 2 cm。

2 结果分析

2.1 烧蚀过程中铝片表面形貌变化

经过不同烧蚀时间后铝片的表面形貌如图 2 所示,缓冲层表面的形貌如图 3 所示。可以看出,烧蚀

后铝片表面出现了明显的腐蚀痕迹,缓冲层表面生成了白色物质,该物质为潮湿条件下缓冲层烧蚀过程中电化学反应的产物^[3,23]。并且随着烧蚀时间的增加,铝片表面的腐蚀程度逐渐加深,缓冲层表面的白色物质逐渐增多,表明烧蚀的严重程度逐渐加重。

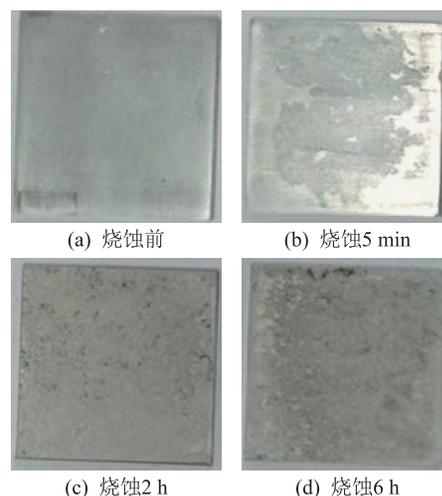


图 2 不同烧蚀时间下铝片表面形貌

Fig.2 The surface morphologies of aluminum specimens under different ablation time

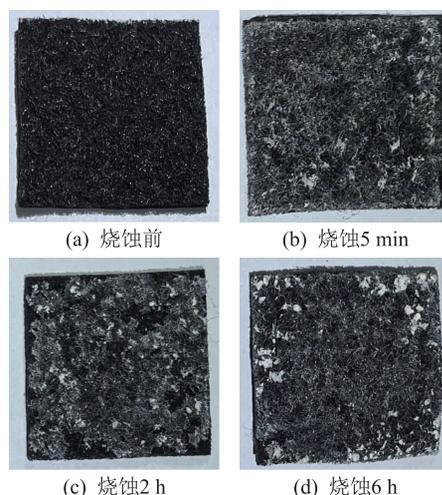


图 3 不同烧蚀时间下缓冲层的表面形貌

Fig.3 The surface morphologies of buffer layers under different ablation time

采用激光共聚焦显微镜对铝片表面的三维形貌进行测试,结果如图 4 所示。根据铝片的表面形貌特征,能够计算得到铝片表面的均方根粗糙度 S_q 。计算公式^[25]为:

$$S_q = \sqrt{\frac{1}{A} \iint z^2(x,y) dx dy} \quad (1)$$

式中: A 为测试面积; x 、 y 为测试面的坐标; $z(x,y)$ 为测试表面的高度关于位置的函数。

根据式(1),计算得到不同烧蚀时间下的铝片

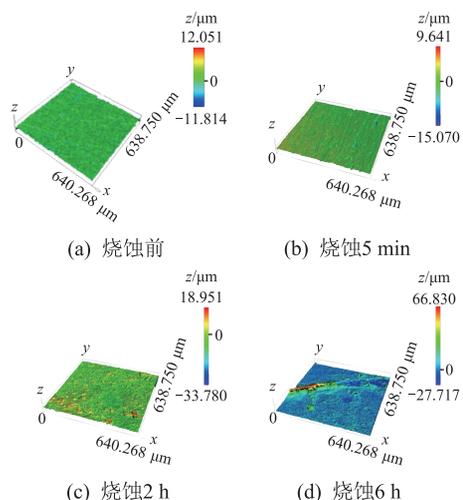


图4 不同烧蚀时间下铝片表面的激光共聚焦显微镜测试结果

Fig.4 Results of laser confocal microscopy tests of aluminum specimens under different ablation time

表面粗糙度分别为 $1.13 \mu\text{m}$ 、 $1.28 \mu\text{m}$ 、 $3.11 \mu\text{m}$ 、 $9.08 \mu\text{m}$ 。可以看出,随着烧蚀时间的增加,铝片表面的粗糙度逐渐增加。

