

太赫兹激励的红外热波检测技术*

陈大鹏^{1)†} 邢春飞²⁾ 张峥¹⁾ 张存林²⁾

1)(北京航空航天大学材料科学与工程学院, 北京 100191)

2)(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、太赫兹光电子学教育部重点实验室, 北京 100048)

(2010年11月25日收到; 2011年4月21日收到修改稿)

本文的目的在于探索一种新的适用于红外热波检测技术的热激励方式——太赫兹 (THz) 热激励. 文中介绍了 THz 波周期性热激励的热传导理论模型; 尝试利用返波振荡器 (返波管 backward wave oscillator, BWO) 太赫兹源对一块碳纤维基底吸波涂层板进行周期性 THz 热激励, 红外热像仪连续观测和记录试件表面温场变化, Canny 边缘算法处理热图像显示缺陷; 检测结果与闪光灯脉冲激励的结果进行比较, 讨论了太赫兹波激励红外热波检测技术可能的优势. 实现了 THz 技术与红外热波无损检测技术的结合.

关键词: 红外热成像, 太赫兹激励, 返波振荡器, 无损检测

PACS: 42.30.-d

1 引言

红外热波无损检测技术是通过各种热激励方式主动对物体施加可控热激励, 使物体内部的异性结构 (异物、分层、脱黏等) 以表面温场变化的差异形式表现出来^[1,2]. 近几年来, 随着航空航天复合材料技术以及新材料技术的迅速发展, 红外热波成像方法在先进新型复合材料缺陷和损伤的检测和评估中具有其他方法无法比拟的综合优势^[3,4], 但随着检测领域的扩大, 传统的热激励方式 (闪光灯、超声、涡流等) 并不能满足所有材料的检测. 高能闪光灯热激励具有快速、非接触的优点, 但会对光敏感材料造成二次污染^[5]; 超声热激励是利用超声能量引起缺陷部位摩擦生热来达到检测的目的, 尤其适合于闭合裂纹的检测, 但激励过程中需要超声枪头与试件接触, 在一定的压力下将振动能量耦合进试件, 不适于检测一些易碎的材料^[6]; 涡流红外热成像只适用于导电材料的检测^[7]. 因此, 发展新的无损的热激励方式对推动红外热波无损检测技术的广泛应用具有深远意义.

太赫兹 (Terahertz 或 THz, $1 \text{ THz} = 10^{12} \text{ Hz}$) 波通常指的是频率在 0.1—10 THz 范围内的电磁辐射. 其单光子能量低, 1 THz 对应的能量只有 4.1 meV, 不会导致生物组织电离, 理论上在对某些表面薄膜, 导热性能好的材料或微观结构的检测有一定的优

势. 返波振荡器 (返波管, backward wave oscillator, BWO) 太赫兹源是一种连续波太赫兹辐射源, 它是利用电子束与梳形减速结构相互作用产生返波振荡的微波电子管, 目前只有返波振荡器和自由电子激光器在 0.1 THz 以上具有宽带调谐和大功率输出的能力. 返波管 (BWO) 作为太赫兹辐射源, 具有独特的优势, 如输出功率高、波前性质良好、稳定性好, 而且体积小、操作简便、光路组成较为简单等^[8-11].

本文尝试利用返波管 (BWO) 太赫兹辐射源作为热激励源, 对预埋人工缺陷的碳纤维基底吸波涂层材料进行频率为 0.1 THz 的周期性热激励, 红外热像仪实时探测试件表面温场的变化, Canny 边缘算法处理热图像显示缺陷. 检测结果与闪光灯脉冲激励的结果进行比较, 分析 THz 激励红外热波技术可能的优势.

2 THz 周期性热激励红外热波检测原理

2.1 返波管产生太赫兹波原理

图 1 为返波管产生太赫兹示意图. 返波管 (BWO) 内存在强磁场、热阴极、阳极、梳形减速结构以及耦合波导. 由热阴极发射出电子, 电子在强磁场中受洛伦兹力作用聚焦. 聚焦后的电

* 国家自然科学基金民航联合基金 (批准号: 61079020) 资助的课题.

† E-mail: pp.2002@163.com

子经过梳型减速结构速度下降,最后到达阳极. 电子速度的改变会辐射出电磁波,其方向与电子运动方向相反. 电磁波与波导耦合以输出到自由空间. 输出频率取决于电子的速度,控制范围在 (0.05—1.5 THz), 电子的速度由加载在电极间的电压决定 [12,13].

