

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.04.023

固体绝缘材料内部缺陷形貌的超声检测研究

申巍¹, 孟永鹏², 菅永锋¹, 杨韧¹, 宋文进²

(1. 国网陕西省电力公司电力科学研究院, 西安 710054;

2. 西安交通大学电力设备电气绝缘国家重点实验室, 西安 710049)

摘要: 电力设备长期运行中, 绝缘材料内部会产生不同形态的细微缺陷, 采用超声检测有助于及时发现缺陷, 确保设备的安全运行。笔者根据固体绝缘材料内部缺陷形貌超声检测的要求, 通过对不同频率探头测量灵敏度和衰减的对比确定了适用的超声探头频率, 分析了影响超声检测灵敏度的因素。在此基础上设计了能准确获取缺陷形貌特征的超声自动检测系统, 提出了基于回波特征参量分析的缺陷形貌超声成像方法。采用设计的超声检测系统对人工模拟缺陷环氧试样进行超声扫描验证检测方法的实用性, 结果表明: 检测系统可以准确识别直径大于130 μm 的气隙缺陷, 能够反映内部电击穿通道的二维走向, 及其在材料内的空间位置信息, 该方法对于不同电力设备绝缘内部缺陷的诊断具有一定的参考意义。

关键词: 绝缘材料; 内部缺陷; 形貌; 超声检测

Study on Ultrasonic Detection for Internal Defects Appearance of Solid Insulation Materials

SHEN Wei¹, MENG Yongpeng², JIAN Yongfeng¹, YANG Ren¹, SONG Wenjin²

(1. Electric Power Research Institute, State Grid Shaanxi Electric Power Company, Xi'an 710054, China;

2. Xi'an Jiaotong University, Xi'an 710049, China)

Abstract: The insulation material used in power equipment will bring some small defects after long-time operation. It is useful to find these defects promptly through ultrasonic detection and ensure the safety of the power equipment. According to ultrasonic testing requirements for internal defects of solid insulation materials, the applicable frequency for ultrasonic probe is determined by comparing the sensitivity and attenuation of multiple sensors with different center frequency. The main factors affecting the detection sensitivity are analyzed in this paper. The ultrasonic automatic detection system which can accurately get defect appearance is designed, and the ultrasound imaging method to get the defect appearance is proposed based on echo characteristic parameter analysis. To verify the practicability of the detection method, the ultrasonic testing system is used to test some artificial defects in epoxy. The results show that the system can accurately identify internal void with diameter greater than 130 μm . Furthermore, it can give the 2-dimensional appearance of the internal electrical breakdown channels and also its spatial position information. It seems that the ultrasonic detection method can be applied to instruct the insulation diagnosis for different power equipment.

Key words: insulation material; internal defect; appearance; ultrasonic detection

0 引言

电力设备中采用的固体绝缘材料(如环氧、聚乙

烯)在长期运行中受到电、热、机械等应力的作用, 内部很容易产生气隙和裂纹等微观缺陷, 其绝缘性能逐渐下降, 最终导致绝缘发生击穿, 危及电网的安全^[1]。因此, 对电力设备绝缘状态的检测一直是电力

收稿日期: 2015-11-09; 修回日期: 2015-12-11

基金项目: 国家自然科学基金创新群体项目资助(51521065); 电力设备电气绝缘国家重点实验室资助(EIPE15309)。

Project Supported by National Natural Science Fund of China(51521065), State Key Laboratory of Electrical Insulation and Power Equipment(EIPE15309).

运行部门关注的重要问题。

对电力设备绝缘状态检测的研究多年来主要集中在传统电气参数的测量,如介电常数、介质损耗、击穿电压等,这些电参量能够在一定程度上反映材料的整体劣化程度,但对材料内部缺陷的具体位置及绝缘的损伤程度尚不能给出令人满意的结论。超声检测技术作为一种无损检测技术,与传统检测方法相比具有被测对象范围广、检测灵敏度高、缺陷定位准确、成本低、使用方便、对环境无污染及便于现场检测等优点,因而在绝缘材料内部缺陷的检测方面具有广阔的应用前景^[2]。

