

文章编号: 2095-4980(2017)01-0054-05

基于激光光谱的远距离炸药探测技术

汪 辉, 方 东, 凌国平, 王 群

(近地面探测技术重点实验室, 江苏 无锡 214035)

摘 要: 激光光谱技术能够提供炸药的光谱“指纹”信息, 具有远距离快速探测能力, 近年来得到国内外的广泛关注。重点阐述了激光拉曼光谱和激光诱导击穿光谱应用于远距离炸药探测的基本原理、技术特点和发展现状及趋势, 并在此基础上, 分析了激光光谱远距离炸药技术的应用前景。

关键词: 光谱; 拉曼光谱; 激光诱导击穿光谱; 炸药探测; 远距离探测

中图分类号: TN247

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201701.0054

Analysis on laser spectroscopy applied for standoff explosives detection

WANG Hui, FANG Dong, LING Guoping, WANG Qun

(Science and Technology on Near-Surface Detection Laboratory, Wuxi Jiangsu 214035, China)

Abstract: Standoff detection of explosives is a subject of great interests in active terrorism. Laser spectroscopy techniques seem to be the most promising approaches for standoff detection and unique identification of explosives, and attract wide attention in these years. This article elaborates the principles, characteristics, and the current development situations of Raman Spectroscopy(RS) and Laser Induced Breakdown Spectroscopy(LIBS). Based on the analysis, the application prospects of standoff laser spectroscopy for explosives detection are described.

Keywords: spectroscopy; Raman Spectroscopy; Laser Induced Breakdown Spectroscopy; explosive detection; standoff detection

随着恐怖爆炸活动的日益猖獗, 炸药探测技术变得越来越重要。当前炸药探测手段主要有离子迁移谱、荧光聚合物传感器、核四极矩共振、中子质询和激光光谱技术等, 这些技术需要近距离接触或者样品采样, 这将给操作人员带来很大的安全威胁。具有远距离炸药探测能力的激光光谱技术^[1]在降低操作人员安全风险的情况下能够有效提供爆炸物预警, 被认为是一种对抗恐怖爆炸活动的有效手段, 受到广泛关注并得到迅速发展。激光光谱远距离炸药探测技术是一项迫切需求的技术, 然而发展这项技术具有极大的难度, 不是简单地将实验室环境下的物质光谱分析技术应用于远距离探测就可以实现。其主要困难来源于 3 方面: a) 可供探测的炸药量极少, 通常认为在 10 μg 量级甚至更少; b) 距离的增加会大幅度降低光谱信号强度, 影响探测灵敏度, 通常探测距离需要大于 10 m; c) 复杂环境背景的干扰严重影响炸药的准确探测识别。所以, 快速、准确、灵敏、可探测距离成为衡量激光光谱远距离炸药探测技术的主要技术指标。有望用于远距离炸药探测的激光光谱技术主要有拉曼光谱(RS)技术、激光诱导击穿光谱(LIBS)技术、光碎片激光诱导荧光光谱(Photo Fragmentation Laser Induced Fluorescence, PF-LIF)技术、共振拉曼光谱(Resonance-enhanced Raman Spectroscopy, RRS)技术、红外光谱(Infrared spectroscopy, IR)技术、光声光谱(Photo-Acoustic Spectroscopy, PAS)技术等, 其中 RS 和 LIBS 是 2 种主流技术并且已在户外环境测量中获得初步实验结果。本文分别针对这 2 种技术应用于远距离炸药探测的基本原理、技术特点和发展现状及趋势进行重点阐述, 并在此基础上, 分析了基于激光光谱远距离炸药探测技术的应用方向。

1 拉曼光谱技术

拉曼光谱技术是一种基于拉曼散射效应的光谱分析技术, 能够给出物质分子的指纹信息从而对物质进行鉴别。作为物质分析的一种手段, 许多年来一直应用于实验室环境, 随着激光技术和电荷耦合元件(Charge Coupled

