

文章编号: 1003-1480 (2023) 05-0056-07

太赫兹时域光谱技术定量检测含能材料研究

鄂秀天凤, 李伟, 任山福, 孟子晖, 刘文芳

(北京理工大学 化学与化工学院, 北京, 100081)

摘要: 为了快速准确检测含能材料, 基于大多数含能材料分子的振动和转动能级都处于 0.1~3.0THz 频率范围, 开展了采用太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术检测爆炸物的研究。针对 3 类 10 种典型含能材料, 测试了其太赫兹吸收光谱, 指认了每种含能材料特征峰, 丰富了含能材料的太赫兹吸收光谱数据库; 并通过线性拟合, 根据硝基或分子晶格振动所致的太赫兹特征吸收峰强度, 对每种含能材料建立了定量分析的方法。

关键词: 含能材料; 炸药; 太赫兹时域光谱技术; 定量分析; 检测

中图分类号: TJ55; TJ450.6 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3969/j.issn.1003-1480.2023.05.011

Quantitative Detection of Typical Explosives by Terahertz Time Domain Spectroscopy

E Xiu-tian-feng, LI Wei, REN Shan-fu, MENG Zi-hui, LIU Wen-fang

(School of Chemistry and Chemical Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing, 100081)

Abstract: Aimed at rapid and accurate detection of energetic materials or explosives, based on the reality that most energetic material molecules vibrate and rotate in the terahertz band (0.1~3.0THz), the study of using terahertz time-domain spectroscopy (THz-TDS) detection technology to the detection of explosives was carried out. The terahertz absorption spectra of ten kinds of typical energetic materials were tested, and the characteristic peaks of each explosive were identified, which enriched the terahertz database of energetic materials. Additionally, the linear fitting between the terahertz absorption intensity and the mass of energetic material was also carried out. As a result, the quantitative analysis methods for energetic explosives were established, based on the intensity of terahertz characteristic absorption peak of $-\text{NO}_2$ or molecular lattice vibration.

Key words: Energetic materials; Explosives; THz-TDS; Quantitative analysis; Detection

近年来, 一些恐怖爆炸事件对人民的生命安全造成了严重危害, 简单、快速、准确、安全的爆炸物检测技术对于加强车站、机场、海关、港口等地对爆炸物的检测力度、提高检测水平具有重要意义。太赫兹波是频率在 0.1~3.0 THz (1 THz=10¹² Hz) 内的电磁波, 属于远红外波段。太赫兹时域光谱 (THz-TDS) 技术作为一种新型爆炸物检测技术, 与现有的 X 射线、质谱、中子、拉曼光谱和核四极矩等技术^[1-5]相比, 主要具有 3 大优点^[6-9]: (1) 指纹性: 大多数含能材料分子的转动与振动能级都位于太赫兹波段, 因此该技

术可以准确识别多种含能材料; (2) 低能性: 太赫兹波的能量只有约 4.1 meV, 为 X 射线能量的 10⁻⁶ 倍, 不会引起敏感含能材料爆炸或对人体造成损伤; (3) 强穿透性: 太赫兹波能够穿过大多数的包裹材料, 可以对隐蔽的含能材料进行准确识别。

基于以上优点, 研究人员早在 2003 年就开始研究含能材料的 THz-TDS 检测技术。吴斌等^[10]将这项技术用于检测四氢双环戊二烯; Zhang 等^[11]测得了 CL-20/HMX 共晶材料在 0.2~1.4 THz 范围内的太赫兹吸收光谱, 确定了特征吸收峰的位置; 蔚旋等^[12]将这

收稿日期: 2023-04-23

作者简介: 鄂秀天凤 (1990-), 女, 副研究员, 主要从事航天推进剂及含能材料合成与分析研究。

通讯作者: 刘文芳 (1977-), 女, 副教授, 主要从事高分子材料表面改性及火炸药分析方法研究。

基金项目: 国家自然科学基金资助 (No.22105024)。

项技术用于 TNT、LLM-105 和 PETN；段俊杰等^[13]对 HMX、RDX、PETN、LLM-105 和 TATB 共 5 种含能材料在 0.5~6.0 THz 范围内进行了 THz-TDS 分析，并利用高斯软件对实验测得的特征吸收峰的位置进行模拟指认，解释了这些峰形成的原因；Norbert 等^[14]研究了温度对 HNIW 和 TEX 太赫兹吸收光谱的影响；Choi 等^[15]则采用 THz-TDS 技术检测到含能材料混合物中含有 PETN、RDX 和 TNT 3 种主要成分。综上所述，目前的研究主要集中在定性分析含能材料或如何提高 THz-TDS 检测的准确性，对含能材料的定量分析鲜有报道。含能材料的纯度或其混合物中的含量对其性能有直接影响，也是工艺控制的关键。因此，建立 THz-TDS 技术对含能材料的定量检测方法具有重要意义。

