

## 激光与光电子学进展

## 电力绝缘子层间气隙太赫兹检测与定量分析

刘文通<sup>1,2,3</sup>, 李丽娟<sup>1,2,3\*</sup>, 任姣姣<sup>1,2,3</sup>, 顾健<sup>1,2,3</sup>, 张丹丹<sup>1,2,3</sup>, 孔诗媛<sup>3</sup>, 陈奇<sup>3</sup><sup>1</sup>长春理工大学光电测控与光信息传输技术教育部重点实验室, 吉林 长春 130022;<sup>2</sup>长春理工大学光电工程学院, 吉林 长春 130022;<sup>3</sup>长春理工大学中山研究院, 广东 中山 528400

**摘要** 电力绝缘子具有机械强度高、表面不易发生裂缝、老化速度慢等功能,在电力领域具有广泛应用。为了研究电力绝缘子层间气隙,构建了具有三层电力绝缘子的太赫兹(THz)波反射传播模型。模拟电力绝缘子层间气隙,制作了橡胶-环氧树脂板层间气隙缺陷样品。对含有层间气隙缺陷的样品的波形进行分析,能够检测厚度为 100  $\mu\text{m}$  的层间气隙缺陷,并对层间气隙厚度进行了计算。经数显千分测厚仪验证,THz 检测层间气隙厚度的准确率达到 95.61%。对缺陷样品进行能量积分成像并采用最大类间方差(Ostu)二值化方法提取气隙缺陷,为了验证 THz 检测的识别准确度,采用光学三坐标扫描仪对粘接缺陷重构提取缺陷面积,检测准确率达到 95.29%。本文研究为电力绝缘子中含有层间气隙缺陷的检测提供了新方法。

**关键词** 仪器,测量与计量;电力绝缘子;层间气隙;反射传播模型;缺陷厚度检测;缺陷面积检测

中图分类号 TN215; O433.4

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP222661

## THz Detection and Quantitative Analysis of Interlayer Air Gap in Power Insulators

Liu Wentong<sup>1,2,3</sup>, Li Lijuan<sup>1,2,3\*</sup>, Ren Jiaojiao<sup>1,2,3</sup>, Gu Jian<sup>1,2,3</sup>, Zhang Dandan<sup>1,2,3</sup>, Kong Shiyuan<sup>3</sup>, Chen Qi<sup>3</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Photoelectric Measurement and Optical Information Transmission Technology, Ministry of Education, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>2</sup>School of Opto-Electronic Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, Jilin, China;

<sup>3</sup>Zhongshan Institute of Changchun University of Science and Technology, Zhongshan 528400, Guangdong, China

**Abstract** Power insulators are widely used in the electric power field owing to their high mechanical strength, crack resistive surface, and slow aging speed. A terahertz wave reflection propagation model with three layers of power insulators is constructed to study the air gap between layers of power insulators. An air gap defect sample of rubber-epoxy resin plate was fabricated by simulating the air gap between layers of power insulator. The waveform analysis of the samples containing the interlayer air gap defects reveals that the thickness of the interlayer air gap defects is 100  $\mu\text{m}$ . Moreover, the thickness of the interlayer air gap is calculated. The accuracy of THz detection of the interlayer air gap thickness is 95.61%, as verified by a digital display thousand meter. The energy integral imaging was performed on the defect samples and the maximum between-class variance (Ostu) binarization method was used to extract the air gap defects. To verify the recognition accuracy of THz detection, the optical coordinate measuring machine (CMM) 3D was used to reconstruct the bonding defects and extract the defect area, and the detection accuracy is 95.29%. This study provides a new method for detecting interlayer air gap defects in power insulators.

**Key words** instrumentation, measurement, and metrology; power insulator; interlayer air gap; reflection propagation model; defect thickness detection; defect area detection

## 1 引言

电力绝缘子普遍应用在高压及超高压架空输电线

路上,对电力系统的安全运行有着至关重要的作用。在电力绝缘子热熔粘接过程中,橡胶与芯棒界面脱粘导致粘接界面极易产生层间气隙,使得电力绝缘子被

收稿日期: 2022-09-30; 修回日期: 2022-10-27; 录用日期: 2022-11-23; 网络首发日期: 2023-01-04

基金项目: 吉林省科技发展计划(20220508032RC)、中山市第二批社会公益和基础研究项目(2022B2012)

通信作者: \*custjuan@163.com

击穿,造成架空输电线路过电压,影响电网运行。

目前对电力绝缘子的无损检测方式主要有两种:一种方式为超声检测<sup>[1]</sup>,超声检测具有强穿透性和较好的方向性,但对于缺陷的精确定量较差;另一种方式为太赫兹(THz)无损检测,具有精度高、分辨率较高、对非极性材料具有很好的穿透性等优点,可以更好地对介电材料中的杂质、孔隙等进行探测<sup>[2-8]</sup>。目前一些学者对电力绝缘子中存在的内部缺陷进行了研究,Cheng等<sup>[9]</sup>利用透射式THz时域光谱检测系统,检测复合绝缘子的光学参数,通过THz波测量硅橡胶套厚度,检测误差为4%。Mei等<sup>[10]</sup>通过建立的反射式THz传播模型,检测橡胶-环氧树脂板缺陷样件,检测结果与实际测量结果对比,气隙厚度在0.3 mm以上时,相对误差在5%左右。张中浩等<sup>[11]</sup>对橡胶-环氧玻纤板界面中存在的层间气隙缺陷进行厚度方面的研究,将THz波检测结果与测厚仪检测气隙缺陷结果进行对比,相对误差在10%以内。唐志国等<sup>[12]</sup>研究了复合绝缘子硅橡胶内部缺陷,利用时域有限差分法对硅橡胶内部缺陷进行了仿真,并分析了探测距离对灵敏度的影响、背景噪声对成像分辨率的影响,以及缺陷类型识别等问题。