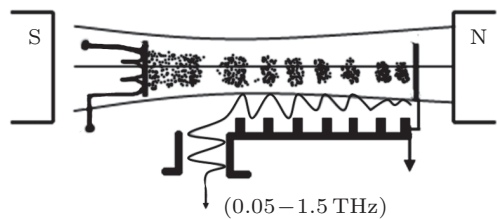


图 1 返波管产生太赫兹示意图

返波管产生的 THz 波通过聚乙烯透镜聚焦在吸波涂层试件表面,吸波涂层吸收 THz 能量形成表面热源,热量以热波的形式向试件内部传递. 控制返波管周期性的输出 THz,焦点处的热量随之周期性的变化,试件内部缺陷处与非缺陷处会有不同的热波响应.

2.2 周期性热激励红外热波检测理论模型

热传导方程为 [14]

$$\nabla \cdot [\kappa \nabla T(\mathbf{r}, t)] - \rho c_v \frac{\partial T(\mathbf{r}, t)}{\partial t} = -f(\mathbf{r}, t), \quad (1)$$

$T(\mathbf{r}, t)$ 是位于 \mathbf{r} 处 t 时刻的温度, $f(\mathbf{r}, t)$ 是热源方程, $\kappa(\text{W/m}\cdot\text{K})$ 是热传导率. 密度 $\rho(\text{kg/m}^3)$ 与比热 c_v 的乘积是体热容, 热传导率 κ 与体热容的比值定义为热扩散系数 $\alpha(\text{m}^2/\text{s})$, 即

$$\alpha = \frac{\kappa}{\rho c_v}, \quad (2)$$

解方程 (1) 要满足两个边界条件, 即边界温度连续条件 $T_1 = T_2$, 和边界能量守恒条件:

$$\kappa_1 \nabla T_1 \cdot \mathbf{n} = \kappa_2 \nabla T_2 \cdot \mathbf{n}. \quad (3)$$

只讨论一维热传导, 并假定被检测表面无热损失, 边界方程 (2) 可简化为

$$\left[\frac{\partial T(x, t)}{\partial x} \right]_{x=0}^{x=d} = 0. \quad (4)$$

对于单一频率的周期热源, 方程 (1) 中 $f(\mathbf{r}, t)$ 可以写为

$$f(\mathbf{r}, t) = f(\mathbf{r}) e^{-i\omega t}, \quad (5)$$

被检测物表面温度 $T(\mathbf{r}, t)$ 也具有相同的形式. 因此, 方程 (1) 简化为

$$\nabla^2 T(\mathbf{r}) - q^2 T(\mathbf{r}) = -f(\mathbf{r}), \quad (6)$$

其中 q 定义为

$$q = \sqrt{\frac{i\omega}{\alpha}} = (1 + i) \sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}}. \quad (7)$$

进一步假定热源是只作用于半无限大物体表面即 $x = 0$ 处的正弦平面热源, 那么方程 (6) 的解为

$$T(x) = T_0 e^{i(qx - \omega t)}. \quad (8)$$

温度分布函数为其实数部分

$$T(x) = T_0 \cos \left[\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x - \omega t \right] e^{-\sqrt{\frac{\omega}{2\alpha}} x}. \quad (9)$$

可以视为两部分, 一部分是余弦波, 波长为

$$\lambda = 2\pi \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}. \quad (10)$$

速率为

$$v = \sqrt{2\alpha\omega}. \quad (11)$$

另一部分为指数衰减部分, 当热波在介质中传播时以指数形式快速衰减, 热扩散深度 μ 定义为热波振幅降为原来的 $1/e$ 时穿透的距离, 因此,

$$\mu = \sqrt{\frac{2\alpha}{\omega}}. \quad (12)$$

(10),(11),(12) 式说明在单一频率周期热波在给定介质中的传播时, 热波频率越高, 传播越快, 强度衰减也越快, 穿透深度越小. 因此, 在实际检测中, 应该根据缺陷深度, 选择合适的热激励频率, 使热激励能够引起缺陷处的频率响应, 达到检测的目的 [15].

正弦热源的理论模型较为简单, 但在实际检测实验中较难实现, 通常采用方波代替.

