

多层胶接结构胶层空气缺陷的太赫兹无损检测

李文军¹, 王天一¹, 周 宇², 游承武¹, 杨振刚^{2*}, 王可嘉¹, 刘劲松¹

¹华中科技大学武汉光电国家实验室, 湖北 武汉 430074;

²华中科技大学光学与电子信息学院, 湖北 武汉 430074

摘要 利用建筑材料、隔热垫和胶粘剂制作了胶层中含人工空气缺陷的三层胶接结构, 并利用 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统对样件进行了检测。通过分析胶接面的太赫兹二维图像及缺陷处和正常胶粘处的单点纵向信号, 获得了胶层空气缺陷的位置和大小信息。结果表明, 连续太赫兹波成像系统可以清晰识别胶接结构中的胶层空气缺陷。

关键词 成像系统; 无损检测; 连续波太赫兹成像系统; 胶层空气缺陷; 多层胶接结构

中图分类号 TN247 文献标识码 A

doi: 10.3788/AOS201737.0111002

Terahertz Non-Destructive Inspection of Air Defect Within Adhesive Layers of Multi-Layer Bonded Structure

Li Wenjun¹, Wang Tianyi¹, Zhou Yu², You Chengwu¹,
Yang Zhengang², Wang Kejia¹, Liu Jinsong¹

¹ Wuhan National Laboratory for Optoelectronics, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China;

² School of Optical and Electronic Information, Huazhong University of Science and Technology,
Wuhan, Hubei 430074, China

Abstract Three-layer bonded structure containing artificial air defects within adhesive layers is manufactured with the usage of building materials, insulation mat, and adhesive, and the specimen is inspected by the SynViewScan 300 continuous terahertz imaging system. Via analysing the two-dimensional terahertz images at adhesive surface and single point longitudinal signal within defect area and normal adhesive area, the informations about position and size of air defects are acquired. The results indicate that the continuous terahertz imaging system is capable of clear identification of air defects within bonded structures.

Key words imaging system; non-destructive inspection; continuous wave terahertz imaging system; air defect within adhesive layer; multi-layer bonded structure

OCIS codes 110.6795; 110.2970; 060.2630

1 引 言

胶接结构在实际工程中应用广泛,但在制造或使用过程中胶接处内部会产生缺陷,空气层缺陷是其中较为常见的一种。胶接处产生的缺陷会影响胶接结构的性能,为了保证工程的安全性,特别是在机械制造、安检和航天等领域,缺陷检测显得尤为重要。在不造成被检对象损害的前提下及时发现缺陷,新型无损检测技术成为迫切需要^[1]。无损检测是利用声、光、磁和电等手段,在不损害被检对象或对被检测对象的使用性能不造成影响的前提下,检测被检对象内部存在的缺陷及夹杂^[2],对被检对象的性能进行评判及改进。目前无

收稿日期: 2016-06-30; 收到修改稿日期: 2016-08-05

基金项目: 国家自然科学基金(11574105,61475054,61405063)

作者简介: 李文军(1990—),男,硕士研究生,主要从事太赫兹无损检测方面的研究。E-mail: M201572682@hust.edu.cn

导师简介: 刘劲松(1959—),男,博士,教授,主要从事基于光电子学的太赫兹技术方面的研究。

E-mail: jsliu4508@vip.sina.com

* 通信联系人。E-mail: yangzhengang@hust.edu.cn

损检测领域应用较多的检测技术有射线检测、渗透检测、磁粉检测、涡流检测和超声检测^[3-5]。多数射线检测中光子能量过高,可能会对检测人员产生危害。太赫兹波段的辐射光子能量相对较低,对人体无害,且太赫兹波对复合材料的穿透性更好。渗透检测是基于毛细管现象,利用渗透液渗透后再显影,但该方法只能观察试件表面的缺陷。磁粉检测是利用磁性材料的磁化特性进行试件表面或近表面缺陷的检测。涡流检测是通过超声频交变电流的激励线圈在导电试件中激励出涡电流,但涡流检测的对象必须是导电介质,且该方法的实施受到试件几何形状和尺寸的限制。超声波检测需要通过耦合介质才能使声波射入被检物,显示结果不直观,对操作人员技术水平要求较高。目前绝大多数胶接结构都采用复合材料制作,试件不具有导电性,且胶接结构中的缺陷属于内部缺陷。对于胶接结构胶层空气缺陷的无损检测,太赫兹无损检测技术凭借其安全性、有效性和简易性具有较大优势。

