

# 基于太赫兹光谱技术的爆炸物类危险品检测

卢树华<sup>1,2</sup>

(<sup>1</sup> 中国人民公安大学安全防范系, 北京 102416; <sup>2</sup> 中国人民公安大学公安部安全防范重点实验室, 北京 102416)

**摘要** 太赫兹(THz)光谱技术识别爆炸物类危险品是一种极具竞争力的新型安检方法。总结了不同研究机构的爆炸物指纹谱数据,建立了可供参考的数据库;讨论了棉布、塑料、皮革、涤纶和硬纸板等常见材料覆盖下隐蔽爆炸物的检测状况;介绍了远距离探测爆炸物的最新研究进展。最后,分析了实战场景中应用 THz 光谱技术检测爆炸物需要面临的混合爆炸物、复杂环境条件和远距离探测等主要问题,并对未来的发展趋势作了展望。

**关键词** 光谱学;太赫兹;爆炸物;爆炸物检测;指纹谱

**中图分类号** TN247 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/LOP49.040006

## Detection of Explosives by Terahertz Spectroscopic Techniques

Lu Shuhua<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup> Department of Security Prevention, Chinese People's Public Security University, Beijing 102416, China  
<sup>2</sup> Key Laboratory of Security Prevention, Ministry of Public Security, Chinese People's Public Security University, Beijing 102416, China

**Abstract** Terahertz spectroscopic techniques have been regarded as competitive methods for the identification of explosives and related compounds. The explosives fingerprint data of various research institutions are reviewed to establish reference databases. The detection of explosives hidden under some materials including cotton, plastic, leather, polyester, cardboard etc. is discussed. The latest research advances of the remote detection of explosives are described. Furthermore, the major issues faced with mixed explosives, complex environment conditions, remote detection on THz detecting explosives in the actual scene and so on have been analyzed. The future trends in a preliminary outlook are pointed out.

**Key words** spectroscopy; terahertz; explosive; identification of explosive; fingerprint spectrum

**OCIS codes** 300.1030; 300.6495; 300.6170

## 1 引言

汽车爆炸、人体炸弹等恐怖事件频发,严重威胁着当今社会的公共安全,已受到各国政府的高度重视。传统的安检方法主要有 X 射线检测、中子检测和红外成像等。X 射线难以确定爆炸物的种类,无法识别液体炸药、生化威胁和人体炸弹,且对人体有害;中子检测难以实现远距离精确识别且危害较大;红外成像缺少爆炸物的指纹谱。因此,寻找一种简捷、安全、准确的检测方法成为了国际上研究的热点。太赫兹(THz)光谱检测技术作为一种新型的实时检测手段,具有很多优良的性质,如非电离性、强穿透性、高灵敏度以及指纹谱性等,能够有效检测出大部分危险品,特别是隐蔽爆炸物类危险品,应用前景广阔<sup>[1~4]</sup>。

THz 波是指频率在 0.1~10 THz 范围内的电磁波,波长为 0.03~3 mm,在电磁波谱上位于毫米波与红外线之间,是宏观电子学向微观光子学过渡的重要频段。长期以来,由于缺乏有效的 THz 辐射源和检测方法,导致 THz 频段的电磁波未得到有效应用。近 20 年来,随着超快激光技术的发展,THz 波的产生和应用研究得到了快速的发展,在物理、生物、化学、军事、天文学和安全检测等领域有重要应用<sup>[5~7]</sup>,其中,THz 技术在安全检测领域的应用充满了活力<sup>[1~7]</sup>。目前,包括中国在内的诸多国家和地区如美国、日本和欧洲等的科研机构都对 THz 技术应用于安检极为关注。科学家预测,不久的将来,THz 技术将成为机场、车站、码

