

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2026.10.017

高压XLPE电缆缓冲层烧蚀故障机理与防治研究进展

韩卓展¹, 田毅², 黄君堂², 黄嘉盛¹

(1. 广东电网有限责任公司广州供电局, 广州 510620; 2. 西安工程大学西安市电气设备互联感知与智能诊断重点实验室, 西安 710048)

摘要:近年来,皱纹铝护套结构的高压交联聚乙烯(XLPE)电缆阻水缓冲层烧蚀故障频发,对电力系统的安全稳定运行造成严重影响。针对高压XLPE电缆缓冲层烧蚀故障特征分析、检测方法和解决方案的研究得到了显著的关注。文中对不同类型缓冲层的基本结构进行了分析,梳理了缓冲层烧蚀的发展过程和烧蚀过程中伴随产生的物理化学特征。通过搭建的模拟烧蚀平台和不同工况下电缆等效电路模型和多物理场仿真模型进一步细化了烧蚀过程中伴随产生的物理特征:缓冲层受潮发展至烧蚀可以分为3个阶段,当缓冲层内含有气隙或白色粉末时就会影响缓冲层的电场强度、电压分布以及局部温升,因此局部放电现象会出现在缓冲层内部,除此之外,缓冲层表面一个周期的温度升高约至45℃,根据热平衡方程计算可得到白色粉末处的温度可达到一个周期的数倍。总结出了烧蚀发生的条件和关键影响因素,包括铝护套波谷压入深度、气隙间距、白色粉末的面积和厚度、接触不良长度等。此外,根据缓冲层烧蚀过程中伴随的物理特征信号和产物的检测手段对各种检测方法进行了对比分析,并从缓冲层修复和新型缓冲层两方面阐述了如何从根源去解决高压电缆缓冲层烧蚀故障。文中为优化缓冲层材料及结构,提高其耐烧蚀能力,开发缓冲层缺陷检测技术提供参考。

关键词: 高压XLPE电缆; 缓冲层; 烧蚀机理; 模拟烧蚀; 故障检测

Research Progress on Ablation Failure Mechanism and Prevention of Buffer Layer in High-voltage XLPE Cables

HAN Zhuozhan¹, TIAN Yi², HUANG Juntang², HUANG Jiasheng¹

(1. Guangzhou Power Supply Bureau, Guangdong Power Grid, Guangzhou 510620, China; 2. Xi'an Key Laboratory of Interconnected Sensing and Intelligent Diagnosis for Electrical Equipment, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: In recent years, ablation failures of the water-blocking buffer layer in high-voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables with corrugated aluminum sheath structures have occurred frequently, causing serious impacts on the safe and stable operation of power systems. Significant attention has been paid to research on failure characteristic analysis, detection methods, and solution strategies for buffer layer ablation in high-voltage XLPE cables. In this paper, the basic structures of different types of buffer layers are analyzed, and the development process of buffer layer ablation as well as the accompanying physical and chemical characteristics generated during the ablation process are reviewed. Through the construction of a simulated ablation platform and cable equivalent circuit models under different operating conditions, as well as multi physics field simulation models, the physical characteristics that accompany the ablation process have been further refined. The development of the buffer layer from moisture to erosion can be divided into three stages. When air gaps or white powder are present in the buffer layer, they affect the

收稿日期:2026-04-10; 修回日期:2026-06-18

基金项目:中国南方电网有限责任公司创新项目(030100KK52222050(GDKJXM20222372));陕西省重点研发计划(2024GX-ZDCYL-01-07)。

Project Supported by Innovation Project of China Southern Power Grid Co., Ltd.(030100KK52222050(GDKJXM20222372)), Key R & D Plan of Shaanxi Project(2024GX-ZDCYL-01-07).

electric field strength, voltage distribution, and local temperature rise within the buffer layer. As a result, partial discharge phenomena occur inside the buffer layer. In addition, the temperature on the buffer layer surface rises to approximately 45 °C over one cycle. According to calculations based on the heat balance equation, the temperature at the locations where white powder is present can reach several times that of one cycle. The conditions and key influencing factors in case of ablation, including the depth of groove pressing into the aluminum sheath, air gap spacing, area and thickness of white powder, length of poor contact, are summarized. In addition, various detection methods are compared and analyzed based on the physical signature signals and byproduct detection techniques associated with the buffer layer ablation process. Moreover, solutions to fundamentally address the ablation failure of high-voltage cable buffer layers are discussed from such two perspectives as buffer layer repair and the development of novel buffer layer designs. This paper provides a reference for optimizing buffer layer materials and structures, improving their ablation resistance, and developing defect detection technologies for buffer layers.

Key words: high voltage XLPE cable; buffer layer; ablation mechanism; simulated ablation; fault detection

0 引言

架空地线和电力电缆作为电力运输中两种常见的线路。与电力电缆相比,架空地线的运行安全易受自然条件的威胁。而电力电缆通常埋设于地下,受气候条件和周围环境的影响较小,传输性能稳定,电力电缆占地少,线间绝缘距离小,无需杆塔,尤其适用于城市电网建设^[1-2]。其中,交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)电缆以其优异的电气性能、机械性能和耐热性能,成为高压电缆领域的首选绝缘材料^[3-4]。缓冲层提供了机械保护,防止敷设及运行过程中外力导致的损害,其通过吸收冲击、提供弯曲、拉伸和挤压保护,确保电缆绝缘层完整无损。此外,缓冲层防水、屏蔽电场的功能,也是保障电缆长期稳定运行的关键。高压XLPE电缆随着投运时间的增长,外部水汽侵入与缓冲层结构的阻水粉进行化学反应,造成缓冲层结构的体积电阻率增大^[5-7]。同时,在长期运行过程中,由于外界因素及运行环境的影响,缓冲层蓬松棉层、阻水粉层以及无纺布层将会出现相对位移,结构间掺杂的炭黑粉末出现脱落,从而造成缓冲层结构的体积电阻率增大。在上述两种现象的作用下导致电缆烧蚀故障,危及电力系统的稳定运行。与电缆绝缘层或导体发生的传统故障不同,这种故障缺陷存在于皱纹铝护套和绝缘外屏蔽层之间的阻水缓冲层。在对故障分析中,发现电缆烧蚀具有以下特点:①电缆本体上有多个烧蚀点,铝护套、阻水缓冲层和绝缘屏蔽层上存在故障烧蚀点;②缓冲层烧蚀部位产生大量白色粉末,呈现为半环形,与电缆位置无关。烧蚀集中在皱纹铝护套的内部凸起部分(即铝护套波谷位置);③皱纹铝护套和缓冲层之间接触越紧密,烧蚀现象就越严重。

阻水缓冲层作为高压XLPE电缆的关键结构,针对缓冲层的烧蚀机理与故障检测方法,国内外学者开展了大量研究工作。文中首先对不同类型缓冲层的基本结构进行了分析,梳理了缓冲层烧蚀的发展过程和烧蚀过程中伴随产生的物理化学特征。其次,通过搭建模拟烧蚀平台和不同工况下电缆等效电路模型和多物理场仿真模型对烧蚀过程中伴随产生的物理特征信号和产物进行了研究和总结。然后,根据缓冲层烧蚀过程中伴随的物理特征信号和产物的检测手段对各种检测方法进行了对比分析。最后,从缓冲层修复和新型缓冲层两方面阐述了如何从根源去解决烧蚀故障。

1 高压XLPE电缆结构及缓冲层类型

现在运行的高压XLPE绝缘电缆结构一般由7个部分组成,高压电缆结构见图1。其中,缓冲层作为高压XLPE电缆结构中的一个重要组成部分,位于绝缘层和金属屏蔽层之间,其主要功能是保护主绝缘层不受机械损伤,尤其是在电缆制造、安装和运行过程中可能遭受的冲击和挤压。此外,他还可以作为隔离层,防止水分和气体渗透到主绝缘层中,起到纵向阻水及维持绝缘屏蔽层与金属护套间良好电气连接的作用^[8-10]。

高压电缆缓冲层分为非阻水型和阻水型,根据电缆的使用环境可以选择不同的缓冲层材料,目前有以下几种缓冲层材料:

1)半导电丁基橡胶带。由丁基橡胶内加入一定量的导电炭粉和各种添加剂组成的固体状态的缓冲带材,其不具备纵向阻水功能,但耐高温。

2)半导电聚酯非织造布。聚酯非织造布内复合了一定量的导电炭粉组成的海绵状带型缓冲材料,同样不具有纵向阻水。

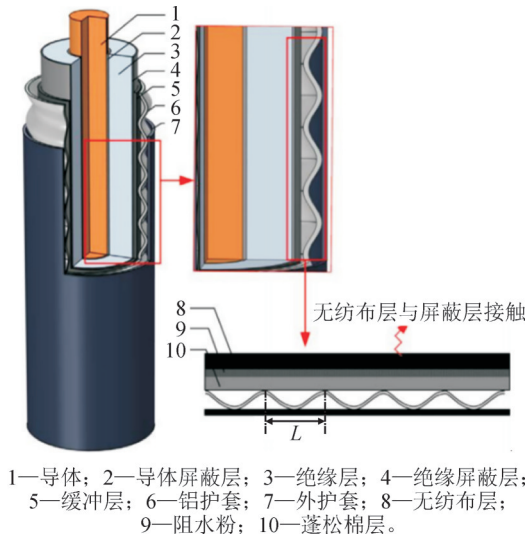


图1 高压电缆结构示意图

Fig. 1 High-voltage XLPE cable structure

3) 半导电聚酯非织造阻水布。在非织造布内加入一定量的导电微粒和阻水粉组成海绵状的带型缓冲材料。内部阻水粉遇水后迅速膨胀,起到纵向阻水的作用。其耐温等级相对于半导电丁基胶带要低一些。

4) 金属丝纤维编织布。主要采用金属细丝与纤维进行编织而成。该编织布可使缓冲层与金属护套之间保持良好的电气接触,还可实现静电屏蔽功能。冲击电压作用时,还能降低半导电层的感应电压,避免缓冲层内部出现局部放电。

目前投入运行的高压XLPE电缆中,使用半导电聚酯非织造阻水布作为缓冲层的高压XLPE电缆比例最高。半导电聚酯非织造阻水布是通过将纺织短纤维或长丝定向或随机排列形成纤维网结构,然后使用机械、热或化学方法进行加固。在高压XLPE电缆中,半导电聚酯非织造阻水布型缓冲层通常由3层结构粘合而成,其结构见图2。其中,第1层为蓬松棉层,通过添加导电炭黑使其具有半导电性能,该层直接与皱纹铝护套接触,起缓冲作用;第2层为阻水粉层,目前国内高压电缆缓冲层阻水材料的主要成分为聚丙烯酸钠($C_3H_5NaO_2$)_n,阻水粉为白色或淡黄色粉末,本身不具有导电性能;第3层为含有半导电胶的无纺布层,将无纺布的基布浸涂导电胶液使其具有半导电性能,该层与绝缘外屏蔽层直接接触减少接触电阻。