2.3 检测系统搭建原理

检测系统搭建示意图如图 2 所示, 用 BWO 系统作为 THz 热激励源, 由于产生 THz 功率小, 用聚乙烯透镜对 THz 波聚焦, 对试件表面缺陷处和非缺陷处分别进行周期性热激励, 比较检测结果, 可以实现对物体内部缺陷进行定性的检测及评估.

3 THz 激励红外热成像检测系统

该实验系统主要由三部分组成:THz 波产生系统, THz 波热激励系统, 红外热波成像系统.

反射式 BWO 成像系统采用 550—710 GHz 返波振荡器源. 光束从返波振荡器出射, 先经频率为 10 Hz 的斩波器调制, 然后通过硅片, 被焦距为 20 cm、直径为 30 cm 的聚乙烯透镜聚焦到试件上, 从而实现对试件的热激励. 红外热像仪是制冷型热像仪, 温度分辨率为 0.02 K, 图像大小为 320×240 像素, 敏感波段为 3.7—4.8 μm, 采集频率与采集时间可以实时调整. 系统设备实物照片如图 3 所示.

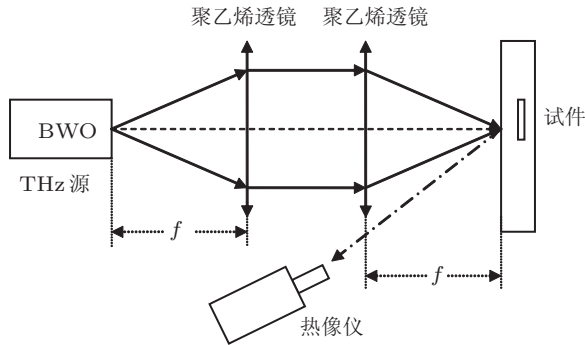


图 2 THz 热激励的红外热波检测系统

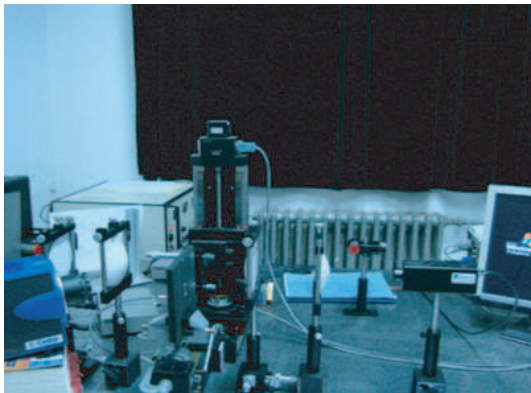


图 3 系统设备照片

4 实验

4.1 试件介绍

试件为碳纤维复合材料基底涂覆吸波涂层, 如图 4 所示, 该涂层中含有大量的空心微球. 空心微球是一种独特而性能稳定的中空微粒材料, 由于具有颗粒细、中空、质轻、高强、耐磨、耐高温、保温绝热、绝缘阻燃等多种性能, 常作为复合材料的填料, 在建材、冶金、航空航天、机械、物理、

化学、电绝缘及军事等领域广泛应用. 空心微球自身并不具有吸波特性, 却是制备吸波材料的良好基材. 涂层下埋有人工缺陷. 试件尺寸和基底、涂层厚度见表 1.

表 1 碳纤维基底吸波涂层试件尺寸、基底厚度和各涂层台阶厚度值

尺寸/cm ²	基底/mm	涂层厚度		
		台阶 1/mm	台阶 2/mm	台阶 3/mm
15 × 14	12	0.2	1.2	2.2

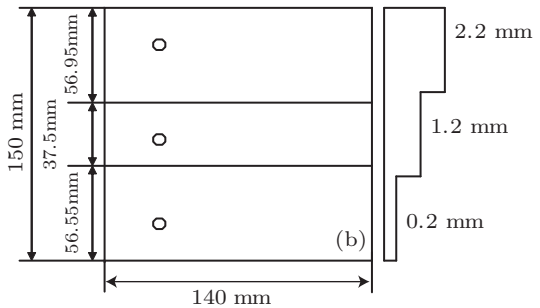
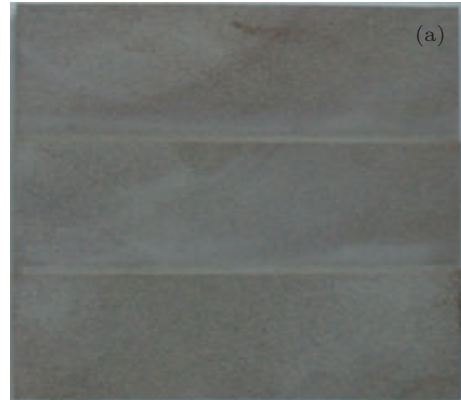


图 4 碳纤维基底吸波涂层试件 (a) 实物图; (b) 结构图

4.2 实验结果及分析

返波管 (BWO) 采用 QSI-370 型号发射源, 最大发射功率为 17 mW, 把试件置于太赫兹波焦点处, 对其进行频率为 0.1 Hz 的周期性热激励.