**收稿日期**: 2011-09-21; **收到修改稿日期**: 2011-10-30; **网络出版日期**: 2012-01-19

**基金项目**: 中央高校基本科研业务经费(2011LG02)和中国人民公安大学校级科研项目资助课题。

**作者简介**: 卢树华(1978—),男,讲师,主要从事光电子光谱及安全检测等方面的研究。E-mail: lushuhua@cpps. edu. cn

头及海关等公共场所极具竞争性的新型安全检测手段<sup>[5]</sup>。

THz 技术应用于安全检测领域具有诸多优良的性质:1) 指纹谱性,THz 波通过与物质的相互作用(透射、反射、发射),可以携带物质大量的物理化学信息。大多数有机大分子(包括爆炸性物质和毒品等)的振动和转动能级谱处于 THz 波段,表现出特征吸收和色散,具有指纹谱性。THz 波能检测出物质结构的微小变化和差异,通过其检测出爆炸性物质的特征指纹谱,可以确定爆炸性物质的结构及种类。2) 非电离性,相比于 X 射线几十至几百千电子伏特的光子能量,THz 单光子能量较低,仅有几毫电子伏特(约 4.1 meV,仅为 X 射线的  $10^{-6}$  倍左右),不会使生物分子产生电离,是一种较为安全的无损探测方法,特别是应用于人体携带危险物品的检测时。此外,对安检操作人员也较为安全<sup>[8,9]</sup>。3) 强穿透性,THz 波可以有效穿透大多数非金属和非极性电介质材料,包括塑料、包裹、信封、行李、衣物、陶瓷甚至墙壁等隐蔽材料,故可以实现对非金属、非极性材料覆盖的隐蔽爆炸物品的非接触式检测<sup>[8~13]</sup>。

近几年来,THz 技术的研究发展较快。尽管 THz 光谱技术检测爆炸物的综述有些报道,但对近几年远距离探测爆炸物的最新进展汇总较少,同时对接近实战场景识别爆炸物面临的问题鲜有分析。

本文主要综述了爆炸物类危险品的 THz 波谱探测技术研究概况,分析了尚需面对的问题,并展望了未来的发展前景。

## 2 爆炸物的 THz 光谱探测技术

爆炸物的种类繁多,其组成成分和配方也不断发展变化,但是其核心成分仍是各种炸药。常见的炸药可分为单质炸药和混合炸药两类。单质炸药为单一成份的有机化合物(TNT、RDX、HMX、PETN、NG 等),主要是芳香族硝基化合物、硝胺类化合物、硝酸酯化合物以及胺类和硝酸盐类化合物。混合炸药是两种或两种以上单质炸药组成的混合物或单质炸药添加氧化剂和助燃剂等,常见的军用或民用炸药绝大部分是混合物。大多数有机大分子(含爆炸物、毒品等危险品)的转动和振动跃迁位于 THz 频段,运用 THz 光谱技术能够得到这些物质的折射率、吸收系数等丰富的光谱和结构信息,可以对炸药进行无损、非电离和高灵敏度的光谱测量。

### 2.1 爆炸物 THz 光谱数据库

较早开展爆炸物 THz 光谱测量的是 Campbell 等<sup>[14]</sup>和 Kemp 等<sup>[12]</sup>。2003 年,Campbell 等<sup>[14]</sup>报道了利用傅里叶红外(FTIR)光谱仪和 THz 光谱仪对 C4、PETN 和 Semtex A 炸药的光谱测量,指出 THz 光谱技术可以探测邮包或塑料隐蔽的爆炸物。同年,Kemp 等<sup>[12]</sup>研究了常见炸药的 THz 特征指纹谱,包括军用炸药 TNT、RDX、HMX、PETN 和商用 PE-4、塞姆汀塑胶炸药。随后,Yamamoto 等<sup>[15]</sup>和 Huang 等<sup>[16]</sup>也报道了 RDX 的特征光谱,结果与 Kemp 等的测量数据一致。由于部分爆炸物在 THz 波段有较大的吸收系数,2004 年,Shen 等<sup>[2,17]</sup>首次测得了 RDX 的反射光谱与透射光谱具有相同的特征,反射光谱也可用来鉴别爆炸物,丰富了 THz 光谱技术的检测手段。近年来,利用 THz 技术检测爆炸物的特征光谱成为了国际上研究的热点之一。美国 Rensselaer Polytechnic Institute 的研究小组从 2004 年开始对爆炸物的特征指纹谱进行了系统和深入的研究。2007 年该小组利用 THz 时域光谱术(THz-TDS)和傅里叶变换红外光谱术(FTIR, Bruker 66V/S)测得了 15 种单质炸药及相关化合物在 0.1~21 THz 区域的特征吸收谱<sup>[18]</sup>,见表 1。同年他们又利用 THz-TDS 测得了 17 种单质炸药及相关化合物在 0.1~2.8 THz 频段的特征指纹谱,为 THz 技术探测爆炸物的数据库的建立奠定了良好的基础<sup>[19]</sup>。

