

文章编号: 1672-2892(2011)03-0287-04

太赫兹检测技术在炸药检测中的应用

杜宇, 张伟斌, 肖丽

(中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 介绍了太赫兹辐射光谱技术与成像技术在炸药相关检测领域的几个实际应用方向: 太赫兹辐射对炸药所处的状态非常敏感, 温度的不同和晶型的不同都会在太赫兹光谱中有所反映, 不同晶向的炸药样品吸收特征也有所差别, 可用于炸药精细结构的检测分析; 利用太赫兹时域光谱装置测量各种单质化合物的光谱, 再采用线性回归技术, 对测量的混合化合物太赫兹谱进行分析, 能得到混合材料的成分和相对含量, 可用于研究混合炸药在不同状态下的表面组分变化情况; 利用水分子对太赫兹辐射强烈的吸收特性, 能够有效地对库存炸药表面水分布的变化情况进行无损检测与评价。这些研究方向可有效地应用于炸药的无损检测当中, 为炸药状态的无损评价提供新的思路与方法。

关键词: 太赫兹; 炸药; 无损检测; 综述

中图分类号: TN201; O433.11

文献标识码: A

Application of terahertz wave technology in explosive analysis

DU Yu, ZHANG Wei-bin, XIAO Li

(Institute of Chemical Materials, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621900, China)

Abstract: The status quo of THz spectroscopy and imaging of explosives are discussed. The THz radiation are very sensitive to the explosive of different temperatures and crystal structures in explosive structure inspection. The THz absorption spectrum of chemical mixture can be analyzed by linear regression to identify the composition and its relative content in the mixture according to the absorption spectrum of pure compounds. Terahertz time-domain spectroscopy can be employed to study the sorption of water content, which can identify the distribution of water in the surface of explosives.

Key words: terahertz; explosive; nondestructive testing; overview

高新武器的性能一直是现代作战能力的重要体现, 其库存、工作中的状态与特性是体现武器性能一项重要内容。炸药部组件、高分子材料部件的检测研究能力对于研究武器状态与特性有着重要的意义, 一直是各国军方关注的重要问题。库存武器在实际检测中发现的炸药表面渗水问题、结构功能低效问题, 都对武器的性能稳定性、功能可靠性提出了挑战。对于炸药的检测, 利用射线、超声、CT 等无损检测手段已建立起了涵盖宏观尺度到微观纳米尺度的物理结构表征方法, 但在材料分子层面上的表征手段还很不足, 而材料微观原子分子尺度表征体系的建立, 将更有利于从材料变化的基础开始研究炸药高分子材料的结构信息与特性变化机理, 为武器的安全性与可靠性研究提供技术支撑。针对材料分子原子尺寸的表征, 通常以材料的光谱信息为研究主体, 用以表征材料的微观结构变化, 常用的有红外光谱、拉曼光谱等。作者的研究小组已经逐步搭建了一些如红外光谱检测等技术平台, 用于材料微观结构的观测。在过去的研究中通过对某些 PBX(Polymer Bonded Explosive)炸药材料在加速老化条件下炸药表面的红外光谱、拉曼光谱研究, 发现老化前后炸药的光谱信息似乎并无明显区别, 说明用现有的光谱技术也难以对库存炸药状态给出准确描述, 还无法满足库存炸药原子、分子微观结构变化的研究需求。另外, 上述所有检测技术都需要取样研究, 无法实现原位的实时检测, 而能否实现原位检测恰恰是真正意义上库存弹药监测的一个关键问题。这些技术都还不足以建立一个相对完整的材料分子、原子尺度的表征体系。为提高材料微观结构的表征能力, 国内外进行了大量的探索试验, 结果表明, 频率范围位于红外与毫米波之间的太赫兹电磁波对于材料分子微结构的探索有着独特的优势, 太赫兹时域光谱检测技术能够获得材料在太赫兹波段丰富的物理化学信息, 有效地与红外光谱技术形成互补, 在表征材料分子特征方面具有巨大的应用潜力^[1-2]。

