

高压电缆缓冲层缺陷检测技术与方法的研究进展

吕 盼, 邹抄军, 李宝鹏, 高 彬, 田忠元*

(国网克拉玛依供电有限公司, 新疆 克拉玛依 834000)

摘 要: 高压交联聚乙烯(XLPE)电缆构成了城市电网的核心输配电通道, 其缓冲层因烧蚀而失效已成为威胁电缆本体安全和电网稳定运行的重要隐患。本文总结了高压电缆缓冲层缺陷检测的研究现状, 对电气检测法(宽频阻抗谱法、局部放电检测法)、化学气体检测法(特征气体分析)及影像学检测法(X射线成像法、CT检测技术)等主流方法, 分别就其检测原理、效果、适用场景与优缺点进行了梳理和对比, 最后指出现有技术面临的挑战与发展方向。

关键词: 高压电缆; 缓冲层; 缺陷检测; 状态评估

Research progress on defect detection technologies and methods for buffer layer of high-voltage cable

Lü Pan, Zou Chaojun, Li Baopeng, Gao Bin, Tian Zhongyuan*

(State Grid Karamay Power Supply Co., Ltd., Karamay 834000, China)

Abstract: High-voltage cross-linked polyethylene (XLPE) cables constitute the core power transmission and distribution channels of urban power grids. Buffer layer failure caused by ablation has become a major hidden danger threatening the safety of cable body and the stability of power grid operation. This paper systematically summarized the research status of defect detection technologies for high-voltage cable buffer layers. Three mainstream methods, including electrical detection methods (broadband impedance spectroscopy, partial discharge detection), chemical gas detection methods (characteristic gas analysis), and imaging detection methods (X-ray, CT detection), were reviewed and compared in terms of their detection principles, effectiveness, applicable scenarios, and advantages and disadvantages. Finally, the challenges faced by existing technologies and future development directions were pointed out.

Key words: high-voltage cable; buffer layer; defect detection; condition assessment

0 引言

随着城市用电负荷的快速攀升, 以及电网对输电能力和供电质量要求的日益提高, 城市电网中电缆的应用范围不断扩大, 电缆的投运数量和相关市场规模也呈现持续增长态势^[1]。交联聚乙烯(cross-linked polyethylene, XLPE)高压电缆因其出色的电气特性、强大的输电能力以及良好的工程适应性, 已在电力系统内得到了大规模应用。随着电缆用量持续增长, 对供电安全与可靠性的要求也日益提升。在此背景下, 电缆缓冲层烧蚀作为影响线路稳定运行的重要隐患, 亟待有效识别与防控。2001—2019年间, 仅北京市此类故障共计26起, 超过40%的电缆故障发生在投运后的4~9年^[2], 导致电缆实

际寿命远低于设计使用寿命, 这一现状使得及时准确地诊断缓冲层烧蚀缺陷, 成为当前电缆运维工作中亟待解决的关键问题^[3-4]。

高压电缆缓冲层位于绝缘屏蔽层与金属护套之间, 由含炭黑的聚酯纤维无纺布、聚丙烯酸钠阻水粉及缓冲棉构成, 兼具半导电连接、纵向阻水与机械防护功能, 其室温体积电阻率需满足JB/T 10259—2014要求($\leq 10^4 \Omega \cdot \text{cm}$), 以保障电流均匀传导。缓冲层烧蚀是多物理场复杂耦合作用的结果, 其核心机理表现为多阶段连锁反应: 外护套破损导致水分侵入后, 阻水粉溶解生成的 Na^+ 、 OH^- 与环境中的 CO_2 以及铝护套发生电化学腐蚀, 生成 Na_2CO_3 、 NaHCO_3 及 $\text{Al}(\text{OH})_3$ 等高阻物质并沉积于界面; 这些高阻物质会破坏半导电连续性, 导致局部接触不良, 从而引发电流向良好接触区域集中, 并通过焦耳效应产生局部过热; 持续的热效应与局部

基金项目: 国网克拉玛依供电有限公司项目(SGKL0000JX-IS2500214)。

放电协同作用,一方面导致聚酯纤维等有机材料热裂解,释放 H_2 、 C_2H_4 、 CO 等特征气体,另一方面导致缓冲层纤维收缩、炭黑导电网络断裂,进一步加剧高阻化与电流集中,最终形成不连续烧蚀痕迹^[5]。

在故障发展初期,缺陷特征往往不明显,常规预防性试验和运维手段难以实现有效监测和早期预警。若缺陷发展至中后期,极易导致主绝缘击穿,引发严重停电事故。以往受检测技术限制,运维单位对此类缺陷缺乏有效处置手段,往往只能采取整线更换的方式,不仅成本高昂、工期漫长,也对电网经济运行和供电可靠性造成显著影响。为攻克这一难题,近年来国内外积极开展高压电缆缓冲层缺陷的检测诊断与状态评估研究。

缓冲层烧蚀缺陷多由局部放电、过热等因素引发,过程中会伴随明显的物理与化学信号特征,例如局部温度骤升、出现放电脉冲信号、绝缘材料裂解产生特征气体等。这些信号在实验室环境中容易被模拟、捕捉与量化,因此成为检测技术研究的首选对象。

当前的高压电缆缓冲层烧蚀检测技术主要围绕电气检测法、化学气体检测法、影像学检测法三个方向展开,在状态评估方面,研究正从传统阈值判断向智能化、多源信息融合的方向发展。然而,这些研究尚显零散,缺乏系统性归纳。为此,本文全面梳理近年来高压电缆缓冲层缺陷检测技术的研究进展,重点剖析各类方法的优缺点及适用场景,并对智能化诊断趋势进行展望,为提升电缆运维水平和保障电网可靠运行提供参考。

1 烧蚀缺陷检测技术

高压电缆缓冲层烧蚀过程往往伴随电、热、声等多物理现象及化学副产物的生成。因此,可以根据这些缺陷所表现出的不同物理特征,采取相应的检测方法。目前,高压电缆缓冲层烧蚀缺陷尚缺乏高效检测手段,相关研究仍在持续探索中^[6]。当前主流检测方法主要是利用局部放电检测技术捕捉烧蚀过程中的放电信号^[7-8]。因烧蚀会改变电缆内部结构和性能,故可采用X射线、计算机断层扫描(CT)、超声波或宽频阻抗谱进行探测。此外,烧蚀会导致局部过热,因此研究人员提出了红外热成像检测法,或通过特征气体检测来识别缓冲层材料分解产生的特定气体^[9]。本文依据这些特征,将以上