本文针对电力绝缘子0.4 mm以下的层间气隙缺陷开展研究,应用反射式脉冲THz时域光谱技术对电力绝缘子进行检测,通过分析波形和成像,利用缺陷特征峰的飞行时间差检测层间气隙厚度,并利用THz二值化算法检测层间气隙面积,从而实现了对电力绝缘子缺陷的定量分析。

## 2 层间气隙传播理论

电力绝缘子材料属于热熔粘接材料,主要结构是橡胶-胶层-环氧树脂板,如图1所示<sup>[13-14]</sup>。

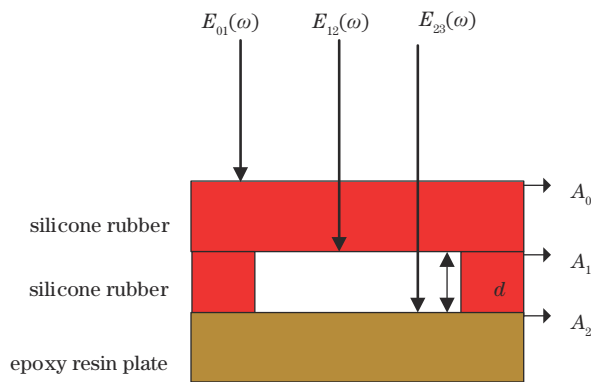


图1 层间气隙 THz波传播模型

Fig. 1 Model of terahertz (THz) wave propagation in interlayer air gap

对THz波在内部的传播过程进行分析,在图1中,三层介质的厚度和折射率分别为 $d_1$ 、 $d_2$ 、 $d_3$ 和 $\tilde{n}_1$ 、 $\tilde{n}_2$ 、 $\tilde{n}_3$ ;  $E(\omega)$ 为光电导天线产生的THz脉冲电场强度, $R(\omega)$ 为THz波通过不同介质所对应的反射系数, $T(\omega)$ 为

THz波通过不同介质所对应的透射系数, $U(\omega, d)$ 为THz波在介质中的传输等效时间延迟后产生的相移, $d$ 为介质厚度,则 $U(\omega, d)$ 可表示为

$$U(\omega, d) = \exp[-j2\omega\tilde{n}d/c], \quad (1)$$

式中, $c$ 为电磁波在空气中的传播速度,其值为 $3 \times 10^8$  m/s。由空气与橡胶界面反射的THz波可写为

$$E_{01}(\omega) = E(\omega)R_{01}(\omega)U_{01}(\omega, d_0). \quad (2)$$

由橡胶与气隙上界面反射的THz波可写为

$$E_{12}(\omega) = E(\omega) \cdot T_{01}(\omega) \cdot T_{21}(\omega) \cdot U_{01}(\omega, d_0) \cdot R_{12}(\omega) \cdot U_{12}(\omega, d_1). \quad (3)$$

由气隙与环氧树脂板界面反射的THz波可写为

$$E_{23}(\omega) = E(\omega) \cdot T_{01}(\omega) \cdot T_{12}(\omega) \cdot T_{21}(\omega) \cdot T_{10}(\omega) \cdot U_{01}(\omega, d_0) \cdot U_{12}(\omega, d_1) \cdot U_{23}(\omega, d_2) \cdot R_{23}(\omega). \quad (4)$$

反射式THz波的时域信号为其频域信号所对应的傅里叶逆变换,其中 $\mathcal{F}^{-1}$ 为傅里叶逆变换:

$$E_R(t) = \mathcal{F}^{-1}[E_R(\omega)]. \quad (5)$$

接收器接收到的THz波为各个界面返回的THz波的总和,即为

$$E_R(t) = E_{01}(t) + E_{12}(t) + E_{23}(t). \quad (6)$$

如图2所示,样品中的缺陷信号表现为:橡胶与气隙界面缺陷信号 $E_{12}$ 、气隙与环氧树脂板界面缺陷信号 $E_{23}$ 。其中, $E$ 代表缺陷位置的特征,根据 $E$ 的峰值特征可以获得实际检测中层间气隙的成像模式为能量积分成像,这样即可实现传播模型对于实际检测的指导<sup>[15-17]</sup>。

