

文章编号: 2095-4980(2025)06-0583-07

太赫兹脉冲成像电缆绝缘层厚度均匀性研究

陈巳阳¹, 成 诚¹, 翟 迪²

(1. 国网宁夏超高压公司, 宁夏 银川 750011; 2. 国网智能电网研究院有限公司, 北京 102209)

摘 要: 高压电缆绝缘层质量对于电力输变电系统的长期可靠性至关重要。绝缘层厚度分布不均匀性导致的局部切向电场容易形成安全隐患。本文利用反射式太赫兹检测系统, 结合柱坐标扫描装置, 实现了交联聚乙烯高压电缆绝缘层厚度全角度扫描测量, 量化了绝缘层厚度不圆度并评估其分布均匀性。通过太赫兹图像直观显示绝缘层的界面褶皱纹理特征, 与实际试件形貌高度吻合, 验证了太赫兹成像技术在高压电缆质量检测中的有效性, 为高压电缆的质量评价提供了新的检测手段和评估方法。

关键词: 电缆绝缘层; 太赫兹; 检测成像; 厚度均匀性

中图分类号: TN247

文献标志码: A

DOI: 10.11805/TKYDA2024558

Study on the uniformity of cable insulation layer thickness using terahertz pulse imaging

CHEN Siyang¹, CHENG Cheng¹, ZHAI Di²

(1.State grid Ningxia Ultrahigh Voltage Company, Yingchuan Ningxia 750011, China;

2.State Grid Smart Grid Research Institute Co., Ltd, Beijing 102209, China)

Abstract: The quality of the insulation layer of high-voltage cables is crucial for the long-term reliability of power transmission and transformation systems. Non-uniformity in the thickness of the insulation layer can lead to localized tangential electric fields, which are prone to creating safety hazards. A reflective terahertz detection system, combined with a cylindrical coordinate scanning device, is employed to achieve full-angle scanning measurements of the insulation layer thickness of cross-linked polyethylene high-voltage cables. The non-roundness of the insulation layer thickness is quantified, and its distribution uniformity is assessed. The terahertz images intuitively display the interface wrinkle texture features of the insulation layer, which are highly consistent with the actual specimen morphology. This validates the effectiveness of terahertz imaging technology in the quality inspection of high-voltage cables, providing a new detection method and evaluation approach for the quality assessment of high-voltage cables.

Keywords: cable insulation layer; terahertz; detection imaging; thickness uniformity

高压电缆的质量对电力系统长期稳定运行至关重要。电缆不仅长期承受强电场和自然环境变化的考验, 还需确保运行安全, 因此检测绝缘层结构完整性是电力设备状态检测的重要环节。近年因绝缘材料失效引发的事中, 不均匀区域多为故障点, 这也对质量控制提出了新的要求。绝缘层成型需要控制挤出、硫化交联等诸多因素, 但不确定因素会导致厚度、密度不均、褶皱等缺陷, 直接影响电缆电气与机械性能^[1-6]。

目前主要通过破坏性取样检测绝缘层厚度均匀性, 缺乏高效的全覆盖非接触式无损检测手段。电缆绝缘层

收稿日期: 2024-10-15; 修回日期: 2025-01-25

基金项目: 国网宁夏电力有限公司科技项目(5229CG23000H)

引用格式: 陈巳阳, 成诚, 翟迪, 等. 太赫兹脉冲成像电缆绝缘层厚度均匀性研究[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2025, 23(6): 583–589. DOI: 10.11805/TKYDA2024558.

Citation format: CHEN Siyang, CHENG Cheng, ZHAI Di. Study on the uniformity of cable insulation layer thickness using terahertz pulse imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2025, 23(6): 583–589. DOI: 10.11805/TKYDA2024558.