几种检测方法主要归结为电气检测法、化学气体检测法、影像学检测法以及新型检测技术四类,分别分析其研究现状和应用前景。

1.1 电气检测法

电气检测法主要监测缓冲层缺陷引发的电气参数变化和放电现象,与其相对应的检测方法有宽频阻抗谱法和局部放电检测法。

1.1.1 宽频阻抗谱法

高压电缆缓冲层发生烧蚀时,其缓冲阻水带体积电阻率显著上升,故障电缆中体积电阻率实测值可达 $3.2 \times 10^7 \Omega \cdot \text{cm}$,远超 $1 \times 10^5 \Omega \cdot \text{cm}$ 的标准限值。电阻率升高直接导致绝缘屏蔽层与铝护套间接接触阻抗增大^[9]。因此,两者间的阻抗值可作为诊断缓冲层烧蚀缺陷的一个有效指标。

根据传输线理论,电缆线路可等效为分布参数电路,其首端输入阻抗由线路的传输特性与分布参数(单位长度的电阻 R 、电感 L 、电容 C 和电导 G)决定,具体等值电路如图1所示。宽频阻抗谱检测技术正是基于这一原理,通过向电缆首端注入扫频信号,并测量输入阻抗随频率的变化,以获取其运行状态信息。该技术的有效性取决于电缆的电气特性与其物理结构及信号频率的密切关联。当电缆长度远小于信号波长时(对应低频或短电缆情况),电缆本身对回路阻抗的影响可以忽略,此时测得的阻抗主要反映负载特性。然而,当信号频率足够高或电缆足够长时,电缆长度与信号波长可比拟,电缆自身的阻抗特性(即其传输特性)将成为回路总阻抗的主导因素,其中包含了电缆的大量状态信息。此时,电缆中存在的任何缺陷或劣化都会改变其在高频段的阻抗响应特性。因此,通过提取和分析这些高频阻抗谱特征,并借助专门的数据分析算法,即可实现对电缆缓冲层状态的有效诊断^[10]。

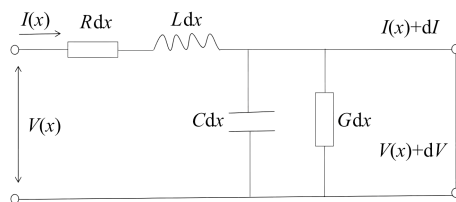


图1 电缆的传输线分布参数电路

Fig.1 The distributed parameter circuit model of cable

文献[11]为验证宽频阻抗谱技术对缓冲层缺陷的检测能力,将阻抗分析仪的两极分别接于电缆端部的导体-铝护套与绝缘屏蔽层-铝护套之间。选

取一段皱纹铝护套电缆作为测试对象,制备了两个长度为 30 cm 的试样,其中试样 1 保持原始无损状态,试样 2 则人工模拟了含缓冲层白粉的典型缺陷,对两个试样在两种接线方式下进行宽频阻抗谱测量,如图 2 所示。从图 2 可以看出,在导体-铝护套接线方式下,无缺陷试样 1 与含白粉缺陷试样 2 的阻抗幅值随频率变化趋势基本一致,均呈指数下降。表明该接线方式无法有效识别缓冲层缺陷状态,不适用于烧蚀缺陷检测。而在绝缘屏蔽层-铝护套接线方式下,两种试样的宽频阻抗谱呈现显著差异。试样 2 在各频率下的阻抗幅值均明显高于试样 1,在 20~100 Hz 频段内,两者阻抗值保持约 3~4 倍的差异。实验表明,绝缘屏蔽层-铝护套接线方式可有效检测缓冲层烧蚀缺陷。

根据图 2 的结果,在采用绝缘屏蔽层-铝护套接线方式时,频率越低,缓冲层阻抗幅值越大,缺陷样本与正常样本的差异越显著,更易直观判断整体性劣化。该规律适用于短电缆或低频场景,此时电缆长度远小于信号波长,测得阻抗主要反映缓冲层与铝护套的接触电阻,幅值差异为核心判据。而当检测对象为长电缆(电缆长度与信号波长可比拟)时,其传输特性成为阻抗关键影响因素,低频下难以区分长度导致的阻抗变化与缺陷导致的阻抗变化,需提取高频阻抗谱特征如谐振频率偏移、相位突变,以精准识别局部烧蚀缺陷。因此,宽频阻抗谱法需按电缆长度来适配测试频段:短电缆侧重低频幅值分析,长电缆侧重高频特征提取,二者共同构成完整的缺陷诊断体系。

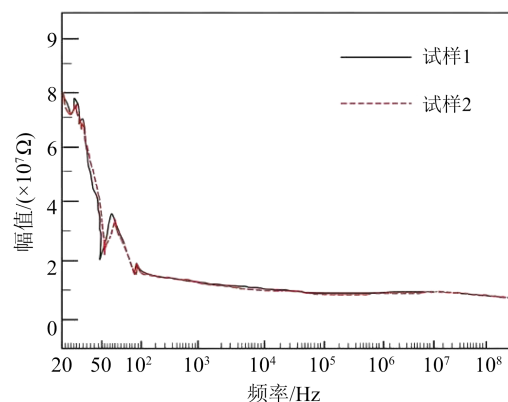
1.1.2 局部放电检测法

局部放电检测技术通过捕捉和分析电缆缓冲层局部放电过程中产生的声、电及电磁波信号,获取其绝缘状态信息,进而判断是否存在因放电引发的烧蚀缺陷^[12]。缺陷电缆内部的局部放电可以通过超声信号、高频电流信号等表征^[13],但此类放电并非持续发生,出现时间也无明显规律。实际检测到的局部放电信号往往呈现空间分布分散、强度波动大、发生频次不稳定等特点^[14]。因此,目前利用局部放电法成功检测电缆缓冲层缺陷的案例相对有限,相关检测设备与方法仍有待进一步发展和完善。

