

· 综述 · doi:10.3969/j.issn.1671-8348.2019.20.030

## 太赫兹光谱技术在安全检查中的应用及研究进展\*

詹新宇<sup>1</sup>, 阳 莎<sup>1</sup>综述, 张 阳<sup>2△</sup>审校

(1. 陆军军医大学西南医院检验科, 重庆 400038; 2. 重庆市人民医院检验科 400010)

**[摘要]** 太赫兹波 (THz) 是一种波长 0.03~3.00 mm 的电磁波。由于其具有高穿透性、指纹谱特性及生物安全性等独特的优势, 在安全检查、航空航天、生物医学、天文考古、雷达通信等领域展现了巨大的应用前景, 其中在安全检查领域中对爆炸物及刀具、枪支等危险品的检测更是近年来国内外关注的热点问题。该文基于经典的太赫兹光谱、成像检测技术, 对太赫兹波在侦检不同爆炸物及刀具、枪支携带研究中的最新进展进行综述, 以分析当前太赫兹波技术用于安全检查中亟待解决的问题并进行展望。

**[关键词]** 太赫兹时域光谱技术; 太赫兹成像技术; 爆炸物; 安全检查

**[中图分类号]** R298 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1671-8348(2019)20-3549-04

## Application of terahertz spectroscopic technology in safety inspection and research progress\*

ZHAN Xinyu<sup>1</sup>, YANG Sha<sup>1</sup>, ZHANG Yang<sup>2△</sup>

(1. Department of Clinical Laboratory, Southwest Hospital, Army Military Medical University, Chongqing 400038, China; 2. Department of Clinical Laboratory, Chongqing Municipal People's Hospital, Chongqing 400010, China)

**[Abstract]** Terahertz wave (THz), an electromagnetic wave with a wavelength range of 0.03–3.00 mm. Due to its unique advantages such as high penetration, fingerprint spectrum characteristics, and bio-safety, it has shown great application prospects in security inspections, aerospace, biomedical, astronomical archeology, and radar communications. Among them, in the field of security inspection, the detection of dangerous goods such as explosives and knives and guns has been a hot topic for recent years. This paper introduces the classic terahertz spectrum and imaging detection techniques, also summarizes the latest progress of terahertz wave in detecting different explosives and weapons carrying, and analyzes the problem demanding prompt solution of the terahertz technology in security inspection application at present and conducts the expectation.

**[Key words]** terahertz time-domain spectroscopy; terahertz imaging technology; explosives; security check

2004 年, 西班牙马德里发生列车爆炸案, 遇难人数达 200 人, 2013 年 4 月 15 日美国波士顿发生令世人震惊的“波士顿马拉松爆炸案”, 逾百人受伤。2018 年 5 月 18 日德克萨斯州圣达菲中学枪击案, 10 人死亡, 10 人受伤, 这一系列事件都表明, 恐怖分子正在以日益多样的方式威胁着公共安全。各国都在加紧研发具有针对性的安全检查仪器, 近年来太赫兹波 (THz) 技术正以其独特的性质逐渐成为一种极具优势的检测方法。

太赫兹波在电磁波谱中位于微波和远红外辐射之间, 其频率为 0.10~10.00 THz, 波长范围 0.03~3.00 mm。由于太赫兹波独特的优势, 它在安全检查、航空航天、生物医学、天文考古、雷达通信等领域展现了巨大的应用前景, 其中在安全检查领域中对爆炸物及刀具、枪支等危险品的检测更是近年来国内外关注的热点问题。

近年来, 由于太赫兹波技术在检测爆炸物及刀具、枪支等危险品方面有着巨大的潜力, 国内外多家机构致力于此类危险品的太赫兹光谱测量及成像研究。其中具有代表性的机构, 包括美国海军研究所、霍普金斯大学、雪城大学、英国剑桥大学、日本大阪大学, 国内的天津大学、首都师范大学等。主要研究方向为: 单纯样本的爆炸物太赫兹光谱特征; 混合样本爆炸物的太赫兹光谱特征; 不同状态下 (包括固相和气相) 爆炸物的太赫兹光谱特征; 遮盖物下的爆炸物检测; 不同温度、湿度下的爆炸物检测; 爆炸物太赫兹光谱数据库的建立; 枪支、刀具等违禁品的太赫兹成像及智能检测等。本文将从以上各方面对国内外近年来的研究成果进行介绍, 并对未来太赫兹光谱技术和太赫兹成像技术用于爆炸物及刀具、枪支等违禁品的检测进行展望。