太赫兹无损检测技术源于航天材料的检测。太赫兹波段(0.1~10 THz)介于红外和微波之间^[6-9],利用太赫兹波可以实现对高分子复合材料、磁性材料等的无损检测,太赫兹无损检测是一种基于射线的无损检测技术^[10]。2003年,研究人员发现太赫兹波可以穿过航天泡沫材料^[11]。2005年,NASA的研究人员使用脉冲太赫兹波检测了泡沫隔热材料中的缺陷裂痕。与此同时,张希成课题组设计了便携式连续波太赫兹成像系统,用于航天飞机泡沫绝热的检测^[12]。2006年,张存林课题组成功调试出国内首台连续波成像系统^[13]。2010年,Jördens等^[14]使用太赫兹时域光谱(TDS)技术对玻璃纤维进行了测量分析。2012年,Nezadal等^[15]利用较低的太赫兹频段(频率范围为220~325 GHz)对玻璃纤维增强塑料中的人造缺陷进行了检测,可以达到0.8 mm的纵向分辨率。复合材料具有隔热效果好、强度大、重量轻等优点,广泛应用于各工程领域。为了保证复合材料安全高效的使用,太赫兹无损检测技术在复合材料检测领域是必不可少的。

太赫兹无损检测技术已被广泛应用,但多数是基于TDS技术。TDS技术的检测过程耗时较长,不适用于快速或者大型的检测。德国SynViewScan 300连续太赫兹成像系统的成像原理主要是反射式成像,可以对检测对象进行快速检测成像。本文使用SynViewScan 300对含有空气层缺陷的三层复合材料胶接结构进行了相关实验测试,验证了利用太赫兹检测技术对由复合材料构成的胶接结构中的胶层空气缺陷进行无损检测的可行性。

2 连续太赫兹成像系统的工作原理

SynViewScan 300连续太赫兹成像系统如图1所示,其中L为聚焦透镜,S为光源,ADC为模数转换器,VCO为压控振荡器,D为外差探测器。SynViewScan 300的探测头SynViewHead 300的工作原理为:信号产生方面,通过斜坡发生器驱动VCO产生一个扫频周期为240 μs 、扫频范围大约在13~18 GHz的信号,该信号在光源S中倍频后扫频范围达到0.23~0.32 THz;信号探测方面,以肖特基混频器作为D,将待测物反射的信号和发射信号进行混频,混频后的信号经过ADC后输入数据处理单元。该系统利用定向耦合器完成分光工作,避免了不必要的光学器件(反光镜和分光器等)。系统的输出功率为0.1 mW,系统成像的动态范围可达60 dB^[16]。

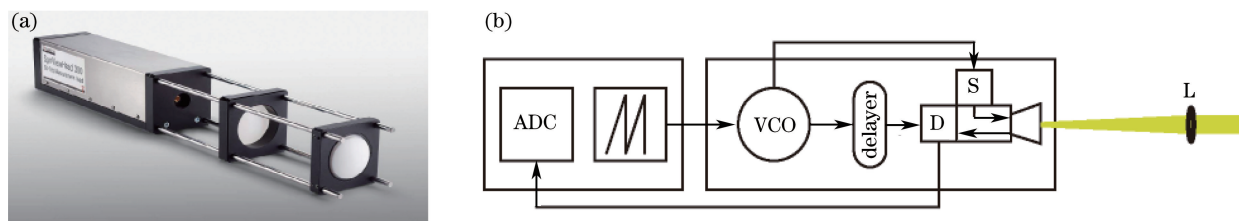


图1 SynViewScan 300。(a)实物图;(b)工作原理示意图

Fig. 1 SynViewScan 300. (a) Physical map; (b) schematic diagram of operating principle

SynViewScan 300连续太赫兹成像系统是基于调频连续波(FMCW)来实现物体的三维成像。FMCW基本原理如图2所示,其中 ω_b 为发射信号与探测信号的频率差, Δt 为时间延迟, $\Delta\omega$ 为调频带宽, t_s 为扫频时间。发射信号的一部分(T)作为参考信号直接被探测器接收,而另一部分(R)作为探测信号经过更长的光路从物体反射后到达接收器。信号相对于参考信号延迟了 Δt ,频率相差 ω_b ,这样就产生了差频,差频 ω_b 与时间延迟成正比。