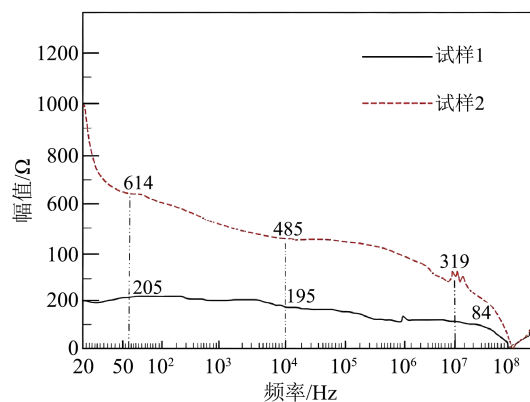
文献[15]通过局部放电测试电路,采集了模拟的电缆缓冲层球形缺陷信号,经去噪处理获得缺陷演变过程中的放电图谱。研究表明,放电脉冲幅值



(a) 实验示意图



(b) 导体-铝护套接线方式检测结果



(c) 绝缘屏蔽层-铝护套接线方式检测结果

图 2 不同电极连接方式下的电缆宽频阻抗谱测量

Fig.2 Measurement of wide-frequency impedance spectroscopy of cable under electrode connection methods

可直接用于表征缓冲层劣化程度。当脉冲幅值大于 30 mV,电缆需要被列入重点检查对象;若脉冲幅值超过 100 mV,则建议立即更换。然而,脉冲电流法虽然为诊断提供了新方向,但其本身易受噪声干扰,对环境要求高,而且如何准确判定放电信号就来自缓冲层而非其他部位,仍是该方法走向实际应用前必须解决的难题。

针对电缆缓冲层烧蚀缺陷,文献[16]通过计算吸声结构的吸声系数,构建了相应的有限元仿真模型,用以解析放电所激发的超声波在电缆结构中的传播规律。图 3 展示了不同频率的超声信号在穿透不同层数缓冲层后的归一化电压检测结果^[16]。从图 3 可以看出,信号在仅穿透一层缓冲层后,其检测幅

值与未经过缓冲层(即放电点位于缓冲层最外层与铝护套之间,对应图3中的0层和1层)的情况相比,衰减并不显著。然而,当放电发生在缓冲层与导体屏蔽层之间(图3中的1层和2层),且信号频率较高时,在外护套处检测到的信号幅值会急剧下降,可能仅为原始信号的五分之一。实验进一步证实,若放电位于缓冲层内层,超声检测技术难以有效捕获其信号;反之,若强烈的放电发生在波纹铝护套的波谷位置,则采用超声技术进行检测是可行的。尽管超声波法在缺陷定位方面表现出一系列优势,但其在实际应用中的效果仍受到电缆具体安装与敷设条件的制约。

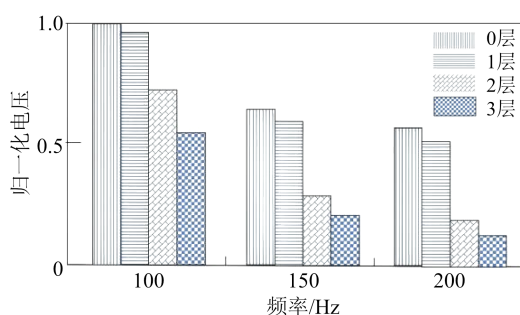


图3 超声信号归一化电压测试结果

Fig.3 Test results of ultrasonic signal normalized voltage

为提升电力电缆早期故障识别的准确性,文献[17]提出了一种融合轨迹图像与卷积神经网络的智能诊断方法。该研究基于相空间重构技术对电流信号进行数据重构,并根据重构结果绘制电流信号的轨迹图像,然后根据绘制的轨迹图像,通过搭建卷积神经网络来完成电缆早期故障的识别,为电缆缓冲层缺陷的诊断开辟了新的技术途径。

宽频阻抗谱法以及局部放电检测法各有其适用场景与局限性。宽频阻抗谱法适用于实验室或现场离线精确诊断,能够有效判断缓冲层是否存在整体性或分布性劣化。该方法在采用绝缘屏蔽层-铝护套接线方式时具有较高灵敏度,缺陷样本的阻抗值可达正常样本的数倍;同时,宽频带测量可反映介电性能、导电性能等多种信息,数据维度丰富,但其测量结果易受电缆长度、终端处理方式和环境温度的影响,需建立基准数据库进行对比,且目前主要适用于离线分析,在线监测中传感器部署与信号提取难度较大。作为局部放电检测的代表性方法,脉冲电流法主要用于离线评估缓冲层是否已发生伴随放电的严重劣化,适用于风险预警。该方法

的优势在于放电脉冲幅值与劣化程度存在明确对应关系,可提供量化评估依据,是绝缘故障诊断中的经典手段,但其对现场电磁噪声极为敏感,需借助复杂噪声抑制技术,环境适应性较差,且难以准确定位放电信号来源,易导致误判。局部放电检测中的超声波检测法适用于在线定位缓冲层中的剧烈放电源,尤其擅长精确定位故障点。作为一种声学检测手段,其不受电网电磁干扰影响。然而,超声信号在穿透电缆多层结构尤其是缓冲层时衰减显著,若放电发生于缓冲层内层,外部很难捕获有效信号,存在检测盲区。此外,电缆的敷设方式如埋设、穿管等会严重影响声波传播路径与能量,制约该方法的实际应用效果。

1.2 化学气体检测法

特征气体识别技术通过分析故障产生的气体成分,依据气体种类与浓度实现设备内部缺陷诊断^[18-19]。

1.2.1 特征气体产生原理

特征气体并非直接来源于金属铝护套或缓冲层本身,而是源于电缆结构中相邻的有机绝缘材料在异常能量(主要是热和电)作用下的化学分解,主要可以分为局部过热分解和局部放电分解。

局部过热分解主要源于缓冲层受潮或接触不良导致的电阻增大,在负载电流下产生焦耳热,或由放电能量转化而来的热量。高温会使相邻的交联聚乙烯(XLPE)绝缘层及缓冲层无纺布等有机材料发生热解,导致其碳-碳键与碳-氢键断裂,生成小分子烃类气体(如 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 等)和其他气体(如 CO 、 CO_2 等)。局部放电分解主要是缓冲层与绝缘屏蔽层之间因接触不良形成气隙,在高电场强度下发生局部放电,作用于放电区域内空气中的 N_2 、 O_2 和电缆材料的表层分子。放电首先电离空气,产生臭氧和氮氧化物,这些强氧化性物质会腐蚀、氧化周围的聚乙烯材料,生成含氧碳氢化合物;放电过程中的离子轰击会直接剥离聚合物分子中的氢原子从而生成 H_2 ,因此 H_2 可作为发生放电的灵敏指标^[20-23]。由于 CO_2 是空气中的主要背景气体之一,难以有效区分其是否源于电缆内部烧蚀,不宜作为特征气体。因此,可将 CO 作为烧蚀过程涉及固体绝缘材料分解的关键证据,并将 C_2H_6 、 C_2H_2 、 C_2H_4 等烃类气体作为辅助判据,共同用于缺陷诊断^[11]。

