

高压电缆 X 射线成像状态检测中的尺寸测量分析

郝世旺

(上海魏德曼电力绝缘材料有限公司, 上海 201114)

摘 要: 高压电力电缆 X 射线成像检测技术在检查和呈现电缆内部结构状态、识别和分析局部缺陷问题方面发挥着重要作用。但目前该方法主要以定性分析为主, 缺乏定量评价的相关研究。基于此, 首先研究了电缆 X 射线成像尺寸量化分析问题, 并调研成像系统参数是否满足电缆尺寸测试精度需求; 然后, 详细分析了影响尺寸测量的关键因素, 提出了电缆尺寸标定的具体方法; 最后, 通过具体应用实例验证了方法的可靠性。结果表明, 放大倍数修正值标定法的效果良好, 能够满足电力电缆状态检测量化分析评价的新要求。

关键词: 电力电缆; X 射线成像; 尺寸标定; 量化评价; 放大倍数

中图分类号: TM726

文献标志码: A

文章编号: 1672-6901(2024)05-0041-06

Dimensional Measurement and Analysis of High Voltage Cables in X-ray Imaging State Detection

HAO Shiwang

(Weidmann Electrical Insulating System (Shanghai) Co., Ltd., Shanghai 201114, China)

Abstract: X-ray imaging detection technology for high-voltage power cables plays a significant role in inspecting and displaying the internal structure status of cables and identifying and analyzing the local defects. However, it mainly focuses on qualitative analysis in current, and there are few relevant reports on quantitative evaluation. Firstly, research was conducted on the quantification analysis of cable X-ray imaging dimensions, and imaging system parameters were investigated to determine whether they meet the accuracy requirements for cable size testing. The key factors affecting size measurement were analyzed in detail, and a specific method of cable dimension calibration was proposed. Finally, the reliability of the method was verified through specific application examples. The results indicated that the discharge multiple correction method had a good effect, which could meet the new requirement of quantitative analysis and evaluation for power cable state detection.

Key words: power cable; X-ray imaging; size calibration; quantitative evaluation; enlargement factor

0 引 言

近年来, 高压电力电缆 X 射线成像检测技术已在行业内得到广泛应用, 对检查和展现电缆内部结构状态、识别和分析局部缺陷起着至关重要的作用^[1-2]。然而, 由于 X 射线数字图像与电力电缆实体之间存在着放大现象和变形问题, 二者尺寸并不一致, 导致当前工程应用中, 成像结果只能以定性分析为主^[3-6]。

当前, 随着工程实践的不断深入, 对电缆结构或局部缺陷的量化分析需求也日趋强烈。长春理工大学刘斌贤、上海应用技术大学李伟等人曾深入研究

过电力电缆偏心和外径问题的 X 射线检测, 主要以测试原理、工艺参数、系统设计方案等内容为主^[7-8]; 中国工程物理研究所李强、奚清等人对 X 射线成像尺寸的标定问题进行过专门研究, 并制定了不同的标尺或评定尺, 但仅适用于特定金属焊缝、低密度粉末制品的缺陷尺寸的评定^[9-10]; 云南电力试验研究院吴章勤、华北电力大学耿磊昭、云南电科院刘荣海等人指出, X 射线影像尺寸标定技术是一种新的方法, 能为定量分析提供有效帮助, 但目前仅在气体绝缘开关(GIS)内部螺栓紧固程度、断路器触头位置等分析中有所应用^[11-12]。可见, 目前尚鲜有对电力电缆 X 射线成像进行定量分析和尺寸评定的相关研究。

