

高压电缆缓冲层烧蚀机理、检测技术与解决方案研究进展

武康宁¹, 赵 鸽¹, 李博达¹, 葛 洲¹, 高 建^{1,2}, 任志刚^{1,3}, 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), 西安 710049;

2. 广东省电力装备可靠性企业重点实验室(广东电网有限责任公司电力科学研究院), 广州 510080;

3. 国网北京市电力公司电力科学研究院, 北京 100075)

摘 要: 皱纹铝护套结构的高压电缆近年来频繁发生缓冲层烧蚀故障, 严重影响电缆的安全稳定运行。缓冲层烧蚀的机理、检测技术与解决方案在电力电缆领域得到了广泛关注。该文在阐述缓冲层结构及其功能的基础上, 结合实际电缆的解体分析结果, 从铝护套、缓冲层、绝缘屏蔽层、主绝缘层的角度, 系统总结了烧蚀故障的典型特征。梳理了干燥与潮湿环境下缓冲层烧蚀的发展机理: 在干燥条件下, 烧蚀故障主要由电缆受力不均匀引发的局部电流集中所致; 在潮湿条件下, 除上述机制外, 电化学反应生成的高阻性白色粉末进一步加剧了电流集中现象, 焦耳热持续累积, 最终引发电缆结构的损伤。基于烧蚀特征及机理, 讨论了各类烧蚀缺陷检测技术的适用性, 包括基于烧蚀过程中物理信号变化、电缆结构变化及烧蚀产物的检测方法。此外, 该文讨论了缓冲层烧蚀故障的解决方案: 对于存量电缆, 在烧蚀未伤及绝缘屏蔽之前可采取修复技术修复故障缓冲层; 对于增量电缆, 建议严格控制缓冲层杂质离子成分及含量、保证绝缘屏蔽与铝护套之间良好的电气接触, 或采用平滑铝护套结构替代现有皱纹铝护套结构, 从根本上预防烧蚀故障的发生。

关键词: 高压电缆; 缓冲层烧蚀; 故障机理; 故障检测; 解决方案

Mechanism, Detection Technology and Solution of Buffer Layer Ablation Fault in High Voltage Cables

WU Kangning¹, ZHAO Ge¹, LI Boda¹, GE Zhou¹, GAO Jian^{1,2}, REN Zhigang^{1,3}, LI Jianying¹

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

2. Guangdong Key Laboratory of Electric Power Equipment Reliability(Electric Power Research Institute of Guangdong Power Grid Co., Ltd.), Guangzhou 510080, China;

3. State Grid Beijing Electric Power Research Institute, Beijing 100075, China)

Abstract: In recent years, buffer layer ablative failure occurs frequently in high-voltage cables with corrugated aluminum sheathed structure, which seriously affects the safe and stable operation of cables. The mechanism, detection technology and solution of buffer layer ablation have been widely concerned in the field of power cable. On the basis of describing the structure and function of buffer layer, combined with the disintegration analysis results of actual cables, the typical characteristics of ablative faults are systematically summarized from the angles of aluminum sheath, buffer layer, insulation shield layer, and main insulation layer. The mechanism of buffer layer ablation under dry and wet conditions is summarized. Under dry conditions, ablation failure is mainly caused by local current concentration caused by uneven cable force. Under humid conditions, in addition to the above mechanism, the high-resistance white powder generated by the electrochemical corrosion reaction further aggravates the current concentration phenomenon, and the Joule heat continues to accumulate, eventually causing damage to the cable structure. Based on ablative characteristics and mechanism, the applicability of various ablative defect detection techniques is discussed, including detection methods based on changes of physical signal, cable structure during ablative process and ablative products. In addition, this paper discusses the solution of buffer layer ablative failure. For the stock cable, the repair technology can be adopted to repair the fault

buffer layer before the ablative damage does not hurt the insulation shield. For incremental cables, it is recommended to strictly control the composition and content of impurity ions in the buffer layer, ensure good electrical contact between the insulation shield and the aluminum sheath, or replace the existing corrugated aluminum sheath structure with a smooth aluminum sheath structure to fundamentally prevent the occurrence of ablation failures.

Key words: high voltage cable; buffer layer ablation; failure mechanism; fault detection; solution

0 引言

高压电缆是城市供电的主要形式,我国一二线城市的城区输电网架已形成电缆为主、架空为辅的输电模式^[1],其运行可靠性对城市供电安全至关重要。皱纹铝护套结构的交联聚乙烯(XLPE)绝缘高压电缆是目前国内高压电缆领域的主流结构。然而,近年来发生了多起高压电缆缓冲层烧蚀故障。据不完全统计,缓冲层烧蚀缺陷导致故障占高压电缆本体绝缘故障的比例超过 80%^[2-4]。因此,高压电缆缓冲层烧蚀机理、检测方法与解决方案的研究已成为电力电缆领域的焦点。

对缓冲层烧蚀故障进行分析并研究其机理与检测方法,一方面能够为已投运的高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的检测及处理提供依据;另一方面可以为未来高压电缆的优化与改进提供思路。目前业内提出的缓冲层烧蚀机理可以归纳为 3 类:缓冲层与铝护套之间的间隙放电^[5-8]、缓冲层与铝护套过盈接触部位电流集中的热效应^[9-12]、缓冲层受潮后与铝护套之间的电化学腐蚀^[13-15]。然而,现阶段对于高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的发展过程认识仍不足,烧蚀机理尚未形成共识。当前国内针对高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的检测技术已有 X 射线成像^[16]、局部放电检测^[17]、宽频阻抗谱^[18]等。但电缆所处环境复杂,如何在各类工况下实现烧蚀故障的准确检测仍需继续探索。缓冲层烧蚀故障的这一问题的解决方案针对不同场景可以分为两类:第一类针对存量电缆,对故障严重的电缆采取整段更换处理,对轻度故障的电缆采用缓冲层修复技术^[19-21]。第二类针对增量电缆,业内普遍认为采用平滑铝护套结构来代替目前的皱纹铝护套结构能够有效预防烧蚀故障^[22-24],对于目前的皱纹铝护套结构电缆需严格把控缓冲层入网质量,但缺乏完善的入网标准与检测方法。

本文在介绍缓冲层结构与功能的基础上,结合实际故障电缆解体经验,对缓冲层烧蚀故障的特征进行总结。并在归纳目前相关学者提出的烧蚀机理后,梳理缓冲层在不同条件下的烧蚀发展过程。从烧蚀产生的物理信号、烧蚀导致的结构变化、烧蚀

产物等角度分析了用于缓冲层烧蚀的各种检测技术的原理与可行性。关于烧蚀故障的解决方案主要从修复与防治两方面进行阐述。

1 缓冲层烧蚀故障的特征与机理

1.1 缓冲层的结构与功能

高压 XLPE 电缆结构如图 1(a)所示,缓冲层结构位于绝缘屏蔽层与铝护套之间。缓冲层由蓬松棉层、阻水粉层以及无纺布层 3 层结构组成,其中蓬松棉层与无纺布层位于两侧,中间为阻水粉层(图 1(b))^[25-26]。蓬松棉与无纺布的基材均为聚酯短纤维,主要成分是涤纶,即聚对苯二甲酸乙二醇酯(polyethylene terephthalate, PET),并通过浸渍半导电水性胶液获得半导电特性。阻水粉的主要成分是聚丙烯酸钠(NaPA),通过半导电粘合剂粘接于蓬松棉与无纺布之间。

缓冲层主要起提供导电通路、缓冲机械损伤以及纵向阻水的作用:即在绝缘屏蔽与皱纹铝护套之间形成导电桥梁,为电缆中的径向电流提供导电通路;缓解电缆运行时因热膨胀对铝护套产生的挤压作用;其中的阻水粉在吸水后发生膨胀,阻断由于电缆护层破损侵入的水分的纵向扩散。