1.2.2 气体采样与分析方法

目前,国内外已对高压电缆缓冲层在不同缺陷状态下的特征气体生成规律开展了研究。缓冲层缺陷发展一般可分为电化学腐蚀阶段和烧蚀阶段,电化学腐蚀阶段主要生成 H_2 和 CH_4 ,烧蚀阶段则还会产生 C_2H_6 、 C_2H_4 及 C_2H_2 等烃类气体^[21,24]。采用气相色谱-质谱技术,将甲苯等芳香烃类作为缓冲层烧蚀的特征气体,通过分析气体产物与电流密度的关联,可有效评估烧蚀严重程度^[25]。基于气体分析的电缆状态评估方法与采样技术对电缆早期故障识别效果良好。然而,上述研究目前仍主要局限于实验室环境,其所依赖的气相色谱法等技术在现场应用时存在诸多限制,如分析周期长、安全保障要求高、操作流程复杂等,导致其难以直接推广至实际电缆运行现场的在线监测与诊断。

近年来,有学者研发了一种基于傅里叶变换红外光谱(FTIR)的检测方法,该方法具备响应快速、灵敏度高的优势。目前,相关设备的检测线性误差低至1%,响应时间在5~10 s,能够满足现场检测缓冲层烧蚀故障的需求,其原理如图4(a)所示^[26]。光源发出的光束经准直透镜调整后,由分束器分为两路,一路经透射到达动镜,另一路经反射到达定镜。两束光反射后在分束器处汇合,因动镜匀速移动产生光程差,形成干涉光。此干涉光在通过充有特征气体的检测气室后,即可携带气体对特定波长光的吸收信息。随后,携带信息的干涉光经透镜会聚至探测器,被转换为包含干涉条纹信号的电流或电压,形成干涉图。通过对干涉图进行傅里叶变换,可解析出表征气体成分的红外光谱,通常显示为透射率或吸光度随波数或波长变化的曲线。当入射光强度、气体吸收光程及摩尔吸收系数确定时,气体浓度与出射光强度存在确定的对应关系。每种气体分子仅吸收特定频率红外光,在光谱上形成对应波数的特征吸收峰。通过分析这些吸收峰的吸光度,可直接对缓冲层烧蚀特征气体进行定性与定量分析,为缺陷诊断提供可靠依据。实验装置的整体结构如图4(b)所示,其取气与气路控制单元由进气泵、干燥管、继电器、电磁阀和出气泵组成,取气位置如图4(c)所示。此方法经实验检测与现场应用,发现 CH_4 、 C_2H_4 、 C_2H_6 、 C_2H_2 、 CO 、 H_2 这6种特征气体均能表征缓冲层的烧蚀缺陷,但 C_2H_6 作为缓冲层烧蚀缺陷的特征气体时,其灵敏度相对较低。相比

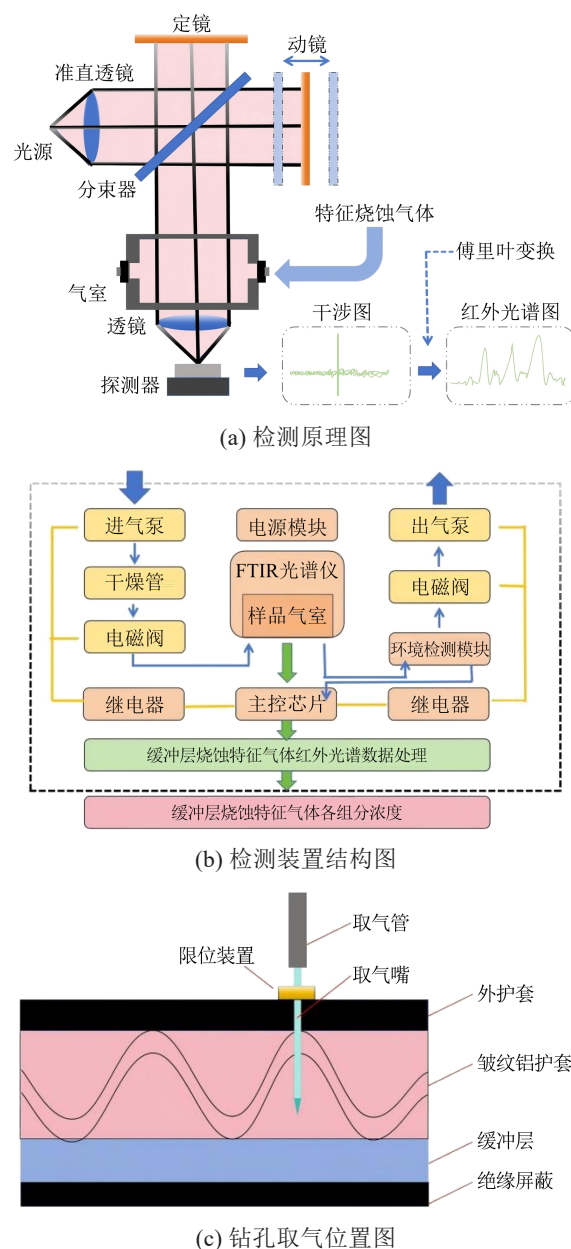


图4 基于FTIR的缓冲层烧蚀气体检测原理

Fig.4 Schematic diagram of FTIR-based characteristic gas detection device

之下, C_2H_4 、 C_2H_2 、 CO 、 H_2 等气体具有更显著的特征响应,更适合作为诊断缺陷的特征气体指标^[27]。

目前关于逸出气体的种类、浓度与烧蚀严重程度之间的定量关系的研究极少。文献[28]基于特征气体均源自材料分解的特性,引入化学计量学方法对多种气体进行综合分析,系统探究了气体化学计量特征随烧蚀与受潮程度的变化规律。结果表明:特征气体平均摩尔质量(M_G)与碳氢原子数比(R_{CH})随烧蚀时间无显著变化;而碳、氢原子浓度(N_C 、 N_H)持续上升,反映气体释放总量随破坏加剧而增加。

