

基于连续太赫兹波的航天复合材料粘接缺陷检测

潘 钊^{1,2} 郑晓康^{1,2*} 王玉田^{1,2} 温银堂³

¹燕山大学仪器科学工程系, 河北 秦皇岛 066004; ²燕山大学河北省测试计量技术重点实验室, 河北 秦皇岛 066004

³燕山大学国防科学技术学院, 河北 秦皇岛 066004

摘要 研究了连续太赫兹波技术在航天隔热复合材料粘接缺陷无损检测领域的应用。使用环氧树脂作为粘接剂, 制作了隔热复合材料与金属基板的粘接样件。采用频率范围为 0.23~0.32 THz 的反射式调频连续太赫兹波检测系统, 对粘接层进行检测。使太赫兹探头聚焦在粘接层处, 获得层析图像。根据焦平面下 0, 1, 2 mm 处的灰度图像, 判断出粘接面的缺陷大小、形状和位置, 并用自适应 Canny 算子边缘检测法对所得图像进行处理。实验与分析表明, 应用连续太赫兹成像方法, 结合适当的图像检测技术, 可以实现对隔热复合材料与粘接基板之间粘接缺陷的无损检测。

关键词 太赫兹成像; 无损检测; 复合材料; 粘接缺陷

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201535.s111003

Nondestructive Testing for Bonding Defects in Aerospace Composite Based on Continuous Terahertz Wave

Pan Zhao^{1,2} Zheng Xiaokang^{1,2} Wang Yutian^{1,2} Wen Yintang³

¹Department of Instrumentation Science and Engineering, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

²Measurement Technology and Instrumentation Key Laboratory of Hebei Province, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

³College of National Defense Science and Technology, Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei 066004, China

Abstract This paper studies the applications of continuous terahertz wave in nondestructive testing for bonding defects in aerospace thermal insulation composite. Aerospace thermal insulation composite and metal substrates are bonded by epoxy resin adhesive as the experimental sample. The adhesive interface is tested by the reflection type frequency modulated continuous terahertz wave testing system and the frequency range is 0.23~0.32 THz. Tomographic images are obtained by making the terahertz probe focus on the adhesive interface. The size, shape and position of the defect can be judged by the gray value of images which at 0, 1 and 2 mm below the focal plane. In the imaging processing, edge detection is managed with adaptive threshold Canny operator. The adhesive interface between metal substrates and aerospace thermal insulation composite can be tested by applying the method of continuous terahertz imaging and combined with proper image detection technique.

Key words terahertz imaging; nondestructive testing; composite; bonding defect

OCIS codes 110.6795; 110.2970; 060.2630

1 引 言

航天器通常需要长时间在大气中高速飞行, 机体表面气动加热会产生高温, 必须使用隔热材料阻止外部热量向内部传递来确保航天器的主体结构及仪器设备的安全^[1-2]。目前航天器表面热防护的主要方式为将陶瓷隔热瓦与陶瓷纤维隔热毡粘合到航天器的表面^[3-5]。在隔热材料的粘合过程中, 由于操作不当或粘合

收稿日期: 2015-01-25; 收到修改稿日期: 2015-03-10

基金项目: 国家自然科学基金(61403333)

作者简介: 潘 钊(1982-), 男, 博士, 讲师, 主要从事光电检测技术与仪器方面的研究。E-mail: panzh_zach@hotmail.com

* 通信联系人。E-mail: zhengxk9117@163.com

剂失效等原因,可能会出现粘接层中有气泡孔洞甚至大面积缺胶等情况,粘接缺陷会导致航天器局部隔热材料在高速飞行过程中脱落,破坏机体热防护结构,带来巨大风险乃至灾难性后果。因此对航天器隔热材料粘接质量和材料本身质量的检测显得尤为关键。

目前针对航天复合材料应用的主要检测方法包括:射线检测、涡流检测、超声波检测、红外检测等^[5-10]。但是对于复合材料粘接层的无损检测,由于需要将检测信号穿透波衰减强、绝缘并且具有隔热特性的层多孔隙结构复合材料,才能到达粘接层处,上述方法均不适用。在对材料和胶的特性进行分析后,采用基于连续太赫兹波的方法对隔热复合材料与机体的粘接层进行检测。

太赫兹波是对特定波段电磁波的统称,它在波谱中位于微波和红外辐射之间,其频率的范围为 $0.1 \sim 10 \text{ THz}$ ^[11-15]。金属这种极性材料对于太赫兹波属于不透明物质,不能透过,而对于太赫兹波能够透过的陶瓷、石墨、高分子复合材料、塑料、泡沫等非金属和非极性材料,可以对胶层存在的孔洞、掺渣、裂缝等清晰成像,实现无损检测。