半导电聚酯非织造阻水布型缓冲层的阻水原理为:阻水粉具有强吸水性^[11],当水分侵入电缆内部时,阻水粉能迅速吸收水分并且体积在短时间内膨胀,填充皱纹铝护套和金属屏蔽层之间的空气间隙^[12],从而形成对水分的物理隔绝。在这种情况下,水分无法再沿着电缆轴向继续渗透,从而保护电缆的绝

缘层不受损坏。

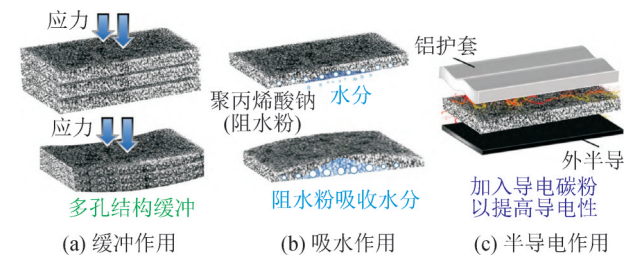


图2 阻水缓冲层结构示意图

Fig. 2 Water blocking buffer layer structure

2 缓冲层烧蚀故障的特征现象及机理

2.1 电缆缓冲层烧蚀故障特征分析

根据近几年出现的高压缓冲层烧蚀故障案例分析和国内外学者的研究^[13-17],发现具有上述结构的高压XLPE电缆在密封性能差、工作环境湿度大的电缆线路中时,外部水分侵入电缆后可能会产生缓冲层烧蚀放电缺陷,从而导致电缆击穿事故。由该缺陷引发的电缆击穿事故具有以下特点:

特征现象1:在缺陷电缆中发现,缓冲层与铝护套紧密接触的区域,缓冲层表面出现白色粉末,并且缓冲层表面的白色粉末集中在电缆的某一区域,然后逐渐从缺陷区域向两侧正常区域扩展,呈现斑状或条状,见图3(a)。此外,与白色粉末接触的铝护套表面也有明显的腐蚀痕迹,白色粉末同样附着在铝护套内表面,见图3(b)。

特征现象2:在缓冲层出现白色粉末的区域,其与绝缘屏蔽层之间存在电烧蚀物理特征。在这些烧蚀区域,缓冲层和铝护套之间的接触面完全被白色粉末覆盖,见图3(c)。

特征现象3:在缓冲层出现白色粉末的区域,当剥离绝缘屏蔽层后,发现绝缘层已损坏,见图3(d)。随着绝缘层损坏程度的加剧,电缆线路最终会发生击穿事故。

电缆烧蚀故障多出现在在挤包和焊接两种铝护套形式中,然而针对于缓冲层结构而言,多发生于金属丝布加阻水缓冲带和单一阻水缓冲带这两种结构中。研究发现此类故障多分布于导体截面积为400~2 000 mm²区间的电缆,面积为630 mm²和800 mm²的比例很高,这表明高压电缆的负荷电流与故障之间没有直接的关联,同时,故障频率与通道方式无正向关联关系^[18]。

2.2 白色粉末生成机理

从高压XLPE电缆缓冲层烧蚀故障的特征现象1中可见,缓冲层表面白色粉末的形成应该是一个

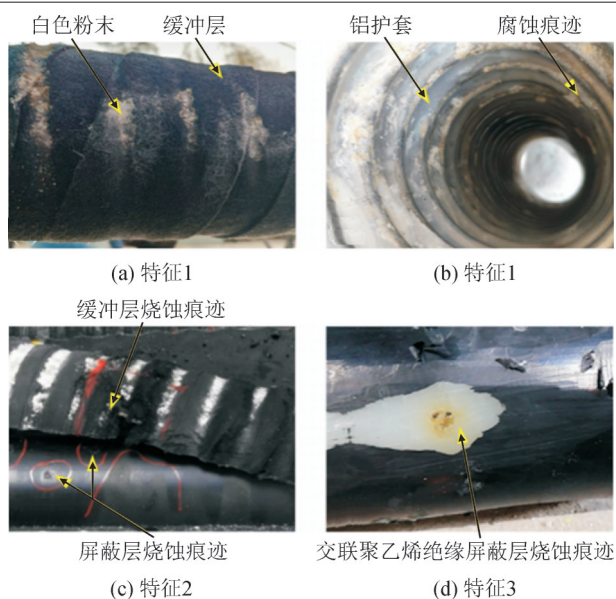


图3 缓冲层烧蚀故障的特征现象

Fig. 3 Characteristics of buffer layer ablation

逐渐积累的过程。缺陷产生初期,缓冲层表面的白色粉末较少,白色粉末在缓冲层表面呈现斑块状分布,随着时间的推移,缓冲层表面的白色粉末逐渐增多,白色粉末成条状分布在缓冲层表面。同时,白色粉末出现的位置均位于铝护套与缓冲层的接触面上,在铝护套内表面的相应位置也能看到明显的腐蚀痕迹。由此可以推测,白色粉末可能是缓冲层内部某些成分与铝护套反应的产物^[19]。

首先对白斑的成分进行分析^[20],为了研究该反应对缓冲层上白色粉末集中区域的形貌以及其化学元素组成成分,使用扫描电子显微镜(SEM)测试形貌表征,通过EDS进行化学成分分析见图4。从图4可知,缓冲层表面的白斑主要含有C、H、O、Na、少量Al元素。铝护套内表面的白斑与缓冲层表面的白斑成分相似,但Al元素的含量相对较高。

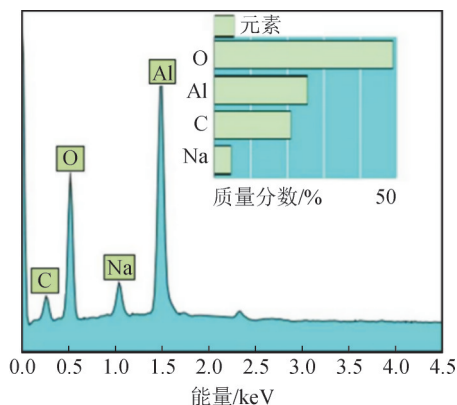


图4 故障缓冲层白斑的EDS图

Fig. 4 EDS of white spots in the fault buffer layer

根据形成缓冲层放电缺陷的环境条件、阻水粉的化学特性以及白斑的成分分析,可以推断出白斑

形成的原因见图5,即在潮湿的环境中,电缆受到外界水分的侵入,水分进入电缆后会被阻水粉吸收。阻水粉吸水膨胀后从阻水带孔隙中渗出,分布于阻水带外层结构,并沿电缆径向扩散至绝缘屏蔽层及外层铝护套的内表面^[21]。由于阻水粉呈碱性,吸水后会产生游离羟基。Al作为两性金属,可与碱性物质发生反应,因此阻水粉产生羟基会与接触面的铝护套发生化学反应,具体化学反应见图6。

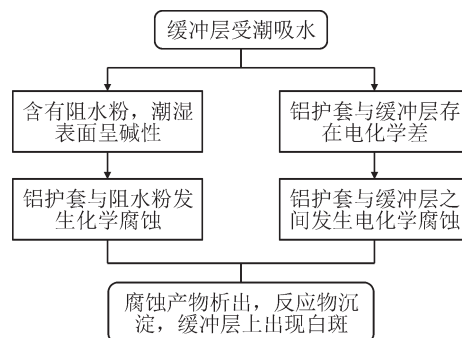
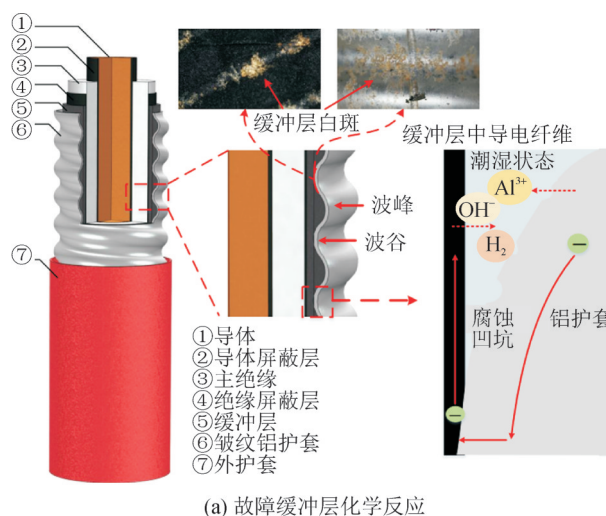


图5 缓冲层受潮白斑的形成过程

Fig. 5 The formation process of white spots

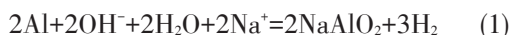


(a) 故障缓冲层化学反应

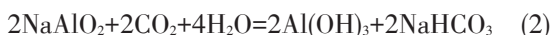
(b) 故障缓冲层电化学反应

图6 故障缓冲层化学反应及电化学反应原理图

Fig. 6 Buffer layer chemistry and electrochemical reactions



由式(1)生成的偏铝酸钠与空气中的水分和二氧化碳发生反应

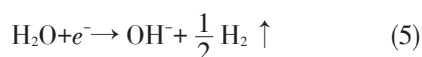


此外,反应生成的碳酸氢根离子会继续与羟基发生反应



由以上的化学反应式可知,阻水粉吸水后反应生成的主要产物为 Al_2O_3 和 Na_2CO_3 。由于缓冲层表面的白斑只含有少量的Al元素,因此 Na_2CO_3 是缓冲层表面白斑的主要成分。

此外,潮湿环境下铝护套与缓冲层中的导电纤维会发生电化学反应^[22]。铝护套和缓冲层之间的电势差推动电化学反应:当导电纤维电势低于铝护套时,铝将作为阳极发生腐蚀,进而导致铝基体溶解并产生铝离子;导电纤维作为阴极,发生析氢反应,反应如下:



由式(6)可知,铝离子在电场的作用下发生迁移,与溶液中的氢氧根离子结合后,生成氢氧化铝沉淀,进而在缓冲层与铝护套的接触面上形成白斑。



化学与电化学腐蚀过程会生成氢气、腐蚀副产物及绝缘性薄膜。当阻水粉吸水膨胀后因长期运行受热脱水^[23],以及 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 沉淀的形成^[24],这些将显著增大缓冲层的电阻,从而加剧系统故障风险。首先,白色粉末的导电性可能导致缓冲层的绝缘性能下降。导电粉末可以形成导电通道,破坏原本的绝缘层结构,导致电缆的局部放电、击穿甚至失效。这种绝缘性能下降对电缆的安全性和可靠性带来直接的威胁。其次,白色粉末的存在可能引起电缆的介质损耗增加。粉末中的颗粒或成分可能具有一定的介电损耗特性,当他们分布在缓冲层中时,会导致电场的能量损耗增加。这会导致电缆的功率损耗增大,影响电缆的传输效率和性能。此外,白色粉末的存在还可能改变电缆的电容特性。电缆的电容与介质的性质和结构密切相关,粉末的引入可能导致电缆的电容值发生变化。这种电容变化可能会影响电缆的频率响应和信号传输特性,对高频应用和数据传输造成不利影响。当电场作用于白色粉末时,会导致绝缘屏蔽层表面形成感应电荷。这是因为电场的存在会引发绝缘材料内部的