与干燥条件下相比,潮湿环境下的 M_G 普遍更低而 R_{CH} 更高,证实湿度会促进不饱和气体生成。 N_C 与 N_H 随着含水率的增加呈现出先降后升再降、最终单调上升的复杂变化,这反映出水分对烧蚀气体释放过程存在非线性影响。该研究为评估高压电缆缓冲层烧蚀程度提供了更全面的依据。

FTIR检测装置在分析缓冲层烧蚀气体方面速度快、误差小、稳定性良好,能为缺陷诊断提供可靠的现场数据支持。然而,该技术也面临挑战:高性能FTIR光谱仪造价高昂,其成本控制、小型化与轻量化仍是推广的瓶颈。此外,现场粉尘、油污易污染光学系统,这对采样气路的设计与维护提出了更高的要求。

1.3 影像学检测法

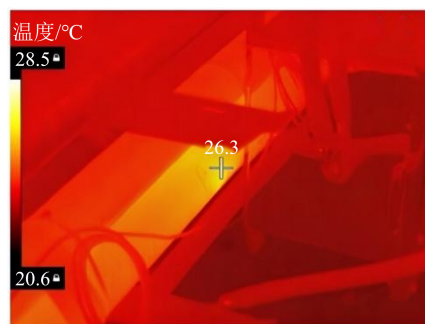
影像学检测法以可视化或图像化的方式直接观察电缆内部结构,从而识别缓冲层烧蚀、变形等物理缺陷,其中红外热成像检测、X射线成像和计算机断层扫描(CT)等方法的应用潜力较大。

1.3.1 红外热成像检测法

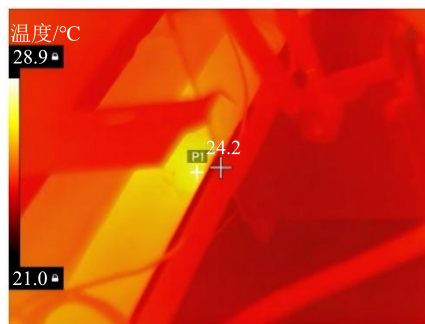
红外热成像技术通过探测电缆表面的红外辐射,生成温度分布图像。通过识别图像中的异常热点即可定位电缆内部的潜在缺陷,该技术目前已相对成熟。文献[11]采用红外热成像仪对电缆线路进行检测时,发现多处温度异常,如图5所示。文献[29]对高压XLPE电缆进行解剖检查,发现发热点对应处阻水带出现白粉,绝缘屏蔽层存在烧蚀痕迹。红外热成像法虽能有效识别因阻水带白粉等缺陷引起的局部温升,但通常仅适用于隧道等暴露于环境中的电缆,不适用于直埋或穿管敷设的电缆。此外,该技术还存在检测成本高、效率偏低的问题,且在实际检测中易受拍摄角度限制,可能造成部分异常点漏检,因此目前难以适用于电缆线路的全线快速普查。

1.3.2 X射线成像法

X射线穿透物体时会发生衰减,其程度因材料与结构而异,探测器通过接收衰减后的射线信号,可生成反映内部结构的明暗对比影像。目前,X射线检测技术虽在GIS设备母线裂纹检测等场景中应用成熟,但在高压电缆缓冲层烧蚀缺陷诊断方面的研究仍处于探索阶段,相关成果较为有限^[30]。为提升X射线成像质量,文献[31]系统优化了管电压、管电流、焦距及曝光时间等关键参数,发现管电压为



(a) 缓冲层缺陷区域温度测量结果(26.3℃)



(b) 同位置相邻区域温度测量结果(24.2℃)

图5 某110 kV电缆红外热成像检测结果

Fig.5 Infrared thermal imaging detection results for a 110 kV cable

80 kV、管电流为0.5 mA、焦距为400 mm、曝光时间为17 s时,可获得最清晰的电缆内部结构图像。图6(a)为异常点X射线检测成像图,从影像学分析,异物形态特征显著,呈高度规律的对称分布。该区域图像衬度明显更高,表明物质密度较大,对X射线衰减更强,反映其元素平均原子序数较高。为验证此现象,对检测后的故障电缆进行解剖,发现缓冲层表面离散分布大量白色点状物质,形貌如图6(b)所示。

选择合适的入射角度对检测效果至关重要,X射线以45°角入射时能更清晰地揭示缓冲层烧蚀缺陷^[32],结合图像深度处理方法,可进一步增强缺陷与正常区域的灰阶对比度,使缺陷识别更为直观^[33]。经过深度处理的X射线成像结果如图7所示,此时缺陷特征已清晰可辨,表明该方法具备有效的缺陷识别能力。尽管该方法显著提升了检测准确性,但额外的处理步骤也增加了时间成本,在一定程度上降低了检测效率。

1.3.3 计算机断层扫描法

计算机断层扫描(CT)技术通过从多角度采集物体的投影数据,并利用重建算法还原其三维内部

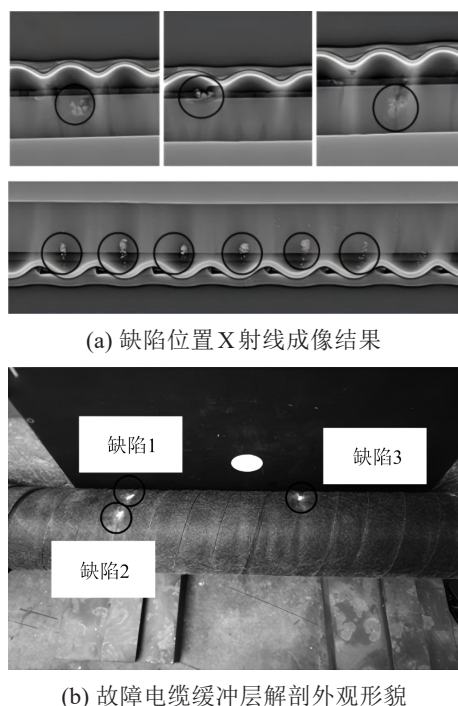


图6 缓冲层缺陷的X射线检测与解剖结果
Fig.6 X-ray inspection and dissection results of buffer layer defects