国内,首都师范大学太赫兹光电子学教育部重点实验室的课题组从 2006 年开始研究了一系列爆炸物的指纹谱,得到了 10 余种爆炸物的特征谱数据<sup>[6]</sup>,包括单质炸药 2,4-DNT、TNT、RDX、HMX、 $\gamma$ -HNIW、 $\epsilon$ -HNIW、TNPG 和混合炸药 8701、8702、R971、R852、PW0、PW30、Plastic-1 等<sup>[3,20~22]</sup>。其中该小组利用 THz-TDS 系统在国际上首次研究了 HNIW 多晶炸药( $\gamma$ -HNIW, $\epsilon$ -HNIW)在 0.2~2.5 THz 波段内的 THz 光谱,研究结果表明 THz 光谱技术可以鉴别不同晶型的炸药<sup>[3,20]</sup>。目前国际上利用 THz 光谱技术得到了多种爆炸物成份的特征指纹谱,本文对此进行了总结。不同文献报道的常见单质炸药或混合炸药小于 3 THz 的指纹谱数据如表 2 所示。其中,文献[24]首次报道了 TATP 在 0.2~18 THz 波段的特征吸收峰,小于 3 THz 区域的特征吸收位于  $56.6\text{ cm}^{-1}$  和  $67.1\text{ cm}^{-1}$ ,经过换算得出其频率位置分别为 1.70 THz 和 2.01 THz。

表 1 炸药及其化合物的 THz 吸收谱(0.1~21 THz)

Table 1 Absorption peak positions of explosives and related compounds (ERC) (0.1~21 THz)

ERCs	Absorption peak positions /THz
TNT	1.66, 2.20, 3.69, 4.71, 5.52, 8.28, 9.12, 9.78, 10.65, 11.01, 13.86, 15.15, 16.95, 17.37, 19.17, 19.89
RDX	0.82, 1.05, 1.50, 1.96, 2.20, 3.08, 6.73, 10.35, 11.34, 12.33, 13.86, 14.52, 17.74, 18.12, 20.13
HMX	1.78, 2.51, 2.82, 5.31, 6.06, 11.28, 12.00, 12.54, 12.96, 13.74, 14.55, 18.15, 18.60, 19.38
PETN	2.0, 2.84
Tetryl	5.97, 10.11, 11.28, 14.67, 16.14, 18.36
2A-DNT	0.96, 1.43, 1.87, 3.96, 5.07, 6.27, 8.49, 9.87, 10.77, 12.15, 13.44, 16.68
4A-DNT	0.52, 1.24, 2.64, 3.96, 5.04, 5.82, 7.53, 9.30, 10.20, 11.13, 13.86, 14.97, 17.70
4-NT	1.20, 1.37, 1.86, 6.75, 8.85, 10.83, 14.04, 15.66, 18.51
1,3,5-TNB	4.17, 4.62, 10.05, 11.19, 13.80, 15.75, 19.05
1,3-DNB	0.94, 1.19, 2.37, 10.56, 12.18, 15.33, 17.13
1,4-DNB	3.24, 3.96, 5.55, 10.38, 12.45, 13.29, 15.21, 15.54
2,4-DNT	0.45, 0.66, 1.08, 2.52, 4.98, 8.88, 10.56, 11.58, 12.81, 14.34, 15.69, 19.05, 20.04
2,6-DNT	1.10, 1.35, 1.56, 2.50, 5.61, 6.75, 9.78, 11.43, 13.32, 13.89, 15.39, 17.25
3,5-dinitroaniline	0.96, 1.20, 3.18, 4.62, 5.04, 5.91, 7.44, 10.62, 10.98, 14.46, 16.41, 18.18
2-NDPA	2.19, 2.58, 2.88, 3.45, 5.13, 6.18, 7.56, 10.08, 12.33, 13.05, 15.00, 15.60, 16.29, 17.34, 18.51, 19.32

表 2 不同文献报道的单质炸药及混合炸药的特征谱数据(频率小于 3 THz)

Table 2 Absorption data (frequency less than 3 THz) of ERC obtained from various literatures

ERC	Absorption peak positions /THz	Refs
TNT	1.62, 2.20	[19]
2A-DNT	0.95, 1.42, 1.87	[19]
4A-DNT	0.51, 1.25, 2.64	[19]
4-NT	1.21, 1.36, 1.86	[19]
1,3-DNB	0.94, 1.19, 2.37	[19]
2,4-DNT	0.45, 0.66, 1.08, 1.36, 2.54	[19]
2,6-DNT	1.10, 1.36, 1.58, 2.50	[19]
Tetryl	1.17, 2.06, 2.70	[19]
RDX	0.82, 1.05, 1.36, 1.54, 1.95, 2.19	[19]
HMX	1.78, 2.51, 2.82	[19]
PETN	2.00, 2.16, 2.84	[19]
NG	1.43, 2.38, 2.76	[19]
DMNB	1.15, 1.44	[19]
KClO <sub>4</sub>	2.00, 2.22, 2.60	[19]
KClO <sub>3</sub>	No featured absorption band	[19]
KNO <sub>3</sub> , S, C (black powder)	1.81, 2.04, 2.27, 2.72	[19]
NH <sub>4</sub> NO <sub>3</sub>	No featured absorption band	[19]
RDX	0.82, 1.06, 1.45, 1.98	[3]
ε-HNIW	0.99, 1.32, 1.43, 2.08, 2.51	[3]
γ-HNIW	1.05, 1.52, 1.67, 1.90	[3]
HMX	1.80, 2.48	[3]
2,4-DNT	1.08	[3]
TNPG	1.06, 1.40	[21]
Desensitized RDX	0.82, 1.04, 1.36, 1.95	[22]
8701 (RDX based)	0.83, 1.05, 1.37, 1.97	[22]
8702 (mixture of HMX as main ingredient)	1.79, 2.48	[22]
R971 (mixture of RDX as main ingredient)	0.82, 1.05, 1.38, 1.96	[22]