本工作对高压电力电缆 X 射线成像尺寸的测量与分析进行研究。首先, 调研成像系统参数能否满足

收稿日期: 2024-04-13

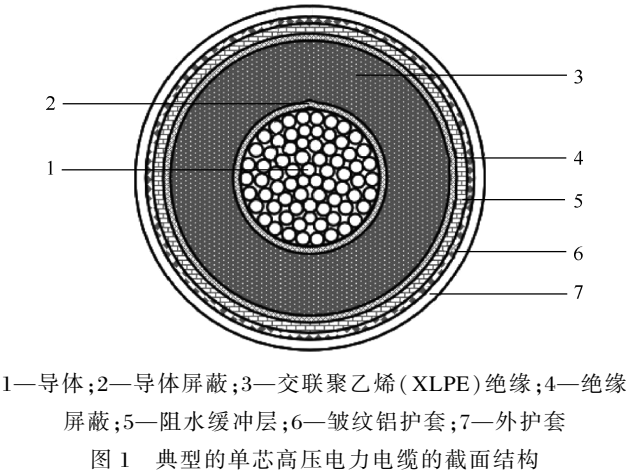
作者简介: 郝世旺(1987—), 男, 工程师。

E-mail: hardy_hao@weidmann-group.com

电缆尺寸测试精度需求,分析影响尺寸测量分析的关键因素;然后,提出电缆尺寸标定的具体方法,并通过具体应用案例,验证所提出方法的实际效果。

1 高压单芯电缆尺寸量级分析

常见的 110 kV 和 220 kV 单芯高压电力电缆的截面结构见图 1^[5]。按照电缆标准要求,各层厚度尺寸计量单位均采用毫米。其中,绝缘屏蔽层和导体屏蔽层的厚度最小,典型厚度约为 1~2 mm;其他各层厚度一般在 2 mm 以上,绝缘层最大,典型标称厚度为 16~27 mm;常见的电缆内部缺陷,如金属护套局部变形、缓冲层及绝缘层烧蚀斑点等,通常在数毫米以上。



量化分析电缆尺寸要求 X 射线成像系统的分辨能力达到一定水平。X 摄像数字式平板探测器的分辨率较高,在半导体检测行业应用广泛^[13-14],而在电力设备状态检测领域实际应用中,分辨率基本可达到 $2.5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,甚至 $5\text{ lp}\cdot\text{mm}^{-1}$,基本满足电力电缆结构成像检测应用的要求。主流 X 射线成像系统的分辨率见表 1。

表 1 电缆 X 射线成像系统的分辨率		
品牌	分辨率/(lp·mm ⁻¹)	清晰度/μm
中国某品牌 1	2.5~4	200~125
中国某品牌 2	6.7	75
美国某品牌 1	3.6~5	139~100
美国某品牌 2	6	83
美国某品牌 3	6.7	75
德国某品牌 1	3.5	139
德国某品牌 2	5.1	100
日本某品牌	5.1	100
比利时某品牌	6.7	75

可见,当前应用阶段,主流的优质成像仪器系统

分辨力水平适用于高压电缆尺寸的测量与分析,这是电缆 X 射线状态检测中的尺寸量化评价前提条件。

需要特别指出,高压电缆由内到外组成层数较多,各层密度并未按照由内及外或由高到低的顺序排列,再加上成像条件的限制,导致 X 射线在高压电缆检测中存在较多盲区。因此,客观上并非所有的缺陷类型都可以通过 X 射线成像检测方法进行有效识别和尺寸分析。例如,轻微的缓冲层烧蚀问题、500 kV 等级护层烧蚀斑点、绝缘层或应力锥内低密度气泡气隙瑕疵、导线内部缺陷等,这些问题的量化评价在短期内将难以开展。

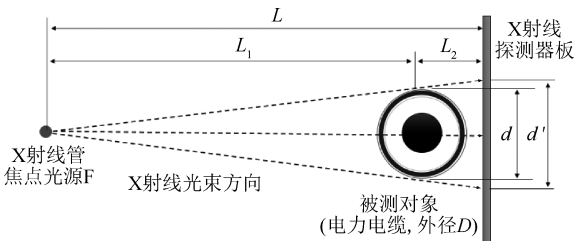
2 电缆成像尺寸测量误差影响因素分析

对 X 射线成像检测结果进行尺寸评价和分析,需要从传统的定性分析过渡到较为准确的定量分析,最大的挑战就是测量误差问题,即认为的测量结果(测量值)与被测量值的真值之间的差值。对于毫米级的高压电缆结构,现场 X 射线状态检测的精度要求虽然比工厂检验低,但仍然是一个不小的挑战。现场测试时误差来源较多,现场用仪器性能和总误差控制水平也相对有限。

通常,测量误差的来源包括测量仪器误差、测量原理的局限、测量方法的不完善、外界干扰,以及测量人员的个人因素等^[15]。电缆 X 射线成像检测中的误差来源也可分为以上几种,现选取部分关键影响因素,具体分析如下。

