

基于 THz-TDS 的聚乙烯管道接头老化及缺陷检测实验分析

陈强¹, 王强^{2*}, 谷小红¹, 俞跃³, 凌张伟^{4,5}

¹中国计量大学机电工程学院, 浙江 杭州 310018;

²中国计量大学质量与安全工程学院, 浙江 杭州 310018;

³中国特种设备检测研究院, 北京 100029;

⁴浙江省特种设备检测研究院, 浙江 杭州 310018;

⁵浙江省特种设备安全检测技术研究重点实验室, 浙江 杭州 310018

摘要 基于太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)对聚乙烯管道接头的老化及常见缺陷进行检测,获得不同老化程度的聚乙烯样品的折射率与吸收系数,并对管道接头的典型缺陷进行成像检测。实验结果表明:随着老化时间延长,聚乙烯样品在 0.2~2.0 THz 频段内的折射率未发生明显变化,该频段内材料的吸收系数随着老化时间的延长而明显下降。太赫兹图像中缺陷区域与无缺陷区域的像素点存在明显区别,从图像中可以分辨出缺陷的位置及大致轮廓。

关键词 光谱学; 太赫兹时域光谱; 聚乙烯; 无损检测; 光氧老化; 反射式成像

中图分类号 O439.4

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP56.223001

Inspection of Aging and Defects of Polyethylene Pipe Joints Based on THz-TDS

Chen Qiang¹, Wang Qiang^{2*}, Gu Xiaohong¹, Yu Yue³, Ling Zhangwei^{4,5}

¹ College of Mechanical & Electrical Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

² College of Quality & Safety Engineering, China Jiliang University, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

³ China Special Equipment Inspection and Research Institute, Beijing 100029, China;

⁴ Zhejiang Provincial Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou, Zhejiang 310018, China;

⁵ Key Laboratory of Special Equipment Safety Testing Technology of Zhejiang Province, Hangzhou, Zhejiang 310018, China

Abstract Herein, the aging and common defects of polyethylene (PE) pipe joints are inspected based on terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS). The reflective indices and absorption coefficients of PE specimens with different aging time are calculated, and the imaging detection for the typical defects of pipe joints is conducted. It is found that the reflective indices of the PE specimens have no obvious change in 0.2-2.0 THz range after aging for a long time. However, the absorption coefficient shows a decreasing tendency with increasing aging time. Finally, the defects are imaged using reflective THz-TDS. Pixels around the defect areas are different from those around non-defect areas in THz images, and the defect position and outline are revealed in the THz images.

Key words spectroscopy; terahertz time-domain spectroscopy; polyethylene; non-destructive testing; photo-oxidation aging; reflective imaging

OCIS codes 300.6495; 300.1030; 160.4760; 320.7100

收稿日期: 2019-04-04; 修回日期: 2019-04-10; 录用日期: 2019-05-09

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFF0209704)

* E-mail: qiangwang@cjlu.edu.cn

1 引言

聚乙烯(PE)管道因耐腐蚀性好、价格低、可塑性好等优点而成为城市燃气管道的首选^[1]。聚乙烯燃气管道通常在现场进行焊接,在运输与焊接过程中外界环境、人为操作失误等可能会导致管道接头出现缺陷。此外,聚乙烯作为一种高分子有机材料,其自身的老化问题是不可避免的。上述缺陷的存在以及管道自身的老化威胁着燃气管道的使用安全。传统的管道检测手段包括 X 射线法、红外热成像、超声检测等,但它们在 PE 管道检测上均存在一定的局限性。X 射线法对聚乙烯管道接头的检测效果不理想^[2],红外热成像需要外部加热源供热^[3],而超声检测对操作人员的要求较高并且检测过程中需要耦合剂^[4]。传统方法对 PE 燃气管道接头缺陷的检测效果较差,并且现阶段对聚乙烯材料的老化还缺少一种较为有效的评估方法。