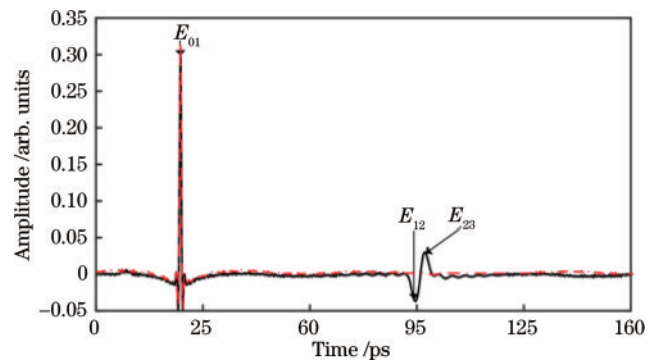


图2 层间气隙缺陷仿真信号

Fig. 2 Simulation signals of interlayer air gap defects

## 3 样品制备与检测系统

### 3.1 样品制备

为了模拟电力绝缘子层间气隙缺陷,本文设计制作了4组橡胶-环氧树脂板缺陷样件。工艺步骤如下:先将橡胶制品下表面涂抹适量橡胶,如图3(a)所示,阴影区域面积 $M_1$ 为预制涂胶的面积,空白区域面积 $M_2$ 为预制层间气隙面积。再将凸型模具圆柱面侧面的高度由3D打印机分别制作作为0.1、0.2、0.3、0.4 mm,底面面积制作成 $M_2$ ,并将凸型模具底面置于橡胶下表面层间气隙缺陷位置上,并用铁片压制在橡

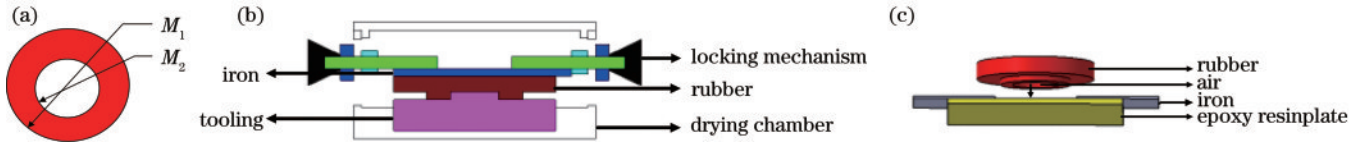


图 3 缺陷样品工艺图。(a) 涂胶面积; (b) 橡胶制作工艺; (c) 样品工艺制作图

Fig. 3 Process diagram of defect samples. (a) Gluing area; (b) rubber manufacturing process; (c) process diagram of samples

胶制品未涂胶面上,由锁紧装置固定,之后将样品放入风干箱风干,如图 3(b)所示。风干后对涂胶部位的橡胶样品采用热熔方式粘接在环氧树脂板上表面,同时放置与预制缺陷厚度一致的铁片,最后橡胶与环氧树脂板粘合,如图 3(c)所示。

待样品固化 6 h 后,将铁片抽出,得到 4 组橡胶制品缺陷样品如图 4 所示。橡胶的平面尺寸直径为 100 mm,最大厚度约为 7 mm,与橡胶热熔粘接的环氧树脂板的平面尺寸为 100 mm × 100 mm,最大厚度约为 3 mm,并将制作的 4 组缺陷样品分别编号为 1#、2#、3#、4#。

为了使实际测量缺陷厚度的值更加精确,用数显

千分测厚仪测量样品总厚度、橡胶厚度及环氧树脂板厚度。利用样品总厚度减去橡胶和环氧树脂板的厚度即为缺陷厚度。随机测量橡胶边缘 8 个位置的厚度,并将 8 个位置缺陷厚度的平均值作为样品缺陷实测平均厚度,表 1 为 4 组样品实测层间气隙厚度测量结果和预制层间气隙厚度信息。

表 1 预制层间气隙厚度

Table 1 Thickness of air gap between prefabricated layers

unit: mm

Sample number	Measured air gap thickness between layers	Prefabricated air gap thickness between layers
1#	0.091	0.1
2#	0.184	0.2
3#	0.295	0.3
4#	0.372	0.4



图 4 样品实物图

Fig. 4 Real picture of samples

### 3.2 反射式脉冲 THz 成像系统

本文采用反射式 THz 二维扫描平台对制作的橡胶层间气隙缺陷样品进行逐点扫描,采集系统工作原理图如图 5(a)所示,激光器采用锁模钛蓝宝石飞秒激光器。飞秒激光器发射的飞秒激光脉冲经分束镜分为泵浦光和探测光,泵浦光入射到 THz 发射元件上激发其产生 THz 电磁波脉冲;探测光经光电导取样测量获得时间分辨的 THz 光谱信息。采集到的图像中每一个像素点都对应该点的脉冲信号,对每个像素点进行成像,得到反映不同信息的二维图像如图 5(b)所示。THz 时域光谱系统探测频谱范围为 0.02~2 THz,时