20世纪90年代,文[3-4]中首次将医用超声探头用于绝缘材料的检测,验证了绝缘材料超声检测的可行性;此后超声检测方法被广泛的应用于各种电力设备中,文[5-6]中利用低频超声直探头对套管中的分层缺陷进行检测,同时还检测了电缆中的水树枝及瓷绝缘子中的裂纹;文[7]中研究了聚焦探头发出的超声波在材料中的传播特性,并将这种方法用于电树枝形态的检测;文[8]中深入研究了低频超声法检测发电机定子线棒主绝缘缺陷的方法;文[9]中将低频超声回波法应用于玻璃纤维复合材料内部疲劳损伤裂纹的检测和判定,得到了较好的结果。国内在绝缘材料内部缺陷超声检测技术和设备方面也进行了大量的研究,取得了很多实用性的成果,已在多种电力设备上得到了实际应用^[10-17]。然而受测量灵敏度和分析方法的影响,目前对于绝缘材料内部缺陷的检测基本停留在定性检测阶段,对缺陷的形貌以及缺陷类别还不能进行准确地识别。

文中根据固体绝缘材料内部缺陷形貌检测的要求,研究了基于回波扫描分析的超声检测关键技术,在此基础上研制了检测灵敏度符合要求的自动化超声检测系统,并通过制作典型的人工模拟缺陷进行超声检测,验证了超声检测方法的准确性。

1 超声检测系统设计

1.1 超声探头频率的选择

固体绝缘材料的声衰减要比金属材料大很多,因此超声探头的频率是一个很重要的检测参数。对绝缘材料内部缺陷的超声检测有2方面的要求:其一是要求所选择的超声换能器要有较高的灵敏度;其二是要求超声波有足够的穿透能力。根据超声传播理论,超声波检测缺陷的理论灵敏度为^[18]

$$\frac{\lambda}{2} = \frac{1}{2} \times \frac{v}{f} \quad (1)$$

式(1)中, λ 、 v 、 f 分别为超声波的波长、波速及频

率。根据式(1)可计算出不同频率超声波在常用绝缘材料中的检测灵敏度。表1为纯环氧材料中超声波的衰减系数和理论灵敏度。可见当声速一定时,检测灵敏度与超声的频率成正比。而固体中超声的衰减正比于频率,因此频率越大,超声分辨能力越强而声衰减也越大,要想同时获得高分辨能力和低衰减是不可能的,必须在两者之间寻找合适的平衡点。

表1 超声波在纯环氧中的灵敏度和声衰减

Table 1 Sensitivity and attenuation of the ultrasonic signal in epoxy

频率/MHz	灵敏度/mm	衰减/(dB·cm ⁻¹)
1	1.02	2.51
5	0.20	17.51
10	0.10	36.26

此外,探头晶片尺寸、脉冲宽度、焦区等因素也是影响灵敏度的因素。晶片尺寸决定了探头发出的超声能量的大小,在条件允许的情况下应尽量选择晶片尺寸较大的探头;脉冲宽度越小,超声波的频带越宽,缺陷的纵向分辨率能力越强,信噪比也越高。聚焦探头的焦区直径的大小直接影响缺陷的横向分辨率^[19]。为了减少声能衰减、提高缺陷的分辨率和信噪比,需要选用宽带窄脉冲的超声探头。经过对分辨力、衰减等因素的综合考虑,设计中选择日本 Olympus 公司 5 MHz 的高频窄脉冲聚焦探头进行缺陷形貌的检测,其脉宽为 0.6 μs,理论上对环氧内缺陷的分辨率小于 0.2 mm。

1.2 系统硬件结构设计

在确定了超声探头参数后,根据内部缺陷形貌检测的要求构建了相应的超声检测系统。其整体结构见图1。

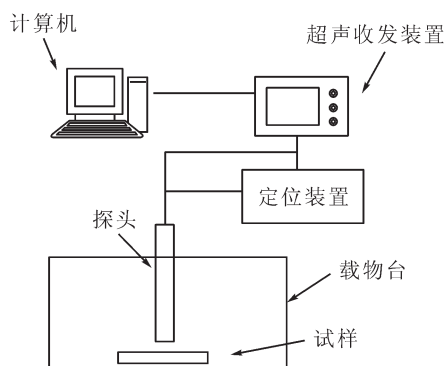


图1 超声检测系统结构

Fig. 1 Structure of ultrasonic detection system

检测系统包括超声波收发装置、机械定位机构、计算机以及载物池。超声收发装置包括超声发射接收电路、通信模块、机械定位控制模块、液晶显示模块以及数据采集模块,实现对机械定位机构的