1 太赫兹技术在国内外的研究进展现状

利用太赫兹电磁波技术进行炸药及其相关材料检测方面的研究主要集中在美国、英国和日本,如美国的新泽西理工学院、伦斯勒理工学院、约翰霍普金斯大学、美国洛斯阿拉莫斯国家实验室、Picometrix 公司、Physical Sciences 公司、英国的剑桥大学、TeraView 公司、日本的大阪大学等。国内首都师范大学、清华大学、电子科技大学等也在进行相关的研究。国内外已经对主要炸药如黑索今(RDX)、2,4,6-三硝基甲苯(TNT)、奥克托金(HMX)、太安(PETN)、2,4-二硝基甲苯(DNT)等开展了一系列的研究工作。

Kemp 等人^[3]利用太赫兹技术获得了 RDX,TNT,HMX,PETN 等普通炸药和 PE-4、塞姆汀塑胶炸药、可塑炸药(C-4)的特征谱、折射率和吸收系数,证明可用太赫兹光谱来鉴别多种爆炸物。Guo 等人利用反射式太赫兹系统研究六硝基六氮杂异伍兹烷(HNIW)5 种晶型中 γ -HNIW 和 ϵ -HNIW 在 0.2 THz~2.5 THz 范围的光谱,实验结果与理论计算基本相符,2 种晶型的太赫兹特征谱有明显区分。随着一系列的炸药太赫兹光谱分析技术的深入,国内外研究提出了太赫兹技术在炸药检测^[4]当中的许多具体开展方向,以下是几种典型应用实例。

1.1 炸药精细结构的检测分析

太赫兹光谱学能有效地扩展分子光谱学的带宽范围,表征分子之间弱相互作用(如氢键)及大分子的骨架振动(构型弯曲)、偶极子的旋转和振动跃迁以及晶体中晶格的低频振动吸收频率,反映分子的结构及相关环境信息。太赫兹辐射对炸药所处的状态非常敏感,温度的不同和晶型的不同都会在太赫兹光谱中有所反映,不同晶向的炸药样品吸收特征也有所差别,可以用于炸药精细结构的检测分析。

Burnett 等人^[5]研究了 RDX,PETN 炸药晶体的太赫兹光谱,讨论了不同温度下 2 种晶体的吸收峰特征变化情况,结果如图 1、图 2 所示,不同温度下 2 种晶体的吸收峰有所差别。

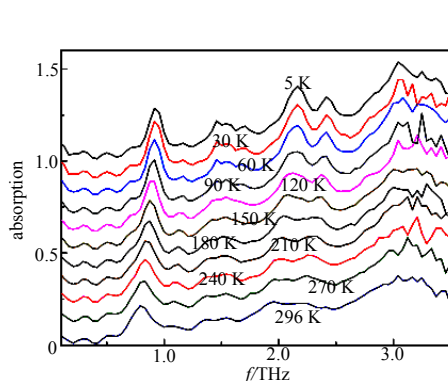


Fig.1 Terahertz spectra of RDX under temperatures ranging from 5 K(the top spectra) to room temperature(the bottom spectra)

图 1 5 K(顶部光谱线)至室温(底部光谱线)范围内 RDX 炸药的太赫兹光谱

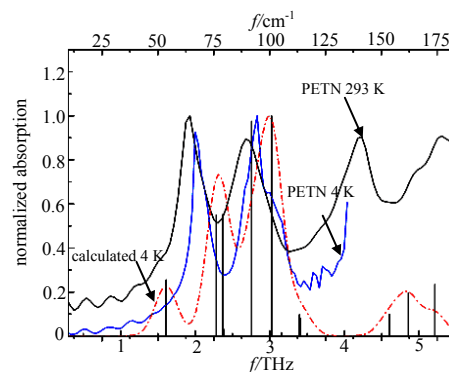


Fig.2 Comparison of terahertz absorption spectra of PETN under room temperature and 4 K with theoretical predictions