系统分辨率由扫频范围 $\Delta\omega$ 决定。如果信号来自不同深度,可以通过傅里叶分析将不同深度的信息提取出

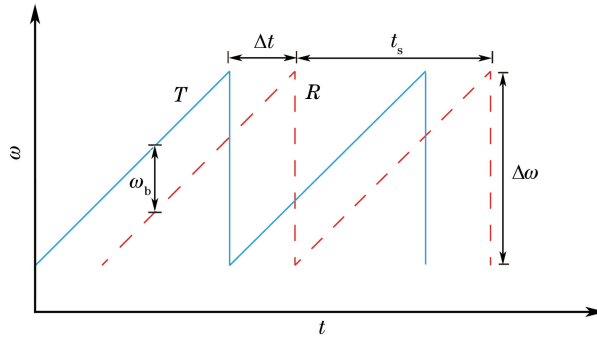


图 2 FMCW 基本原理

Fig. 2 Basic principle of FMCW

来。SynViewScan 300 经过单次有限范围内的二维扫描就可以获取样件内部不同深度的二维太赫兹图像^[17]。

根据 FMCW 原理可知,差频 ω_b 与 Δt 成正比,由于时间延迟与探测器到物体的距离成正比,所以可以用 Δt 来估算物体的深度位置。根据图 2 调频连续波的原理可得

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

发射接收系统与物体待测面的距离为 L ,则有

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

式中 c 为光在空气中的速度。于是可得

$$L = \frac{c \cdot \omega_b \cdot t_s}{2\Delta \omega}, \quad (3)$$

式中 t_s 和 $\Delta \omega$ 为已知的调制参数。不同的差频信号对应待测对象内部的不同深度,且深度与 ω_b 的大小呈正相关,故差频信号的频谱也称为距离谱^[18]。

差频测量的最大有效时间间隔由单次扫描的持续时间 t_s 决定,差频 ω_b 决定扫描的有限精度。频率测量精度受测量时间的限制,扫描的频率带宽越大,深度分辨率越好。FMCW 距离测量的分辨率 ΔQ 为

$$\Delta Q = \frac{c}{2\Delta \omega}. \quad (4)$$

在 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统中,待测对象内部的不同深度信号是与发射信号和探测信号混频得到的差频信号相关的。在探测器获得差频信号之后,通过对差频信号进行快速傅里叶变换处理就可以得到距离谱^[19],进而得到待测对象的深度信息。

3 样件介绍及检测方案

样件主体材料是尺寸为 $50 \text{ mm} \times 50 \text{ mm} \times 20 \text{ mm}$ 的长方体白色建筑材料,如图 3(a)所示。样件是建筑材料和隔热垫及胶粘剂粘合组成,样件上层为建筑材料,下层为隔热垫,隔热垫厚度为 1.5 mm ,由资料数据可知,隔热垫在 0.3 THz 处的折射率为 1.22 ,粘接剂在 0.3 THz 处的折射率为 1.75 。在胶接处中心区域人工制造圆形空气层缺陷,厚度约为 0.5 mm ,样件涂胶完成后如图 3(b)所示,建筑材料上未涂胶区域近似为直径为 30 mm 的圆形。完整样件的结构展开图如图 3(c)所示。采用 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统对三层胶接结构样件进行无损检测,且对检测结果进行分析以分辨粘接处胶层的特征。当样件待测面处于太赫兹波的焦平面附近时,太赫兹波对待测面的成像质量最好,以此为依据展开对样件的检测。

SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统的最大扫描范围为 $670 \text{ mm} \times 670 \text{ mm}$,步进方向为 X 和 Y 轴方向, X 轴方向采样精度为 1 mm , Y 轴方向步进精度为 1 mm 。SynViewHead 300 在 Y 轴上每步进 1 mm ,就会在 X 轴上进行一次扫描采样。待测样件横截面大小为 $100 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$,单次扫描采样时间约为 4 min 。检测过程中分别使用镜面和吸波垫为扫描平台,使用镜面为检测平台,可以加强样件下表面的发射,避免发生因反射强度过小而无法分辨样件内部信息的情况;以吸波垫为检测平台,可以在检测时还原样件内部的真

