

高压电缆缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽损伤的机理研究

张可¹, 高建¹, 武康宁¹, 门业堃², 任志刚², 李建英^{1*}

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

2. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京市 东城区 100075)

Research on Damaging Mechanisms of Insulation Shield Induced by Buffer Layer Ablation in High-voltage Cables

ZHANG Ke¹, GAO Jian¹, WU Kangning¹, MEN Yekun², REN Zhigang², LI Jianying^{1*}

(1. State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment (Xi'an Jiaotong University), Xi'an 710049,

Shaanxi Province, China; 2. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Dongcheng District, Beijing 100075, China)

ABSTRACT: The frequent occurrence of breakdown accidents caused by the erosion of the buffer layer of high-voltage cables poses a serious threat to cable operation safety. While existing research primarily focuses on the erosion and damage of the buffer layer itself, the process and mechanism of erosion defects developing towards the cable insulation shield remain unclear. This article provides a comprehensive summary of the damage characteristics of the insulation shield caused by white powder in an actual ablative fault cable. The analysis includes a three-dimensional finite element simulation of high voltage cable to investigate the damage mechanism of the insulation shield by white powder, along with verification through simulation tests of the insulation shield damage process and actual cable simulation ablation tests. The findings indicate that the primary damage characteristics of white powder on the insulation shield are predominantly embedded damage, resulting from current thermal effects at the edge of the white powder and pressure. In terms of axial direction, current density is concentrated at the edge of the white powder, promoting electrochemical corrosion on the buffer layer surface and formation of continuously distributed white powder strips. Radially, temperature rise due to critical current density exceeding 185 A/m^2 leads to thermal decomposition of buffer layer and melting temperature exceeding that for insulation shield layer. Under cable self-weight action, gradual penetration into buffer layer occurs leading to surface damage on insulation shield. These simulation results align well with laboratory-based simulation tests on insulation shield damage

process and actual ablative fault cable disintegration, thus validating rationality in this paper's analysis results. The research outcomes presented here hold significant implications for elucidating development mechanisms underlying ablative defects within buffer layers.

KEY WORDS: buffer layer ablation; insulation shield; current heating effect; electrochemical corrosion; finite element simulation

摘要: 高压电缆缓冲层烧蚀引发的本体击穿事故频发,但目前对于烧蚀缺陷向电缆绝缘屏蔽层发展的过程与机理尚不明确。该文分析实际烧蚀故障电缆中白色粉末对绝缘屏蔽的损伤特征,通过高压电缆三维有限元仿真,研究白色粉末对绝缘屏蔽烧蚀的损伤机理,并通过绝缘屏蔽损伤过程模拟试验与实际电缆模拟烧蚀试验验证仿真结果。结果表明:白色粉末对绝缘屏蔽层的损伤特征主要表现为嵌入式损伤,由白色粉末边缘处的电流热效应以及承受压力所致。轴向上,白色粉末边缘处产生电流密度集中,促进了缓冲层表面的电化学腐蚀与连续分布的条状白色粉末的生成;径向上,当缓冲层表面电流密度达到临界值 185 A/m^2 时,缓冲层温度高达 204°C ,绝缘屏蔽层温度高达 90.5°C ,超过缓冲层的热分解温度和绝缘屏蔽层的熔融温度,在电缆自重作用下白色粉末将逐步贯穿破坏缓冲层,并最终损伤绝缘屏蔽表面。仿真结果能够与实验室绝缘屏蔽损伤过程模拟试验和实际烧蚀故障电缆解体情况对应良好,验证了分析结果的合理性,研究结果对于揭示缓冲层烧蚀缺陷的发展机理具有一定意义。

关键词: 缓冲层烧蚀; 绝缘屏蔽层; 电流热效应; 电化学腐蚀; 有限元仿真

0 引言

高压电缆是城市输电系统的重要组成部分,其可靠性对于城市电网的安全稳定运行至关重要^[1-4]。

基金项目: 国家电网有限公司科技项目(5108-202218280A-2-353-XG); 国家自然科学基金项目(52107028)。

Science and Technology Project of State Grid Corporation of China (5108-202218280A-2-353-XG); Project Supported by National Natural Science Foundation of China (52107028).

然而,近年来国内各大城市频繁发生因阻水缓冲层烧蚀引发的电缆本体击穿事故,且目前仍有大量在运电缆存在潜伏性缓冲层烧蚀缺陷,严重危害了电缆系统的运行可靠性^[5-7]。因此,深入研究高压电缆缓冲层烧蚀诱导电缆本体击穿故障的内在原因与发展过程,对于掌握在运高压电缆缓冲层烧蚀缺陷风险、提升实际电缆线路的运维决策能力具有重要的意义。

国内外学者已针对高压电缆缓冲层烧蚀机理进行大量研究^[8],分为电流热效应烧蚀^[9-11]、气隙放电烧蚀^[12-14]和电化学腐蚀烧蚀^[15-17]。电流热效应烧蚀机理认为,电缆径向电流或铝护套环流的热效应是引发缓冲层烧蚀破坏的原因,缓冲层与铝护套接触位置存在的长段不良接触会导致电流密度的集中,并造成缓冲层的温升^[5,18],高于缓冲层的热分解温度时便会引发缓冲层的烧蚀破坏。气隙放电烧蚀机理认为,缓冲层与皱纹铝护套之间因不良电气接触而引发的气隙放电是导致缓冲层烧蚀的重要原因,仿真和实验研究发现,缓冲层和铝护套间的气隙放电会对缓冲层产生直接破坏^[13,19]。电化学腐蚀烧蚀机理认为电化学反应是缓冲层受潮后产生高阻性白色粉末的直接原因,高阻白色粉末能够引发缓冲层的电流密度集中或电位差^[9,20-21],引发电流热效应或气隙放电,从而导致烧蚀。可以看出,目前对于高压电缆缓冲层烧蚀的引发机理已形成较为全面的认识。

然而,现有研究主要针对缓冲层本身的烧蚀破坏过程。高压电缆缓冲层烧蚀在发展到一定程度后,会引发绝缘屏蔽层的损伤,导致绝缘屏蔽层表面产生白色粉末嵌入、烧蚀损伤凹坑等特征,可能是引发电缆主绝缘劣化甚至击穿的重要原因,严重危害了电缆线路的可靠性与安全稳定运行。而目前对于缓冲层烧蚀如何进一步向内发展并引发电缆绝缘屏蔽层损伤的机理仍不明确,因此,亟须开展相关研究,完善缓冲层烧蚀对电缆劣化损伤的认识。