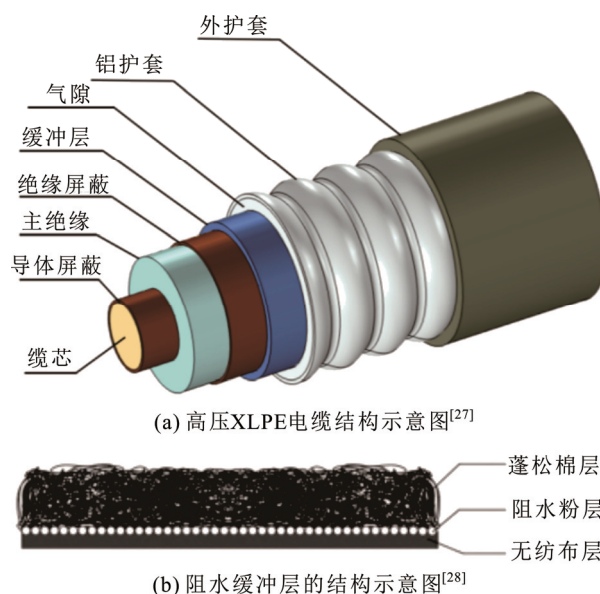


图 1 阻水缓冲层在电缆中的位置与结构示意图

Fig.1 Structure diagram of buffer layer

国内在缓冲层材料性能方面的标准和规范相对较少, 目前仅有推荐性行业标准 JB/T 10259—2014^[29]、中国标准化协会标准 T/CAS 374—2019^[30]对阻水缓冲层性能做出了明确要求。其中电性能至关重要, 行业标准规定阻水缓冲层表面电阻不大于 $1.5 \times 10^3 \Omega$, 体积电阻率不大于 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$; 中国标协标准规定阻水缓冲层的表面电阻不大于 350Ω , 体积电阻率不大于 $5.0 \times 10^3 \Omega \cdot \text{cm}$ 。

1.2 缓冲层烧蚀的特征

电缆缓冲层故障主要发生在皱纹铝护套结构的高压电缆中, 集中在投运 5 年后, 与电缆截面积、电缆是否有铜丝织造带结构、电缆线路负荷没有直接关系^[6,31]。如图 2、3 所示, 缓冲层烧蚀缺陷的基本特征可以总结为: ①缓冲层表面与皱纹铝护套波谷对应处出现条状分布的白色粉末或放电损伤痕迹, 部分区域出现烧蚀孔洞; ②绝缘屏蔽表面有白色粉末嵌入, 形成凹坑; ③皱纹铝护套内侧波谷表面存在条状腐蚀痕迹; ④在电缆内部存在大量气体; ⑤烧蚀后缓冲层的电、热性能发生劣化, 表现为体积电阻率增大、导热系数降低等。

若缓冲层烧蚀持续发展, 如图 4 所示, 较严重的部位会在主绝缘层形成烧蚀痕迹甚至导致电缆本体的击穿, 可能造成严重的输电事故。

1.3 缓冲层烧蚀的机理

目前主要的缓冲层烧蚀机理可以概括为 3 类:

①气隙放电导致烧蚀: 缓冲层与铝护套之间接触不良在轴向达到一定长度时, 气隙中的场强会超过空气的击穿场强引发局部放电^[10,32-36]; ②电化学腐蚀导致烧蚀: 缓冲层中的阻水粉受潮水解作为电解质, 缓冲层中的炭黑与铝护套作为电极形成原电池, 进而铝护套被腐蚀形成高阻性白色粉末^[6,10,13,37]; ③电流热效应导致烧蚀: 电缆内部缓冲层与铝护套之间存在不均匀接触时, 径向电流将集中于二者紧密接触、导电良好的部位, 并在该处产生局部温升, 进一步导致电缆结构的破坏^[9-11,38-40]。但目前对于高压电缆缓冲层烧蚀缺陷的发展过程认识仍不足, 烧蚀机理尚未形成共识。基于上述相关烧蚀机理, 笔者梳理了缓冲层烧蚀的发展过程。

根据缓冲层烧蚀故障电缆的解体分析结果, 缓冲层烧蚀故障可以主要分为 2 大类:

(1)缓冲层表面几乎没有白色粉末但存在烧蚀孔洞, 铝护套内侧波谷处未出现腐蚀痕迹。

(2)在缓冲层表面存在大量白色粉末并出现纤

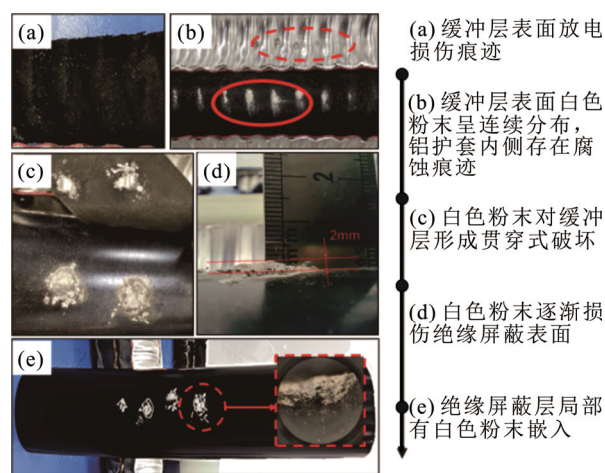
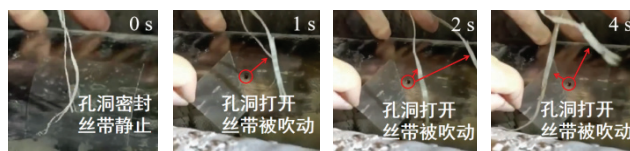


图 2 高压电缆缓冲层烧蚀缺陷特征^[27]

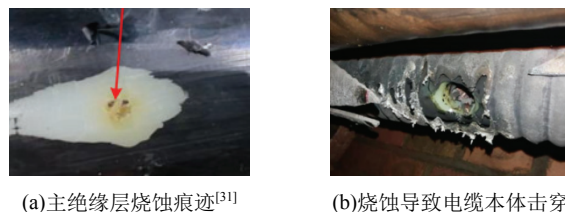
Fig.2 Characteristics of ablative defect in buffer layer of high-voltage cable^[27]



(取自国网北京电科院 2022 年 6 月现场拍摄视频)

图 3 发生缓冲层烧蚀故障的电缆内存在大量气体

Fig.3 There is a large amount of gas in the cable where the buffer layer ablation failure occurs



(a)主绝缘层烧蚀痕迹^[31]

(b)烧蚀导致电缆本体击穿

图 4 烧蚀导致的主绝缘损伤及电缆本体击穿
Fig.4 Insulation damage and cable body breakdown caused by ablation

维破损, 铝护套内侧波谷处出现腐蚀痕迹, 且绝缘屏蔽层对应处有白色粉末嵌入。

两类特征现象的存在说明缓冲层的烧蚀存在不同的机理, 差异的根源在于是否有水的参与, 据此划分为干燥与潮湿 2 种情况。

1.3.1 干燥条件下缓冲层烧蚀的机理

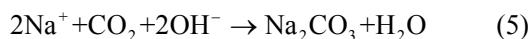
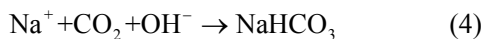
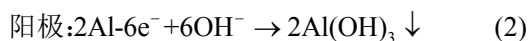
干燥情况下, 当电缆存在弯曲等情况导致缓冲层受力不均匀时, 如图 5 所示, 压强较大的位置导电聚酯纤维网络的空隙减小, 同时导电通路的有效面积增加, 导致缓冲层局部的交流体积电阻率减小。同时,