Device, CCD)相机的迅速发展,拉曼光谱技术在户外环境下应用于远距离炸药探测成为可能。

1.1 基本原理及特点

拉曼光谱的基本原理是用一束激光入射到目标炸药分子上,除了产生与入射光频率 ω_0 相同的散射光以外,还会产生一些频率分量为 $\omega_0 \pm \omega_M$ 的散射光, ω_M 是与分子振动或者转动相关的频率,这些 ω_M 被认为是炸药分子的指纹谱,只要测量得到 ω_M 及其谱线强度等数据,就可以用来研究炸药分子结构,而这个结构可以作为物质种类识别的依据。拉曼光谱为瞬时光谱,寿命很短,几乎与激发光同步,并且能够提供炸药分子指纹信息,具有探测时间短,物质识别准确度高等特点。但是拉曼光谱的强度非常弱,例如最强的常规拉曼散射只有入射激光强度的 10^{-6} ,有些固体介质甚至只有 10^{-12} ;另一方面,在激发拉曼散射的同时,必然产生瑞利散射,有时还产生与拉曼散射在同一波段的光致发光,强度通常都大于拉曼散射几倍至上千倍,这 2 个特点成为远距离炸药探测必须注意解决的关键问题。

1.2 发展现状及趋势

激光拉曼光谱远距离探测原理的首次提出是在 20 世纪 60 年代中叶,由于拉曼光谱固有信号十分微弱以及受到 CCD 发展的限制,所以仅仅是从理论上分析了其可行性。直到 20 世纪 70 年代早期,才开展了初期的拉曼光谱远距离探测探索试验,但主要工作集中在优化激光器和传输光路以及器件的选型,并局限于中短距离的夜间试验。20 世纪 90 年代,拉曼光谱远距离探测技术蓬勃发展,主要应用领域是大气环境测量,其探测系统普遍体积庞大,望远镜口径达到 1 m 甚至更大,1992 年 Angel 等开始开展小型拉曼探测系统的研制,其系统可探测固体和液体,探测距离达到 16.7 m,探测时间为 60~120 s。

为了克服自然背景光和光致荧光对目标固有微弱拉曼散射光的干扰,提高探测灵敏度,研究人员采用脉冲激光器进行激发,通过纳秒门控增强电荷耦合器件(Intensified CCD, ICCD)对拉曼光谱进行探测。2005 年, Carter^[2]等研究的远程拉曼探测系统采用 Nd:YAG 激光器的倍频光 532 nm 激发,门控时间为 1 μ s~10 ms,在日常环境光条件下获得较好的光谱,实验探测到 50 m 外的爆炸物,他们研究的爆炸物包括黑索今(RDX)、三硝基甲苯(TNT)、太安(PETN)以及硝酸盐和氯酸盐模拟剂,炸药含量为 8%。2009 年, Pettersson^[3]等在室外环境采用波长为 532 nm 的激光器对 30 m 处大量爆炸物和配剂进行了探测,包括熵炸药(TATP)、HMYD、硝基甲烷、硝基苯和不同容器材料(棕色绿色玻璃, PET 瓶),并研究了激光波长对探测效果的影响,结果表明 532 nm 可见激光激发的拉曼光谱容易受到荧光干扰,但优点在于可见光对光路中的雨雪吸收不敏感,并且具备穿透各种容器材料的能力。

在外场试验方面,2012 年加拿大 Rosalie Forest^[4]等研究设计了一套拉曼光谱激光雷达,通过分析拉曼光谱,研究评估远距离探测爆炸物的可行性,试验炸药对象包括 RDX,TNT,PETN,HMX,HMTD 和 Urea Nitrate,经试验该系统能在 20 m 的距离处准确探测和识别微量炸药。2013 年,韩国国防高级开发研究院^[5]研究设计了一种基于纳秒门控技术的远程拉曼系统,该系统被成功用于探测置于 10~54 m 外的简易爆炸装置(Improvised Explosive Device, IED),能分辨出其中含有的包括 TNT,RDX 和 HMX 在内的 20 种以上化学成份。通过门控技术,包括室内荧光灯以及室外太阳光在内的较大环境光背景成功得到了抑制,使得室外远距离探测不再受背景限制而成为可能。