本文首先基于多个实际烧蚀故障电缆线路的解体案例,分析总结受潮条件下电缆缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽层损伤的特征。随后通过高压电缆建模仿真分析,研究缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽层损伤的机理。之后通过实际电缆模拟烧蚀试验,对应并论证了仿真结果。本文的研究结果对于完善缓冲层烧蚀导致电缆故障发展过程的认识、掌握并规避实际电缆线路的缓冲层烧蚀缺陷隐患具有重要的参考意义。

1 实际电缆绝缘屏蔽层的烧蚀损伤特征

通过解体 20 余根 110 kV 故障线路烧蚀电缆可知,缓冲层表面在轴向长距离范围内存在大量白色粉末,如图 1(a)所示,但仅局部白色粉末能够向内发展并嵌入绝缘屏蔽层,为图 1(a)中椭圆圈标记的部位。同时,皱纹铝护套波谷处产生明显的电化学腐蚀痕迹,与缓冲层表面白色粉末的位置一致。绝缘屏蔽层表面存在明显的白色粉末嵌入式损伤,并与缓冲层的穿孔形状一致,表明烧蚀生成的白色粉末已形成从缓冲层到绝缘屏蔽层内的贯穿式分布。绝缘屏蔽层的烧蚀损伤特征如图 1(d)所示。



图 1 含白色粉末的电缆缓冲层烧蚀缺陷特征

Fig. 1 Characteristics of buffer layer ablation defects with white powders

从绝缘屏蔽层表面取白色粉末,使用能谱仪(energy dispersive X-ray spectroscopy, EDS)对其进行元素成分分析,结果如图 2 所示,白色粉末中含有较多的铝元素与氧元素。在潮湿环境中,在电流与水分作用下,缓冲层中阻水粉与铝护套发生电化学腐蚀,产生白色粉末。结合现有研究^[15,18],潮湿环境烧蚀电缆中缓冲层与绝缘屏蔽上的白色粉末状烧蚀产物中的主要高阻成分为 Al_2O_3 。

综合上述结果可以看出,缓冲层烧蚀引发的绝缘屏蔽层损伤主要是在缓冲层表面存在连续分布的白色粉末,且生成的白色粉末已对缓冲层产生贯穿式破坏,但仅有部分白色粉末能够穿透缓冲层并损伤绝缘屏蔽层。

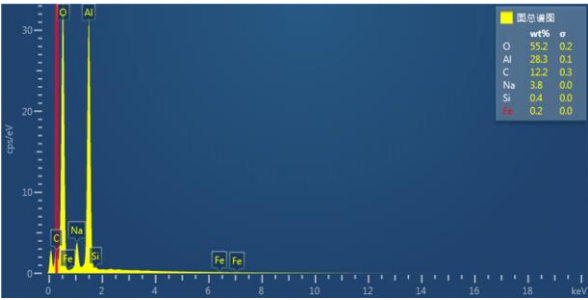


图 2 烧蚀电缆绝缘屏蔽表面白色粉末成分及含量
Fig. 2 Composition and content of white powder on the surface of ablative cable insulation shield

2 仿真模型

2.1 高压电缆三维仿真模型

以皱纹铝护套 YJLW02-Z 64/110 kV 为仿真对象，构建 110 kV 高压 XLPE 电缆的三维模型，如图 3(a)所示。

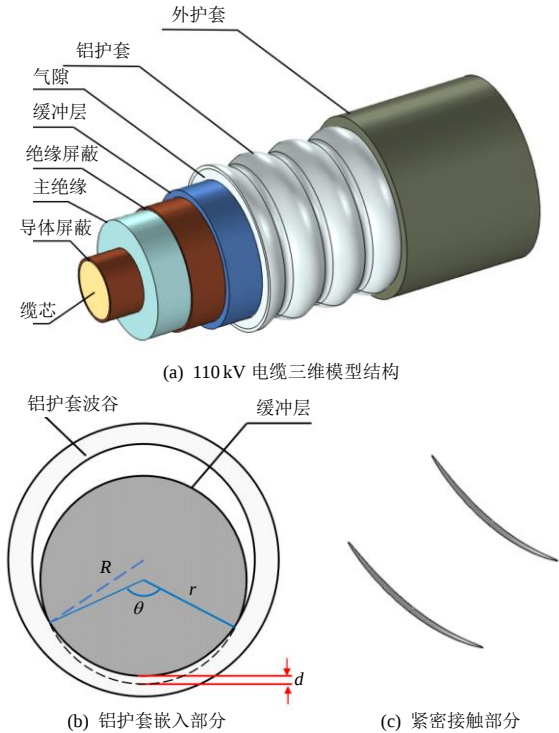


图 3 110 kV 电缆仿真模型
Fig. 3 Simulation model of the 110 kV cable

实际电缆受护套结构、敷设方式、外部机械应力、重力等影响^[13,22]，皱纹铝护套波谷与缓冲层间可能存在空气隙间隔，仅有部分区域紧密接触。为简化分析，本文仿真设定铝护套波谷为标准圆形，以重力作用为例，电缆底部铝护套与缓冲层行成弧形紧密接触部分。当铝护套波谷内圈对缓冲层抱紧程度不同时，底部铝护套与缓冲层接触面积不同。定义接触部分对应缓冲层的圆心角为 θ ，如图 3(b)所示，几何上有：

$$\theta = 2\arccos[\frac{2(R-r)(r-d)-d^2}{2r(R-r+d)}]$$
 (1)

式中： R 为铝护套波谷内径； r 为缓冲层的外径； d 为铝护套嵌入缓冲层的深度； θ 与底部接触面积成正比，在 d 与 r 确定时与 $R-r$ 成反比。

仿真中采用的电缆模型的尺寸和材料参数如表 1 所示^[5,18]。干燥情况下，设置缓冲层电阻率为 $1\times10^3\Omega\cdot\text{m}$ ，相对介电常数为 100；潮湿情况下，设置缓冲层电阻率为 $1\times10^5\Omega\cdot\text{m}$ ，相对介电常数为 1 000^[20]。

