

高压电缆附件铅封缺陷的交流电磁场检测

刘正存¹, 申德峰², 王延东², 薛建祥¹, 王明亮¹

(1. 济宁鲁科检测器材有限公司, 济宁 272000; 2. 济宁市特种设备检验研究院, 济宁 272000)

摘要: 铅封是高压电缆常用的连接方式, 受外部热缩套及防水带干扰的影响, 常规检测方法难以对内部铅封连接状态进行检测。制备了高压电缆铅封试样并加工了相应缺陷, 以模拟现场使用状况, 采用交流电磁场检测技术进行了检测试验。试验结果表明, 交流电磁场检测技术能够穿透保护层对铅封表面开裂缺陷进行检测, 检测灵敏度及分辨力较高, 但检测结果会受到探头角度的影响, 检测时需考虑检测方向。

关键词: 交流电磁场检测技术; 铅封; 高压电缆; 缺陷模拟

中图分类号: TG115.28 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6656(2022)04-0024-04

Alternating current field measurement for lead seal defects of high voltage cable accessories

LIU Zhengcun¹, SHEN Defeng², WANG Yandong², XUE Jianxiang¹, WANG Mingliang¹

(1. Jining Luke Testing Equipment Co., Ltd., Jining 272000, China;

2. Jining Special Equipment Inspection and Research Institute, Jining 272000, China)

Abstract: The lead sealing is a common way of connecting high-voltage cables. Due to the interference of external heat-shrinkable sleeves and waterproof tapes, conventional inspection methods are difficult to inspect the internal lead seal connection status. Simulate onsite use conditions and process defects to prepare high-voltage cable lead seal samples. Carry out inspection experiments based on alternating current field measurement (ACFM) technology at the same time. Testing results shows that ACFM can penetrate the protective layer to detect the surface cracking defects of the lead seal. The detection sensitivity and resolution are better than other methods. The detection direction should be considered when detecting because the detection result will be affected by the angle of the probe.

Key words: ACFM; lead sealing; high-voltage cable; defect simulation

封铅是目前电缆附件安装中比较常见的封装手段, 主要用于尾管端部与金属保护套内部电缆之间的连接。虽然封铅工艺繁琐, 但由于其具有较高的强度及良好的耐老化性能, 且密封性能可靠, 仍在广泛使用。

根据统计, 目前电缆附件已经成为电缆线路中故障最多发的部件之一, 而大部分故障是由产品本身质量不过关或安装不当导致的^[1-2]。

目前电缆铅封的检测方法主要有超声法、X 射

线法、涡流法等。超声法受到耦合限制, 需要拆除表面保护层进行检测, 多用于电缆安装前的测试。方春华等^[3]利用仿真软件模拟了铅封内部气孔缺陷的回波特征, 并利用铅封缺陷试样验证了超声检测的可行性。射线检测方法需从不同方向进行透照, 以避免漏检, 但现场工作环境复杂, 实际操作困难, 且由于线缆内部并非整体, 内部存在间隙, 存在漏检、误报的风险。涡流检测方法则受制于探头提离高度, 普通涡流检测设备提离高度只有 1~2 mm, 无法满足穿透电缆铅封 5 mm 以上保护层的要求。蒲英俊等^[4]针对涡流检测的提离高度问题, 对涡流检测探头进行了改进, 实现了电缆附件的涡流检测。

交流电磁场检测 (ACFM) 技术^[5]检测效率高, 精度高, 且检测信号受提离效应的影响比较小, 无需

收稿日期: 2021-08-11

作者简介: 刘正存 (1996—), 男, 本科, 工程师, 主要从事电磁及超声类检测技术新应用场景的开发及现场应用的研究工作

通信作者: 刘正存, 1345354132@qq.com

对被测件表面做任何处理就能完成检测^[6],更适用于电缆铅封的检测。笔者分析了高压电缆附件的结构及缺陷,并制作模拟试样进行试验,证明了交流电磁场检测技术对电缆附件铅封表面开口缺陷的检测能力。

1 交流电磁场检测原理

在 ACFM 技术中,将工件表面磁场分为 3 个分量: B_x , B_y , B_z 。 B_x 分量方向与电流方向垂直,并与工件表面平行; B_y 分量方向与电流方向一致; B_z 分量方向垂直于工件表面。交流电磁场检测原理如图 1 所示。