(续表)

ERCs	Absorption peak positions /THz	Refs
R852 (mixture of RDX as main ingredient)	0.827,1.05,1.38,1.96	[22]
PW0 (RDX+Al)	0.82,1.047,1.376,1.96	[22]
PW30 (RDX+Al)	0.82,1.055,1.39,1.92	[22]
Plastic-1	0.83,1.08,1.36,1.92	[22]
Semtex-H (RDX+PETN+plasticiser)	0.72,1.29,1.73,1.88,2.15,2.45,2.57	[23]
PE4 (RDX+plasticiser)	0.72,1.29,1.73,1.94,2.21,2.48,2.69	[23]
RDX	0.72,1.29,1.73	[23]
PETN	1.73,2.51	[23]
HMX	1.58,1.91,2.21,2.57	[23]
TNT	1.44,1.91	[23]
TATP	1.70,2.01	[24]

## 2.2 隐蔽爆炸物的 THz 光谱探测

THz 波能够有效穿透一般的非极性材料,包括塑料、包裹、信封、行李、衣物和陶瓷等。研究表明,这些材料在 THz 波段的吸收光滑,无明显吸收峰位<sup>[12,23,25,26]</sup>。结合炸药的特征指纹谱数据,THz 技术成为了检测隐蔽爆炸物的有力手段。2004 年,Tribe 等<sup>[23]</sup>测量了普通材料涤纶、棉布、人造皮革和纸板对 THz 波的吸收结果,发现这些材料仅在小于 2 THz 的波段有些许吸收。由于衣物覆盖下的危险品在实际应用中更为常见,2004 年,Baker 等<sup>[26]</sup>研究了衣服遮盖下的 SX2 爆炸物 THz 折射谱,表明 THz 技术可以鉴别 4 层衣物下面隐藏的危险品。2007 年,Chen 等<sup>[18]</sup>检测了空气中 RDX 和 HMX 在不同材料隐蔽下的 THz 吸收谱以及 RDX+塑料、RDX+棉布和 HMX+塑料、HMX+皮革的吸收谱,结果表明:塑料、皮革和棉布三种隐蔽材料在 0.1~3 THz 波段基本透明,虽然空气中水分子对 THz 波的吸收影响了测量结果,但是 RDX 和 HMX 在不同材料隐蔽下的特征吸收仍清晰可见,与纯品的特征谱吻合较好,如图 1 所示。这证明了 THz 光谱技术检测隐蔽爆炸物切实可行,也印证了文献<sup>[12,26]</sup>的结果。

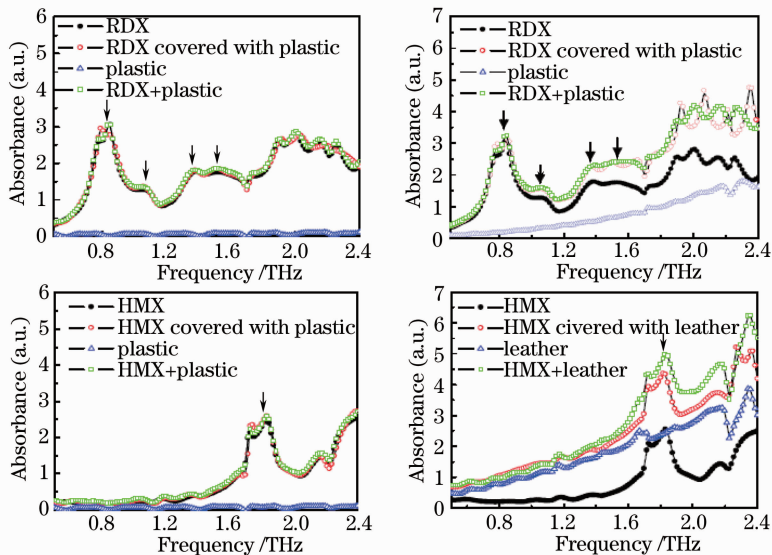


图 1 RDX 和 HMX 在不同材料隐蔽下的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectra of RDX and HMX covered with different materials