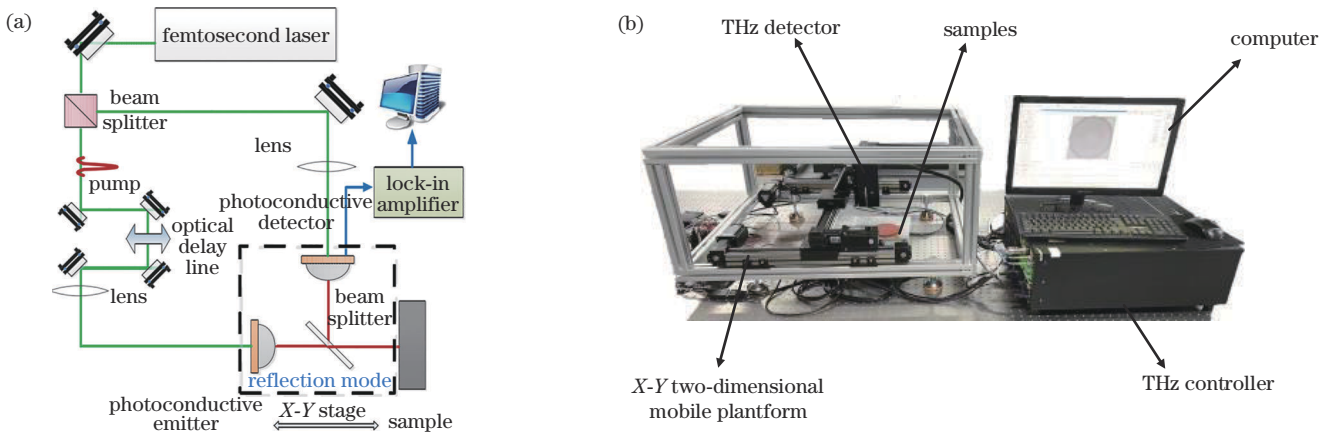


图 5 THz 时域光谱系统。(a) THz 成像系统光路原理示意图; (b) THz 检测系统图

Fig. 5 THz time domain spectral system. (a) Schematic diagram of optical path of THz imaging system; (b) diagram of THz detection system



间分辨率为 0.1 ps,快速扫描范围为 160 ps,信噪比大于 60 dB。采用扫描平台对样件进行检测,扫描步距为 0.5 mm,探测器焦距为 11.43 cm<sup>[18]</sup>。

## 4 结果与讨论

### 4.1 层间气隙缺陷样件波形分析

橡胶-环氧树脂板缺陷样件的 THz 时域波形分析如图 6 所示。实际样件中橡胶上表面与空气界面  $A_0$  所对应的反射回波即  $E_{01}(t)$ ,  $A_1$  界面所对应的是橡胶与气隙表面反射回波即  $E_{12}(t)$ ,  $A_2$  界面所对应的是环氧树脂板与气隙界面反射回波即  $E_{23}(t)$ 。在图 6 中,实线波形为 THz 透过无层间气隙缺陷样品的时域波形,虚线波形为 THz 透过有层间气隙缺陷样品的时域波形。 $E_{01}(t)$  为 THz 经空气与橡胶材料反射的回波,有无缺陷时域波形在  $E_{01}(t)$  处一致。而正常时域波形与缺陷时域波形比较,有层间气隙缺陷时域波形较正常波形多出了橡胶与层间气隙界面的反射回波  $E_{12}(t)$  和层间气隙与环氧树脂板界面的反射回波  $E_{23}(t)$ 。由于粘接界面中存在层间气隙缺陷,因此在橡胶-层间气隙界面及层间气隙-环氧树脂板界面产生回波 [ $E_{12}(t)$ ,

$E_{23}(t)$ ]。THz 波能够对橡胶中的层间气隙进行有效检测。

### 4.2 层间气隙厚度检测

当 THz 入射到被测样件时,THz 波进入样件内部,由于介质的不同,会反射出不同的波形特征。根据电磁波传播原理,可以根据脉冲之间的飞行时间差计算出反射界面之间的距离<sup>[19]</sup>。因此,橡胶厚度  $d$  可以通过以下方法计算:

$$d = \frac{c \cdot \Delta t}{2n}, \quad (7)$$

式中: $c$  为电磁波在空气中的传播速度; $n$  为气隙的折射率; $\Delta t$  为脉冲之间的时间差。

由图 7 中样件的层间气隙缺陷波形可以看到,层间气隙缺陷的谷值处在相同位置是由于橡胶厚度一致,所以在时域波形上会有相同的位置。在缺陷波形放大图中可以看出,随着层间气隙厚度的增加,峰谷间距也随着相应地增加,特征峰也相应地向后移动。层间气隙厚度越厚其峰谷间距的飞行时间就越长,缺陷特征峰向后移动的值就越大。