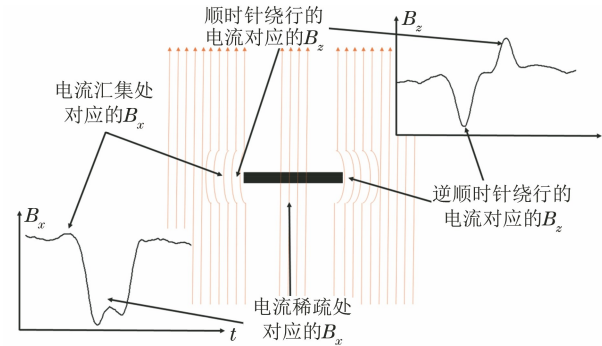


图 1 交流电磁场检测原理示意

根据电磁感应定律,当工件表面没有缺陷时,交变电流产生的感应磁场均匀且无变化, B_y 和 B_z 分量为 0;当电流经过缺陷时,电流从缺陷两侧和底部偏转,使通过缺陷处的电流密度减小,产生的磁通密度也相应减小,即 B_x 分量会在缺陷处出现明显的波谷。此外,电流会在缺陷两端产生聚集,使得缺陷两端磁通密度出现极值,受磁场方向性的影响, B_z 分量与原有磁场会存在叠加和抵消的现象,即 B_z 分量会在缺陷两端形成波峰和波谷,根据检测信号即可判定缺陷的存在^[7-8]。

2 高压电缆铅封的结构及常见缺陷

高压电缆终端由尾管、铝护套、铅封等组成,是输电线路的重要组成部分。铅封即采用铅锡合金封堵尾管端部及铝护套之间的间隙,在完成电气连接的同时,实现密封防水的功能。铅封完成后在外部使用防水包带和热缩套进行防护,防护层厚度约为 5 mm。高压电缆铅封实物如图 2 所示。

目前发现高压电缆铅封缺陷以加工过程中的砂眼、气孔、内部层叠以及安装中工艺不到位导致的径向开裂等为主。缺陷容易导致电气连接不良,造成跳闸、击穿等问题,严重时还会引起电网停运事故。



图 2 高压电缆铅封实物

因此,需要寻找一种可以快速、准确地检测出电缆铅封内部缺陷的技术,以保证电网的安全运行。

3 ACFM 检测试验

3.1 试样制备

电缆运行过程中,由于外部环境变化,铅封单侧受力,往往会出现顶部开裂缺陷,这也是铅封缺陷中危害最大的一种。结合顶部开裂缺陷现场案例及 ACFM 检测技术要求,设计的试样上的缺陷信息如表 1 所示。

表 1 试样上的缺陷信息

试样	缺陷位置	缺陷参数/mm			处理方式
		长度	深度	宽度	
试样 1	表面裂纹	30	3	1	外包 5 mm 绝缘层
试样 2	表面裂纹	30	3	1	无处理

3.2 试验仪器

试验采用济宁鲁科检测器材公司生产的 LK ACFM-X1 型交流电磁场检测仪(见图 3),该设备主要由主机、探头及连接线等组成;可兼容内穿式、外套式、平板型、笔形等多种探头,并可支持 16 通道阵列探头,探头最大提离高度为 10 mm,针对电缆铅封的变径情况,可采用特制的弧形单探头(圆弧直径为 273 mm),以得到更好的耦合效果。



图 3 LKACFM-X1 型交流电磁场检测仪实物

3.3 检测及分析

将探头放置于工件待检部位,双手扶持探头,在工件上进行匀速扫查,扫查速度应尽量不超过 $40\text{ mm}\cdot\text{s}^{-1}$,同时尽量避免抖动,检测完成后记录相关数据。