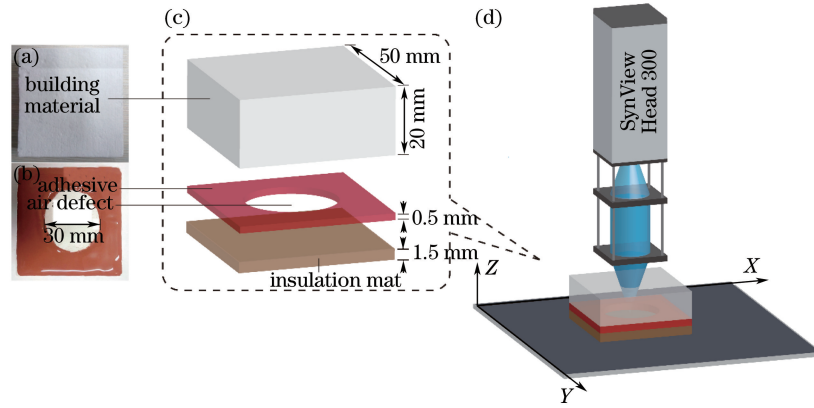


图 3 (a) 建筑材料实物图; (b) 建筑材料涂胶完成实物图; (c) 三层胶接结构展开示意图; (d) 三层胶接结构检测示意图
 Fig. 3 (a) Physical map of building material; (b) physical map of building material after gluing; (c) schematic diagram of three-layer bonded structure after expansion; (d) schematic diagram of inspection of three-layer bonded structure

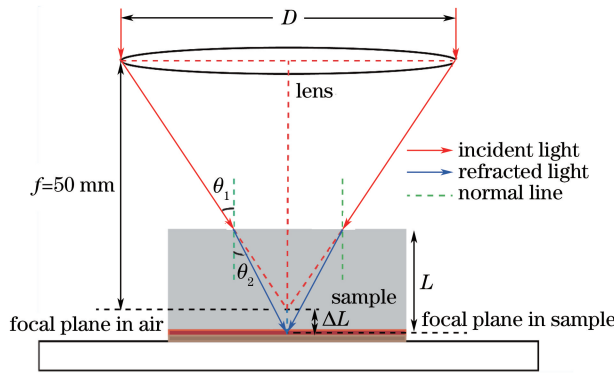


图 4 太赫兹波在样件中的聚焦光路图
 Fig. 4 Focusing light path of terahertz wave in specimens

实情况,避免样件内噪声对有效信息产生干扰。图 3(d)为三层胶接结构样件扫描测试示意图。

在系统检测平台的设置中, SynViewHead 300 与设备的焦平面之间的距离为 50 mm,太赫兹辐射穿透建筑材料时衰减很小。从几何光学的角度分析,扫描过程中太赫兹波在样件中聚焦的光路图如图 4 所示,其中 D 和 f 分别为 SynViewHead 300 镜头的直径和焦距, L 为建筑材料的厚度, ΔL 为建筑材料低于焦平面的距离, θ_1 为镜头边缘光线从空气进入建筑材料的入射角, θ_2 为太赫兹波在建筑材料中的折射角。

根据实验数据可知,建筑材料在 0.3 THz 频率下的折射率近似为 $n_2 = 1.32$ 。已知 SynViewHead 300 镜头直径 $D = 50\text{ mm}$, 焦距 $f = 50\text{ mm}$, 空气折射率 $n_1 = 1$, 由折射率公式及其几何关系可得

$$L = \frac{\Delta L \cdot \tan \theta_1}{\tan \theta_1 - \tan \left[\arcsin \left(\frac{n_1 \cdot \sin \theta_1}{n_2} \right) \right]}, \quad (5)$$

代入具体数据可得

$$L = 3.574 \Delta L. \quad (6)$$

由实际测试经验来看,当样件待测面低于太赫兹波在空气中的焦平面的距离超过 20 mm 时,太赫兹二维图像中的细节无法分辨,即当待测面距离太赫兹波在空气中的焦平面小于 20 mm 时可认为待测面处于有效的扫描区域。取 $\Delta L_{\max} = 20\text{ mm}$, 由(6)式可得 $L_{\max} = 71.480\text{ mm}$, 即理论上建筑材料的最大厚度可以达到 71.480 mm。此时建筑材料处于焦平面以上的高度为 51.480 mm, 大于 SynView Head 300 的焦距, 但受设备结构的限制, 建筑材料高于焦平面的最大距离为 50 mm, 根据(6)式的关系可知, 为了使太赫兹波在胶层待测面聚焦, 建筑材料的最大厚度为 69.425 mm。在实际项目中使用的胶接结构厚度多数在 20 mm 左右, 样件过厚会导致重量增加, 对实际工程产生不利影响, 故实验中使用的胶接结构建筑材料采用的厚度为 20 mm。