不同烧蚀时间下铝片的电化学阻抗谱测试结果如图5所示,其中 Z' 、 $-Z''$ 分别为阻抗实部和虚部。基于电化学腐蚀电池的等效电路模型,采用 Zview 软件对电化学阻抗谱曲线进行拟合,得到不同烧蚀时间下铝片的电荷转移阻抗^[26-27],分别为 $1\ 617 \Omega$ 、 $2\ 181 \Omega$ 、 $3\ 623 \Omega$ 、 $4\ 959 \Omega$ 。可以看出,随着烧蚀时间的增加,铝片表面的电荷转移阻抗逐渐增加,表明铝片表面的腐蚀过程逐渐趋于完善,腐蚀程度逐渐增加^[27-28]。

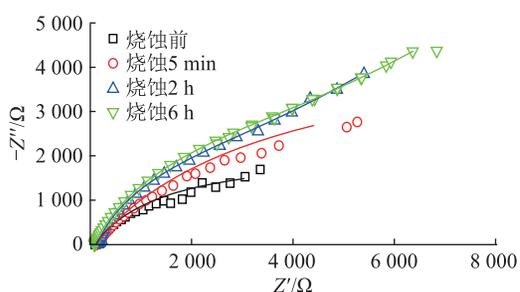


图5 不同烧蚀时间下铝片的电化学阻抗谱测试结果

Fig.5 Results of electrochemical impedance spectroscopy tests of aluminum specimens under different ablation time

图6给出了铝片表面粗糙度以及电荷转移阻抗随烧蚀时间的变化。可以看出,随着烧蚀时间的增加,铝片的表面粗糙度以及电荷转移阻抗均逐渐增加,且铝片的表面粗糙度越大,对应的电荷转移阻抗也越高。铝片的表面粗糙度能在一定程度上反映出铝片的腐蚀程度,粗糙度越大表明腐蚀过程越

趋于完善,腐蚀程度越大。因此,通过检测铝片的表面粗糙度,能够推断出铝片的腐蚀程度,进而判断缓冲层的烧蚀严重程度。

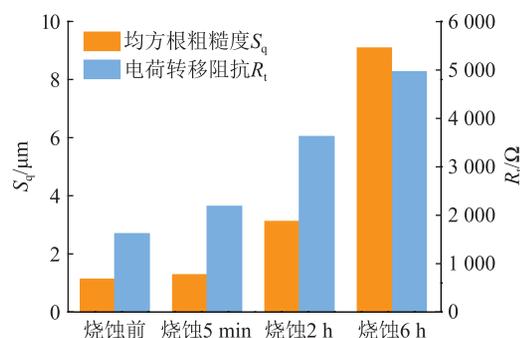


图6 不同烧蚀时间下铝片表面粗糙度以及电荷转移阻抗

Fig.6 The surface roughness and charge transfer resistance of aluminum specimens under different ablation time

2.2 基于铝片表面粗糙度的缓冲层烧蚀缺陷超声检测分析

图7为超声检测实验的示意图。其中,超声探头用于发出和接受超声波信号;有机玻璃楔块用于控制超声波束的角度;耦合剂用于排出楔块与铝片之间的空气,使声波能有效传导至铝片,通常选用水作为耦合剂。

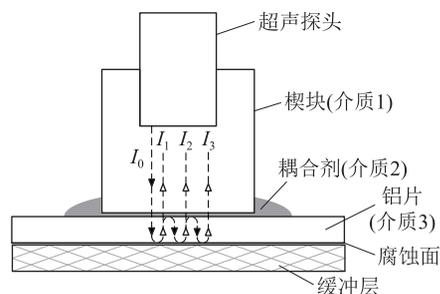


图7 铝片超声波检测及声波传导过程示意

Fig.7 Schematic diagram of aluminum sheet ultrasonic tests and sound wave transmission processes

超声波传播到2种不同介质的界面处时会发生透射和反射,反射系数与透射系数可由式(2)、式(3)计算得到。

$$R_{12} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} \quad (2)$$

$$T_{12} = \frac{2Z_2}{Z_2 + Z_1} \quad (3)$$

式中: R_{12} 、 T_{12} 分别为超声波从介质1向介质2传播过程中在界面处的反射系数与透射系数; Z_1 、 Z_2 分别为介质1和介质2的声阻抗。不同介质的声阻抗如表1所示。