控制以及与计算机的通信,保证定位机构与计算机的协调工作。机械定位机构接收上位机发送的命令,将接收到的命令转换成电脉冲信号,通过伺服电机带动探头做二维平面的精确位移,位移精度可达 $0.2\ \mu\text{m}$ 。计算机实现数据的采集,以及对下位机的控制。通过各部分的协调工作,实现对试样的连续超声扫描检测。检测系统实物见图 2。

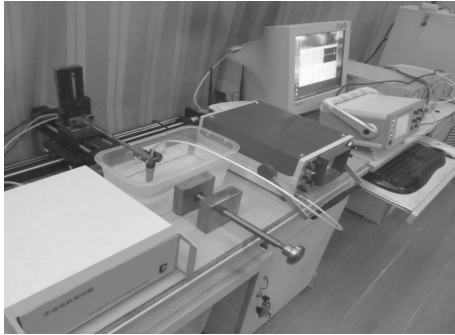


图 2 超声检测系统

Fig. 2 Ultrasonic detection system

在整个系统设计中,超声波发射、接收和采集模块是最关键的一个部分,其性能在直接影响对缺陷的识别能力。整体结构见图 3。

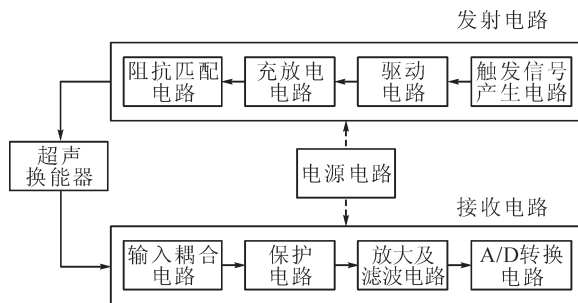


图 3 超声波发射接收模块结构

Fig. 3 Diagram of the ultrasonic transmitting and receiving unit

发射电路的功能是向探头发射 $400\ \text{V}$, 脉宽从 $0.1\sim 1\ \mu\text{s}$ 可调的脉冲激励信号。其基本原理见图 4。高压电源提供 $400\ \text{V}$ 的稳定直流电压,由 DSP 的 I/O 端口产生 PWM 触发信号,通过占空比调节脉冲宽度。触发信号经过驱动电路后控制 MOSFET 开关,以设定的频率给储能电容充放电,从而在输出端产生幅值 $400\ \text{V}$ 的负脉冲电压,这个脉冲电压加至探头上产生超声波信号。为了保证脉冲沿的陡度,在输出端增加了阻抗匹配电路。

由于检测系统采用的是单探头工作模式,即一个探头既发射超声波又接收回波信号。回波信号一般是几十 μV 微伏到几百 mV ,而发射电路的激励脉冲高达 $400\ \text{V}$,因此必须在接收回路前端设计阻尼

