

太赫兹时域光谱反射式层析成像技术

任姣姣¹, 李丽娟^{1*}, 张丹丹¹, 乔晓利²

- (1. 长春理工大学 光电工程学院 光电测控技术研究所, 吉林 长春 130022;
2. 长春理工大学 机电工程学院, 吉林 长春 130022)

摘要: 改性聚丙烯(PP)材料由于其阻燃、高抗冲性能等特点被广泛应用在汽车仪表板、保险杠等汽车配件中,采用无损探伤技术对改性 PP 材料进行检测是汽车配件质量保证的必要手段。搭建了透射式太赫兹时域光谱系统及反射式太赫兹时域光谱成像系统,采用透射式 THz-TDS 系统对改性 PP 材料的光学参数进行了检测,测定了该材料在太赫兹波段的折射率,其数值为 1.53。设计了一种改性 PP 材料平底洞样品,采用反射式 THz-TDS 成像系统对其进行成像,采用了反卷积滤波技术对 THz 信号进行处理,提高了信号的信噪比,提出了一种基于飞行时间的太赫兹时域光谱层析成像技术,采用已测定的改性 PP 材料的折射率,通过飞行时间层析成像技术对该样品的太赫兹检测结果进行了三维重构,厚度测量精度为 0.01 mm。

关键词: 太赫兹时域光谱; 层析成像; 改性聚丙烯

中图分类号: O433.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201847.0225002

Terahertz time domain spectral reflective tomography technology

Ren Jiaojiao¹, Li Lijuan^{1*}, Zhang Dandan¹, Qiao Xiaoli²

- (1. Institute of Optoelectronics Measurement & Control Technology, College of Opto-electronic Engineering,
Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China;
2. College of Mechanical and Electric Engineering, Changchun University of Science and Technology, Changchun 130022, China)

Abstract: The modified polypropylene(PP) material has been widely used in dashboard, bumper and other auto parts because of its characteristics of flame retardant, high impact resistance, etc. It is a necessary means to improve the quality of auto parts by using the nondestructive testing technology to detect the modified PP material. A transmission terahertz time-domain spectroscopy(THz-TDS) imaging system and a reflective THz-TDS imaging system were built. The optical parameters of modified PP materials were extracted by adopting the transmission THz-TDS system. The refractive index, one of the optical parameters in terahertz band can be solved through the mathematics model, its value was 1.53. A kind of modified PP material sample with flat bottom holes was designed. The reflective THz-TDS imaging system was adopted for measuring the sample, the deconvolution method was used to filter the time domain THz signal, which largely improved the signal-to-noise ratio. What's more, THz-TDS tomography imaging technology was proposed based on the time of flight. Combined with the measured

收稿日期: 2017-08-10; 修订日期: 2017-10-28

基金项目: 国家高技术研究发展计划(2015AA6036A); 国防技术基础科研(JSZL2015411C002)

作者简介: 任姣姣(1988-), 女, 讲师, 博士, 主要从事太赫兹无损检测及应用方面的研究。Email: zimengrenjiao@163.com

通讯作者: 李丽娟(1972-), 女, 教授, 博士生导师, 博士, 主要从事数字化光电精密测量与装配、太赫兹无损检测及应用方面的研究。

Email: custjuan@126.com

refractive index, the 3D structure of the modified PP material was reconstructed with the time of flight tomography imaging technique, the thickness accuracy is 0.01 mm.