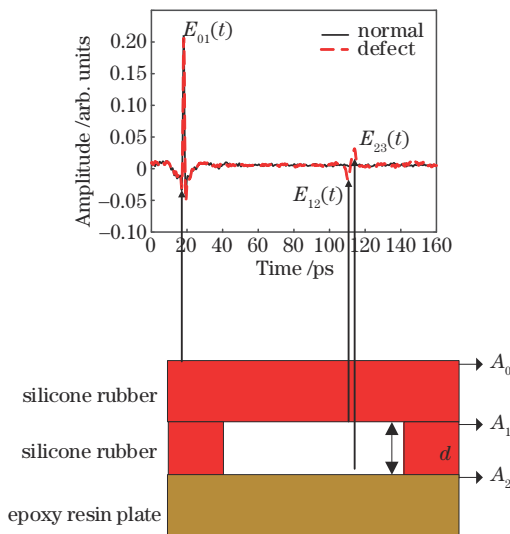


图 6 缺陷波形分析

Fig. 6 Defect waveform analysis

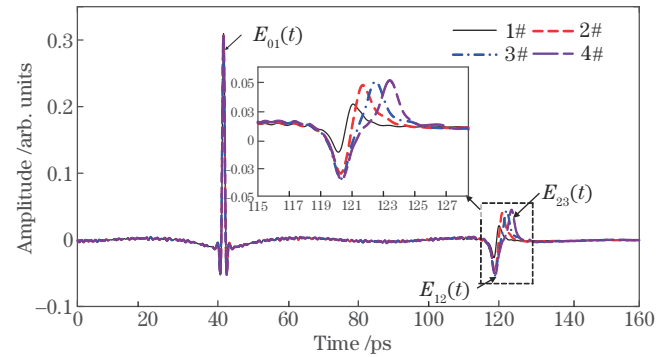


图 7 不同厚度层间气隙时域波形图

Fig. 7 Time-domain waveform of interlayer air gap with different thicknesses

由于空气的折射率可近似为 1,依据 [ $E_{12}(t)$ ,  $E_{23}(t)$ ] 峰谷之间的飞行时间差  $\Delta t$ ,能够计算出缺陷样件的层间气隙厚度,如图 8 所示(图中右侧刻度值表示太赫兹能量幅值的平方,无量纲,图 9 同)。

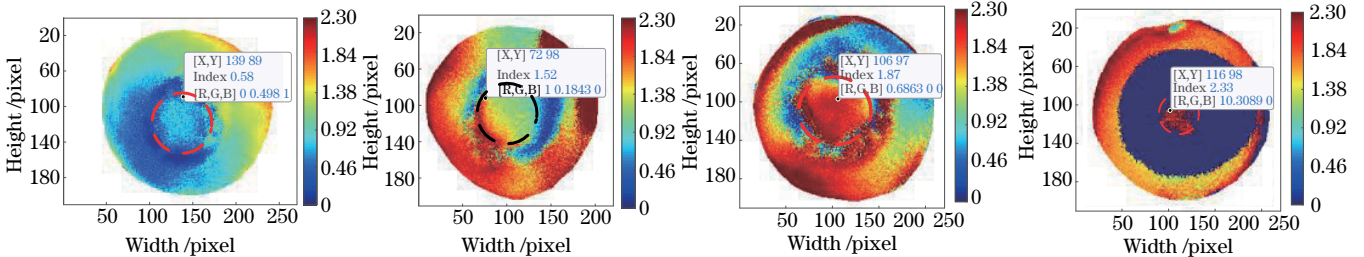


图 8 峰峰值飞行时间成像图

Fig. 8 Peak-to-peak time-of-flight images

缺陷区域随机选取 100 个数据点的缺陷特征峰值,求取峰峰值平均飞行时间,经式(7)计算得到缺陷

的平均厚度值,并与数显千分测厚仪的测试结果对比,利用式(8)计算其检测厚度与实测厚度的相对误差,计

算结果如表 2 所示。可以看到,层间气隙缺陷 THz 检测值与实测值相近,相对误差在 4.52% 左右。缺陷特征峰、谷之间的飞行时间可以成为判断厚度的一个指标,当缺陷特征峰、谷之间的飞行时间越长时,说明橡胶气隙越厚。

$$\alpha = \frac{x - \mu}{x} \times 100\%, \quad (8)$$

式中: $\alpha$  为橡胶 THz 检测厚度与数显千分测厚仪测量厚度之间的相对误差; $x$  为数显千分测厚仪测量橡胶层间气隙的厚度; $\mu$  为 THz 检测橡胶层间气隙的厚度。

### 4.3 层间气隙面积检测

利用反射式 THz 时域光谱系统对缺陷样件进行

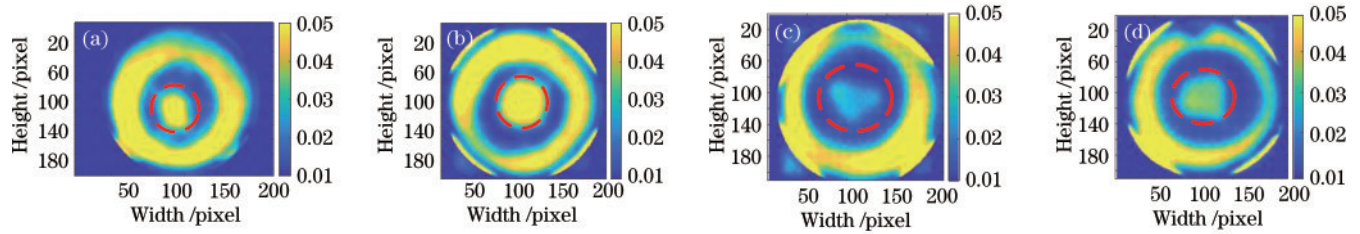


图 9 THz 能量积分成像图。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 9 THz energy integration images. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

图 10 为 Ostu 二值化处理经 THz 检测到的层间气隙缺陷图像,当前景与背景的分割阈值为  $t$  时,前景点占图像比例为  $\omega_0$ ,均值为  $u_0$ ,背景点占图像比例为  $\omega_1$ ,均值为  $u_1$ 。则整个图像的均值  $u$  为

$$u = \omega_0 \times u_0 + \omega_1 \times u_1. \quad (9)$$

分割阈值为  $t$  时的类间方差  $g(t)$  的表达式为

$$g(t) = \omega_0(t) \times [u_0(t) - u(t)]^2 + \omega_1(t) \times [u_1(t) - u(t)]^2. \quad (10)$$