表 1 仿真模型材料参数

Table 1 Material parameters of the simulation model								
结构	电导率/ (S/m)	相对介 电常数	导热系数/ (W/(m·K))	恒压热容/ (J/(kg·K))	密度/ (kg/m ³)	厚度/ mm	外径/ mm	
缆芯	5.99×10^7	1	400	385	8 960	—	33.7	
导体屏蔽	20	700	0.4	2 180	1 150	1.47	36.64	
主绝缘	1×10^{-14}	2.3	0.286	2 600	930	15.78	68.2	
绝缘屏蔽	20	700	0.4	2 180	1 150	1.35	70.9	
缓冲层	1×10^{-3}	100	0.08	2 120	140	4	78.9	
空气隙	1×10^{-14}	1	0.026	1 005	1.2	—	90.9	
铝护套	3.45×10^7	1	238	900	2 700	2	94.9	
外护套	1×10^{-14}	2.25	0.02	2 000	200	3.5	101.9	

2.2 电热耦合及边界条件

根据 GB/T 11017.2—2014 标准^[23]，110 kV 电缆导体截面积为 800 mm^2 ，额定载流量为 837 A，实际电缆运行载流量在 30%~50%额定载流量的范围。取额定载流量的 50%，在仿真模型上施加 400 A 线芯电流。所加相电压为 63 000 V、频率 50 Hz，波纹铝护套接地。模型总长度为 500 mm，铝护套节距为 25 mm。

本文的仿真模型采用电热耦合方式，由电流产热，固体传热。设置对流换热系数为 $5\text{ W m}^{-2}\text{ K}^{-1}$ ，外表面热发射率为 0.85，环境温度与自然流动空气温度均为 20°C ^[5]。

3 仿真结果与分析

3.1 缓冲层与波纹铝护套均匀接触

本文仿真取 $d=0.1\text{ mm}$ ， $R-r=1\text{ mm}$ 。由线芯电流产生的温升如图 4 所示，线芯温度为 53.1°C ，绝缘屏蔽层温度为 $45.4\sim48.7^\circ\text{C}$ ，缓冲层温度为 $38.4\sim48.5^\circ\text{C}$ 。线芯电流产生的温升仅与线芯电流密度、材料导热系数与对环境传热系数相关，独立作用于各层结构。

高压电缆产生的径向泄露电流经过铝护套波谷最后流入接地点。缓冲层与铝护套均匀接触时，

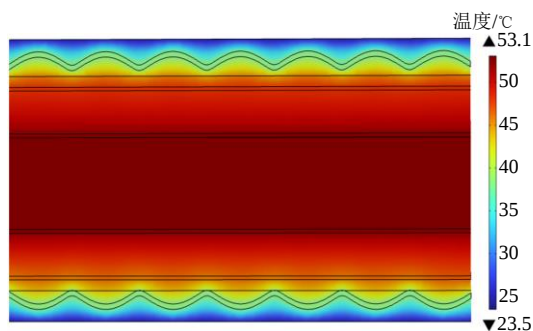


图4 线芯电流作用下电缆温度分布

Fig. 4 Temperature distribution of the cable under the conductor current

缓冲层表面电流密度分布如图5(a)所示。电流主要分布在铝护套与缓冲层紧密接触的部位, 尤其边缘位置附近的电流密度最集中, 最高电流密度为 4.85 A/m^2 。缓冲层与铝护套均匀接触时, 电缆温度分布如图5(b)所示。缓冲层与绝缘屏蔽产生的热量低, 温升均不明显。

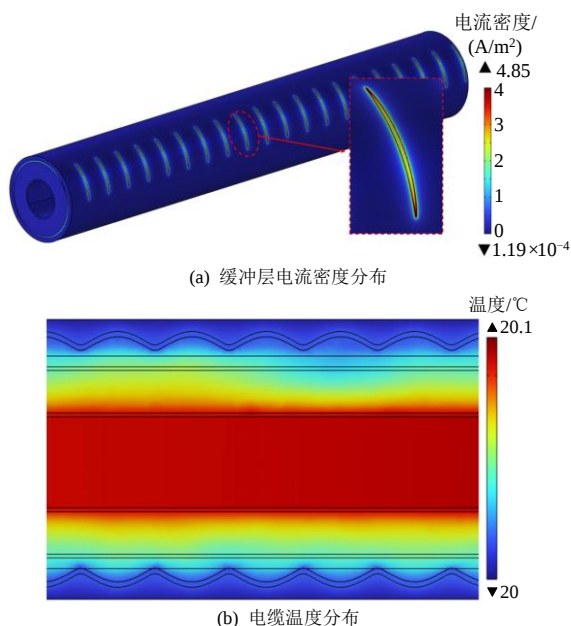


图5 径向泄露电流作用下电流密度与温度分布

Fig. 5 Current density and temperature distribution of the cable under the radial leakage current

3.2 白色粉末对绝缘屏蔽层的损伤过程分析

解剖烧蚀电缆可以发现, 白色粉末呈条状分布在缓冲层中与铝护套波谷紧密接触部位, 部分白色粉末呈柱状贯穿缓冲层, 直至嵌入并损伤绝缘屏蔽, 如图1所示。

在仿真模型中向一处铝护套波谷与缓冲层紧密接触部位添加高阻物质以模拟白色粉末。根据 Al_2O_3 物性参数^[24-25], 设置白色粉末电导率为 $1 \times 10^{-10} \text{ S/m}$ 、相对介电常数为 9、导热系数为 0.02 W/(m K) 、密度为 3500 kg/m^3 、恒压热容为

3100 J/(kg K) 。在缓冲层中紧密接触部位添加白色粉末, 根据实际解体的测量结果, 设置高阻白色粉末厚度为 1 mm , 半径为 1 mm , 添加白色粉末后缓冲层电流密度分布如图6所示。高阻物质阻塞了电流通路, 故白色粉末处电流密度极低; 但在其边缘处有电流密度集中的趋势, 会加剧白色粉末边缘处的电化学反应, 使白色粉末不断增加直至完全覆盖铝护套波谷与缓冲层紧密接触部位, 导致在铝护套该波谷处的电流密度整体保持较低数值。