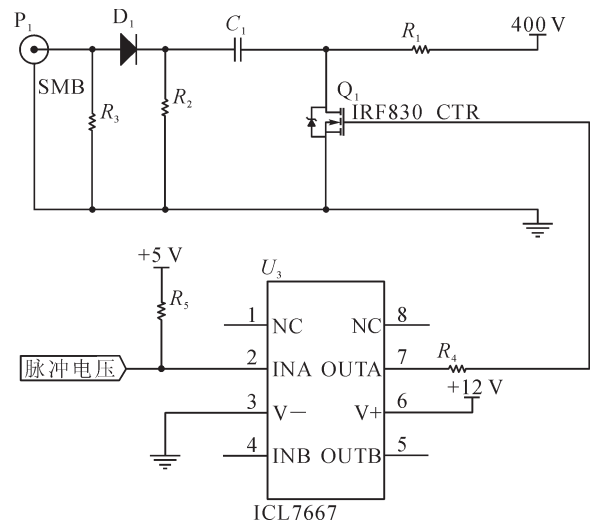


图 4 超声发射电路

Fig. 4 Schematic of ultrasonic transmitting circuit

限幅电路,以防止高压脉冲对后端调理电路和采集电路中元器件的损坏,保证系统能够正常稳定工作。阻尼限幅电路利用二极管的单向导电性能实现电路的保护,见图 5。

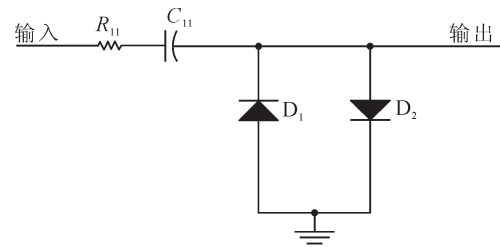


图 5 阻尼限幅电路

Fig. 5 Schematic of damping amplitude limited circuit

由于接收到的超声回波信号比较微弱,因而在检测过程中需要对回波信号进行程控放大,通过计算机发送指令动态调整增益,使信号幅值符合数据采集的要求。回波信号的采集由 16 位 A/D 转换器完成。此外,由于电路中不可避免地存在噪声信号,干扰回波信号的识别,采集前必须进行滤波处理,滤除其中的杂波信号。设计中采用了带通滤波电路,中心频率设置为 $5\ \text{MHz}$ 。

1.3 系统软件设计

系统软件主要完成对机械扫描定位机构的控制、系统参数配置和超声信号的采集,并且把超声探头的坐标位置信息和回波波形进行处理后,在计算机上输出和显示。系统软件采用图形可视化技术,具有友好的用户界面,能够根据数据分析绝缘缺陷特征值,对应调色板中相应的色度生成扫描的二维图像。一次完整的检测流程见图 6。

2 缺陷形貌的成像方法

目前广泛应用的超声成像方法有 A 型、B 型和

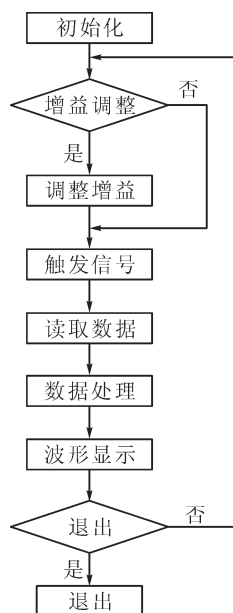


图6 软件流程图

Fig. 6 Flow chart of system software

C型3种。A型以直角坐标的形式将超声信号传播时间和幅值的关系显示出来。A型显示虽然简单,但每次只能显示一个测量点的回波信息;B型显示和C型显示都是截面图,能够直观表现缺陷的整体形态特征^[20]。传统的C扫描显示只给出扫描截面上的信号幅度信息,而抛弃了回波的相位、位置、波形等有用的信息。文中在传统C扫描成像的基础上提出了绝缘材料内部缺陷形貌的成像方法,增加了回波信号的位置、相位和频率信息,充分发挥了数字化超声检测系统的优势。具体实现过程为:首先使用A型显示对单个坐标点进行超声测量,A型回波波形由上表面回波、底面回波的缺陷回波构成,见图7。对采集得到A型回波信号用以下4种分析方法进行处理,得到缺陷形貌的特征值。

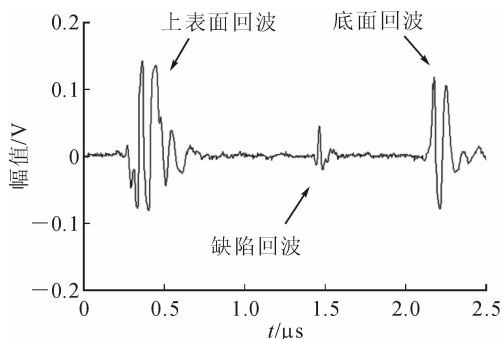


图7 典型的A型显示回波波形

Fig. 7 Typical waveform of A-type ultrasonic echo

- 1)提取缺陷回波的最大值作为幅值特征数据;
- 2)计算上表面回波和缺陷回波间的时间差,结合超声声速换算成对应的距离,得到缺陷的相对位

置特征数据;

3)对缺陷回波进行快速傅里叶变换(FFT)得到频谱,取频谱中能量最大分量对应的频率作为中心频率,并以各个扫描位置的中心频率作为频率特征数据;

4)根据参考回波信号,对测量回波信号进行相关分析,以相关系数作为相位特征数据。

以一定的步长和顺序对试样被测区域进行逐点扫描,以扫描的位置作为 x 和 y 轴,以缺陷回波的幅值、位置、频谱、相位特征数据为 z 轴,用二维图像的形式显示出来。实际应用中这4种成像算法相互配合,互相对照,可以更全面地反映缺陷的形貌,为超声诊断研究提供有力的依据。

为了验证文中提出的超声成像方法,制作了内部含有气隙的纯环氧模拟试样。由于纯环氧试样有一定透光率,可以用偏光显微镜观察内部缺陷形态,以便与超声检测结果进行对比。以 $2.5\mu\text{m}$ 的步长对缺陷试样进行超声扫描,采集A型回波数据后进行成像处理,分析结果见图8。