由于一次检测面积小, 选取对人工缺陷位置处和非缺陷处分别进行 THz 热激励, 比较实验结果.

首先, 对 0.2 mm 厚涂层进行检测. 为了便于比较缺陷位置处和非缺陷位置处热信号, 选取太赫兹热激励时间相同的两幅减背景热图像, 如图 5 所示. 从图 (a) 非缺陷处和 (b) 缺陷处的热图像可以看出, 在 THz 激励下, 缺陷处的热信号的信噪比要高于非缺陷位置, 说明缺陷处的热扩散系数小, 对热量的反射高于非缺陷区域.

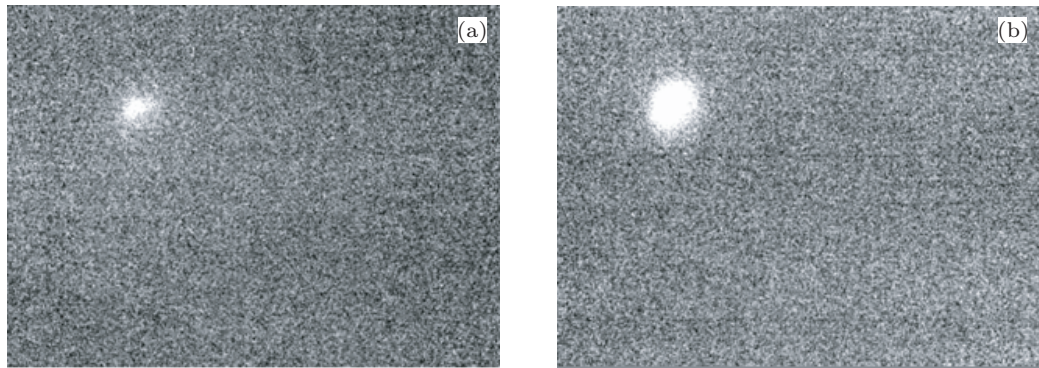


图 5 17 mW THz 激励减背景热图 (a) 非缺陷处; (b) 缺陷处

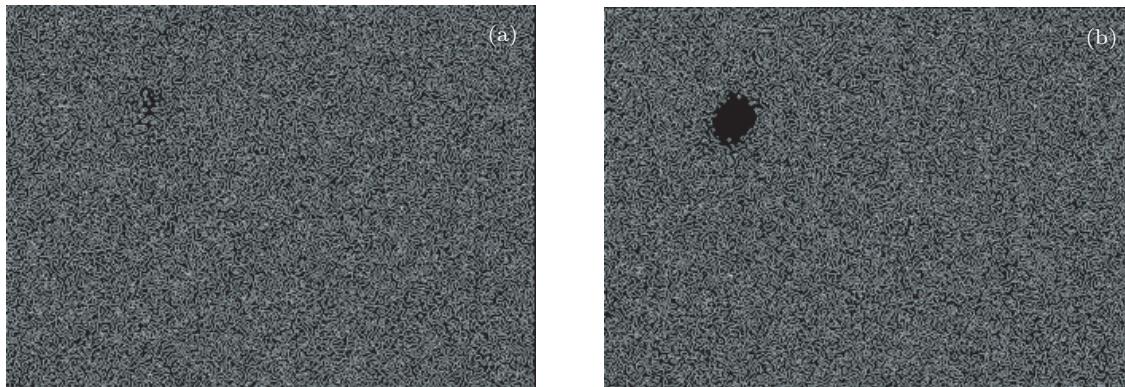


图 6 Canny 算法处理后热图 (a) 非缺陷处; (b) 缺陷处

对实验结果做进一步处理, 面型缺陷的检测, 主要是测得缺陷的边缘, 从而判断缺陷的大小、位置等信息. 利用 Canny 边缘算子滤波, 处理热图像. 该算法根据对信噪比与定位乘积进行测度, 得到最优化逼近算子.