为简化图7所示超声波传导过程,文中仅考虑超声波在铝片内部的反射与透射过程。首先,由探

表 1 不同介质的声阻抗

Table 1 Acoustic impedances of different mediums

介质	声阻抗/($10^6 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$)
楔块	3.15
水	1.48
铝片	17.06
空气	0.000 427

头发出超声波束 I_0 并传导至铝片下表面。由于铝片与缓冲层的蓬松棉侧相接触,存在较多空气气隙,且空气的声阻抗远低于铝片,导致透射系数近似为 0,反射系数近似为 1,因此可以认为超声波传导至铝片下侧的腐蚀面时被全部反射。反射后的超声波在传导至铝片的上表面后,一部分将透射过铝片上表面并被超声探头接收,在示波器上表现为一次回波,即图 7 中的 I_1 ;而另一部分会被铝片的上表面反射,继续向铝片的腐蚀面传导,随后再次在铝片腐蚀面被反射,并重复上述过程,得到更高次的回波信号 I_2 、 I_3 等。因此,各个回波信号的幅值可以表示为:

$$I_n = I_0 T_{12} T_{23} (R_{3,\text{air}})^n (R_{32})^{n-1} T_{32} T_{21} \quad n = 1, 2, \dots \quad (4)$$

式中: I_n 为第 n 次回波的超声信号幅值; T_{23} 、 T_{32} 、 T_{21} 分别为超声波从介质 2 向介质 3、从介质 3 向介质 2、从介质 2 向介质 1 传播过程中在界面处的透射系数; $R_{3,\text{air}}$ 为超声波从介质 3 向空气传播过程中在界面处的反射系数; R_{32} 为超声波从介质 3 向介质 2 传播过程中在界面处的反射系数。各透射系数与反射系数可根据表 1 中各介质的声阻抗计算得到。根据式(4),可以得到相邻回波的幅值比为:

$$\frac{I_{n+1}}{I_n} = R_{32} R_{3,\text{air}} \quad (5)$$

根据相屏近似理论,铝片腐蚀面与空气之间的反射系数可以由铝片的表面粗糙度 S_q 得到^[28-30]。

$$R_{3,\text{air}} = R_{3,\text{air}}^* e^{-2S_q^2 k^2} \quad (6)$$

式中: $R_{3,\text{air}}^*$ 为表面光滑时的反射系数,近似为 1; k 为超声波在介质中的波数,在铝片中 $k = \frac{2\pi f}{v} = \frac{2\pi \times 7.5 \times 10^6}{6320} \text{ m}^{-1} \approx 7456 \text{ m}^{-1}$, f 为超声波的频率, v 为超声波在铝中的传播速度。通过计算相邻高次回波幅值比,根据式(6)即可得到铝片表面的粗糙度,进而推断缓冲层的烧蚀严重程度。