本文利用 THz-TDS 技术在 0.1~3.0 THz 范围内对单环类、笼状类、含能离子盐 3 类共 10 种含能材料进行了检测，获得其太赫兹吸收光谱，对特征峰归属进行分析，并归纳其出峰特点；通过线性拟合这些含能材料的对应特征峰的吸收强度与其用量，建立定量分析方法。该研究可拓宽 THz-TDS 技术的应用范围，为 THz-TDS 技术快速、定量检测含能材料提供数据和方法支撑。

1 实验

1.1 实验原料和设备

实验试剂：溴化钾（分析纯，99%）、无水乙醇（分析纯），百灵威科技有限公司；聚乙烯（PE）（分析纯，粒径 25 μm），中新塑料有限公司；TNT、RDX、HMX、ANPZ、LLM-105、CL-20、TAIW、TEX、FOX-12、HDNAT 均由西安近代化学研究所提供，纯度 > 99.9%。

实验仪器：BP210S 电子天平，德国 Sartorius；MaiTai SP1.01 激光器，美国 Spectra-Physics；FW-4A 压片机，天津市拓普仪器有限公司；HF-2B 压片模具，天津市拓普仪器有限公司；101-1AB 防爆电热鼓风干燥箱，天津市泰斯特仪器有限公司；太赫兹时域光谱

系统，实验室自主搭建。

1.2 实验方法和产物分析

1.2.1 样品制备

为了避免所测含能材料的用量太高导致吸收过强，首先测试了 PE 在 0.1~3.0 THz 对太赫兹波的吸收强度，结果接近于零，故可采用 PE 作为样品测试的分散剂。采用 PE 和含能材料混合压片法制备样品，PE 过少不利于压片成型（最少称取 90 mg），含能材料过少会导致部分材料的信号较弱，过多会导致压片过厚，不利于成型和测试。因此，压片时 PE 和含能材料的总质量确定为 300 mg。压片前，所有的药品均置于防爆烘箱中充分干燥，然后分别称取 120，150，180，210 mg 含能材料，再称取一定质量的 PE，轻轻研磨至粉末表面不存在明显的反光，以防止药品因散射作用对测试结果造成影响。压片前，采用无水乙醇擦拭干净压片模具，再将研磨充分的混合粉末倒入压片模具中，置于油压机下加压，在 10 MPa 的压力下压制 30 s 后，将压片取出，密封干燥保存备用。

1.2.2 THz-TDS 测试原理及方法

采用 THz-TDS 系统进行测试前需预热至少 2h，待系统稳定后，向样品池缓慢通入氮气，控制样品池内湿度低于 5%。打开测试软件并设置参数，先测试未放样品的气氛数据并记录湿度，再测试纯 PE 压片，之后测试样品。测试原理如图 1 所示。

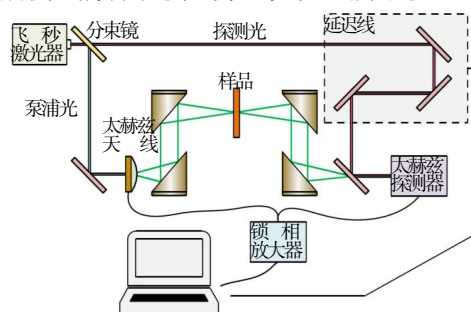


图 1 透射式 THz-TDS 系统测试原理图

Fig. 1 The schematic diagram of transmission THz-TDS system

如图 1 所示，飞秒激光器发出的光通过分束镜得到泵浦光和探测光，泵浦光通过太赫兹天线发出太赫兹脉冲波，通过样品后得到样品信号，该信号是时域形式的，需要利用软件对样品光谱和参照光谱进行傅里叶变换，分别得到它们的频谱图，再将样品与参照