近年来,研究人员将目光逐渐转向紫外波段的拉曼光谱,主要是基于 4 种考虑: a) 拉曼光谱的信号强度和波长的四次方成反比; b) 当激发波长低于 250 nm 时,拉曼散射波数达到 $4\ 000\ \text{cm}^{-1}$,能有效抑制荧光干扰; c) 紫外光对人眼较安全; d) 紫外波长能量接近炸药分子电子跃迁能级,容易产生共振,拉曼信号强度可得到 $10^2\sim 10^6$ 倍的增强。2010 年,普林斯顿大学研究人员^[6]用 229 nm 激光测量了 TNT,PETN,RDX 以及 HMX 的拉曼强度,相比于可见光和近红外,信号强度增强了 1 000 倍,探测灵敏度达到 ppb 量级,证明了共振拉曼光谱在远距离炸药探测的可行性,是未来重要发展方向之一。

2 激光诱导击穿光谱技术

激光诱导击穿光谱技术是一种基于原子发射光谱学的物质成分和浓度分析技术。以激光为能源产生的等离子体称为激光等离子体,它能将各种材料汽化,为进行元素分析提供一种独特的条件,通过对激光等离子体的性质进行深入研究,可实现物质的定性和定量分析。作为一种新的分析手段,激光诱导击穿光谱技术越来越引起人们的重视,并被应用于远距离炸药探测。

2.1 基本原理及特点

激光诱导击穿光谱技术的基本原理是利用高能量密度的激光脉冲(纳秒、皮秒或者飞秒量级)聚焦到炸药分子

表面,产生由电子、离子和原子组成的高温高压等离子体,并发射出较强并有特征波长的谱线,通过聚焦并耦合到光纤,最终传输到探测器,这些特征谱线的强度与该原子对应的元素在炸药分子中的含量密切关联,因而可用于炸药分子中所含元素的种类识别及含量测量。

激光诱导击穿光谱谱线相对较强,不需要高灵敏的探测器,非常适合远距离探测。但是激光诱导击穿光谱探测技术主要是识别炸药元素种类并测量其含量,在实际探测环境中,存在许多干扰因素,比如空气中的 N_2 和 O_2 ,会严重影响含量测量的准确度进而影响物质鉴别,另一方面,许多含硝基化学物质的成分和炸药成分类似,也会影响物质的判别,能否提高炸药识别的准确度成为激光诱导击穿光谱技术应用于远距离炸药探测的关键因素。

2.2 发展现状及趋势

激光诱导击穿光谱技术是从原子角度对物质成分进行分析,具有很多独特的优势和广泛的应用前景。早在 2003 年,美国陆军研究实验室(Army Research Laboratory, ARL)开始利用单激光脉冲远距离 LIBS 技术进行爆炸物残留探测^[7],探测距离达 30 m。2006 年, Lopez-Moreno^[8]等证明了用同轴结构的单脉冲 LIBS 技术探测有机能量物质的可能性,采用调 Q Nd:YAG 激光器,以 20 Hz 重复频率输出单脉冲能量 350 mJ 的激光,在 45 m 的室外环境中,对 6 种炸药进行盲测,通过对 N, O, H 元素的峰值比来对有机炸药和非炸药有机物进行判别,结果 15 种样品正确判别 13 种,探测灵敏度达到 5 μg 。ARL 联合应用光子公司开展了以国防安全为应用背景的远程 LIBS 技术,他们使用光学望远聚焦系统将纳秒激光脉冲线性聚焦到远距离的爆炸危险物,2009 年的试验结果显示在 25 m 远处,系统能够区分爆炸物和非爆炸物。

为了改善激光诱导击穿光谱检测的灵敏度和精确度,研究人员提出采用双脉冲激发的方法增强激光诱导击穿光谱的强度。2007 年开始,ARL 的 Gottfried 等研究双脉冲远距离激光诱导击穿光谱技术(DP-STLIBS),他们采用 Nd:YAG 激光器的基频 1064 nm 和三倍频 355 nm 双束激光,能够在数十米以外探测多种危险物质。在 2012 年,又分别开展了单脉冲和双脉冲在距离 20 m 外的炸药微量残留的探测研究,成功探测铝表面的 RDX,证明双脉冲的采用可以增强灵敏度和选择性。