电荷分布,进而产生感应电荷。这些感应电荷会导致感应电压的产生,从而增加了绝缘屏蔽层与铝护套之间的电场强度。然而,需要注意的是,缓冲层的松散结构和含有空气会对电场的传递产生影响。当电场强度超出空气的电气绝缘临界值时,铝护套与绝缘屏蔽层之间可能发生电气放电现象,可能会引发高温和能量释放,导致绝缘屏蔽层和缓冲层发生烧蚀。

3 缓冲层烧蚀模拟实验及仿真

3.1 电缆缓冲层烧蚀模拟实验

文中搭建了模拟烧蚀实验装置见图7^[19]。在缓冲带不同含水率的情况下,通过对烧蚀过程中温度、体积电阻率、表面电阻、氢气体积分数的定量分析,将烧蚀分为电缆缓冲层受潮发生电化学腐蚀、电缆缓冲层出现白色粉末、电缆缓冲层开始放电烧蚀3个阶段。

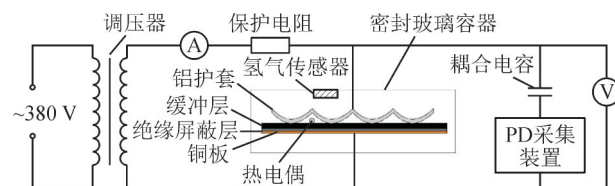


图7 模拟烧蚀装置实验图

Fig. 7 Experimental diagram of simulated ablation

为了尽可能的模拟实际电缆运行过程中缓冲层受潮之后发生的一系列反应,上电极是从110 kV电缆取长10 cm的皱纹铝护套,下电极为25 cm×10 cm×0.1 cm的铜板,两电极之间放置缓冲带与绝缘屏蔽层,厚度参数与材料参数与实际电缆一致,为了模拟高压电缆实际运行中土壤的压力,因此在皱纹铝护套上放置同等重量的砝码,其中缓冲带进行了预处理,即对缓冲带进行受潮处理,通过称重法标定不同含水率的试验样品,具体说明见下式。

$$\omega = \frac{m_2 - m_1}{m_1} \times 100\% \quad (7)$$

式(7)中: m_2 为缓冲带受潮之后的质量; m_1 为缓冲带干燥时的质量; ω 为含水率。

本实验采用热电偶对缓冲层温度进行检测,工作温度范围为0~300℃,采用的氢气传感器型号为XNY系列,工作温度范围为-20~50℃,工作相对湿度≤95%无凝露,体积分数的测试范围为0~1×10⁻²。为了研究密闭容器中氢气体积分数变化每10 min记录一次实验结果,并在2 h后收集缓冲层烧蚀后的气体,对其余气体体积分数进行气相色谱仪分析见图8。

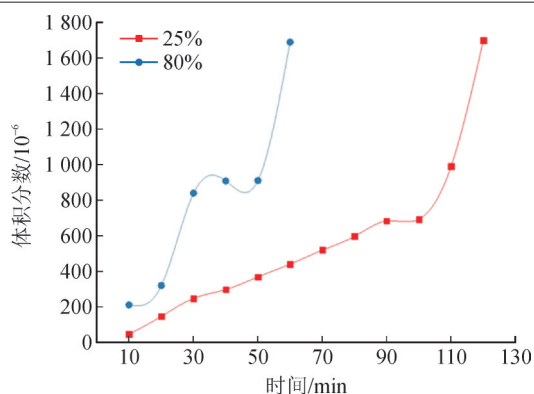


图8 氢气体积分数变化特性

Fig. 8 Change in volume fraction of hydrogen gas

根据上述对相关电缆参数的检测与结合实际运行中的电缆工况,本实验选用含水率为25%的缓冲层进行模拟,并考虑极端受潮情况下缓冲层烧蚀过程出现的气体体积分数与缺陷特征。由图8可以看出随着时间增加缓冲层析出的氢气体积分数不断增大,但一定时间后氢气的变化速率较初始阶段有所下降并趋于稳定,析氢速率减缓可能有以下几个原因:首先,随着反应的持续其体积分数会不断降低,从而致使产氢速率减小。这是因为反应物体积分数的降低会减少可供反应的物质,从而降低了产生氢气的速率。其次,回路电压保持恒定时,烧蚀产物的增多会使缓冲层体积电阻率升高。当腐蚀产物积累到一定程度时,它们会形成一个电阻性层,限制了电流的流动,电流的减小会降低与电化学反应相关的电子传递速率和反应速率。这些因素共同作用,可以影响化学反应的速率和效率。然而最终氢气体积分数急剧上升,这是因为此时缓冲层与铝护套之间的电气连接开始被破坏,接触点温度升高至缓冲层材料的断裂温度,从而出现大量氢气^[25]。

在缓冲层受潮后的第一阶段,电解质的存在会导致形成电解池。电解质可以是缓冲层中水分中所溶解的化合物,例如盐类或其他离子化合物。这些电解质能够在湿润环境中提供离子,从而促进电化学反应的进行。此外,缓冲层中的材料,如炭黑和非金属导电纤维,可能具有不同的电化学活性。这些材料在电化学腐蚀过程中可能充当电极,与电解质中的离子发生反应。根据他们的活性差异,可能会产生电流流动,促使电化学反应的进行。在这样的电化学腐蚀过程中,不同的金属或非金属材料之间可能存在电位差,从而形成原电池。这些原电池能够产生电流,使得缓冲层中的物质发生氧化或还原反应。综上所述,电化学腐蚀的发生涉及到电解质、电极(包括金属和非金属材料)以及电流的流动。这些因素共同作用,导致缓冲层中的物质发生

化学变化和腐蚀现象^[14]。随着原电池反应的不断发展,电解池中反应物浓度逐渐减少以至于氢气体积分数虽一直上升但速率却逐步下降。阻水粉(NaPA)分子结构见图9。除此之外,从图9的阻水粉(NaPA)结构中可知,其中的羧基可与铝离子发生络合反应,此类反应抑制铝离子的迁移,减缓电化学腐蚀的效果,也会导致氢气含量的增加速率有所下降,进而导致缓冲层受潮发展至第二个阶段出现白色粉末,见图10。

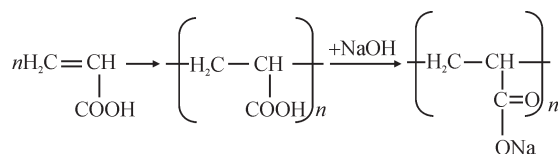


图9 阻水粉(NaPA)分子结构

Fig. 9 Molecular structure of NaPA



图10 缓冲层上出现白色粉末

Fig. 10 White powder appears on the buffer layer

为探究白色粉末的微观结构及元素种类和对缓冲层烧蚀发展的影响,首先可以通过SEM观察,可以更详细地了解缓冲层表面的纤维结构状况以及与之相关的故障现象,SEM图谱提供了高分辨率的表面形貌信息。它使用电子束扫描样品的表面,并检测所产生的信号,以生成图像。出现白色粉末的缓冲层微观结构见图11。在故障的缓冲层样品中,白色物质的覆盖可能表明存在腐蚀产物、氧化物、沉积物等。可以从中看出某些区域的白色物质已经覆盖了大部分缓冲层的纤维,图11中的缓冲层部分纤维已经断裂或者即将断裂,同时可以看出这些白色颗粒是沿着纤维表面生长的。EDS是一种在电子显微镜中常用的技术,用于确定样品中元素的组成,又对这些小颗粒集中的区域进行电镜能谱仪(energy dispersive spectrometer, EDS)对其元素进行分析见表1。根据EDS数据表1可知,白色粉末中主要含有C、O、Na、Al等元素,其中的Al元素可能来自于Al护套。通过SEM和EDS的联合分析,可以获得关于缓冲层的微观纤维结构、表面形貌、纤维连接性和化学成分的综合信息,这有助于理解故障的原因、确定缓冲层的性能问题。

最后对白色粉末的电性能进行检测,在相同条

件下利用万用表对其进行测量,结果表明在未出现白色粉末处的表面电阻为2.6 k Ω ,但是出现白色粉末处的表面电阻为13.24 M Ω 。通过SEM观察缓冲层材料中纤维的断裂以及对缓冲层表面白色粉末的高阻性测量足以证明缓冲层与铝护套的不良电气连接而导致缓冲层基材破坏,因而氢气体积分数在最后而急剧上升是符合理论与实际过程的解释的^[25]。

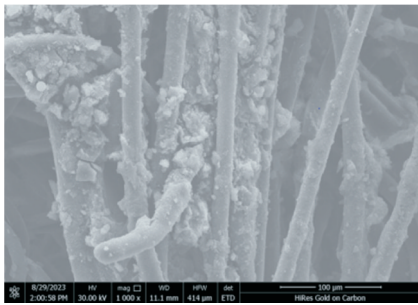


图11 出现白色粉末的缓冲层微观结构

Fig. 11 Microstructure of white powder

表1 实验后试样所含元素类型

Table 1 Types of elements after the experiment

材料类型	元素类型体积分数/%			
	C	O	Na	Al
缓冲层	49.58	23.64	8.64	6.32

白色粉末的元素体积分数符合电化学腐蚀过程中的理论分析,即缓冲层的第1阶段为电化学腐蚀,而白色粉末呈现高阻性,随着白色粉末的大量覆盖缓冲层,这将会严重影响缓冲层与铝护套的导电性能,此时缓冲层与铝护套不是等电位,存在电压差导致其接触点聚集大量电荷产生热量,从而开始发生缓冲层受潮后的第3阶段,即缓冲层开始放电烧蚀导致缓冲层温度升高,见图12。

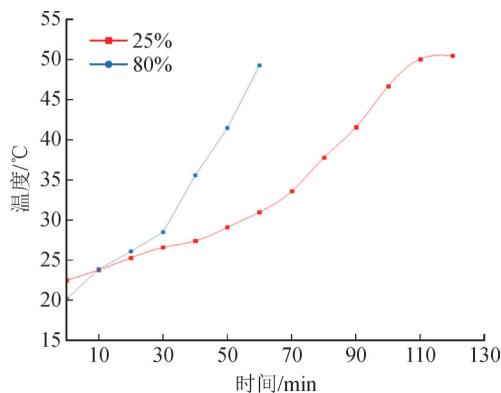


图12 缓冲层温度变化特性

Fig. 12 Temperature variation of buffer layer

从图12可知,随着缓冲层受潮后的温度不断升高,发展至1.5~1.8 h时急剧上升,最终在2 h时稳定大约50℃。从缓冲层特性可知这属于其正常运

行温度,但高压电缆运行过程中缓冲层的热量应满足热平衡方程

$$\int_0^t \frac{U_{PR}^2(t)}{R} dt = \int_{T_0}^T C_m A d T \quad (8)$$

式(8)中: $A=d \times t$ 为烧蚀点宽度,mm;金属套波峰宽 $d=10$ mm;阻水带单位面积质量 $m=130$ g/m²;缓冲层电阻 $R=1\ 000$ 。将数据代入式(8)计算工频下的温度,一个周期内缓冲层温度约达到45℃,与实测温度大致相近,理论上不会导致烧蚀,但当电流集中于一点温度会增至正常时的数倍($A=\pi \cdot D/5=6.5$ mm²)将引起缓冲层基材破坏^[26-27]。