2.1 光成像放大现象

电力电缆 X 射线成像检测放大原理见图 2,在光学成像过程中,成像平面上得到的检测图像尺寸是放大的。



根据几何投影和相似三角形原理,X 射线成像检测放大倍数(M)计算见公式(1)。分析可知, L_2 相对于 L_1 越大,则放大倍数越大^[16]。

$$M = \frac{d'}{d} = \frac{L}{L_1} = 1 + \frac{L_2}{L_1}$$

(1)

式中: M 为图像放大倍数; L_1 为射线光源距离被检

电缆中心区域的距离, m ; L_2 为成像探测器距离被检电缆中心区域的距离, m ; d 为试样外径尺寸, m ; d' 为试样外径投影尺寸, m 。

由于存在放大现象, 整个测试区域及异常缺陷点的投影尺寸被放大, 这在定量分析中, 直接影响到测量尺寸的正确性和缺陷级别的判定。因此, 需要计算放大倍数, 并测量图像尺寸进行真实尺寸的缩小逆运算。

实际应用中, 数字式成像板往往紧贴电缆拍摄, 此时属于特殊情形, 即 $L_2 = D/2$ 。由于电缆直径 D 一般为已知量, 放大倍数仅与 L_1 有关, 非常容易求出。根据实际测算, 通常高压电缆 X 射线成像检测的放大倍数在 1.02~1.20 之间。

此外, 由于射线源实际上有一定的面积(焦斑)而非零尺寸点, 再加上被测物在不同空间位置的放大程度并不完全一致, 必然存在一定的缩放误差。不过对于体积尺寸较小的电缆本体而言, 不均匀缩放导致的误差通常较小, 可以忽略, 故选取统一放大倍数进行实用换算。

2.2 现场成像拍摄角度

在电缆 X 射线成像拍摄工艺中, 直接影响成像放大倍数的参数有物体尺寸大小、相对拍摄距离、拍摄角度等问题。其中, 拍摄角度对成像尺寸有重要影响。拍摄角度的影响, 主要包括以下两个方面。

一是入射光与电缆切面垂直度的问题。由前述的放大原理可知, 放大成像是基于入射光束与电缆切面、成像面板均接近垂直的理想情形下进行的。但是, 如果射线与电缆切面、成像面板的垂直度差, 或者与缺陷点长度面或深度面严重偏离 90° 时, 成像效果将会偏移和失真, 缩放比例不再正确, 这对后续图像尺寸量化分析的影响较大, 很可能造成误判。江苏电科院文乐斌等曾采用钉子扎入电缆的方式, 分析缺陷深度与入射光角度的关系^[17], 电缆扎钉深度探测试验见图 3。只有当主射线束和缺陷深度方向的角度接近 90° 时, 缺陷相对深度才较为准确。因此, 拍摄角度是极其重要的量化分析基础。

二是拍摄方向和“盲区”问题。由于电缆缆芯区域通常为难以穿透的铜导体, 如果拍摄时仅进行单方向照射, 有效成像无法覆盖整个圆周, 即单次成像拍摄存在一定的盲区。如果缺陷点处于盲区内, 则无法成像, 出现漏检, 更无法进行缺陷测量分析。为此, 通常需要调整拍摄方向, 进行第二次射线检测。实际计算表明, 与初始方向的夹角调整在 $50^\circ \sim 130^\circ$ 均可^[5]; 当与初次射线呈 90° 夹角检测时, 缺陷的检出概率更高, X 射线成像检测盲区见图 4。