的厚度均匀度可以通过电缆的不圆度测试来表征, 常见的方法是使用激光测量仪器或者光学投影仪来测量电缆的直径, 然后计算出电缆的不圆度^[7]。这些设备能够精确地测量电缆的直径, 并且可以提供准确的不圆度数据。或者使用机械、电子卡尺测量工具, 得出电缆的不圆度。但是都只能获得外径数据, 无法了解绝缘层内部的信息, 数据存在局限性。还可以采用光学显微镜观察电缆截面的形状, 或者使用影像分析系统进行图像处理和数据分析, 来获取电缆的不圆度信息^[8]。但是测试需要将电缆截断, 存在破坏性, 同时效率较低。

若绝缘层存在严重不均匀性, 在高压电场下, 其非圆几何结构会导致切向电场局部增强, 易引发沿面放电, 容易造成切向电击穿^[9]。绝缘厚度是绝缘结构最重要的几何参数之一。沿同一圆周上的绝缘厚度不可能绝对一致, 且可能出现局部的褶皱、隆起和凹槽, 这带来了长期使用时的安全隐患。目前主要通过破坏性地截取样品、抽样测量的方式获得厚度分布值用于评价厚度分布均匀性。太赫兹波能够穿透电缆绝缘层到达内部导体界面并被原路返回, 分析传输路径上的回波能够分析电缆绝缘层内部及其各个界面的特征。太赫兹检测是一种新型的非接触无损检测技术, 能够给出厚度全覆盖的分布, 而且还能够给出局部褶皱、隆起和凹槽的纹理特征^[10-15], 识别出复合绝缘子橡胶粘接界面气隙缺陷^[16]、电缆绝缘层气隙缺陷^[17]、电缆中气孔和水孔缺陷^[18]、电缆接头护套和绝缘层界面受潮缺陷^[19]等, 受到电力行业和塑料加工行业的关注, 这为维护和保障电力系统的稳定性提供了重要依据。

本文利用反射式太赫兹检测系统, 结合柱坐标扫描装置, 实现了交联聚乙烯高压绝缘电缆绝缘层厚度全角度测量, 分析了厚度分布均匀性, 同时通过太赫兹图像直观显示绝缘层的褶皱纹理, 检测结果与实际试件特征吻合, 验证了太赫兹成像检测的有效性, 为高压电缆的质量评价提供了新的检测手段和评估方法。

1 原理与设计

1.1 太赫兹波传输原理

如图 1 所示的物理模型, 太赫兹脉冲穿过空气和介质之间的界面(保护层和绝缘层), 然后通过介电层传输到介质和金属(金属电缆或水等高反射材料)之间的界面, 位置 0 对应于空气介质界面, 实验中可以使用测量夹具精确定位。太赫兹脉冲 E 垂直入射到介质表面上, 产生部分反射信号 E_{r0} 。在通过介质传输距离 d 后, 传输的脉冲在介质-金属界面处被完全反射(反射率约为 1)。在通过介质行进另一距离 d 后, 脉冲的一部分返回, 而另一部分作为 E_{r1} 传输。理论上, 上述内部传输过程可以无限传播。然而, 在实验中, 信号受到样品吸收和散射的影响, 经过几轮回波传播后, 当 E_{rn} 的幅值趋近于零时, 导致回波信号无法检测到。太赫兹脉冲在样品中的传播可以表示为到达探测器的时间延迟。各次回波信号 E_{r0} 、 E_{r1} 、 E_{rn} 和总反射信号 E_r 分别表示为:

$$E_{r0} = E r_{as} \quad (1)$$

$$E_{r1} = E t_{as} r_{sm} t_{sa} T_s^2(d) \quad (2)$$

$$E_{rn} = E t_{as} r_{sa}^{n-1} r_{sm}^n t_{sa} T_s^{2n}(d) \quad (3)$$

$$E_r = \left\{ r_{as} + \frac{t_{as} t_{sa}}{r_{sa}} \sum_{i=1}^n [r_{sm} r_{sa} T_s^2(d)]^i \right\} E \quad (4)$$

式中: r_{as} 为空气-介质界面处的反射系数; r_{sm} 为介质-金属界面处的反射率; t_{as} 和 t_{sa} 分别为空气介质和介质-空气处的透射系数; $T_s(d)$ 为样品厚度为 d 时的透射系数。

1.2 测厚原理

飞行时间法是通过前界面与后界面回波之间的飞行时间差计算厚度, 如图 2 所示, 厚度 d 计算公式为:

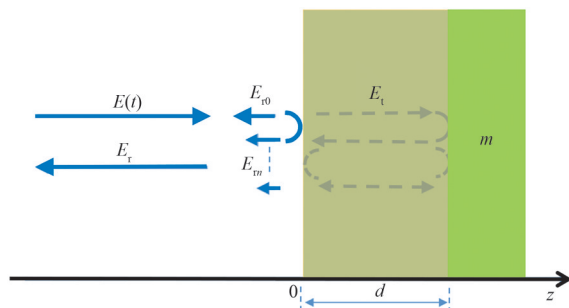


Fig.1 Schematic diagram of terahertz wave propagation model with an air-medium-metal structure