为验证上述缓冲层受潮后第3阶段理论分析的正确性,对烧蚀后的气体采集并使用气相色谱仪对其气体成分进行分析见图13。

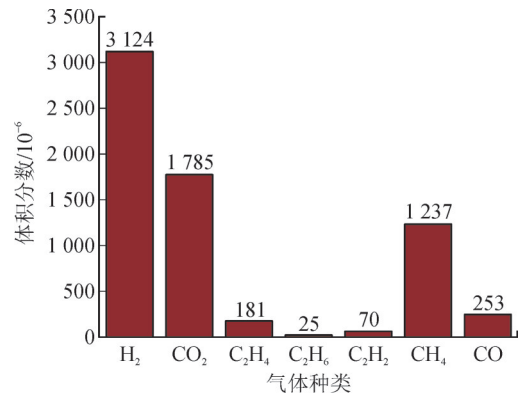


图13 烧蚀后气体种类及体积分数

Fig. 13 Gas statistics after ablation

由图13可知:烧蚀过程中除了H₂还产生了CO₂、C₂H₆、C₂H₄、C₂H₂、CH₄等气体,而这些气体在腐蚀阶段并未产生。文[6]表明,缓冲层的缓冲材料为聚酯纤维(polyethyleneglycol terephthalate, PET),化学式为(C₁₀H₈O₄)_n。PET是由酯基连接起来的长链聚合物,高温下的能量输入导致酯基键的断裂,这导致长链状的聚酯纤维分子链逐渐在高温下解聚成较小的分子,分子链断裂还可能导致聚酯纤维的分子量降低,断裂后的主要产物是羧酸和端烯羟基。随后发生断裂、重组以及游离基反应等降解反应,这些过程均与烧蚀相关。在分子链断裂的过程中,挥发性物质开始从聚酯纤维中释放。它们通过热解过程中的气化作用从纤维中逸出。PET在高温下烧蚀裂解产生小分子气体的过程见图14。在高温条件下,PET分子内的碳碳键和碳氧键可能会发生断裂,导致产生一系列小分子化合物,如CO(一氧化碳)、C₂H₄(乙烯)、C₂H₆(乙烷)。这些小分子化合物的生成取决于PET分子内碳碳和碳氧键断裂的位置。由于断裂位置的差异,PET分子可以产生不同

的裂解产物。其中,CO是由碳氧键的断裂形成的,而C₂H₄和C₂H₆是由碳碳键的断裂形成的^[28]。

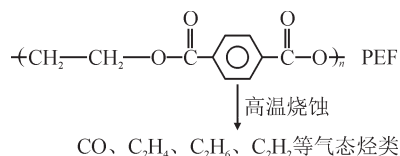


图14 PET基材破坏产气路线

Fig. 14 Gas production route of PET substrate

除此之外从实验后缓冲层的试样与实验前对比见图15。从图15可知,在产生的白色粉末处的缓冲层上出现了烧蚀凹坑,同时,铝护套上也有一定的灼烧痕迹^[29]。因此综上所述,缓冲层受潮后的第3阶段由于热量的累积和电场畸变,导致放电烧蚀,见图16,从图16可以看见放电烧蚀痕迹是从波峰处径向向外扩张。



图15 实验后的缓冲层试样

Fig. 15 Buffer layer after ablation experiment



图16 缓冲层放电烧蚀现象

Fig. 16 Ablation process of buffer layer discharge

电缆通常埋设在地下,环境湿度对局部放电活动的影响是一个复杂的过程。水分子为电负性,可以吸附周围的自由电,这种吸附作用可以起到抑制电子崩的效果。通过吸附和中和部分自由电子,水分子在气隙中形成了一种电场屏蔽的效应^[30]。它可以减少电子的自由运动,从而抑制了电子崩的扩展,并降低了气体放电的可能性。因此,在空气湿度较低时,气隙的电导率会因分子的聚集而增加,使得电流可以更容易地通过气隙传导,从而减少了局部放电的发生。其次,水分子形成的薄层可以在气隙表面形成电场屏蔽效应,减弱了电场的强度,进一步抑制了局部放电的活动。然而,较高湿度条件下,水分子大量聚集,形成水分子薄层,该薄层可通过吸附周围的电荷及离子,加快气隙中电荷的耗散。当气隙表面存在电荷时,水分子会与电荷相互

作用并迅速扩散,从而减小电荷的积累。这使得气隙表面的电荷能够更快地耗散,从而削弱了反向电场的强度,削弱的反向电场会导致局部电场强度升高。在高电场强度的作用下,气隙中的气体分子可以获得足够的能量,形成电子崩和离子化现象。这增加了局部放电的发生率^[14,30]。在此基础上,又由于水分、缓冲层中的碳黑及阻水粉形成电解池导致缓冲层与铝护套发生电化学腐蚀,而电化学腐蚀产生的白色粉末是一种绝缘物质会导致缓冲层与铝护套之间的接触电阻变大,最后导致电气连接变差,缓冲层上出现较大电压差,电荷移动通道受阻导致局部电流聚集,电流聚集会产生热量,因此在电场畸变和热量累积二者共同作用之下缓冲层发生放电烧蚀故障。

结合电—热场仿真与模拟缓冲层烧蚀试验可将其发展总结为3个阶段见图17。缓冲层受潮初始阶段发生电化学腐蚀,高压电缆结构并未被破坏仍能正常运行;缓冲层受潮第2阶段出现白色粉末其阻值高达MΩ级别;缓冲层受潮的第3阶段缓冲层开始放电烧蚀,最终导致高压电缆击穿故障。

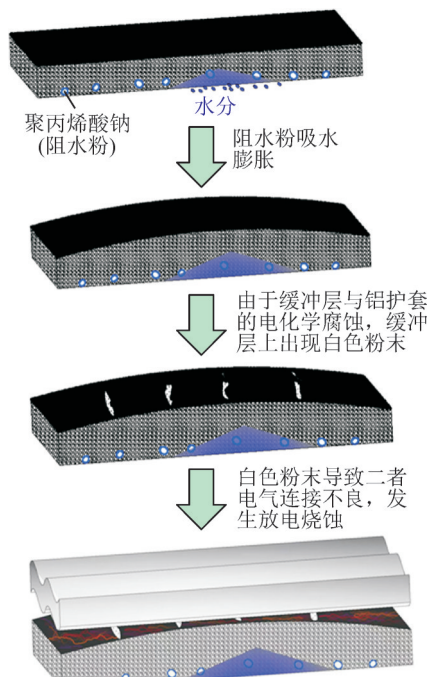


图17 缓冲层烧蚀发展过程

Fig. 17 Development process of buffer layer ablation

通过研究总结缓冲层受潮之后发生烧蚀的整个发展过程可以为新型高压电缆缓冲层阻水结构设计提供参考和理论支持,从而延长其使用寿命和提升可靠性同时也能为在缓冲层还未彻底损坏之前采用修复技术对其进行电气性能修复,可以大大降低不必要的损耗以及经济损失。

3.2 电缆等效电路模型

结合上文的研究,采用等效电路模型和有限元仿真法分析缓冲层烧蚀机理。通过等效电路模型,分析缓冲层和铝护套间接触不良和白斑缺陷的情况,研究其对电缆内部电气性能的影响。

目前运行中的高压XLPE电缆绝大多数采用螺旋型皱纹铝护套结构,可将电缆视作按一定规律分布的拓扑结构所构成的阻容感电力网络^[19,31]。正常电缆及含白色粉末电缆径向简化等效电路模型见图18。

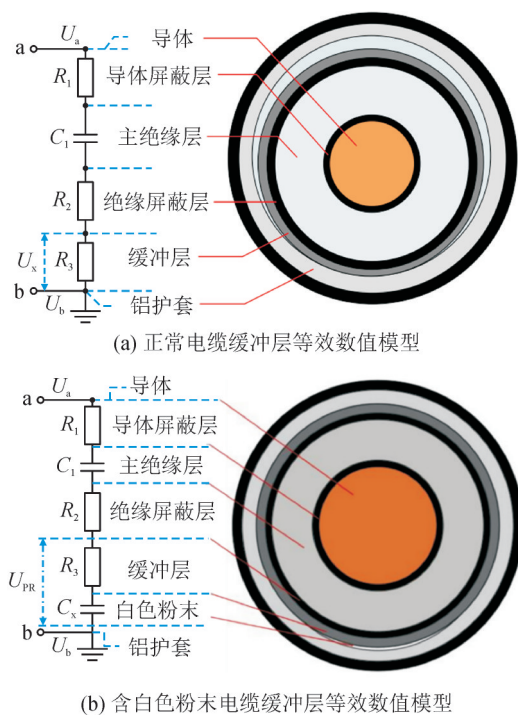


图18 高压电缆等效电路模型

Fig. 18 Equivalent circuit model of cable

模型建立时,根据螺旋型皱纹铝护套电缆实际情况,进行如下假设:

1)在电缆正常工艺下,内屏蔽与导体、外屏蔽与绝缘层和缓冲层之间接触紧密且良好,因此可忽略上述各层的接触电阻^[32]。

2)铝护套表面存在致密的氧化膜,使得电缆材料本身就具有一定大小的体积电阻^[33],所以缓冲层结构与铝护套之间的接触电阻不可忽略。

3)考虑皱纹铝护套与缓冲层间波峰、波谷接触的变化,将铝护套波谷与缓冲层波峰间的空气间隙视作一个等效电容^[34]。

4)分析含白斑缺陷电缆时,认为白斑在电缆底部完全发展,不存在缓冲层与铝护套局部区域接触的情况^[35]。

从电缆等效电路模型可看出,主绝缘的径向电流通过外屏蔽层和缓冲层导入铝护套,最后经接地

点流入大地。当两者接触不良时:在正常工况下,主绝缘的径向电流通过 R_3 均匀流过缓冲层;当某一位置发生接触不良,两者之间的电气连接 R_3 将断开,使得径向电流只能流过电气接触良好的 R_3 ,该接触点的电流密度增大,相应位置的缓冲层温度上升,引发烧蚀现象。对于缓冲层与铝护套存在白斑的情况:通过观察与分析各地区由缓冲层放电烧蚀引发本体故障的案例,发现缓冲层与铝护套接触点处出现的白斑,是经过一系列物化过程在缓冲层外表面所形成的不导电物质,其主要成分为 Na_2CO_3 ,因此在缓冲层部分中串联一个白斑等效电容 C_4 就相当于接触面生成的白斑。白斑缺陷的产生,会使原本的径向导电通道失去良好的电气接触,从而增加放电烧蚀的风险。