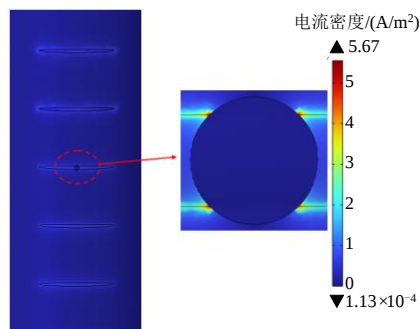


图6 白色粉末覆盖缓冲层时缓冲层电流密度分布

Fig. 6 Current density distribution of the buffer layer when white powder covers the surface of buffer layer

此时根据电流的分流原理, 径向泄露电流会向其他无白色粉末的铝护套波谷低阻处汇集, 同时伴随着温度的升高。当回路中仅有一条良好通路时, 缓冲层电流密度最高可达 68.5 A/m^2 , 温度最高为 146°C 。此时白色粉末在缓冲层表面连续分布, 对应图1(a)所述现象。

为探究白色粉末嵌入绝缘屏蔽层的发展过程, 在剩余未被覆盖的一条良好通路添加柱状白色粉末, 固定高度为 1 mm , 调整圆柱半径以改变覆盖面积, 缓冲层、白色粉末的温度变化与缓冲层表面电流密度随白色粉末半径变化如图7所示。随着白

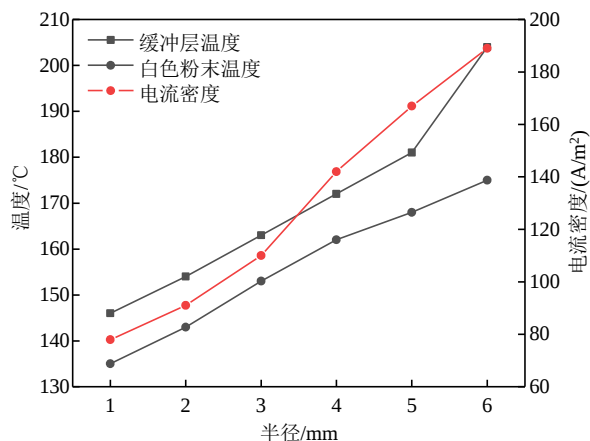


图7 温度与电流密度随白色粉末半径变化

Fig. 7 Temperature and current density change with the radius of white powder

色粉末覆盖面积的增大,缓冲层与白色粉末自身的温度均逐渐升高,在半径 6 mm 时缓冲层温度最高为 204℃,已经达到了缓冲层材料的起始分解温度 200℃^[5],导致缓冲层在热的作用下逐渐被破坏。同时,缓冲层表面电流密度持续升高,在缓冲层发生热分解时表面电流密度达到 185 A/m²,即缓冲层发生热分解的临界电流密度。白色粉末温度分布如图 8 所示,较高的温度集中分布于朝向内部的前端表面,在表面高温以及承受压力的作用下,白色粉末得以向着电缆内部发展。

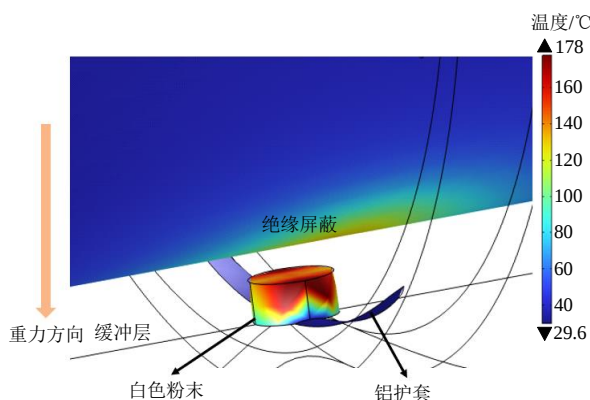


图 8 电流密度集中通路中白色粉末温度分布

Fig. 8 Temperature distribution of white powder in current density concentrated channel

为探究白色粉末在缓冲层内发展深度对温度的影响,固定白色粉末半径为 6 mm,改变白色粉末厚度直至贯穿缓冲层。白色粉末、绝缘屏蔽及白色粉末温度随着白色粉末厚度的变化如图 9 所示。随着白色粉末厚度的增加,各部分温度维持在较为平稳的数值范围,缓冲层温度在 203~209℃,绝缘屏蔽温度在 90.5~95℃,外护套温度在 24.05~24.63℃,即白色粉末在缓冲层中向内发展不会影响温度变化,白

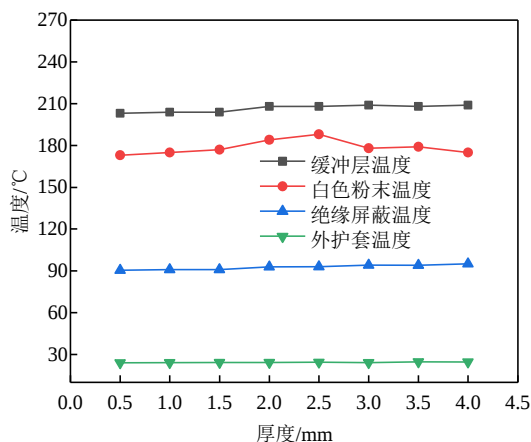


图 9 温度随白色粉末厚度变化

Fig. 9 Temperature change with the thickness of white powder

色粉末前端的缓冲层逐渐分解,新生成的白色粉末得以填充缓冲层空隙,因此,白色粉末将不断向内发展,直至贯穿缓冲层并到达绝缘屏蔽层表面,如图 10 所示,对应图 1(b)、(c)所述现象。绝缘屏蔽温度高于 80℃时绝缘屏蔽呈熔融态,因此,白色粉末引发的温升足以导致绝缘屏蔽层的熔融,在高温与压力的作用下白色粉末得以嵌入绝缘屏蔽,造成绝缘屏蔽的损伤,对应图 1(d)所述现象。

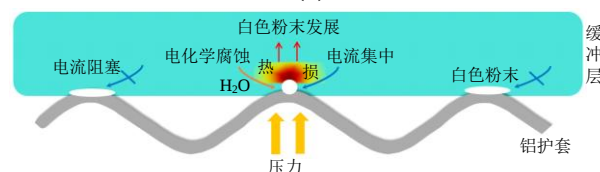


图 10 白色粉末贯穿缓冲层发展机理

Fig. 10 Development mechanism of white powder through buffer layer

4 模拟烧蚀试验

上文通过仿真模拟了白色粉末对绝缘屏蔽的损伤过程,电流集中造成的热效应为缓冲层内部的破坏与白色粉末发展的主要原因。下文通过在实验室模拟绝缘屏蔽损伤过程烧蚀试验与实际电缆的模拟烧蚀试验,对仿真结果进一步分析验证。