图 1 具有空气-介质-金属结构的太赫兹波传播模型示意图

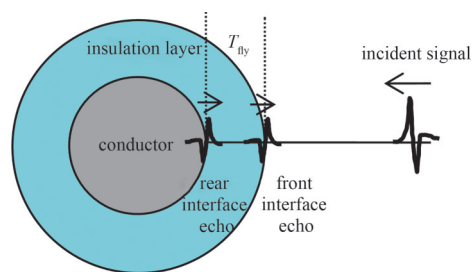


Fig.2 Principle of thickness measurement using time-flight method

图 2 飞行时间法测厚原理

$$d=\frac{T_{ny}\times c}{2n}$$

(5)

式中： T_{ny} 为第一界面与第二界面之间的飞行时间差，即太赫兹波在样品内部的飞行时间； c 为波速； n 为样品折射率。

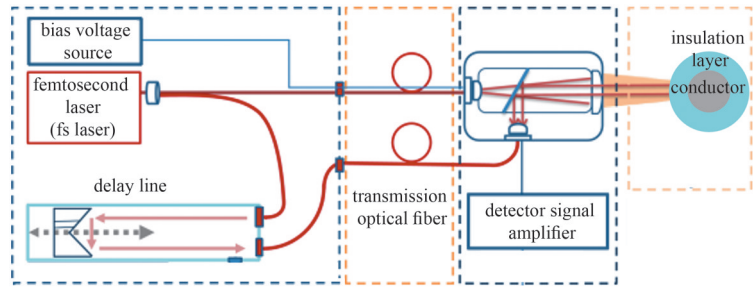


Fig.3 Schematic diagram of terahertz detection system
图3 太赫兹检测系统示意图

1.3 检测系统设计

太赫兹时域检测系统主要由以下部分构成：飞秒脉冲激光器、太赫兹光电导发射天线、太赫兹光电导接收天线、时间延迟装置、传输组件、同步控制和信号采集单元，其结构示意图和系统照片如图3所示。系统中飞秒激光通过光纤传输，被分为两束：一束直接连接到光纤耦合光导天线，另一束通过高速延迟线连接到另一光导天线。光导天线被集成到一个垂直反射模块中。发射的太赫兹信号垂直照射到被测目标，反射的回波原路返回，当太赫兹信号与探测飞秒脉冲同时到达探测光导天线，太赫兹电场驱动光生载流子运动，形成光电流，经过滤波放大后被记录。延迟装置调节太赫兹信号与探测飞秒脉冲的相对相位，实现时域信号采样。结合扫描装置实现对被测目标成像。

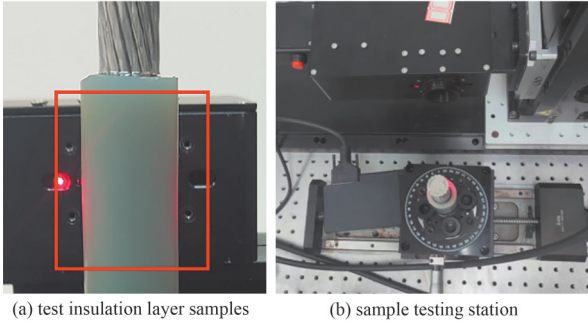


Fig.4 Schematic diagram of insulation layer sample testing
图4 绝缘层样品测试示意图

2 实验

2.1 样品和测试

试验样品为高压电缆的交联聚乙烯绝缘层，内含导线。样品被放置在360°转台上，太赫兹系统收发装置固定在一维平移台上，太赫兹信号垂直入射到样品表面并指向轴线，通过太赫兹探头上下移动配合转台转动样品，完成太赫兹信号扫描，如图4所示。转台步长为1°，实验扫描360°。平移台步长为1 mm，垂直移动范围为42 mm。系统移动位置对应成像像素点，每个像素对应单一时域波形，每个时域波形由3 751个数据点组成，最终将所有像素点组成太赫兹时域信号矩阵，维度为360×42×3 751。系统单像素信号获取速率为10 Hz，36 s能够扫描电缆一周，红框所示位置为绝缘层检测区域，扫描该区需要耗时约25 min。

