

# 瓷绝缘子脉冲红外热波检测研究

李政良<sup>1</sup> 曾智<sup>2,3,4\*</sup> 陶宁<sup>2,3</sup> 张存林<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>重庆市电力公司, 重庆 400015

<sup>2</sup>首都师范大学物理系北京市太赫兹波谱与成像重点实验室, 北京 100048

<sup>3</sup>首都师范大学物理系太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048

<sup>4</sup>重庆师范大学物理与电子工程学院, 重庆 400047

**摘要** 采用主动式脉冲红外热波技术检测瓷绝缘子内部缺陷,两个高能脉冲闪光灯用于瞬时加热被测瓷绝缘子表面,绝缘子表面吸热而升温,热量由表面向内部传导,从而引起表面温度的降低,计算机控制红外热像仪采集和记录绝缘子表面降温过程。通过研究热波一维热传导理论模型,建立了针对内部气孔缺陷的一阶相对热对比度理论公式并模拟其理论曲线,结合对实验热波降温数据序列进行处理和分析,实现了瓷绝缘子夹杂和内部气孔的检测。并分析和讨论了瓷绝缘子内部气孔和夹杂缺陷的一阶微分热图在时序上的区别。结果表明脉冲红外热波技术能用于瓷绝缘子内部缺陷检测。

**关键词** 脉冲红外热波技术;瓷绝缘子;缺陷;热传导

**中图分类号** O434.3 **文献标识码** A **doi:** 10.3788/CJL201138.s108007

## Research of Ceramic Insulator Detection Using Pulsed Thermography

Li Zhengliang<sup>1</sup> Zeng Zhi<sup>2,3,4</sup> Tao Ning<sup>2,3</sup> Zhang Cunlin<sup>2,3</sup>

<sup>1</sup>Chongqing Electric Powers Company, Chongqing 400015, China

<sup>2</sup>Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>3</sup>Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China

<sup>4</sup>Institute of Physics and Electronic Engineering, Chongqing Normal University, Chongqing 400047, China

**Abstract** Active pulsed thermography is adopted to test the inner defects of ceramic insulators, two high energy flash lamps were used to instantly heat the front surface of the tested ceramic insulator, whose temperature increases because of absorbing heat, the heat conducts into the ceramic insulator, thus it causes the temperature decrease of the front surface, the computer was used to control the infrared camera to capture and record this temperature decreasing process. Pulsed thermography was successfully used to detect impurities and holes in ceramic insulator based on the research of one-dimensional heat conduction model, the deduction and simulation of the first-order derivative of relative thermal contrast, and the processing and analysis of experimental temperature decreasing curves. The study also analyzed and discussed the sequential difference of the first-order derivative thermographic images. The results indicated that pulsed thermography could be used in the detection of inner defects of ceramic insulators.

**Key words** pulsed thermography; ceramic insulator; defect; heat conduction

**OCIS codes** 110.3080; 110.6820; 120.4290

## 1 引言

瓷绝缘子是发电厂和变电站运行的重要组成部分

备,起着支撑导线和绝缘的作用。瓷绝缘子在制作工艺流程中由于原料配方、烧结温度和燃料等会造

收稿日期: 2011-08-20; 收到修改稿日期: 2011-09-08

基金项目: 国家自然科学基金(10804078,61079020)和重庆市教委资助项目(KJ100605)资助课题。

作者简介: 李政良(1973—), 硕士, 工程师, 主要从事电力无损检测方面的研究。E-mail: lzl315818@sina.com

\* 通信联系人。E-mail: wsu\_zeng@yahoo.com

成窑后质量下降,易形成瓷件内外部缺陷,常见缺陷有夹杂、气孔、生烧、夹层和开裂等。由于没有固有的形变能且韧性极低,长期承受运行中的机械负荷和环境因素影响等,从而使附加应力增大。若瓷体存在微小缺陷,就容易在该处产生应力集中造成破坏,甚至发生断裂或失效,将严重影响电网的安全稳定运行<sup>[1~3]</sup>。从出厂质量控制和挂网后性能检/监测,无损检测正成为绝缘子检测领域备受重视的技术。采用的无损检测技术主要有观察法、紫外成像法、红外成像法和超声方法等,不同方法各有其优缺点<sup>[4]</sup>。