4.1 绝缘屏蔽损伤过程模拟试验

搭建如图 11 所示的模拟烧蚀平台,设置烘箱温度恒定为 20℃,湿度恒定为 80%。将干燥缓冲层置于烘箱中充分受潮吸水以模拟电缆中缓冲层受潮情况,设定缓冲层的含水率(含水率=吸水质量/干燥缓冲层质量)约为 15.73%。

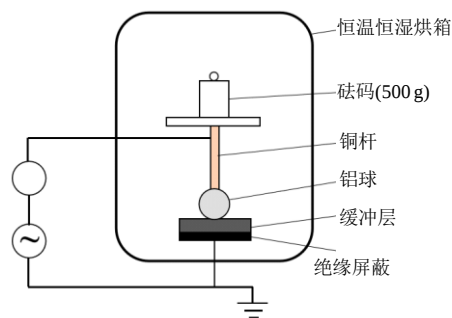


图 11 模拟烧蚀试验平台

Fig. 11 Simulated ablation test platform

根据图 7 的仿真结果,电流密度达到 185 A/m²时缓冲层发生热分解,根据式(2)^[26]计算得接触面积约为 137.5 mm²。

$$S = 4\rho^2 \arccos(1 - \Delta x / \rho) \quad (2)$$

式中: ρ 为铝球的曲率半径; Δx 为球型铝电极嵌入深度。考虑实验室恒流源的功率等级,使用交流恒

流源施加 25 mA 电流达到一致的电流密度。通过红外测温仪记录温度变化,回路的温度分布及最大值如图 12 所示。试验前期温度变化较小,烧蚀 12 h 后缓冲层发生热分解。缓冲层、绝缘屏蔽的表面形貌如图 13 所示,缓冲层与铝球的接触表面被白色粉末覆盖,中间有热分解产生的孔洞区域和白色粉末的堆积区域,绝缘屏蔽表面有灼烧痕迹与白色粉末造成的损伤痕迹。

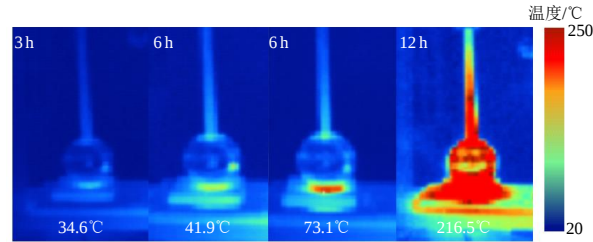
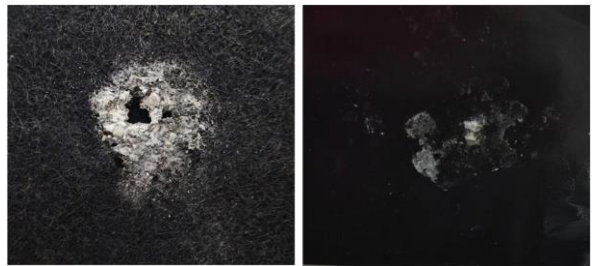


图 12 缓冲层烧蚀过程温度分布

Fig. 12 Temperature distribution under different time



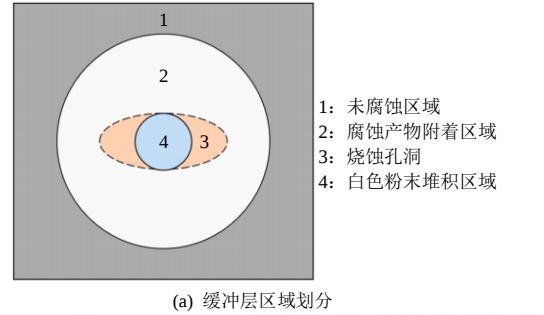
(a) 缓冲层表面形貌 (b) 绝缘屏蔽表面形貌

图 13 缓冲层与绝缘屏蔽的表面形貌

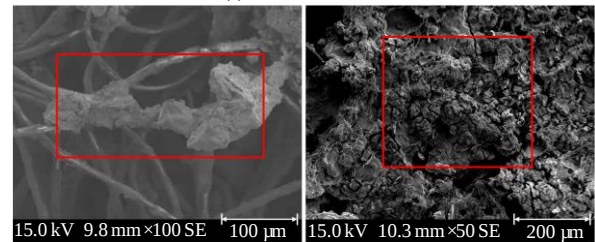
Fig. 13 Surface morphology of buffer layer and insulation shield

对缓冲层进行如图 14(a)所示的区域划分,使用扫描电子显微镜(scanning electron microscope, SEM)分别观测腐蚀产物附着区域(区域 2)和白色粉末堆积区域(区域 4),结果如图 14(b)、(c)所示,使用 EDS 测试图 14 中方框区域的元素分布,结果如表 2 所示。白色粉末在缓冲层纤维上产生,腐蚀区域的白色粉末紧密地包裹在纤维丝表面;而烧蚀区域内缓冲层发生热分解,已经生成的白色粉末呈积聚状态。因此,区域 2 的 C 元素含量远高于区域 4,区域 4 中 Al 与 O 元素占据主要比例,说明区域 4 主要成分为 Al_2O_3 ,源于缓冲层和铝护套之间的电化学腐蚀。

对绝缘屏蔽表面损伤区域进行 SEM 与 EDS 测试,结果如图 15 所示。绝缘屏蔽表面存在热破坏区域,且表面含有 Al 元素,说明白色粉末在热应力作用下破坏绝缘屏蔽。上述烧蚀模拟试验结果能够与电缆三维仿真相对应,验证了烧蚀过程中绝缘屏蔽在电流热效应作用下的破坏过程。