2.2 实验结果

原始检测结果如图5所示，检测结果包含360×42组太赫兹时域波形，每个时域波形的时域长度为100 ps，时域波形中包含了被测样品的前界面回波和后界面回波。

将测量数据按360×42像素矩阵重构太赫兹图像。可基于时域信号的最大值成像、最小值成像、峰-峰值成

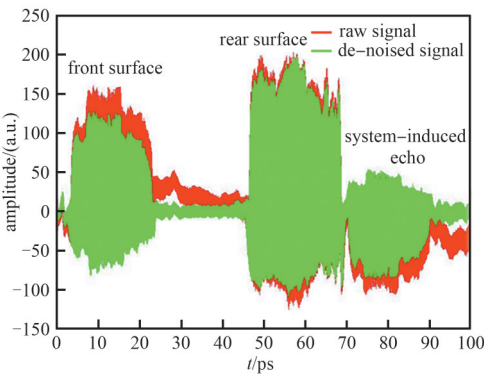


Fig.5 Original measurement results
图5 原始测量结果

像, 或对应时间位置坐标直接成像。也可通过傅里叶变换获得频谱, 在频域中选择特定频率点的振幅或相位进行成像。实验中对前表面回波和后表面回波的时域最大值进行 C 扫描成像, 结果如图 6 所示。在高压电缆实际生产中, 交联聚乙烯绝缘层表面经切削打磨并非绝对光滑, 而太赫兹脉冲对绝缘层表面细小变化非常敏感, 能清晰呈现绝缘层前表面纵向细纹, 如图 6(a) 所示。利用后表面回波的 C 扫描成像, 则可直观显示金属芯与绝缘层的界面形貌, 如图 6(b) 所示。

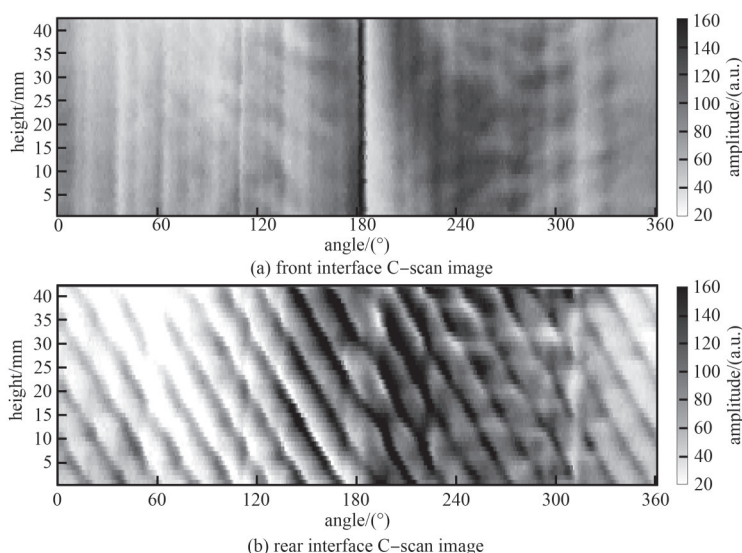


Fig.6 Front and rear interface scanning images

图 6 前后界面扫描图

通过前后回波飞行时间计算获得的厚度分布如图 7(a) 所示。太赫兹时域检测技术可直观反映交联聚乙烯绝缘层厚度分布, 但因信号采集噪声、基线漂移及峰值抖动等问题, 加之样品倾角偏差导致转动时反射信号部分丢失, 样品一些位置的前后表面峰值信号并不明显, 在表面峰值提取时产生干扰, 导致交联聚乙烯绝缘层飞行时间厚度值突然减小, 形成检测异常点。A 点为异常厚度位置, B 点为正常厚度区域, 时域波形如图 7(b) 所示。