红外检测方法分为被动式和主动式,主动式红外检测方法根据不同应用,可选择不同的热激励源,比如脉冲闪光灯、超声、涡流等方法,其中脉冲闪光灯激励方法是最成熟也是应用最广的红外热波技术。脉冲红外热波无损检测技术是20世纪90年代后发展起来的一种无损检测技术,作为一种无损评估手段已经在诸多领域得到广泛应用,如航天航空、汽车制造以及新材料领域。该技术通过主动对被检测物体施加脉冲热激励,使物体内部的异性结构以表面温场变化的差异形式表现出来,采用红外热像仪连续观测和记录物体表面的温场变化,并对序列热图结果进行处理和分析,以实现物体内部异性结构的定性和定量测量<sup>[5~10]</sup>。

许多电力设备故障往往都以设备相关部位的温度或热状态变化为征兆表现出来,因而,被动式红外方法在电力行业常用于在线监测<sup>[11,12]</sup>。但是目前还未见到任何主动式红外热波技术应用于电力行业,特别是绝缘子检测的相关报道。本文将以前瓷绝缘子为例,采用脉冲红外热波技术作为实验方案,进行瓷绝缘子夹杂和内部气孔的脉冲红外热波检测。

## 2 脉冲红外热波理论

脉冲红外热波技术实验原理如图1所示,两个高能脉冲闪光灯用于瞬时加热被测试件表面,试件

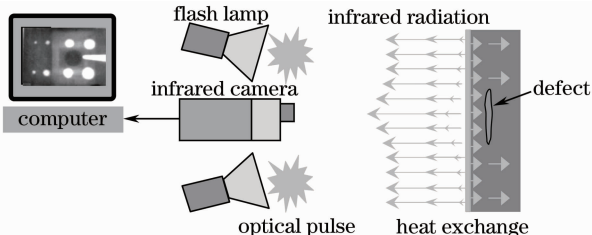


图1 脉冲红外热波实验装置图

Fig. 1 Experimental setup of pulsed thermography

表面吸热而升温,热量由表面向内部传导,从而引起表面温度的降低。当试件内部有缺陷或结构异常时,将以对应表面温场异常形式表现出来。一个红外热像仪用于记录试件表面降温过程,通过对热波降温序列进行处理和分析,可实现被测试件内部缺陷的定性和定量测量。对半无穷大均匀介质,受平行于介质表面的均匀脉冲平面热源作用时,热传导方程可简化为<sup>[5]</sup>

$$k \frac{\partial^2 T(x,t)}{\partial x^2} - \rho c \frac{\partial T(x,t)}{\partial t} = -q\delta(t)\delta(x) \Big|_{x=0, t=0} \quad (1)$$

式中  $T(x,t)$  是  $t$  时刻  $x$  处的温度,  $q\delta(t)\delta(x)$  是脉冲热源函数,  $q$  为常数,是在单位面积上施加的热量,  $k[\text{W}/(\text{m}\cdot\text{K})]$  是热传导率。密度  $\rho(\text{kg}/\text{m}^3)$  与比热  $c$  的乘积是介质材料的体热容。热扩散系数为  $\alpha = k/(\rho c)$ 。对某一特定介质,一般情况下  $\alpha$  可视为常数。

当被测试件无缺陷时,热传导方程的解为

$$\Delta T(0,t) = \frac{q}{e\sqrt{\pi t}} \quad (2)$$

式中  $e$  为被测件的蓄热系数。当物体表面下有缺陷或者被测件较薄时,热传导方程的解为

$$\Delta T(0,t) = \frac{q}{e\sqrt{\pi t}} \left[ 1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(\frac{-n^2 d^2}{at}\right) \right] \quad (3)$$

式中  $n$  为脉冲传播到两种材料界面发生的  $n$  次反射,  $d$  为被测件厚度(或缺陷深度),  $R$  定义为

$$R = \frac{e_1 - e_2}{e_1 + e_2} \quad (4)$$

式中  $e_1$  和  $e_2$  分别为被测试件(瓷体)和缺陷的蓄热系数。当试件内部含有不同类型缺陷时,缺陷具有不同的蓄热系数,该蓄热系数通过参数  $R$  反应到试件表面的降温过程。通过对热波降温序列的分析和研究,可确定内部所含缺陷的热特性,从而确定缺陷类型。

## 3 实验结果

被测瓷绝缘子直径为255 mm,脉冲红外热波技术一次能检测1/3的区域。图2为脉冲红外热波技术检测瓷绝缘子的原始热图,这幅图像中黑色为背景,绝缘子区域由于吸热温度高于背景而在灰度图中具有较大灰度值。但是,这幅图像中绝缘子区域没有任何热异常区域。这是由于所检测绝缘子表面为半圆形,且表面离闪光灯激励源距离不一样,如

