

# 基于太赫兹时域光谱的胶层厚度均匀性检测

李丽娟,周明星,任姣姣

(长春理工大学光电测控技术研究所,吉林 长春 130022)

**摘要:**太赫兹波与不同的介质相互作用,探测器在不同的时间节点检测到携带介质信息的太赫兹时域波形,分析不同时域波形峰值点的飞行时间差,分别建立了透射式和反射式太赫兹无损检测单点厚度提取模型。在柔性装配过程中,一般有机硅胶的折射率难以提取,基于单点厚度提取模型,绘制了胶层空间分布三维形貌图,并提出了采用厚度均匀性标准偏差的方法评价胶层空间分布离散性。太赫兹时域光谱技术系统分析胶层厚度的均匀性,检测精度可达 $100\ \mu\text{m}$ ,对保证胶层连接强度有重要意义。

**关键词:**太赫兹;无损检测;胶层厚度均匀性

**中图分类号:** O433    **文献标识码:** A    **DOI:** 10.3969/j.issn.1001-5078.2014.07.020

## Test of the adhesive thickness uniformity based on terahertz time-domain spectroscopy

LI Li-juan, ZHOU Ming-xing, REN Jiao-jiao

(Institute of Photoelectric Measurement and Control Technology, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

**Abstract:** When THz waves interact with different media, detector detects the THz time-domain waveform of carrying media information at different time nodes, the flight time difference between the THz pulses is analyzed, extraction model of transmission and reflection THz nondestructive inspection of single point thickness are established respectively. In flexible assembly process, refractive index of silicone adhesive is difficult to be extracted. Based on the single-point thickness extracting model, a three-dimensional topography of adhesive spatial distribution is drawn, and the standard deviation for thickness uniformity is put forward to evaluate the discreteness of adhesive spatial distribution. Analyzing the uniformity of adhesive thickness using THz-TDS system, the detecting accuracy is up to  $100\ \mu\text{m}$ , and it is important for ensuring the adhesive connection strength.

**Key words:** terahertz; nondestructive inspection; adhesive thickness uniformity

### 1 引言

随着复合材料普遍应用,柔性装配成为连接复合材料构件的关键技术。胶层连接技术因应力分布均匀、连接效率高、质量轻、抗疲劳和密封性好等优点而得到广泛应用。但胶层厚度不均匀导致应力分布不平衡,影响构件间的连接强度。分析胶层厚度均匀性,保证实现胶层功能是必要的,同时对节约胶料和减少涂胶污染也有重要的意义。

太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)是近年来基于超短脉冲技术基础上发展的一种全新的太赫兹光谱测量技术,通过分析对透射样品和自由空间中

效长度之间的太赫兹脉冲时间分辨电场的相对变化<sup>[1]</sup>。目前,使用THz-TDS系统对材料进行光谱分析,主要是为了获得被测材料在太赫兹波段的复介电常数、色散和吸收等物理和化学参数,并利用这些参数研究物质成分、结构及其相互作用关系<sup>[2-4]</sup>,但仍未开展应用THz-TDS系统对材料厚度均匀性检测的相关研究。

**基金项目:** 国家863重大项目(No. 2012AA7060407)资助。

**作者简介:** 李丽娟(1972-),女,教授,博士,主要研究领域为太赫兹科学与应用。

**收稿日期:** 2014-03-03

## 2 太赫兹无损检测厚度均匀性检测

电磁波与物质的相互作用通常用材料的复折射率  $\tilde{n} = n + i\beta$  来描述,它是波长的函数,复折射率的实部  $n$  和虚部  $\beta$  分别为折射率和消光系数<sup>[1]</sup>。在均匀各向同性介质中,沿  $z$  方向传播、波长为  $\lambda$  的电磁波可以表述为:

$$E(x) = E_0 \exp\left(-\frac{2\pi\beta z}{\lambda}\right) \exp\left[\frac{2\pi i}{\lambda}(nz - ct)\right] \quad (1)$$

太赫兹波也属于电磁波,以相同方式在介质中传播。由于太赫兹波对物质具有选择性的穿透能力,不同物质在太赫兹频段具有不同的响应,很多非极性电介质材料对太赫兹辐射透明,但太赫兹波会被金属材料反射。因此,可根据实验材料性质,选择透射和反射的实验方式检测样品厚度的均匀性。