试样 1 交流电磁场检测结果如图 4 所示,图 4(a)为 B_x 分量图,其中横坐标代表探头行进时间,纵坐

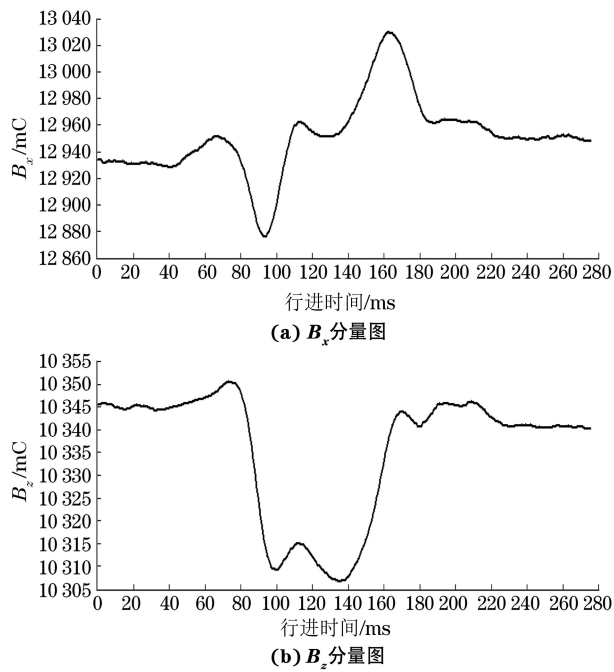


图4 试样1交流电磁场检测结果

标代表 x 方向磁场强度分量的电信号大小;图 4(b) 为 B_z 分量图,横坐标代表探头行进时间,纵坐标代表 z 方向的磁场强度分量电信号大小。由检测结果可见, B_x 及 B_z 信号均有明显显示,波形变化存在明显的波峰波谷特征,与标准 ASME E-2261M—2012《使用交流电现场测量技术检查焊缝的标准实施规程》中的缺陷特征吻合。

试样 2 交流电磁场检测结果如图 5 所示,图中各变量与图 4 的一致,其同样具有明显与 ASME 标

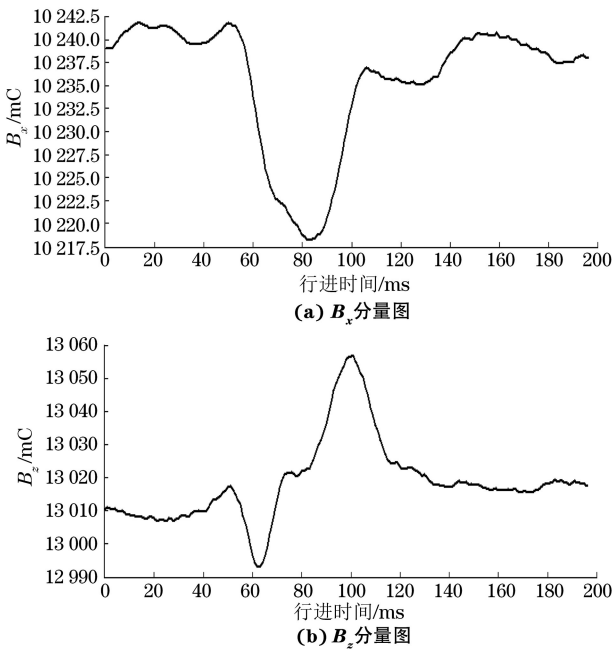


图5 试样2交流电磁场检测结果

准中吻合的波峰波谷特征,但 B_x 分量的变化受到探头提高高度的影响,由 40 mC 降到 25 mC, B_z 分量保持在 70 mC 左右,无明显变化,说明 B_x 分量信号强度受提高高度的影响更大。在大提高的检测工况下, B_z 信号的判定比 B_x 信号更为准确。

试样 1 在探头与缺陷成 45° 角时的检测结果如图 6 所示,图中信号变化量与图 4 信号变化趋势及特征基本一致。 B_x 分量的变化受到探头角度的影响由 40 mC 降到 30 mC, B_z 分量的变化量则有所上升,接近 80 mC。