Key words: THz-TDS; tomography; modified polypropylene

0 引言

改性聚丙烯,是指聚丙烯(PP)塑料经过填充、共混、增强等方法加工,从而使之具有阻燃、高抗冲等性能^[1],PP 材料用于汽车工业具有较强的竞争力,但因其模量耐热性较低,抗冲击强度较差,因此不能直接用作汽车配件,轿车中使用的均为改性 PP 产品,其耐热性可由 80 °C 提高到 145~150 °C,并能承受高温 750~1 000 h 后不老化、不龟裂。产品可以作为汽车仪表板、保险杠,改性 PP 材料用作汽车配件具有十分广阔的应用前景。采用无损探伤技术对改性 PP 材料进行检测是汽车配件质量保证的必要手段。

太赫兹波指的是频率范围在 0.1~10 THz 之间的电磁波,其可穿透纸、涂料、泡沫、塑料、玻璃等几乎所有的绝缘材料^[2],该特性使得复合材料的太赫兹无损检测的发展越来越快。目前太赫兹无损检测主要分为连续太赫兹无损检测和太赫兹时域光谱无损检测,连续太赫兹波只能获得被测材料的振幅信息,太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术是近年来在飞秒激光脉冲技术基础上发展的一种全新光谱测量技术,通过宽频带的太赫兹脉冲发射和接收前后的振幅变化及其飞行时间及等参量来携带太赫兹波飞行路径上的介质信息,从而定性定量地对样品进行内部探伤检测^[3-4]。

太赫兹波层析成像的方式主要有两种:透射和反射,透射方式是太赫兹波与被测物体的截面处于同一个平面,获取的投影信息是被测物体的介质对太赫兹波的吸收效应所产生的。反射方式是太赫兹波与被测物体的截面相交,获取的投影信息是被测物体的介质对太赫兹波的反射效应所产生的^[5]。

文中提出了一种基于飞行时间的太赫兹时域光谱层析成像技术,通过提取所设计的改性 PP 材料平底洞样品的光学参数,高精度重构其三维无损检测结果,利用飞行时间层析成像技术清晰分辨材料平底洞的大小和深度。

1 反射式太赫兹时域光谱层析

1.1 光学参数提取

考虑到采用反射式提取方式提取到的材料光学参数,尤其是折射率参数为群折射率,即在多个频段内的平均折射率,文中以透射式 THz-TDS 系统为例,对待测样品材料的光学特性进行研究,通常情况下需要记录两次 THz 脉冲来提取待测样品材料的光学参数,第一次是对不放样品时的采样,第二次是对放置样品后的采样。文中认为被测样品的表面均为光滑表面,样品和邻近的介质是磁各向同性、无表面自由电荷的物质,三种介质的电磁响应为线性关系。假设样品厚度为 l ,分别获得相应的 THz 时域信号 $E_{\text{ref}}(t)$ 、 $E_{\text{sam}}(t)$,将其时域信号通过傅里叶变化转换至频域 $E_{\text{ref}}(\omega)$ 、 $E_{\text{sam}}(\omega)$,样品的传递函数可表示为:

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}_1}{(1+\tilde{n}_1)^2} \exp\left(-j\frac{\omega d}{c}(\tilde{n}_1-1)\right) = \rho(\omega) \exp[-j\phi(\omega)] \quad (1)$$

当研究样品在 THz 波段的吸收很弱,即 $\kappa \ll n$ 时,由此可对样品的折射率、消光系数和吸收系数进行求解。

$$n(\omega) = \phi(\omega) \frac{c}{\omega d} + 1 \quad (2)$$

$$\kappa(\omega) = \ln \left[\frac{4n(\omega)}{\rho(\omega)[1+n(\omega)]^2} \right] \frac{c}{\omega d} \quad (3)$$

$$\alpha_1(\omega) = \frac{2\kappa_1(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln \left[\frac{4n_1(\omega)}{\rho(\omega)[1+n_1(\omega)]^2} \right] \quad (4)$$

1.2 反射式脉冲太赫兹层析成像

反射式脉冲太赫兹层析成像是最早应用太赫兹时域光谱(THz-TDS)技术实现的,它是 1997 年由 Mittleman 首先提出太赫兹飞行时间三维成像技术^[6],通过记录待测样品不同层反射回来的太赫兹信号进行三维信息重构。文中所指的反射式层析成像便是基于飞行时间的三维成像,文中采用了反卷积滤波