(a) 缓冲层区域划分



(b) 区域2显微图片 (c) 区域4显微图片

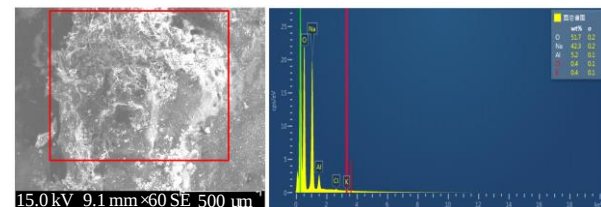
图 14 缓冲层表面 SEM 测试结果

Fig. 14 SEM results of buffer layer surface

表 2 缓冲层表面元素种类及含量

Table 2 Types and contents of elements on buffer layer surface

区域 2		区域 4	
元素种类	含量/%	元素种类	含量/%
Al	5.5	Al	21.6
O	25.3	O	53.1
C	58	C	19.8
Na	11.2	Na	5.5



(a) 绝缘屏蔽表面显微图片 (b) 损伤区域元素分析

图 15 绝缘屏蔽表面 SEM 与 EDS 测试结果

Fig. 15 SEM and EDS results of insulation shield surface

4.2 实际电缆模拟烧蚀试验

取某地区烧蚀故障电缆,测量得其总长度为 103 cm。在电缆一端剥除约 20 cm 的铝护套与外护套,再剥除 10 cm 缓冲层露出绝缘屏蔽,在绝缘屏蔽表面用铜带绕包导线;同时在电缆另一端剥除约 5 cm 的外护套露出铝护套,在铝护套表面用铜带绕包导线,作为接地电极,如图 16 所示,试验过程中环境温度为 10℃。在两端接通 100 V 交流恒压电源^[27],使用红外测温仪记录缓冲层表面温度变化。

外护套温度分布及最大值如图 17 所示,以图中圈出的波谷为例,随着加压时间的增加,波谷对应位置处的温度最先上升,加压 3 h 温升最高为

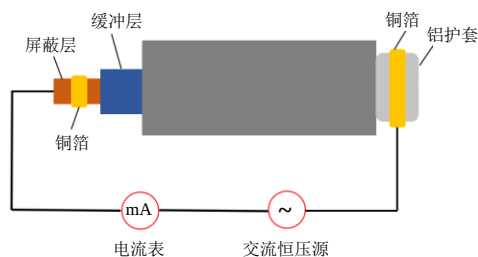


图 16 实际电缆模拟烧蚀试验平台

Fig. 16 Actual cable used in the simulated ablation experiment

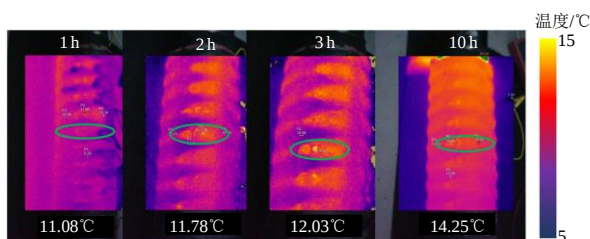


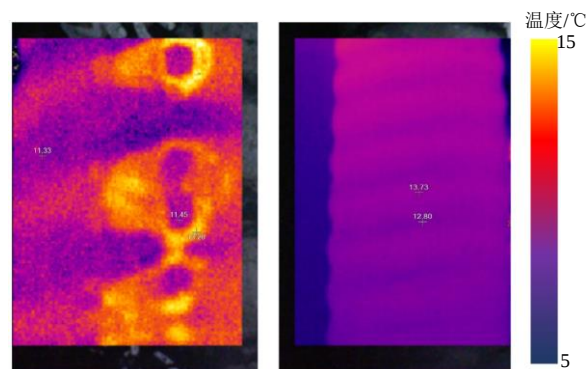
图 17 不同加压时间下电缆表面温度分布

Fig. 17 Temperature distribution of the cable surface under different time

2.03°C，电流表显示回路中电流为 15.6mA，表明铝护套波谷与缓冲层接触位置构成导通回路，回路中电流集中发热产生明显温升。外护套温度最后保持在 14.25°C，相比环境温度温升为 4.25°C。由于电缆表面温度与缓冲层温度、绝缘屏蔽温度为对应关系，此时温度差在图 9 仿真结果的范围内，因此，可以认为此时内部已经出现高温并导致缓冲层和屏蔽层的热损伤。

对部分发热点进行近距离测量，如图 18(a)所示，发热区域呈环状，中心温度低，四周温度高。白色粉末阻塞了部分导电通道，使该部分电流密度低，相同时间内温升不明显；而白色粉末周围未被覆盖处电流密度高，电流集中使相同时间内发热更高，证明白色粉末周围的电流密度及温升更高，对应图 5 的仿真结果。仅有部分区域存在环形发热点，证明当白色粉末发展扩展到一定程度使缓冲层被高温破坏时，仅有部分区域白色粉末向缓冲层内部发展直至绝缘屏蔽层，对应图 7 的仿真结果。测量无白色粉末一侧的温度，如图 18(b)所示，电缆表面无明显发热点，证明潮湿条件下缓冲层与绝缘屏蔽的损伤发生在铝护套与缓冲层紧密接触部位。

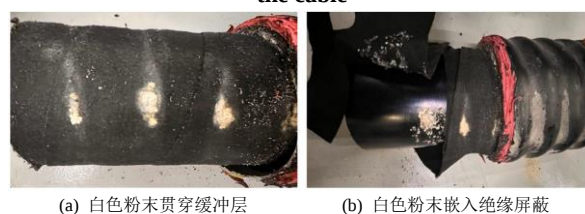
对电缆进行解体观测图 18(a)发热位置，如图 19 所示。缓冲层表面有连续分布的白色粉末，绝缘屏蔽层受到白色粉末的损伤。从烧蚀故障电缆上取绝缘屏蔽样品，进行差示扫描量热分析测试与热重测试，测试结果如图 20 所示。绝缘屏蔽的热



(a) 白色粉末侧温度分布 (b) 无白色粉末侧温度分布

图 18 电缆两侧温度分布

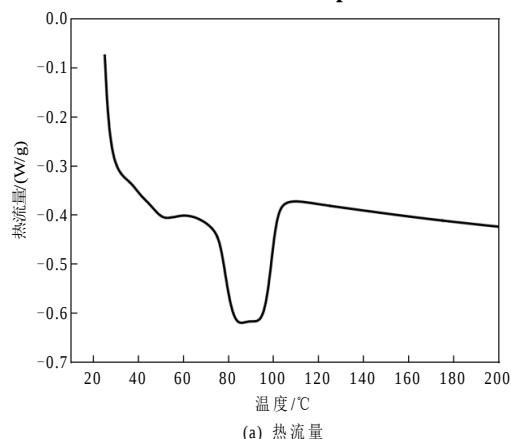
Fig. 18 Temperature distribution on both sides of the cable