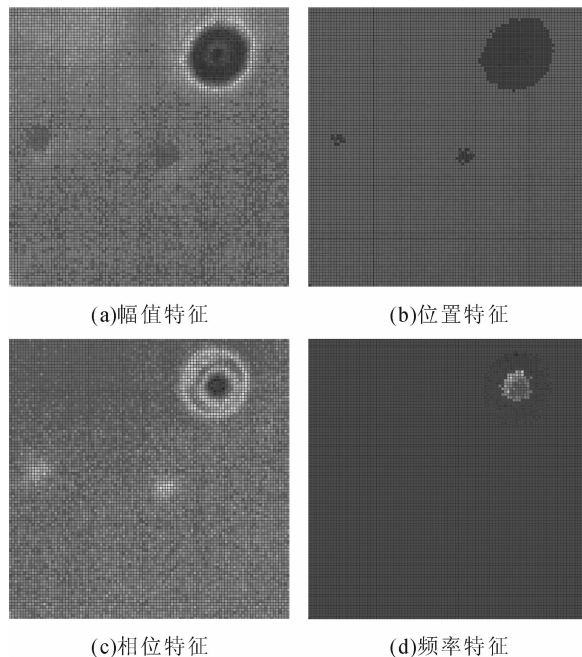


图8 含有气隙的纯环氧试样超声成像

Fig. 8 Ultrasonic image of the epoxy sample containing void defects

图8(a)反映了回波的幅值信息,颜色越深,说明回波幅值越大,可以看到在扫描区域中有3个气隙,位于图像上方的一个气隙较大,在偏光显微镜下测得其实际直径为 2mm ,位于下方的两个气隙直径较小,在偏光显微镜下测得其直径约为 $130\mu\text{m}$,而且有气隙的区域和没有气隙的区域对比很明显。

图8(b)反映了缺陷在与扫描平面垂直方向上的位置信息。分析之前需要根据背景噪声设置一个合

适的阈值。背景噪声主要来自于测量电路中电子器件和电源的热噪声, 以及外界环境的电磁干扰, 在测量中变化不大。可根据超声回波幅值的大小, 取重复测量得到的噪声整流平均值的 2~3 倍作为阈值。幅值大于阈值的回波被认为是缺陷回波, 而幅值小于阈值的回波为噪声, 从而计算出缺陷回波的位置信息。这种成像方法能够给出一个非常明确的缺陷轮廓, 而不会有过渡区域的存在。

图 8(c) 反映了回波的相位信息, 选择较大气隙中间位置的回波作为参考波形, 图中颜色越深, 说明与参考波形的相似度越高。从图 8(c) 中可知大气隙中间区域波形的相似度最高, 从中间到边沿, 回波的相似度逐渐下降, 小气隙上回波的相似度同样不高, 在没有回波的区域, 截取的波形是背景噪声信号, 与参考回波波形的差距最大。

图 8(d) 反映了回波的频谱信息, 图中颜色越浅表明扫描点的中心频率越高。可以看到对于大气隙, 从中心到边沿, 其中心频率逐渐减小, 从 7 MHz 逐渐减小到 4 MHz。小气隙上的回波由于幅值较小, 受杂波影响大, 没有分析到有效的频率特征数据。

由于 C 型扫描是以缺陷上反射的回波幅值对缺陷进行成像的, 焦区的存在使得聚焦探头在扫描时会出现缺陷边缘图像模糊的问题, 从而由超声扫描得到的缺陷尺寸与其实际尺寸之间存在差异。图 9 为一个实际直径为 320 μm 的小气隙的超声扫描成像结果, 可以看到扫描图像上气隙的边缘比较模糊, 给缺陷尺寸的识别带来了困难。