技术。对任一空间采样点 (x,y) ,反卷积滤波技术主要指将检测到的信号与由平面反射镜检测到的信号做反卷积的一种信号处理技术^[7]。经过样品反射后由探测器接收到的信号设为 $y(t)$,由平面反射镜反射后由探测器接收到的信号设为 $x(t)$,引入样品的传递函数 $h(t)$,那么 $y(t)$ 可表示为 $x(t)$ 与 $h(t)$ 的卷积,即:

$$y(t)=h(t)\times x(t)=\int_{-\infty}^{\infty}h(\tau)x(t-\tau)d\tau \quad (5)$$

在频域上,公式(1)可写为:

$$Y(\omega)=H(\omega)\times X(\omega) \quad (6)$$

那么样品的传递函数可通过反卷积求得,即:

$$h(t)=F^{-1}\left(Y(\omega)\cdot\frac{1}{X(\omega)}\right) \quad (7)$$

由于在一些频率区域, $X(\omega)$ 的幅值很小,文中应用维纳滤波器作为反向滤波器避免发散。维纳滤波器可定义为:

$$W(\omega)=\frac{\overline{X(\omega)}}{|X(\omega)|^2+1/a} \quad (8)$$

式中: a 为被测信号功率与噪声功率的比值,也可假设其为常数。应用维纳滤波器后,样品的传递函数可表示为:

$$h(t)=F^{-1}[(Y(\omega)\cdot W(\omega))] \quad (9)$$

为了获得没有旁瓣单个峰值的时域波形,对公式(9)应用窗口函数。为了获得干净的半周期脉冲,将高斯函数作为窗口函数,半波宽为 T_{FWHM} 的高斯脉冲函数可表示为:

$$\exp\left(\frac{t^2}{-2(T_{FWHM}/2\sqrt{2\ln 2})^2}\right) \quad (10)$$

应用窗口函数之后的样品传递函数 $h(t)$ 可表示为:

$$h(t)=F^{-1}\{Y(\omega)\cdot W(\omega)\cdot F\{\exp[t^2/(-2)(T_{FWHM}/2\sqrt{2\ln 2})^2]\}\} \quad (11)$$

经由反卷积处理后,在不同介质分界面的 THz 反射脉冲更加清晰。

对于 k 层介质而言,当不考虑多次回波及材料吸收时,在不受时间窗口的限制下,笔者得到 $k+1$ 个所对应的反射回波;当材料为光学厚样品时,其在时间上完全可分,那么每层介质的厚度 d_j 可通过飞行时间差 $\Delta t=t_{j+1}-t_j$ 进行求解^[8-9],便可直接通过公式(12)求解:

$$d_j=\frac{c}{2n_j}\Delta t \quad (12)$$

式中: n_j 为第 j 层介质的折射率, t_{j+1} 、 t_j 对应于第 t_{j+1} 与 t_j 反射界面所对应的反射脉冲时间,即每个反射脉冲的时间位置与反射界面的深度相关。

2 实验

2.1 检测系统

文中搭建了太赫兹时域光谱系统,主要工作原理如图 1 所示。所采用的飞秒激光器为锁模钛蓝宝石飞秒激光器,产生的光脉冲中心波长为 810 nm,重复频率为 80 MHz,脉宽为 100 fs。飞秒激光脉冲作为泵浦和探测光源,经分束镜后分成两束,一大部分作为泵浦脉冲经过频率为 1.11 kHz 的斩波器斩波后照射在 InAs 晶片表面,激光斑点直径约 3 μm ,产生的 THz 辐射在样品处,光斑大小约为 1 mm。最后,经光电导取样测量获得时间分辨的 THz 光谱信息。该 TDS 系统的探测频谱宽度为 0.2~2.5 THz,频谱分辨率 3.1 GHz,信噪比大于 70 dB。