图2中所示,图2中下部分离闪光灯源较近,而上部分则离闪光灯源较远;同时绝缘子表面光滑,有一定热反射,造成对绝缘子表面加热不均。为了消除表面加热不均的影响,对原始热图进行微分处理观察其表面降温速率<sup>[10]</sup>,绝缘子内部缺陷信息将以更好对比度显现出来。

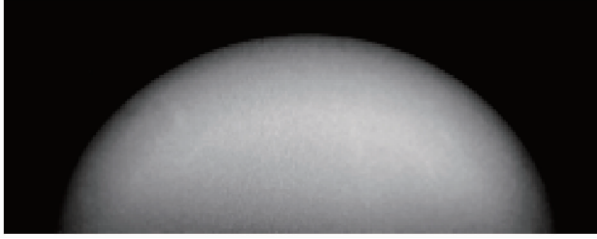


图2 绝缘子红外热波检测原始图像

Fig. 2 Original pulsed thermographic image of ceramic insulator

### 3.1 内部气孔检测

当被测绝缘子内部含有气孔时,其模型可以用

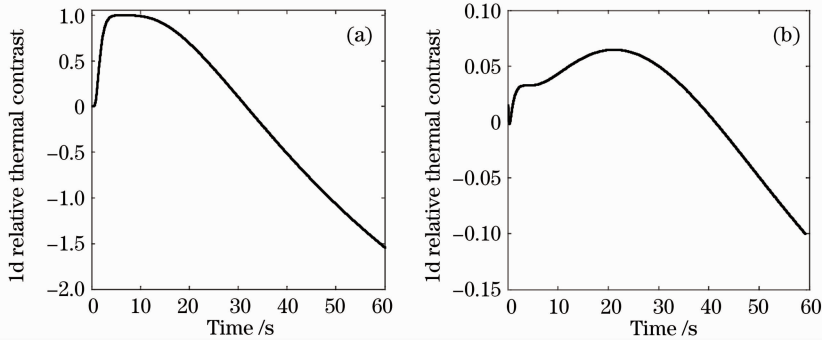


图3 气孔和无缺陷的一阶微分热对比度。(a)理论模拟;(b)实验结果

Fig. 3 First-order devivative thermal contrast of holes and non-defect area. (a) Theoretical simulation; (b) experimental result

图4中比较了3个不同时刻的绝缘子一阶微分红外热图:0.3,15.215和50.851 s。在较早时刻(0.3 s),内部气孔和无缺陷区域的降温是一样的,因而,这个时候气孔还未显示出热异常。在15.215 s时,绝缘子内部的气孔缺陷开始表现出热异常,并且相对于无缺陷区域为亮区域(图中以白圈标出)。50.851 s时绝缘子内部气孔缺陷相对无缺陷区域图像对比度不是很好,这是由于三维热扩散的影响。提取图3(b)中缺陷处对应热波降温数据,并选择一个无缺陷区域并提取其热波降温数据。对这两组数据处理后,获得其一阶微分热对比度,其结果显示在图3(b)中。从图3(a)和(b)比较可以看出,理论模拟和实验结果基本一致,从而可以判断所检测到的缺陷为气孔类缺陷。在实际应用中,可根据一阶微分热图中热异常区域的灰度由亮到暗的反转变化来

图1中平板试件近似模拟,缺陷为空气介质。空气孔对应绝缘子表面降温过程可以用(3)式近似表达,无缺陷区域降温过程可以用(2)式近似表达。分别对(2)和(3)式进行一阶微分处理,并定义一阶微分相对热对比度 $C$ 为

$$C(t) = \frac{\Delta T'_d - \Delta T'_n}{\Delta T'_n} = 2 \sum_{n=1}^{\infty} R^n \exp\left(-\frac{n^2 L^2}{\alpha t}\right) \left(1 - \frac{2n^2 L^2}{\alpha t}\right), \quad (5)$$

式中 $\Delta T'_d$ 和 $\Delta T'_n$ 分别为缺陷和非缺陷区域的降温一阶微分, $R$ 为绝缘子本体材料与空气界面的反射系数,可以用(1)式近似模拟。 $\alpha$ 为绝缘子本体的热扩散系数, $L$ 为空气孔距绝缘子表面深度。图3(a)为(5)式的模拟结果,从图中可以看出,在热波检测的开始阶段,气孔类缺陷应该相对无缺陷区域为较亮区域。到一定时间后,图像灰度发生反转,气孔类缺陷由亮变暗。