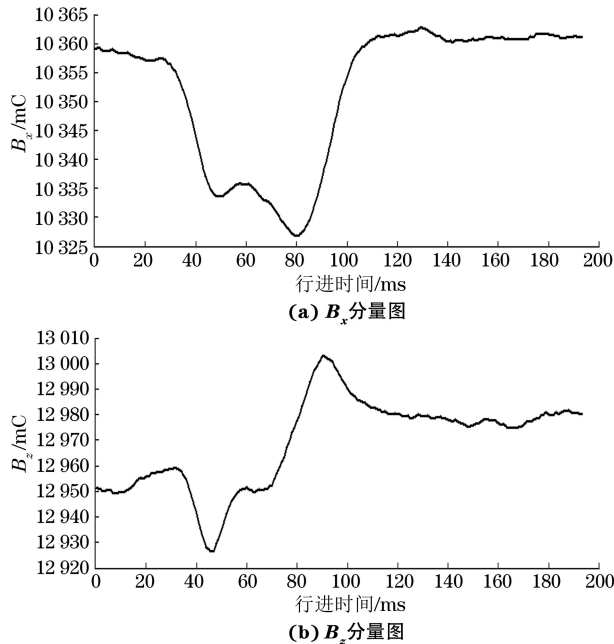


图6 试样1探头与缺陷成 45° 时的检测结果

试样 1 在探头与缺陷成 90° 角时的检测结果如图 8 所示, 90° 检测时,裂纹平行于电场且垂直于磁场,对电流产生干扰很小,由于裂纹自身宽度为 2 mm,此时 B_x 及 B_z 分量信号仍存在波峰波谷特征,但并不明显。

试样 2 在探头与缺陷成 45° 角时的检测结果如图 8 所示,图 8 与图 6 信号变化趋势有所差别,但波峰波谷特征仍比较吻合。 B_x 分量的变化受到探头角度的影响由 30 mC 降到 20 mC, B_z 分量的变化量明显下降,变为 40 mC。交流电磁场检测技术中,所检测对象与探头检测方向间的角度会对检测结果产生影响,图 8 及图 6 说明, 45° 时的检出灵敏度相较于 0° 时已经有了降低,但降低幅度较小。

试样 2 在探头与缺陷成 90° 角时的检测结果如图 9 所示。此时, B_x 分量信号存在波谷特征,但 B_z 分量信号此时变化量只有 20 mC 左右,信噪比较低,波峰波谷特征不明显,与检测标准对比吻合度