4 测试结果与分析

4.1 样件粘接面附近二维太赫兹图像分析

样件在 Z 轴方向上的不同深度位置信息如图 5 所示。图 5(a) 为样件上表面 ($Z=17$) 的二维太赫兹图像。样件所在区域图像亮度恰好由暗变亮, 由此判断图像为样件的上表面, 对比周围的反射强度可知, 建筑材料的上表面对太赫兹波的反射率较低, 但其比空气对太赫兹波的反射率高。由图 5(b) 看出, 样件周围反射强度由暗变亮 ($Z=-4$), 且反射强度较高, 由此可以判断该区域是镜面; 由光程可知, 此时太赫兹波没有到达样件底部, 故此时的样件太赫兹图像并不是样件下表面的。图 5(c) 出现了反映空气层缺陷的图像 ($Z=-9$), 可以清晰地分辨出胶层空气缺陷的信息。图 5(c) 也说明了胶层空气缺陷的存在, 且与人工制造的缺陷图吻合。图 5(d) 为样件下表面的信息 ($Z=-14$), 此时样件所在的区域由亮变暗。

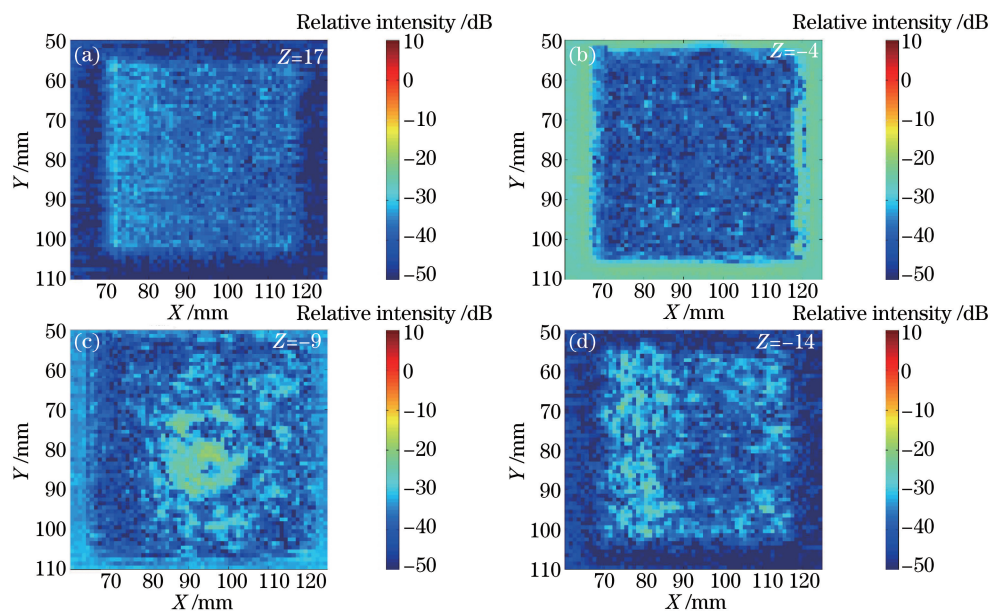


图 5 镜面为底时, 样件太赫兹二维图像。(a) 样件上表面; (b) 镜面; (c) 胶层空气缺陷; (d) 样件下表面

Fig. 5 Terahertz two-dimensional images of specimens when mirror is at bottom. (a) Upper surface of specimen; (b) mirror surface; (c) air defects within bonded layer; (d) lower surface of specimen

底部为吸波垫时, 样件在 Z 轴方向上不同深度位置的信息如图 6 所示。图 6(a) 为样件上表面 ($Z=18$) 的二维太赫兹图像。对比图 5(a), 图 6(a) 图像中样件区域的反射强度与区域外的反射强度差别变小。这是因为底部的吸波垫对太赫兹波有吸收作用, 测试过程中样件整体对太赫兹波的反射减弱, 所以在图像上会表现出反射强度差别不明显。从图 6(b) 中可以清晰地观察到空气层缺陷的信息 ($Z=-8$)。吸波垫对太赫兹波的吸收作用导致在太赫兹分层图像中无法辨别吸波垫上表面和样件下表面图像, 故缺少与图 5(b)、(d) 对