附近其他区域可能由于压力分布的不均存在接触不良, 导致电流集中在紧密接触位置^[9,39-41]。同时结合缓冲层的微观结构, 当有径向电流通过缓冲层时, 导电路径包含导电聚酯纤维丝以及由导电胶液包覆的阻水粉颗粒, 在微观上形成了不均匀的导电路径。这种不均匀的导电路径导致的电流密度的不均匀分布将使电流集中现象更为严重^[25]。

电流长时间集中将使该处持续流过较大电流, 不断累积焦耳热^[38,42], 如图 6 所示。如果该处温度超过 PET 和 NaPA 的熔点, 导致缓冲层纤维丝的断裂与阻水粉的分解, 从而发生缓冲层损伤。若受力不均匀的情况长时间得不到改善, 电流持续集中, 缓冲层将形成贯穿型损伤, 绝缘屏蔽也将受到热效应的影响被灼伤。

1.3.2 潮湿条件下缓冲层烧蚀机理

缓冲层受潮时, 铝护套与缓冲层将以吸潮水解的阻水粉溶液作为电解质发生电化学腐蚀, 生成白色粉末与氢气^[32,43], 相关研究证实白色粉末成分主要是氧化铝、碳酸钠、碳酸氢钠以及析出的阻水粉等物质的混合物^[6,14], 这一过程的化学反应式如式(1)一(3)所示。白色粉末中的铝元素来自铝护套的腐蚀, 见式(2), 其中氢氧化铝会继续分解为氧化铝。白色粉末中的钠盐来自阻水粉水解产生的 Na^+ 与 CO_2 的反应, 如式(4)与式(5)所示。



白色粉末为高阻性物质, 不利于电流的传导, 故白色粉末所在位置电流密度较低。但其边缘会产生图 7 所示的电流密度集中现象, 从而加剧附近的腐蚀作用, 使得白色粉末覆盖面积不断扩大直至完全覆盖缓冲层与铝护套接触的区域, 最终导致在该铝护套波谷处的电流密度整体较低。此时径向电流会向其他没有白色粉末或白色粉末较少的铝护套波谷处集中。当覆盖白色粉末的波谷数量较多时, 将形成较为严重的电流集中。另外, 当潮湿缓冲层存在受力不均匀的情况时, 与前述干燥情况类似, 压强较大的位置会形成电流集中。这会进一步促进腐蚀的发展, 加速白色粉末产生, 加剧由于白色粉末覆盖造成的电流集中现象。电流长时间集中将使焦耳热持续积累, 进而导致缓冲层的损伤。

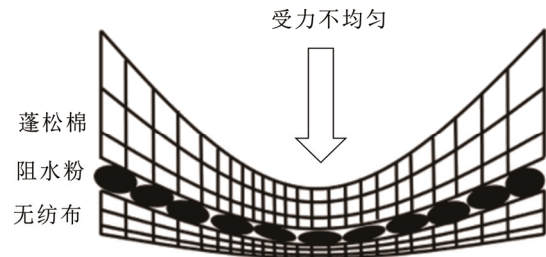


图 5 不均匀受力对缓冲层微观结构变化的影响^[25]

Fig.5 Effect of non-uniform stress on the microstructure of buffer layer^[25]

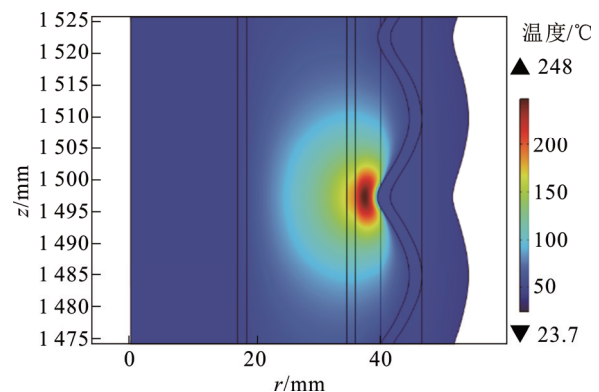


图 6 缓冲层与铝护套局部接触良好下的温度分布仿真^[38]

Fig.6 Simulation of temperature distribution under good local contact between buffer layer and aluminum sheath^[38]

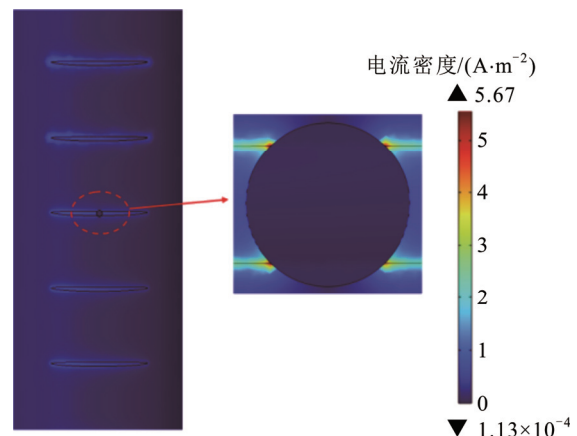


图 7 白色粉末覆盖缓冲层时缓冲层电流密度分布^[27]

Fig.7 Current density distribution of the buffer layer when white powder covers the surface of buffer layer^[27]

进一步, 在温度与电缆内部压力的作用下, 白色粉末在持续生成的同时向电缆内部发展。当白色粉末贯穿缓冲层后, 其引发的温升(204 °C)足以引起绝缘屏蔽层的熔融, 在高温与压力的作用下白色粉末嵌入绝缘屏蔽, 造成绝缘屏蔽的损伤^[10,27]。

无论是干燥还是潮湿情况下, 若缓冲层烧蚀损

伤发展至绝缘屏蔽, 都将对电缆的稳定运行造成威胁。一旦出现过电压或电流集中加剧, 有可能导致电缆本体的击穿, 但这一过程的机制尚不明确, 仍需深入研究。

烧蚀过程中局部温度升高引发的电缆结构损坏会导致电性能的变化, 也会伴随着气体的产生。相关研究表明 PET 受热分解产物中含有 CO、CO₂、CH₄、C₂H₆、C₂H₂、C₂H₄ 等小分子气体^[43-45]以及对苯二甲酸、苯甲酸等大分子芳香族化合物^[33,46], 分解示意图如图 8 所示, 具体反应过程可以参考相关文献。NaPA 的热分解产物包括 CO₂、CO、CH₄、C₂H₄、H₂ 等^[47-48]。上述变化都可以作为烧蚀故障检测的依据。

2 缓冲层烧蚀故障的检测技术

如图 9 所示, 缓冲层烧蚀故障的检测依赖于检测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。国内现阶段已提出有关高压电缆缓冲层烧蚀缺陷检测方法: 根据烧蚀会伴随着电缆温度的升高提出的局部温升检测^[11,42], 根据烧蚀过程中存在放电现象提出的局部放电检测^[17], 根据缓冲层烧蚀后电缆结构与性能变化提出的 X 射线检测^[49]与宽频阻抗谱检测^[18], 根据烧蚀后的电缆中存在大量缓冲层分解产生的气体提出的特征气体检测^[33,50]等。虽然相关报道显示这些方法能够在特定条件下检测到高压电缆线路中的烧蚀缺陷, 但烧蚀故障电缆现场情况复杂, 如何在各类工况下实现烧蚀故障的准确检测以及如何实现烧蚀故障的分级诊断仍需继续探索。

2.1 基于烧蚀过程中物理信号的检测方法

2.1.1 局部温升检测

无论是受力不均匀还是电化学腐蚀生成白色粉末, 均会造成电流密度的集中, 进而由于电流的热效应造成局部温度的升高。检测电缆表面的温度分布是快速实现缺陷定位的最便捷的方式。基于温度的检测方式已经在现场高压电缆故障定位中应用^[11], 在现场检测中发现了大量如图 10 所示的发热点。但温度的检测容易受到周围环境的影响, 误判率较高。