3.3 多物理场耦合仿真分析

由于烧蚀故障发生在电缆内部,现有技术难以直接测量烧蚀区域的温度,因此可采用有限元法探究电—热耦合作用下电缆缓冲层烧蚀区域的温度分布特性^[19,36-39]。采用电场—热场的双向耦合分析联立求解,求解后可确定模型唯一的电场和温度场分布。电热耦合分析原理见图19。

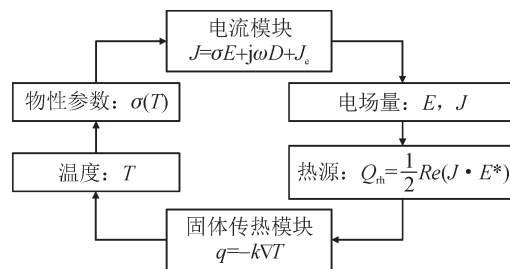


图19 电—热耦合原理图

Fig. 19 Diagram of electric-thermal coupling

3.3.1 电缆正常运行下的缓冲层温升

电缆在正常工作时,电流沿着电缆轴向传输,但电流产生的热量会沿着电缆径向方向传递,这导致电缆内部各层的温度不同。考虑电缆在运行过程中受重力影响,设置缓冲层与铝护套过盈配合 0.1 mm ^[14]。文中选择YJLW03 64/110 kV XLPE电缆为研究对象,正常运行时的温度场仿真结果见图20。两者之间因重力过度配合,导致缓冲层的温度分布不均,与铝护套波谷接触位置的温度要低于两者未接触的区域。电缆整体未出现明显的局部温升。

3.3.2 水分的影响

电缆水分侵入受潮,会使阻水缓冲层的体积电阻率和相对介电常数增大^[40]。欧阳本红等人通过建立二维电缆模型进行仿真分析^[23],仿真结果见图21。干燥状态下,缓冲层与铝护套的过盈配合量对电缆内电场分布无显著影响;即便存在局部接触不良,

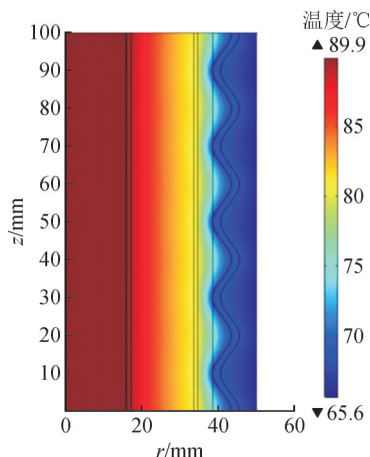
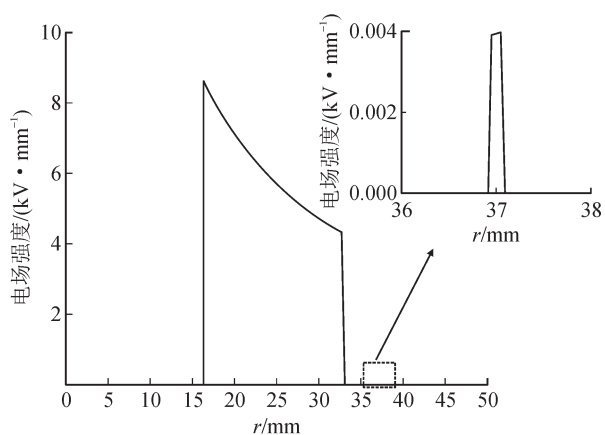


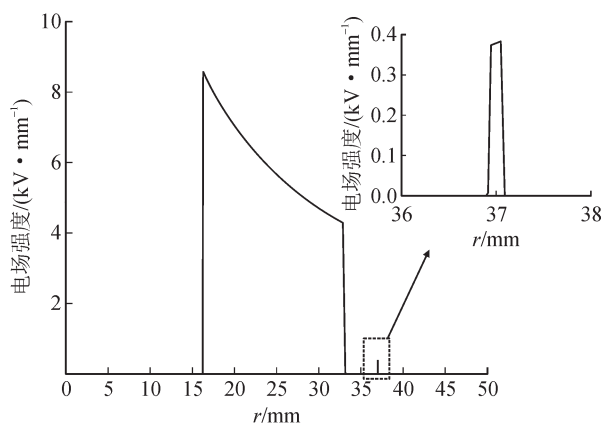
图20 额定负载下电缆温度场分布

Fig. 20 Temperature distribution of cables under rated load

气隙内场强也难以达到引发放电的阈值。缓冲层受潮后,其电阻率上升2个数量级,且两侧出现电势差,无法再近似为等势体,电势差升高;且当二者间连续接触不良长度达0.34 m时,尺寸 ≤ 0.1 mm的气隙中可能引发放电,这证明了实际工程中电缆缓冲层发生放电烧蚀的可能性。



(a) 缓冲层干燥时的场强分布



(b) 缓冲层受潮时的场强分布

图21 干燥和受潮条件下缓冲层沿气隙场分布

Fig. 21 Distribution of buffer layer along air gap field under dry and damp conditions

3.3.3 空间气隙的影响

在电缆运行过程中,受热膨胀及机械外力作用可能导致皱纹铝护套发生形变,进而在两者之间形成气隙,该气隙会破坏二者之间的电气连接。封闭状态下空气的导热系数远低于波纹铝护套的。这种导热性能的差异导致空气间隙会严重阻碍变形部位的热量散失,从而引发局部温升现象^[36]。气隙存在时沿缓冲层表面的温度变化见图22。

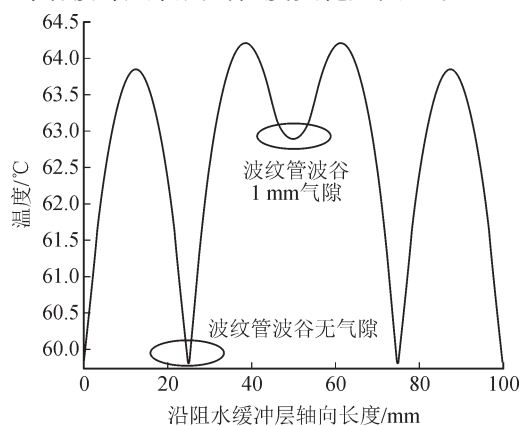


图22 气隙存在时沿缓冲层表面的温度变化

Fig. 22 Surface temperature of buffer layer in the air gap

从图22可以看出,阻水缓冲层波谷处存在气隙时,缓冲层温度为62.8 °C,比波谷不存在气隙处温度高。缆芯温度随气隙厚度的变化趋势见图23。由图23可知,随着气隙厚度增加,缆芯温度不断上升。可见,气隙的存在会影响缆芯温度,进而降低了电缆载流量。

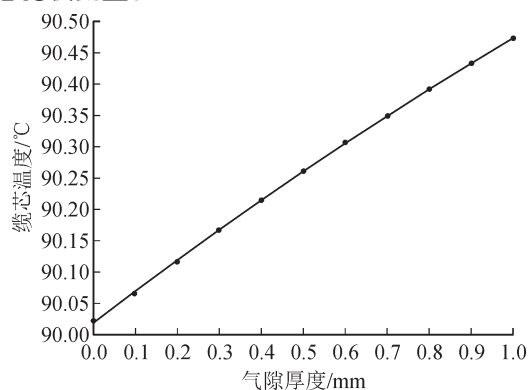


图23 气隙厚度变化对缆芯温度影响

Fig. 23 The variation of cable core temperature with air gap thickness

采用等效法对不同时刻气隙放电后缓冲层的温度分布进行模拟,结果见图24。可以发现两者间的气隙持续升温,且迅速扩散。在放电前3 ms内,电弧放电可使气隙热源中心温度升至3 524 K;放电后的20 ms内,电弧放电的等效热源持续向外传递热量,导致阻水缓冲层外侧与铝护套内侧温度均显著升高。仿真结果表明,气隙放电不仅会因局部温升导致阻水粉膨胀析出,还会引发化学键断裂,进

而加剧整体的烧蚀现象。

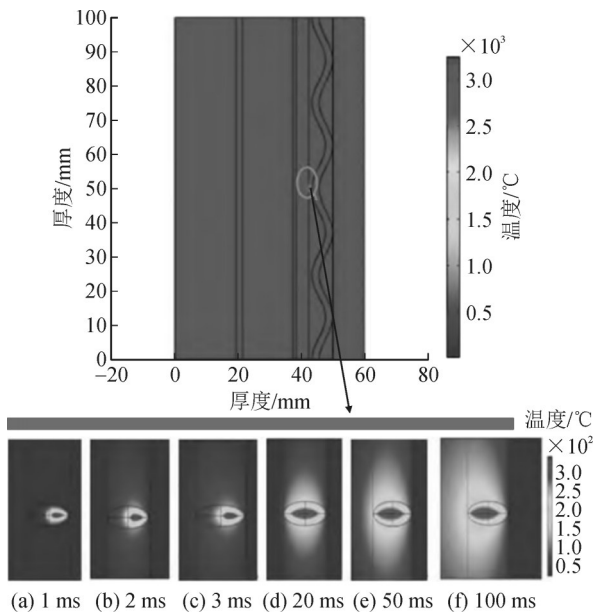


图24 不同时刻气隙放电后温度分布

Fig. 24 Temperature distribution at different times after air gap discharge

3.3.4 压入深度的影响

铝护套受重力影响在电缆底部会压入缓冲层,进一步改变其与缓冲层的接触情况^[40]。压入深度对接触情况的影响主要有以下两方面^[41]:

1) 接触面的轴向宽度:在铝护套曲率半径保持不变的条件下,随着压入深度的增大,铝护套与缓冲层之间的接触区域沿轴向扩展,其接触面的轴向长度相应增加,具体见图25(a)。

2) 接触面圆心角:随着铝护套压入深度的增加,铝护套与缓冲层之间的接触范围扩大,表现为接触面对应的圆心角增大,见图25(b)。

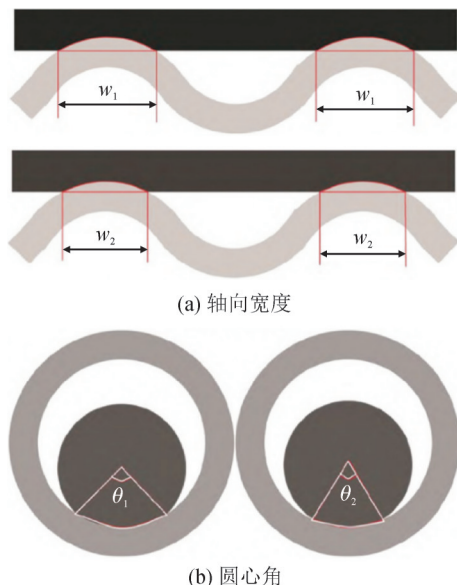


图25 压入深度的影响

Fig. 25 The influence of pressing depth

电缆仿真结果见表2。表2中的仿真结果显示,无论是皱纹铝护套还是铝护套,压入深度增加时,缓冲层温度均会降低。接触面积增加可分散径向电流,从而抑制径向电流集中导致的缓冲层大幅升温。