超声探头将测到的信号传输到示波器中,显示出入射波以及各回波的信号,如图 8 所示。将测得的各回波幅值按入射波信号幅值进行归一化,得到

超声波信号幅值的衰减曲线,如图 9 所示。可以看出,超声信号波的幅值随反射次数的增加逐渐衰减。

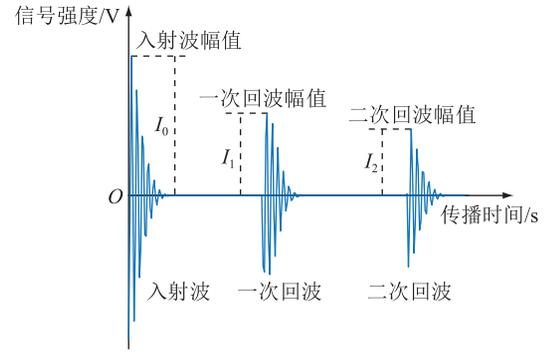


图 8 超声检测波形示意

Fig.8 Schematic diagram of ultrasonic test waves

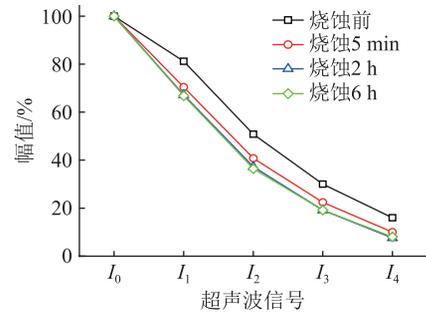


图 9 超声波信号幅值的衰减曲线

Fig.9 The decay curves of ultrasonic signal amplitude

根据式(5)、式(6)可以计算得到不同烧蚀时间下铝片表面的均方根粗糙度,结果如表 2 所示。可以看出,随着烧蚀时间的增加,铝片表面的均方根粗糙度也逐渐增加,对应于铝片的腐蚀程度逐渐增加,表明缓冲层的烧蚀严重程度逐渐加深。

表 2 超声测得的不同烧蚀时间下铝片表面粗糙度

Table 2 The surface roughness of aluminum specimens under different ablation time from ultrasonic tests

烧蚀时间	$S_q/\mu\text{m}$
烧蚀前	17.5
烧蚀 5 min	39.9
烧蚀 2 h	44.8
烧蚀 6 h	45.4

由于超声波在传导至铝护套内表面时基本会被全部反射,因此铝护套与缓冲层之间的空气间隙基本不会影响超声波检测结果。同时,铝护套内表面粗糙度也能够反映缓冲层的体积电阻率大小。当缓冲层体积电阻率较低时(小于 $5 \times 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$),缓冲层中基本不存在高阻性物质,表现为产生严重的电化学腐蚀,此时铝护套内表面粗糙度应较低。而在缓冲层内积聚了大量电化学腐蚀产生的高阻性物质后,缓冲层体积电阻率急剧增加(大于 1×10^6)

$\Omega \cdot \text{cm}$)^[22-23],此时铝护套内表面粗糙度会因电化学腐蚀作用而剧烈增加,并反映在超声检测结果中。

但值得注意的是,计算得到的铝片表面均方根粗糙度与通过激光共聚焦显微镜测得的值有所差异。这可能是因为二者的测量面积以及测试面积存在较大差异。文中所用激光共聚焦显微镜的视窗面积约为 0.41 mm^2 ,而超声探头的面积约为 78.5 mm^2 ,因此通过激光共聚焦显微镜测量得到的是铝片表面局部微区的粗糙度,而通过超声波检测得到的是铝片表面更大范围的平均粗糙度,这导致2种方法的粗糙度测量结果有所差异。后续将通过减小超声探头检测面积、提高超声检测频率等方式进一步优化超声检测方法,以测得更准确的粗糙度。

该方法在实际应用过程中,首先将高压电缆的外护套剥离,对铝护套波谷处进行超声波测量,得到电缆铝护套与缓冲层的各回波信号,结合式(5)、式(6)计算得到铝护套波谷处的均方根粗糙度。若发现铝护套波谷处的均方根粗糙度显著增加,则表明铝护套在该处受到了严重的电化学腐蚀,该处存在潮湿条件下的缓冲层烧蚀缺陷。

该方法仍须针对实际电缆烧蚀缺陷检测的应用,研发针对电缆的超声检测耦合装置^[31],分析故障检出率,并与其他缓冲层烧蚀缺陷检测方法进行比较,开展针对性优化改进,推进该方法的工程化应用。

3 结论

文中研究了基于铝护套表面粗糙度的高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测方法,主要结论如下。

(1) 开展了潮湿条件下的缓冲层烧蚀模拟实验,发现铝片的表面粗糙度以及电荷转移阻抗均随烧蚀时间逐渐增加,缓冲层烧蚀严重程度也相应增加,表明铝片的表面粗糙度能够反映潮湿条件下缓冲层烧蚀缺陷的严重程度。

(2) 通过对铝片的上表面施加超声信号,并根据相邻回波信号的幅值比可以推算出铝片下侧腐蚀面的粗糙度。在不同烧蚀程度下,铝片粗糙度的推算结果与实际测量结果具有相同的变化趋势,因此可以用于判断缓冲层烧蚀缺陷的严重程度。

(3) 该方法在实际电缆中应用时,需要将电缆外护套剥离并测试铝护套波谷处的超声波回波信号特性,以此计算得到铝护套内表面粗糙度,从而判断该处的烧蚀严重程度。

参考文献:

[1] 门业堃,张竟成,郭卫,等. 高压 XLPE 电缆缓冲带动态导电

特性与机理[J]. 电力工程技术,2022,41(6):163-171.