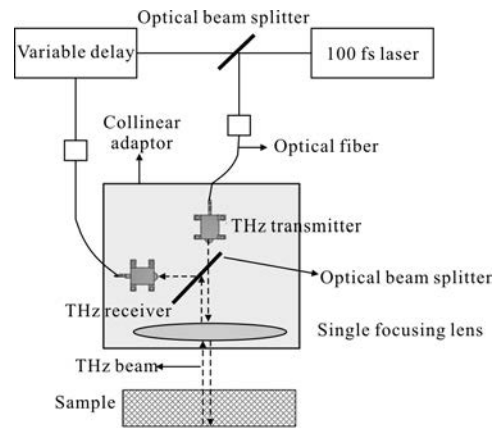
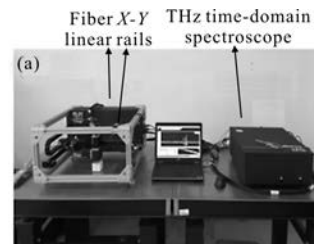


图 1 太赫兹时域光谱原理示意图

Fig.1 Principle of THz-TDS

图 2 所示为文中所搭建的反射式成像系统,将 THz 发射器与接收器通过共线适配器连接后固定至二维导轨上,结合二维导轨的运动,可逐点完成样品反射式 THz 时域光谱的检测。



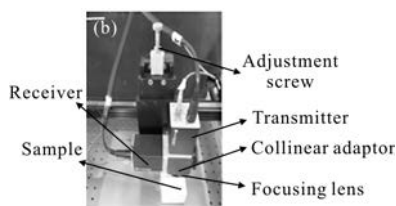


图 2 THz-TDS 反射式成像系统

Fig.2 Reflective THz-TDS imaging system

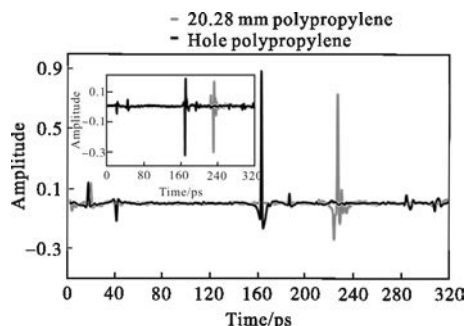


图 4 改性 PP 材料样品不同位置处的反射时域波形

Fig.4 Reflective time domain signals of modified PP material at different positions

2.2 样品制备

图 3 所示为改性 PP 材料平底洞样品设计图, 设计了三种不同深度、不同直径的平底孔, 图中第一组平底孔深度为 14 mm, 直径分布为 4、6、8、10、15、20 mm, 第二组平底孔深度为 16 mm, 第三组平底孔深度为 18 mm, 后两组直径分布与第一组相同。

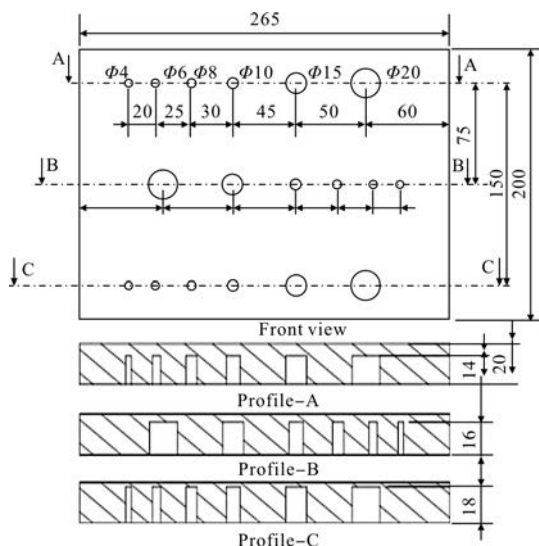


图 3 改性 PP 材料平底洞样品设计图

Fig.3 Design diagram of modified PP material bottom hole sample

3 结果与分析

图 4 所示为图 3 中改性 PP 材料样品的太赫兹时域波形, 其中灰色波形对应于设计厚度为 20 mm 处改性 PP 材料的太赫兹时域波形, 其实际厚度为 20.28 mm。图中两处峰对应材料上表面与下表面, 即材料与金属表面所反射的 THz 时域波形; 黑色对应于该样品上某一处平底洞位置处的时域波形, 其峰值对应于材料上表面、下表面、金属板及多次反射回波, 小窗图为未进行反卷积前两处位置的 THz 信号。图 5 为所测得的改性 PP 材料样品的折射率