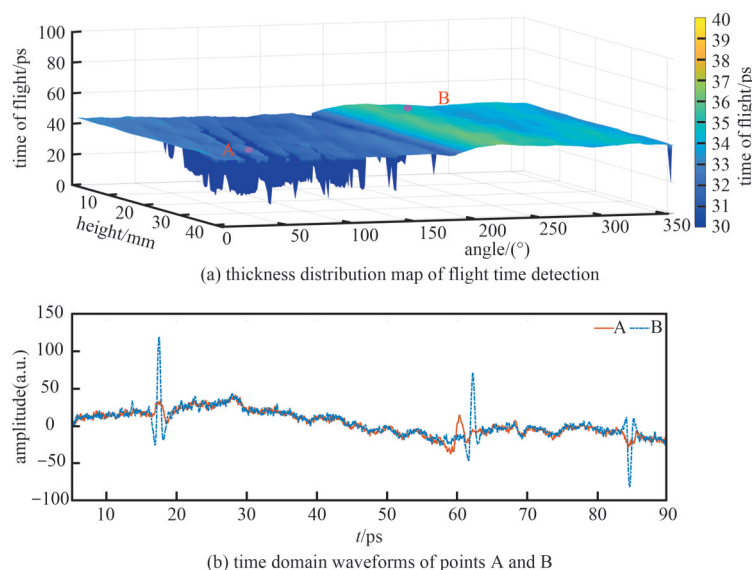


Fig.7 Thickness distribution for time-of-flight detection and time-domain waveforms corresponding to points A and B

图 7 飞行时间检测厚度分布图及 A、B 两点对应时域波形

为提升信噪比并增强交联聚乙烯层前后界面波形特征, 采用信号去噪和基线校正方法, 对绝缘层区信号进行处理。其中, A、B 点信号处理结果如图 8 所示, 图中符号 VMD 为变分模态分解 (Variational Mode Decomposition, VMD), 信号基线得到校正, 异常点 A 信号的前后表面峰值均被有效突出。

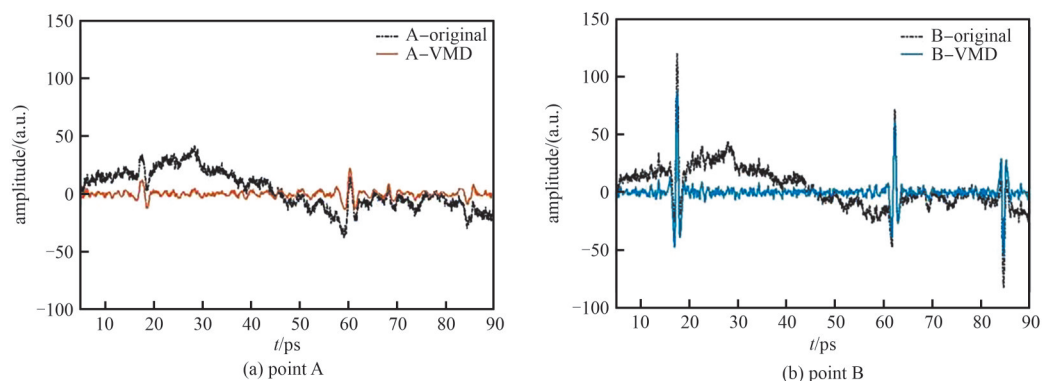


Fig.8 Comparison of signals before and after processing at points A and B

图 8 A、B 两点处理前后信号对比图

对整体信号进行处理, 重构信号与原始波形对比如图 9 所示。经过与原始信号相比重构后信号基线得到了校正, 噪声被有效抑制。若试件表面光滑且轴线垂直, 则太赫兹反射脉冲前表面回波具有时域一致性, 故在分析时, 将信号前表面进行对齐。由于高压电缆金属芯采用多根单线绞合, 因此不同部位接收到的反射信号出现一定相位差, 且信号幅值也会发生变化。

图 10(a)为交联聚乙烯绝缘层与空气界面处理后峰值信号时域成像, 图 10(b)为交联聚乙烯绝缘层区第二主峰处理后信号时域成像。与图 6 相对照, 原始信号后表面回波 C 扫描图像存在不清晰部位, 经过处理后能够直观显示出内部金属芯结构。

为客观比较信号处理前后的图像质量, 本文采用图像信息熵 Q 进行评价, 数学表达式为式(6)。图像信息熵作为图像质量评价的指标, 从信息论的角度反映图像信息丰富程度。通常情况下, 图像信息熵越大, 其信息量就越丰富, 质量越好。

$$Q = - \sum_{i=0}^m P_i \log_2 P_i \quad (6)$$

式中: P_i 为第 i 个灰度值在图像中出现的概率; m 为灰度值范围。经过计算, 原始信号后表面时域成像信息熵 Q 为 5.118, 经过处理信号后表面成像信息熵为 5.607 8。通过肉眼主观评价与客观能量熵评价综合来看, 经变分模态去噪处理后, 信号成像特征更清晰。