太赫兹(THz)波的电子能级低,不会对被测样品造成损坏,这一特性使其在无损伤检测领域展现出广阔的应用前景^[5]。国内外众多科研机构已将 THz 波应用于无损检测,并取得了许多有意义的成果:李铁军等^[6]对陶瓷基复合材料进行了成像检测,并建立了样品的 THz 波图像库,引入 5 个图像质量评价指标,通过指标融合处理得到了较高质量的图像,并利用 SIFT(尺度不变特征变换)特性实现了 THz 波图像的检索,取得了较好的检测效果;赖慧彬等^[7]利用药片孔隙率、折射率与吡啶美辛质量分数之间的关系建立了数学模型,验证了 THz 光谱法测量剂孔隙率的可行性;郭小弟等^[8]对带有不同缺陷的玻璃纤维复合材料样品的 THz 光谱特征进行深入研究后发现,在样品带有不同缺陷的情况下,材料整体的吸收系数与折射率不同;Dong 等^[9]利用 THz 波成像技术检测夹有聚四氟乙烯薄片的多层玻璃纤维样品,从成像结果中可以看出,无论是单层还是多层夹层,都可以被清晰地检测出来,而且可以实现对薄片深度的准确定位;Ospald 等^[10]搭建了连续波成像系统,并用其对航空复合材料中的缺陷进行检测,检测结果表明,THz 技术对航空复合材料中的大部分缺陷具有较高的检测能力;Abina 等^[11]对建筑隔热泡沫材料进行了检测,结果表明,THz 波成像技术在隔热泡沫材料的无损检测中具有巨大的应用前景。目前,将 THz 光谱技术应用于 PE 燃气管道缺陷检测中的文献报道还较少,而 THz 光谱技术的许多特性使其有望成为一种有效的评估 PE

老化的方式。

本文基于 THz-TDS 系统对聚乙烯管道接头的老化与常见缺陷进行检测。模拟制作了管道接头老化与缺陷样品,提取并对比不同老化时间下聚乙烯样品的折射率与吸收系数,并利用反射式 THz 成像技术获取带有缺陷(磨痕、分层与夹杂金属)的聚乙烯管道接头样品的图像。

2 实验设备与参数提取方法

2.1 THz-TDS 系统

实验主要包括两部分:聚乙烯管道老化样品的透射式 THz-TDS 测量以及管道接头缺陷的反射式 THz 成像检测。透射式 THz-TDS 的光路图如图 1(a)所示,该系统的核心部件是钛宝石飞秒脉冲激光器,其中心波长为 800 nm,脉宽小于 100 fs,重复频率为 80 MHz,输出功率为 960 mW。利用该系统对 PE 老化样品进行检测,得到其 THz 时域光谱。图 1(b)为 z3 反射式 THz-TDS 系统,利用该系统对聚乙烯管道缺陷样品进行成像检测,实验时利用二维平移台移动样品进行逐点扫描。

2.2 光学参数提取

太赫兹波在介质中传播时,相位、振幅等会发生改变,改变的大小可以用传播因子 p 表示^[12-13],即

$$p(\omega, L) = \exp\left[\frac{-j\tilde{n}(\omega)\omega L}{c}\right], \quad (1)$$

式中: ω 为频率; L 为传播的路径长度; $\tilde{n}(\omega)$ 为传播介质的复折射率; c 为光速。因此,THz 波在氮气中传播得到的参考信号可以表示为:

$$E_{\text{ref}}(\omega) = E_0(\omega) \exp[-j\tilde{n}_a(\omega)\omega L/c], \quad (2)$$

式中: $E_0(\omega)$ 为从太赫兹发射探头发射出的初始信号; \tilde{n}_a 为氮气的折射率。

样品信号 $E_{\text{sam}}(\omega)$ 可以表示为

$$E_{\text{sam}}(\omega) = E_0(\omega) t_{\text{ab}}(\omega) \cdot \exp[-j\tilde{n}_b(\omega)\omega d/c] t_{\text{ba}}(\omega), \quad (3)$$