表2 电缆仿真结果对比

Table 2 Comparison of simulation results

铝套类型	压入深度/mm	缓冲层最高温度/℃	总径向电流/mA	接触点电流密度/(A·m ⁻²)	缓冲层总发热功率/W
皱纹	0.5	270.65	6.01	8.83	20.68
	1.0	132.61	6.74	4.80	12.22
平滑	0.5	105.29	8.15	3.78	8.73
	1.0	64.78	8.17	2.36	5.11

3.3.5 缓冲层接触状况的影响

当两者紧密接触时,模拟缓冲层在干燥、受潮和接触面附着白斑的条件下缓冲层的温升情况,仿真结果见表3。白色粉末主要成分为Na₂CO₃、Al₂O₃、Al(OH)₃,是一种高阻性物质^[20],因此在铝护套波谷和缓冲层过盈配合处设置一层接触材料,以此模拟烧蚀过程中产生的白色粉末:设置接触材料厚度为0.15 mm,电阻率为1×10¹² Ω·cm,相对介电常数为1 000。

表3 干燥和受潮时的局部热源及温升

Table 3 Local heat source and temperature rise

仿真条件	热源强度/(W·m ⁻³)	局部温升/℃
缓冲层干燥	1.17×10 ²	7.02×10 ⁻⁴
缓冲层电阻率及介电常数增大	1.09×10 ⁴	6.51×10 ⁻²
受潮波谷生成白色粉末	8.93×10 ³	1.02×10 ⁻³

当铝护套与缓冲层接触不良时,电缆模型中仅有中间段1处波谷与缓冲层保持紧密接触,其余波谷与缓冲层之间存在0.1 mm气隙。此时电缆模型的容性电流仅能流过接触良好的波谷,导致该波谷与缓冲层交界点处的电流密度显著增大,其峰值达到2.26×10³ mA/m²,见图26。同时,电流分布在交界点两侧呈现出对称性,这种对称性分布特征进一步加剧了电流的集中效应,见图27。温度场分布见图28。根据图28的电缆温度分布,铝护套接触良好波谷处的电流密度急剧增强,从而缓冲层接触位置发热增加。

继续探讨接触不良长度对缓冲层的影响。在COMSOL中定义接触不良长度为L,考虑到仅有电缆中间段1处波谷接触良好,其值为可近似为电缆模型整体轴向长度。

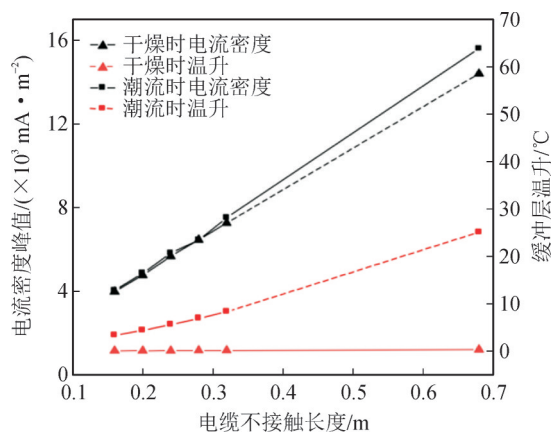


图26 电流密度及温升随接触不良长度的变化曲线

Fig. 26 The variation curve of current density and temperature rise with the length of poor contact

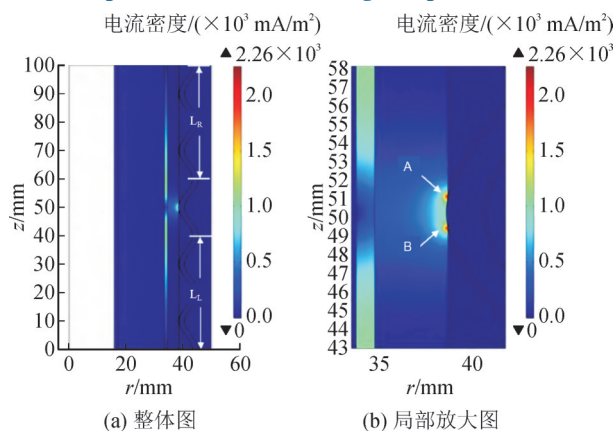


图27 接触不良时电缆的电流密度分布

Fig. 27 Current density during poor contact

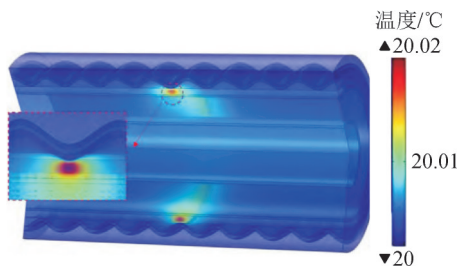


图28 接触不良时电缆的温度分布

Fig. 28 Temperature distribution during poor contact

当缓冲层处于干燥状态下,即使电缆内部存在一定轴向长度的接触不良,缓冲层的温升现象并不明显。而当缓冲层受潮时,随着接触不良长度 L 的增大,缓冲层局部温升也会随之大幅增加。当接触不良长度达到3 m时,由容性电流引起的温升超过324 °C。这一温度远远超过了缓冲层的长期运行耐温值(90 °C)和最高耐温值(230 °C),缓冲层易发生烧蚀故障,电缆的整体结构被破坏。

4 缓冲层烧蚀缺陷检测技术

根据电缆烧蚀导致电缆结构的变化,以及烧蚀

过程中产生的物理信号及化学产物,学者们提出了多种缓冲层烧蚀检测方法,以期预防或减少烧蚀故障的发生^[32,41-42]。

4.1 局部放电检测技术

通过电磁耦合法获取故障电缆的局部放电信号后,利用智能算法完成信号降噪,进而提取故障电缆放电信号的相位、放电量等特征参数,从而对高压电缆进行实时监测与故障定位^[43]。现场测试中对一条230 kV故障电缆进行针对性的局部放电测试,在 $1.1U_0$ 的条件下检测到大于100 pC的局部放电信号,并准确找到了缺陷^[46]。同时结合基于深度学习模型的连续小波变换(CWT)扫描图像,将局部放电信号转换为扫描图像,借此直观地显示不同类型局部放电的频率成分及其随时间的变化情况^[44]。

实际电缆运行发生故障时,电缆内部并不是长期持续放电,放电时间没有明确的规律,通过技术手段检测到的局放信号多点分布、大小不定、发生密度不稳定。因此,局部放电检测法在缓冲层烧蚀故障缺陷存在不足之处,实际检测成功案例较少^[9]。

4.2 X射线检测技术

X射线在检测不同物质时,由于吸收和散射作用会使射线强度发生衰减,衰减受物质的密度和厚度影响。因此,X射线检测技术可依据电缆各结构层材料、生成白斑的厚度与密度,以及二者对X射线吸收能力存在差异的特性^[40,45-47]。

将X射线技术与智能图像识别技术相结合。针对缓冲层烧蚀缺陷X射线图谱进行灰度处理,压缩原始图像的灰度值至人眼可识别范围,进而实现缺陷的识别。此外,该研究还通过训练智能算法实现缺陷的智能分类和识别。相比于传统方法,FCN具有更高的识别准确率,见图29。

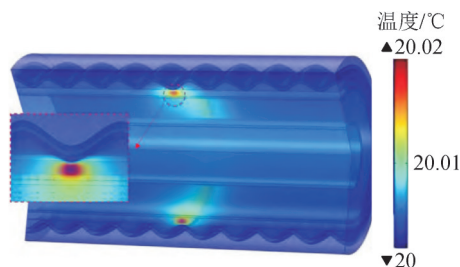


图29 FCN缺陷识别图

Fig. 29 FCN defect identification diagram

4.3 特征气体检测技术

基于前文缓冲层烧蚀过程的研究,我们发现通过对于特征气体的检测可以实现缓冲层烧蚀过程的检测,并且在实验室中也得到了应用。在某实验室中通过搭建缓冲层模拟烧蚀平台,进行放电烧蚀试验,并收集烧蚀后产生的气体。利用气体分析技

术,分析了高压电缆缓冲层烧蚀产生的特征气体。实验结果表明:对比正常运行电缆和烧蚀放电电缆产生的特征气体,发现缓冲层放电烧蚀模拟产生的气体中主要包含 C_7H_8 、 $C_{16}H_{22}O_4$ 等芳香烃类气体,且芳香烃气体占总气体的83%,因此可通过检测电缆中是否存在芳香烃类气体以判断缓冲层是否存在烧蚀缺陷^[48]。

另外,通过搭建110 kV XLPE电缆缓冲层气体检测系统,对电缆注水模拟水分侵入电缆。当注水量达到5 mL时,缺陷电缆出现氢气并持续产生,氢气扩散呈现非均匀扩散特性。同时,在铝护套和缓冲层的接触面出现白色粉末,证实受潮引发铝护套腐蚀析氢机制。该研究结果可为电缆缓冲层缺陷的氢气时空分布检测和定位提供实验依据^[49]。

5 缓冲层缺陷故障修复方法及新型缓冲层研究进展

5.1 缺陷故障修复方法

针对高压电缆缓冲层烧蚀频发的问题,有学者提出了缓冲层的修复方法,旨在不更换电缆的情况下,对损坏的电缆缓冲层进行修复。一种基于石墨注入的高压电缆缓冲层修复方法被提出^[50],采用导电固体炭黑作为缓冲层的修复介质,通过修复装置在铝护套和缓冲层之间注入石墨粉体,填充缓冲层缺陷以重新形成导电通路,进而恢复铝护套和缓冲层的电气连接。同时,一种KSXF 500型半导体修复液在现场应用,KSXF 500型电缆修复液见图30。利用加注设备将修复液注入铝护套与绝缘屏蔽层之间,修复液浸渍于阻水缓冲层上,进而重新建立铝护套和缓冲层之间的电气连接,进而有效降低缓冲层体积电阻率、抑制烧蚀发生,最终实现降低烧蚀引发的电缆故障率及延长电缆寿命的效果,修复液灌注通路连接见图31^[51]。虽然以上修复方法可以暂时修复烧蚀区域,但修复材料耐久性可能不如电缆原有材料,而且对于严重烧蚀或损伤的电缆,单纯的修复缩短可能无法完全恢复其性能。