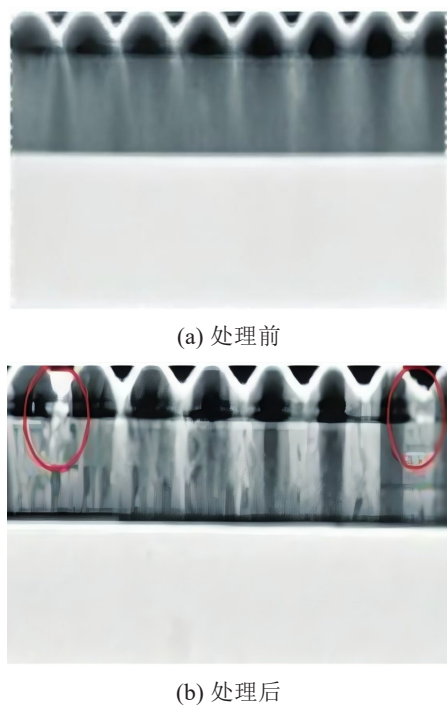


图7 带护套电缆X射线成像深度处理对比结果
Fig.7 Comparative results of X-ray image depth processing for cable with sheath

结构,能够精确获取缺陷的空间位置、几何形态与尺寸信息^[34]。在CT成像的多种扫描方式中,圆周扫描是最常用的数据采集模式,该方式能获取覆盖全

周角的完整投影数据,从而进行高精度的三维重构^[35]。但是地下电缆隧道空间狭窄,且电缆常呈“一”字或“品”字形排列,这种方法目前还难以应用于实际场景中电缆的缺陷检测,因此开发新型CT方法具有重要实际价值。直线扫描CT通过平移射线源或探测器完成数据采集。由于直线运动更易控制且机械结构简单,该技术尤其适用于空间受限的检测场景^[36]。文献[37]提出了X射线源平移扫描CT方法,扫描时固定探测器与对象,仅令射线源平行于探测器移动以获取数据,通过调整物体与射线源的间距,实现成像视场的灵活控制。由于完全避免了旋转运动,且方法结构简单,并能实现快速扫描,该方法在检测在役高压电缆烧蚀缺陷中具有较高的实际意义。

X射线成像与CT方法在检测高压电缆烧蚀缺陷时,均基于X射线与物质相互作用的原理,能够呈现物体内部结构信息。二者的主要区别在于成像维度:X射线成像得到的是二维叠加图像,而CT通过多角度扫描和三维重建,可获取物体内部结构的高分辨率断层图像。在实际应用中,两种方法各有明确的适用场景。X射线成像法设备相对便携、检测速度快,单测点检测时长可控制在20 s以内,适用于现场对电缆铝护套变形、明显异物等可疑缺陷进行快速初步筛查。CT方法则以其无损三维可视化能力,成为实验室中缺陷分析的“黄金标准”,常用于对故障电缆样品进行精细解剖,准确判断烧蚀路径和严重程度。然而,上述两种方法均存在明显局限性,制约了其实际应用。X射线成像因二维投影叠加,难以精确定位缓冲层烧蚀等精细缺陷,易导致漏判或误判;CT方法虽具备精准定位能力,但受设备体积、成本及扫描时间限制,目前无法应用于在运电缆的现场检测。总之两者在电缆缺陷检测中扮演着互补的角色,但目前均无法实现运行电缆的在线、普适性检测。未来研究应聚焦于新型CT技术,如直线扫描CT方法,以打破现场应用瓶颈,搭建起实验室精确诊断与现场高效检测之间的桥梁。

1.4 新型检测技术

在高压电缆缓冲层缺陷检测领域,传统的电气法、特征气体分析及影像学手段均存在一定的局限性。为突破单一检测方式的约束,部分学者开始探索基于多方法融合的多参量检测技术,以期实现对

缺陷的更早期识别、更精准判断及更便捷的现场应用。

1.4.1 多参量检测技术

多参量检测技术是指同时采集与缓冲层缺陷相关的多种不同类型的物理或化学参量,并通过信息融合算法进行综合分析,从而实现更全面、更精确的缺陷诊断。由于单一检测信号易受干扰或存在多义性,通过采集多种基于不同检测原理的参数,使其相互印证、互为补充,该技术能有效提升诊断准确性,避免误判,并且可以深入揭示缺陷机理,相较于传统方法能够更早识别潜伏性缺陷。温度与气压常被用作关键的辅助诊断参量。一方面,缓冲层烧蚀过程伴随明显的局部发热,使温度成为表征缺陷的重要指标;同时,烧蚀产生的大量气体在皱纹铝护套密闭空间内积聚,引起内部气压升高,气压变化也可作为判断烧蚀是否发生的有效依据^[38]。文献[39]研制了用于电缆烧蚀缺陷的多参量综合检测系统,其结构示意图如图8(a)所示。该系统集成了红外光谱仪、 H_2 专用传感器,以及温度、气压等多种传感器,通过数据融合实现综合诊断。对4段真型电缆样本(电缆1、2存在烧蚀缺陷,电缆3、4未发生烧蚀)进行多参量检测,温度、气压及特征气体浓度检测结果如图8(b)所示。从图8(b)可以看出,电缆1和电缆2的温度、气压均显著高于正常电缆3和电缆4,且其缓冲层中 CH_4 、 C_2H_6 、 C_2H_4 和 H_2 浓度也远高于正常样本。

高压电缆缓冲层缺陷检测中的多参量检测技术,通过多维感知与智能诊断相结合,代表了状态监测的未来发展方向。然而,由于需集成多种传感器、数据采集单元及通信模块,其系统设计、安装和维护的复杂度和成本显著高于单一检测技术。目前,尚缺乏高效、准确的多源信息融合模型,难以实现对不同类型参数的加权整合与智能决策,制约了对缺陷状态的准确评估。因此,多参量检测技术目前仍多处于实验室研究与试点应用阶段。未来需依托大量现场数据构建并验证诊断模型,以推动该技术走向成熟与实际工程应用。

2 结束语

本文系统归纳和总结了高压电缆缓冲层缺陷检测技术的研究现状,不同检测方法的具体对比如表1所示。综合考虑缓冲层烧蚀缺陷演化特征、现场工况适配性及技术成熟度,发现便携式X射线成