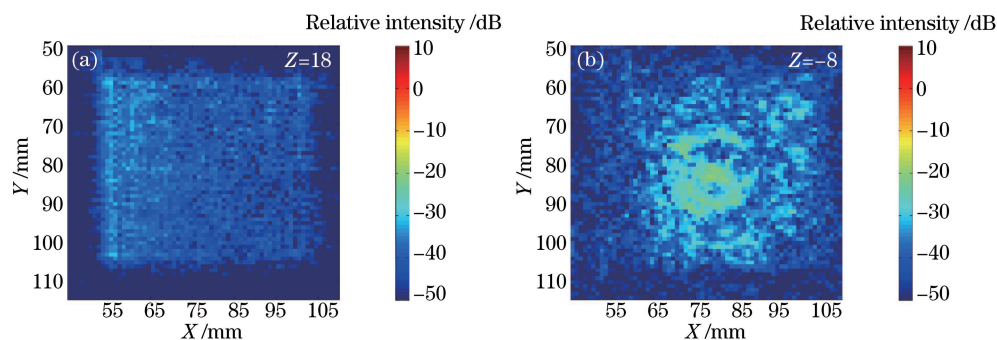


图 6 吸波材料为底时, 真实空气层样件不同深度太赫兹二维图像。(a) 样件上表面; (b) 胶层空气缺陷

Fig. 6 Terahertz two-dimensional images of air layer specimens at different depths when absorbing mat is at bottom. (a) Upper surface of specimen; (b) air defects within bonded layer

应的太赫兹二维图像。

结合图 5、6 中胶层空气缺陷所在的位置可知,样件上表面到胶层空气缺陷的光程为 26 mm,这是太赫兹波在样件上部分建筑材料中的光程,由此可以估算出建筑材料的折射率约为 1.30,在误差允许范围内认为该折射率数据与实验测试结果一致。从图 5、6 所得到的结果可知,从二维太赫兹图像中可以直接观察到三层胶接结构样件中胶层空气缺陷的位置及大小,表明利用 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统能够有效地检测到三层胶接结构样件内部存在的胶层空气缺陷。

4.2 样件空气缺陷区域的信号与正常胶粘处的比较分析

镜面为底时的检测结果如图 7 所示,其中 a、b、c 为曲线中的三个峰。

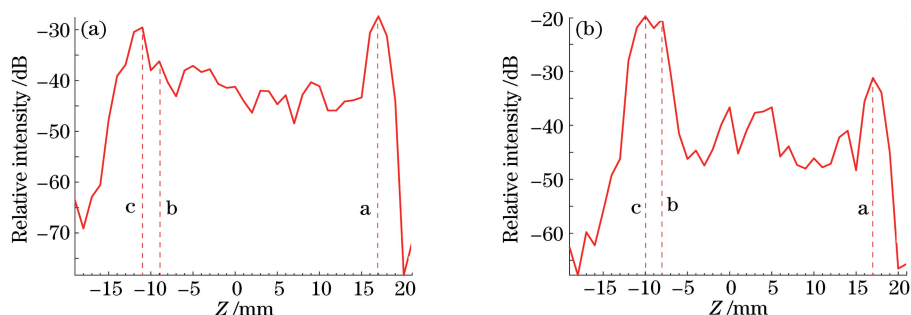


图 7 镜面为底时的不同深度检测结果。(a)正常胶粘区域的信号;(b)空气缺陷区域的信号

Fig. 7 Inspection results at different depths when mirror is at bottom. (a) Signals in normally-bonded area; (b) signals in air-defected area

由图 7(a)可知,三个峰的横坐标值依次为 $Z_a = 17$ mm、 $Z_b = -9$ mm、 $Z_c = -11$ mm。a 峰表示建筑材料上表面的反射信号,c 峰表示镜面上表面的反射信号。已知隔热垫和粘接剂折射率分别为 1.22 和 1.75,计算得到太赫兹波在隔热垫和粘接剂中的光程分别为 $S_1 = 2.20$ mm、 $S_2 = 0.88$ mm。由图 7(a)可知,c 峰与 b 峰的横坐标差 $\Delta Z_1 = Z_b - Z_c = 2$ mm,可认为 S_1 与 ΔZ_1 相差不大, $S_3 = S_1 + S_2$ 且 $S_3 > \Delta Z_1$,即 b 峰对应隔热垫上表面的反射信号。对探测器的性能而言,传输波形的相位噪声是影响穿透能力的重要因素。为了穿透材料并分辨不同物体的表面,探测器必须在上一个表面的强反射中检测到次一级表面的反射波,如果调制的载波携带较强的相位噪声,那么载波频率附近的展波会覆盖较弱的次级表面的反射波信号,这样就无法分辨距离较近的不同表面。由于粘接剂厚度太薄,此时隔热垫的上表面反射信号峰将粘接剂上表面反射信号峰覆盖,使得设备无法具体分辨两个表面的反射信号,在不同深度的信号图中无法观察到粘接剂上表面的反射信号峰。a 峰与 b 峰之间的光程差为 26 mm,建筑材料实际厚度为 20 mm,计算可得建筑材料的折射率约为 1.30。

