

文章编号: 1001-3806(2015)02-0185-05

隔热板的太赫兹无损检测

赵毕强, 魏旭立, 杨振刚*, 刘劲松, 王可嘉

(华中科技大学 光学与电子信息学院 武汉光电国家实验室, 武汉 430074)

摘要: 为了研究太赫兹无损检测技术对复合材料与金属板黏合面粘接质量的检测能力, 在隔热板上制造了不同特征的人工缺陷, 并使用德国 SynViewScan 300 连续太赫兹波成像系统对样件进行了检测。结果表明, 太赫兹波能够穿透复合材料, 并获得复合材料与金属板的黏合面处的 2 维太赫兹图像, 从图像中能够清晰地分辨出不同特征的缺陷。该研究结果为检测复合材料黏合质量及脱黏状况提供了有效的办法。

关键词: 激光技术; 无损检测; 粘接质量; 人工缺陷; 连续太赫兹波成像

中图分类号: TN247 **文献标志码:** A **doi:**10.7510/jgjs.issn.1001-3806.2015.02.008

Terahertz nondestructive inspection of heat shield

ZHAO Biqiang, WEI Xuli, YANG Zhengang, LIU Jinsong, WANG Kejia

(Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science & Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract: In order to investigate the detection capability of terahertz nondestructive inspection technology for the bonding adhesive quality of the adhesive layer between composite material and metal plates, some artificial defects with different characteristics were made on insulation boards in advance and detected with the German SynViewScan 300 continuous terahertz imaging system. The results show that terahertz wave can penetrate the composite material and retrieve two-dimensional terahertz image of the adhesive layer. Those different defects can be clearly distinguished from the terahertz images. The results demonstrate that terahertz non-destructive analysis provides attractive features for the inspection of adhesive quality and the off sticky situation of the composite material.

Key words: laser technique; nondestructive inspection; adhesive quality; artificial defect; continuous THz wave imaging

引 言

无损检测是利用声、光、磁和电等手段, 在不损害或不影响被检对象使用性能的前提下, 检测被检对象中是否存在缺陷或不均匀性, 给出缺陷的大小、位置、性质和数量等信息^[1], 进而判定被检对象所处技术状态的技术手段。随着材料科学的发展, 隔热材料、蜂窝材料、电子填充材料等新型材料的不断出现, 给传统检测手段带来了巨大挑战。特别是在机械制造、安检和航天等领域, 迫切需要新型无损检测技术的出现^[2]。

在航天、汽车等领域, 高分子复合材料作为构件与衬底黏合时, 其黏合面脱粘或灌胶不到位是影响构件性能和引发事故的主要原因之一^[3]。因此, 利用无损检测技术有效地探测和识别样件内部和黏合面的缺陷尤为重要。由于复合材料低密度的物理特性, 采用常规的 X 射线、超声检测等方法几乎无法识别其内部缺陷^[4-5]。而太赫兹波能够透过泡沫、塑料、高分子复合材料等可见光与红外波、甚至超声波都难以穿透的材料^[6], 从而实现对材料内部的无损检测。

本文中针对高分子复合材料与衬底黏合质量的问题, 首先设计并制作了携带不同特征缺陷的人工孔洞结构, 以模拟隔热板在实际制造过程中可能出现的缺陷情况, 然后利用连续太赫兹成像系统对样件黏合面进行了成像检测, 评估其黏合质量和脱黏状况。