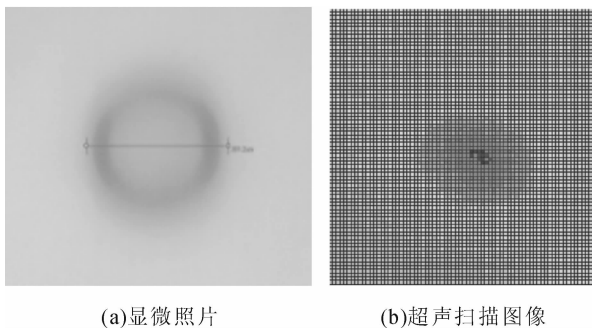


图 9 气隙显微图像及其超声扫描结果

Fig. 9 Microscopic image and ultrasonic scanning result of void in epoxy

在人工模拟试样上选取了几个有代表性的气隙缺陷, 对其进行超声检测, 并计算超声扫描得到的气隙大小与偏光显微镜测量结果之间的误差, 见表 2。

可见气隙的实际尺寸越小, 从超声扫描图像得到的结果与气隙实际尺寸之间的相对误差就越大; 然而绝对误差均保持在 700 μm 左右, 和气隙实际尺寸无关。这时由于聚焦探头在扫描平面内存在一

表 2 不同尺寸气隙的超声检测结果误差

Table 2 The ultrasonic detection error for voids with different size

参数	数值		
气隙实际大小/ μm	500	320	140
C扫描结果/ μm	1 200	1 000	850
绝对误差/ μm	700	680	710
相对误差/%	60.0	87.5	221.4

定的焦区直径, 当探头移动经过气隙边沿时, 回波的声压不是瞬间从 100% 变为 0, 而是逐渐减小。这样在扫描的过程中, 探头接收到的气隙边缘回波幅值会有一个渐变过程, 从而引起了超声扫描图像中缺陷边缘的模糊现象, 扫描得到的缺陷尺寸大于缺陷的实际尺寸, 差值约等于探头的焦区直径。这样对于气隙的检测, 只要将 C 扫描测量的结果减去 700 μm , 便可以得到气隙的实际大小, 从而消除焦区直径对测量结果的影响。这个特点可以用来对测量结果进行修正。

3 在环氧内部击穿通道检测中的应用

为了验证超声检测方法的实用性, 制作了环氧材料内部发生击穿后, 产生击穿通道的模拟试样。试样结构见图 10(a), 环氧厚度为 5 mm, 针电极的直径为 1 mm, 针尖曲率半径约为 15 μm 。将制备好的试样放在浸满绝缘油的容器中施加工频电压。实验中从 15 kV 开始加压, 每 5 min 增加 1 kV, 当观察到试样发生明显放电时降低加压速度, 直至试样被击穿, 在内部生成击穿通道。在偏光显微镜下观察到的击穿通道形貌见图 10(b)。

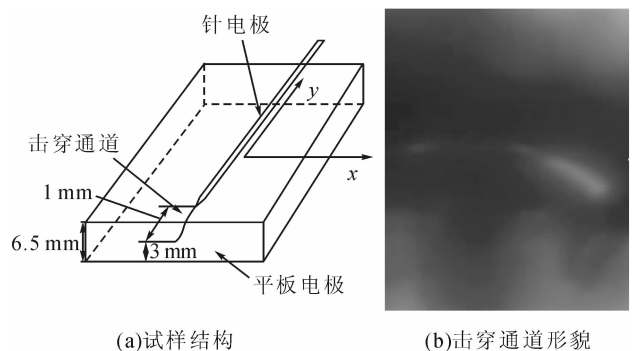


图 10 试样结构与击穿通道形貌

Fig. 10 The electrode structure of sample and breakdown channel appearance

以 2.5 μm 的步长对针尖周围 10 mm $\times$ 10 mm 区域做超声扫描, 图 11(a) 为超声扫描成像结果。可以清楚地看到击穿通道的发展趋势及分布范围, 其形状呈现弧形, 长度约为 2 mm。通过偏光显微镜观

察到的击穿通道长度为 1.5 mm, 小于超声检测的结果。另外, 击穿通道在靠近针尖处并不明显, 在距针尖 0.5~1.5 mm 的范围才观察到。这是由于击穿通道是从针尖开始逐渐向板电极发展的, 在发展的初期施加的电压较低, 针尖周围的场强较小, 放电不明显, 是产生细微的电树枝通道, 超声扫描难以捕获。随着放电的进一步发展, 击穿通道范围逐渐扩大, 当大于探头的分辨能力时, 才观察到明显的超声回波信号。图 11(b) 是分析得到的击穿通道的位置特征信息, 反映了击穿通道的高低起伏的形态, 从针尖开始有上翘的趋势, 靠近针尖的部分距离试样上表面较远, 击穿通道的末端离试样上表面较近。计算得到两部分之间的高度相差了 0.41 mm。这种变化在光学成像上是无法看到的, 从而体现了超声检测在描述缺陷形貌上的优势。