为了提高探测灵敏度和抑制虚警,拉曼光谱与 LIBS 联合技术是一个重要发展趋势,在识别能力上拉曼光谱提供关于待测物质的分子层面的特征信息,而 LIBS 提供待测物质组成的原子信息,两者信息相互补充,再者 2 种技术可以共享很多关键器件,如激光光源和光谱仪等,对于提高系统的集成度、降低造价很有帮助。2012 年,由美国国家航空航天局和海军研究局支持,夏威夷大学^[9]研究开发了一种可在白天检测炸药等化学品的时域脉冲体制的远程拉曼和 LIBS 组合系统,经试验系统最大探测距离可达 120 m,能够远距离获取诸如硝酸铵、硝酸钾、高氯酸钾、硫磺、硝基苯、苯、丙酮等各种无机、有机化学危险品的高质量光谱。

3 激光光谱新技术

3.1 光碎片激光诱导荧光光谱技术

在激光光谱中,激光诱导荧光光谱是经常采用的、非常灵敏的检测技术,可用于测量原子与分子的浓度、能态布居数分布,探测分子内的能量传递过程,近年来,被引入应用到远距离炸药探测。激光诱导荧光光谱比较适合双原子和三原子的小分子物质探测,对于大分子物质,难以获得具有特征性的“标记”,无法从背景环境中实现准确识别。光碎片激光诱导荧光光谱技术是 LIF 的一种变形,属于间接测量技术,首先使得爆炸物分子光碎裂成较小分子,如 NO,再由 LIF 探测特征性的碎片。PF-LIF 局限于探测具有硝基结构的爆炸物,对过氧化物等民用炸药存在较大虚警。2006 年,Arusi-Parpar 根据光碎片所产生的 NO 和空气中的 NO 所处振动能级不同这一特点,在 30 m 外成功探测识别了 TNT。

3.2 光声光谱技术

光声光谱技术是基于光声效应的一种光谱技术,主要是探测来源于受激目标分子的声信号,经过调制的特定波长(和目标分子吸收带匹配)的激光与目标物质相互作用,产生热效应,热损耗会导致周围环境产生压力波,由于激光是受到调制的,所以热压力也是周期的,即产生声波,周期性的调制光声信号可以被探测。传统的光声光谱将待测样品放在光声盒里面,光声盒的目的是在激光调制频率增强声信号的强度,同时实现滤除环境噪声,但是限制了在户外远距离探测方面的应用。2009 年, Neste^[10]等利用中红外激光基于石英增强光声光谱对 20 m 外的 RDX, TNT 和 PETN 进行了有效探测,探测灵敏度达 100 ng/cm^2 ,并证明光声光谱用于远距离探测是可行的。

4 应用前景

激光光谱技术可用于远距离探测识别炸药，在军事作战行动和反恐维稳行动中都有着令人鼓舞的应用前景，远距离炸药探测技术除了能大幅度提高爆炸物识别能力，有效保障操作人员及装备安全性外，还能达成隐蔽突然的战术效果，如在远距离隐蔽侦察发现并确认爆炸物装置后，可以采取果断而突然的行动，在恐怖分子采取自杀式引爆动作前，摧毁恐怖袭击阴谋。未来激光光谱远距离炸药探测技术在军事及反恐中的主要应用方向有：

1) 侦察汽车炸弹：汽车炸弹一般装载有大量炸药，可在行驶和静止状态下引爆，威力巨大，破坏力惊人。由于汽车炸弹装载了大量炸药，车内空间肯定具有很高的炸药分子浓度，并通过汽车缝隙向外散发，有的车体外部还沾染了少量炸药，激光光谱炸药探测技术可以通过探测车体附近气体、车体外部残留，也可利用光学特性透过车窗玻璃探测车内气体和表面残留，判别有无炸药、炸药类型及大致数量。