Canny 边缘检测算法过程包括:

- 1) 用高斯滤波器平滑图像;
- 2) 用一阶偏导的有限差分来计算梯度的幅值和方向;
- 3) 对梯度幅值进行非极大值抑制;
- 4) 用双阈值算法检测和连接边缘.

采用 matlab 工具, 实现 Canny 算子滤波后得到的热图如图 6 所示, 可以看到处理后的热图像缺陷处与非缺陷处存在明显差别, 说明对于周期性 THz 热激励, 缺陷位置有不同于非缺陷位置的热波响应.

上述是对 0.2 mm 厚涂层下缺陷的检测结果分析. 检测结果说明, 太赫兹波作为热激励源对 0.2 mm 厚吸波涂层下缺陷进行红外热成像检测具有一定的可行性.

对 1.2 mm, 2.2 mm 厚涂层下缺陷的检测没有发现热异常.

4.3 与闪光灯脉冲激励检测结果进行比较

图 7 为对试件进行闪光灯脉冲激励 1.2 s 后得到的热图像, 实验所用的闪光灯能量为 9.6 kJ, 脉冲宽度为 2 ms.

从闪光灯脉冲激励的检测结果中可以看到, 三个不同涂层厚度 (0.2 mm, 1.2 mm 和 2.2 mm) 的基底缺陷都显现了出来, 其中, 0.2 mm 厚涂层下缺陷的边缘轮廓最为清晰, 2.2 mm 厚涂层下缺陷由于热扩散, 边缘较为模糊. 而太赫兹激励热波检测, 由于受功率的限制, 没有检出厚 1.2 mm, 2.2 mm 的涂层下缺陷.

4.4 讨论

太赫兹波作为热激励源对碳纤维基底涂覆吸波涂层下缺陷的初步检测结果说明, 配合有效的图像处理手段, 太赫兹激励热波技术能够检出 0.2 mm 厚的涂层下缺陷, 由于功率的限制, 未能检出较厚涂层下的缺陷. 在检测能力上, 与技术较为成熟的闪光灯脉冲激励相比还有很大的差距. 但随着 THz 技术的发展, THz 发射源的改进, 以其作为热源的红外热波技术也将进一步提高. 理论上用 THz 作为

热激励源, 有如下优势:

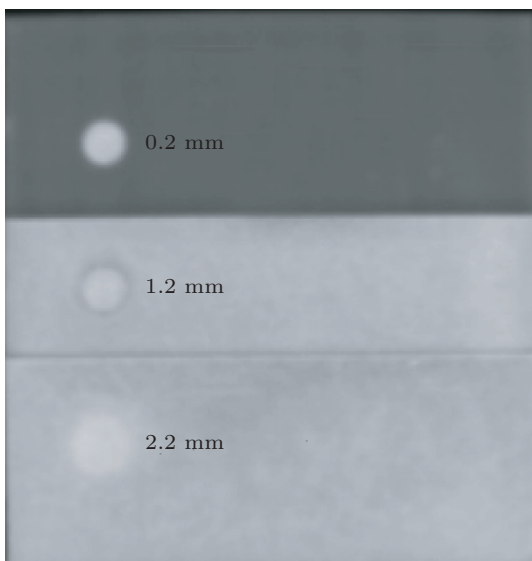


图 7 闪光灯脉冲激励热图像

1) 表面薄膜的红外热波检测, 如果表面加热能量过高, 会将其烧毁而破坏被检测件. 而 THz 的小能量在不损坏被检测件的前提下能有效检测出表面或内部缺陷.

2) 在检测某些对可见光敏感的材料时, 用 THz 热激励能够避免对试件造成二次污染.

3) 可见光激励的脉冲宽度宽, 为毫秒量级, 离表面很近的结构信息往往由于脉宽太宽而被掩埋掉. 而 THz 脉冲宽度窄, 为皮秒量级, 如用大功率太赫兹脉冲热激励, 窄脉冲能够为探测近表面结构信息提供可能 (如较薄涂层的厚度测量).