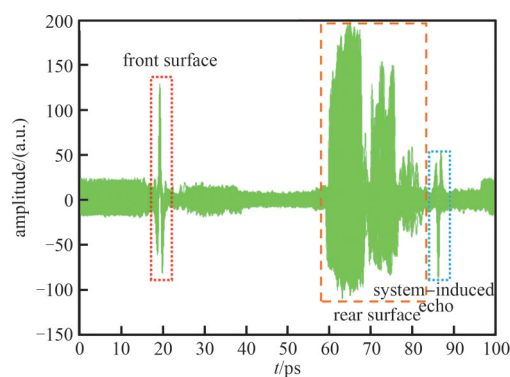


Fig.9 Alignment of signal

图 9 对齐信号

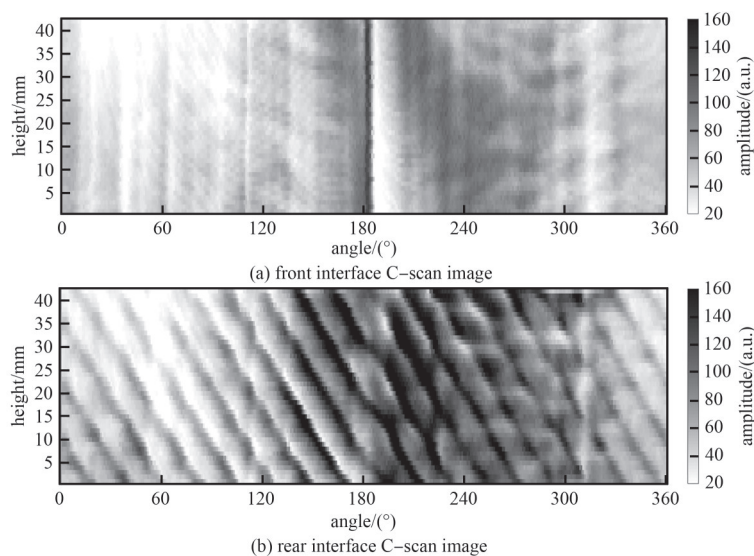


Fig.10 Front and rear interface scanning images after processing

图 10 处理后前后界面扫描图

为进一步对比成像结果,实验截取 10° 位置纵向截面进行 b 扫描成像,如图 11 所示。通过实验结果可以看出,针对绝缘层区,交联聚乙烯信号前后表面噪声干扰均被有效去除,交联聚乙烯层与金属芯交界面作为绝缘层区后表面信号,金属绞合的切面形貌更加清晰。