图 2 室温与 4 K 温度时 PETN 的太赫兹光谱图像与理论计算值的比对

美国海军水上作战中心还开展了不同制备条件下,以 RDX 为主要成分的 PBXIH-137 材料以及纯 RDX 晶体的 THz 光谱吸收特性研究^[6],图 3、图 4 结果同样表明,PBXIH-137 和 RDX 的 THz 光谱在不同品质下均有所差别,进一步表明太赫兹光谱分析技术在炸药制造过程的应用研究具有一定可行性。

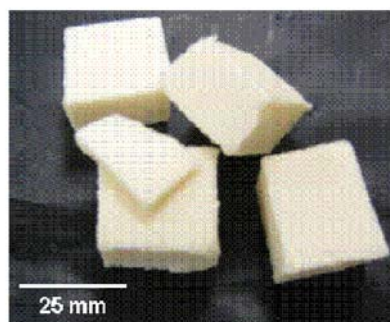


Fig.3 A developmental formulation made from the RDX particles from manufacturer
图 3 几种以 RDX 为成分的材料

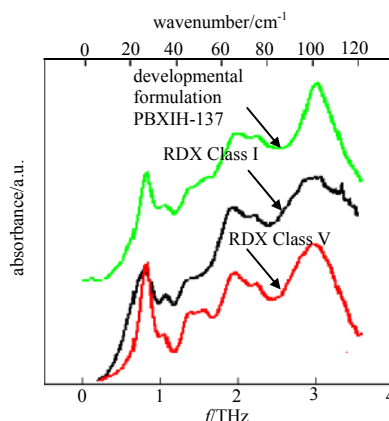


Fig.4 THz spectra of the formulation and the constituent RDX crystallites
图 4 不同品质的 RDX 与 PBXIH-137 具有不同的 THz 光谱特征峰

胡颖等人对不同晶型 HNIW 炸药的 THz 光谱进行研究,结果如图 5 所示。从图中可以看出, γ -HNIW 的吸收峰位于 1.05 THz, 1.52 THz, 1.67 THz, 1.90 THz 处, 而 ϵ -HNIW 在 0.99 THz, 1.32 THz, 1.43 THz, 2.08 THz, 2.51 THz 处具有明显吸收。结果表明, 太赫兹光谱技术可鉴别不同晶型的炸药。

1.2 混合炸药的组分变化情况

太赫兹光谱分析技术能够研究混合物的成分及组成比例。张增艳等人^[7]利用太赫兹时域光谱检测装置测量苯醌、蒽醌和二苯甲酮的吸收谱, 并基于它们的吸收谱, 采用线性回归技术, 对它们的混合物太赫兹光谱进行分析, 得到混合物中化合物的成分和相对含量如表 1。

这项研究验证了将整个测量波段的频谱作为化合物的指纹特征用以鉴别化学混合物中成分和含量的可行性, 通过对蒽醌、苯醌和二苯甲酮混合物的分析结果可以看出: 从太赫兹波段的吸收峰峰位出发得不到混合物的成分信息, 而以整个测量波段的吸收谱作为化合物的指纹特征检测化学品成分和相对含量的方法可行。通过继续深入研究有望进一步完善分析方法, 提高分析准确度。这种方法的建立将进一步开拓太赫兹技术的应用领域, 为特殊化合物的定量分析提供一种新的手段, 并有可能在异构体和化学危险品检测等方面发挥重要作用。

1.3 炸药表面水分布的变化情况研究

德国科学家 Jördens C 等人^[8]利用 THz-TDS 技术, 研究了水在聚酰胺以及塑合木 2 种不同材料中的吸附分布情况, 确定了随着其水平含量的变化, 2 种材料在 0.2 THz~1.0 THz 频段的介电性能有所变化, 验证了基于水成分的介电性能变化规律, 并以此为基础, 获得材料的水分分布, 见图 6。