\* 基金项目: 国家重点基础研究发展计划 973 项目 (2015CB755400); 国家自然科学基金重点项目 (81430054); 后勤科研项目 (BWS13C013; AWS17J010; 2016XY08)。 作者简介: 詹新宇 (1992-), 医师, 硕士, 主要从事太赫兹波生物学效应的研究。 △ 通信作者, E-mail: millen001@163.com。

表 1 太赫兹安全检查仪与传统安全检查方式优势对比

方法	优点	缺点
X 光行李安全检查仪	方便快捷,造价较低	对人体存在一定损害故只能检查包裹,容易漏查误差
手持式金属探测器	配合人工检查最为准确	效率较低,安全检查人员容易受到安全威胁
太赫兹安全检查仪	穿透性高,特征性识别危险品,对人体损害几乎可以忽略不计	造价成本较高,危险品的统一标准数据库有待建立

## 1 太赫兹波技术在安全检查应用中的理论基础

**1.1 国内外典型的太赫兹安全检查系统及优势** 国内外多家公司已研发了多种太赫兹安全检查产品。具有代表性的有美国 L3 通信公司研发的 Provision 系列产品,该类产品为工作频率 35 GHz 的主动式太赫兹安全检查仪,方位分辨率可达 5 mm,目前该产品已在世界多地投入使用。华讯方舟公司研发的 TAI-30 和 TAI-40-HP 主动式太赫兹安全检查仪系列产品已在深圳等地投入使用,该系列设备工作频率为 30 GHz 左右,功率仅为  $0.13 \mu\text{W}/\text{cm}^2$ ,完成 1 次扫描时间为 2.8 s,最高分辨率可达 4.5 mm。

在检测爆炸物方面,太赫兹波技术相比于其他传统检测方法,如 X 光行李安全检查仪、手持式金属探测器等,具有穿透性强、特异性指纹谱精确识别、远距离检测和对人体无害等独特优势<sup>[1]</sup>。依据以上优势,通过太赫兹波技术不仅可以探测到爆炸物的形状,而且能通过光谱信息对爆炸物加以识别,见表 1。

**1.2 太赫兹时域光谱技术(THz-TDS)对爆炸物鉴定的特异性指纹图谱** 爆炸物泛指能够引起爆炸现象的物质,例如炸药、雷管、黑火药等。而常见的炸药包括 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)、环三甲基三硝胺(RDX)等硝铵炸药,以及 B 类炸药、奥克托金炸药、塑性炸药等。炸药从成分上又可分为单质炸药和混合炸药。

THz-TDS 的基本原理是利用飞秒脉冲产生并探测时间分辨的太赫兹电场,通过傅立叶变换获得被测物品的光谱信息,由于爆炸物主要成分中的化学大分子的物质集团特异性振动和转动能级大多在太赫兹波段,进而可以通过特征频率对物质结构、物理性质进行分析和鉴定,例如 RDX 炸药在 0.72,1.26,1.73 THz 段有着特定的吸收峰。因此利用爆炸物特征性吸收峰便可以将不同种类的炸药进行鉴别。常见炸药太赫兹特征性吸收峰位置,见表 2。

## 2 太赫兹光谱技术在安全检查爆炸物检测中的研究

**2.1 单纯、混合样本爆炸物的太赫兹光谱特征** 早在 2003 年,CAMPBELL 等<sup>[3]</sup>就利用傅里叶红外光谱分析仪(FTIR)和太赫兹光谱仪对 C4 炸药(主要成分为 RDX)、PETN 和塞姆汀塑胶炸药(以下简称 SemtexA,主要成分为 RDX 和 PETN)进行了光谱分析,结果表明在 SemtexA 的太赫兹光谱中包含 PETN 和