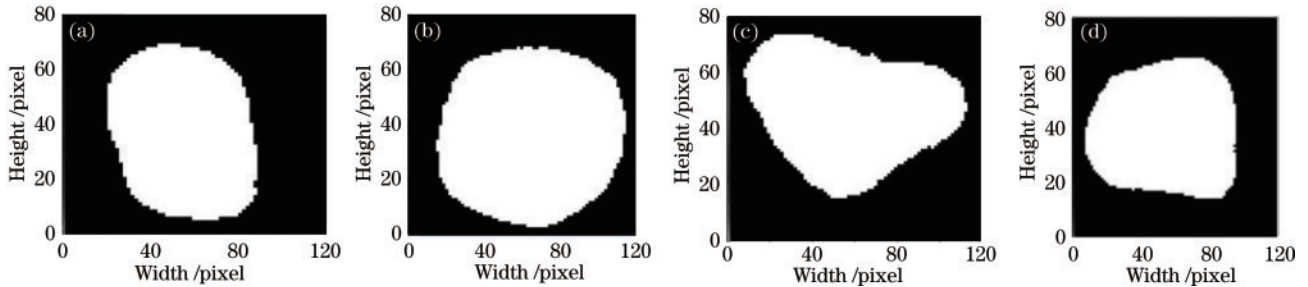


图 10 THz 二值化成像图。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 10 THz binarization images. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

二值化处理后的图像中白色区域的灰度值为 0,即层间气隙缺陷区域。为了计算气隙面积的大小,可以通过计算白色区域内像素点的个数,从而计算气隙缺陷面积。THz 检测层间气隙缺陷的计算面积如下式所示:

$$M = SA_i, \quad (11)$$

式中: $M$  为气隙缺陷的面积; $S$  为像素点所对应的实际面积; $A_i$  为像素值为 0 像素点的个数  $i$ 。

为了能够观察到层间气隙缺陷的几何特征,也是为了和 THz 检测气隙缺陷图像进行对比,将 4 组粘接样件拆解,如图 11 所示,从得到的样件拆解图可以看出,热熔后的层间气隙形状较不规则但总体近似呈现

表 2 THz 检测层间气隙厚度结果及检测误差

Table 2 Results and errors of THz detection of interlayer air gap thicknesses

Sample number	THz measurement thickness /mm	Thickness meter detect thickness /mm	Relative error /%
1#	0.087	0.091	4.39
2#	0.176	0.184	4.35
3#	0.281	0.295	4.75
4#	0.355	0.372	4.57

检测,经能量积分成像后,得到的图像如图 9 所示,虚线标记位置为 THz 检测到的缺陷样件层间气隙,能够清楚地看到图像虚线位置的气隙缺陷。

圆形,且胶层-橡胶界面层间气隙与胶层-环氧树脂板界面层间气隙经拆解后形状大小近似相等,与 THz 检测到的缺陷几何特征近似一致,因此只需要计算环氧树脂板-胶层界面的层间气隙面积大小,就能够反映样件的真实层间气隙面积大小。

为了使不规则层间气隙计算面积更加接近真实值,利用扫描精度为 100  $\mu\text{m}$  的三坐标测量(CMM 3D)扫描仪,对 4 组拆解后的胶层-环氧树脂板样件进行检测,得到的点云数模如图 12 所示。通过将点云转化为实体可以更加容易地提取层间气隙缺陷外轮廓,缺陷外轮廓再经计算机辅助设计(CAD)可直接计算