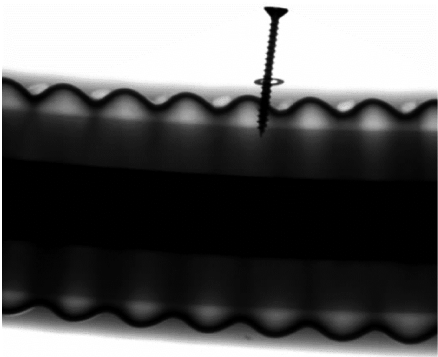


图 3 电缆扎钉深度探测试验

如果通过双次照射法, 发现明显缺陷点, 则可微调拍摄方向, 捕捉最佳的成像效果, 并帮助获取准确的测量尺寸。

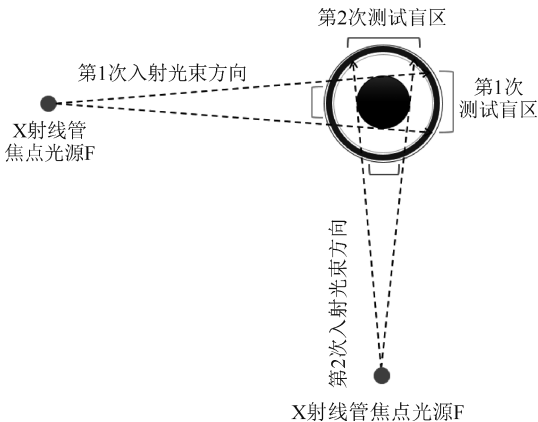


图 4 X 射线成像检测盲区

2.3 图像清晰度

X 射线检测采样后, 通常配套的数字式成像软件会带有尺寸测量工具, 可供分析具体尺寸。尺寸量取的准确与否, 主要受限于图片分辨率高低、电缆各层间可辨别程度, 即图像清晰度或者不清晰度。

实际上, 图像清晰度与不清晰度是同一个概念的正、反两种说法。清晰度与分辨率呈负相关, 清晰度是分辨率倒数的 $1/2$ 。例如, 某平板式数字成像系统的分辨率为 $3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$, 表示采用像质计测量时, 每毫米可以辨别 6 条黑白相间的条纹, 每个条纹的宽度就是清晰度, 即 $3 \text{ lp} \cdot \text{mm}^{-1}$ 空间分辨率对应的清晰度为 $167 \text{ }\mu\text{m}$, 表示清晰度大于 $167 \text{ }\mu\text{m}$ 或者不清晰度小于 $167 \text{ }\mu\text{m}$ 。通常, 分辨率越大、不清晰度越小, 成像质量就越好, 尺寸量取时更准确。

根据 X 射线检测的经典理论, 图像的总不清晰度 (U) 主要由系统固有不清度 (U_i)、几何不清度 (U_g)、移动不清度 (U_m) 等 3 部分综合组成。由于电力电缆在拍摄过程中是静止不动的, U_m 的影响可不予考虑。电缆成像的 U 的计算见公式 (2)。

电缆各层“交界线”或缺陷边界的影像实际都是一条条灰度变化过渡区,过渡区宽度越大,则边界轮廓越模糊。

$$U = (U_i^2 + U_g^2)^{1/2} \tag{2}$$

其中, U_i 主要由成像检测仪器系统的整体性能决定,如成像器件转换屏材料的颗粒度、图像处理算法、显示器像素大小等。如果所选系统参数不佳,将直接影响成像效果。 U_g 主要由成像几何条件决定,并表现为被测对象边缘上的“半影宽度”,或者称为“几何不锐度”。

U_g 的形成原理见图 5。“半影”形成的主要原因是实际射线源并非理想模型中的点,而是具有一定形状和强度分布的焦平面,因而导致成像边界变得模糊。

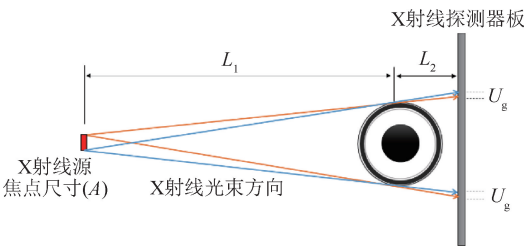


图 5 U_g 的形成原理

结合相关研究可知^{[7][14]}, U_g 的计算方法见公式(3)。

$$U_g = \frac{AL_2}{L_1} = A(M - 1) \tag{3}$$

式中, A 为射线源焦点的尺寸, M 为放大倍数。

可见,对减小 U_g 最有效的措施是选取微小焦点的射线装置,如果系统已经选定,则可在具体成像工艺操作中,适当减小放大倍数(或增加 L_1 、减小 L_2)。研究表明,放大倍数过小导致半影宽度较大,放大倍数过大会导致总不清晰度显著增加,均使图像质量下降^[18]。所以,放大倍数存在某一最佳值,该值最有利于缺陷图像的识别。电缆拍摄工程应用中,典型放大倍数适合取在 1.1 左右,此时成像效果较好。