分析其缺陷性质。且从(5)式中还可以看出,该反转时刻即(5)式等于零时刻反应了缺陷的深度信息。

### 3.2 夹杂检测

对另外一个瓷绝缘子进行红外热波实验,发现了近表模拟夹杂或材质不均缺陷。图5显示了两个不同时刻一阶微分热图,分别对应1.268 s和35.57 s。图5(a)中用两个白圈标记了两个黑色区域,提取其中一个黑色区域以及一个无缺陷区域的热波降温数据进行处理,图6比较了所提取数据的对数温度-对数时间一阶微分曲线。从图5(a)和图6可以看出,在较早时间有两个地方体现为较暗区域,意味着这两个区域降温速率较快。而在图5(b)所示的较晚时间段,这两个区域变亮,出现了温度变化率的反转。参考图6可以发现,较晚时间段变亮说明其温度变化率较正常区域更小。这说

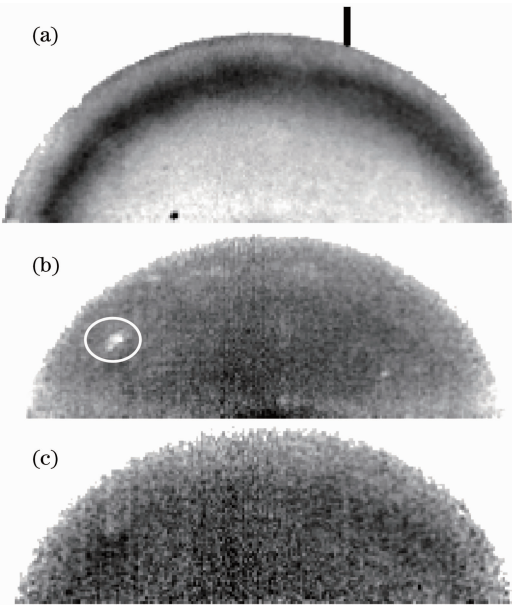


图 4 绝缘子一阶微分热图。(a) 0.3 s;(b) 15.215 s;  
(c)50.851 s

Fig. 4 First-order derivative thermographic images of the insulator. (a) 0.3 s; (b) 15.215 s; (c) 50.851 s

明夹杂位置的材质其对应蓄热系数较大或者其热扩散系数较大,因而表现为早期降温快,且其变化率差异在很早时间就体现出来,说明该异常区域位于绝缘子近表。而较晚时间段时,由于缺陷区域早期降温快,因而其温度低于无缺陷区域,由于三维热扩散效应,无缺陷区域热量除了向深度方向传导外,还将向周围扩散。缺陷区域在较晚时间段在降温同时吸收了由无缺陷区域传导的热量,因而导致其降温速率变小,表现为较亮区域。

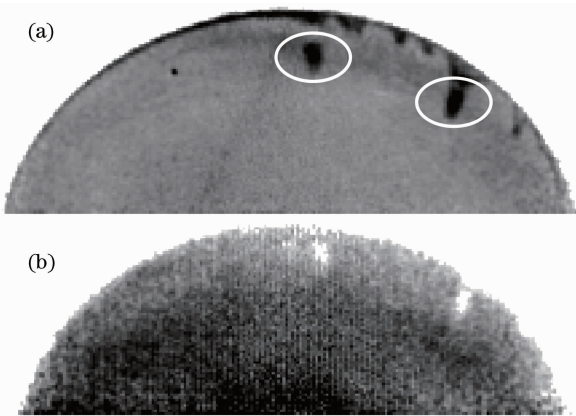


图 5 绝缘子一阶微分热图。(a) 1.268 s;(b) 35.57 s

Fig. 5 First-order derivative thermographic images of the insulator. (a) 1.268 s; (b) 35.57 s

出现近表夹杂或材质不均时,其热传导模型不能用图 1 来近似表示。由于绝缘子以及夹杂物质的热扩散系数、蓄热系数,以及夹杂区域的三维几何尺

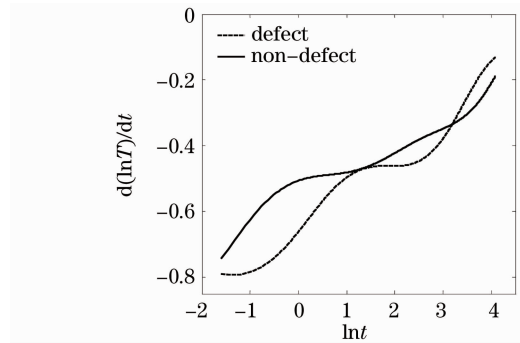


图 6 绝缘子拟似夹杂缺陷和无缺陷区域对数温度-对数时间一阶微分曲线

Fig. 6 First-order derivative of  $\ln T - \ln t$  curves of impurities and non-defect areas in ceramic insulator