5 结论

本文尝试利用返波振荡器 (返波管, BWO) 太赫兹源, 对一块预埋缺陷的碳纤维基底吸波涂层板进行周期性太赫兹波热激励, 红外热像仪连续观测和记录试件表面的温场变化, Canny 边缘算法处理热图像, 成功检出 0.2 mm 厚度涂层下的缺陷, 初步实验验证了 THz 红外热波检测技术的可行性. 但由于太赫兹源功率的限制, 没能检出厚 1.2 mm, 2.2 mm 涂层下缺陷, 检测能力与相对成熟的闪光灯脉冲激励相比有一定的差距. 但随着 THz 技术的快速发展, THz 源功率的不断提高, 热激励效率和检测能力也会有所改善, 其独特的优势必能拓宽红外热波无损检测技术的应用范围.

- [1] Favro L D, Han X Y, Wang Y X 1995 *QNDE* **14A** 425
- [2] Pickering S, Almond D 2008 *NDT & E International* **41** 501
- [3] Gasparyan S H, Andrianopoulos N P 2005 *Appl. Compos. Mater.* **12** 65
- [4] Favro L D, Kuo P K, Thomas R L 1994 *QNDE* **13A** 395
- [5] Avdelidisa N P, Almond D P 2004 *Prog. Aerosp. Sci.* **40** 143
- [6] Favro L D, Han X Y, Ouyang Z 2001 *Int. J. Fatigue* **23** 471
- [7] Zenzinger G, Bamberg J, Satzger W, Carl V 2007 *NDT & E International* **22** 101
- [8] Zhang C L, Zhang Y, Zhao G Z 2008 *Terahertz Sensing and Imaging* (Beijing: National Defense Industry Press) p22 (in Chinese) [张存林, 张岩, 赵国忠 2008 太赫兹感测与成像 (北京: 国防工业出版社) 第 22 页]
- [9] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima N 2004 *Appl. Opt.* **43** 5637
- [10] Sheng J L, Zhang C L, Hu Y 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 2212 (in Chinese) [沈京玲, 张存林, 胡颖 2004 物理学报 **53** 2212]
- [11] Chen M, Xiao T Q, Xu H J 2003 *Acta Phys. Sin.* **52** 2807 (in Chinese) [陈敏, 肖体乔, 徐洪杰 2003 物理学报 **52** 2807]
- [12] Ge X H, Lv M, Zhong H, Zhang C L 2010 *Infrared Millim. Waves* **29** 15 (in Chinese) [葛新浩, 吕默, 钟华, 张存林 2010 红外与毫米波学报 **29** 15]
- [13] Meng T H, Zhao G Z, Zhang C L 2008 *Acta Phys. Sin.* **57** 3846 (in Chinese) [孟田华, 赵国忠, 张存林 2008 物理学报 **57** 3846]
- [14] Zhang H J 1992 *Heat Conduction* (Beijing: Higher Education Press) p15 (in Chinese) [张洪济 1992 热传导 (北京: 高等教育出版社) 第 15 页]
- [15] Breitenstein O, Langenkamp M 2003 *Lock-in Thermography* (Germany: Springer) p24–30

Terahertz thermal wave nondestructive test*

Chen Da-Peng^{1)†} Xing Chun-Fei²⁾ Zhang Zheng¹⁾ Zhang Cun-Lin²⁾

1) (*School of Material Science and Engineering, Beihang University, Beijing 100191 China*)

2) (*Beijing Key Laboratory for Terahertz Spectroscopy and Imaging, Key Laboratory of Terahertz Optoelectronics, Ministry of Education, Department of Physics, Capital Normal University, Beijing 100048, China*)

(Received 25 November 2010; revised manuscript received 21 April 2011)

Abstract

This work aims at developing a new excitation method for thermal wave nondestructive test(NDT)-Terahertz excitation. In the paper we introduce a theoretical model of heat conduction for periodical THz excitation. BWO (backward wave oscillator) terahertz source is employed to heat a carbon fiber plate with wave absorbing coating, surface temperature variations and distributions are captured by an infrared camera, and Canny edge algorithm is used to process thermal images to show the defects. Result of flash pulse thermography serves as comparison, and the advantages of THz thermal wave NDT are discussed. The combination of THz technology and infrared thermal wave NDT is realized.

Keywords: thermal wave imaging, THz excitation, backward wave oscillator (BWO), nondestructive testing

PACS: 42.30.-d

* Project supported by the Civi Aviation Joint Funds of the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61079020).

† E-mail: pp.2002@163.com