2.4 其他误差影响因素

实际上,射线检测成像过程中的每一环节均可能引入噪声,使图像质量下降,进而影响尺寸分辨率和准确性。除了上述的 3 类对尺寸测量和分析有直接影响的因素外,还包括其他次要或间接的影响因素,如散射线干扰、曝光参数(如管电压和管电流)、成像系统主因对比度、器件噪声和图像处理软件算法(如帧叠加、灰度增强)等^{[7][19]}。限于篇幅,不再深入分析。

3 电缆成像尺寸标定方法

如前所述,X 射线状态检测时高压电缆的尺寸是根据具体条件进行分析测量的。但是,需要考虑光成像放大现象、拍摄角度、图像的 U 等关键因素对尺寸的影响。其中,由于拍摄角度不垂直造成的尺寸失真、仅单次拍摄造成的“盲区”问题,是无法通过软件测量和算法进行修正的,必须在测试操作的过程中控制好入射角度、拍摄方向等参数,否则将对尺寸分析的正确性造成直接影响。至于放大现象、图像清晰度有限等问题,是客观上必然存在的,应该在尺寸标定中给以考量。

成像系统标定问题,在计算机视觉领域中是一个重要的研究方向,其方法主要包括两类,一类是传统的基于已知场景的标定方法,另一类是自标定方法^[20]。电缆尺寸标定并不复杂,通常仅需要电缆实际结构尺寸或缺陷点尺寸与图像标称尺寸的关系,通过固定参照物即可实现。下面将结合电缆成像方法的特点,提出两种电缆尺寸标定的思路,并对比分析两者的优缺点。

3.1 标尺标定法

如前所述,中国工程物理研究所李强、奚清等人曾经制作了不同形状的标尺^[9-10],以便于对各类低密度粉末制品、特定金属焊缝缺陷进行尺寸标定,这类思路可以应用于电缆测试场景。

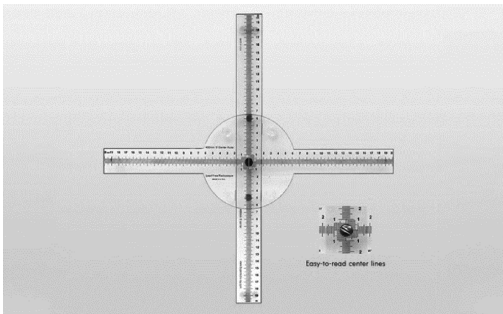
由于高压电力电缆结构形状基本相同、外径尺寸也通常在 200 mm 以内,仅需要使用一套通用十字型标尺或一段特定长度的条型铅贴,即可满足常规要求,达到直接在图像上读取被测部位实际尺寸的目的。典型十字型检测标尺及条型铅贴见图 6。

标尺标定法通用程度高、成本低,主要问题是在每次拍摄时需要放在电缆表面进行同步拍摄。现场操作时,增加了固定标尺的步骤,耗时略长;铅线刻度、铅贴与电缆成像相互叠加时,会影响视觉和比对效果。

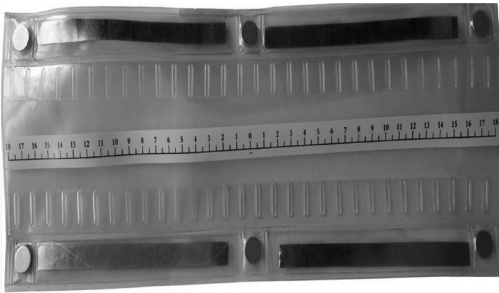
3.2 放大倍数修正值标定法

放大倍数修正值标定法是基于光成像放大现象而采取的逆向缩小标定方法。成像板紧贴电缆成像时,放大倍数(M)很容易算出,然后仅需用图像标称尺寸除以 M 即可求出实际尺寸。

但是,按照公式(1)计算 M ,需要记录 L_1 ,并且由于拍摄操作中存在角度及其他空间误差, M 值可能不太准确。这时,可以选取电缆的已知尺寸(如导体直径、主绝缘层外径等)作为参照物进行放大倍数的修正。这种做法不再需要记录任何操作中的