2.1.2 局部放电检测

根据部分烧蚀缓冲层表面存在的放电痕迹, 研究者提出了检测局部放电来实现烧蚀检出的方式。电缆内部的局部放电可以通过超声信号、高频电流

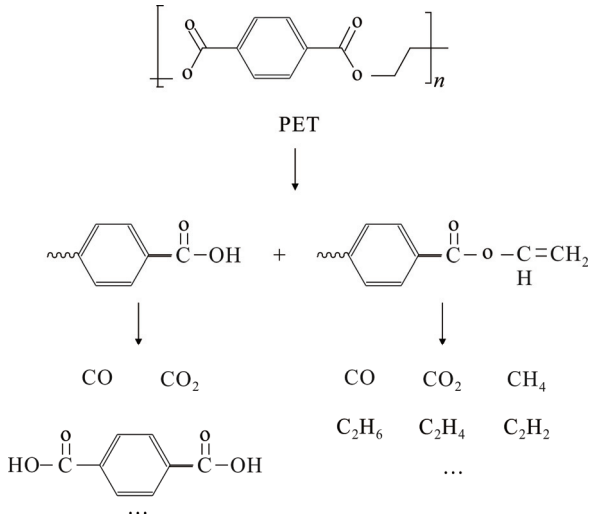


图 8 PET 受热分解产物示意图

Fig.8 Schematic diagram of decomposition products of PET under heat

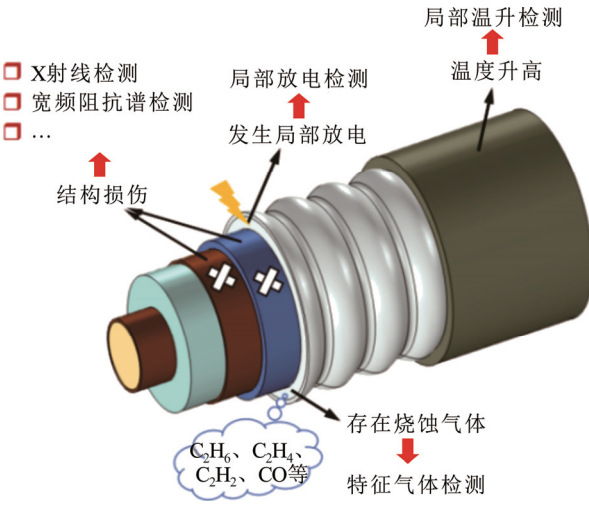


图 9 缓冲层烧蚀故障的检测方法

Fig.9 Detection method of buffer layer ablative fault

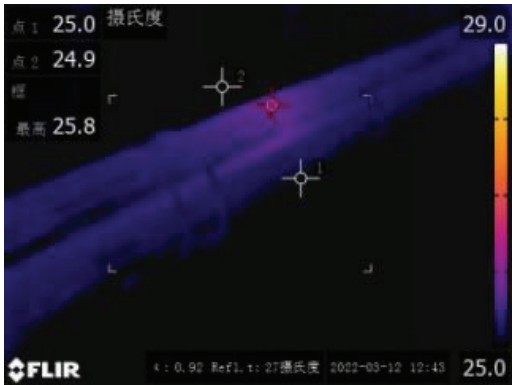


图 10 电缆外护层的发热现象

Fig.10 The heating phenomenon of the outer sheath of the cable

信号等表征^[36,51]。但是实验测试结果显示电缆内部并不是长期持续放电,且放电时间没有确定的规律,所检测到的局放信号多点分布,大小不定,发生密度不稳定^[52]。因此,局部放电法在电缆缓冲层缺陷领域成功检测的案例相对较少,相关的检测设备与检测方法还需完善。

2.2 基于烧蚀导致的电缆结构变化的检测方法

2.2.1 X 射线检测

X 射线能够实现烧蚀缺陷检测的基础是电缆中各部分的射线吸收系数相差很大,相应图像可以显示电缆结构的差异(见图 11(a))。已有通过 X 射线检测到缓冲层烧蚀缺陷的报道,并且借助深度神经网络的算法模型进行图像分析,实现对电缆内是否存在缓冲层缺陷的自动识别(见图 11(b))^[49]。但 X 射线检测的灵敏度有待提升;同时现场部分角度受电缆敷设方式等实际情况的影响无法拍摄,可能遗漏故障信息;此外,其操作难度较高、后处理过程复杂都对使用者提出了较高的要求,X 射线对人体的损伤也不容忽视。

2.2.2 宽频阻抗谱检测

结合缓冲层烧蚀后电缆结构损坏导致电性能发生变化这一特征,部分学者提出了利用宽频阻抗谱检测烧蚀故障。仿真结果显示,缓冲层受潮或破损后^[18,53],频域反射谱会发生偏移,谐振频率点会变化。但相关实验显示宽频阻抗法对缓冲层烧蚀引起的阻抗变化不敏感^[54],且检测结果可重复性不佳。能够采用宽频阻抗谱检出的缓冲层烧蚀缺陷,大多已发生严重烧蚀,临近电缆击穿阶段。因此,宽频阻抗谱法具有理论上的可行性,但实际检测应用还需进一步探索。

2.3 基于烧蚀产物的检测方法

电化学腐蚀过程与缓冲层材料的热分解会伴随着多种气体产物的释放,这些气体产物可以作为故障检测的指标。相关研究表明 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 H_2 和 CO 等小分子气体的浓度可以作为特征气体实现烧蚀故障的检测^[11,50]。烧蚀产生的含量较高其他小分子气体还包括 CH_4 、 CO_2 等, CH_4 作为 XLPE 绝缘材料的交联副产物之一^[50,55], CO_2 作为空气中大量存在的气体之一,难以辨别其是否源于缓冲层烧蚀,不适合作为烧蚀检测的特征气体。

目前对烧蚀气体的分析主要借助气相色谱仪,其准确度高,但响应速度较慢,现场检测效率较低。近年来,李建英等人研发了基于傅里叶变换红外光谱的检测方法^[56-58],具有快速、灵敏的优势,目前

相关设备检测线性误差 1%,响应时间 5~10 s,能够满足缓冲层烧蚀故障的现场检测需求,但需要继续向小型化、轻量化发展。

特征气体的检测方式已得到现场应用,在某地烧蚀故障引发击穿的电缆段进行实际取气检测,相关结果见图 12。结果显示烧蚀故障处与无烧蚀处电缆内上述特征气体的数密度均存在较大区别。现场结果验证了特征气体 C_2H_6 、 C_2H_4 、 C_2H_2 、 H_2 和 CO 等的浓度可以反映是否存在缓冲层烧蚀。但实施气体检测前需要对可能存在故障的区域定位以减小取气检测工作量,这可以通过局部温升检测实现。因此温度与特征气体相结合是实现缓冲层烧蚀缺陷定位与检测的有效手段。这一联合检测方式已在烧蚀故障检测中现场应用,有效性已得到初步验证^[11]。

此外,特征气体来自于缓冲层材料的分解,因此其浓度与缓冲层损伤的程度密切关联,但这一联系目前尚不明确。探明特征气体浓度与缓冲层烧蚀严重程度之间的定量关系,将对实现高压电缆缓冲层烧蚀缺陷严重程度与发展状态的诊断具有重要的实际意义。

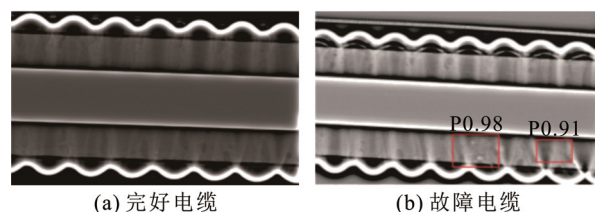


图 11 高压电缆的 X 射线透照图像^[49]

Fig.11 X-ray image of a high-voltage cable^[49]