## 2.3 远距离探测爆炸物

空气中水分子的较强吸收使得 THz 波在空气中衰减很快,超过 100 dB/km。水分子明显的吸收(部分吸收峰位于 0.56,0.75,0.99,1.10,1.11,1.16,1.21,1.22,1.41,1.60,1.66,1.71 THz),特别是在 1 THz 以上的频段,降低了吸收光谱的信噪比(SNR)和准确性,因此 THz 波对爆炸物的检测多以  $N_2$  为保护气氛并在极短距离内进行的,使得远距离探测爆炸物较难实现<sup>[9,27]</sup>,而近距离检测会使安检人员暴露在爆炸物品

的威胁中且难以及时做出预警,因此 THz 远距离探测爆炸物成为研究人员的努力方向。近几年来,美国 Rensselaer Polytechnic Institute 的研究小组在对 THz 远距离探测技术的研究方面表现得非常活跃。

2006 年, Liu 等<sup>[28]</sup> 利用漫反射 THz-TDS 装置在空气中测量了不同材料(纸、聚乙烯、皮革和聚酯纤维)覆盖下 RDX 的反射谱,经过计算得出,虽然 RDX 在很多频率处的吸收无法辨认,但在 0.82 THz 处的特征吸收峰仍然可以确定,使得远距离探测隐藏爆炸物成为可能。2007 年, Liu 等<sup>[19]</sup> 继续利用反射式 THz-TDS 系统在 2.5~30 m 范围内测量了 RDX 不同湿度条件下的吸收谱,发现此方法识别 RDX 的最远距离为 30 m。2009 年, Liu 等<sup>[29]</sup> 研究了 THz 辐射增强气体等离子体荧光的探测机理,发现单色激光诱导荧光可以用来进行远程非相干 THz 探测而不是相干探测。2010 年,他们又报道了双色激光诱导增强荧光法,克服了文献[29]中只能得到 THz 波的强度而丢失相位信息的缺点,实现了距离 10 m 的宽带 THz 辐射探测,且突破了光信号收集方向的局限以及水汽的强烈吸收<sup>[30]</sup>。研究人员用双色 THz 辐射增强气体等离子体荧光方法测量了 4A-DNT 的吸收谱并与电光晶体测量结果相比较,发现两种方法所得结果符合很好,如图 2 所示。不足之处是使用固态晶体做 THz 波源,限制了其探测距离和带宽(小于 3 THz)。为了解决上述问题,使 THz 波更接近实际场景探测,2011 年, Clough 等<sup>[31]</sup> 设计了全气体等离子体荧光编码 THz 光谱系统,该系统将爆炸物的谐振标志编码进双色激光诱导等离子体氮荧光,通过激光等离子实现 THz 波产生与检测,即一部分脉冲能量(70%)用来产生 THz 波,另一部分(30%)经衰减后用来产生探测等离子体氮荧光。利用这种方法测得了掺有 20% (质量分数) 聚乙烯的 NG、2,4-DNT 和 HMX 混合物的 THz 时域波形及吸收谱,并与电光晶体所测量结果进行了对比分析,如图 3 所示。尽管由于样品的位置不同和 THz 光束重叠,使两种方法的波形与吸收信号测量结果有微小差异,但吸收峰的位置与 THz-TDS 光谱重复性较好。结果表明,此方法有望使 THz 波探测爆炸物摆脱距离和环境等因素的束缚,在走向实用方面发挥重要作用。当然,相较于传统的 THz-TDS 方法,辐射增强气体离子体荧光方法也存在一些弱点,如信噪比低、等离子体屏蔽效应、需要足够强的磁场调制荧光等,都需要进一步研究。

### 3 分析与展望

目前,国际上对 THz 技术应用于爆炸物的识别仍以实验室条件的测量研究为主,尚未有效应用于实际情况,而在实战场景中检测爆炸物品远比实验室检测条件复杂得多,需要面对不同温度、不同湿度和极端天气等复杂环境条件,混合成分的爆炸物和隐蔽爆炸物等不同检测目标,并存在需远距离爆炸物探测以便及时作出预警等困难,仍然需要大量的研究工作。