从图 7(b)样件空气缺陷区域的信号图可知,b、c 峰对应的横坐标值分别为 $Z_b = -8$ mm、 $Z_c = -10$ mm,即两峰之间光程差 $\Delta Z_2 = Z_b - Z_c = 2$ mm,很显然 $\Delta Z_2 = \Delta Z_1$ 。图 7(a)与图 7(b)结论一致,即 b 峰为隔热垫的上表面反射信号。相对于图 7(a),图 7(b)中 a 峰与 b 峰之间光程差变小,b 峰、c 峰提前出现,表明图 7(b)中信号曲线反映了空气层缺陷区域的反射信号。对比图 7(a)与图 7(b)中 b 峰、c 峰峰值大小,可知图 7(b)中 b 峰、c 峰的峰值明显增加,表明空气层的存在减少了对太赫兹波的吸收和反射,使得镜面和垫的反射信号增强。从样件不同深度信号图像的对比上可以明显看出两个区域反射信号的差别,这也可以作为判断样件真实空气层缺陷存在的依据。

吸波材料为底时的检测结果如图 8 所示。以吸波材料为底时,太赫兹波在进入吸波材料后不会被反射,故在图像上无法获得检测平台上表面的信息,即 b 峰之后没有其他峰。结合之前的分析,a 峰为样件上表面的反射信号,b 峰为垫上表面的反射信号,由图 8(a)可知, $Z_a = 18$ mm、 $Z_b = -8$ mm,a 峰与 b 峰之间的光程差为 $\Delta Z_3 = Z_a - Z_b = 26$ mm。图 8(b)中 $Z_a = 18$ mm、 $Z_b = -7$ mm,a 峰与 b 峰之间光程差为 $\Delta Z_4 = Z_a - Z_b = 25$ mm,可知 $\Delta Z_3 > \Delta Z_4$,相对于图 8(a),图 8(b)中 a 峰与 b 峰之间光程差变小,b 峰提前出现,表明图 8(b)中信号曲线反映的是空气层缺陷区域的反射信号,该结论与图 7 所得结论一致。对比图 8(a)、(b)中 a、b 峰峰值大小可以发现,空气缺陷区域的 b 峰峰值明显增加,表明空气层的存在减少了对太赫兹波的吸收和反射,使得垫的反射信号增强,这也可以证明空气层缺陷的存在。

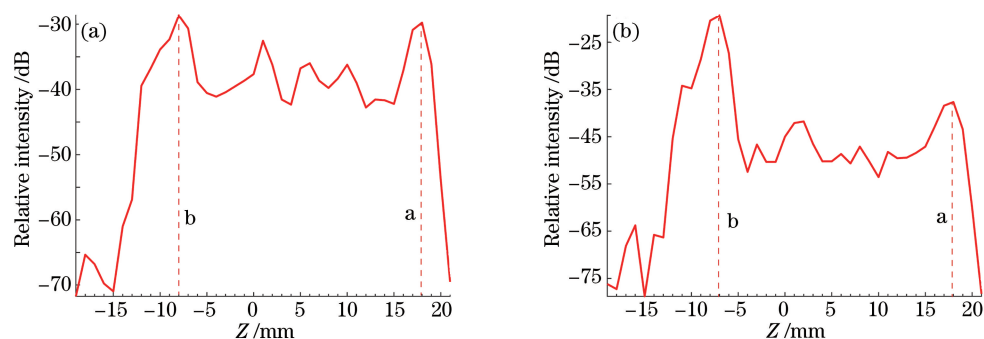


图 8 吸波材料为底时的不同深度检测结果。(a)正常胶粘区域的信号;(b)空气缺陷区域信号

Fig. 8 Inspection results at different depths when absorbing mat is at bottom. (a) Signals in normally-bonded area; (b) signals in air-defected area

5 结 论

在三层胶接结构胶层中设置空气缺陷,利用德国 SynViewScan 300 连续太赫兹成像系统对样件进行了无损检测。检测结果表明,SynViewScan 300 能够清晰地分辨出胶层空气缺陷的位置及大小。对比太赫兹二维图像及不同区域的深度信号,证明了空气层缺陷的存在,验证了胶接结构中人工胶层空气缺陷的存在,并验证了对胶层空气缺陷进行检测的可行性。太赫兹无损检测技术为实际工程领域中胶接结构胶层缺陷的检测提供了可行的方法。