物的频谱图进行对比得到太赫兹吸收光谱^[6]。

2 结果与讨论

2.1 单环类含能材料

首先,选取了典型且常见的单环类含能材料 TNT、RDX、HMX、ANPZ、LLM-105,研究其太赫兹特征峰的吸收强度与材料用量的关系。

采用 THz-TDS 技术定量分析 TNT,结果如图 2 所示。由图 2(a)可知,4 种用量的 2,4,6-三硝基甲苯(TNT)均在 2.35 THz 出现吸收峰,有 3 个样品在 2.83 THz 处出峰。由密度泛函理论可知,2.35 THz 处的吸收峰是由 TNT 分子中的晶格振动产生^[17],随着 TNT 用量增加,此处的吸收峰强度也逐渐变大。由图 2(b)可见,线性拟合效果较好($R^2=0.951$),拟合方程为 $y=0.3886+0.00904x$ 。当 TNT 的用量为 120 mg 时,吸收峰较弱,由此可知其太赫兹检测用量不宜低于 120 mg。

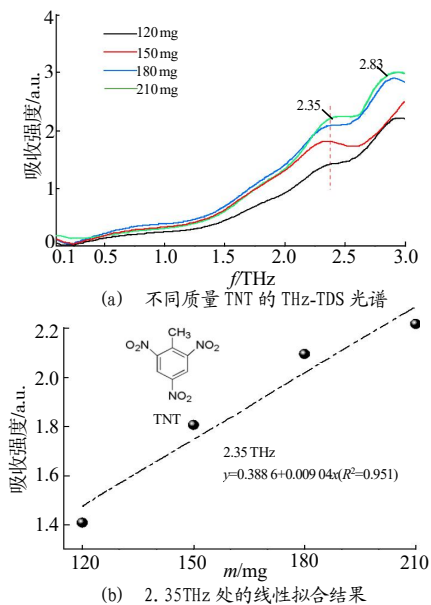


图 2 THz-TDS 技术定量分析 TNT 的结果

Fig.2 Quantitative analysis result of TNT using THz-TDS technique

采用 THz-TDS 技术定量分析 RDX,结果如图 3 所示。由图 3(a)可知,不同用量的黑索今(RDX)均具有 4 个明显太赫兹特征吸收峰,分别位于 0.85, 1.53, 2.08, 2.91 THz 处,且 2.08 THz 处的峰强度最大。其中,0.85 THz 处的峰是由分子间振动产生^[18],1.53 THz 处的峰是由单个硝基的摆动和环的弯曲所

致,2.08 THz 处的峰是由一对硝基的不对称摆动和环的扭曲所致^[19],2.91 THz 处的峰文献未见报道。将 4 个吸收峰的强度对 RDX 的用量进行拟合,如图 3(b)所示,发现 0.85,1.53,2.08 THz 3 个峰的线性拟合关系都非常好, R^2 值达到了 0.995 及以上,可以用于 RDX 的定量分析;而 2.91 THz 峰的强度与 RDX 的用量不成线性关系,不能用于定量分析。

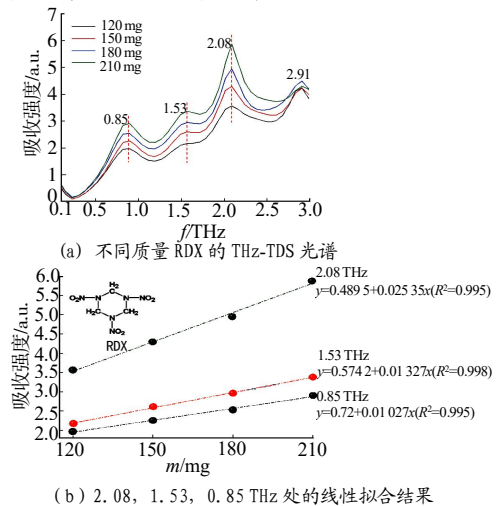


图 3 THz-TDS 技术定量分析 RDX 的结果

Fig.3 Quantitative analysis result of RDX using THz-TDS technique

采用 THz-TDS 技术定量分析 HMX 结果,如图 4 所示。与 RDX 相比,奥克托今(HMX)结构更加对称。由图 4(a)可知,其太赫兹吸收峰只有 2 个,分别位于 1.86, 2.46 THz 处,其中硝基吸收峰只有 1 个,与文献^[20]结果接近。