### 2.1 太赫兹无损检测单点厚度提取模型

在不同介质中传播,由于介质分界面处折射率改变,太赫兹波发生透射和反射,原理如图1所示。假设样品是各向同性的,太赫兹波以角度  $\theta_i$  入射,在空气-介质交界面产生太赫兹回波,记作参考信号  $E_{up}$ ;透射的太赫兹波,在样品下表面反射,探测器检测到携带样品信息的太赫兹回波  $E_{down}$ 。

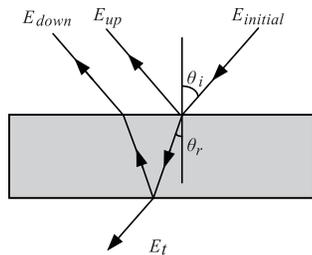


图1 THz波反射原理

Fig. 1 THz wave reflection principle

根据太赫兹波的传播理论,建立了反射式单点厚度提取模型:

$$\begin{aligned} d &= \frac{c \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i}}{2n} (T_{down} - T_{up}) \\ &= \frac{c \sqrt{n^2 - n_0^2 \sin^2 \theta_i}}{2n} \Delta T \end{aligned} \quad (2)$$

当太赫兹波垂直入射时,单点厚度提取模型可简化为:

$$d = \frac{c}{2n} (T_{down} - T_{up}) = \frac{c}{2n} \Delta T \quad (3)$$

其中,  $d$  为样品的厚度;  $T_{up}$  和  $T_{down}$  分别为  $E_{up}$ 、 $E_{down}$  的飞行时间;  $n$  为样品折射率;  $c$  为光在空气中的传播速度。

同样,通过检测透射空气和被测样品的参考信

号  $E_{ref}$  和透射信号  $E_{sam}$ ,建立了透射式单点厚度提取模型,公式(4)说明了飞行时间差是光程变化的直接表现形式:

$$d = \frac{c}{n - n_0} (T_{sam} - T_{ref}) = \frac{c}{n - n_0} \Delta T \quad (4)$$

其中,空气和样品折射率分别为  $n_0$  和  $n$ ;  $T_{sam}$  和  $T_{ref}$  分别为  $E_{ref}$ 、 $E_{sam}$  的飞行时间。

### 2.2 太赫兹无损检测系统厚度均匀性检测分析

在样品折射率已知的情况下,通过检测太赫兹回波的飞行时间差可准确地获得样品厚度。然而,一般在工程试验中,样品的光学参数难以提取,且回波飞行时间差即可反应被测样品的厚度信息,因此,用反射式厚度相关系数  $\rho$  简化厚度模型:

$$d = \rho \cdot \Delta T \quad (5)$$

同样,用透射式厚度相关系数  $\tau$  简化透射式太赫兹无损检测单点厚度提取模型:

$$d = \tau \cdot \Delta T \quad (6)$$

通常,可通过检测样品标准件的若干空间分布点,采用飞行时间差平均化的方法来获得样品厚度相关系数。而在工程应用中,一般很难制作样品标准件,所以,也可通过人为设置厚度相关系数的方法来简化样品厚度模型。对样品空间分点云进行检测分析,绘制空间分布三维形貌图,分析样品厚度均匀性。其中,  $X$ 、 $Y$  轴表示样品的空间位置,  $Z$  轴表示回波飞行时间差,曲面形貌直接反映了样品的分布均匀性。从色度变化也能够反映厚度分布情况,平均值所对应的颜色代表理想色度,通过色度对比可量化分析样品厚度空间分布相对于平均值的波动量。

采用厚度均匀性标准差  $SD.T.U$  量化表示样品空间分布的离散性,其中,  $\Delta \bar{T}$  可表示为飞行时间差平均值或标准值,  $SD.T.U$  数值越小,说明样品的空间分布越均匀。

$$SD.T.U = \rho \cdot \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\Delta T_i - \Delta \bar{T})^2}{N - 1}} \quad (7)$$

经过计算,最终得到可信赖的厚度值:

$$d = \bar{d} \pm SD.T.U \quad (8)$$

## 3 实验及数据分析

### 3.1 实验装置

实验用美国 Picometrix 公司的 T-Ray 5000 系统如图2所示。该系统是一个紧凑,自包含高度集成,采用光导天线法产生并检测太赫兹脉冲的时域系统,主要由飞秒激光器、太赫兹发射元件、太赫兹

探测元件以及时间延迟系统组成。该 THz - TDS 系统脉冲宽度为 0.1 ~ 3.5 THz, 信噪比 > 70 dB (频域 1 h 平均), 快速扫描范围 320 ps, 扫描频率 100 Hz, 光谱分辨率 < 8 GHz, 深度分辨率 100 μm。



