

基于多种检测的高压电缆绝缘放电诊断分析与研究

唐勇¹ 李斌² 唐勇³ 刘泽金⁴ 付兵⁴ 张飞⁴

1 金堂县供电公司，四川 金堂 610400；2 四川宏业电力集团有限公司，四川 成都 610300

3 国网成都供电公司青羊供电中心，四川 成都 610000；4 国网成都供电公司，四川 成都 610000

摘要：随着电力行业对高压电缆的依赖日益增加，电缆头作为电力传输系统中关键的组成部分，其质量直接影响着电网的安全稳定运行。电缆头在制作过程中，由于结构封闭、部件复杂等原因，容易出现电场不均，导致局部放电现象，进而可能引发更为严重的故障。为了有效检测电缆头的缺陷，本文创新性地结合了红外精确测温、超声波、以及高频电流局放检测法，同时引入了 X 射线吸收衬度成像技术，通过对 35kV 单芯高压电力电缆头的绝缘放电案例进行分析，验证了多种检测手段的综合应用效果。结果表明，X 射线吸收衬度成像技术能够准确发现电缆头在制作或使用过程中可能产生的孔洞、裂缝等缺陷，结合其他检测手段可以有效提高缺陷定性分析的准确性，显著提升了故障诊断的直观性与可靠性。

关键词：电力电缆；X 射线吸收衬度成像技术；高频电流局放检测

Diagnostic Analysis and Research on Insulation Discharge of High-voltage Cables Based on Multiple Detection Methods

Tang,Yong¹ Li,Bin² Tang,Yong³ Liu,Zejin⁴ Fu,Bing⁴ Zhang,Fei⁴

1Jintang County Power Supply Company, Jintang, Sichuan, 610400, China

2Sichuan Hongye Electric Power Group Co., Ltd., Chengdu, Sichuan, 610300, China

3State Grid Chengdu Power Supply Company Qingyang Power Supply Center, Chengdu, Sichuan, 610000, China

4State Grid Chengdu Power Supply Company, Chengdu, Sichuan, 610000, China

Abstract: With the increasing dependence of the power industry on high-voltage cables, cable terminations, as a crucial part of the power transmission system, directly affect the safe and stable operation of the power grid. During the manufacturing process of cable terminations, due to the closed structure and complex components, uneven electric fields are likely to occur, leading to partial discharge phenomena, which may further cause more serious failures. To effectively detect the defects of cable terminations, this paper innovatively combines infrared precise temperature measurement, ultrasonic, and high-frequency current partial discharge detection methods. At the same time, X-ray absorption contrast imaging technology is introduced. Through the analysis of the insulation discharge case of a 35kV single-core high-voltage power cable termination, the comprehensive application effect of multiple detection means is verified. The results show that the X-ray absorption contrast imaging technology can accurately detect defects such as holes and cracks that may occur during the manufacturing or operation of cable terminations. Combined with other detection means, it can effectively improve the accuracy of defect qualitative analysis and significantly enhance the intuitiveness and reliability of fault diagnosis.

Keywords: Power cables; X-ray absorption contrast imaging technology; High-frequency current partial discharge detection

DOI: 10.62639/sspis03.20250204

随着我国城市化进程的加速，电力需求急剧增加，电力电缆作为重要的输电媒介，越来越多地应用于城市电网。电缆相比于传统的架空线路，具备占地少、运行效率高、对环境适应性强等优点。然而，电缆在长期运行过程中，由于制造缺陷或外部环境的影响，容易引发局部放电等故障^[1]。电缆头作为电缆系统中关键的连接节点，往往成为故障的高发区域。为此，如何高效、准确地诊断电缆头的放电缺陷成为电力行业研究的热点之一。现有的红外热成像、超声波检测和高频电流局放检测技术已经在实际应用中取得了一定

的成果，但面对电缆头复杂的结构，现有技术往往无法提供全面的缺陷诊断。本文基于多种检测手段，特别是首次将 X 射线吸收衬度成像技术应用于电缆头的缺陷诊断，旨在为电力电缆头的健康监测提供更为精确的技术支持。

一、X 射线吸收衬度成像技术的实现

X 射线吸收衬度成像技术是一种先进的无损检测手段，凭借其独特的原理和优越的分辨能力，能够在不破坏被检测物体的前提下，精准揭示其内部的微小缺陷。这项技术依赖于 X 射线在穿透

(稿件编号: IS-25-4-1001)