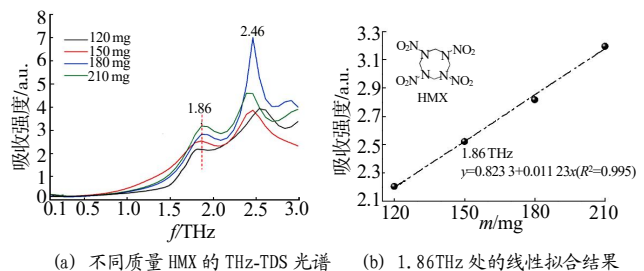
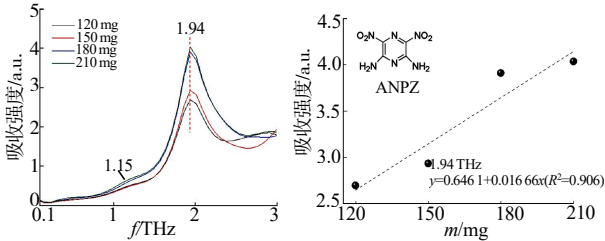


图 4 THz-TDS 技术定量分析 HMX 的结果

Fig.4 Quantitative analysis result of HMX using THz-TDS technique

1.86 THz 处吸收峰是由硝基的摆动、扭动以及 C-H 键的扭动等作用产生^[21],此处的吸收峰强度随 HMX 用量的增加而增强,线性拟合的效果见图 4(b) ($R^2=0.995$),可以用于 HMX 的定量分析;2.46 THz 处吸收峰是由 HMX 分子间的 O-O 键的相互作用产生^[22],此处的吸收峰虽然强度较大,但其吸收强度与 HMX 的用量并无关联。

2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪 (ANPZ) 是一种综合性能良好的单质炸药,也是合成新型炸药 LLM-105 的前体。采用 THz-TDS 技术定量分析 ANPZ,结果如图 5 所示。



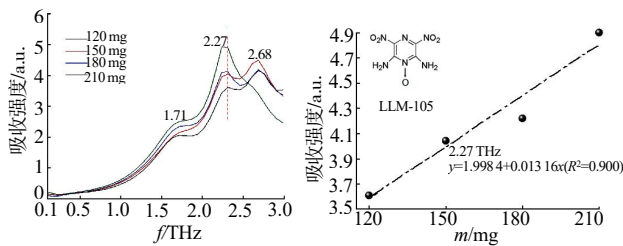
(a) 不同质量 ANPZ 的 THz-TDS 光谱 (b) 1.94THz 处的线性拟合结果

图 5 THz-TDS 技术定量分析 ANPZ 的结果

Fig.5 Quantitative analysis result of ANPZ using THz-TDS technique

由图 5 (a) 可知 ANPZ 在 0.1~3.0 THz 范围内具有 2 个太赫兹特征吸收峰,分别位于 1.15, 1.94 THz 处,其中,1.15 THz 处吸收峰是由 ANPZ 分子的两对硝基与周围原子相互作用产生,但这个峰不太明显;1.94 THz 处吸收峰是硝基的摆动、扭动作用所致^[23],具有较高的吸收强度。对 1.94 THz 处的吸收峰强度和 ANPZ 用量进行线性拟合,如图 5 (b)所示, $R^2=0.906$,效果比前面几种材料略差。

2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪 (LLM-105) 是一种新型的高能、热稳定性好的钝感单质炸药。采用 THz-TDS 技术定量分析 LLM-105,结果如图 6 所示。



(a) 不同质量 LLM-105 的 THz-TDS 光谱 (b) 2.27THz 处的线性拟合结果

图 6 THz-TDS 技术定量分析 LLM-105 的结果

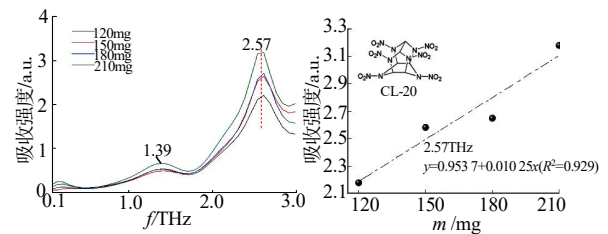
Fig.6 Quantitative analysis result of LLM-105 using THz-TDS technique

由图 6 (a) 可知 LLM-105 在 0.1~3.0 THz 范围内具有 3 个太赫兹特征吸收峰,分别位于 1.71, 2.27, 2.68 THz 处。其中,1.71 THz 处吸收峰是由 NO_2 的摆动所致,2.27 THz 处吸收峰是由晶格振动或声子模式等作用所致^[24],2.68 THz 处吸收峰可能是由连接硝基和氨基的 C=C 键的振动产生。但这 3 个峰中,只有 2.27 THz 处的峰可用来拟合, R^2 值为 0.900,如图 6 (b) 所示。