C4 的特征性吸收带,并借此提出将太赫兹波技术运用于邮件和包裹中的炸药检测,为太赫兹波运用于单体和混合炸药的检测开辟了思路。2004 年,CHEN 等<sup>[4]</sup>首次测量了 RDX 的反射 THz 光谱。以此为基础,有学者获取了 RDX 在 1.5~20 THz 的漫反射式太赫兹光谱,并指出可以借此分析出化合物的空间结构并最终达到对爆炸物的自动识别<sup>[4-6]</sup>。2009 年,冯瑞姝等<sup>[7]</sup>运用 THz-TDS 检测了包括 RDX、8701、R852、R791、PWO、8702 在内的 6 种炸药分别在粉末状和片状的吸收谱(几种常见爆炸物的 THz 吸收光谱见图 1)。结果显示由于粉末状吸收和散射的概率较大,故粉末状样品的吸收大于片状样品。并且 8701、R852、R791、PWO 这 4 种以 RDX 为主要成分的混合炸药的谱线走向与吸收峰与 RDX 基本相同,而以 HMX 为主要成分的 8702 则表现出完全不同的吸收峰。这些都表明了太赫兹波具有鉴别混合炸药中各主体炸药类别的能力。2011 年,CHEN 等<sup>[8]</sup>运用多目标微遗传算法对以苯甲酸、邻甲基苯甲酸和对甲基苯甲酸这 3 种化合物不同比例组成的混合物,依靠已知的这 3 种化合物的光谱数据来确定混合物中各组分浓度,创新性引入此类算法对混合爆炸物进行定性和定量分析。

表 2 常见炸药太赫兹特征性吸收峰位置

炸药种类	特征性吸收峰位置
RDX	0.72、1.26、1.73 THz
TNT	0.69、1.82、2.20 THz
HMX	1.80 THz
PETN	1.98、2.12 THz
DNT	1.08 THz

**2.2 太赫兹光谱技术对遮盖物下爆炸物的“不开包”安全检查扫描中的研究** 除了在混合爆炸物中识别主体爆炸物,透过遮盖物的爆炸物识别也是当今研究的热点。2007 年,CHEN 等<sup>[9]</sup>检测了空气温度 25 ℃、湿度约 20%条件下 RDX 和 HMX 在塑料、皮革和棉布 3 种不同材料隐蔽下的 THz 吸收谱,结果表明:塑料、皮革和棉布 3 种非极性材料在 0.1~0.3 THz 波段下基本是“透明”的,虽然空气中水分子对 THz 波有一定影响,但是 RDX 和 HMX 在不同材料隐蔽下与纯品的特征谱基本一致。RDX 与 HMX 在