曲线。

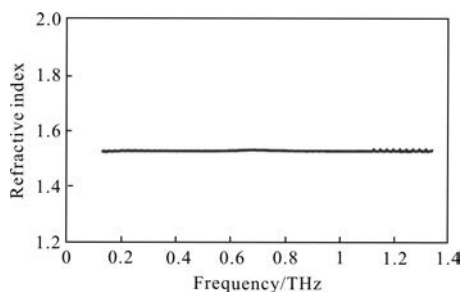


图 5 改性 PP 材料样品折射率曲线

Fig.5 Refractive index curve of modified PP material sample

图 6 所示为改性 PP 材料平底洞样品的 THz 时域信号功率谱成像图, 图中可清晰观测出平底洞的直径大小。在图 6 中选取某一平底洞位置处孔内、孔边缘处、孔外所对应的时域波形, 如图 7 所示。

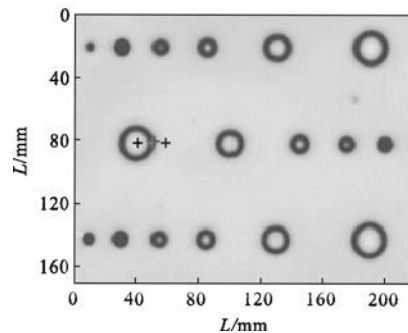


图 6 改性 PP 材料平底洞样品的 THz 时域信号功率谱成像图

Fig.6 THz time domain power spectrum imaging diagram of modified PP material bottom hole sample

从图 7 可以看出: 在小孔的边缘处, 由材料上表面、下表面返回的回波信号由于散射的影响信号幅值明显降低。

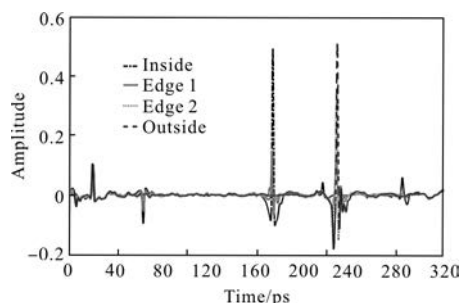


图 7 小孔内外的太赫兹时域波形

Fig.7 Terahertz time domain signals inside and outside the small hole

由公式(2)可知,当已知材料折射率时,便可通过飞行时间差对样品的三维结构进行重构,由图 7 可看出材料的多次反射较为严重,文中通过分析该材料样品不同厚度处下表面反射太赫兹回波,通过阈值设定的方式排除多次反射现象的影响,利用文中提出的反射式飞行时间太赫兹层析成像技术对其厚度进行重构获得如图 8 所示的结果,图中平底洞的大小、深度均可分辨,其中直径为 4 mm 的平底孔由

于制作过程中厚度不一致,文中未对其进行厚度成像。表 1 列出了三组平底孔的不同深度,其中检测厚度为采用太赫兹层析方法所测得的平底孔厚度,实际厚度为采用游标卡尺所测得的平底孔厚度,其中序号 1-X(X=2,3,4,5,6)指的是三组不同的平底孔,X 指的是每组平底孔按直径不同所对应的序号,利用两种方式可看出基于飞行时间的太赫兹时域光谱厚度检测精度为 0.01 mm。结合厚度分布差异图,结

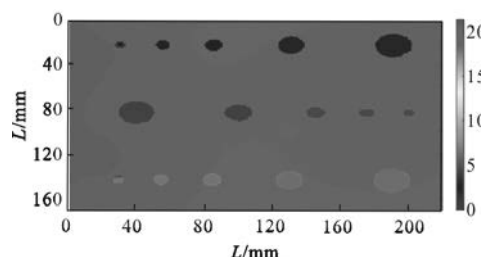


图 8 改性 PP 材料平底洞样品厚度分布差异图

Fig.8 Thickness distribution different map of modified PP material bottom hole sample