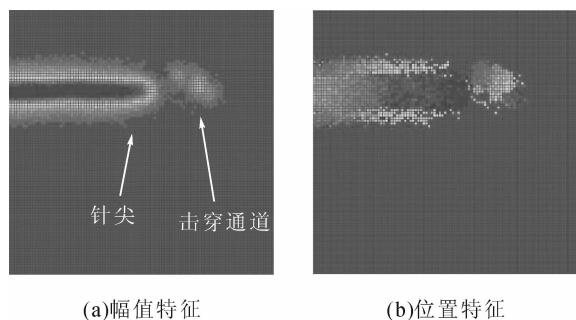


图 11 纯环氧试样击穿后超声扫描图像

Fig. 11 The ultrasonic scanning image of the breakdown channel in epoxy

4 结论

文中研究了固体绝缘材料内部缺陷形貌的超声检测方法, 设计了超声检测系统, 并对含有人工缺陷的模拟绝缘试样进行了检测, 得到以下结论:

1) 采用中心频率为 5 MHz 的窄脉冲聚焦探头能够准确获取固体绝缘内的缺陷回波信号。通过对含有不同大小气隙的环氧试样进行超声检测发现, 系统能够准确识别直径大于 130 μm 的气隙缺陷。

2) 由于聚焦探头焦区的存在, 导致缺陷形貌超声扫描图像的边缘出现模糊现象。测试结果表明: 不同尺寸气隙缺陷测量误差的绝对值均为 700 μm 左右, 和气隙实际尺寸无关, 在实际应用中可以进行修正。

3) 通过对超声回波信号的幅值、位置、相位和频率等特征信息进行分析, 能够全面反映绝缘内部缺陷形貌, 从而弥补了传统光学成像方法的不足。

参考文献:

[1] 巫松帧, 谢大荣, 陈寿田, 等. 电气绝缘材料科学与工程[M].

西安: 西安交通大学出版社, 1996.

WU Songzhen, XIE Darong, CHEN Shoutian, et al. Electrical insulation materials science and engineering[M]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University Press, 1996.

[2] 胡建恺. 超声检测原理和方法[M]. 合肥: 中国科学技术大学出版社, 1993.

HU Jiankai. Ultrasonic testing principle and method[M]. Hefei: University of Science and Technology China Press, 1993.

[3] McGRAIL A, RISINO A, AUCKLAND D W, et al. Use of a medical ultrasonic scanner for the inspection of high voltage insulation[J]. IEEE Transactions on Electrical Insulation Magazine, 1993, 9(6): 5-10.

[4] McGRAIL A J, AUCKLAND D W, VARLOW B R. Detecting and classifying flaws within insulating materials using ultrasound[C]//Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation[S.I.]: IEEE, 1994: 20-24.

[5] AUCKLAND D W, SMITH C D, VARLOW B R. Application of ultrasound to the NDT of solid insulation[J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1994, 141(1): 20-24.

[6] AUCKLAND D W, McGRAIL A J, SMITH C D, et al. Application of ultrasound to the inspection of insulation[J]. IEE Proceedings: Science, Measurement and Technology, 1996, 143(3): 177-181.

[7] UENOLH, WALTER P. Resolution evaluation of ultrasonic diagnosis tools for electrical insulation devices and the detection of electrical trees[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2007(14): 249-256.

[8] NELSON J K, AZIZI-GHANNAD S. Theory and application of dynamic aging for life estimation in machine insulation[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 1995, 7(6): 773-781.

[9] MOURITZ A P, TOWNSEND C, SHAH K M Z. Non-destructive detection of fatigue damage in thick composites by pulse-echo ultrasonics[J]. Composites Science and Technology, 2000, 60 (1): 23-32.

[10] 李晓红, 王敏, 吴敏, 等. 支柱瓷绝缘子的超声检测有效性[J]. 中国电机工程学报, 2006, 26(9): 159-163.

LI Xiaohong, WANG Min, WU Min, et al. Ultrasonic testing validity of porcelain post insulators[J]. Proceedings of the Chinese Society for Electrical Engineering, 2006, 26 (9): 159-163.

[11] 郝艳捧. 基于低频声反射法检测技术的大电机主绝缘状态诊断和寿命评估[D]. 西安: 西安交通大学, 2005.

HAO Yanpeng. Assessment of insulation condition and reliable life of large generator stator insulation based on low-frequency ultrasonic pulse-echo techniques[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2005.