(a) 十字型检测标尺



(b) 条型铅钻

图 6 典型十字型检测标尺和条型铅钻

拍摄距离,检测操作工作量小,且参考已知尺寸计算出来的放大倍数误差相对较小,但需要在软件上进行多次测量和换算。

上述两种标定方法各有优缺点,应用特点对比见表 2。根据经验,放大倍数修正值标定法更为简便、准确。

表 2 不同标定方法应用特点对比

标定方法	优点	缺点
标尺标定法	可以直读、标尺通用性好	现场测试需固定标尺、操作步骤增加
放大倍数修正值标定法	无需外置参考物、较准确快捷	需要标称值数据、需多测量和换算

4 电缆缺陷点尺寸测量分析应用案例

本次研究中,采用了本工作所提出的放大倍数修正值标定法,对多起具体的电力电缆缺陷案例进行缺陷点尺寸的实际测量与评价分析,并成功为电缆管理单位提供了量化评价依据和检修建议。

4.1 案例 1 皱纹铝护套挤压变形问题

2024 年某变电站在扩建施工中,220 kV 电缆外护套受到外力挤压发生局部变形。典型挤压变形处间距对比见图 7,变形处皱纹铝护套内边缘与主绝缘之间间距已呈现明显不一致,最小间距和正常间距测量数值分别为 3.0 mm 和 7.2 mm。

采用已知尺寸标定法,得到放大倍数修正值为 1.15,进而计算出最大变形处间距变化值为

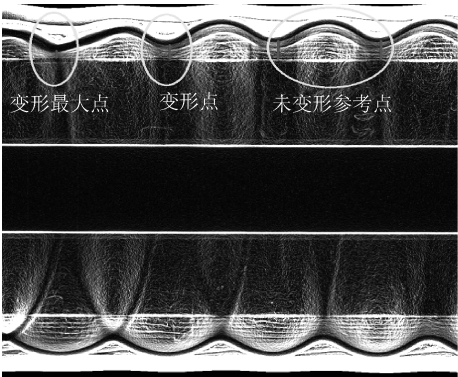


图 7 某铝护套挤压变形处间距对比

3.7 mm,间距变形程度达 58.7%,放大倍数修正值标定法的标定计算参数见表 3。铝护套挤压处变形程度已经超过 50%,但是受挤压点非常狭小、外观观察不明显,且主绝缘尚未受到直接挤压,其他耐压验收试验均合格,该条电缆绝缘状态暂未受到影响。

表 3 放大倍数修正值标定法的标定计算参数

项目参数		数值
主绝缘外径/mm	测量值	102.8
	参考值	89.4
M 修正值		1.15
变形最大点处间距/mm		2.6
正常位置处间距/mm		6.3
最大间距差/mm		3.7
间距变形程度/%		58.7

4.2 案例 2 电缆终端头内空隙问题

电缆状态检测服务过程中,技术人员发现某电缆终端接头内部存在空隙。调整现场拍摄角度后,典型 X 成像见图 8。接头内部空隙的测量尺寸为 1.89 mm,根据已知电缆外径尺寸标定后 M 修正值为 1.06,计算出该空隙的尺寸约为 1.80 mm。

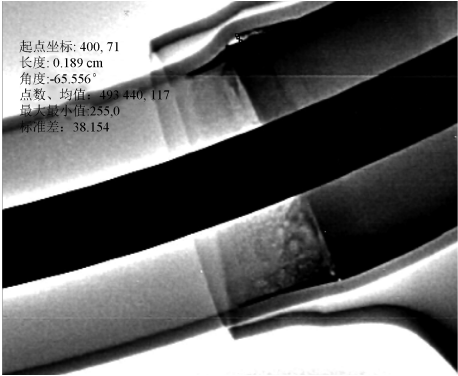


图 8 电缆终端接头内部空隙缺陷

经查询,相关标准中并无电缆终端接头空隙尺寸的具体要求。但是,由于大部分电缆终端头内均

无明显缝隙,且电缆终端头制作工艺上要求热缩均匀平整。因此,判断该瑕疵为施工原因导致,建议客户做好该电缆终端头的定期检测和观察,可在大修期间对其进行维护处理。

4.3 案例 3 电缆缓冲层烧蚀点问题

多年来,电缆主绝缘外层至皱纹铝护套之间的缓冲层烧蚀点问题不断出现。

图 9 为某工厂 110 kV 电缆的烧蚀点成像。通过测量并换算,得到该烧蚀位置最大宽度为 8.0 mm,测算面积约 22 mm²。电缆拆解后,实物缺陷点形状、尺寸与成像结果基本一致,缺陷点拆解见图 10。经评估,该烧蚀点尺寸较大,且多处分布,最终客户决定整条电缆更换。