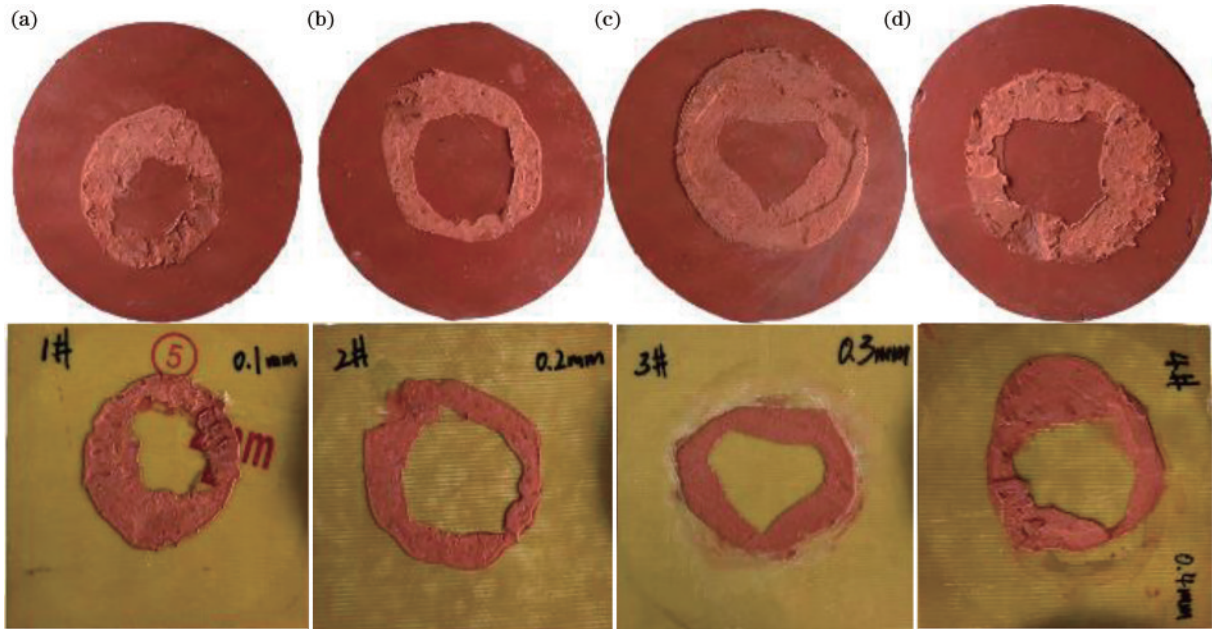


图 11 样品拆解图。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 11 Sample disassembly diagram. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

不规则层间气隙缺陷面积,将CAD计算的层间气隙面积作为真实值。

THz 检测系统的扫描步距设置为 0.5 mm,即 THz 横向扫描距离为 0.5 mm,纵向扫描距离为 0.5 mm,因此图像中每一个像素点对应的实际检测面积为 0.25 mm<sup>2</sup>,通过式(11)计算得出含有气隙缺陷样品 THz 检测的面积,并与经扫描仪检测的缺陷面积进

行对比,利用式(8)计算缺陷面积的相对误差,计算结果如表 3 所示,1#、2#、3#、4#气隙样品相对误差分别为 3.19%、4.14%、3.56%、4.71%,可以看出相对误差都在 3.19%~4.71%之间,因此本文提出的方法对橡胶-环氧树脂板层间气隙面积检测具有较好的识别精度,且不需要拆解就可以检测层间气隙缺陷的面积,也可以更好地表征缺陷的严重程度。

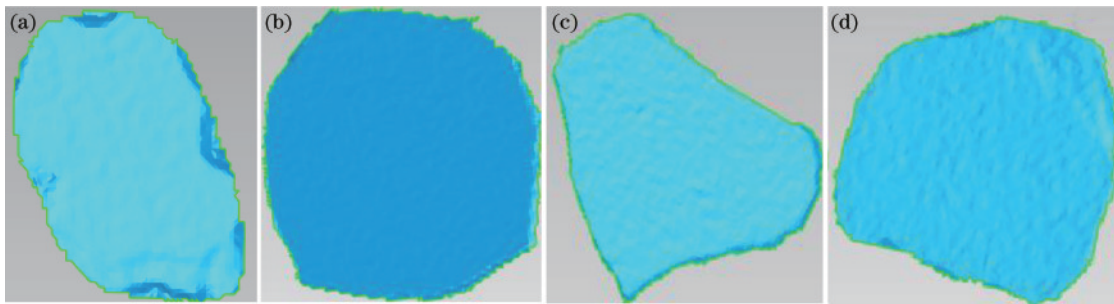


图 12 扫描成像图。(a) 1#;(b) 2#;(c) 3#;(d) 4#

Fig. 12 Scanning images. (a) 1#; (b) 2#; (c) 3#; (d) 4#

表 3 层间气隙面积检测结果及检测误差

Table 3 Detection results and errors of interlayer air gap areas

Sample number	THz detection area /mm <sup>2</sup>	Scanner detection area /mm <sup>2</sup>	Relative error /%
1#	387.00	399.752	3.19
2#	748.25	780.541	4.14
3#	578.75	600.121	3.56
4#	666.00	698.932	4.71

## 5 结 论

针对电力绝缘子中存在层间气隙缺陷的问题,开

展了相关研究。通过构建的层间气隙传播模型,研究了 THz 波在内部的传播规律。利用 THz 无损检测系统对不同厚度缺陷样品进行了检测,层间气隙厚度检测准确率达到 95.61%。对于缺陷样品进行能量积分成像并通过二值化处理提取气隙缺陷,并采用更高精度的光学扫描仪设备对层间气隙缺陷重构提取缺陷面积,缺陷样品面积检测准确率达到 95.29%。该研究对之后在航空航天、船舶、军工业等领域研究橡胶类制品的夹杂缺陷检测具有一定的参考意义。