寸未知,同时由于绝缘子表面还有上釉等处理而带来几层较薄界面。以上原因导致对于表面夹杂或材质不均时的理论模拟较复杂,还有待深入研究。

### 3.3 内部气孔和夹杂缺陷判读

内部气孔和夹杂类缺陷是瓷绝缘子的两种常见缺陷,3.1 和 3.2 分析了这两类缺陷的一阶微分热图。对于内部气孔类缺陷,在一阶微分热图上表现为先亮后暗,且由亮变暗的时间决定于缺陷深度。而对于本文所分析的近表夹杂缺陷,其一阶微分热图表现为先暗后亮,与内部气孔类缺陷刚好相反。但是夹杂类缺陷的热图及明暗变化时间不仅与夹杂物的热特性和缺陷深度有关,还与其几何尺寸有关。

## 4 结 论

采用主动式脉冲红外热波技术作为实验手段对瓷绝缘子进行检测,通过对一维热传导模型的研究和模拟,以及分析实验数据的一阶微分热对比度,实现了瓷绝缘子内部气孔以及近表夹杂或材质不均的检测。由于瓷绝缘子种类繁多,其可能含有的缺陷类型也不仅限于本文所检测的气孔和夹杂。因而,还需要针对不同应用进行不同热激励方式的选择,并进行深入的理论和数据分析方法研究。

### 参 考 文 献

- Ding Jie, Li Xiaohong, Chen Hanming. Failure character and non-destructive testing of insulators in service[J]. *Refrigeration Air Conditioning & Electric Power Machinery*, 2003, **24**(6): 64~66
- 丁杰, 李晓红, 陈汉明. 在役绝缘子失效特征与无损检测[J]. *制冷空调与电力机械*, 2003, **24**(6): 64~66
- Wang Xue, Zhang Guanjun, Yan Zhang. Discussion on the methods of on-line insulators monitoring in china[J]. *Insulators and Surge Arresters*, 2002, (6): 3~5
- 王雪, 张冠军, 严璋. 国内高压绝缘子在线检测方法综述[J]. *电瓷避雷器*, 2002, (6): 3~5

- 3 Yan Bin, Ding Hui. Analysis of strut porcelain insulator's rupturing and invalidity[J]. *Qinghai Electric Power*, 2003, (1): 1~6  
闫斌, 丁辉. 支柱瓷绝缘子断裂失效分析[J]. 青海电力, 2003, (1): 1~6
- 4 Ye Gengfu, Zhou Ming, Li Gengyin. Comparison on online detecting methods of insulator[J]. *Electric Power Science and Engineering*, 2007, **23**(3): 37~40  
叶根富, 周明, 李庚银. 绝缘子在线检测方法的比较[J]. 电力科学与工程, 2007, **23**(3): 37~40
- 5 Maldague X. . Nondestructive Evaluation of Materials by Infrared Thermography[M]. New York: Springer, 1993
- 6 Favro L. D. , Han X. , Wang Y. *et al.* . Pulse-echo thermal wave imaging[J]. *Rev. Prog. in Quant. Nondestr. Eval.* , 1995, **14**: 425~429
- 7 Favro L. D. , Han X, Kuo P. K. *et al.* . Imaging the early time behavior of reflected thermal wave pulses [ C ]. SPIE, Thermosense XVII, 1995, **2473**: 162~166
- 8 Han X. , Favro L. D. , Kuo P. K. *et al.* . Early-time pulse-echo thermal wave imaging[J]. *Rev. Prog. Quant. Nondestr. Eval.* , 1996, **15**: 519~524
- 9 Xiaoyan Han, L. D. Favro, R. L. Thomas. Thermal wave NDI of disbonds and corrosion in aircraft[C]. Second Joint NASA/FAA/DOD Conference on Aging Aircraft, 1998, NASA/CP-1999-208982, **1**: 265~274
- 10 Shepard S. M. , Lhota J. R. , Rubadeux B. A. *et al.* . Reconstruction and enhancement of active thermographic image sequences[J]. *Opt. Engng.* , 2003, **42**(5): 1337~1342
- 11 Tian Zhihai. Thermal wave detection of inner insulation defect [J]. *Laser and Infrared* , 1996, **26**(2): 92~94  
田志海. 内部电绝缘缺陷的红外热像检测诊断[J]. 激光与红外, 1996, **26**(2): 92~94
- 12 Wang Zulin, Huang Tao. On-line inspection of defective composite insulators by infrared temperature measurement[J]. 2003, **27**(2): 17~20  
王祖林, 黄涛. 合成绝缘子故障的红外热像在线检测[J]. 电网技术, 2003, **27**(2): 17~20

栏目编辑:李文喆