式中: t_{ab} 与 t_{ba} 均为根据菲涅耳公式得到的透射系数; d 为样品厚度; \tilde{n}_b 为被测样品的复折射率。由于 \tilde{n}_a 取 1,因此样品的复折射率可以表示为

$$H(\omega) = \frac{E_{\text{sam}}(\omega)}{E_{\text{ref}}(\omega)} = \frac{4\tilde{n}_b(\omega)}{[1 + \tilde{n}_b(\omega)]^2} \cdot$$

$$\exp\left\{-j\frac{\omega d}{c} [\tilde{n}(\omega) - 1]\right\} = \rho(\omega) \exp[-j\phi(\omega)], \quad (4)$$

式中: $\phi(\omega)$ 为样品信号与参考信号的相位差; $\rho(\omega)$ 为样品信号与参考信号的振幅比。 $\phi(\omega)$ 和 $\rho(\omega)$ 都

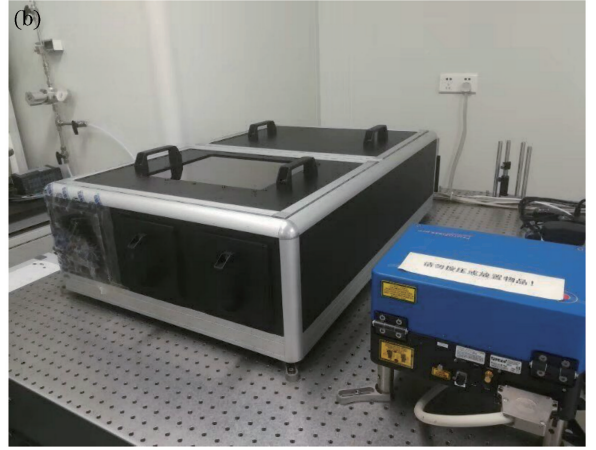
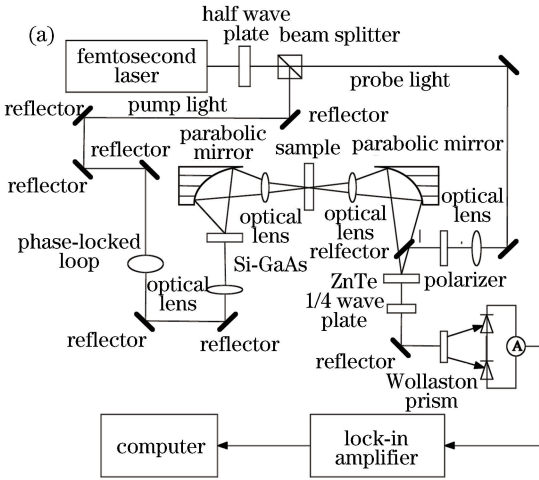


图1 THz-TDS系统。(a)透射式 THz-TDS 光路图;(b) z3 反射式 THz-TDS 系统

Fig. 1 THz-TDS system. (a) Light path of transmissive THz-TDS system; (b) z3 reflective imaging system

可以通过实验得到。将 $\tilde{n}_b(\omega) = n_b(\omega) - j\kappa_b(\omega)$ 代入(4)式进行化简,其中 $n_b(\omega)$ 为样品的折射率, $\kappa_b(\omega)$ 为样品的消光系数。在弱吸收情况下,样品的消光系数远小于其折射率 ($\kappa_b \ll n_b$),可以得到样品的折射率、消光系数与吸收系数:

$$n_b(\omega) = \phi(\omega)c/(\omega d) + 1, \quad (5)$$

$$\kappa_b(\omega) = \ln \left\{ \frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega) [n_b(\omega) + 1]^2} \right\} \frac{c}{\omega d}, \quad (6)$$

$$\alpha_b(\omega) = \frac{2\kappa_b(\omega)\omega}{c} = \frac{2}{d} \ln \frac{4n_b(\omega)}{\rho(\omega) [n_b(\omega) + 1]^2} \circ \quad (7)$$