图30 KSXF 500型电缆修复液

Fig. 30 KSXF 500 cable repair fluid

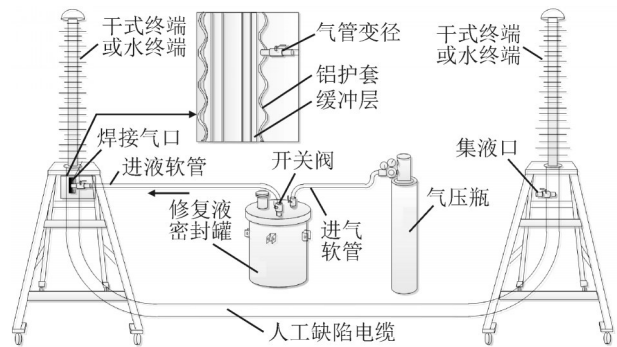


图31 修复液灌注通路连接示意图

Fig. 31 Diagram of repair fluid infusion pathway connection

充气吸湿法作为一种高效且安全的电缆干燥技术,该方法结合真空抽吸与干燥气体充填工艺,有效去除电缆内部水分以提升其绝缘性能。具体操作流程为:首先利用真空泵对电缆进行抽吸,降低内部压力以减少水分含量;随后充入干燥空气或高纯度氮气,使干燥气体在电缆内部循环流动,吸收并排出残留水分,直至达到预期的内部湿度水平。为进一步加速水分蒸发,可在真空抽吸阶段同步施加感应加热,即通过穿心式升流器或电焊机的二次线圈对电缆导体及绝缘层进行加热,将输出电流控制在约130 A使加热温度维持在35~55℃之间。处理完成后,密封电缆端头。该方法避免了高温处理,尤其适用于对温度敏感电缆类型,并因其操作安全性和除湿效率高而受到青睐。通过显著降低电缆内部水分含量,充气吸湿法有效改善电缆的绝缘性能。

5.2 新型缓冲层的研究进展

缓冲层要满足具备控制外半导体层电位的设计要求,以确保电缆能够安全运行。在AEIC CS9-15标准中^[52],关于高压电缆缓冲层的电气性能、断裂强度、热稳定性以及缓冲层补偿绝缘的最大变形厚度等方面都进行了阐述,具体性能要求见表4。

表4 缓冲层的性能指标

Table 4 Performance indicators of buffer layer

参数	技术指标
断裂强度/(N·cm ⁻¹)	≥ 40
纵向断裂伸长率/%	≥ 20
热稳定性	长期耐温(90℃, 24 h)膨胀高度/mm
	≥ 初始值
	瞬间耐温(230℃, 20 s)膨胀高度/mm
	≥ 初始值
酸值/(mgKOH·g ⁻¹)	—
含水率/%	≤ 7
表面电阻/Ω	≤ 1 500
体积电阻率/(Ω·cm)	≤ 1×10 ⁵

国内外使用的高压XLPE绝缘电缆的缓冲层结构及其运行环境存在多样性。同时,在缓冲层原材料性能、产品结构、生产工艺、运行和安装等方面缺

乏关联性分析和系统性研究,这使得从根本上认识并解决高压电缆缓冲层烧蚀问题变得十分困难。因此,探索新型缓冲层材料和缓冲层制备工艺,深入研究各种材料的性质及其在特定加工工艺下的表现,优化缓冲层的结构和性能,以此提高缓冲层的阻水性能、耐热性能和耐烧蚀性能,有效预防和减少烧蚀现象的发生。

1)湿法纺丝工艺。传统导电材料普遍存在柔韧性差和加工复杂等问题,而基于聚合物基体的导电复合材料具有轻质、可加工性强等优势。炭黑(CB)具有高导电性和低成本优势,作为提升复合材料导电性能的关键填料;热塑性聚氨酯(TPU)具有优异的弹性和耐磨性,其与导电填料进行复合,能使材料从绝缘体变为导体,可以制备出可变形导电复合材料。

针对热塑性聚氨酯(TPU)/炭黑复合纺丝原液制备中普遍存在的炭黑颗粒易团聚、填料—基体界面相容性不足以及高粘度体系加工流动性受限问题,设计了一套分阶段球磨分散、动态增塑调控与真空脱泡工艺体系,制备湿法纺丝原液见图32。如图32所示,将湿法纺丝原液,通过湿法纺丝机纺丝,制备所需的导电纱线。利用去离子水凝固浴使导电纱线冷却成型,将冷却成型后的导电纱线牵引至湿法纺丝机,利用3组不同高度的卷轴间相互配合对冷却后导电纱线进行牵伸,对导电纱线进行卷绕收集。最后将导电纱线与其他高强度纱线混编,制备单层的湿法纺丝机织的新型缓冲层,见图33。



图32 湿法纺丝

Fig. 32 Wet spinning

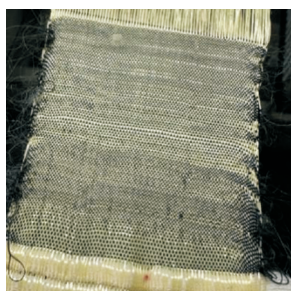


图33 湿法纺丝工艺小样织布

Fig. 33 Wet spinning process for sample weaving

2)熔喷工艺。采用熔融共混法制备一种PP/CB导电母粒,并采用熔喷工艺将导电母粒制备成无纺布基布,最后通过复合、热轧等工艺制备一种新型

电缆缓冲层。

采用熔融共混的方式制备了一种PP/CB导电母粒。通过混炼设备(如双辊混炼机、密闭式混炼机、挤出机等)进行混合,以制取均匀聚合物共熔体。随后,再将共熔体冷却、粉碎或造粒,最终得到混合分散均匀的共混物。熔融共混制备而成的导电母粒见图34。



图34 熔融共混制备的导电母粒

Fig. 34 Conductive masterbatch prepared by melt blending

将利用上述已制备好的导电母粒,通过熔喷工艺技术制备导电无纺布,见图35。将预处理好的导电母粒加入螺杆挤压机的料斗中,通过螺杆的旋转和剪切作用使母粒熔融,形成均匀的熔体见图36。熔体从熔喷模头的喷丝孔高速喷出,同时受到热空气的强烈牵伸作用,形成超细纤维。通过调整热空气的速度、温度和方向,可以控制纤维的直径、取向和分布。超细纤维在空中相互交织形成网状结构,并在热空气与周围冷空气的混合作用下迅速冷却固化,形成具有一定厚度和强度的无纺布。



图35 导电无纺布

Fig. 35 Semi-conductive non-woven fabric

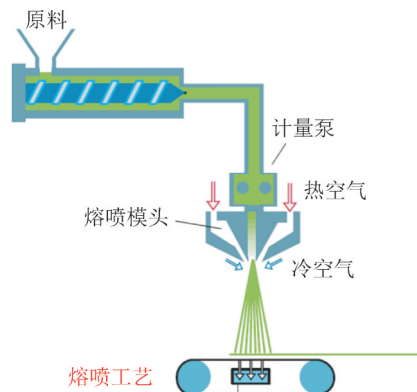


图36 熔喷工艺原理图

Fig. 36 Schematic diagram of melt blown process

6 结论

文中主要结论如下:

1)在研究缓冲层烧蚀缺陷特征现象时,发现烧蚀过程中会产生白色粉末,其主要成分为 Na_2CO_3 、 Al_2O_3 、 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 。进一步分析白色粉末的形成机理,发现白色粉末会破坏缓冲层的导电性能,提高放电烧蚀的风险。可以推测,外界环境湿气渗透至电缆内部,在电场的作用下,缓冲层中阻水粉与铝护套间将发生化学反应和电化学反应,生成白色粉末并发生烧蚀现象。

2)通过多种电缆缓冲层烧蚀模拟实验和不同工况下电缆等效电网络模型参数计算及多物理场仿真,发现烧蚀故障受到铝护套波谷压入深度、接触不良时气隙间距、白色粉末的面积和厚度、两者间接触不良长度等因素的影响。

3)高压XLPE电缆缓冲层故障检测方法主要包括局部放电检测法、X射线检测和特征气体检测法。其中特征气体法相较于局放检测和X射线检测,具有检测精度高、电缆损伤小、检测时间短等优点,在缓冲层缺陷检测中有较大发展潜力。

4)缓冲层的修复方法主要有填充导电修复液和充气吸湿技术,该类方法能极大降低整个工程施工成本,提高线路运行的可靠性。根据缓冲层的性能要求,分别提出了湿法纺丝工艺和熔喷工艺制备新型缓冲层的研究进展,与现行的半导电聚酯非织造阻水布型缓冲层相比,以上两种新型缓冲层在不添加阻水粉的情况下,能够实现材料层面的防水效果,有望减小烧蚀故障的发生。

根据现有研究,未来的研究将聚焦于以下几个方面:

1)通过研究缓冲层材料的热解动力学,了解烧蚀过程中的热解反应和物质转化。这可以帮助理解烧蚀过程的动态变化,以及热解产物对烧蚀机理的影响。

2)开展高压电缆缓冲层烧蚀的可靠性评估和寿命预测研究。基于收集的数据,建立可靠性模型来评估电缆系统的烧蚀风险。同时,结合可靠性模型和历史数据,建立寿命预测模型来估计电缆缓冲层的使用寿命。基于上述的预测结果,进行电缆系统的烧蚀风险评估,并提供维护和决策支持。

3)研究不同材料和加工工艺对缓冲层性能的影响,探索新型缓冲层材料和缓冲层制备工艺。深入研究各种材料的性质及其在特定加工工艺下的表现,可以优化缓冲层的结构和性能,以此提高缓冲

层的阻水性能、耐热性能和耐烧蚀性能,有效预防和减少烧蚀现象的发生。

参考文献:

- [1] 郭卫,周松霖,王立,等. 电力电缆状态在线监测系统的设计及应用[J]. 高电压技术, 2019, 45(11): 3459-3466.
Guo Wei, Zhou Songlin, Wang Li, et al. Design and application of online monitoring system for electrical cable states[J]. High Voltage Engineering, 2019, 45(11): 3459-3466.
- [2] Saleh M, Ahmed N, Moghaddam T B, et al. Towards a high-performance asphalt concrete for extreme climatic conditions using asphaltenes and polyethylene terephthalate fibres[J]. Construction and Building Materials, 2024(420): 135573.
- [3] 何宏明,邱漫诗,聂章翔,等. 高温下110 kV XLPE电缆绝缘在空气和硅油介质中的老化机理研究[J]. 绝缘材料, 2020, 53(3): 22-27.
He Hongming, Qiu Manshi, Nie Zhangxiang, et al. Ageing mechanism of 110 kV XLPE cable insulation in air and silicone oil at high temperature[J]. Insulating Materials, 2020, 53(3): 22-27.
- [4] Xie Yue, Zhao Yifeng, Bao Shuzhen, et al. Investigation on cable rejuvenation by simulating cable operation[J]. IEEE Access, 2020 (8): 6295-6303.
- [5] Gustavsen B, Høyer-Hansen M, Hatlo M, et al. Voltages and AC corrosion on metallic tubes in umbilical cables caused by magnetic induction from power cable charging currents[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2019, 34(2): 596-605.
- [6] Li Pengfei, Chen Yuebin, Huang Haowei, et al. Investigation of corrosion behavior of galvanized steel as submarine cable armor in seawater under weak magnetic fields[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2023, 18(9): 100264.
- [7] 王野,张涛,赵新院. 高压电缆缓冲层烧蚀故障分析及预防[J]. 电线电缆, 2022(2): 47-50.
Wang Ye, Zhang Tao, Zhao Xinyuan. Analysis and prevention measures of ablation fault of high voltage cable buffer layer[J]. Wire & Cable, 2022(2): 47-50.
- [8] 汪传斌,金海云. 高压XLPE绝缘电力电缆缓冲层与金属护层结构设计仿真计算与优化[J]. 电线电缆, 2018(3): 6-12.
Wang Chuanbin, Jin Haiyun. The structural design simulation and optimization of high voltage XLPE insulation power cable buffer layer and metal sheath[J]. Wire & Cable, 2018(3): 6-12.
- [9] 邱玮,章宇聪,谢亿,等. 高压XLPE电缆缓冲层缺陷研究现状综述[J]. 绝缘材料, 2024, 57(4): 13-21.
Qiu Wei, Zhang Yucong, Xie Yi, et al. Summary of research status on buffer layer defects in high voltage XLPE cables[J]. Insulating Materials, 2024, 57(4): 13-21.
- [10] 张洪亮,张建民,于洪森,等. 高压电缆大截面分割导体焊接后的机械性能及缓冲阻水层设计[J]. 电线电缆, 2018(4): 36-39.
Zhang Hongliang, Zhang Jianmin, Yu Hongmiao, et al. A study on mechanical property of large section welded milliken conductor and design of water-blocking buffer layer for HVAC cable[J]. Wire & Cable, 2018(4): 36-39.
- [11] 刘召见,常军,房鹏. 电力电缆的阻水技术[J]. 电线电缆, 2013(1): 12-14.
Liu Zhaojian, Chang Jun, Fang Peng. The water blocking