通过上述分析可见,对于不同的单环类炸药,由分子结构中的 NO_2 摆动、扭动作用产生的吸收峰通常出现在 1.7~1.9 THz 范围内,而分子晶格振动则会导致在 2.3 THz 处出峰。因此,对于这类炸药,可选择这两处的峰进一步作定量分析。

2.2 笼状类含能材料

选取 3 种典型的笼状类含能材料进行太赫兹特征峰吸收强度与含能材料用量关系的研究。六硝基六氮杂异伍兹烷 (CL-20) 是目前能够批量生产的能量最高的一种具有笼状分子结构的高能量密度炸药。采用 THz-TDS 技术定量分析 CL-20,结果如图 7 所示。



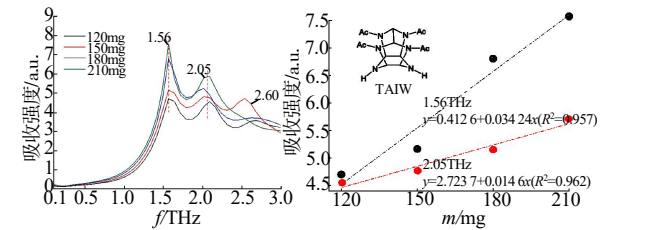
(a) 不同质量 CL-20 的 THz-TDS 光谱 (b) 2.57THz 处的线性拟合结果

图 7 THz-TDS 技术定量分析 CL-20 的结果

Fig.7 Quantitative analysis result of CL-20 using THz-TDS technique

由图 7 (a) 可知 CL-20 在 0.1~3.0 THz 范围内具有 2 个太赫兹特征吸收峰,分别位于 1.39, 2.57 THz 处。前者是由 CL-20 晶格振动产生,后者是由 NO_2 摇摆振动产生^[25]。对 2.57 THz 处的吸收峰强度与 CL-20 用量进行拟合,如图 7 (b) 所示,拟合方程为 $y=0.9537+0.01025x$, $R^2=0.929$,说明该方程可用于 CL-20 的定量分析。1.39 THz 处的吸收峰强度则与 CL-20 用量没有明显的正相关性。

四乙酰基六氮杂异伍兹烷 (TAIW) 是合成 CL-20 典型工艺中的前体,文献未见 TAIW 的 THz-TDS 检测的报道。采用 THz-TDS 技术定量分析 TAIW,结果如图 8 所示。



(a) 不同质量 TAIW 的 THz-TDS 光谱 (b) 1.56, 2.05THz 处的线性拟合结果

图 8 THz-TDS 技术定量分析 TAIW 的结果

Fig.8 Quantitative analysis result of TAIW using THz-TDS technique

由图 8 (a) 可知 TAIW 在 0.1~3.0 THz 范围内具有 3 个太赫兹特征吸收峰, 分别位于 1.56, 2.05, 2.60 THz 处。结合 CL-20 在 2.57 THz 处的吸收峰, 推测 2.60 THz 处吸收峰可能是由 C=O 羰基键的振动产生, 1.56 THz 处为分子晶格振动吸收峰。但 210 mg TAIW 在 2.60 THz 处未出峰, 原因尚不清楚。对 1.56, 2.05 THz 处的吸收峰强度与 TAIW 用量进行线性拟合, 如图 8 (b) 所示, R^2 值均在 0.960 附近, 说明可采用这两处吸收峰的拟合模型对 TAIW 进行定量分析。

4,10-二硝基-2,6,8,12-四氧杂-4,10-二氮杂四环 [5,5,0,05,9,03,11]十二烷 (TEX) 是一种新型多硝基笼状单质炸药, 具有机械感度低、热稳定性及爆轰性能良好等优点。采用 THz-TDS 技术定量分析 TEX, 结果如图 9 所示。