遮盖物下的吸收光谱对比见图 2。

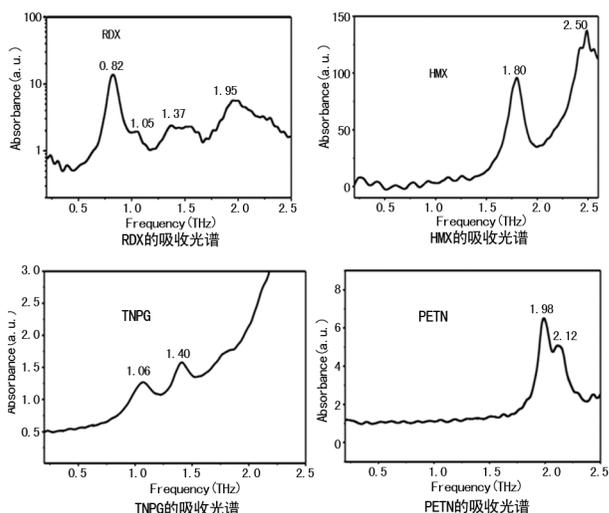


图 1 4 种常见爆炸物的 THz 吸收光谱

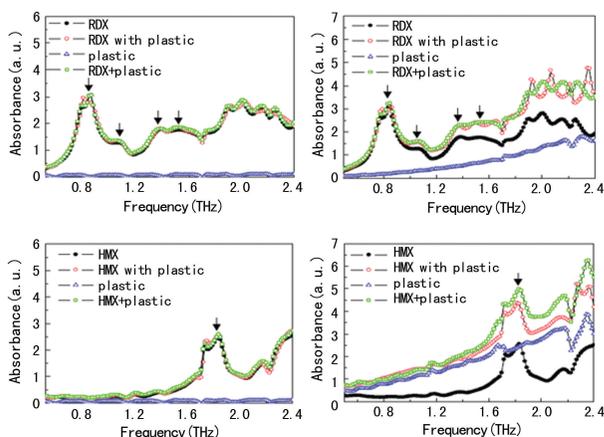


图 2 RDX 与 HMX 在遮盖物下的吸收光谱对比

**2.3 太赫兹光谱技术对不同温湿度环境下爆炸物的检测** 然而,将太赫兹光谱技术真正运用到现实检测爆炸物中绝非易事,前文中提及水分子对太赫兹波有着强烈的吸收,炸药中主要成分的大分子随温度变化内部结构也会相应改变,因此,空气的温度、湿度都要纳入研究的范畴。考虑到不同地域的空气湿度存在差异并且空气中的水蒸气会对太赫兹波有强烈的吸收,清华大学王迎新等<sup>[10]</sup>运用 THz-TDS 分别测量了 RDX、HMX、TNT 和合成 B 4 种炸药在氮气环境和空气环境下吸收峰的位置,利用傅里叶变换相除原理,基本排除了水蒸气的影响,使太赫兹波运用于实践更进一步。2009 年,首都师范大学团队对包括 HMX、RDX、PETN 和 plastic-1 在内的多种炸药在不同湿度条件下进行了深入研究。结果表明:虽然随着湿度的升高,4 种物质的太赫兹特征性吸收峰位置保持恒定而强度逐渐增强,因此仍可以对 4 种物质进行特征性识别<sup>[11]</sup>。2010 年,美国海军实验室的 MELINGER 等<sup>[12]</sup>研究并报道 4A-DNT、HMX 和 PETN 这 3 种爆炸物的在不同温度下由于内部晶型

结构改变造成的指纹谱特征变化。2011 年,姚宝岱等<sup>[13]</sup>提出了利用小波变换的方法对空气环境下的 RDX 和 HMX 的太赫兹光谱数据进行了处理,消除了空气中水分子对吸收光谱的影响,并且证明了小波变换法和传统的傅里叶变换法相比,具有更有效的数据提取和分析的优点。

**2.4 太赫兹光谱技术在对爆炸物不同理化状态下的检测** 在进行爆炸物的太赫兹光谱研究过程中,人们也对不同状态下的爆炸物进行了太赫兹光谱测量。由于 DNT 是合成 TNT 的前体化合物,具有较强的偶极矩,并且在 150 °C 时较易蒸发,美国圣地亚哥国家实验室的 FOLTYNOWICZ 等<sup>[14]</sup>在 2006 年测量了 2,4-DNT 的气相太赫兹光谱,并发现可以用 THz-TDS 测得气相 2,4-DNT 在 0.05~1.50 THz 的光谱特征,推断其可能与 DNT 中 NO<sub>2</sub> 和 CH<sub>3</sub> 基团的内部转子运动有关。2018 年,印度海德拉巴大学 RAO 等<sup>[15]</sup>研究并报道了由磷锆晶体产生的太赫兹源下的甲醇和硝基甲烷室温蒸汽状态下在 0.5~1.5 THz 的太赫兹光谱特征。

上述研究都为太赫兹波技术在安全检查中的应用奠定了扎实的理论基础。然而,为满足实际应用中的具体要求,还存在许多技术问题亟待解决,例如国内外对爆炸物的研究多集中在 0.5~3.0 THz 频段,虽然美国约翰霍普金斯大学的 LEAHY-HOPPA 等<sup>[16]</sup>曾有过对 RDX、HMX、TNT、PETN 4 种炸药进行 0.5~6.0 THz 的测量,但对于大于 6 THz 的宽频谱测量仍然较少。最后,太赫兹波无法穿透包括金属等极性材料,检测这些材料遮蔽的违禁品仍需借助其他手段。

**3 成像技术在携带枪支、刀具快速扫描中的应用研究**

太赫兹波技术应用于安全检查中的枪支、刀具检测主要依靠太赫兹成像技术。与前文中提到的 THz-TDS 类似,太赫兹成像技术通过采集成像样品的透射谱或反射谱信息(包括空间数据和时间数据)并进行分析处理以得到太赫兹图像。根据原理不同可分为太赫兹时域逐点扫描成像、太赫兹实时焦平面成像、太赫兹波计算机辅助层析、连续波成像和近场成像<sup>[17]</sup>。由于太赫兹成像技术兼具结构成像和功能成像的优势,故不仅可以对传统刀具、枪支等金属违禁品进行高分辨率识别,还可以识别出传统安全检查手段(如 X 光安全检查仪等)无法识别的陶瓷刀具。2015 年,张立红等<sup>[18]</sup>基于时域有限差分方法,对太赫兹波下的陶瓷刀具及几种非极性材料遮盖下的陶瓷刀具做出研究,结果表明陶瓷介质的太赫兹反射谱在有遮盖物的情况下均可探测到。目前在枪支、刀具检测方向的研究热点主要有图像的处理和智能识别