本文利用华中科技大学武汉光电国家重点实验室中的 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统对已经人工植入粘接缺陷的航天复合隔热材料样件进行检测。对成像结果进行处理,有效地检测出粘接层的缺陷。

2 连续太赫兹系统

连续太赫兹成像系统是根据被测材料透射或反射的光强得到样品的太赫兹图像。隔热复合材料与粘接基板之间粘接层会对太赫兹波产生损耗,其粘接缺陷的边缘对太赫兹波的散射效应,会影响太赫兹波的强度分布,将强度信号线性量化成灰度图像,反映到物体的太赫兹图像上显示为明暗不同,据此可推出物体内部的形状、缺陷及边缘位置。

2.1 反射式成像原理

太赫兹反射式成像原理如图 1 所示。不同频率的太赫兹波被透镜会聚到材料的不同深度,太赫兹发射信号穿过材料与粘接层被金属基板反射后与发射信号进行混频,被探头接收。混频后得到的信号中含有目标的相对距离信息,探头一次二维扫描,可同时采集样件不同深度的二维太赫兹图像(获得二维图像为太赫兹波等光程面),有效实现太赫兹无损检测。

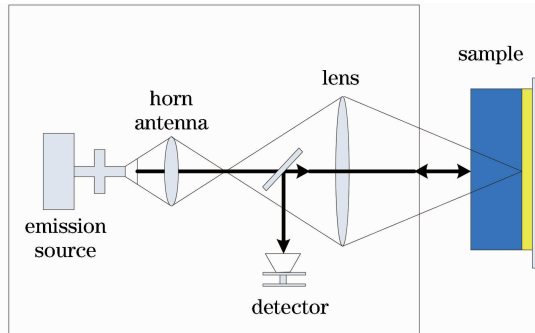


图 1 反射式连续太赫兹成像系统

Fig. 1 Reflection type continuous terahertz wave imaging system

回波时频曲线与锯齿波调制连续太赫兹发射曲线如图 2 所示。图中信号发射接收所用时间为 τ , 初始频率为 f_0 , 带宽为 B , 周期为 T , 调频斜率 $\mu = B/T$, 设太赫兹发射头到目标距离为 R , c 为波在空气中的传播速度, 则 $\tau = 2R/c$ 。

发射信号频率为

$$f_t = f_0 + \mu t, \quad (1)$$

反射信号频率为

$$f_r = f_t(t - \tau) = f_0 + \mu(t - \tau). \quad (2)$$

混频器的作用是使发射信号频率与反射信号频率相减得到中频信号, 表示为

$$f_{if} = |f_t - f_r| = \mu\tau = \frac{2B}{Tc}R, \quad (3)$$

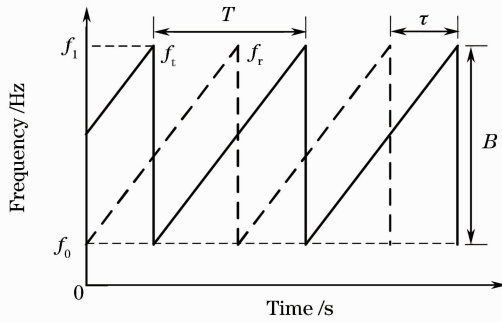


图 2 锯齿波调制连续太赫兹发射与回波时频曲线

Fig. 2 Emission and echo time-frequency curves of saw tooth modulation continuous terahertz

于是有

$$R = \frac{Tc}{2B} f_{if}. \quad (4)$$

由上述可知,调频带宽 B 和周期 T 固定,混频器中频信号输出 f_{if} 与到材料的距离 R 成正比,根据中频信号 f_{if} 可得出探头到材料的距离,中频信号的振幅反映了被测材料的折射率,通过混频器发出的差拍信号,即可实现目标材料的振幅与相位成像。锁相放大器将信号放大后交上位机,再由图像软件处理后,可显示 z 方向 $0 \sim 100$ mm 纵深范围内任一处样件的 x - y 二维截面太赫兹图像。

2.2 实验设计

实验设立相应的技术参数为:频率范围 $0.23 \sim 0.32$ THz;动态范围优于 50 dB;空间分辨率为 1 mm;每像素扫描时间小于 $250 \mu\text{s}$; x 方向采样精度为 1 mm, y 方向步进精度为 1 mm, z 方向可探测纵深 $0 \sim 100$ mm。