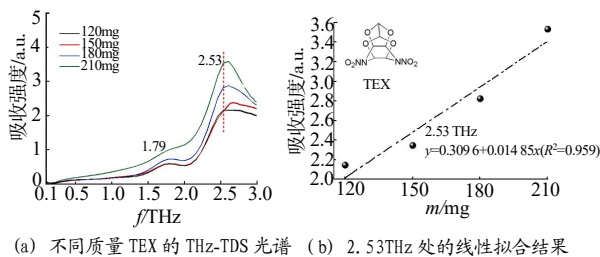


图 9 THz-TDS 技术定量分析 TEX 的结果

Fig.9 Quantitative analysis result of TEX using THz-TDS technique

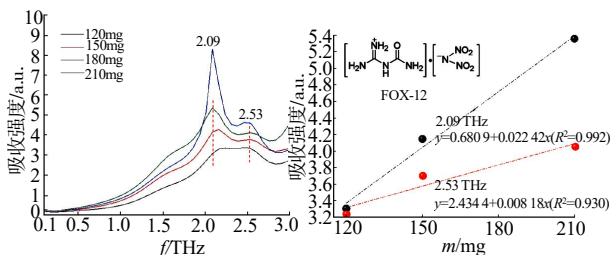
由图 9 (a) 可知不同质量的 TEX 的太赫兹吸收谱均在 1.79 THz 和 2.53 THz 两处出峰, 与文献[26]报道结果接近, 且与 CL-20 出峰位置类似。由于 1.79 THz 处峰强度较小, 且 120mg 和 150 mg 的两条线在此处基本重叠, 故仅对 2.53 THz 处的吸收峰强度与 TEX 用量进行线性拟合, 如图 9 (b) 所示, $R^2=0.959$, 说明此峰可以用于 TEX 的定量分析。

对于以上 3 种笼状类含能材料, 除了 TAIW 之外, CL-20 和 TEX 的出峰具有一定相似性, 二者均在 2.5~2.6 THz 处有较强的吸收峰, 且吸收峰的强度与含能材料的用量具有较好的线性拟合关系, 可用于定量分析。

2.3 离子盐类含能材料

离子盐类含能材料通常由高氮有机阳离子 (如胍、咪唑、三唑和四唑类) 和带有 1 个或多个含能基团 (如 $-\text{NO}_2$ 、 $-\text{N}_3$ 和 $-\text{CN}$) 的阴离子组成, 这类含能材料通常具有较高的正生成焓, 不仅爆速高, 而且其

爆炸产物无污染, 常用于钝感炸药分子设计。本研究选择 2 种离子盐类含能材料 N-脒基脒二硝酰胺盐 (FOX-12) 和 3,5-二硝氨基-1,2,4-三唑胍盐 (HDNAT) 进行研究, 其中, FOX-12 是一种不敏感含能炸药, 具有高能、低感、不溶于冷水、不吸潮、稳定性及相容性好的特点, 也是一种能量高、热稳定性好的含能离子盐类炸药。目前未见关于 FOX-12 和 HDNAT 的 THz-TDS 技术检测结果报道。采用 THz-TDS 技术定量分析 FOX-12, 结果如图 10 所示。



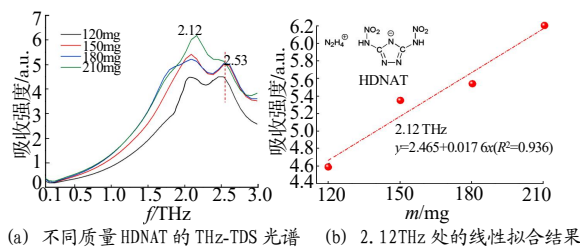
(a) 不同质量 FOX-12 的 THz-TDS 光谱 (b) 2.09, 2.53THz 处的线性拟合结果

图 10 THz-TDS 技术定量分析 FOX-12 的结果

Fig.10 Quantitative analysis result of FOX-12 using THz-TDS technique

由图 10 (a) 可知, FOX-12 在 0.1~3.0 THz 范围内有 2 个太赫兹特征吸收峰, 分别位于 2.09, 2.53 THz 处, 且前者吸收峰强度较大。鉴于其分子结构和前文分析结果, 推测这两处吸收峰可能是由硝基振动产生。对 2.09, 2.53 THz 处的吸收峰强度与 FOX-12 用量进行线性拟合, 由图 10 (b) 可知, R^2 值分别为 0.992 和 0.930, 前者优于后者。

采用 THz-TDS 技术定量分析 HDNAT, 结果如图 11 所示。



(a) 不同质量 HDNAT 的 THz-TDS 光谱 (b) 2.12THz 处的线性拟合结果

图 11 THz-TDS 技术定量分析 HDNAT 的结果

Fig.11 Quantitative analysis result of HDNAT using THz-TDS technique

由图 11 (a) 可知, 尽管 HDNAT 含有唑环, 分子结构与 FOX-12 有着明显的不同, 但是太赫兹吸收谱图与 FOX-12 却十分类似, 也在 2.1THz 和 2.5 THz 附近有 2 个形状类似的特征吸收峰, 进一步验证了这 2 个峰可能是由硝基振动产生。对 HDNAT 在 2.12 THz