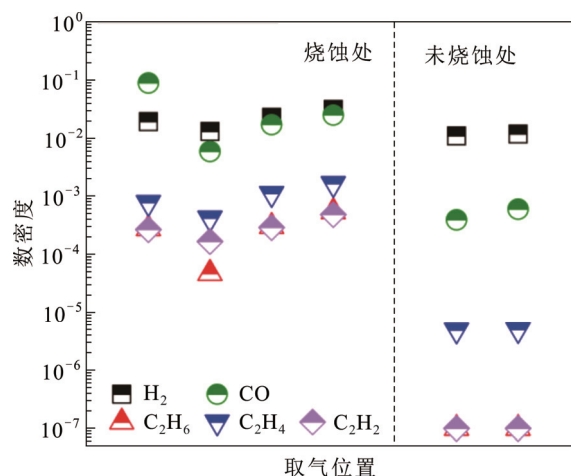


图 12 现场检测的电缆内不同位置的气体浓度

Fig.12 Gas concentrations at different locations in the cable collected on site

3 缓冲层烧蚀故障解决方案

目前, 在实际运维工作中解决高压电缆阻水缓冲层烧蚀故障一般采用整线更换的方式, 这种方式耗时长、成本高, 亟需新的解决方案。现阶段针对不同场景提出了两类方案(如图 13 所示): ①针对存量电缆, 修复故障缓冲层; ②针对增量电缆, 严控缓冲层入网质量以及使用平滑铝护套结构替代现有的皱纹铝护套结构。

3.1 存量电缆缓冲层烧蚀故障修复技术

缓冲层修复技术通过将具有导电或半导电特性的修复剂注入电缆中, 重构绝缘屏蔽与皱纹铝护套之间的电气接触, 缓解因电流集中的热效应引发的局部温升问题。关于修复技术的应用范围, 目前业内普遍认为对于未伤及绝缘屏蔽的烧蚀故障电缆可以采用修复技术延长其服役时间, 但绝缘屏蔽已损伤的电缆应尽快更换以避免更为严重的事故。

3.1.1 修复技术总体要求

电流分布不均匀导致的局部过热是缓冲层烧蚀故障发展的主要驱动力。为消除缓冲层中焦耳热的积累, 同时考虑缓冲层在电缆中的功能与电缆运维工作中的实际需求, 缓冲层修复技术应满足以下几点要求:

(1)修复剂需要具有良好且稳定的导电性能和导热性能, 能够长期有效改善缓冲层导电能力并减少热量积累。

(2)修复剂修复缓冲层并填充气隙后, 应具备与原有缓冲层接近的机械缓冲作用。

(3)修复剂应避免出现电化学腐蚀以及与屏蔽层不相容的问题, 保证修复后的电缆的长期运行稳定性。

(4)应使修复剂均匀分布在缓冲层与气隙中, 有效改善绝缘屏蔽与铝护套之间的电气接触。

3.1.2 修复剂的分类

根据修复剂在电缆中的相态, 修复剂可分为导电粉体型、半导电液体型、可固化半导电液体型 3 类。导电粉体型修复剂以石墨、石墨烯等良导体作为介质, 通过高压气泵直接吹入或制备气溶胶后注入电缆的方式进行修复。其修复机理是导电粉体在电缆中建立新的径向导电通道。这类修复剂对缓冲层机械性能与阻水性能影响小, 化学性质稳定。但其扩散距离较短, 在电缆中的分布不均匀且不稳定, 不利于长距离、大规模的工程应用^[59]。

半导电液体型修复剂以液相作为载体, 辅以不同的助剂, 将导电填料注入电缆中。液体修复剂能够恢复缓冲层中的导电路径, 同时填充铝护套与缓冲层之间的气隙建立新的导电通道。液相载体包括硅油类和有机溶液类, 导电填料包括碳系填料和导电离子型填料。液体型修复剂流动性好、扩散均匀, 能够有效完成长距离电缆缓冲层的修复, 已有部分应用案例。但液体修复的长期稳定性需要验证, 包括液体修复剂可能存在的渗漏、与电缆结构的长期相容性, 以及导电填料的沉降导致修复剂导电性能变化等问题^[19,60]。

可固化半导电液体型修复剂的修复机理与液体型修复剂相同, 区别在于其采用存在反应基团的液相载体, 修复剂以液态注入电缆后, 在电缆内发生反应固化。液相载体包括硅橡胶、聚氨酯和可聚合有机羧酸, 导电填料可以分为碳系填料和离子型填料。可固化型修复剂具备液体的流动性和扩散均匀性, 又能够固化保证电缆长期运行的稳定性。但当前报道的可固化修复剂在黏度、固化条件等性能上还未能满足工程化应用要求, 需要进一步完善^[20-21,60-61]。

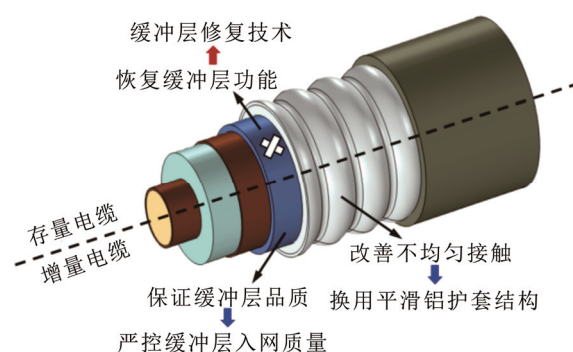


图 13 缓冲层烧蚀故障的解决方案

Fig.13 Solution of buffer layer ablative failure

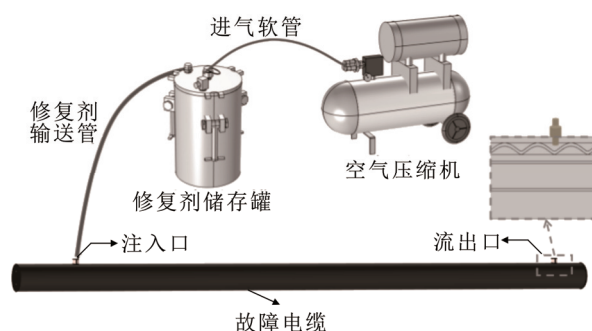


图 14 一种典型高压电缆缓冲层烧蚀修复工艺示意图

Fig.14 A typical high-voltage cable buffer layer ablative repair process diagram

关于修复工艺已经有颇多方案, 总体技术思路大致相同, 如图 14 所示为一种典型修复工艺示意图。导电粉体型修复剂常采用气体吹入的方式, 两类液体型修复剂常通过施加压力注入。部分工艺会在流出口增加抽气装置促进修复剂在电缆中的流动^[61-63]。

3.1.3 修复技术的效果与可靠性评估

目前国内已初步形成了高压电缆缓冲层烧蚀故障修复技术路线, 但是尚处于实验室研究阶段, 缺乏针对实际电缆的修复效果和长期可靠性量化评价方法。

基于缓冲层修复技术的总体要求, 评价修复效果的指标应包括绝缘屏蔽与金属护套之间的导电水平与导热水平, 这决定着是否恢复良好的电气接触以及能否减少热量积累^[20,64]。导电水平的恢复效果可以通过铝护套和绝缘屏蔽层之间的电阻等能够体现缓冲层导电性能的参量来表征。如图 15 所示, 修复后电缆铝护套与绝缘屏蔽层之间的电流更稳定且没有尖峰, 说明修复之后的缓冲层中导电通道稳固、微放电更少。导热水平的恢复可以通过修复前后片状试样的热导率等参量表征。同时, 导电水平与导热水平的恢复有利于缓解局部电流集中, 进而缓解电缆中的过热现象, 因此可以通过检测修复前后的电缆在相同工况下的温度初步判断修复效果。