- technology in electrical power cable[J]. Wire & Cable, 2013(1): 12-14.
- [12] Cao Junping, Wang Shaohua, Li Naiyi, et al. Analysis on buffer layer discharges below the corrugated Aluminum sheath of XLPE cables and comparison with other metal sheath structures[C]//2019 IEEE 3rd International Conference on Circuits, Systems and Devices(ICCSD), 2019:21-26.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 吴春芳,陈云,黄韬,等.电力电缆状态感知与检测技术研究综述[J]. 高压电器, 2024, 60(10): 86-103.
- Wu Chunfang, Chen Yun, Huang Tao, et al. Overview of condition sensing and detection technology for power cables[J]. High Voltage Apparatus, 2024, 60(10): 86-103.
- [16] SU C Q. Failure analysis of three 230 kV XLPE cables[C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America(T & D-LA), 2010:22-25.
- [17] 邓声华,江福章,刘和平,等.高压电缆缓冲层材料及结构特性研究[J]. 电线电缆, 2019(2): 19-27.
- Deng Shenghua, Jiang Fuzhang, Liu Heping, et al. Research on materials and structural characteristics of buffer layers for high voltage cable[J]. Wire & Cable, 2019(2): 19-27.
- [18] 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.
- 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.
- [19] Tian Yi, Zhu Guixin, Huang Lihong, et al. Study on the ablation process and failure mechanism of the buffer layer in high-voltage XLPE cable[J]. International Journal of Electrochemical Science, 2024, 19(8): 100662.
- [20] 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.
- [21] 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.
- [22] Du Boxue, Du Xiaoyu, Kong Xianglin, et al. An investigation on discharge fault in buffer layer of 220 kV XLPE AC cable[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021, 15(6): 508-516.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 周凯,赵琦,李原,等.基于分阶段产气的高压电缆阻水缓冲层状态评估[J]. 高电压技术, 2022, 48(10): 3882-3890.
- Zhou Kai, Zhao Qi, Li Yuan, et al. Evaluation technology of water-blocking buffer layer of high voltage cable based on stages classification of gases evolution[J]. High Voltage Engineering, 2022, 48(10): 3882-3890.
- [26] 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.
- [27] 李志坚,李旭,杜晓雨,等.湿度对不同电场类型下电缆缓冲层局部放电特性的影响[J]. 绝缘材料, 2021, 54(7): 102-109.
- Li Zhijian, Li Xu, Du Xiaoyu, et al. Effect of relative humidity on partial discharge characteristics of cable buffer layer under different electric field forms[J]. Insulating Materials, 2021, 54(7): 102-109.
- [28] 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.
- [29] Cheng Yanting, Hao Yanpeng, Chen Yun, et al. Effects of condition of water blocking tape on the buffer layer failures of high voltage XLPE cables in electric field and temperature field[J]. Engineering Failure Analysis, 2022(131): 105823.
- [30] 杜晓雨. 220 kV交流电缆缓冲层放电机理及其运行状态评估方法研究[D]. 天津:天津大学, 2021.
- Du Xiaoyu. Study on discharge mechanism and operation condition assessment method of buffer layer in 220 kV AC cables[D]. Tianjin: Tianjin University, 2021.
- [31] Zhou Wenqing, Cheng Hao, Hui Baojun, et al. Key process of the defection of PET buffer layer in XLPE power cable by a case study: thermo-oxidative degradation[J]. Engineering Failure Analysis, 2023(146): 107131.
- [32] 吴明,洪涵韬,任志刚,等.径向电流作用下的高压电缆缓冲层烧蚀多物理量信号演变规律[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 936-945.
- Wu Ming, Hong Hantao, Ren Zhigang, et al. Evolution law of multi-physical signal of high-voltage cable buffer layer ablation under radial current[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 936-945.
- [33] 钟理鹏,刘雨丰,段肖力,等.高压交联聚乙烯电缆缓冲层白色粉末烧蚀特性仿真研究[J]. 湖南电力, 2025, 45(1): 73-78.
- Zhong Lipeng, Liu Yufeng, Duan Xiaoli, et al. Simulation study on white powder ablation characteristics in buffer layer of high-voltage

- cross-linked polyethylene cables[J]. Hunan Electric Power, 2025, 45(1): 73-78.
- [34] 刘 青,焦宇阳,尚英强,等. 高压XLPE电缆阻水缓冲层烧蚀机理研究[J]. 绝缘材料, 2025, 58(3): 99-108.
- Liu Qing, Jiao Yuyang, Shang Yingqiang, et al. Study on ablation mechanism of water-blocking buffer layer in high voltage XLPE cable[J]. Insulating Materials, 2025, 58(3): 99-108.
- [35] 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.
- [36] 刘 黎,周路遥,李晋贤,等. 铝护套与缓冲层间气隙对高压电缆的电-热耦合影响[J]. 浙江电力, 2021, 40(11): 54-59.
- Liu Li, Zhou Luyao, Li Jinxian, et al. Influence of air gap between aluminum sheath and buffer on electro-thermal coupling characteristics of HV cables[J]. Zhejiang Electric Power, 2021, 40(11): 54-59.
- [37] Ren Zhigang, Gao Jian, Zhang Hao, et al. Understanding electrical conductivity deterioration of buffer layer in high-voltage cables under electro-humid stress[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2024, 31(5): 2768-2775.
- [38] 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.
- [39] 周 旭,李 欢,朱梦瑶,等. 高压XLPE电力电缆阻水缓冲层烧蚀故障研究综述[J]. 中国电机工程学报, 2025, 45(12): 4927-4942.
- Zhou Xu, Li Huan, Zhu Mengyao, et al. Research review on the ablative failure of water buffer layer in high voltage XLPE power cables[J]. Proceedings of the CSEE, 2025, 45(12): 4927-4942.
- [40] 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.
- [41] Wu Zhipeng, 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.
- [42] 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.
- [43] 周 凯,饶显杰,汪先进,等. 基于距离的互相关算法在电力电缆局部放电定位中的应用[J]. 高电压技术, 2021, 47(8): 2946-2954.
- Zhou Kai, Rao Xianjie, Wang Xianjin, et al. Application of distance-based cross-correlation algorithm in partial discharge location of power cable[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(8): 2946-2954.
- [44] Sahoo R, Karmakar S. Effectiveness of wavelet scalogram on partial discharge pattern classification of XLPE cable insulation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024 (73): 1-10.
- [45] 刘三伟,谢 亿,张 军,等. 高压电缆X射线数字影像深度处理和缓冲层缺陷智能识别技术[J]. 南方电网技术, 2020, 14(12): 66-70.
- Liu Sanwei, Xie Yi, Zhang Jun, et al. High voltage cable X-ray digital image depth processing and technology of buffer layer defect intelligent recognition[J]. Southern Power System Technology, 2020, 14(12): 66-70.
- [46] Liu Sanwei, Liu Zhang, Duan Jianjia, et al. X-ray digital image advanced processing and buffer layer defect intelligent identification of power cable[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2020, 1601(5): 052028.
- [47] 刘维可,谢 亿,刘三伟,等. 高压电缆阻水缓冲层烧蚀缺陷的射线检测工艺参数研究[J]. 电线电缆, 2021(2): 28-32.
- Liu Weike, Xie Yi, Liu Sanwei, et al. Study on the technical parameters of X-ray detection of water blocking buffer layer ablative defects in high-voltage cable[J]. Wire & Cable, 2021(2): 28-32.
- [48] 刘顺满,王 健,程 皓,等. 高压XLPE电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体分析[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 116-125.
- Liu Shunman, Wang Jian, Cheng Hao, et al. Analysis on characteristic gas of ablative defect in buffer layer of high voltage XLPE cable[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 116-125.
- [49] 郝艳捧,田万兴,成延庭,等. 高压皱纹铝护套电力电缆缓冲层受潮的气体产生、扩散和持续时间[J]. 广东电力, 2025, 38(4): 70-78.
- Hao Yanpeng, Tian Wanxing, Cheng Yanting, et al. Gas generation, diffusion, and duration of moisture in the buffer layer of high-voltage wrinkled aluminum-sheathed power cable[J]. Guangdong Electric Power, 2025, 38(4): 70-78.
- [50] 宋鹏先,张 华,朱晓辉,等. 一种基于石墨注入的高压电缆缓冲层修复方法研究[J]. 绝缘材料, 2023, 56(10): 84-90.
- Song Pengxian, Zhang Hua, Zhu Xiaohui, et al. Research on a repair method of high-voltage cable buffer layer based on graphite injection[J]. Insulating Materials, 2023, 56(10): 84-90.
- [51] 曲国安,罗汪彬,赵新院,等. 一种高压电缆缓冲层烧蚀修复技术[J]. 电线电缆, 2023(5): 17-22.
- Qu Guoan, Luo Wangbin, Zhao Xinyuan, et al. Ablation repair technology for buffer layers of high voltage cables[J]. Wire & Cable, 2023(5): 17-22.
- [52] AEIC CS9-15 Specification for extruded insulation power cables and their accessories rated above 46 kV through 345 kV AC[S].
- 韩卓展(1993—),男,硕士,工程师,研究方向为输电电缆施工运维检测技术。
- 田 毅(1986—),男,博士,副教授,主要从事电力设备智能感知与先进测量、智能材料及电网关键设备现场试验技术及装备研究工作(通信作者)(E-mail: tianyi@xpu.edu.cn)。