处的吸收峰强度与其用量进行线性拟合,如图 11(b)所示, R^2 值为 0.936,说明可以用 2.12 THz 处的吸收峰强度来对 HDNAT 进行定量分析。

2.4 汇总与讨论

对上述 10 种含能材料的太赫兹的特征吸收峰与定量分析的拟合结果以及 R^2 值进行汇总,如表 1 所示。

表 1 10 种含能材料的 THz-TDS 定量分析结果汇总
Tab.1 Quantitative analysis result of ten samples using THz-TDS technique

序号	样品	特征吸收峰/THz	定量分析模型	R^2
1	TNT	2.35,2.83	2.35 THz: $y=0.388\ 6 + 0.009\ 04x$ 0.85 THz: $y=0.72 + 0.010\ 27x$	0.951 0.995
2	RDX	0.85,1.53, 2.08,2.91	1.53 THz: $y=0.574\ 2 + 0.013\ 27x$ 2.08 THz: $y=0.489\ 5 + 0.025\ 35x$	0.998 0.995
3	HMX	1.86,2.46	1.86 THz: $y=0.823\ 3 + 0.011\ 23x$	0.995
4	ANPZ	1.15,1.94	1.94 THz: $y=0.646\ 1 + 0.016\ 66x$	0.906
5	LLM-105	1.71,2.27, 2.68	2.27 THz: $y=1.998\ 4 + 0.013\ 16x$	0.900
6	CL-20	1.39,2.57	2.57 THz: $y=0.953\ 7 + 0.010\ 25x$ 1.56 THz: $y=0.412\ 6 + 0.034\ 24x$	0.929 0.957
7	TAIW	1.56,2.05, 2.60	2.05 THz: $y=2.723\ 7 + 0.014\ 6x$	0.962
8	TEX	1.79,2.53	2.53 THz: $y=0.309\ 6 + 0.014\ 85x$ 2.09 THz: $y=0.680\ 9 + 0.022\ 42x$	0.959 0.992
9	FOX-12	2.09,2.53	2.53 THz: $y=2.434\ 4 + 0.008\ 18x$	0.930
10	HDNAT	2.12	2.12 THz: $y=2.465 + 0.017\ 6x$	0.936

单环类含能材料主要有 2 处特征峰,其中 1.7~1.9 THz 附近为硝基的摆动、扭动作用所致,2.3 THz 附近为分子晶格的振动吸收。TNT 的 2 个吸收峰均往高频处移动了约 0.5 THz。与其它单环类炸药相比,RDX 有 4 个明显的太赫兹特征吸收峰,且其中 3 个峰的吸收强度对 RDX 用量的线性拟合 R^2 值达到 0.995 及以上,因此,更易于进行定量分析。笼状类含能材料 CL-20 和 TEX 的出峰非常相似,二者均在 2.5~2.6 THz 处有较强的吸收峰,且峰的强度与含能材料的用量具有较好的线性拟合关系,可用于定量分析。离子盐类

含能材料 HDNAT 与 FOX-12 的太赫兹吸收谱图十分类似,均在 2.1THz 和 2.5 THz 附近有 2 个特征吸收峰,可能是由二者共同具有的硝基振动产生。

3 结论

本文利用 THz-TDS 技术对 3 类 10 种典型含能材料的太赫兹吸收光谱进行了测试,并将它们的特征吸收峰强度对材料用量进行线性拟合,得出以下主要结论:

(1) 在含量材料的用量为 120~210 mg 范围内、检测频率为 0.1~3.0 THz 时,研究的 10 种材料的太赫兹吸收谱图都出现了 2 个及 2 个以上明显的特征峰,说明可采用 THz-TDS 技术对这些材料进行准确识别;

(2) 对于单环类含能材料,1.7~1.9 THz 为 $-\text{NO}_2$ 摆动扭动作用,2.3 THz 为分子晶格振动吸收峰;对于笼状类含能材料,1.4~1.8 THz 为笼状分子晶格振动吸收峰,而 2.5~2.6 THz 为 $-\text{NO}_2$ 摇摆振动作用;对于离子盐类含能材料,2.1 THz 和 2.5 THz 为 $-\text{NO}_2$ 摇摆振动所致的太赫兹特征吸收峰;