图2 THz - TDS 系统图  
Fig. 2 THz - TDS system

### 3.2 单点厚度提取模型分析

实验在室温 (25℃), 空气湿度为 20% 的条件下进行, 采用反射式 THz - TDS 系统对厚度为 25 mm 的某复合材料标准件进行反射式单点检测, 获得被测样品的太赫兹时域波形。图 3 为标准件上某一点的反射式太赫兹时域波形图, 前一波形为标准件上表面回波, 其峰值时间节点为 46.9 ps; 后一波形为标准件下表面回波, 其峰值时间节点为 265.8 ps, 则回波飞行时间差为 218.9 ps。通过测量多个空间点, 取其平均值得到飞行时间差  $\Delta T$  为 218.93 ps, 由公式 (5) 求得  $\rho$  为 0.114, 则  $d = 0.114\Delta T$ 。

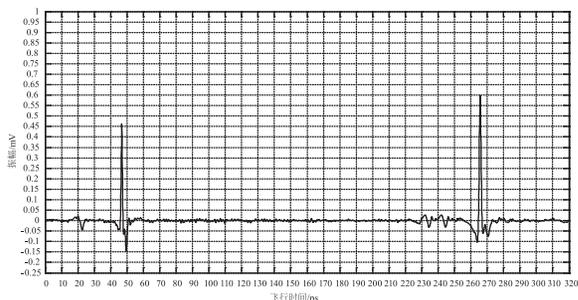


图3 反射式 THz 时域波形图  
Fig. 3 Reflection THz domain waveform

### 3.3 厚度均匀性分析

有机硅胶粘剂通常被用于复合材料的生产和柔性装配领域。作为复合材料与金属构件柔性装配的连接介质, 胶层的厚度不仅决定着连接强度, 而且影响使用寿命, 因此, 对胶层厚度均匀性进行分析有重要的意义。

在实验室模拟复合材料与铝板柔性装配的过程, 为了避免复合材料对实验结果的影响, 将有机硅胶粘剂直接涂在抛光的铝板上 (铝板被完全覆盖), 铝板尺寸为 50 mm × 50 mm, 胶层厚度约为 2 mm。为了使实验结果能够准确地反应胶层厚度的变化, 在涂胶过程中, 胶层中心区域被人为增厚, 实验样品如图 4 所示。

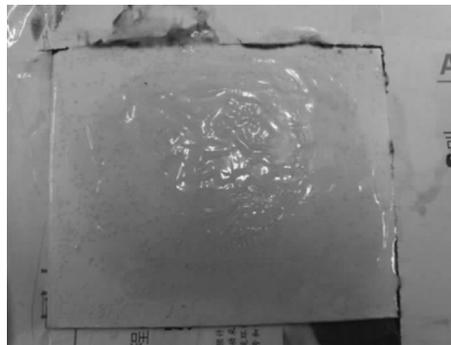


图4 实验样品  
Fig. 4 Testing sample

实验在室温 (25℃), 空气湿度为 20% 的条件下进行, 由于太赫兹脉冲无法透射铝板, 实验选用反射式检测方式, 采用逐点扫描的方式检测被测样品, 获得胶层空间分布点云。由于难以制作胶层分布的标准件, 对反射式厚度相关系数难以提取, 因此, 采用设置厚度相关系数的方法对厚度提取模型进行简化, 并绘制了胶层空间分布三维形貌图, 如图 5 所示。从图中可清晰地分辨出胶层厚度均匀性信息, 整个三维形貌图的形貌特征从边缘到中心是变化的, 且变化非常明显, 说明中心区域胶层较厚, 边缘处胶层胶薄。从色度变化可以量化分析相对于平均值的厚度变化程度。飞行时间差 19.1715 ps 所对应的胶层厚度  $\bar{d}$  为 2.032 mm, 相对于平均厚度的上波动最大值为 0.384 mm, 下波动最大值为 0.464 mm。根据公式 (7) 所求得的厚度均匀性标准差  $SD. T. U = 0.1189$ , 说明该被测样品的胶层厚度均匀性较差。