作者简介: 赵毕强(1989-), 男, 硕士研究生, 主要从事太赫兹波无损检测方面的研究。

* 通讯联系人。E-mail: yangzhengang@hust.edu.cn

收稿日期: 2014-03-19; 收到修改稿日期: 2014-05-14

1 调频连续波太赫兹成像系统的工作原理

实验中所用仪器为德国 SynView 公司生产的调频连续波太赫兹成像系统 SynViewScan 300^[7], 装置实物图如图 1 所示。该系统采用调频连续波的方式实现距离向分辨。在方位向上, 采用透镜将太赫兹光束聚焦, 并通过转动和摆动反射面来实现 2 维光束扫描。成像系统的原理如图 2a 所示, 耿氏振荡器产生的电磁波经倍频后产生瞬时频率随时间在 0.23THz ~ 0.32THz 范围内呈线性变化的太赫兹连续波, 并由透镜聚焦到样件上, 反射的太赫兹波信号被探测器接收, 并与发射信号混频。混频器输出的中频信号可以得到目标物体的距离, 也就是说通过探测回波信号与发射信号的差频信号就可以实现目标物体的深度上的成像^[8-9]。另一方面, 通过 2 维移动反射和接收单元, 可以获得某一深度下太赫兹光强的 2 维图像。

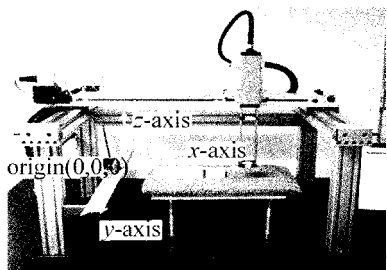


Fig. 1 Photograph of SynViewScan 300 system

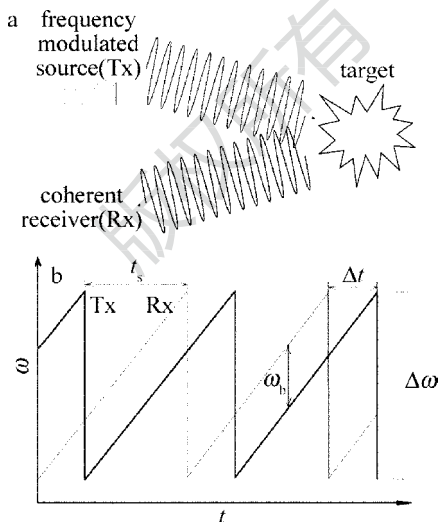


Fig. 2 a—imaging principle of terahertz frequency modulated continuous wave b—time-frequency curve of Tx-Rx signal with sawtooth FMCW

SynViewScan 300 成像装置的工作原理与调频连续波 (frequency modulated continuous wave, FMCW) 探测雷达系统探测距离的原理^[10]类似。理

想情况下, 锯齿形 FMCW 的发射与回波的时频曲线如图 2b 所示。发射波与回波的延时为:

$$\Delta t = \omega_b \frac{t_s}{\Delta \omega} \quad (1)$$

假设发射-接收系统与目标的距离为 l , 光速为 c , 则有:

$$\Delta t = \frac{2l}{c} \quad (2)$$

于是可得:

$$l = \frac{1}{2} c \omega_b \frac{t_s}{\Delta \omega} \quad (3)$$

式中, $\Delta \omega$ 为调频带宽, t_s 为扫频时间, ω_b 为发射信号与回波信号的差频。可见不同距离的目标对应着不同的差频信号。由于差频信号的频率正比于距离, 因此差频信号的频谱被称为距离谱^[10]。

对于 SynViewScan 300 系统, 不同距离的目标也就是指待测样品的不同深度层。那么反射波与发射波混频得到的差频信号就对应着不同深度 h 下各层的反射信号。通过对差频信号做快速傅里叶变换 (fast Fourier transformation, FFT) 处理就可以得到距离谱。由于待测样品的折射率 n 往往高于空气的折射率值, 距离谱的横坐标 z 轴代表了太赫兹波的光程差 nh 。