3 样品制作

3.1 老化样品的制备

老化实验用的样品为白色管道 PE100,采用氙光灯模拟日光的方式对聚乙烯管材进行老化处理。根据国标 GJB 150. 7A—2009 在氙灯老化试验箱中

进行人工老化加速实验^[14],光源为水冷式氙弧灯,波长为 295~700 nm,辐射强度为 0.27 W/m²。暴露 102 min,喷淋 18 min,2 h 为一个循环。黑板温度为 (60±5) °C,箱内相对湿度保持在 70%±5%。老化时间分别为 10, 24, 75, 100 h。试验箱如图 2(a)所示,老化样品如图 2(b)所示,老化时间从左到右递增。老化样品的总长度约为 70 mm,两端的表面尺寸约为 20 mm×20 mm。

3.2 聚乙烯管道缺陷样品

为了模拟聚乙烯管道常见缺陷,在管道 PE100 样品上人为制作缺陷^[15],如图 3 所示。缺陷的类型包括磨痕、分层、夹杂金属三种,其中:1 号样品为采用 120# 砂纸打磨聚乙烯样品表面得到的模拟磨痕样品,样品表面尺寸约为 20 mm×18 mm;2 号样品为分层缺陷,分层厚度约为 1 mm,图中白线上方为分层区域,样品表面尺寸约为 20 mm×20 mm;3 号样品表面的黑色虚线框中包含一外径为 10 mm、内径为 4 mm 的金属环,样品表面尺寸约为 18 mm×25 mm。

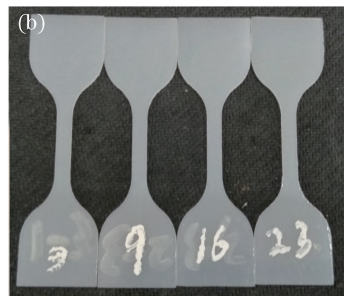
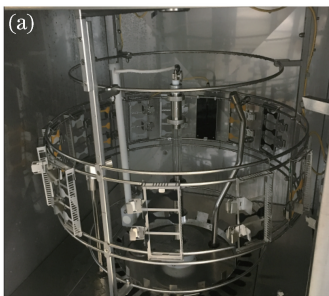


图2 老化实验装置及老化样品。(a)老化试验箱;(b)老化样品

Fig. 2 Aging test setup and aging samples. (a) Aging test chamber; (b) aging samples

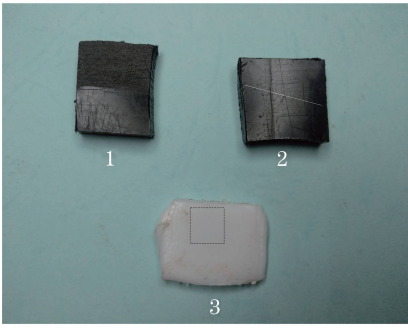


图 3 缺陷样品

Fig. 3 Defect samples

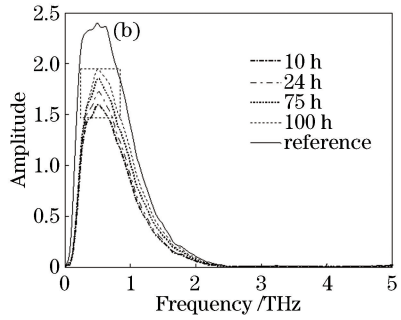
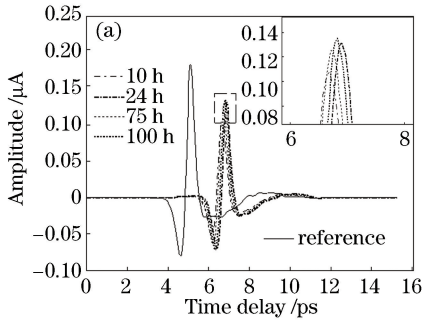