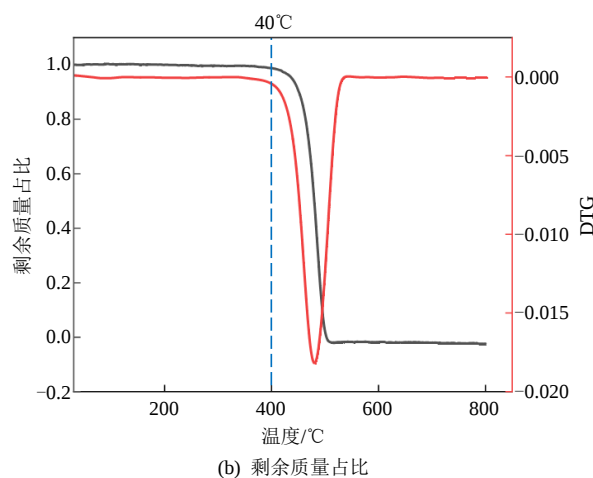
(a) 白色粉末贯穿缓冲层 (b) 白色粉末嵌入绝缘屏蔽

图 19 试验所用实际电缆烧蚀特征

Fig. 19 Characteristics of ablation cable used in experiments



(a) 热流量



(b) 剩余质量占比

图 20 绝缘屏蔽 DSC 温谱图与热重曲线图

Fig. 20 DSC temperature spectrum and thermogravimetric diagram of insulation shield

分解温度为 402℃, 但绝缘屏蔽温度高于 80℃时绝缘屏蔽呈熔融态, 因此, 白色粉末引发的温升足以导致绝缘屏蔽层的熔融, 在高温与压力的作用下白色粉末得以嵌入绝缘屏蔽, 造成绝缘屏蔽的损伤, 对应图 10 所述机理分析。该试验现象验证了白色粉末周围聚集的电流密度会加速电化学腐蚀, 论证了 3.2 节所述绝缘屏蔽损伤过程。

5 结论

本文通过解体故障线路烧蚀电缆, 分析总结受潮条件下电缆缓冲层与绝缘屏蔽层的损伤特征, 并通过有限元仿真构建三维高压电缆模型, 研究了受潮条件下高压电缆缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽损伤的机理, 主要结论如下:

1) 根据实际缓冲层烧蚀缺陷电缆解体情况, 分析总结了缓冲层与绝缘屏蔽层的烧蚀损伤特征, 即受潮条件下, 铝护套波谷与缓冲层紧密接触部位发生电化学腐蚀, 在接触表面产生连续分布的白色粉末, 部分白色粉末在缓冲层内部发展直至贯穿缓冲层并嵌入绝缘屏蔽层表面, 白色粉末的发展过程串接整个缓冲层烧蚀过程。

2) 白色粉末边缘处的电流热效应以及电缆内部压力的共同作用是潮湿条件下绝缘屏蔽层损伤的原因。仿真分析表明, 当电化学腐蚀生成的高阻白色粉末在电缆轴向大范围覆盖时, 会引发白色粉末边缘处电流密度的大幅集中与显著温升。当缓冲层表面电流密度达到临界值 185 A/m^2 时, 缓冲层温度高达 204℃, 绝缘屏蔽层温度高达 90.5℃, 超过了缓冲层的热分解温度和绝缘屏蔽层的熔融温度, 在温度与压力的作用下白色粉末将贯穿破坏缓冲层并嵌入绝缘屏蔽表面, 造成绝缘屏蔽层的损伤。

3) 通过实验室绝缘屏蔽损伤过程模拟试验与实际电缆两端加压测量温度的烧蚀模拟试验, 分析复现了烧蚀过程中白色粉末损伤绝缘屏蔽的过程, 并得到实际电缆中白色粉末侧铝护套波谷处位置温度随加压时间增加而逐渐增加的变化规律及部分区域中间环形区域温度低、四周温度高的温度分布, 证明了仿真分析的白色粉末损伤绝缘屏蔽层机理的合理性。

参考文献

[1] 李盛涛, 王诗航, 杨柳青, 等. 高压电缆交联聚乙烯绝缘的关键性能与基础问题[J]. 中国电机工程学报, 2022, 42(11): 4247-4254.

LI Shengtao, WANG Shihang, YANG Liuqing, et al. Important properties and fundamental issues of the crosslinked polyethylene insulating materials used in high-voltage cable[J]. Proceedings of the CSEE, 2022, 42(11): 4247-4254(in Chinese).

[2] ZHENG Yingying, LONG Yiwei, YI Delun, et al. Correlation between antioxidant depletion kinetic model and ageing behaviour of cross-linked polyethylene cable insulation[J]. High Voltage, 2023, 8(2): 231-238.

[3] 葛洲, 武康宁, 赵鹤, 等. 单组份硅橡胶基修复剂的高压电缆缓冲层缺陷修复及可靠性研究[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4917-4927.

GE Zhou, WU Kangning, ZHAO Ge, et al. Repair of high voltage cable buffer layer defects and reliability study of one-component silicone rubber-based repair agent[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4917-4927(in Chinese).

[4] 杨凯, 任颀若, 李建英, 等. 乙烯共聚调控晶态结构对聚丙烯电缆绝缘料电气性能的影响[J]. 高电压技术, 2023, 49(3): 982-989.

YANG Kai, REN Yongruo, LI Jianying, et al. Effect of regulating crystalline structure by copolymerizing with ethylene on the electrical performance of polypropylene cable insulation materials[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(3): 982-989(in Chinese).

[5] 张浩然, 高建, 武康宁, 等. 基于温度测量和气体分析的高压电缆缓冲层烧蚀故障检测技术[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4929-4937.

ZHANG Haoran, GAO Jian, WU Kangning, et al. Detection technology of buffer layer ablation failure in high voltage cables based on temperature measurement and gases analysis[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4929-4937(in Chinese).

[6] 门业堃, 张竞成, 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(in Chinese).