方面(太赫兹成像技术用于检测衣物遮盖下的枪支图像见图 3)<sup>[19]</sup>2018 年,康涅狄格大学的 KIARASH<sup>[20]</sup>基于光学分辨率增强技术,将时域和频域滤波器用于滤除噪声、低频频谱和衍射畸变,并利用点扩散函数进行建模,进一步提高了成像的质量。

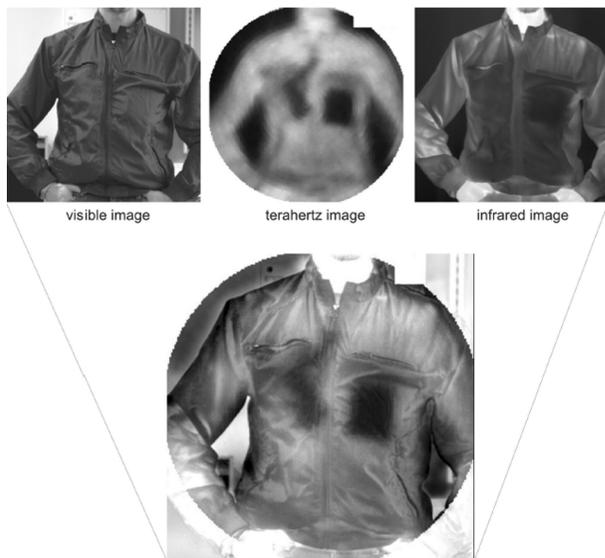


图 3 太赫兹成像技术与红外技术结合用于检测衣物遮盖下的枪支

**3.1 爆炸物太赫兹光谱数据库的建立** 为达到对爆炸物的精确识别乃至智能化识别的最终目的,建立一个完整的、可供参考的爆炸物太赫兹数据库是不可或缺的。近年来,多个研究机构致力于基于太赫兹波光谱数据库的爆炸物分类识别研究。2009 年,首都师范大学赵晶晶<sup>[21]</sup>通过对 4 种爆炸物(TNT、DNT、RDX、HMX)进行了光谱的物理特性与数学分析,并提取了峰值点、峰幅度等特征,设计了基于太赫兹光谱特征数据库的爆炸物识别系统并实现了对这 4 种炸药的高可置信度和准确率的识别。2012 年,西安电子科技大学陈涛等<sup>[22]</sup>提取了多种单质、混合爆炸物及与其有着相似吸收峰的非爆炸物(如蔗糖等)的特征参数建立光谱模型库,并选取其中两种进行基于模糊模式进行识别,实验结果表现出了较高的识别率。

**3.2 太赫兹危险品安全检查图像数据库的建立** 在刀具、枪支的检测方面。2009 年,冯艳平等<sup>[23]</sup>提出基于阈值分割的太赫兹波图像刀具识别,将数字图像处理技术与智能化监控报警系统相结合。2018 年,ZHANG 等<sup>[24]</sup>在分析太赫兹图像特征的基础上,提出了一种基于深度学习方法的有效的检测系统,能够对人体和其他物体进行独立识别及检测,将太赫兹检测系统的灵敏度进一步提高。

## 4 展 望

近年来,太赫兹波技术应用于爆炸物及刀具、枪

支等违禁品的检测已取得了诸多成绩,各式太赫兹安全检查仪在世界各地也逐步投入使用。虽然太赫兹波技术还未完全被大众所熟知,甚至还存在质疑和误解,但随着太赫兹波技术在安全检查方面的逐步深入应用及研究者的不断探索,相信在不远的将来,太赫兹安全检查仪将替代传统安全检查手段更高效地为公众安全保驾护航。然而,为满足实际应用中的具体要求,还存在许多技术问题亟待解决:由于测量仪器与数据处理方法不尽相同,尚未形成国内国际统一标准;与此同时,复杂条件下的空气中颗粒物、温湿度都会对检测造成一定影响。因此,建立一个完整的、可供参考的数据库和样品检测标准是太赫兹安全检查仪走向实际应用前必须解决的问题。