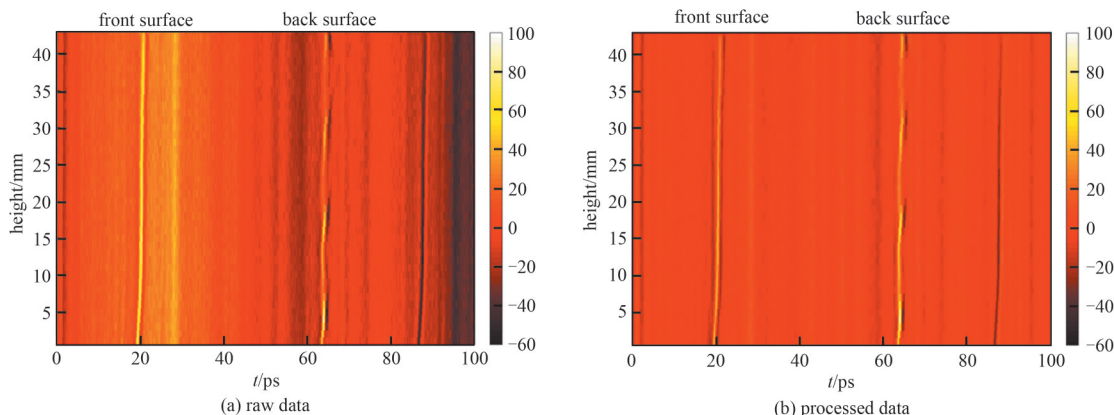


Fig.11 10° position b scanning imaging

图 11 10° 位置 b 扫描成像

通过计算处理后信号前后回波的飞行时间,获得飞行时间厚度分布如图 12 所示。通过成像结果可以看出信号厚度检测中的异常点被有效去除。

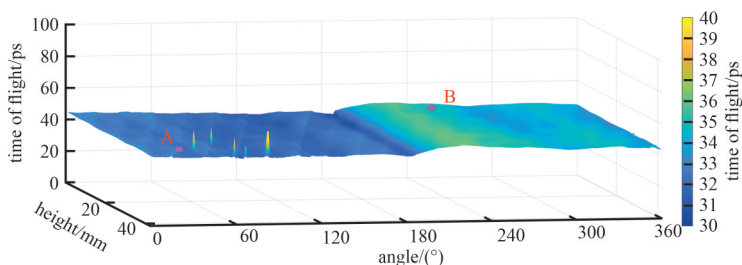


Fig.12 Thickness distribution of processed flight time detection

图 12 处理后飞行时间检测厚度分布图

通过剔除异常点的飞行时间厚度数据,构建厚度分布直方图如图 13 所示。交联聚乙烯厚度值呈现单峰分布,飞行时间集中分布于 $42.5 \sim 47.5$ ps 区间。根据式(5),材料折射率为 1.55,最小飞行时间为 40.69 ps,对应最薄厚度为 3.94 mm,最大飞行时间为 48.57 ps,对应最厚厚度为 4.70 mm,平均飞行时间为 44.43 ps,对应厚度为 4.30 mm。绝缘厚度均匀性采用不圆度来评价,定义为:

$$\text{不圆度} = \frac{\text{最厚点厚度} - \text{最薄点厚度}}{\text{平均厚度}} \times 100\% \quad (7)$$

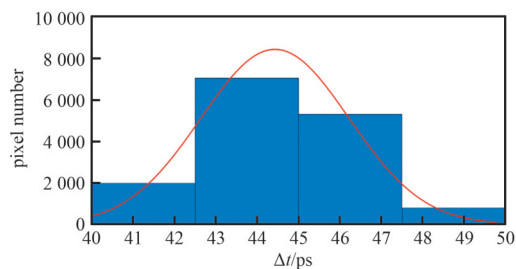


Fig.13 Histogram of flight time thickness distribution

图 13 飞行时间厚度分布直方图

根据式(7)计算的试件绝缘层的不圆度为 17.67%,参照国家标准对电缆不圆度的要求,该类电缆的不圆度需要控制在 15%之内,不圆度超出国标值,同时电缆界面还存在局部的褶皱、隆起和凹槽,存在较大安全隐患。

3 结论

电缆不圆度是电缆生产及使用中必须重视的指标之一。本文采用太赫兹时域光谱与成像检测技术实现电缆绝缘层的准确厚度测量,进而计算绝缘层不圆度,同时能够对绝缘层界面的形貌进行飞行时间成像,是一种快速准确评估电缆绝缘层厚度均匀性的新方法,为电缆生产及使用提供了数据参考,促进太赫兹技术实现在线检测和在役检测。

参考文献:

- [1] 潘燕凯. 电缆绝缘树脂用交联聚乙烯的制备及其改性研究进展[J]. 塑料科技, 2023,51(3):99-105. (PAN Yankai. Research progress on preparation and modification of cross-linked polyethylene for cable insulation resin[J]. Plastics Science and Technology, 2023,51(3):99-105.) DOI:10.15925/j.cnki.issn1005-3360.2023.03.021.
- [2] 李飞,钟力生,李文鹏,等. 挤包绝缘高压直流电缆制造与应用中的径向梯度效应[J]. 中国电力, 2021,54(4):63-71. (LI Fei, ZHONG Lisheng, LI Wenpeng, et al. Radial gradient effect in the manufacturing and application of extruded insulation high-voltage direct current cables[J]. China Electric Power, 2021,54(4):63-71.) DOI:10.11930/j.issn.1004-9649.202006208.
- [3] 陈新,李文鹏,李震宇,等. 高压直流XLPE绝缘材料及电缆关键技术展望[J]. 高电压技术, 2020,46(5):1571-1579. (CHEN Xin, LI Wenpeng, LI Zhenyu, et al. Prospects for key technologies of high voltage DC XLPE insulation materials and cables[J]. High Voltage Engineering, 2020,46(5):1571-1579.) DOI:10.13336/j.1003-6520.hve.20200515011.
- [4] 于鑫,狄健,叶丽军,等. 110 kV挤出模注式接头的开发及应用[J]. 绝缘材料, 2018,51(5):63-68. (YU Xin, DI Jian, YE Lijun, et al. Development and application of 110 kV extrusion die injection joint[J]. Insulation Materials, 2018,51(5):63-68.) DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2018.05.011.
- [5] 李忠磊,杜伯学. 高压直流交联聚乙烯电缆运行与研究现状[J]. 绝缘材料, 2016,49(11):9-14. (LI Zhonglei, DU Boxue. Operation and research status of high voltage DC cross linked polyethylene cables[J]. Insulation Materials, 2016,49(11):9-14.) DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2016.11.002.
- [6] 中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局、中国国家标准化管理委员会. GB/T 9330-2008 电工电子产品热塑性绝缘材料通用技术条件[S]. 北京:中国标准出版社, 2009. (General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of China(SAC). GB/T 9330-2008 General technical specifications for thermoplastic insulation materials for electrical and electronic products[S]. Beijing:Standards Press of China, 2009.)
- [7] 董兆鹏,黄富贵. 圆度误差测量及评定方法综述[J]. 工具技术, 2011,45(2):14-19. (DONG Zhaopeng, HUANG Fugui. Overview of roundness error measurement and evaluation methods[J]. Tool Technology, 2011,45(2):14-19.) DOI:10.3969/j.issn.1000-7008.2011.02.003.
- [8] 刘罡. 基于机器视觉的电线电缆绝缘厚度检测研究[D]. 杭州:浙江工业大学, 2019. (LIU Gang. Research on insulation thickness detection of wire and cable based on machine vision[D]. Hangzhou, China: Zhejiang University of Technology, 2019.)
- [9] 罗明月. 线缆挤出工艺的控制方法研究[D]. 长春:长春工业大学, 2021. (LUO Mingyue. Research on control methods for cable extrusion process[D]. Changchun, China: Changchun University of Technology, 2021.)
- [10] KOMATSU M, SATO R, MIZUNO M, et al. Feasibility study on terahertz imaging of corrosion on a cable metal shield[J]. Japanese Journal of Applied Physics, 2012,51(1):122405. DOI:10.1143/JJAP.51.122405.
- [11] TAKAHASHI S, HAMANO T, NAKAJIMA K, et al. Observation of damage in insulated copper cables by THz imaging[J]. NDT & E International, 2014(61):75-79. DOI:10.1016/j.ndteint.2013.10.004.
- [12] YAN Zhijin, SHI Wei, HOU Lei, et al, et al. Investigation of aging effects in cross-linked polyethylene insulated cable using terahertz waves[J]. Materials Research Express, 2017,4(1):015304. DOI:10.1088/2053-1591/aa5237.
- [13] LI Shuaibing, CAO Binglei, KANG Yongqiang, et al. Nonintrusive inspection of moisture damp in composited insulation structure based on terahertz technology[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021(70):1-10. DOI: 10.1109/TIM.2021.3117360.
- [14] LEE I S, LEE J W. Nondestructive internal defect detection using a CW-THz imaging system in XLPE for power cable insulation[J]. Applied Sciences, 2020,10(6):2055. DOI:10.3390/app10062055.
- [15] 李薇,施长城,张瑾,等. 纤维增强复合材料太赫兹成像无损检测[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2015,13(3):396-400. (LI Wei, SHI Changcheng, ZHANG Jin, et al. Nondestructive evaluation of fiber reinforced plastic using terahertz imaging[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2015,13(3):396-400.) DOI:10.11805/TKYDA201503.0396.
- [16] 张中浩,梅红伟,刘建军,等. 基于太赫兹波的复合绝缘子界面检测研究[J]. 中国电机工程学报, 2020,40(3):989-998. (ZHANG Zhonghao, MEI Hongwei, LIU Jianjun, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2020,40(3):989-998.) DOI:10.13334/j.0258-8013.pcsee.190699.

(下转第647页)