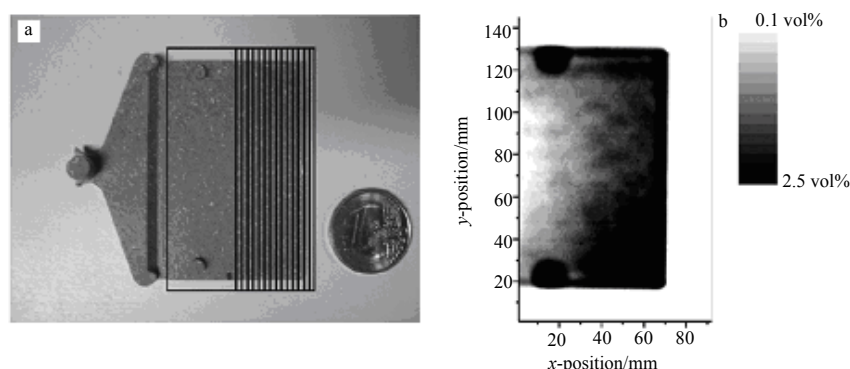


Fig.6 THz image of the water distribution in a wood plastic composite plate
图 6 塑合木中水分分布的 THz 成像图片

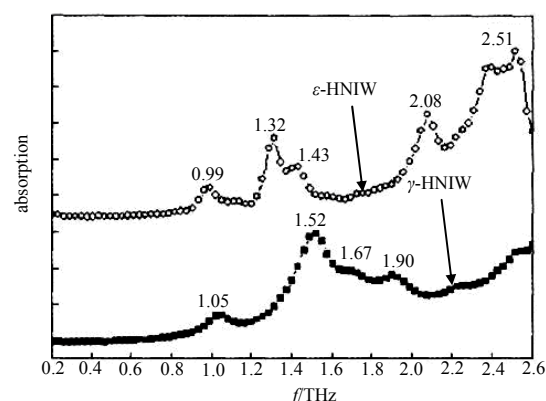


Fig.5 THz absorption spectra of ϵ -HNIW and γ -HNIW
图 5 ϵ -HNIW 与 γ -HNIW 晶体的太赫兹吸收谱

表 1 苯醌、蒽醌和二苯甲酮混合物的含量分析结果
Table1 Actual and calculated corresponding contents in the mixture of benzoquinone, anthraquinone and diphenyl ketone

Testing 1			
	anthraquinone	benzoquinone	diphenyl ketone
actual	0	60%	40%
calculated	0	58.4%	41.6%
Testing 2			
	anthraquinone	benzoquinone	diphenyl ketone
actual	60%	40%	0
calculated	59.2%	40.8	0

2 太赫兹技术在炸药检测方向的发展应用

开展基于太赫兹技术的炸药检测技术研究对炸药与检测技术领域的发展有着重要的科学意义和应用价值。

2.1 单质炸药太赫兹波谱检测与分析技术

研究单质炸药的太赫兹波谱检测与分析技术是开展太赫兹在炸药领域检测研究的基础。首先, 很多有机分子在 THz 频段内具有特征吸收和色散, 使得物质的 THz 光谱表现出“指纹”特性, 因而通过太赫兹谱分析技术可以进行物质种类和成分鉴别。其次, 结合密度泛函理论(Density Functional Theory, DFT)等量子化学手段, 炸药在太赫兹波段特征峰吸收机理研究, 将为研究炸药特征峰变化行为所对应的精细结构状态变化情况提供强有力的