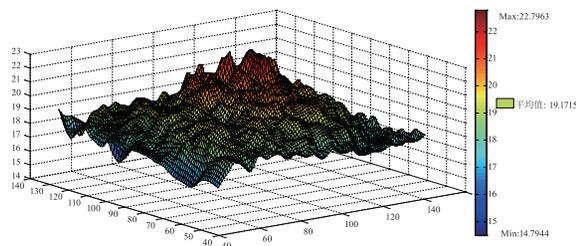


图5 胶层空间分布三维形貌图

Fig. 5 Three-dimensional topography of adhesive spatial distribution

## 4 结论

本文在复合材料标准件的折射率未知的情

下,采用检测标准件的方法对单点厚度提取模型进行了简化,使该厚度模型具有通用性。并在实验室模拟了复合材料与金属构件柔性装配过程,采用逐点扫描方式对有机硅胶进行了均匀性检测,获得了有机硅胶空间分布点云,绘制了胶层空间分布三维形貌图,形貌特征直接反应了胶层厚度均匀性,并提出了采用厚度均匀性标准偏差的方法评价胶层空间分布离散性。采用 THz - TDS 系统分析厚度均匀性具有精度高,操作简单,对人体无危害等优点,可用于实时检测复合材料的生产和柔性装配过程,有利于缩减生产周期,保证工程质量。

### 参考文献:

- [1] LI Jingzhen. Hand book of optics[M]. Xi'an; Xi'an science and technology press, 2010; 371 - 401. (in Chinese)  
李景镇. 光学手册[M]. 西安: 西安科学技术出版社, 2010; 371 - 401.
- [2] ZHANG Cunlin, MU Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2010, 02; 1 - 14. (in Chinese)  
张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. 激光与光电子学进展, 2010, 02; 1 - 14.
- [3] WANG Xiumin. Determine sample thickness in the process of terahertz spectrum analysis using error theory [J]. Laser and Infrared, 2009, 39 (8): 884 - 886. (in Chinese)  
王秀敏. 太赫兹光谱分析中用误差理论确定样品厚度的研究[J]. 激光与红外, 2009, 39(8): 884 - 886.
- [4] CHEN Liqun, GAO Fei, GONG Xiaojing. Extraction of refractive indices of materials through transmission terahertz time-domain spectroscopy [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2013, 02; 160 - 164. (in Chinese)  
陈立群, 高飞, 龚小竞. 一种利用透射式太赫兹时域光谱技术精确提取样品折射率的方法[J]. 红外与毫米波学报, 2013, 02; 160 - 164.
- [5] Lionel Duvillaret, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. Applied Optics, 1999. 1.
- [6] Ryan Michael Smith. Terahertz frequency analysis of gaseous and solid samples using Terahertz time-domain spectroscopy [D]. University of Iowa, 2012.
- [7] Lionel Duvillaret, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz. Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. Applied Optics, 1999. 1.
- [8] Lionel Duvillaret, Frederic Garet, Jean-Louis Coutaz. A reliable method for the extraction of material parameters of thick and thin samples in THz time-domain spectroscopy [J]. IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics, 1996; 248 - 251.
- [9] LI Jing. Studies on the terahertz time-domain spectroscopy signal analysis and substance identification methods based on the geometric algebra [D]. Xi'an; Xidian University, 2012. (in Chinese)  
李静. 基于几何代数的太赫兹时域光谱信号分析及物质识别方法研究 [D]. 西安: 西安电子科技大学, 2012.
- [10] Christopher D STOIK. Nondesructive evaluation of aircraft composites using terahertz time domain spectroscopy [D]. Wright-patterson AFB: Graduate School of Engineering and Management Air Force Institute of Technology, 2008.
- [11] CAO Binghua, ZHANG Guangxin, ZHOU Zekui. New method for paper basis weight measurement based on terahertz time-domin spectroscopy [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2009, 28(4): 241 - 245.
- [12] Dorney T D, Baraniuk R G, Mittleman D M. Material parameter estimation with terahertz time - domain spectroscopy [J]. Journal of the Optical Society of America A: Optics, Image Science and Vision, 2001, 7; 1562 - 1571.
- [13] Duvillaret L, Garet F, Coutaz, J L. (1999). Highly precise determination of optical constants and sample thickness in terahertz time-domain spectroscopy [J]. Optics Express, 2007, 4; 409 - 415.
- [14] CAO Binghua, HOU Dibo, YAN Zhigang, et al. Method for detection of pesticide residue based of Terahertz timg - domain spectroscopy [J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2008, 06; 429 - 432. (in Chinese)  
曹丙花, 侯迪波, 颜志刚, 等. 基于太赫兹时域光谱技术的农药残留检测方法 [J]. 红外与毫米波学报, 2008, 06; 429 - 432.