表 1 不同平底洞位置厚度(单位: mm)

Tab.1 Thickness of different bottom hole position (Unit: mm)

No.	Test thickness	Real thickness	No.	Test thickness	Real thickness	No.	Test thickness	Real thickness
1-2	2.474	2.45	2-2	4.479	4.45	3-2	6.368	6.34
1-3	2.417	2.40	2-3	4.402	4.4	3-3	6.359	6.34
1-4	2.388	2.36	2-4	4.316	4.30	3-4	6.32	6.3
1-5	2.263	2.26	2-5	4.124	4.12	3-5	6.09	6.04
1-6	2.254	2.26	2-6	4.114	4.12	3-6	6.109	6.08

合材料上下表面所对应的飞行时间可对平底洞样品的几何尺寸进行重构,图 9 所示即为孔洞型改性 PP 材料平底洞样品的三维重构图。

4 结论

文中首先建立了基于透射式太赫兹时域光谱的材料光学参数提取模型,提取了改性 PP 材料在太赫兹波段的折射率参数,该材料的折射率在 0.12~1.3 THz 之间为一个稳定的常数,其数值为 1.53。其次提出了基于飞行时间的反射式太赫兹时域光谱层析成像技术,针对 THz 时域信号提出了反卷积滤波技术,提高了 THz 时域信号的信噪比,使得各个界面返回的 THz 脉冲信号清晰可分辨。最后利用反射式太赫兹时域光谱系统对改性 PP 材料的标准平底洞样品进行了检测,采用已测定的改性 PP 材料的折射率,利用基于飞行时间的反射式太

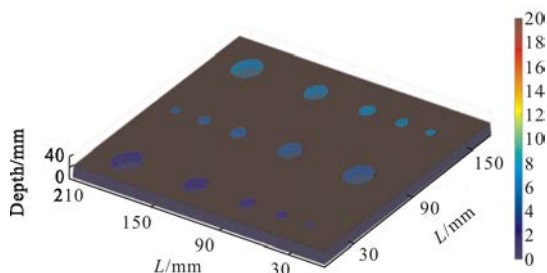


图 9 改性 PP 平底洞样品厚度三维重构图

Fig.9 Thickness 3D reconstruction map of modified PP material bottom hole sample

赫兹时域光谱层析成像技术对样品的三维模型进行了重构,厚度测量精度为 0.01 mm。

参考文献:

- [1] 张祎阳. 汽车用改性 PP 材料性能开发与应用 [J]. 科学与财富, 2016, 8(1): 539-540.
- [2] 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.
- [3] Hartwick T S, Hodges D T, Barker D H, et al. Far infrared imagery[J]. *Applied Optics*, 1976, 15(8): 1919-22.
- [4] Hu B B, Zhang X C, Auston D H, et al. Free-space radiation from electro-optic crystals [J]. *Applied Physics Letters*, 1990, 56(6): 506-508.
- [5] 潘中良, 陈翎, 谌贻会. 太赫兹波的层析成像 [J]. 数字技术与应用, 2013(12): 29-30.
- [6] Wang S, Zhang X. Pulsed terahertz tomography [J]. *Journal of Physics D Applied Physics*, 2004, 37(4): R1.
- [7] Takayanagi J, Jinno H, Ichino S, et al. High-resolution time-of-flight terahertz tomography using a femtosecond fiber laser [J]. *Optics Express*, 2009, 17(9): 7549-55.
- [8] Ren J, Li L, Zhang D, et al. Study on intelligent recognition detection technology of debond defects for ceramic matrix composites based on terahertz time domain spectroscopy [J]. *Applied Optics*, 2016, 55(26): 7204-7211.
- [9] Zhou Xiaodan, Li Lijuan, Zhao Duo, et al. Application of terahertz technology in nondestruct testing of ceramic matrix composite defects [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(8): 0825001. (in Chinese)