(3) 对研究的 10 种含能材料的特征吸收峰强度和其用量进行了线性拟合,对每种含能材料建立了至少一种定量分析方法;其中 RDX 可用来定量的吸收峰有 3 个,且 R^2 值均达到了 0.995 及以上,最易于进行定量分析;其次是 HMX,其在 1.86 THz 处的拟合方程的 R^2 值为 0.995,说明拟合度很高,适用于定量分析。

参考文献:

- [1] 李微微. 神经网络对爆炸物太赫兹光谱的识别[D]. 北京:首都师范大学,2009.
- [2] 高晓玲,曹建强,吕江,等. 氮质谱检测用于火工品大漏检测的可行性研究[J]. 火工品,2021(1): 51-55.
- [3] 高凤,刘文芳,孟子晖,等. 激光拉曼光谱技术在火炸药分析检测中的应用研究进展[J]. 含能材料,2018,26(2): 185-196.
- [4] 高凤,孟子晖,刘文芳,等. 拉曼光谱分析六硝基六氮杂异

- 戊兹烷的晶型纯度[J]. 含能材料, 2019, 27(3): 236-241.
- [5] 王明, 潘清, 李晓宇, 等. XRD 结合化学计量学方法测定 HMX 晶型纯度研究[J]. 火工品, 2022(1): 68-71.
- [6] 任林茂. 太赫兹技术在铁路安检中的应用[J]. 电子测试, 2014(18): 118-120.
- [7] 王高, 李茜, 姚建铨, 等. LLM-105 炸药的太赫兹时域光谱探测技术研究[J]. 火工品, 2011, 8(4): 40-43.
- [8] 杜欢. 太赫兹空气电离相干检测系统构建与应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [9] 魏佳宾. 太赫兹时域光谱成像系统构建及应用研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2017.
- [10] 吴斌, 杨延召, 应承平. 太赫兹光谱技术在四氢双环戊二烯检测中的应用[J]. 应用光学, 2020, 41(04): 786-790.
- [11] ZHANG Meng-hua, TAN Ying-xin, ZHAO Xu, et al. Seeking a novel energetic co-crystal strategy through the interfacial self-assembly of CL-20 and HMX nanocrystals[J]. Cryst EngComm, 2020, 22(6): 61-67.
- [12] 蔚旋, 王高, 祁乐融. 黑索今太赫兹吸收光谱仿真与形成机理的研究[J]. 中北大学学报(自然科学版), 2018, 38(06): 686-691.
- [13] 段俊杰. 火工药剂宽带 THz 光谱的检测与分析[D]. 西安: 西安理工大学, 2017.
- [14] Orbert P, Mateusz S, Elzbieta C, et al. Characterization of prospective explosive materials using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 125-150.
- [15] Choi J, Ryu S Y, Kwon W S, et al. Compound explosives detection and component analysis via terahertz time-domain spectroscopy[J]. Journal of the Optical Society of Korea, 2013, 17(5): 454-460.
- [16] 杨家懿. 太赫兹时域光谱系统数据处理及应用研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2020.
- [17] 施璐. CL-20/TNT 含能共晶 THz 光谱的理论研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2013.
- [18] 牧凯军. 爆炸物的太赫兹光谱研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2008.
- [19] 冯瑞姝. 爆炸性物质的 THz 光谱的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009.
- [20] 冯瑞姝, 李微微, 周庆莉. 爆炸物及相关混合材料的太赫兹波谱[J]. 无损检测, 2009, 31(5): 1 000-6 656.
- [21] 杜宇, 李敬明, 宗和厚. α -HMX 的太赫兹波吸收特性及理论计算[J]. 含能材料, 2015, 23(5): 454-458.
- [22] 安青, 段晓惠, 施璐. CL-20/HMX 共晶 THz 光谱的理论研究[J]. 含能材料, 2017(7): 65-78.
- [23] 刘泉澄, 张祺, 李桂林, 等. 2,6-二氨基-3,5-二硝基吡嗪的太赫兹光谱特性[J]. 光学学报, 2021, 41(14): 238-243.
- [24] 孟增睿, 尚丽平, 杜宇. LLM-105 太赫兹波吸收特性及理论计算[J]. 光谱学与光谱分析, 2015, 35(7): 1 179-1 782.
- [25] 安青. CL-20/HMX 含能共晶 THz 光谱的理论研究[D]. 绵阳: 西南科技大学, 2014.
- [26] Palka N, Szala M, Czerwinska E, et al. Characterization of prospective explosive materials using terahertz time-domain spectroscopy[J]. Applied Optics, 2016, 55(17): 4 575-4 583.