[12] 杨奕, 陈以方, 洪玉萍, 等. 合成绝缘子的超声检测方

- 法[J]. 无损检测, 2003(7):337-339.
- YANG Yi, CHEN Yifang, HONG Yuping, et al. Ultrasonic inspection of composite insulator[J]. Non-destructive Test, 2003(7):337-339.
- [13] 范兴明, 马世伟, 张 鑫, 等. 超声无损检测及其在电力绝缘子探伤中的应用[J]. 高压电器, 2014, 50(3):109-114.
- FAN Xingming, MA Shiwei, ZHANG Xin, et al. Application of ultrasonic non-destructive testing to power insulator[J]. High Voltage Apparatus, 2014, 50(3):109-114.
- [14] 蒋 云, 王维东, 蔡红生, 等. 支柱瓷绝缘子及瓷套超声波检测[M]. 北京: 中国电力出版社, 2010.
- JIANG Yun, WANG Weidong, CAI Hongsheng, et al. Ultrasonic testing of porcelain post insulators and bushing[M]. Beijing: China Electric Power Press, 2010.
- [15] 司文荣, 黄 华, 傅晨钊, 等. 超声检测进行气体绝缘组合电器典型绝缘缺陷识别[J]. 高压电器, 2011, 47(12):11-18.
- SI Wenrong, HUANG Hua, FU Chenzhao, et al. Integrated classification technique for typical insulation flaws in gas-insulated switchgear based on acoustic detection[J]. High Voltage Apparatus, 2011, 47(12):11-18.
- [16] 牛伸克, 姜 涛, 王祥林, 等. 高压开关触头水浸超声自动检测装置及其应用[J]. 高压电器, 2001, 37(4):53-57.
- NIU Shenke, JIANG Tao, WANG Xianglin, et al. Automatic scan device of ultrasonic immersion and its application in detecting the defects of contact welding[J]. High Voltage Apparatus, 2001, 37(4):53-57.
- [17] 罗宏建, 周重回, 赵洲峰, 等. 超声衍射时差技术在气体绝缘组合电器焊缝检测中的应用[J]. 无损检测, 2015, 37(1):56-59.
- LUO Hongjian, ZHOU Chonghui, ZHAO Zhoufeng, et al. Application of TOFD detection technology in gas insulated switchgear[J]. Non-destructive Test, 2015, 37(1):56-59.
- [18] 冯 若. 超声手册[M]. 南京: 南京大学出版社, 1999.
- FENG Ru. Ultrasonic manual[M]. Nanjing: Nanjing University Press, 1999.
- [19] 闫 力. 环氧复合材料内电极超声检测及其对电场影响的研究[D]. 西安: 西安交通大学, 2009.
- YAN Li. Study on the detecting of the surface of the electrode in epoxy organic materials by ultrasonic and its influence to the electrical field[D]. Xi'an: Xi'an Jiaotong University, 2009.
- [20] 史亦韦. 超声检测[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- SHI Yiwei. Ultrasonic detection[M]. Beijing: Machinery Industry Press, 2009.

申 巍(1983—), 男, 高级工程师, 博士, 主要从事电力设备检测与诊断以及绝缘状态评价方面的工作。

孟永鹏(1976—), 男, 工学博士, 西安交通大学电气工程学院讲师, 分别于1998年、2001年和2006年在西安交通大学获得电气工程工学学士、硕士和博士学位。目前主要从事绝缘材料劣化机理与寿命评估、绝缘检测新技术、以及电力设备状态监测与故障诊断方面的教学与研究工作(通讯作者)。

(上接第 144 页)

- [19] 庞 峰. 模拟退火算法的原理及算法在优化问题上的应用[D]. 吉林: 吉林大学, 2006.
- PANG Feng. The principle of SA algorithm and algorithm's application on optimization problem[D]. Jilin: Jilin University, 2006.
- [20] 朱颢东, 钟 勇. 一种改进的模拟退火算法[J]. 计算机技术与发展, 2009(6):32-35.
- ZHU Haodong, ZHONG Yong. A kind of renewed simulat-

ed annealing algorithm[J]. Computer Technology and Development, 2009(6):32-35.

郑建康(1968—), 男, 高工, 主要从事高电压与绝缘技术方面的研究。

孙浩杰(1991—), 男, 西安交通大学硕士研究生, 主要从事电力设备绝缘状态诊断方面研究。