目前雷达测距的主流方法有两种: 一种是调频连续波雷达测距, 另一种是脉冲雷达测距。它们的基本思路都是由电磁波的发射与反射信号的延时推测距离值 (即 (2) 式), 脉冲雷达可以直接测量发射脉冲与反射脉冲的时间差, 而调频连续波雷达则是通过差频信号来反推时间差。与脉冲测距的原理相似, 太赫兹波飞行时间断层成像根据每一层反射回的脉冲来实现断层成像。太赫兹波飞行时间成像是在反射型太赫兹时域光谱系统上 2 维逐点扫描来实现断层成像, 其特点是需要利用飞秒激光与介质作用的非线性效应产生太赫兹脉冲, 并通过扫描延迟线来获取太赫兹脉冲的时域波形。飞秒激光器体积较大、维护复杂、逐点扫描耗时长。而采用电子源的 SynViewScan 300 系统, 装置集成度高、工作稳定, 且具有扫描速率快的优势。

SynViewScan 300 系统发射信号的调频时间为 240 μ s, 调频带宽为 90GHz。由 FFT 的原理可知, 距离精度为 $\Delta l = c/(2\Delta \omega)$, 即 1.67mm。成像系统在直接 FFT 变换的基础上做了改进以提高距离精度 (即纵向精度), 基本思路是先找出频率所在区间,

再细分区间以确定频率值(FFT/chirp z 法)^[10]。这种改进的办法可以使纵向精度提高到1mm。

2 样件介绍及检测方案

样件由复合材料和金属板衬底由粘接剂粘接组成。将白色高分子复合材料压制成一个长方体(如图3a所示),其尺寸为150mm×150mm×28mm,外表面为一层青色涂层。金属板为300mm×300mm×2mm的铝质薄板。粘接剂的厚度为3mm。为了模拟隔热板在生产过程中可能会出现脱粘和缺陷情况,在铝板上制作了3个不同特征的缺陷,如图4a所示,缺陷标号后为其2维坐标。1号和3号缺陷分别为半径6mm和5mm的钻孔,2号缺陷由两个半径4mm部分重叠的钻孔组成。3种缺陷的设计过程如下:(1)1号缺陷先将铝块切割掉再将其重新镶入孔内,保留粘接剂;(2)2号缺陷取出孔内的铝块,保留粘接剂;(3)3号缺陷将铝块和粘接剂均从孔内取出。

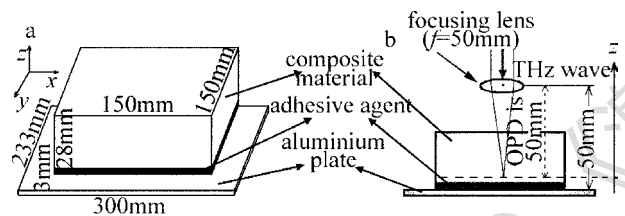


Fig. 3 a—schematic diagram of the sample b—schematic diagram of non-destructive inspection process

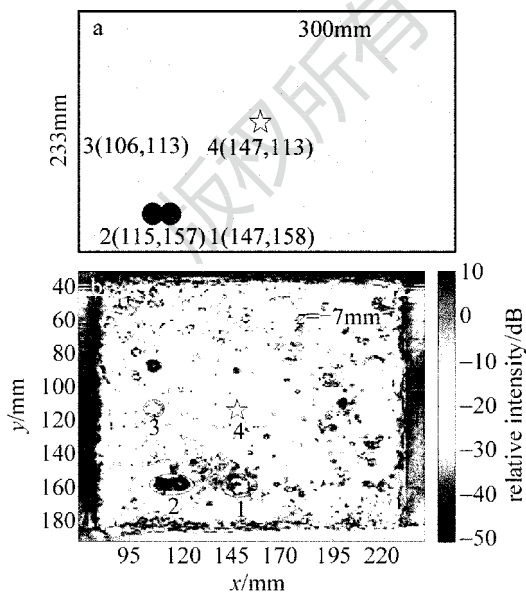


Fig. 4 a—schematic diagram of the artificial defects b—2-D THz profile of the adhesive layer

为了与正常粘接情况作对比分析,在样件上其它位置选取了一个无缺陷点,标记为4号。实验中

采用 SynViewScan 300 系统对该样件进行了检测。研究太赫兹波对高分子复合材料的穿透特性,并根据2维图像来分辨不同特征的缺陷,为粘合质量的评估提供参考。样件测试过程如图3b所示,将样件水平放置在金属载物平台上,铝板上表面与聚焦透镜间隔等于透镜焦距($f=50\text{mm}$),太赫兹波从复合材料上方并垂直于载物平台入射,光程差(optical path difference, OPD)为50mm。