MEN Yekun,ZHANG Jingcheng,GUO Wei,et al. Dynamic conductive property and mechanism of buffer tape in HV XLPE cables[J]. Electric Power Engineering Technology,2022,41(6):163-171.

[2] 张静,王伟,徐明忠,等. 高压电缆缓冲层轴向沿面烧蚀故障机理分析[J]. 电力工程技术,2020,39(3):180-184.

ZHANG Jing,WANG Wei,XU Mingzhong,et al. Analysis of axial ablation failure mechanism of buffer layer of high voltage power cable[J]. Electric Power Engineering Technology,2020,39(3):180-184.

[3] 欧阳本红,李文杰,刘英,等. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理[J]. 高电压技术,2021,47(9):3153-3162.

OUYANG Benhong,LI Wenjie,LIU Ying,et al. Ablation mechanism of water-blocking buffer layer in HV XLPE cables[J]. High Voltage Engineering,2021,47(9):3153-3162.

[4] 刘洋,陈杰,胡丽斌,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层放电烧蚀机理与实验研究[J]. 绝缘材料,2021,54(8):102-108.

LIU Yang,CHEN Jie,HU Libin,et al. Mechanism and experimental study on discharge ablation of high voltage XLPE cable buffer layer[J]. Insulating Materials,2021,54(8):102-108.

[5] 刘英,陈佳美. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层电-热场分析及模拟烧蚀试验研究[J]. 中国电机工程学报,2022,42(4):1260-1271.

LIU Ying,CHEN Jiamei. Electro-thermal field analysis and simulated ablation experiments for the water-blocking buffer layer in high voltage XLPE cable[J]. Proceedings of the CSEE,2022,42(4):1260-1271.

[6] 李岩,刘一帆,齐磊杰,等. 高压电缆皱纹护套损耗系数改进计算方法[J]. 电网与清洁能源,2023,39(6):49-57.

LI Yan,LIU Yifan,QI Leijie,et al. An improved calculation method for high voltage cable corrugated sheath loss coefficient[J]. Power System and Clean Energy,2023,39(6):49-57.

[7] 周韞捷,李海,范玉军,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障原因与检测关键技术[J]. 电线电缆,2023(1):26-29.

ZHOU Yunjie,LI Hai,FAN Yujun,et al. Analysis ablation failure causes on buffer layer of high voltage XLPE cable and key detection technologies[J]. Wire & Cable,2023(1):26-29.

[8] 严有祥,徐子峻,尤天鹏,等. 高压电缆缓冲层烧蚀的成因分析[J]. 高压电器,2023,59(2):184-189.

YAN Youxiang,XU Zijun,YOU Tianpeng,et al. Cause analysis of buffer layer ablation in high voltage cable[J]. High Voltage Apparatus,2023,59(2):184-189.

[9] 严有祥,欧阳本红,郑建康,等. 电缆缓冲层电阻变化、电容电流分布和运行的研究[J]. 电线电缆,2022(4):35-40.

YAN Youxiang,OUYANG Benhong,ZHENG Jiankang,et al. Research on resistance change, capacitance current distribution and operation of cable buffer layer[J]. Wire & Cable,2022(4):35-40.

[10] 周韞捷,杨天宇,周宏,等. 高压 XLPE 电缆缓冲层状态模糊综合评估方法[J]. 高压电器,2022,58(6):137-143.