图 4 老化不同时间样品的 THz 波形。(a) 时域波形；(b) 频域波形

Fig. 4 THz waveforms of samples with different aging time. (a) Time-domain waveform; (b) frequency-domain waveform

根据(5)、(7)式分别计算样品的折射率与吸收系数,结果如图 5、6 所示。从图 4(b)可以看出 2.0 THz 之后的太赫兹信号的能量低信噪比较差,因此只分析 0.2~2.0 THz 频段内的折射率与吸收系数。从图 5 可以看出,样品的折射率在 0.2~0.4 THz 频段下降,在 0.2~2.0 THz 范围内基本上保持平稳。考虑到样品摆放、厚度测量等带来的误差,可以认为老化后的聚乙烯的折射率基本保持不变,即老化并未对材料的折射率造成影响。由图 6 可知:吸收系数在 0.2~0.4 THz 频段内下降,在 0.4~2.0 THz 频段基本保持稳定;聚乙烯材料在

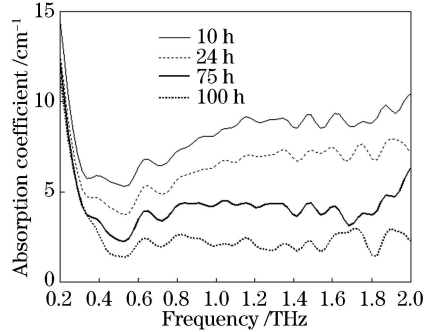


图 6 老化不同时间样品的吸收系数

Fig. 6 Absorption coefficients of samples with different aging time

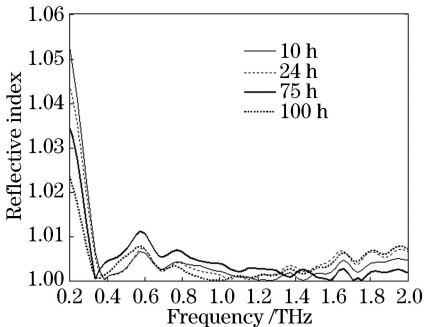


图 5 老化不同时间样品的折射率

Fig. 5 Reflective indices of samples with different aging time

4 实验结果分析

4.1 老化检测

基于透射式 THz-TDS 系统对聚乙烯老化样品进行检测,实验结果如图 4(a)所示,可以看出样品信号峰值相对于参考信号峰值存在约 2 ps 延时。对得到的时域信号进行快速傅里叶变化,得到的频域响应如图 4(b)所示,可以看出:随着老化时间延长,THz 波透过样品后的衰减幅度降低;此外,THz 波的能量主要集中在 0.2~2.0 THz 频段。

0.2~2.0 THz 频段内不存在明显的吸收峰,并且随着老化时间延长,0.4~2.0 THz 频段内的吸收系数呈下降趋势。聚乙烯材料的老化是一个漫长且复杂的过程,通过本文实验发现,老化会对聚乙烯的吸收系数造成一定的影响,这一发现对于下一步进行的老化时间预测建模研究具有重要意义。

4.2 反射式 THz 成像结果

采用 z3 反射式 THz-TDS 系统对图 3 所示的聚乙烯缺陷样品进行成像检测,采用时域最大值作为参数进行成像^[16],磨痕缺陷样品、分层缺陷样品和夹杂金属环样品待检测区域的表面尺寸分别为

6 mm×6 mm、8 mm×8 mm、11 mm×11 mm。

对比图 3 中的磨痕样品与图 7(a)所示的磨痕的太赫兹成像结果可知,通过太赫兹成像的结果可以分辨出样品是否存在缺陷,其中 X、Y 表示样品在载物台上的相对位置。THz 波在磨痕表面会发生漫反射,导致最后成像的像素点与无磨痕区域相比较暗,但 120# 砂纸的磨痕较细,因此得到的太赫兹图像的整体对比度较低。分层缺陷的成像结果如图 7(b)所示,由于空气与聚乙烯的折射率不同,故 THz 在传播过程中遇到空气夹层时会反射一部分 THz 波,夹层