3 测试结果及分析

3.1 样件粘接面附近的2维太赫兹图像的分析

图4b为复合材料和铝板粘接面附近的2维太赫兹图像。与图4a比较,在太赫兹图像中能够快速识别出人工设计的1号、2号、3号缺陷,即图4b中数字标号上方的圆孔区域。根据太赫兹图像,可以粗略得到1号、2号、3号缺陷的坐标以及尺寸信息,并定性的分析缺陷的特征。

3.2 样件正常情况不同深度的反射信号的分析

图5b所示为样件无缺陷位置(即4号参考点)不同深度的反射信号曲线,即 SynViewScan 300 系统成像结果的典型距离谱。其中纵坐标为光强的相对值,横坐标为反射点与焦平面之间的光程差。 z 轴为0mm代表实际焦平面,在图3b中对此也有分析。由于样件的折射率大于1,故焦平面在粘接面以上。

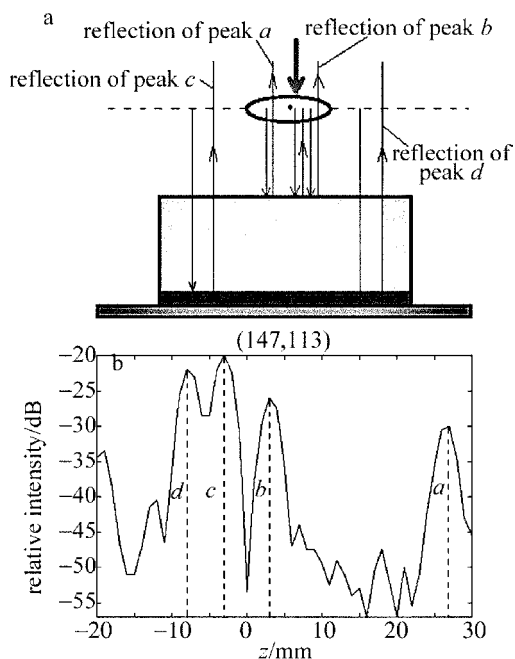


Fig. 5 a—schematic diagram of the incident and reflection of THz wave b—intensity of reflection signal at different depth at No. 4 reference point

从图 5b 反射信号曲线中可以明显看到 4 个峰值,分别标记为 *a* 峰、*b* 峰、*c* 峰、*d* 峰。如图 5a 所示,4 处光强峰值的坐标依次为 $z_a = 27\text{mm}$, $z_b = 3\text{mm}$, $z_c = -3\text{mm}$, $z_d = -8\text{mm}$ 。*a* 峰对应着高分子复合材料上表面的反射信号,*c* 峰对应着粘接剂上表面的反射信号,*d* 峰对应着铝板上表面的反射信号。*a* 峰与 *c* 峰之间光程差约为 30mm,而高分子复合材料厚 28mm,可得复合材料的折射率约为 1.07。同样,*c* 峰与 *d* 峰之间光程差约为 5mm,而粘接剂厚度为 3mm,可得粘接剂的折射率约为 1.67。

在实验过程中,改变样件的高度(即样件在 *z* 方向上的位置)时,发现 *b* 峰的 *z* 轴位置(即其距离焦平面的光程差)变化程度快于其它 3 个峰。据此判断 *b* 峰的成因如下:复合材料表面反射回的太赫兹波一部分被聚焦透镜表面反射回样品表面,这部分信号被样品反射后也被探测单元接收,体现为曲线上的峰值,称其为二次反射信号。由图 5b 可以看到,*a* 峰和 *b* 峰的光程差约为 24mm,而样件表面距离透镜 22mm,与之大致相符。