- ZHOU Yunjie, YANG Tianyu, ZHOU Hong, et al. Fuzzy comprehensive condition assessment method of buffer layer in HV XLPE cables[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(6): 137-143.
- [11] 刘凤莲, 夏荣, 李文杰, 等. 高压交联电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法研究[J]. 高压电器, 2022, 58(8): 259-266, 274.
LIU Fenglian, XIA Rong, LI Wenjie, et al. Research on detection method of buffer layer ablation defect in high voltage XLPE cable[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(8): 259-266, 274.
- [12] 冯超, 李伟, 曹先慧, 等. 220 kV 电缆缓冲层烧蚀缺陷射线检测方法[J]. 湖南电力, 2020, 40(5): 43-46.
FENG Chao, LI Wei, CAO Xianhui, et al. Radiographic detection method of ablative defects in 220 kV cable buffer layer[J]. Hunan Electric Power, 2020, 40(5): 43-46.
- [13] 齐伟强, 李华春, 谭磊, 等. 一起高压电缆半导电缓冲层烧蚀故障分析[J]. 高电压技术, 45(增2): 98-101.
QI Weiqiang, LI Huachun, TAN Lei, et al. A case study of ablation fault of semi-conductive buffer layer of high voltage cable[J]. High Voltage Engineering, 45(Supplement 2): 98-101.
- [14] 陈云. 高压 XLPE 电缆缓冲层故障特征与机理[D]. 广州: 华南理工大学, 2019.
CHEN Yun. Fault characteristics and mechanism of high voltage XLPE cable buffer layer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019.
- [15] 宋军, 王若丞, 纪航, 等. 电缆接头硅橡胶材料热老化超声声速特性研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(12): 50-54.
SONG Jun, WANG Ruocheng, JI Hang, et al. Study on ultrasonic velocity characteristics of silicon rubber material for cable joint during thermal ageing[J]. Insulating Materials, 2020, 53(12): 50-54.
- [16] 王若丞, 康洪玮, 贺云逸, 等. 电缆接头硅橡胶材料内部缺陷的超声检测研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(4): 102-108.
WANG Ruocheng, KANG Hongwei, HE Yunyi, et al. Research on ultrasonic testing of internal defects in silicone rubber materials for cable joints[J]. Insulating Materials, 2021, 54(4): 102-108.
- [17] 徐天勇, 董晓虎, 李荣超, 等. 复合绝缘子内部缺陷的超声相控阵检测研究[J]. 电力工程技术, 2018, 37(6): 75-79, 114.
XU Tianyong, DONG Xiaohu, LI Rongchao, et al. Ultrasonic phased array detection of composite insulator internal defects[J]. Electric Power Engineering Technology, 2018, 37(6): 75-79, 114.
- [18] 晋涛, 王伟, 梁基重, 等. 基于声衰减特性的激光超声盆式绝缘子缺陷检测研究[J]. 电瓷避雷器, 2023(3): 161-165.
JIN Tao, WANG Wei, LIANG Jizhong, et al. Laser ultrasonic defect detection of basin insulator based on acoustic attenuation characteristics[J]. Insulators and Surge Arresters, 2023(3): 161-165.
- [19] 李濛, 洪晓丰, 黄嘉盛. 高压电缆铝护套腐蚀缺陷周向超声导波检测技术[J]. 自动化与信息工程, 2022, 43(4): 1-6.
LI Meng, HONG Xiaofeng, HUANG Jiasheng. Circumferential ultrasonic guided wave detection technology for corrosion defect of aluminum sheath of high voltage cable[J]. Automation & Information Engineering, 2022, 43(4): 1-6.
- [20] 周梦茜, 唐志国, 王泽瑞, 等. 基于声纹识别系统的局部放电超声信号识别研究[J]. 高压电器, 2022, 58(9): 127-133.
ZHOU Mengxi, TANG Zhiguo, WANG Zerui, et al. Study on ultrasonic signal recognition of partial discharge based on voiceprint recognition system[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(9): 127-133.
- [21] 何维晟, 吴照国, 邓帮飞, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷超声检测技术仿真研究[J]. 高压电器, 2022, 58(11): 230-237, 260.
HE Weisheng, WU Zhaoguo, DENG Bangfei, et al. Simulation research on ultrasonic detection technology of buffer layer ablation defects in high voltage cables[J]. High Voltage Apparatus, 2022, 58(11): 230-237, 260.
- [22] 郑建康, 苏小婷, 李庚, 等. 高压电缆阻水缓冲层电化学腐蚀特性及失效研究[J]. 绝缘材料, 2022, 55(2): 91-96.
ZHENG Jiankang, SU Xiaoting, LI Geng, et al. Electrochemical corrosion properties and failure analysis of water-blocking buffer layer in high voltage power cables[J]. Insulating Materials, 2022, 55(2): 91-96.
- [23] 陈熠东, 周凯, 雷清泉, 等. 高压电缆阻水缓冲层的白斑现象及析氢腐蚀机理[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(12): 4830-4840.
CHEN Yidong, ZHOU Kai, LEI Qingquan, et al. Phenomena of white spots on the buffer layer and mechanisms of hydrogen evolution corrosion inside high-voltage cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(12): 4830-4840.
- [24] LAI L H, WU Z H, LIU X D, et al. Analysis for metal sheath corrosion rate in AC high voltage power cable[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(22): 4563-4574.
- [25] LEACH Richard. Characterisation of areal surface texture[M]. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2013.
- [26] CHEN Y D, ZHOU K, KONG J M, et al. Hydrogen evolution and electromigration in the corrosion of aluminium metal sheath inside high-voltage cables[J]. High Voltage, 2022, 7(2): 260-268.
- [27] 王立友. 典型供水金属管材电化学腐蚀及对水质影响的研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2015.
WANG Liyou. Electrochemical corrosion of typical water supply metal pipe and the impact on water quality[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.
- [28] 宗庆彬. 高压输电用钢芯铝绞线电化学腐蚀行为研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZONG Qingbin. Electrochemical corrosion behavior of aluminum conductor steel reinforced for high voltage electricity transmission[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.