区域与完整区域上不同的 THz 波传播特性使夹层在成像结果中可以清晰地被分辨出来。图 7(c)为夹杂金属环样品的成像结果,金属材料对 THz 波是不透明的,THz 波在传播过程中遇到金属材料时会被全部反射,金属材料与聚乙烯材料的不同 THz 特性使其在成像时能够被清晰地显现出来。图 7(c)中金属环的内外轮廓清晰,外径约为 10 mm,内径约为 4 mm,与实际的内外径一致。图 7(c)左侧成像结果较暗,分析后认为这是由制作样品时 PE 材料与金属环未完全贴合,二者间存在空隙导致的。

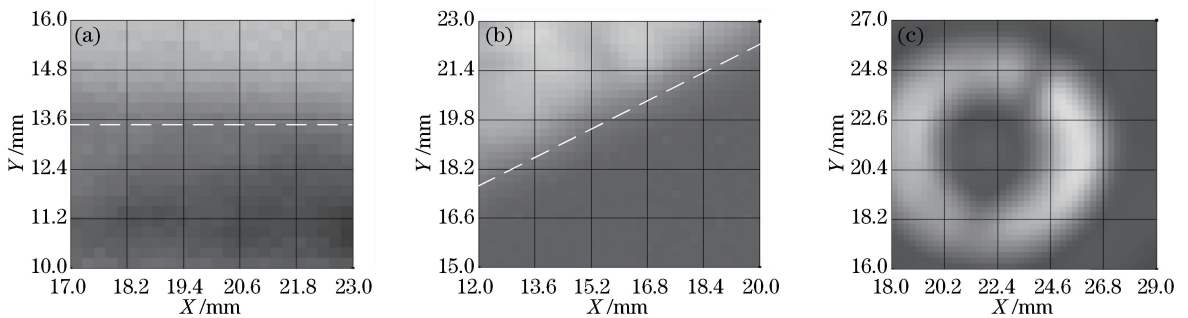


图 7 各样品的反射式成像结果。(a)磨痕缺陷样品;(b)分层缺陷样品;(c)夹杂金属环样品

Fig. 7 Reflective imaging results of samples. (a) Sample with scratch; (b) sample with delamination; (c) sample with metal ring

5 结 论

基于透射式 THz-TDS 系统对聚乙烯老化进行检测,实验结果表明,聚乙烯材料的老化不会对材料的折射率造成明显的影响,但会导致材料的吸收系数下降。利用 THz-TDS 系统对聚乙烯老化进行检测的最大优点在于其对材料本身不会造成损伤,有望实现对聚乙烯管道的老化进行现场检测,本文的研究为聚乙烯老化研究提供了一种新思路。利用反射式 THz-TDS 系统对磨痕缺陷样品、分层缺陷样品以及夹杂金属环样品进行成像检测,实验结果表明,反射式 THz 成像对磨痕的检测能力较差,但对分层及夹杂金属环具有较好的检测效果,成像结果中的缺陷尺寸与实际尺寸较为吻合。

参 考 文 献

[1] Shi J F, Guo W C, Shi J, *et al.* Development of non-destructive testing and safety assessment of polyethylene and composite pipes [J]. *CIESC Journal*, 2013, 64(2): 756-764.
施建峰, 郭伟灿, 师俊, 等. 聚乙烯及其复合管道安全检测与评价方法[J]. *化工学报*, 2013, 64(2): 756-764.