从图 3b 可知,与直接入射波相比,透镜回波传播的光程更接近聚焦透镜的焦距,那么透镜回波作用到样品时被聚焦的更强,从而能够解释二次反射

信号对应的 *b* 峰的强度高于直接入射波信号对应的 *a* 峰的强度。进一步检测了放置在不同高度下的光滑铝板,发现只有样件处于透镜焦平面以上时,才会出现二次反射信号对应的峰。因此可以通过调整聚焦透镜的焦距可以改变 *b* 峰的位置,从而消除它对反射信号的影响。

3.3 样件缺陷点的反射信号与正常点的比较分析

根据前面的分析,*a* 峰和 *b* 峰分别对应着复合材料表面的一次反射信号和二次反射信号。*c* 峰对应着粘接剂上表面的反射信号,*d* 峰对应着铝板上表面或金属载物平台的反射信号。样件上的缺陷导致了粘接剂以及铝板的差异,因而只需要分析 *c* 峰和 *d* 峰的情况。

由图 6 可以看到,3 个缺陷点(1 号、2 号、3 号)与正常的参考点(4 号)相比,*a* 峰和 *b* 峰值出现的位置基本相同,表明不同(*x*, *y*)坐标下复合材料上表面对应的光程差相同,这说明样件上的复合材料上表面与入射太赫兹波垂直。另外由图 6c 可以看到,对应着 3 号缺陷位置的反射信号曲线中 *c* 峰消失,而设计的 3 号缺陷无粘接剂。表明根据反射信号能够识别出粘接剂脱粘这一缺陷情况。

进一步分析 3 处缺陷情况下反射信号曲线中的

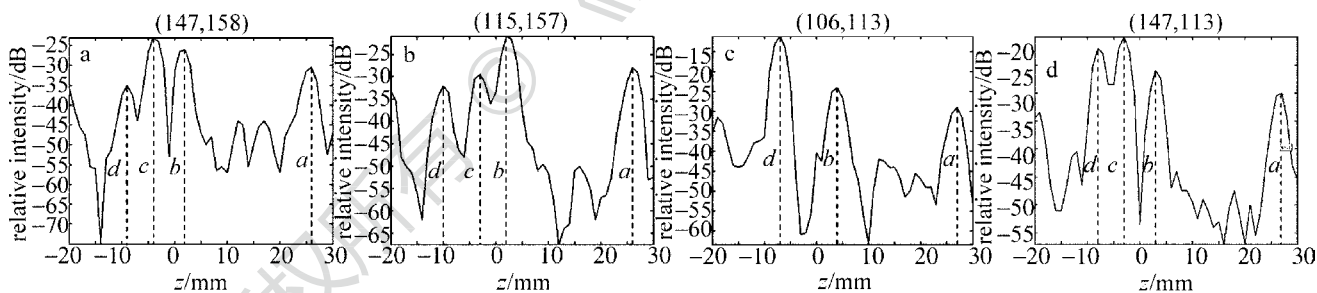


Fig. 6 Intensity of reflection signal at different depth at the three defects and the reference points

a—No. 1 defect b—No. 2 defect c—No. 3 defect d—No. 4 reference position

d 峰。图 6a 中 *d* 峰对应着太赫兹波穿过粘接剂入射到重新镶入铝板的铝块的反射信号;图 6b 中 *d* 峰对应着太赫兹波穿过粘接剂入射到金属平台的反射信号;图 6c 中 *d* 峰对应着太赫兹波穿过复合材料及空气层入射到金属载物平台的反射信号。

由图 4a 中 3 个缺陷的设计过程可知,1 号、2 号缺陷及 4 号参考位置反射信号曲线中的 *d* 峰都对应着太赫兹波透过复合材料和粘接剂入射到金属表面的情况,并且粘接剂和金属材料之间的空气层的厚度满足 2 号 > 1 号 > 4 号。而 3 号缺陷没有粘接剂,太赫兹波透过空气层直接入射到金属载物平台表面。根据对 4 个位置各自光程差的分析,*d* 峰对应