## 参考文献

- [1] 卢树华. 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测[J]. 激光与光电子学进展, 2012(4): 45-51.
- [2] 何明霞, 张凯, 赖慧彬等. 太赫兹光谱技术应用于毒品与炸药的检测[J]. 警察技术, 2016(3): 15-18.
- [3] CAMPBELL B M, HEILWEIL E J. Non-invasive detection of weapons of mass destruction using THz radiation[J]. Proceed SPIE, 2003(5070): 38-43.
- [4] CHEN Y Q, LIU H B, DENG Y Q, et al. THz spectroscopic investigation of 2,4-dinitrotoluene[J]. Chem Phys Lett, 2004(400): 357-361.
- [5] SHEN Y C, TADAY P F, KEMP M C. Terahertz spectroscopy of explosive materials[J]. Proc SPIE, 2004, 5619: 82-89.
- [6] SHEN Y C, LO T, TADAY P F, et al. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. Appl Phys Lett, 2005, 86(24): 241116.
- [7] 冯瑞妹, 孟田华. 爆炸物太赫兹谱的研究[J]. 山西大同大学学报(自然科学版), 2009, 25(1): 25-27.
- [8] CHEN Y, MA Y, LU Z, et al. Terahertz spectroscopic uncertainty analysis for explosive mixture components determination using multi-objective micro-genetic algorithm[J]. Adv Eng Softw, 2011, 42(9): 649-659.
- [9] CHEN J, CHEN Y Q, ZHAO H W, et al. Absorption coefficients of selected explosives and related compounds in the range of 0.1 - 2.8 THz[J]. Opt Express, 2007, 15(19): 12060-12067.
- [10] 王迎新, 陈志强, 赵自然, 等. 基于太赫兹时域谱分析的爆炸物检测方法研究[J]. 光学技术, 2007, 33(4): 587-590.
- [11] 冯瑞妹. 爆炸性物质的 THz 光谱的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [12] MELINGER J S, HARSHA S S, LAMAN N, et al. Temperature dependent characterization of terahertz vibrations of explosives and related threat(下转第 3557 页)

- 录因子 GATA3 的影响[J]. 温州医科大学学报, 2013, 43(3):175-177.
- [22] ZHU S, QIAN Y. IL-17/IL-17 receptor system in autoimmune disease: mechanisms and therapeutic potential [J]. Clin Sci, 2012, 122(11):487.
- [23] CHEN Y, LI C, WENG D, et al. Neutralization of interleukin-17A delays progression of silica-induced lung inflammation and fibrosis in C57BL/6 mice[J]. Toxi Appl Pharmacol, 2014, 275(1):62-72.
- [24] GARIBALDI B T, FRANCO R, MOCK J R, et al. Regulatory T cells reduce acute lung injury fibroproliferation by decreasing fibrocyte recruitment [J]. Am J Res Cell Molecular Biol, 2013, 48(1):35-43.
- [25] 万勇, 张念, 李剑平, 等. 调节性 T 细胞与 Th17 细胞的失衡及其对大鼠肺纤维化的影响[J]. 华中科技大学学报(医学版), 2013, 42(2):161-166.
- [26] TURGUT N H, KARA H, ELAGOZ S, et al. The protective effect of naringin against bleomycin-induced pulmonary fibrosis in wistar rats[J]. Pulm Med, 2016(1):1-12.
- [27] 韩晓静, 陈晓玲, 康林, 等. 大鼠肺纤维化形成中肺内肥大细胞结缔组织生长因子的表达[J]. 中国应用生理学杂志, 2011, 27(3):325-328.
- [28] SELMAN M, PARDO A. Revealing the pathogenic and aging-related mechanisms of the enigmatic idiopathic pulmonary fibrosis. An integral model[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2014, 189(10):1161-1172.
- [29] NUOVO G, SANDERS Y Y, SELMAN M, et al. Thy-1 promoter hypermethylation: a novel epigenetic pathogenic mechanism in pulmonary fibrosis[J]. Am J Respir Cell Mol Biol, 2008, 39(5):610-618.
- [30] COWARD W R, WATTS K, FEGHALI-BOSTWICK C A, et al. Repression of IP-10 by interactions between histone deacetylation and hypermethylation in idiopathic pulmonary fibrosis[J]. Mol Cell Biol, 2010, 30(12):2874-2886.
- [31] FROESE A R, SHIMBORI C, BELLAYE P S, et al. Stretch-induced activation of transforming growth factor- $\beta$ 1 in pulmonary fibrosis[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2016, 194(1):84-96.
- [32] WARBURTON D, SHI W, XU B. TGF-beta-Smad3 signaling in emphysema and pulmonary fibrosis: an epigenetic aberration of normal development? [J]. Am J Physiol Lung Cell Mol Physiol, 2013(304):83-85.
- [33] 杨丽, 吕晓东, 刘勇明, 等. 中医药防治肺纤维化氧化应激作用机制研究进展[J]. 世界中西医结合杂志, 2017, 12(3):297-300.
- [34] LEUN G D W, CAEHIANES G, KUANG W J, et al. Vascular endothelial growth factor is a secreted angiogenic mitogen[J]. Science, 1989(246):1306-1309.
- [35] BARAN C. Important roles for macrophage colony-stimulating factor, CC chemokine ligand 2, and mononuclear phagocytes in the pathogenesis of pulmonary fibrosis[J]. Am J Respir Crit Care Med, 2012, 176(1):78-89.
- [36] ZHANG Y, GU R, JIA J, et al. Inhibition of macrophage migration inhibitory factor (MIF) tautomerase activity suppresses microglia-mediated inflammatory responses [J]. Clin Exp Pharmacol Physiol, 2016, 43(11):1134-1144.
- [37] GUIOT J, MOERMANS C, HENKET M, et al. Blood biomarkers in idiopathic pulmonary fibrosis [J]. Lung, 2017, 195(3):273-280.