考虑到缓冲层在电缆中具有缓解机械压力、避免机械损伤的作用, 需要关注修复后缓冲层的机械缓冲作用。这可以通过修复后缓冲层片状试样的弹性、硬度、压缩率等表征。

缓冲层修复技术长期可靠性的评价, 一方面需要关注修复后缓冲层自身性能的稳定性, 包括导电水平与导热水平等, 对相关参量进行长期监测; 另一方面还需要关注修复后的缓冲层与其他电缆结构的稳定共存, 包括与屏蔽层的相容性, 以及与铝护套之间不发生电化学腐蚀。上述特性可以通过修复剂与绝缘屏蔽试样的相容性测试、电工铝材料在修复剂中浸泡后的极化曲线或电化学阻抗谱测试等进行表征。

目前关于缓冲层修复技术的修复效果和长期可靠性评价方法还处于探索阶段, 仍需继续研究:

(1)构建基于多物理量的修复效果评价体系。除了相关标准规定的电缆基础性能外^[29-30], 相关研究表明温度、特征气体、高频电流信号可以作为缓冲层烧蚀的特征信号^[11,50-51], 这为缓冲层修复效果的评价提供了新的思路。

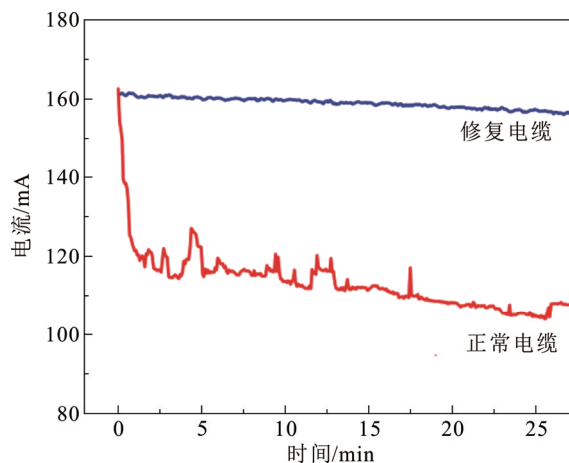


图 15 真型电缆在修复前后的烧蚀电流曲线对比^[20]

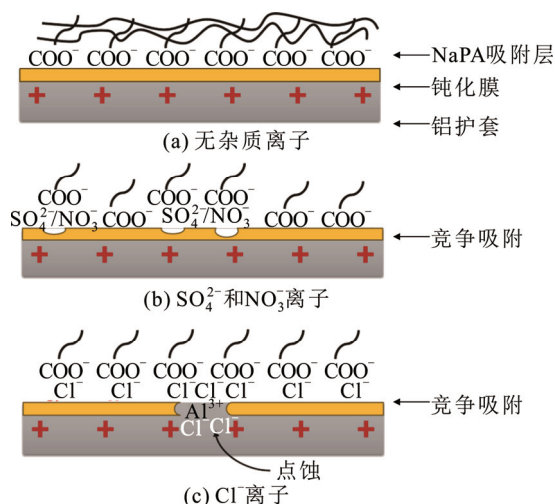
Fig.15 Comparison of ablative current curve of real cable before and after repair^[20]

(2)构建缓冲层修复长期效果评价体系。一方面选择能够表征修复后缓冲层性能的、便于长期监测的指标, 验证修复缓冲层的长期稳定性。另一方面关注修复剂对电缆结构的长期影响。修复后的缓冲层可能会与绝缘屏蔽发生“溶胀”或与铝护套发生电化学腐蚀, 不同修复剂应用后发生上述现象的严重程度, 以及给电缆运行带来的影响有待进一步研究。

3.2 增量电缆缓冲层烧蚀故障防治措施

对于增量电缆, 一方面应该严格把控入网电缆缓冲层的质量。相关研究表明, 缓冲层中的杂质阴离子对烧蚀的影响不可忽视^[65-67]。如图 16(a)所示, 无杂质阴离子时, NaPA 聚合物网络可吸附于铝表面形成隔离层, 铝自身亦会生成氧化铝或氢氧化铝钝化膜, 二者共同构成“双层”屏障。然而, 如图 16(b)、(c), 当存在杂质阴离子时, 其与 NaPA 中带负电的 COO^- 产生竞争吸附^[66]。在常见杂质阴离子中, NO_3^- 和 SO_4^{2-} 因离子质量与半径较大, 竞争吸附能力较弱; 而氯离子(Cl^-)因其半径较小竞争吸附显著, 能引发严重的点蚀并穿透钝化膜, 会促进电化学腐蚀、导致电缆结构的破坏^[66]。

因此电缆厂家采用的缓冲层应进行相关测试, 以保证相关离子在适宜浓度范围内, 同时可以采用防腐材质的皱纹铝护套, 以达到防治缓冲层烧蚀的目的^[68]。此外, 高压电缆必须保证绝缘屏蔽与铝护套具有良好的电气接触, 这需要缓冲层起到良好的电气连接作用。施楠楠等提出一种电缆缓冲层与金属护套之间电气接触性能的改进测试方法, 能够应用于电缆入网前的缓冲层测评^[69]。但目前业内

图 16 杂质阴离子对缓冲层烧蚀的影响示意图^[66]Fig.16 Schematic diagram of the effect of impurity anions on the ablation of buffer layer^[66]

缺乏对绝缘屏蔽与铝护套之间的电气接触性能的统一评价方法与标准。

另一方面,应用平滑铝护套结构来代替皱纹铝护套结构也是防治烧蚀故障的有效手段。平滑铝护套结构的优势在于铝护套与半导体缓冲层呈紧密面接触,将有效改善电缆径向的电气连接,缓解电流集中。但平滑铝护套结构的高压电缆在预防烧蚀故障方面的长期有效性有待验证。

4 结论与建议

1) 缓冲层烧蚀的机理可以梳理为:干燥条件下电缆受力不均匀会导致局部电流集中,不断累积焦耳热使温度过高,导致缓冲层的损伤,并在持续发展后灼伤绝缘屏蔽等结构;潮湿条件下除发生上述过程外,还存在电化学腐蚀,反应生成的高阻性白色粉末同样会导致局部电流集中产生温升,且白色粉末可能嵌入绝缘屏蔽导致较为严重的损伤。

2) 缓冲层烧蚀的检测方式主要包括 X 射线成像、宽频阻抗谱检测、局部放电检测、温度检测与特征气体检测等。其中温度检测结合特征气体检测有望实现烧蚀故障的有效检出。

3) 缓冲层烧蚀的解决方案包括以下两类:针对存量电缆的缓冲层修复技术;针对增量电缆的严控缓冲层入网质量以及换用平滑铝护套结构等防治方法。

根据目前缓冲层烧蚀故障的研究现状,后续需要在以下几个方面开展相关研究:

1) 明确缓冲层烧蚀后损伤发展至主绝缘并导

致主绝缘击穿的过程,指导相关故障的防治。

2) 针对缓冲层烧蚀故障的定量检测方式展开研究,有效评估缓冲层烧蚀的严重程度,以便据此采取相应的处理方式:整段更换电缆、对故障段进行修复或持续监测。

3) 根据修复技术的总体要求提出修复效果与长期可靠性的量化评价方法,并据此验证修复剂在实际电缆修复中的有效性,指导修复剂的研发与应用。

4) 明确高压电缆中缓冲层入网标准,对入网缓冲层进行严格质量把关;明确平滑铝护套结构的高压电缆在预防缓冲层烧蚀方面的有效性,并针对相关技术细节开展科研攻关。

参考文献 References

- [1] 孟峥, 李 旭, 于 洋, 等. 高压 XLPE 电缆缓冲层故障研究现状综述[J]. 中国电力, 2021, 54(4): 33-41, 55.
MENG Zhengzheng, LI Xu, YU Yang, et al. Review on the research status of the high voltage XLPE cable buffer layer failure[J]. Electric Power, 2021, 54(4): 33-41, 55.
- [2] JIANG L, XIN Y, YAN W B, et al. Study on ablation between metal sheath and buffer layer of high voltage XLPE insulated power cable[C]//2019 2nd International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Guangzhou, China: IEEE, 2019: 372-375.
- [3] TEMPESTA T, VECCHIATO D, GIRARDI P. The landscape benefits of the burial of high voltage power lines: a study in rural areas of Italy[J]. Landscape and Urban Planning, 2014, 126: 53-64.
- [4] 程卓林, 武康宁, 王佳乐, 等. 稳定型氧化锌压敏电阻高温直流老化的转变特性[J]. 电工技术学报, 2025, 40(9): 2958-2969.
CHENG Zhuolin, WU Kangning, WANG Jiale, et al. Transition characteristics of stable ZnO varistors during DC Aging at high temperatures[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2025, 40(9): 2958-2969.
- [5] 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.
- [6] 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 of high voltage XLPE cable buffer layer[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2019.
- [7] 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.
- [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] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 廖子涵. 110 kV 高压电缆护层烧蚀对绝缘屏蔽层影响规律研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2022.
LIAO Zihan. Study on the influence of shield ablation on insulation shield of 110 kV high voltage cable[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2022.
- [13] 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.
- [14] 赵西元. 气隙放电与电化学腐蚀诱发高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障机理研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2021.
ZHAO Xiyuan. Study on Mechanism of buffer layer ablation failure induced by air gap discharge and electrochemical corrosion in high voltage XLPE cable[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2021.
- [15] 张浩然. 不均匀微结构和电化学过程对高压电缆缓冲层烧蚀的影响[D]. 西安: 西安交通大学, 2023.
ZHANG Haoran. Effect of heterogeneous microstructure and electrochemical process on the ablation of buffer layer of high voltage cable[D]. Xi'an, China: Xi'an Jiaotong University, 2023.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 封刚铎. 频域反射谱对高压电缆缓冲层缺陷检测的性能研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2023.
FENG Gangduo. Performance research of frequency domain reflection spectroscopy for the detection of buffer layer defects of high voltage cable[D]. Xi'an, China: Xi'an University of Technology, 2023.
- [19] 任志刚, 陈平, 门业堃, 等. 丙烯酸基缓冲层烧蚀缺陷修复液的修复效果研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(6): 63-67.
REN Zhigang, CHEN Ping, MEN Yekun, et al. Study on repair effect of repair solution for ablation defect in acrylic based buffer layer[J]. Insulating Materials, 2024, 57(6): 63-67.
- [20] 葛洲, 武康宁, 赵鸽, 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): 4917-4926.
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): 4917-4926.
- [21] 凌颖, 黄嘉盛, 李濛, 等. 基于硅橡胶基调控的高压电缆缓冲层缺陷修复研究[J]. 广东电力, 2023, 36(7): 84-93.
LING Ying, HUANG Jiasheng, LI Meng, et al. Research on defect rejuvenation of buffer layer for high voltage cable based on silicone rubber regulation[J]. Guangdong Electric Power, 2023, 36(7): 84-93.
- [22] 黄肖为, 张玉成, 洪晓东, 等. 110 kV 平滑铝套电缆缓冲层特性及其电气性能研究[J]. 科技创新与应用, 2024, 14(19): 51-55.
HUANG Xiaowei, ZHANG Yucheng, HONG Xiaodong, et al. Study on characteristics and electrical performance of buffer layer of 110 kV smooth aluminum sheath cable[J]. Technology Innovation and Application, 2024, 14(19): 51-55.
- [23] 郝艳捧, 陈林昊, 张鹏, 等. 电、热、力仿真研究平滑铝护套高压 XLPE 电缆缓冲层设计[J]. 广东电力, 2024, 37(8): 125-134.
HAO Yanpeng, CHEN Linhao, ZHANG Peng, et al. Electrical, thermal and mechanical simulation study of buffer layer design of smooth aluminum sheathed high voltage XLPE cables[J]. Guangdong Electric Power, 2024, 37(8): 125-134.
- [24] 金程逸畅, 李华春, 任志刚, 等. 平滑铝护套电缆蛇形敷设下热机械效应的有限元分析[J]. 绝缘材料, 2024, 57(9): 158-165.
JIN Chengyichang, LI Huachun, REN Zhigang, et al. Finite element analysis on thermo-mechanical effects of smooth aluminium sheathed cables under serpentine laying[J]. Insulating Materials, 2024, 57(9): 158-165.
- [25] 任志刚, 郭卫, 门业堃, 等. 受力不均匀性对高压电缆缓冲层烧蚀故障发展过程的影响[J]. 绝缘材料, 2023, 56(8): 80-86.
REN Zhigang, GUO Wei, MEN Yekun, et al. Influence of inhomogeneous force on development process of high voltage cables buffer layer ablation faults[J]. Insulating Materials, 2023, 56(8): 80-86.
- [26] LI Z J, LI X, FANG S C, et al. Effects of the environmental factors on electrical properties of high voltage cable buffer layer[C]//2020 IEEE 3rd International Conference on Dielectrics (ICD). Valencia, Spain: IEEE, 2020: 546-549.
- [27] 张可, 高建, 武康宁, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀致绝缘屏蔽损伤的机理研究[J/OL]. 中国电机工程学报, 2024: 1-10[2024-11-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241665>.
ZHANG Ke, GAO Jian, WU Kangning, et al. Research on damaging mechanisms of insulation shield induced by buffer layer ablation in high-voltage cables[J/OL]. Proceedings of the CSEE, 2024: 1-10 [2024-11-21]. <https://doi.org/10.13334/j.0258-8013.pcsee.241665>.
- [28] 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.
- [29] 中国机械工业联合会. 电缆和光缆用阻水带: JB/T 10259—2001[S]. 北京: 机械工业出版社, 2001.
China Machinery Industry Federation. Waterblocking tape for electric cables and optical fiber cables: JB/T 10259—2001[S]. Beijing, China: China Machine Press, 2001.
- [30] 中国标准化协会. 额定电压 26/35 kV 以上挤包绝缘电力电缆用半导电缓冲层材料: T/CAS 374—2019[S], 2019.
China Association for Standardization. Semi-conducting buffer mate-