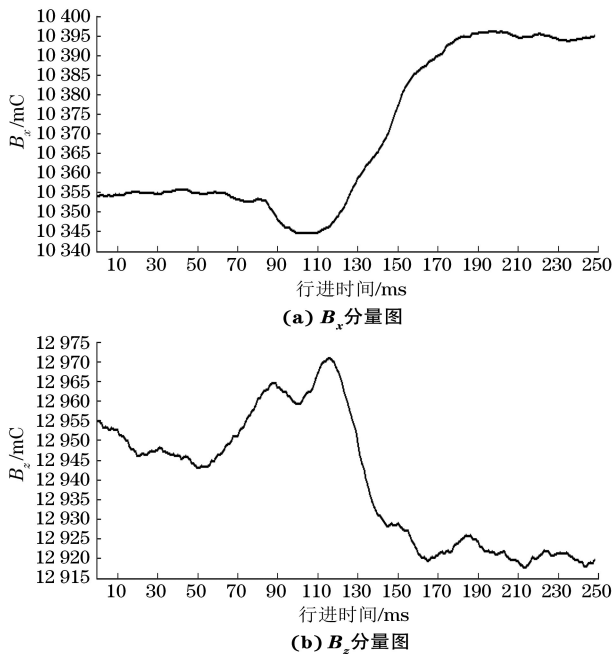


图7 试样1探头与缺陷成90°时的检测结果

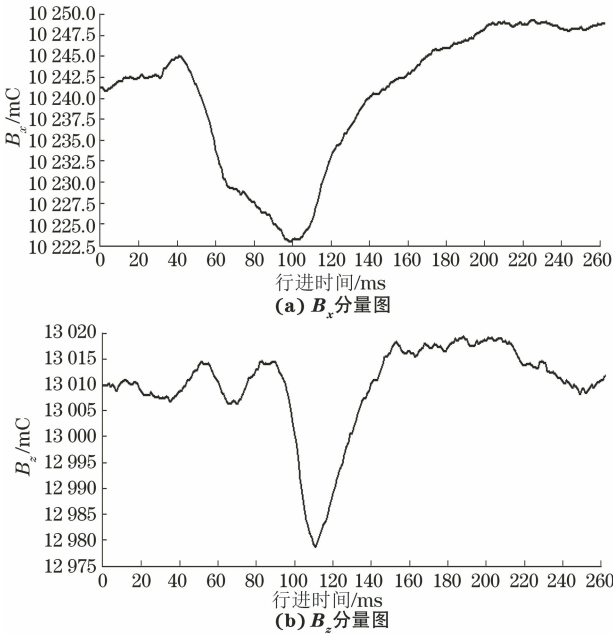


图8 试样2在探头与缺陷成45°角时的检测结果

很差。图7及图9说明,在所检测对象与探头检测方向相互垂直时,交流电磁场检测技术的检出灵敏度最差,此时的磁场变化幅度取决于检测对象宽度,对于裂纹等条形缺陷,极易出现漏检。

4 结语

(1) 采用交流电磁场检测技术可以对带有5 mm厚绝缘层的高压电缆铅封的表面裂纹进行检测,且无需去除绝缘层,检测方便快捷。

(2) 交流电磁场检测灵敏度受缺陷方向影响较

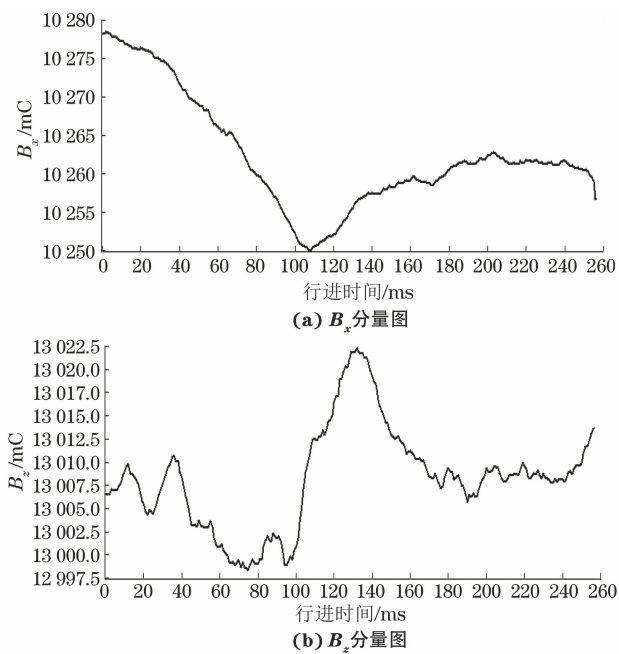


图9 试样2在探头与缺陷成90°角时的检测结果

大,探头方向与缺陷方向夹角为90°时,缺陷检出较为困难,实际检测过程中需根据缺陷具体发生机理确定其检测方向,或直接进行0°及45°检测。

参考文献:

[1] 惠宝军,傅明利,刘通,等. 110 KV及以上电力电缆系统故障统计分析[J]. 南方电网技术,2017,11(12):44-50,67.

[2] 曹俊平,王少华,蒋愉宽,等. 浙江电网高压电缆线路运行情况[J]. 电线电缆,2017(3):39-43.

[3] 方春华,胡冻三,郭凯歌,等. 高压电缆终端铅封缺陷超声检测方法研究[J]. 中国测试,2021(3):1-5.

[4] 蒲英俊,刘广兴,李正利,等. 涡流检测高压电缆附件铅封缺陷的试验研究[J]. 山东电力技术,2020,47(2):56-60,69.

[5] 李兵,于亮. 交流电磁场检测技术在压力容器焊缝检测中的应用[J]. 中国特种设备安全,2016,32(4):47-50.

[6] REN S K, ZHU Z B, LIN T H, et al. Design for the ACFM sensor and the signal processing based on wavelet de-noise[C]//2009 2nd International Congress on Image and Signal Processing. Tianjin, China. IEEE, 2009:1-4.

[7] 李伟. 基于交流电磁场的缺陷智能可视化检测技术研究[D]. 青岛:中国石油大学,2007.

[8] ZHOU J W, LUGG M C, COLLINS R. A non-uniform model for alternating current field measurement of fatigue cracks in metals[J]. International Journal of Applied Electromagnetics and Mechanics,1999,10(3):221-235.