针对粘接层缺陷的检测,需人工将缺陷植入。实验中设计制作的样品如图 3 所示。

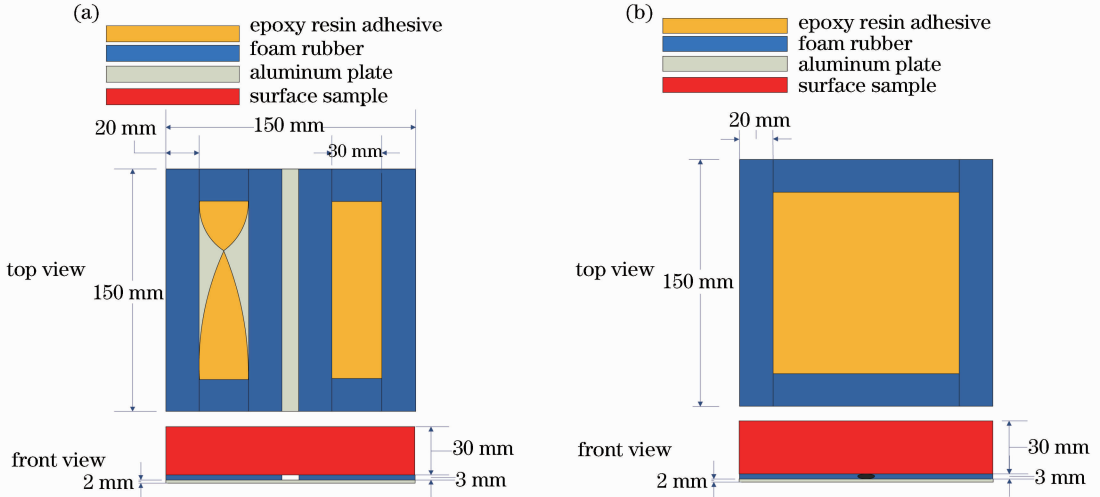


图 3 样品粘接层。(a) 样品 1; (b) 样品 2

Fig. 3 Bonding layer of the sample. (a) Sample 1; (b) sample 2

样品 1 用泡沫胶粘成结构如图 3(a) 所示的围栏形状,利用环氧树脂胶液填充围栏内部区域,左侧不完全填充,利用胶液流动形成如图示形状来模拟缺陷的缺陷,右侧则进行最大限度填充,使胶液尽量充满围栏内部区域,用于对比。样品 2 用泡沫胶粘成如图 3(b) 所示的围栏形状,中间使用环氧树脂胶液进行最大限度填充,使胶液尽量充满围栏内部区域,用来检测整个粘接面是否有气泡缺陷。胶液填充后,立即将材料垂直粘接到胶层上方。粘接完毕后在上方加重物对其保压,尽量减少缺陷。

2.3 实验结果分析

使太赫兹探头聚焦在粘接层处,以此来定义 $z=0$, $z=-1$ mm, $z=-2$ mm 即在焦平面下 1 mm 和 2 mm 处。在平台完成扫描之后,结果如图 4 所示。可以在 z 轴方向以 1 mm 为间隔依次查看图像。图中颜色的

深浅表示反射信号在被测材料中的衰减强度，颜色越浅代表反射信号衰减越少，颜色越深代表反射信号衰减越多。

调频连续太赫兹波透过复合隔热材料与粘接层，由金属基板反射后，回波信号被探头接收，经处理后得到图像。将 z 轴定位到 $z=0$ 的粘接层处。

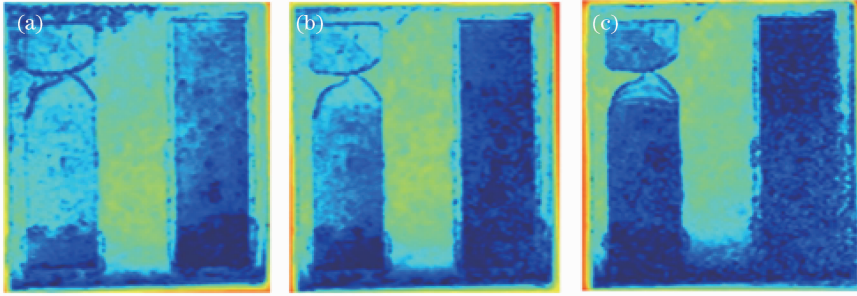


图 4 样件 1 的连续太赫兹图像。(a) $z=0$; (b) $z=-1$ mm; (c) $z=-2$ mm

Fig. 4 Continuous terahertz wave images of sample 1. (a) $z=0$; (b) $z=-1$ mm; (c) $z=-2$ mm