已有文献报道的对爆炸物的探测主要针对单质炸药的探测,混合炸药的识别和探测较少。而实际情况

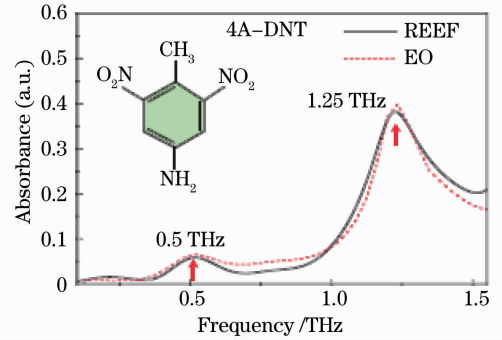


图 2 双色辐射增强气体等离子体荧光和电光晶体测量 4A-DNT 的 THz 吸收谱

Fig. 2 Comparison of THz absorption spectra of 4A-DNT measured by radiation-enhanced-emission of fluorescence (REEF) from gas plasma and that measured with electro-optic (EO) crystal sampling

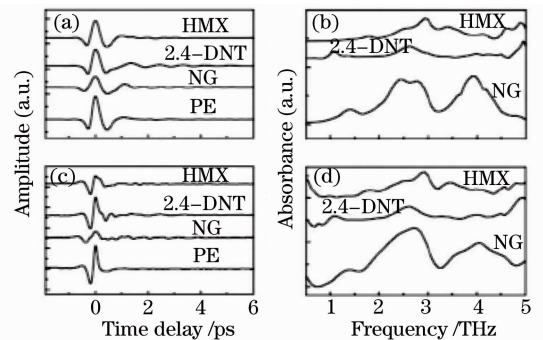


图 3 (a) 电光晶体测量含 20% 聚乙烯的 NG、2,4-DNT 和 HMX 的波形; (b) 与(a) 相对应的吸收谱; (c) 辐射增强气体等离子体荧光编码测得的波形; (d) 与(c) 相对应的吸收谱  
Fig. 3 (a) THz waveforms for pellet samples NG, 2,4-DNT and HMX containing 20% chemical mixture of polyethylene (PE) obtained using EO crystal sampling; (b) absorption spectra corresponding to samples in (a); (c) identical samples and corresponding waveforms obtained using REEF encoding; (d) absorption spectra corresponding to samples in (c)

要复杂得多,爆炸物的种类繁多,其组成成分和配方也不断地发展变化,且大多是混合爆炸物<sup>[32]</sup>。另外,由于一些爆炸性物质如 Tetryl、1,3,5-TNB、1,4-DNB 和  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  等在低于 3 THz 的波段内无明显的特征吸收,其中  $\text{NH}_4\text{NO}_3$  却是汽车炸弹的常用成分,这就要求未来增加对爆炸物在宽频区域的 THz 吸收谱测量。最近 Leahy-Hoppa 等<sup>[33]</sup>研究了 4 种爆炸物 RDX, HMX, PETN 和 TNT 宽频段(0.5~6 THz)的 THz-TDS 测量,在 3~6 THz 波段发现了很多新的吸收峰。而国际上对于更多爆炸物的宽谱测量报道仍较少。从表 2 可以看出,由于使用的测量仪器及数据处理方法各异,不同研究机构对同种爆炸物的测量数据也不完全一样,国际上尚缺乏统一的标准。由于水对 THz 波有较强的吸收,使得一些液体炸药较难探测,可考虑使用反射谱来识别液体炸药。一些固体爆炸物处于溶液中或非晶态时也较难探测。当前,由于 THz 检测仪器的价格昂贵,国内对爆炸物的 THz 技术检测开展研究的机构较少。利用 THz 技术对混合爆炸物进行光谱测量、对不同爆炸物进行更宽区域的光谱测量和完善爆炸物数据库是 THz 应用于实战的前提。

2.1 节中讨论的爆炸物特征吸收谱大都是在实验室条件下测量的结果,温度为室温,相对湿度小于 5%,以  $\text{N}_2$  为保护气氛。而实际情况却非如此,THz 技术在复杂环境条件下的应用面临诸多挑战,如爆炸性物质的 THz 吸收谱随温度的变化而发生频移或吸收峰位等变化,水蒸气的较大吸收,复杂的天气条件、温度和湿度等都会对 THz 的光谱产生影响。2010 年, Melinger 等<sup>[34]</sup>报道了部分爆炸物 4A-DNT、HMX 和 PETN 的指纹谱与温度的关系,但是更多爆炸物接近实际场景温度(230~310 K)的 THz 光谱信息有待进一步研究。2009 年,冯瑞珠<sup>[35]</sup>对多种炸药在不同湿度条件下的检测进行了深入研究,包括 HMX(相对湿度 4%, 8%, 14%, 18%, 40%), RDX(3%, 9%, 13%, 21%), PETN(4%, 8%, 13%, 40%), plastic-1(4%, 12%, 15%, 21%)。结果表明:随着湿度的增大几种材料的 THz 吸收增大,而每种爆炸物在不同湿度条件下仍具有相同的特征吸收峰,并且吸收谱整体趋势相同,利用该特性可以识别爆炸物。值得一提的是,阴雨天气中湿度较大时(约 90%)的水蒸气对 THz 吸收谱的影响报道较少。