[2] Zhao H. Welding technology and evaluation method of polyethylene pipes [J]. *China Plastics*, 2011, 25(7): 48-53.
赵红. 聚乙烯管道焊接技术和评价方法[J]. *中国塑料*, 2011, 25(7): 48-53.
[3] Wang Z, Zhang Y W, Yu Y, *et al.* Depth test of pipeline defects by active thermal excitation and infrared thermography [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(9): 0912003.
王卓, 张云伟, 喻勇, 等. 主动热激励式红外热成像管道缺陷深度检测[J]. *光学学报*, 2018, 38(9): 0912003.
[4] Wang S F, Li J, Li T, *et al.* Fuzzy evaluation of ultrasonic testing effect of PE pipe weld defect [J]. *China Measurement & Test*, 2016, 42(8): 39-43.
王仕芳, 李俊, 李涛, 等. PE 管焊缝缺陷超声检测效果的模糊评价[J]. *中国测试*, 2016, 42(8): 39-43.
[5] Yan Y Q, Zhao C Q, Xu W D, *et al.* Research on the terahertz active ghost imaging technology [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2018, 45(8): 0814001.
闫昱琪, 赵成强, 徐文东, 等. 太赫兹主动关联成像技术研究[J]. *中国激光*, 2018, 45(8): 0814001.
[6] Li T J, Sun Y, Shao G F, *et al.* Terahertz nondestructive detection method of ceramic matrix

- composites[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2018, 55(6): 061101.
- 李铁军, 孙跃, 邵桂芳, 等. 陶瓷基复合材料的太赫兹无损检测方法[J]. *激光与光电子学进展*, 2018, 55(6): 061101.
- [7] Lai H B, He M X, Tian T, *et al.* Porosity of tablets based on terahertz spectroscopy [J]. *Acta Optica Sinica*, 2018, 38(6): 0630001.
- 赖慧彬, 何明霞, 田甜, 等. 基于太赫兹光谱的固体片剂孔隙率研究[J]. *光学学报*, 2018, 38(6): 0630001.
- [8] Guo X D, Wang Q, Gu X H, *et al.* Defects depth inspection and data analysis of glass fiber based on THz-TDS[J]. *Infrared Technology*, 2016, 38(7): 602-606.
- 郭小弟, 王强, 谷小红, 等. 基于太赫兹时域光谱的玻璃纤维缺陷深度检测及数据分析[J]. *红外技术*, 2016, 38(7): 602-606.
- [9] Dong J L, Kim B, Locquet A, *et al.* Nondestructive evaluation of forced delamination in glass fiber-reinforced composites by terahertz and ultrasonic waves[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2015, 79: 667-675.
- [10] Ospald F, Zouaghi W, Beigang R, *et al.* Aeronautics composite material inspection with a terahertz time-domain spectroscopy system [J]. *Optical Engineering*, 2014, 53(3): 031208.
- [11] Abina A, Puc U, Jeglič A, *et al.* Structural characterization of thermal building insulation materials using terahertz spectroscopy and terahertz pulsed imaging [J]. *NDT & E International*, 2016, 77: 11-18.
- [12] Duvillaret L, Garet F, Coutaz J L. A reliable method for extraction of material parameters in terahertz time-domain spectroscopy [J]. *IEEE Journal of Selected Topics in Quantum Electronics*, 1996, 2(3): 739-746.
- [13] 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*, 2001, 18(7): 1562-1571.
- [14] Chinese PLA general armament department. Laboratory environmental test methods for military materiel-Part 7: solar radiation test: GJB150.7A-2009[S]. Beijing: Standards Press of China, 2009.
- 中国人民解放军总装备部. 军用装备实验室环境试验方法第7部分: 太阳辐射试验: GJB150.7A-2009[S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [15] Palka N, Panowicz R, Chalimoniuk M, *et al.* Non-destructive evaluation of puncture region in polyethylene composite by terahertz and X-ray radiation[J]. *Composites Part B: Engineering*, 2016, 92: 315-325.
- [16] Park J W, Im K H, Yang I Y, *et al.* Terahertz radiation NDE of composite materials for wind turbine applications [J]. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2014, 15(6): 1247-1254.