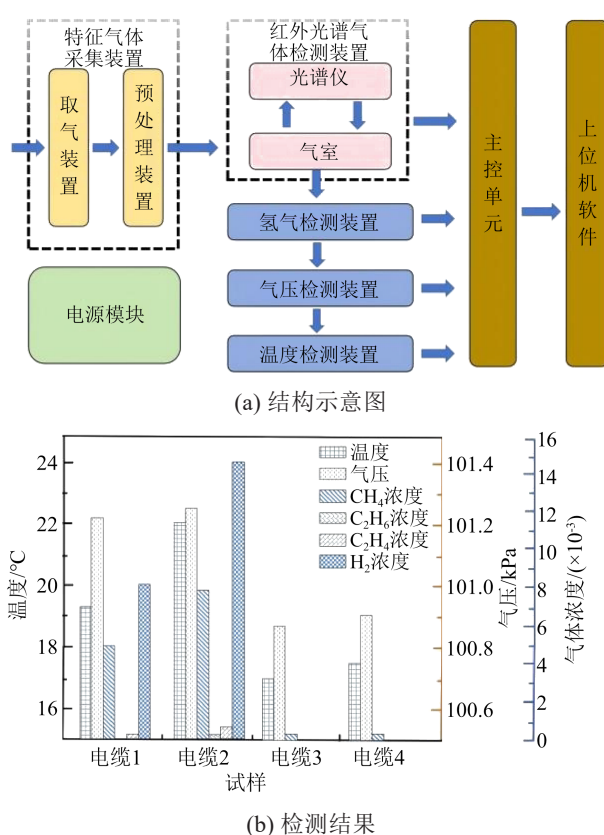


图8 多参量检测系统结构示意图及检测结果

Fig.8 Schematic diagram of multi-parameter detection system and detection results

像法、FTIR 特征气体检测法、宽频阻抗谱法及多参量综合检测系统为当前核心适配技术。

便携式X射线成像法具有便携快速(单测点 ≤ 20 s)、可视化等优势,经过 45° 入射角优化结合AI图像识别,成为多敷设场景现场带电快速筛查的首选;FTIR 特征气体检测法响应快(5~10 s)、线性误差 $\leq 1\%$,通过监测 H_2 、 C_2H_4 、CO等气体浓度及其增长趋势,适配在运电缆易烧蚀部位早期在线预警;宽频阻抗谱法(绝缘屏蔽层-铝护套接线方式)在低频段($10^2 \sim 10^4$ Hz)呈现3~4倍阻抗差异,结合基准数据库排除干扰,为离线精准诊断与严重程度评估提供关键依据;多参量综合检测系统整合多维度信号,经纳秒级同步与数据融合,是复杂环境下综合诊断的最优方案。

尽管如此,现有检测方法仍面临不少挑战:离线检测适用性有限,而在线检测方法普遍存在抗干扰能力不足、难以实现准确定量分析、早期缺陷识别灵敏度不高等问题,且缺乏统一、可靠的现场检测标准。

未来可以从以下几个方面加以突破:研发适用

表1 不同检测方法对比表
Table 1 Comparison table of different detection methods

具体方法	核心原理	适用场景	优点	缺点	成熟度
宽频阻抗谱法	阻抗随频率变化识别劣化	离线精确诊断	灵敏度高,数据维度丰富	受环境影响,在线难用	实验室成熟
局部放电检测法	捕捉放电脉冲信号 量化劣化程度	离线严重劣化评估	量化关系明确,经典 诊断手段	抗干扰差,易误判	实验室成熟
超声波法	捕捉放电超声波信号	在线定位放电源	抗电磁干扰,定位精准	存在检测盲区,受敷设制约	现场应用有限
FTIR法	红外光谱分析特征气体	现场快速检测	响应快,误差≤1%	设备昂贵,易污染	现场试点
红外热成像检测法	探测表面红外辐射以识别 发热点	隧道暴露环境电缆 检测	技术成熟,非接触检测	不适用于直埋/穿管电缆, 效率低	现场成熟,应用 场景受限
X射线成像法	X射线穿透衰减成像	现场快速筛查	便携可视化,检测快速	定位精确度不足	现场可用
计算机断层扫描 (CT)法	射线源平移三维重建	隧道空间受限场景	适配现场,扫描快速	精度待优化,验证不足	实验室验证
多参量综合检测法	多源数据融合诊断	复杂缺陷评估	准确性高,早检性好	成本高,集成难	试点应用

于现场的便携、高效带电检测方法;有效运用人工智能技术,实现多源数据的深度融合、缺陷的精准识别乃至智能诊断;研发新型缓冲层材料,从根本上提升电缆的长期运行可靠性。

参考文献 References

[1] 陈研,倪松,马天宇,等.在役高压电缆缓冲层缺陷检测[J]. 仪器仪表学报,2023,44(4):82-90.
Chen Yan, Ni Song, Ma Tianyu, et al. Detection of buffer layer defects of in-service high-voltage cables[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument,2023,44(4):82-90.

[2] 王伟,欧阳本红,徐明忠,等. 电缆缓冲层烧蚀现象初步分析[J]. 电线电缆,2019(5):5-10.
Wang Wei, Ouyang Benhong, Xu Mingzhong, et al. Basic preliminary study of erosion phenomena on buffer layer of cable[J]. Cable,2019(5):5-10.

[3] Jiang Lei, Xin Yue, Yan Wenbo, 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,2019:372-375.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 武康宁,赵鸽,李博达,等. 高压电缆缓冲层烧蚀机理、检测技术与解决方案研究进展[J]. 高电压技术,2026,52(2):789-800.
Wu Kangning, Zhao Ge, Li Boda, et al. Mechanism, detection technology and solution of buffer layer ablation fault in high voltage cables[J]. High Voltage Engineering,2026,52(2):789-800.

[7] Cheng Yanting, Hao Yanpeng, Chen Yun, et al. Effects of condi-

tion 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.

[8] 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: 4142-4157.

[9] 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,2019:20-37.
Chen Yun. Fault characteristics and mechanism of of high voltage XLPE cable buffer layer[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2019:20-37.

[10] 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.

[11] 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,2023:63-67.
Hui Baojun. Research on ablative fault mechanism, defect detection and elimination methods of high voltage cable buffer layer [D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2023: 63-67.