作者简介：唐勇（1977-），男，汉族，籍贯：四川金堂，本科，高级技师，研究方向：电力电缆故障诊断。

李斌（1981-），男，汉族，籍贯：四川仪陇，本科，高级技师，研究方向：电力电缆故障诊断。

唐勇（1977-），男，汉族，籍贯：重庆奉节，本科，工程师，研究方向：焊接后的机械性能。

刘泽金（1987-），男，汉族，籍贯：四川泸州，本科，技师，研究方向：电力电缆故障诊断。

付兵（1981-），男，汉族，籍贯：四川雅安，大学本科，研究方向：电力电缆故障诊断。

张飞（1987-），男，汉族，籍贯：四川仁寿，硕士，工程师，研究方向：电力电缆故障诊断。

不同材料时的衰减特性, 衰减程度与材料的密度、厚度及其内部结构紧密相关。通过结合高精度的辐射源与高分辨率的成像探测器, X 射线成像技术能够捕捉并呈现出电缆头等复杂结构中微小裂纹、孔洞等潜在缺陷的细节。这种成像方法通过增强图像的对比度, 使得缺陷区域在图像中显现出与周围材料截然不同的衬度, 从而为技术人员提供了直观且精确的诊断依据。这一特点使得 X 射线吸收衬度成像技术在电力电缆的维护和故障诊断中具有极大的应用价值, 尤其在面对电缆头这一结构复杂、易出现潜在缺陷的关键部位时, 能够提供远超传统检测方法的洞察力。

与传统的检测手段相比, X 射线吸收衬度成像技术的最大优势在于其高分辨率成像的能力, 能够清晰展示电缆头内部各层结构的详细信息, 并揭示常规检测难以察觉的微小缺陷。例如, 电缆头内的裂纹、气泡或异物等, 通过成像技术可以一目了然。这一无损检测方式避免了对电缆头的解体操作, 使得检测过程更加高效且安全, 同时降低了对电缆头物理完整性的破坏风险。技术人员不再需要进行繁琐的拆解过程便可获取精准的内部结构信息, 从而大大提高了故障诊断的效率和准确性^[2]。X 射线成像为电力电缆的定期检查和运维提供了一种更为直观和高效的方式, 能够及时发现电缆头内部可能存在的隐患, 从而为电力系统的运行提供了重要的保障。在电力设备的故障预防和故障分析中, 这种成像技术无疑发挥了举足轻重的作用, 使得电力电缆的健康管理更加科学和高效。

二、案例检测过程

(一) 红外精确测温

红外精确测温作为电缆检测领域中常用且有效的技术手段, 能够通过实时监测电缆头的温度变化来间接识别电缆内部的潜在故障。在 35kV 电缆头的检测中, 采用 FLIR 红外测温仪进行精密测量, 仪器在高分辨率下对电缆头各相的温度进行了全面采集和分析。根据测试数据, C 相电缆头显现出明显的温度异常, 特别是在某些特定区域, 温度的升高明显超出了电缆在正常工作条件下的运行温度范围。根据热成像图谱, 这些温度升高区域与常规运行条件下的温度分布存在较大偏差, 表明可能存在局部放电、过载电流或电缆绝缘不良等故障现象。具体而言, 温度异常集中在电缆头的连接部分, 可能的原因是电流通过该区域时, 局部电场的集中导致了电缆头内部局部发热。这一温升现象为后续故障诊断提供了关键的初步信息, 表明电缆头在某些部位可能存在较为严重的绝缘缺陷或局部放电问题, 这些故障往往是电力系统发生重大故障的前兆。因此, 红外测温技术的使用为电缆头故障的早期诊断和维护提供了科学依据, 能够在不干扰电缆正常运行的情况下, 有效发现电力设备的异常状态。

(二) 超声波检测

红外精确测温作为电缆检测领域中常用且有效的技术手段, 能够通过实时监测电缆头的温度

变化来间接识别电缆内部的潜在故障。在 35kV 电缆头的检测中, 采用 FLIR 红外测温仪进行精密测量, 仪器在高分辨率下对电缆头各相的温度进行了全面采集和分析。根据测试数据, C 相电缆头显现出明显的温度异常, 特别是在某些特定区域, 温度的升高明显超出了电缆在正常工作条件下的运行温度范围。根据热成像图谱, 这些温度升高区域与常规运行条件下的温度分布存在较大偏差, 表明可能存在局部放电、过载电流或电缆绝缘不良等故障现象。具体而言, 温度异常集中在电缆头的连接部分, 可能的原因是电流通过该区域时, 局部电场的集中导致了电缆头内部局部发热。这一温升现象为后续故障诊断提供了关键的初步信息, 表明电缆头在某些部位可能存在较为严重的绝缘缺陷或局部放电问题, 这些故障往往是电力系统发生重大故障的前兆。因此, 红外测温技术的使用为电缆头故障的早期诊断和维护提供了科学依据, 能够在不干扰电缆正常运行的情况下, 有效发现电力设备的异常状态。