[29] NAGY P B, ROSE J H. Surface roughness and the ultrasonic detection of subsurface scatterers[J]. Journal of Applied Physics, 1993, 73(2) :566-580.

[30] GUNARATHNE G P P, CHRISTIDIS K. Measurements of surface texture using ultrasound[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2001, 50(5) :1144-1148.

[31] 方春华, 胡冻三, 陶玉宁, 等. 高压电缆终端铅封缺陷超声相控阵柔性耦合检测[J]. 高电压技术, 2022, 48(1) :29-37. FANG Chunhua, HU Dongsan, TAO Yuning, et al. Ultrasonic phased array flexible coupling detection of lead-sealing defects in high voltage cable terminals[J]. High Voltage Engineering,

2022, 48(1) :29-37.

作者简介:



高建

高建(1996),男,博士在读,研究方向为高电压绝缘技术(E-mail:g142102811@stu.xjtu.edu.cn);

张浩然(1998),男,硕士在读,研究方向为高电压绝缘技术;

张可(2001),男,硕士在读,研究方向为高电压绝缘技术。

Experiments on the ultrasonic detection of buffer layer ablation defects in high-voltage cables

GAO Jian, ZHANG Haoran, ZHANG Ke, LI Jianying

(Xi'an Jiaotong University (State key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment), Xi'an 710049, China)

Abstract: The ablation fault of buffer layers in high-voltage cables is a frequent type of cable fault in recent years. However, current detection methods for ablation defects cannot meet the detection requirements of existing cables. In this paper, the ultrasonic detection method for the buffer layer ablation defects in high-voltage cables based on the surface roughness of aluminum sheath is studied for the first time. Firstly, simulated buffer layer ablation experiments under humid conditions are carried out, and the laser confocal microscopy and electrochemical impedance spectroscopy analysis are carried out on the ablated aluminum specimens. It is found that with the increase of ablation time, the surface roughness of aluminum specimens gradually increases, and the surface corrosion degree of aluminum specimens gradually deepens, corresponding to the aggravated ablation defects of buffer layers, which indicates that the surface roughness of aluminum specimens could be correlated with the ablation degree of buffer layers under the moisture conditions. Secondly, ultrasonic testing experiments are carried out on the ablated aluminum specimens, and the roughness of the corroded surfaces of aluminum specimens can be calculated from the amplitude ratio of adjacent ultrasonic echo signals. The calculated results show the same variation trend as the measured roughness in the experiment. The results in this study indicate that the ultrasonic tests could be used to detect the severity of buffer layer ablation defects, providing the research basis for the ultrasonic detection method of ablation defects in the buffer layer of high-voltage cables.

Keywords: high-voltage cable; buffer layer ablation; ultrasonic detection; electrochemical corrosion; roughness; reflection coefficient

(编辑 陆海霞)