(收稿日期:2019-03-28 修回日期:2019-06-28)

(上接第 3552 页)

- materials[J]. Opt Express, 2010, 18(26):27238-27250.
- [13] 姚宝岱, 王高. 基于小波变换的爆炸物太赫兹光谱降噪分析[J]. 光电技术应用, 2011, 26(1):63-65.
- [14] FOLTYNOWICZ R J, ALLMAN R E, ZUCKERMAN E. Terahertz absorption measurement for gas-phase 2,4-dinitrotoluene from 0.05 THz to 2.7 THz[J]. Chem Phys Lett, 2006, 431(1):34-38.
- [15] RAO K S, GANESH D, CHAUDHARY A K. Generation of terahertz from ZnGeP<sub>2</sub> crystal and its application to record the time-resolved photoacoustic spectra of nitromethane[J]. Opt Laser Technol, 2018, 103(103):126-134.
- [16] LEAHY-HOPPA M R, FITCH M J, ZHENG X, et al. Wideband terahertz spectroscopy of explosives[J]. Chem Phys Lett, 2006(434):227-230.
- [17] 郭澜涛, 牧凯军, 邓朝, 等. 太赫兹波谱与成像技术[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(1):51-56.
- [18] 张立红, 余文华, 刘宏. 太赫兹光谱探测隐蔽携带陶瓷刀具的仿真研究[J]. 计算机仿真, 2015, 32(11):27-31.
- [19] MAY T, ZIEGER G, ANDERS S, et al. Infrared, and terahertz object recognition for security screening application [J]. Proc SPIE, 2009(7309):1-8.
- [20] KIARASH A. A method and system for enhancing the resolution of terahertz imaging[J]. Manuscript submitted for Measurement.
- [21] 赵晶晶. 基于 THz 光谱数据库的爆炸物分类识别研究[D]. 北京:首都师范大学, 2009.
- [22] 陈涛, 李智, 莫玮. 基于模糊模式识别的爆炸物 THz 光谱识别[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(11):2480-2486.
- [23] 冯艳平, 赵元黎, 宋燕燕, 等. 基于阈值分割的 THz 图像刀具识别[J]. 微计算机信息, 2009, 25(21):270-271.
- [24] ZHANG J S, XING W J, XING M D, et al. Terahertz image detection with the improved faster region-based convolutional neural network [J]. Sensors (Basel), 2018, 7(18):1-19.

(收稿日期:2019-02-24 修回日期:2019-06-16)