[12] 王晓卫,王雪,王毅钊,等. 基于图像信息熵与多元变分模态分解的电缆局部放电信号去噪方法[J]. 电工技术学报,2024:39(13): 4100-4115,4152.
Wang Xiaowei, Wang Xue, Wang Yizhao, et al. A cable partial discharge signal denoising method based on image information entropy and multivariate variational mode decomposition[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2024: 39(13): 4100-4115,4152.

[13] 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.
- [14] 蒋晓娟,何伟.一起通过局放在线检测技术成功发现的110kV电缆本体缺陷[J].华东电力,2011,39(11):1960-1963.
Jiang Xiaojuan, He Wei. A defect in a 110kV cable body successfully identified through online partial discharge monitoring technology[J]. East China Electric Power, 2011, 39(11): 1960-1963.
- [15] Du Boxue, Du Xiaoyu, Kong Xiaoxiao, et al. An investigation on discharge fault in buffer layer of 220kV XLPE AC cable[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2021, 15(6):508-516.
- [16] 何维晨,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.
- [17] 张毅斌,李梦诗,徐子弘,等.基于轨迹图像与卷积神经网络的电缆早期故障识别[J].广东电力,2022,35(8):86-94.
Zhang Yibin, Li Mengshi, Xu Zihong, et al. Cable incipient fault identification based on trajectory image and convolutional neural network[J]. Guangdong Electric Power, 2022, 35(8):86-94.
- [18] 王昊,张长虹,杨旭,等.420kV及以上高压断路器电寿命试验中SF₆气体分解产物及其影响研究[J].高压电器,2023,59(10):88-95.
Wang Hao, Zhang Changhong, Yang Xu, et al. Study on the effect of SF₆ gas decomposition products in electrical endurance test of 420 kV and above circuit breaker[J]. High Voltage Apparatus, 2023, 59(10):88-95.
- [19] Kong Jiamin, Zhou Kai, Chen Yidong, 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.
- [20] 田美丝,李春阳,牛越,等.高压电缆半导体缓冲层电学性能及其对电场分布的影响[J].电线电缆,2026,69(3):37-47.
Tian Meisi, Li Chunyang, Niu Yue, et al. Electrical performance of high-voltage cable semiconductive buffer layer and its influence on electric field distribution[J]. Wire & Cable, 2026, 69(3): 37-47.
- [21] 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.
- [22] 刘顺满.高压电缆缓冲层放电烧蚀缺陷特征气体分析[D].广州:华南理工大学,2022:36-46.
Liu Shunman. Analysis of characteristic gases from discharge-induced ablation defects in high-voltage cable buffer layers[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2022:36-46.
- [23] 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.
- [24] 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.
- [25] 郭卫,门业堃,任志刚,等.高压电缆缓冲层烧蚀过程中电流密度与气体产物浓度的关联性研究[J].绝缘材料,2023,56(9):71-76.
Guo Wei, Men Yekun, Ren Zhigang, et al. Study on correlation between current density and gas product concentration of buffer layers for high-voltage cable during ablation process[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9):71-76.
- [26] 李晓彬,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.
- [27] Xie Yi, Liu Jianjun, Feng Chao, 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.
- [28] 任志刚,郭卫,门业堃,等.基于气体化学计量特征的高压电缆缓冲层烧蚀评估方法研究[J].绝缘材料,2025,58(4):109-116.
Ren Zhigang, Guo Wei, Men Yekun, et al. Evaluation method for buffer layer ablation of high voltage cable based on gas stoichiometric characteristics[J]. Insulating Materials, 2025, 58(4): 109-116.
- [29] 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.
- [30] 闫斌,何喜梅,王志惠,等.X射线数字成像检测系统在GIS设备中的应用[J].高压电器,2010,46(11):89-91.
Yan Bin, He Ximei, Wang Zhihui, et al. Application of X-ray digital imaging defect detection system in GIS equipment[J]. High Voltage Apparatus, 2010, 46(11):89-91.
- [31] 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.
- [32] 刘三伟,段肖力,黎刚,等.高压电缆缓冲层缺陷数字X射线无损检测技术研究[J].湖南电力,2020,40(6):18-21.
Liu Sanwei, Duan Xiaoli, Li Gang, et al. Research on digital

- X-ray non-destructive testing technology of cable buffer layer defects[J]. Hunan Electric Power,2020,40(6):18-21.
- [33] 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.
- [34] 吕寒玉,邹晶,赵金涛,等. 纳米计算机断层扫描成像技术进展综述[J]. 激光与光电子学进展,2020,57(14):140001.
- Lü Hanyu, Zou Jing, Zhao Jintao, et al. Review on development of nano-computer tomography imaging technology[J]. Laser & Optoelectronics Progress,2020,57(14):140001.
- [35] 皮真真,余海军,李雷,等. 一种三源摆动螺旋安检CT成像方法研究[J]. 光学学报,2021,41(16):1611003.
- Pi Zhenzhen, Yu Haijun, Li Lei, et al. Triple-source swinging spiral CT imaging method for security inspection[J]. Acta Photonica Sinica,2021,41(16):1611003.
- [36] 田忠建,余海军,汪粼波,等. 正交直线扫描计算机分层成像研究[J]. 光学学报,2020,40(22):2211002.
- Tian Zhongjian, Yu Haijun, Wang Linbo, et al. Orthogonal translation computed laminography[J]. Acta Photonica Sinica, 2020,40(22):2211002.
- [37] Yu Haijun, Li Lei, Tan Chuandong, et al. X-ray source translation based computed tomography (STCT) [J]. Optics Express, 2021,29(13):19743-19758.
- [38] 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 electro-thermal coupling method[J]. Insulating Materials, 2023, 56(9): 77-82.
- [39] 刘音,任志刚,及洪泉,等. 基于特征气体和温压变化的电缆烧蚀缺陷多参量检测方法[J]. 绝缘材料,2025,58(1):109-115.
- Liu Yin, Ren Zhigang, Ji Hongquan, et al. Multi-parameter detection method of cable ablation defect based on characteristic gases with temperature and pressure variation[J]. Insulating Materials,2025,58(1):109-115.

收稿日期:2025-11-09;修回日期:2026-01-08。

作者简介:

吕盼(1983-),男(汉族),新疆昌吉人,高级工程师,主要从事高压绝缘材料的研究;

通信作者:田忠元(2000-),男(汉族),甘肃武威人,高级工程师,主要从事电工材料的研究。