- rial with extruded insulation power cable for rated voltages above 26/35 kV: T/CAS 374—2019[S], 2019.
- [31] 惠宝军. 高压电缆缓冲层烧蚀故障机理、缺陷检测与消除方法研究[D]. 广州: 华南理工大学, 2023.
- HUI Baojun. Research on ablative fault mechanism, defect detection and elimination methods of high voltage cable buffer layer[D]. Guangzhou, China: South China University of Technology, 2023.
- [32] SU C Q. Failure analysis of three 230kV XLPE cables[C]//2010 IEEE/PES Transmission and Distribution Conference and Exposition: Latin America (T&D-LA). Sao Paulo, Brazil: IEEE, 2010: 22-25.
- [33] 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.
- [34] CHENG Y T, HAO Y P, CHEN Y, 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.
- [35] 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.
- [36] WU Z H, LAI Q B, ZHOU W Q, 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.
- [37] 刘宏亮, 刘若溪, 陈 平, 等. 高压电缆缓冲层烧蚀及白斑模拟试验研究[J]. 广东电力, 2022, 35(6): 135-142.
- LIU Hongliang, LIU Ruoxi, CHEN Ping, et al. Study on simulation experiment of ablation and white powder of buffer layer in high-voltage cable[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(6): 135-142.
- [38] 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.
- [39] LIU Y, CHEN J M, ZHANG H Y. Study on the current concentration and local heating of the buffer layer in HV XLPE cables[C]//2021 International Conference on Electrical Materials and Power Equipment (ICEMPE). Chongqing, China: IEEE, 2021: 1-4.
- [40] 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.
- [41] 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.
- [42] 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.
- [43] ZHOU W Q, LI L C, CHENG H, et al. Gas production analysis for the buffer layer of high-voltage cross-linked polyethylene cables[J]. High Voltage, 2024, 9(5): 1149-1158.
- [44] SOVOVÁ K, FERUS M, MATULKOVÁ I, et al. A study of thermal decomposition and combustion products of disposable polyethylene terephthalate (PET) plastic using high resolution fourier transform infrared spectroscopy, selected ion flow tube mass spectrometry and gas chromatography mass spectrometry[J]. Molecular Physics, 2008, 106(9/10): 1205-1214.
- [45] ZHOU W Q, CHENG H, HUI B J, 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.
- [46] DZIĘCIOŁ M, TRZESZCZYŃSKI J. Temperature and atmosphere influences on smoke composition during thermal degradation of poly(ethylene terephthalate)[J]. Journal of Applied Polymer Science, 2001, 81(12): 3064-3068.
- [47] BUZANOWSKI W C, CUTIÉ S S, HOWELL R, et al. Determination of sodium polyacrylate by pyrolysis-gas chromatography[J]. Journal of Chromatography A, 1994, 677(2): 355-364.
- [48] LÉPINE L, GILBERT R. Thermal degradation of polyacrylic acid in dilute aqueous solution[J]. Polymer Degradation and Stability, 2002, 75(2): 337-345.
- [49] 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.
- [50] KONG J M, ZHOU K, CHEN Y D, et al. A novel condition assessment method for corrugated aluminum sheathed XLPE cables based on evolved gas analysis[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2023, 30(2): 883-891.
- [51] 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.
- [52] 蒋晓娟, 何 伟. 一起通过局放在线检测技术成功发现的 110 kV 电缆本体缺陷[J]. 华东电力, 2011, 39(11): 1960-1963.
- JIANG Xiaojuan, HE Wei. Defects of 110 kV cable body successfully discovered by local on-line inspection technology[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11): 1960-1963.
- [53] 黄友聪, 郑钟楠, 林梓圻, 等. 基于频域反射法的高压电缆阻水缓冲层缺陷定位研究[J]. 绝缘材料, 2024, 57(6): 86-95.
- HUANG Youcong, ZHENG Zhongnan, LIN Ziqi, et al. Research on locating defects in water-blocking buffer layer of high-voltage cables based on frequency domain reflection method[J]. Insulating Materials, 2024, 57(6): 86-95.
- [54] 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.
- [55] XIE Y, LIU J J, FENG C, et al. Study on technical parameters of X-ray stereoscopic imaging of ablative defects for water blocking buffer layer in high voltage cable[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2022, 2401(1): 012057.
- [56] LI X S, TANG X J, CHEN H Q, et al. Quantitative analysis method for the Fourier transform Infrared spectroscopy of gases[C]//Proceedings

- of SPIE 12972, International Academic Conference on Optics and Photonics (IACOP 2023). Online, China: SPIE, 2024: 129720J.
- [57] LI X S, TANG X J, WANG B, et al. An adaptive extended Gaussian peak derivative reweighted penalised least squares method for baseline correction[J]. Analytical Methods, 2023, 15(44): 6048-6060.
- [58] 李晓杉, 汤晓君, 陈厚清, 等. 基于 FTIR 的 XLPE 电缆缓冲层烧蚀缺陷特征气体检测技术及应用[J]. 高电压技术, 2025, 51(2): 678-685.
- LI Xiaoshan, TANG Xiaojun, CHEN Houqing, et al. Characteristic gases detection technology and application of buffer layer ablation defects in XLPE cables based on FTIR[J]. High Voltage Engineering, 2025, 51(2): 678-685.
- [59] 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.
- [60] 蔡凡一, 曾 浩, 周柏杰, 等. 一种电缆缓冲层烧蚀抑制剂及其制备方法及应用: CN118336606A[P]. 2024-07-12.
- CAI Fanyi, ZENG Hao, ZHOU Bojie, et al. Cable buffer layer ablation inhibitor and preparation method and application thereof: CN118336606A[P]. 2024-07-12.
- [61] YIN Y Y, ZHOU W Q, WU Z H, et al. Revitalising high voltage cable: exploring effective repair methods and influential factors for buffer layer defects using conductive silicone rubber[J]. High Voltage, 2024, 9(6): 1357-1369.
- [62] QIAN M D, ZHOU S Y, CAI J, et al. Study on design and feasibility of acrylic-based repair liquid for buffer layer ablation failure[M]//YANG Q X, LI Z W, LUO A. The Proceedings of the 18th Annual Conference of China Electrotechnical Society. Singapore, Singapore: Springer, 2024: 410-419.
- [63] 金海云, 王纯洁, 葛 洲, 等. 高压电缆阻水缓冲层的聚氨酯基导电修复剂及其制备方法: CN117700662A[P]. 2024-03-15.
- JIN Haiyun, WANG Chunjie, GE Zhou, et al. Polyurethane-based conductive repairing agent for water-blocking buffer layer of high-voltage cable and preparation method of polyurethane-based conductive repairing agent: CN117700662A[P]. 2024-03-15.
- [64] 宋鹏先, 朱晓辉, 方 静, 等. 一种基于脉冲电压的高压电缆缓冲层修复效果评价方法: CN115343533A[P]. 2022-11-15.
- SONG Pengxian, ZHU Xiaohui, FANG Jing, et al. High-voltage cable buffer layer repair effect evaluation method based on pulse voltage: CN115343533A[P]. 2022-11-15.
- [65] 武康宁, 葛 洲, 张 可, 等. 一种高压电缆缓冲层中杂质离子检测与烧蚀风险评价方法: CN119936235A[P]. 2025-05-06.
- WU Kangning, GE Zhou, ZHANG Ke, et al. Method for detecting foreign ions in buffer layer of high-voltage cable and evaluating ablation risk: CN119936235A[P]. 2025-05-06.
- [66] GE Z, WU K, ZHANG K, et al. Effects of impurity anions in the buffer layer on electrochemical corrosion and ablation of high-voltage cables[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2025, 32(6): 3661-3668.
- [67] 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.
- [68] 武康宁, 杨子弋, 葛 洲, 等. 一种基于电化学防腐涂层的缓冲层烧蚀防治方法: CN119786163A[P]. 2025-04-08.
- WU Kangning, YANG Ziyi, GE Zhou, et al. Buffer layer ablation prevention method based on electrochemical anticorrosive coating: CN119786163A[P]. 2025-04-08.
- [69] 施楠楠, 夏俊峰, 黄 阳. 高压电力电缆缓冲层测试方法研究及测试装置设计[J]. 电线电缆, 2024, 67(3): 36-40.
- SHI Nannan, XIA Junfeng, HUANG Yang. Research on test method and design of test device for high voltage power cable buffer layer[J]. Wire & Cable, 2024, 67(3): 36-40.



WU Kangning
Ph.D.

Corresponding author



GAO Jian
Ph.D



REN Zhigang
Ph.D. candidate
Senior engineer



LI Jianying
Ph.D., Professor

武康宁(通信作者)

1993—, 男, 博士, 助理教授

研究方向为电介质理论及其应用、先进电工材料

E-mail: wukning@xjtu.edu.cn

高 建

1996—, 男, 博士

主要从事智能绝缘材料与高电压绝缘技术研究工作

E-mail: g142102811@stu.xjtu.edu.cn

任志刚

1983—, 男, 博士生, 高工

主要从事高电压与绝缘技术, 高压电缆状态评估、运维检测等领域的研究工作

E-mail: renzhigang2009@163.com

李建英

1972—, 男, 博士, 教授

研究方向为电介质物理及应用、先进电工材料

E-mail: lijy@xjtu.edu.cn

收稿日期 2024-11-21 在线出版日期 2025-04-21 编辑 曹昭君