金属材料会对 THz 波产生屏蔽,金属材料包裹的爆炸物不宜使用该技术进行识别,需与其他检测手段相互配合。另外,强极性材料也会阻碍 THz 波的穿透。空气中水蒸气对 THz 电磁波的吸收、尘埃等对 THz 波的散射都会影响 THz 的传输,使得 THz 波远距离的探测、预警较难实现,最近在远距离探测爆炸物方面取得了可喜的进展,但也存在很多局限。

现阶段,THz 波探测仪器结构复杂,体积庞大,且价格昂贵,器件尚未成熟,只适合在实验室操作,部分试用的小型探测仪功率较低、波谱较窄。便携式、成本低的实用型装置有利于实际场景检测和大规模装备。

虽然面对诸多困难,但由于科研工作者不懈的努力,接近实战情景的 THz 波探测应用已做出了令人鼓舞的成绩。相信在不久的将来,基于 THz 技术的探测仪器就会出现在安检现场。

## 参 考 文 献

- 1 J. Federici, B. Schulkin, F. Huang *et al.*. THz imaging and sensing for security applications-explosives, weapons, and drugs[J]. *Semicond. Sci. Technol.*, 1995, **20**(7): S266~S280
- 2 Y. C. Shen, P. F. Taday, M. C. Kemp. Terahertz spectroscopy of explosive materials[C]. *SPIE*, 2004, **5619**: 82~89
- 3 Ying Hu, Ping Huang, Lantao Guo *et al.*. Terahertz spectroscopic investigations of explosives[J]. *Phys. Lett. A.*, 2006, **359**(6): 728~732
- 4 Alexander Sinyukov, Ivan Zorych, Zoi-Heleni Michalopoulou *et al.*. Detection of explosives by terahertz synthetic aperture imaging-focusing and spectral classification[J]. *C. R. Physique*, 2008, **9**(2): 248~261
- 5 Yao Jianquan. Introduction of THz-wave and its applications [J]. *J. Chongqing University of Posts and Telecommunications (Natural Science Edition)*, 2010, **22**(6): 703~707
- 姚建铨. 太赫兹技术及其应用[J]. *重庆邮电大学学报(自然科学版)*, 2010, **22**(6): 703~707
- 6 Zhang Cunlin, Mu Kaijun. Terahertz spectroscopy and imaging[J]. *Laser & Optoelectron. Progress*, 2010, **47**(2): 023001
- 张存林, 牧凯军. 太赫兹波谱与成像[J]. *激光与光电子学进展*, 2010, **47**(2): 023001
- 7 J. M. Dai, J. Liu, X. C. Zhang. Terahertz wave air photonics: terahertz wave generation and detection with laser-induced gas plasma[J]. *IEEE J. Sel. Top. Quant. Electron.*, 2011, **17**(1): 183~190
- 8 J. F. Federici, Robert Barat, Dale Gary *et al.*. THz standoff detection imaging of explosives and weapons[J]. *SPIE*, 2005, **5727**: 123~131
- 9 Haibo Liu, Xicheng Zhang. Terahertz Spectroscopy for Explosive, Pharmaceutical, and Biological Sensing Applications in