## 参 考 文 献

- [1] 孙洪宇, 彭丽莎, 屈凯峰, 等. 机器学习在复合绝缘子缺陷超声检测中的应用与展望[J]. 无损检测, 2021, 43(5): 58-63.  
Sun H Y, Peng L S, Qu K F, et al. Application and prospect of machine learning in ultrasonic testing of composite insulator defects[J]. Nondestructive Testing, 2021, 43(5): 58-63.
- [2] 王子康, 周凯, 朱光亚, 等. 硅脂溶胀对 XLPE-SiR 复合界面气隙缺陷局部放电的影响及作用机理[J]. 高电压技术, 2021, 47(12): 4245-4254.  
Wang Z K, Zhou K, Zhu G Y, et al. Effect and mechanism of silicone grease swelling on partial discharge at air-gap defects of XLPE-SiR interface[J]. High Voltage Engineering, 2021, 47(12): 4245-4254.
- [3] 郭蕾, 曹伟东, 白龙雷, 等. 乙丙橡胶电缆终端气隙局部放电过程及特征提取[J]. 西南交通大学学报, 2021, 56(5): 1011-1019, 1028.  
Guo L, Cao W D, Bai L L, et al. Partial discharge process and feature extraction of air gap in EPR cable terminal[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2021, 56(5): 1011-1019, 1028.
- [4] Nüßler D, Jonuscheit J. Terahertz based non-destructive testing (NDT) [J]. Tm-Technisches Messen, 2021, 88(4): 199-210.
- [5] Smith R A. Foreword to the special issue on terahertz nondestructive testing[J]. Applied Sciences, 2021, 11(24): 11724.
- [6] Yakovlev E V, Zaytsev K I, Fokina I N, et al. Nondestructive testing of polymer composite materials using THz radiation[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2014, 486: 012008.
- [7] 王洋, 林振衡, 唐天赐, 等. 基于 THz 波的氟橡胶材料热损伤检测[J]. 激光与光电子学进展, 2020, 57(17): 173003.  
Wang Y, Lin Z H, Tang T C, et al. Thermal damage detection of fluororubber material based on terahertz wave [J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2020, 57(17): 173003.
- [8] 谢声益, 杨帆, 黄鑫, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的交联聚乙烯电缆绝缘层气隙检测分析[J]. 电工技术学报, 2020, 35(12): 2698-2707.  
Xie S Y, Yang F, Huang X, et al. Air gap detection and analysis of XLPE cable insulation based on terahertz time domain spectroscopy[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2020, 35(12): 2698-2707.
- [9] Cheng L, Wang L, Mei H, et al. Research of nondestructive methods to test defects hidden within composite insulators based on THz time-domain spectroscopy technology[J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2016, 23(4): 2126-2133.
- [10] Mei H W, Jiang H Y, Yin F H, et al. Terahertz imaging method for composite insulator defects based on edge detection algorithm[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2021, 70: 4504310.
- [11] 张中浩, 梅红伟, 刘建军, 等. 基于 THz 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): 989-999.  
Zhang Z H, Mei H W, Liu J J, et al. Detection method of interfacial defects of composite insulators based on THz wave[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(3): 989-999.
- [12] 唐志国, 李阳. THz 反射成像技术在复合绝缘子硅橡胶内部缺陷检测中的评述[J]. 绝缘材料, 2022, 55(7): 10-16.  
Tang Z G, Li Y. Application review of terahertz reflectance imaging technique for detection of internal defects in silicone rubber for composite insulators[J]. Insulating Materials, 2022, 55(7): 10-16.
- [13] 宋新明, 夏云峰, 黎一杉, 等. 复合绝缘子硅橡胶成分分析方法[J]. 电力科学与技术学报, 2020, 35(5): 150-158.  
Song X M, Xia Y F, Li Y S, et al. Study on component analysis schemes for silicone rubber of composite insulator [J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2020, 35(5): 150-158.
- [14] 徐凤. THz 光谱检测不同橡胶材料研究[J]. 现代电子技术, 2016, 39(8): 135-137.  
Xu F. Research on terahertz spectrum used to detect different rubber materials[J]. Modern Electronics Technique, 2016, 39(8): 135-137.
- [15] 钟一帆, 任姣姣, 李丽娟, 等. 基于条纹抑制技术的脉冲 THz 无损检测层析成像[J]. 中国激光, 2020, 47(10): 1014001.  
Zhong Y F, Ren J J, Li L J, et al. Pulsed terahertz nondestructive detection tomography based on fringe suppression technology[J]. Chinese Journal of Lasers, 2020, 47(10): 1014001.
- [16] Zhang J Y, Ren J J, Li L J, et al. THz imaging technique for nondestructive analysis of debonding defects in ceramic matrix composites based on multiple echoes and feature fusion[J]. Optics Express, 2020, 28(14): 19901-19915.
- [17] 顾健, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于多次回波数值模拟的涂层缺陷 THz 无损检测[J]. 光学学报, 2022, 42(15): 1512007.  
Gu J, Ren J J, Zhang D D, et al. Terahertz nondestructive testing of coating defects based on multiple echoes numerical simulation[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(15): 1512007.
- [18] 王赫楠, 任姣姣, 张丹丹, 等. 基于连续小波变换的玻璃纤维增强树脂复合材料 THz 特征增强及缺陷成像[J]. 复合材料学报, 2021, 38(12): 4190-4197.  
Wang H N, Ren J J, Zhang D D, et al. Glass fiber reinforced polymer terahertz feature enhancement and defect imaging based on continuous wavelet transform[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2021, 38(12): 4190-4197.
- [19] 张量, 张中浩, 刘建军, 等. THz 波在绝缘材料测厚中的应用[J]. 高压电器, 2020, 56(5): 175-181.  
Zhang L, Zhang Z H, Liu J J, et al. Application of terahertz wave to thickness measurement of insulating materials[J]. High Voltage Apparatus, 2020, 56(5): 175-181.