通过图像的轮廓看出样件 1 左边一组有明显缺胶的缺陷。由于胶和空气的折射率不同，造成在其分界面产生边缘散射效应，从而造成了反射强度的变化。通过改变 z 轴的值，可以将粘接面层析，随着 $x-y$ 平面沿 z 轴向下移动，离焦平面原来越远，能量的衰减越明显，反映到图像为颜色越深。而且可以从图 4(a) 看到，即使是人为最大限度填充胶液，粘接层也会存在一些气泡，这是不可避免的，而且在调制胶液和灌注胶液时，也会产生气泡。

在粘接时，样件 2 并没有预埋缺陷，但由图 5 可以观察到样件 2 在粘接层存在的 8~10 个直径不等的气泡。所以即使在正确涂胶程序之后，样件也需要进行保压，来使基板、胶和材料充分接触。这也就进一步证明，对材料粘接部位的检测是非常必要的。

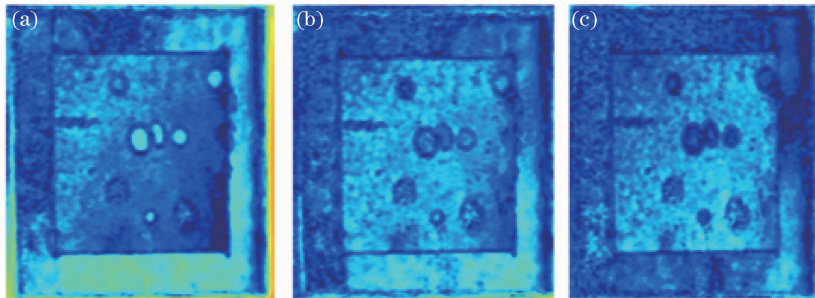


图 5 样件 2 的连续太赫兹图像。(a) $z=0$; (b) $z=-1$ mm; (c) $z=-2$ mm

Fig. 5 Continuous terahertz wave images of sample 2. (a) $z=0$; (b) $z=-1$ mm; (c) $z=-2$ mm

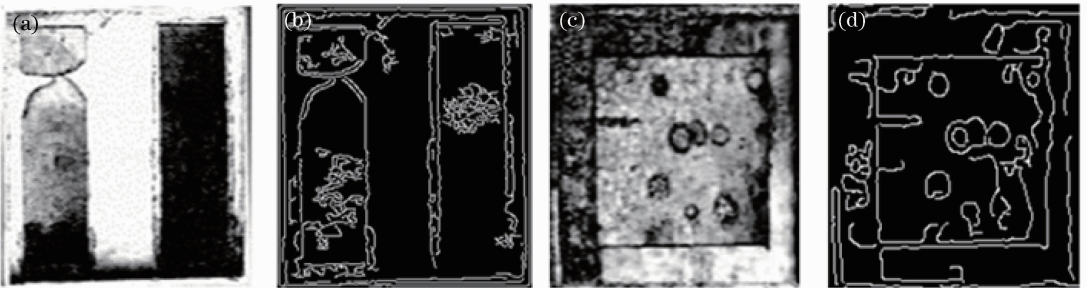


图 6 样件的边缘检测。(a) 样件 1 灰度图像; (b) 样件 1 canny 算子下的边缘检测; (c) 样件 2 的灰度图像; (d) 样件 2 canny 算子下的边缘检测

Fig. 6 Edge detection of the sample. (a) Gray image of sample 1; (b) Canny operator edge detection of sample 1; (c) gray image of sample 2; (d) Canny operator edge detection of sample 2

3 图像边缘检测

粘接缺陷存在散射效应,其强度低于无缺陷区域,使图像局部颜色变化明显,通过边缘检测可以达到区分缺陷和背景的目的。选择适当的算法得到相对准确的缺陷边缘图像是图像特征提取的关键步骤。

采用自适应 Canny 算子图像边缘检测方法,对连续太赫兹图像进行后期处理,此方法通过最大类间方差法的自适应同步搜索,确定检测强弱边界,当且仅当弱边界和强边界相连时,才将弱边界的内容显示在输出图像中。由于太赫兹图像缺陷形状不规则,自适应 Canny 算子较一般 Canny 算子边缘检测法在确定强弱边界上更有优势。因此,这种方法不容易被噪声干扰,更容易检测出真实的粘接缺陷边缘。

根据处理后结果可看出,自适应 Canny 算子可以有效检测太赫兹图像边缘,粘接层中气泡的边界与泡沫胶的边界较为清晰,基本能够识别缺陷的位置与大小,并忽略大部分的噪声信息。

4 结 论

通过实验得到以下结论:

1)通过使用连续太赫兹成像系统获得了航天复合材料粘接层中不同深度处的图像,通过对植入粘接缺陷样件扫描图的对比,观测到了预埋其中的缺陷。

2)通过使用自适应 Canny 算子对图像进行边缘检测,能够对缺陷属性做出基本判断,达到了其他无损检测方法得不到的效果。

3)连续太赫兹设备易于操作,灵活性较强,通过安装在机械平移台或者机械臂上,可实现多角度测量,测量周期短,适用于现场快速的检测粘接缺陷。

参 考 文 献

- 1 Shen Jingling, Zhang Cunlin. Terahertz wave nondestructive test new technology and application[J]. *Nondestructive Test*, 2005, 27(3): 146-147.
沈京玲, 张存林. 太赫兹波无损检测新技术及其应用[J]. *无损检测*, 2005, 27(3): 146-147.
- 2 Zhang Xin, Zhao Yuanmeng, Deng Chao, *et al.*. Study on passive terahertz image target detection[J]. *Acta Optica Sinica*, 2013, 33(2): 0211002.
张馨, 赵源萌, 邓朝, 等. 被动式太赫兹图像目标检测研究[J]. *光学学报*, 2013, 33(2): 0211002.
- 3 Li Qi, Yao Rui, Shan Jixin, *et al.*. A preliminary study on THz imaging and image enhancement based on thermal imager[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, 28(s2): 275-277.
李琦, 姚睿, 单纪鑫, 等. 基于热像仪的太赫兹成像及图像增强初步研究[J]. *光学学报*, 2008, 28(s2): 275-277.
- 4 Yao Jianquan, Zhong Kai, Xu Degang. Study and outlook of terahertz space applications[J]. *Space Electronic Technology*, 2013, (2): 1-16.
姚建铨, 钟凯, 徐德刚. 太赫兹空间应用研究与展望[J]. *空间电子技术*, 2013, (2): 1-16.
- 5 Yang Zhengang, Liu Jinsong, Wang Kejia. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular sample[J]. *Journal of Optoelectronics • Laser*, 2013, 24(6): 1158-1162.
杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 连续太赫兹成像系统对多层蜂窝样件无损检测的实验研究[J]. *光电子·激光*, 2013, 24(6): 1158-1162.
- 6 Yang J, Ruan S, Zhang M. Real-time continuous-wave imaging with a 1.63 THz OPTL and a pyroelectric camera[J]. *Optoelectronics Letters*, 2008, 4(4): 295-298.
- 7 Yang Zhengang, Liu Jinsong, Wang Kejia. Terahertz nondestructive inspection for adhesive face with composite materials and steel plate [J]. *Nondestructive Testing*, 2014, (4): 42-48.
杨振刚, 刘劲松, 王可嘉. 复合材料与钢板黏合面的太赫兹无损检测[J]. *无损检测*, 2014, (4): 42-48.
- 8 Ge Xinhao, Lü Mo, Zhong Hua, *et al.*. Terahertz wave reflection imaging system based on backward wave oscillator and its application[J]. *Journal of Infrared and Millimeter Waves*, 2010, 29(1): 15-18.
葛新浩, 吕默, 钟华, 等. 反射式太赫兹返波振荡器成像系统及其应用[J]. *红外与毫米波学报*, 2010, 29(1): 15-18.
- 9 Li Q, Ding S, Li Y, *et al.*. Research on reconstruction algorithms in 2.52 THz off-axis digital holography[J]. *Journal of Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves*, 2012, 33(10): 1039-1051.
- 10 Xu Ying, Hong Zhi. Study of multi-scale enhancement algorithm for THz images combining wavelet denoising [J]. *Chinese Journal of Sensors and Actuator*, 2011, 24(3): 398-401.
徐英, 洪治. 结合小波去噪的 THz 图像多尺度增强算法研究[J]. *传感技术学报*, 2011, 24(3): 398-401.
- 11 Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, *et al.*. Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. *Appl Opt*, 2004, 43(30): 5637-5646.
- 12 Li Q, Li Y. Continuous-wave 2.52 terahertz Gabor inline compressive holographic tomography[J]. *Appl Phys B*, 2014, 117: 585-596.
- 13 Jepsen P U, Cooke D G, Koch M. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications[J]. *Laser & Photonics Reviews*, 2011, 5(1): 124-166.
- 14 S. Wang, B. Ferguson, D. Abbott, *et al.*. T-ray imaging and tomography[J]. *Journal of Biological Physics*, 2003, 29(2-3): 247-256.
- 15 Jansen C, Wietzke S, Peters O, *et al.*. Terahertz imaging: applications and perspectives[J]. *Appl Opt*, 2010, 49(19): E48-E57.