目前,太赫兹无损检测技术在空间分辨率、太赫兹波源功率、检测速度等方面还有待提升,对太赫兹无损检测图像的处理需要更加深入,以实现二维太赫兹图像到三维立体图像的转变。需注重对样件的三维重构,以实现探测数据的三维可视化,这对太赫兹无损检测技术的发展具有重要意义。

参 考 文 献

- [1] Fu Tianhang, Liu Songping. Review of manual scan ultrasonic imaging methods for composite materials[J]. Nondestructive Testing, 2012, 34(8): 50-54.
傅天航, 刘松平. 浅谈复合材料超声手动扫描成像检测[J]. 无损检测, 2012, 34(8): 50-54.
- [2] Zhou Le, Zhang Zhiwen. Nondestructive testing and its new technology[J]. Journal of Chongqing Institute of Technology, 2006, 20(8): 46-48.
周 乐, 张志文. 无损检测及其新技术[J]. 重庆工学院学报, 2006, 20(8): 46-48.
- [3] 夏纪真. 无损检测导论[M]. 广州: 中山大学出版社, 2010: 6.
- [4] Yang J, Ruan S C, Zhang M, *et al.* Real-time continuous-wave imaging with a 1.63 THz OPTL and a pyroelectric camera[J]. Optoelectronics Letters, 2008, 4(4): 295-298.
- [5] 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.
- [6] Xu Jingzhou, Zhang Xicheng. Terahertz science technology and application[M]. Beijing: Peking University Press, 2007: 1-251.
许景周, 张希成. 太赫兹科学技术和应用[M]. 北京: 北京大学出版社, 2007: 1-251.
- [7] 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.
- [8] Li Q, Li Y D. Continuous-wave 2.52 terahertz Gabor inline compressive holographic tomography[J]. Applied Physics B, 2014, 117(2): 585-596.
- [9] Dobroiu A, Yamashita M, Ohshima Y N, *et al.* Terahertz imaging system based on a backward-wave oscillator[J]. Applied Optics, 2004, 43(30): 5637-5646.
- [10] Yang Zhengang, Liu Jinsong, Wang Kejia. Terahertz nondestructive inspection for adhesive face with composite

- materials and steel plate[J]. *Nondestructive Testing*, 2014, 36(4): 42-44.
- 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, 36(4): 42-44.
- [11] Zhong H, Xu J Z, Xie X, *et al.* Nondestructive defect identification with terahertz time-of-flight tomography[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2005, 5(2): 203-208.
- [12] Walker J L, Richter J D. Nondestructive evaluation of foam insulation for the external tank return to flight[C]. 42ed AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Joint Propulsion Conference & Exhibit, 2006.
- [13] Karpowicz N, Zhong H, Xu J Z, *et al.* Non-destructive sub-THz CW imaging[C]. *SPIE*, 2005, 5727: 132-142.
- [14] Jördens C, Scheller M, Wietzke S, *et al.* Terahertz spectroscopy to study the orientation of glass fibres in reinforced plastics[J]. *Composites Science and Technology*, 2010, 70(3): 472-477.
- [15] Nezadal M, Schur J, Schmidt L P. Non-destructive testing of glass fibre reinforced plastics with a synthetic aperture radar in the lower THz region[C]. 37th International Conference on Infrared, Millimeter, and Terahertz Waves, 2012: 13192426.
- [16] am Weg C, von Spiegel W, Henneberger R, *et al.* Fast active THz cameras with ranging capabilities[J]. *Journal of Infrared, Millimeter and Terahertz Waves*, 2009, 30(12): 1281-1296.
- [17] Yang Zhengang, Liu Jinsong, Wang Kejia. 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.
- 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.
- [18] Liu Bao, Liu Junmin. A method of the realization of high accuracy in FMCW ranging system[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrument*, 2001, 15(3): 41-45.
- 刘 宝, 刘军民. FMCW 雷达快速高精度测距算法[J]. *电子测量与仪器学报*, 2001, 15(3): 41-45.
- [19] Zhao Biqiang, Wei Xuli, Yang Zhengang, *et al.* Terahertz nondestructive inspection of heat shield [J]. *Laser Technology*, 2015, 39(2): 185-189.
- 赵毕强, 魏旭立, 杨振刚, 等. 隔热板的太赫兹无损检测[J]. *激光技术*, 2015, 39(2): 185-189.