的 *z* 轴坐标应满足 $z_{d,2} < z_{d,1} < z_{d,4} < z_{d,3}$ 。

从图 6 可得 *d* 峰对应的坐标分别为 $z_{d,1} = -9\text{mm}$, $z_{d,2} = -10\text{mm}$, $z_{d,3} = -7\text{mm}$, $z_{d,4} = -8\text{mm}$,与前面的分析结论非常吻合。可见根据反射信号中峰位置的不同,可以分辨不同特征的缺陷。

4 结 论

利用 SynViewScan 300 连续太赫兹波成像系统对覆盖高分子复合材料的铝质衬底上的不同缺陷进行了无损检测。测试结果表明,太赫兹波能够很好地透过高分子复合材料并获得黏接面的 2 维太赫兹图像。通过对特定深度下正常粘点点和缺陷点的太

赫兹图像,以及特定位置下反射信号随深度变化的曲线进行深入分析,很好地解释了缺陷点和正常点对应的信号特点,进一步可以分辨出不同物理特征的缺陷。太赫兹无损检测技术为复合构件黏合面质量的非破坏性检测提供了一种可靠的方法。

与传统的检测技术相比,太赫兹无损检测还处于初步发展阶段。随着太赫兹波的产生、探测技术和成像系统的发展,以及检测理论、图像处理算法等方面的进一步完善^[11-12],太赫兹无损检测技术将更加成熟,并会更加广泛地应用在航天、机械制造以及安检等工程领域。

参 考 文 献

- [1] ZHOU L, ZHANG Zh W. Nondestructive testing and its new technology[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2006, 20(8):46-48 (in Chinese).
- [2] FU T H, LIU S P. Review of manual scan ultrasonic imaging methods for composite materials [J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(8):50-54 (in Chinese).
- [3] WEN M P, TIAN Y, YOU K X. Multiple ultrasonic pulse-echo method for testing composite component bonding quality[J]. Journal of Test and Measurement Technique, 1996, 10(2/3):679-682 (in Chinese).
- [4] KARPOWICZ N, ZHONG H, ZHANG C, *et al.* Compact continuous-wave subterahertz system for inspection applications[J]. Applied Physics Letters, 2005, 86(5): 054105.
- [5] RECUR B, YOUNUS A, SALORT S, *et al.* Investigation on reconstruction methods applied to 3-D terahertz computed tomography[J]. Optics Express, 2011, 19(6): 5105-5117.
- [6] WALKER J L, RICHTER J D. Nondestructive evaluation of foam insulation for the external tank return to flight[C]//Proceedings of the 47th American Institute of Aeronautics and Astronautics / ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference. Huntsville, AL, USA; American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2006; 20060050249.
- [7] YANG Zh G, LIU J S, WANG K J. Experimental research on nondestructive inspection for multilayer cellular samples using continuous terahertz waves imaging system[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 2013, 24(6):1158-1162 (in Chinese).
- [8] AM W C, von SPIEGEL W, HENNEBERGER R, *et al.* Fast active THz camera with range detection by frequency modulation [J]. Proceedings of the SPIE, 2009, 7215:72150F.
- [9] KARPOWICZ N, REDO A, ZHONG H, *et al.* Continuous-wave terahertz imaging for non-destructive testing applications[C]//Infrared and Millimeter Waves and 13th International Conference on Terahertz Electronics, 2005. New York, USA; IEEE, 2005: 329-330.
- [10] LIU B, LIU J M. A method of the realization of high accuracy in FMCW ranging system [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrument, 2001, 15(3):41-45 (in Chinese).
- [11] ZHANG W, LEI Y Zh. Progress in terahertz nondestructive testing[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2008, 29(7): 1563-1568 (in Chinese).
- [12] JANSEN C, WIETZKE S, PETERS O, *et al.* Terahertz imaging: applications and perspectives [J]. Applied Optics, 2010, 49(19): E48-E57.