(三) 高频局部放电流检测

在高频电流局部放电检测中, 利用 PDS-T90 局部放电测试仪进行精密测量, 为进一步分析电缆头在运行过程中可能发生的绝缘性放电现象提供了重要的数据支持。测试仪的高灵敏度使得对电缆头绝缘层内细微的放电信号能够精准捕捉和记录。通过对电流波形的细致分析, 清晰地揭示了放电信号的持续性、幅值特征及其在时间上的分布规律。测试结果显示, 放电活动并非偶然性出现, 而是呈现出一定的规律性和稳定性, 这与电缆头某些区域的电场不均匀以及可能的绝缘劣化密切相关。进一步的信号分析表明, 放电集中在电缆头的某些关键接点, 尤其是半导体层与电缆本体的连接部位, 且放电强度在特定的工作电压下显现出较强的放电信号。这些特征信息为后续缺陷定位提供了关键依据, 使得工程师可以精确识别放电源所在区域, 从而实施针对性的维修和故障处理。这一检测手段的应用, 不仅为电缆头的故障诊断提供了科学数据, 同时也为电力系统的维护人员提供了一个高效的工具, 有助于预防和及时解决潜在的电气安全隐患。

(四) X 射线吸收衬度成像检测

为更准确地定位放电源及分析其形成原因, 研究团队引入了 X 射线吸收衬度成像技术进行电缆头内部结构的详细成像分析。该技术利用 X 射线的穿透能力, 结合衬度成像原理, 能够清晰呈现电缆内部的微小缺陷, 尤其是在传统检测方法难以发现的区域。在对电缆头进行扫描后, 成像结果显示, 半导体应力管与电缆本体之间的接触区域存在明显的工艺缺陷。具体来说, 半导体应力管并未完全覆盖电缆本体的半导体层, 形成了一道宽度不等的缝隙, 这一缺陷直接导致了电场在该区域的分布不均匀。电场的不均匀性促使局部电流密度增大, 进而引发了局部放电现象。X 射线成像清晰地标示了这些异常区域, 使得缺陷位置得以准确确认。通过这种成像技术, 电缆头内部缺陷的成因得到了可视化的支持, 同时为后续的维修和改进工艺提供了科学依据。该方法的应用, 有效填补了传统检测手段在

高压电缆内部缺陷定位方面的空白, 提升了电缆头故障诊断的精度和可靠性。

三、解体及分析

解体检查是电缆头故障诊断中的关键步骤, 其重要性在于验证此前多种检测手段的诊断结果, 并为故障分析提供直观的实物依据。高压电缆头由于其结构复杂性和封闭性, 内部缺陷往往难以直接观测, 仅依赖外部检测数据难以充分揭示问题的根源。解体检查可以从物理层面直接还原电缆头内部的结构状态, 对隐藏缺陷进行精细化观察, 为分析故障的成因提供准确支持。在本研究中, 解体检查的首要步骤是针对特定的故障部位, 依据检测手段预判的异常区域, 确定解体位置以避免不必要的破坏。随后, 对电缆头的各层结构进行逐一分解, 包括外护层、绝缘层、半导体应力管及导体连接部位等, 确保操作过程中每一层的细节都得以完整保留, 以便观测到潜在的微小缺陷。解体后, 利用高分辨率光学工具对暴露的部位进行精确记录, 重点观察绝缘性能、结构连接的完整性以及是否存在裂纹、孔洞等结构性缺陷。此外, 在观察过程中, 针对半导体应力管与电缆本体连接的关键部位, 需要特别关注材料的密合程度以及局部是否存在因工艺瑕疵而引发的应力集中现象。整个解体检查的设计既强调操作的规范性, 又兼顾对电缆头内部结构的还原性, 从而为后续的故障原因分析和诊断方法改进奠定了基础。这种方法既能验证前期检测的有效性, 也为进一步优化电缆头的生产工艺提供了直观的数据支持。