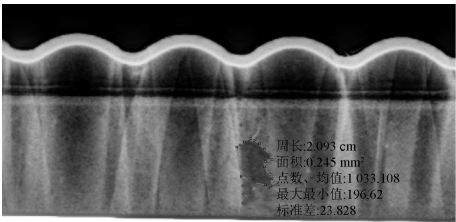


图 9 电缆缓冲层缺陷点尺寸测量



图 10 缺陷点拆解

5 结 论

本工作研究了电力电缆 X 射线成像状态检测中的尺寸量化问题,得到以下结论:

- 1)当前电力电缆 X 射线成像系统的空间分辨率能够满足电缆尺寸测量基本要求。
- 2)光成像放大现象、现场成像拍摄角度问题、图像不清晰度等是影响尺寸测量与分析的关键因素,需要重点关注,并注意消除其带来的影响。
- 3)电缆成像尺寸可以采用标尺标定法和放大倍数修正值标定法进行标定,两者各有特点,通常后者更为简便实用。
- 4)通过多起实例验证,本工作提出的基于放大

倍数修正值的电缆尺寸标定方法应用效果良好,能够满足电力电缆状态检测量化评价需求。

5)对于电缆成像尺寸测量不确定度的问题,可以结合具体的成像检测系统,进一步开展深入研究。

参考文献:

[1] 全国高电压试验技术和绝缘配合标准化技术委员高电压试验技术分技术委员会. 电力设备 X 射线数字成像检测技术导则[S]: DL/T 1785—2017. 中国电力出版社,2019.

[2] 蒲文政. 电缆外护套绝缘层破损原因分析及处理[J]. 中国仪器仪表,2023(3):68-71.

[3] 冯超,谢亿,曹先慧,等. 高压电缆射线检测典型案例分析[J]. 中国测试,2020,46(2):19-22.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 付贵,周维超,李治. 高压电缆接头 X 射线数字化检测技术[J]. 农村电气化,2018(8):21-24.

[7] 刘斌贤. X 射线电缆尺寸检测技术研究[D]. 长春:长春理工大学,2008.

[8] 李伟. 基于 X 射线的电力电缆在线检测系统设计与研究[D]. 上海:上海应用技术大学,2017.

[9] 李强,孙朝明. 数字射线检测中图像评定尺的设计与应用[J]. 无损检测,2011,33(4):33-35.

[10] 奚清,段建国,李启寿,等. X 射线实时成像检测的尺寸标定[J]. 无损探伤,2016,40(3):47-48.

[11] 吴章勤,刘荣海,艾川,等. 基于 X 射线数字成像技术的 GIS 尺寸标定. [J]. 无损检测,2011,35(2):46-48.

[12] 耿磊昭,刘荣海,唐发庆,等. X 射线影像尺寸标定技术在 GIS 故障分析中的应用[J]. 高压电器,2019,55(9):119-125.

[13] 刘骏,杨龙,刘军. 微焦点 X 射线数字成像系统的最佳分辨率[J]. 电子工业专用设备,2017,46(2):1-3.

[14] 王德信,王家龙,李世荣. 微焦点放大摄影的数字化 X 射线影像系统[J]. 中国仪器仪表,2008(8):76-81.

[15] 陈荣保,江琦,李奇越,等. 电气测试技术[M]. 北京:机械工业出版社,2014.

[16] 杨扬,虞永杰. X 射线实时成像检测最佳放大倍数的研究[J]. 机械,2014,40(10):1-6.

[17] 文乐斌,李鸿泽,周立,等. 电力电缆 X 射线无损检测工艺技术研究[J]. 华东电力,2013,41(12):2518-2521.

[18] 史建军. X 射线实时成像图像质量的影响因素[J]. 无损探伤,2009,33(2):34-35.

[19] 赵付宝,孙良文,汤振鹤,等. 复合材料构件的 X 射线数字成像检测[J]. 中国测试,2021,47(2):92-95.

[20] 田原,都东,侯润石,等. 一种 X 射线成像系统模型及其快速标定方法[J]. 焊接学报,2007,28(7):25-28.