[7] 赵书静, 龚梁涛, 詹博博, 等. 基于 FMCW 的 10kV 配电电缆故障定位及类型识别方法[J]. 中国电机工程学报, 2023, 43(11): 4452-4462.

ZHAO Shujing, GONG Liangtao, ZHAN Bobo, et al. 10kV cable fault location and type identification method based on FMCW[J]. Proceedings of the CSEE, 2023, 43(11): 4452-4462(in Chinese).

- [8] 赵琦, 周凯, 孔佳民, 等. 高压 XLPE 电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究现状[J]. 绝缘材料, 2022, 55(4): 20-28.
ZHAO Qi, ZHOU Kai, KONG Jiamin, et al. Research status of ablation mechanism of water-blocking buffer layer in high voltage XLPE power cable[J]. Insulating Materials, 2022, 55(4): 20-28(in Chinese).
- [9] 郑建康, 苏小婷, 李庚, 等. 基于电热耦合法的 XLPE 电缆缓冲层烧蚀特性研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(9): 77-82.
ZHENG Jiankang, SU Xiaoting, LI Geng, et al. Research on ablation characteristics of XLPE cable buffer layer based on electrothermal coupling method[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 77-82(in Chinese).
- [10] 刘宏亮, 刘若溪, 赵西元, 等. 径向电流集中诱发的高压交联聚乙烯电缆缓冲层烧蚀研究[J]. 绝缘材料, 2021, 54(8): 94-101.
LIU Hongliang, LIU Ruoxi, ZHAO Xiyuan, et al. Study on ablation of buffer layer in high voltage XLPE cable induced by concentrated radial current[J]. Insulating Materials, 2021, 54(8): 94-101(in Chinese).
- [11] ZHANG Haoran, GAO Jian, WU Kangning, et al. Effects of the inhomogeneous microstructures on buffer layer ablation failure in high voltage cables[J]. Engineering Failure Analysis, 2023, 152: 107491.
- [12] 冯尧, 赵鹏, 李文杰, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障机理分析与结构优化[J]. 电力工程技术, 2023, 42(3): 242-249.
FENG Yao, ZHAO Peng, LI Wenjie, et al. Ablative fault mechanism analysis and structure improvement of buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Electric Power Engineering Technology, 2023, 42(3): 242-249(in Chinese).
- [13] WU Zhiheng, LAI Qingbo, ZHOU Wenqing, et al. Analysis of influencing factors on buffer layer discharge for high - voltage XLPE cable[J]. IET Generation, Transmission & Distribution, 2022, 16(20): 4142-4157.
- [14] CHEN Yun, HUI Baojun, CHENG Yanting, et al. Effects of connection conditions between insulation screen and Al sheath on the buffer layer failures of high-voltage XLPE cables[J]. Engineering Failure Analysis, 2021, 122: 105263.
- [15] 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): 4830-4839.
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): 4830-4839(in Chinese).
- [16] 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(in Chinese).
- [17] CHEN Yidong, ZHOU Kai, KONG Jiamin, 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.
- [18] 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): 1260-1270.
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): 1260-1270(in Chinese).
- [19] 周松霖, 刘若溪, 姜磊, 等. 高压 XLPE 绝缘电力电缆护层烧蚀机理分析[J]. 高压电器, 2020, 56(12): 171-176.
ZHOU Songlin, LIU Ruoxi, JIANG Lei, et al. Ablation mechanism analysis on metal sheath of high voltage XLPE insulated power cable[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(12): 171-176(in Chinese).
- [20] 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(in Chinese).
- [21] 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(in Chinese).
- [22] 冯尧, 邓显波, 李文杰, 等. 高压电缆铝套结构与缓冲层烧蚀特性[J]. 高电压技术, 2023, 49(12): 4919-4928.
FENG Yao, DENG Xianbo, LI Wenjie, et al. Ablative properties of buffer layer in Aluminum sheath structure of high voltage cable[J]. High Voltage Engineering, 2023, 49(12): 4919-4928(in Chinese).
- [23] 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. 额定电压 110 kV($U_m=126$ kV)交联聚乙烯绝缘电力电缆及其附件: GB/T 11017—2014[S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.

General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Power cables with cross-linked polyethylene insulation and their accessories for rated voltage of 110 kV($U_m=126$ kV): GB/T 11017—2014[S]. Beijing: Standards Press of China, 2015(in Chinese).

- [24] LAMOURI S, HAMIDOUCHE M, BOUAOUADJAN, et al. Control of the γ -alumina to α -alumina phase transformation for an optimized alumina densification[J]. Boletín de La Sociedad Española de Cerámica y Vidrio, 2017, 56(2): 47-54.

- [25] TOMA F L, SCHEITZ S, BERGER L M, et al. Comparative study of the electrical properties and characteristics of thermally sprayed alumina and spinel coatings[J]. Journal of Thermal Spray Technology, 2011, 20(1-2): 195-204.

- [26] 廖子涵. 110 kV 高压电缆护层烧蚀对绝缘屏蔽层的影响规律研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2022.

LIAO Zihan. Study on the effect of erosion of 110 kV high voltage cable protective layer on insulation shielding layer[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2022(in Chinese).

- [27] MEN Y K, GUO W, HONG H T, et al. Multi-physical signal of true cable buffer layer ablation[C]//Proceedings of the 14th International Conference on the Properties and Applications of Dielectric Materials. Phuket, Thailand: IEEE, 2024.



张可

在线出版日期: 2024-11-21。

收稿日期: 2024-07-10。

作者简介:

张可(2001), 男, 工学硕士, 研究方向为先进电工材料、高压电缆绝缘材料, mztkn203@stu.xjtu.edu.cn;

武康宁(1993), 男, 博士, 助理教授, 研究方向为高性能氧化锌压敏电阻老化机制及状态评估、先进电工材料工作, wukning@xjtu.edu.cn;

任志刚(1983), 男, 博士研究生, 高级工程师, 研究方向为高电压与绝缘技术, 高压电缆状态评估、运维检测等, renzhigang2009@163.com;

*通信作者: 李建英(1972), 男, 教授, 博士生导师, 研究方向为电气绝缘技术、先进电工材料、电介质物理及其应用等, lijy@mail.xjtu.edu.cn。

(责任编辑 胡琳琳)