解体检查中发现的半导体应力管与电缆本体之间存在的明显缝隙, 暴露了该电缆头结构设计和工艺中的潜在问题, 这一问题对电缆的运行性能具有重要影响。半导体应力管的主要作用在于对电缆头电场进行均匀化分布, 以降低局部电场强度过高带来的绝缘风险。理想情况下, 应力管应与电缆本体的半导体层紧密接触, 通过其特有的电导性能和弹性特性实现电场的平滑过渡。然而, 缝隙的存在破坏了这一关键功能, 使得电缆头内部的电场分布出现显著的非均匀性, 导致局部电场强度升高。随着运行电压的增加, 这种局部电场的不均匀分布会直接引发局部放电现象。局部放电作为一种隐性故障, 其发生初期往往不易被外界检测到, 但长时间作用下会引发绝缘层劣化, 进一步扩大放电范围, 最终导致电缆头的失效。从材料和工艺角度分析, 缝隙的形成可能与生产过程中应力管安装不到位或材料匹配性不足有关。由于电缆头在设计时需要适应复杂的电场分布和机械要求, 任何一处微小的制造偏差或材料选择不当, 都可能导致应力管与本体之间的结合部位出现物理间隙。这种间隙不仅削弱了应力管对电场的调节能力, 还可能为空气或杂质的进入提供条件, 从而进一步恶化绝缘性能。特别是在高压环境下, 间隙内的空气容易形成放电通道, 导致放电现象更加频繁和严重。

进一步的解体分析表明, 半导体应力管与电缆本体之间的缝隙不仅导致电场分布异常, 而且对电缆头的绝缘性能造成了直接而显著的影响。

在缝隙周围, 由于电场集中效应, 局部区域的绝缘材料经受了远高于其设计阈值的电压冲击。长期的电气应力作用会使绝缘材料逐渐老化, 其介电强度降低, 最终难以满足正常运行的绝缘需求。解体过程中观察到缝隙附近的绝缘层表面存在明显的放电痕迹, 表现为炭化点或击穿路径, 这些特征清楚地说明了局部放电已经多次发生, 并对绝缘层造成了不可逆的破坏。局部放电的发生机制可以进一步归因于电缆头生产工艺的细节问题。在制造过程中, 半导体应力管的安装需要极高的精度, 以确保其与电缆本体表面完全接触。然而, 因工艺不当或操作偏差, 缝隙可能在组装阶段形成, 并成为电场集中的高风险区域^[3]。更严重的是, 这种工艺瑕疵往往难以在初期被察觉, 但在运行过程中, 局部放电的积累效应会逐步放大问题。放电不仅损耗绝缘材料, 还可能诱发裂纹扩展或局部高温, 这些连锁反应最终导致电缆头失效。

X 射线吸收衬度成像技术在本次研究中的应用为解体检查结果提供了关键性的佐证。成像技术基于 X 射线的高穿透性和衬度增强原理, 能够精准捕捉电缆头内部的结构细节, 其结果清晰地呈现了半导体应力管与电缆本体之间的微小缝隙及其周边区域的物理状态。这一发现不仅直观地揭示了电缆头的结构缺陷, 同时也从图像层面验证了局部放电的发生机制。成像结果中缝隙的形态、位置以及与周围材料的结合特性清晰可见, 为进一步理解电场集中效应和绝缘性能劣化提供了数据支撑。与传统检测方法相比, X 射线成像技术的突出优势在于其能够无损地获取被测物内部的完整图像, 并对关键部位的缺陷特征进行高分辨率的展现。例如, 在本次检测中, 红外测温和超声波检测虽然能够反映电缆头局部异常, 但无法深入了解内部结构细节。而 X 射线成像技术则以其高度直观的可视化结果弥补了这一不足, 提供了传统方法难以获得的精确诊断信息。此外, 该技术能够动态捕捉电缆头内部不同材料对 X 射线吸收差异形成的衬度变化, 从而有效区分正常区域和缺陷区域。

四、结语

通过综合应用红外精确测温、超声波检测、高频电流局放检测以及 X 射线吸收衬度成像技术, 本研究成功地诊断了 35kV 单芯高压电缆头的绝缘放电问题。X 射线成像技术作为一种创新性的检测手段, 在电缆头缺陷诊断中发挥了重要作用, 为提高电缆头的故障诊断精度提供了有力支持。研究表明, 结合多种检测技术, 可以有效提高电力设备的故障诊断能力, 确保电网的安全稳定运行。

参考文献:

- [1] 周福捷, 李海, 范玉军, 代娜. 高压 XLPE 电缆缓冲层烧蚀故障原因与检测关键技术 [J]. 电线电缆, 2023, (01): 26-29.
- [2] 李濛, 洪晓丰, 黄嘉盛. 高压电缆铝护套腐蚀缺陷周向超声导波检测技术 [J]. 自动化与信息工程, 2022, 43 (04): 1-6.
- [3] 刘三伟, 谢亿, 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.