- R. E. Miles, X. C. Zhang, H. Eisele *et al.*. (eds.). Terahertz Frequency Detection and Identification of Materials and Objects[M]. Berlin: Springer, 2007. 251~323
- 10 M. J. Fitch, D. Schauki, C. Dodson *et al.*. THz spectroscopy of explosives and related compounds[C]. *SPIE*, 2004, **5411**: 84~91
- 11 Peter Uhd Jepsen, David G. Cooke, Martin Koch. Terahertz spectroscopy and imaging-modern techniques and applications [J]. *Laser Photon. Rev.*, 2011, **5**(1): 124~166
- 12 M. C. Kemp, P. E. Taday, B. E. Cole *et al.*. Security applications of terahertz technology[C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 44~52
- 13 Michael C. Kemp. Millimetre wave and terahertz technology for the detection of concealed threats-a review[C]. *SPIE*, 2006, **6402**: 64020D
- 14 Matthew B. Campbell, Edwin J. Heilweil. Non-invasive detection of weapons of mass destruction using THz radiation[C]. *SPIE*, 2003, **5070**: 38~43
- 15 Kohji Yamamoto, Mariko Yamaguchi, Fumiaki Miyamaru *et al.*. Noninvasive inspection of C-4 explosive in mails by terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 2004, **43**(3B): L414~L417
- 16 F. Huang, B. Schulkin, H. Altan *et al.*. Terahertz study of 1,3,5-trinitro-s-triazine by time-domain and Fourier transform infrared spectroscopy[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2004, **85**(23): 5535~5537
- 17 Y. C. Shen, T. Lo, P. F. Taday *et al.*. Detection and identification of explosives using terahertz pulsed spectroscopic imaging[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2005, **86**(24): 241116
- 18 Jian Chen, Yunqing Chen, Hongwei Zhao *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
- 19 Haibo Liu, Hua Zhong, Nicholas Karpowicz *et al.*. Terahertz spectroscopy and imaging for defense and security applications[J]. *Proc. IEEE*, 2007, **98**(8): 1514~1527
- 20 Lantao Guo, Ying Hu, Yan Zhang *et al.*. Vibrational spectrum of  $\gamma$ -HNIW investigated using terahertz time-domain spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(8): 3654~3659
- 21 Qingli Zhou, Cunlin Zhang, Kaijun Mu *et al.*. Optical property and spectroscopy studies on the explosive 2,4,6-trinitro-1,3,5-trihydroxybenzene in the terahertz range[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 2008, **92**(10): 101106
- 22 Ruishu Feng, Weiwei Li, Qingli Zhou *et al.*. Terahertz spectroscopic investigations explosives and the related compounds [C]. *SPIE*, 2009, **7158**: 71580W
- 23 W. R. Tribe, D. A. Newnham, P. F. Taday *et al.*. Hidden object detection; security applications of terahertz technology [C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 168~176
- 24 John Wilkinson, Christopher T. Konek, Jesse S. Moran *et al.*. Terahertz absorption spectrum of triacetone triperoxide[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2009, **478**(4-6): 172~174
- 25 D. J. Cook, B. K. Decker, G. Maislin *et al.*. Through container THz sensing: applications for explosives screening[C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 55~62
- 26 C. Baker, W. R. Tribe, B. E. Cole *et al.*. Developments in people screening using terahertz technology[C]. *SPIE*, 2004, **5354**: 61~68
- 27 Cai He, Guo Xuejiao, He Ting *et al.*. Terahertz wave and its new applications[J]. *Chin. J. Opt. Appl. Opt.*, 2010, **3**(3): 209~222
- 蔡禾, 郭雪娇, 和挺等. 太赫兹技术及其应用研究进展[J]. *中国光学与应用光学*, 2010, **3**(3): 209~222
- 28 Haibo Liu, Yunqing Chen, Glenn J. Bastiaans *et al.*. Detection and identification of explosives RDX by THz diffuse reflection spectroscopy[J]. *Opt. Express*, 2006, **14**(1): 415~423
- 29 J. Liu, X. C. Zhang. Terahertz-radiation-enhanced emission of fluorescence from gas plasma[J]. *Phys. Rev. Lett.*, 2009, **103**(23): 235002
- 30 Jingle Liu, Jianming Dai, See Leang Chin *et al.*. Broadband terahertz wave remote sensing using coherent manipulation of fluorescence from asymmetrically ionized gases[J]. *Nature Photon.*, 2010, **4**(9): 627~631
- 31 Benjamin Clough, Jingle Liu, X. C. Zhang. "All air-plasma" terahertz spectroscopy[J]. *Opt. Lett.*, 2011, **36**(13): 2399~2401
- 32 Megan R. Leahy-Hoppa, Michael J. Fitch, Robert Oslander. Terahertz spectroscopy techniques for explosives detection [J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2009, **395**(2): 247~257
- 33 M. R. Leahy-Hoppa, M. J. Fitch, X. Zheng *et al.*. Wideband terahertz spectroscopy of explosives[J]. *Chem. Phys. Lett.*, 2007, **434**(4-6): 227~230
- 34 Joseph S. Melinger, S. Sree Harsha, N. Laman *et al.*. Temperature dependent characterization of terahertz vibrations of explosives and related threat materials[J]. *Opt. Express*, 2010, **26**(18): 27238~27250
- 35 Feng Ruishu. Terahertz Spectroscopic Investigation of Explosives[D]. Beijing: Capital Normal University, 2009
- 冯瑞殊. 爆炸性物质的 THz 光谱的研究[D]. 北京: 首都师范大学, 2009