依据。第三,将太赫兹技术应用到武器炸药部组件无损检测时,单质炸药的太赫兹检测分析研究将起到最基本的支撑作用。

2.2 库存等状态条件下炸药太赫兹波谱检测与分析技术

炸药及其相关物的老化特性与库存武器的安全性和可靠性密切相关,弹药老化监测技术和贮存寿命研究一直是各国军方关注的重要问题。目前用于库存炸药非破坏性检测的手段主要有:用扫描显微镜观察炸药表面形貌,用接触角测试仪测试炸药表面能变化,利用气相色谱—质谱法测定混合炸药组分迁移、利用傅里叶变换红外光谱技术检测炸药分子结构变化等几种。现有的技术有着其独特优势,但也有着各种各样的不足,利用太赫兹技术对炸药的库存老化行为进行科学研究有着独特的优势:不同温度、不同晶型和晶向以及结构相似的炸药在 THz 波段的光谱都具有明显差别,因此可利用 THz 光谱技术鉴别炸药所处状态,并对其分子的精细结构进行分析,从而对热红外光谱学与拉曼光谱学作补充与完善,进一步扩展炸药光谱学的研究范围;检测过程不破坏样品,不用试剂,故不污染环境,从而克服了化学检测法的缺点;太赫兹波可穿透很多光学不透明的非金属和非极性材料,如泡沫、塑料、木头和纺织物等,因此利用太赫兹远距离光谱测量技术,可直接对隐藏在这些包装材料中的炸药部件进行原地实时检测,从而克服了现有技术的困难。利用太赫兹技术还能够研究炸药在库存老化中的组分分布与变化问题。利用线性回归技术分析炸药的太赫兹光谱,能够有效地分辨出炸药各组分的含量及其变化情况,分辨力达到了 1%左右,对具体研究炸药各组分的库存老化行为提供了有力的技术支撑,解决了传统射线、超声等方法无法分辨炸药组分的缺点。同时,针对炸药库存中的表面渗水问题,研究表明,由于太赫兹光谱对水的吸收非常敏感,其无损、非接触的测量方法也在研究炸药库存老化试验中具有优势,这将是研究炸药库存状态下表面水分分布的一项重要技术手段。

3 结论

综上所述,开展太赫兹电磁波光谱与成像技术的基础研究,将为后续一系列基于太赫兹电磁波技术的应用研究提供强大的技术支撑,也是未来国内外研究的热门学科。太赫兹电磁波独特的特性使其在各学科领域都有着独特的表现形式,随着太赫兹电磁波研究的不断深入,太赫兹电磁波技术将有效地带动分子尺度物质研究技术的新发展,并在国家安全、反恐、无损检测、材料特性表征等方面进一步拓宽研究思路,解决现有的不足,获取更多的新信息,军事应用前景广阔。

参考文献:

- [1] Sizova F, Rogalski A. Review THz detectors[J]. ELSEVIER, Progress in Quantum Electronics, 2010,34(5):278-347.
- [2] 王迎新,陈志强,赵自然,等. THz 辐射在安全和反恐中的应用[D]. 北京:中国核技术与安全学术委员会, 2007.
- [3] Kemp M C, Taday P F, Cole B E, et al. Security applications of terahertz technology[J]. Proc. SPIE, 2003,5070:44-52.
- [4] 胡颖,张存林,郭澜涛,等. THz 光谱技术在炸药及其相关材料检测中的应用进展[J]. 物理, 2007,36(1):68-72.
- [5] Burnett A D, Fan W H, Upadhyaya P C, et al. Broadband terahertz time-domain and Raman spectroscopy of explosives[C]// Proc. of SPIE:International Society for Optical Engineering. Bellingham WA:society of photo optical, 2007:1-10.
- [6] Wilkinson John, Caulder Stanley M, Portieri Alessia. Manufacturing process effects on the terahertz spectra of RDX[C]// Proc. of SPIE:International Society for Optical Engineering. Bellingham WA:society of photo optical, 2008,1-7.
- [7] 张增艳,余笑寒,肖体乔,等. 化学混合物成分的太赫兹光谱分析[J]. 光子学报, 2007,36(2):290-293.
- [8] Jördens C, Wietzke S, Scheller M, et al. Investigation of the water absorption in polyamide and wood plastic composite by terahertz time-domain spectroscopy[J]. Polymer Testing, 2010,29(2):209-215.

作者简介:



杜宇(1983-),男,四川内江人,研究实习员,本科,主要从事含能材料无损检测技术及应用研究工作.email:combatdu@gmail.com.

张伟斌(1972-),男,安徽桐城人,副研究员,硕士,主要从事含能材料无损检测技术及应用研究工作.

肖丽(1962-),女,四川内江人,研究员,硕士,主要从事含能材料无损检测技术及应用.