2) 探测人体炸弹等简易爆炸装置：人体炸弹及其他简易爆炸装置由于制作过程相对简单，一般会在外包装上残留部分炸药，同时炸药透过包装缝隙散发分子团，激光光谱炸药探测技术可以通过探测人体衣物及包装表面的残留判别有无炸药及炸药类型。

3) 排查其他易燃易爆危险品：激光光谱技术可以识别无机物、有机物等范围广泛的物质，包括甲醇、汽油、毒品等危险品，并可透过玻璃、塑料材质的透明和半透明容器，检测其中的溶液，因此该技术在安全检测领域具有独特的优势。

4) 探测地雷等制式爆炸物：地雷等军用制式爆炸物相对简易爆炸装置，其制造工艺规范，炸药密封程度高，虽然炸药成份的挥发较简易爆炸装置低很多，但依然有部分残留和挥发。据国外文献报道，美军在研究一种通过检测气溶胶中极低浓度炸药成份来探测埋设地雷的装置，其灵敏度可如狗鼻子般灵敏。另外对地表布设的智能地雷等爆炸物，可结合远距离检测其表面炸药残留和涂层判别其类型。

5 结论

随着激光技术和光探测器技术的发展，一些基于激光的光谱学技术，如拉曼光谱技术、激光诱导击穿光谱技术、光碎片激光诱导荧光光谱技术、光声光谱技术等，已经展示了远距离探测炸药的能力。激光拉曼光谱技术分析速度快，准确度高，然而灵敏度不够；激光诱导击穿光谱技术灵敏度高，但准确度不够。应用领域的扩大和环境的复杂性对设备的小型化、灵敏度、快速探测能力、特异性等方面的要求越来越严苛，在当前的科技条件下，单一技术方法很难甚至不能满足一些特殊场景的探测，多种方法的联合应用以及设备的便携性、高灵敏度、准确度将成为未来的研究热点。

参考文献：

- [1] WALLIN Sara,PETTERSSON Anna,OESTMARK Henric,et al. Laser-based standoff detection of explosives:a critical review[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009,395(2):259-274.
- [2] CARTER J Chance,ANGLE S Michael,LAWRENCE-SNYDER Marion,et al. Standoff detection of high explosive materials at 50 meters in ambient light conditions using a small Raman instrument[J]. Applied Spectroscopy, 2005,59(6):769-775.
- [3] ANNA Pettersson,IDA Johansson,SARA Wallin,et al. Near real-time standoff detection of explosives in a realistic outdoor environment at 55m distance[J]. Propellants,Explosives,Pyrotechnics, 2009,34(4):297-306.
- [4] FOREST Rosalie,BABIN Francois,GAY David,et al. Use of a spectroscopic lidar for standoff explosives detection through Raman spectra[J]. Proceedings of SPIE, 2012(8358):83580M-3.
- [5] JIN Hyuk Chung,SOO Gyeong Cho. Standoff detection of explosive molecules using nanosecond gated Raman spectroscopy[J]. Proceedings of SPIE, 2013(8709):87090S.
- [6] TUSCHEL David D,MIKHONIN Aleksandr V,LEMOFF Brian E,et al. Deep ultraviolet resonance Raman excitation enables explosives detection[J]. Applied Spectroscopy, 2010,64(4):425-432.
- [7] GOTTFRIED Jennifer L,DE Lucia Frank C Jr,MUNSON Chase A,et al. Laser-induced breakdown spectroscopy for detection of explosives residues:a review of recent advance, challenges, and future prospects[J]. Analytical and Bioanalytical Chemistry, 2009,395(2):283-300.
- [8] LOPEZ-MORENO Cristina,PALANCO Santiago,JAVIER Laserna J,et al. Test of a stand-off laser-induced breakdown spectroscopy sensor for the detection of explosive residues on solid surfaces[J]. Journal of Analytical Atomic Spectrometry, 2006,21(1):55-60.

- [9] ANUPAM K Misra,SHIV K Sharma,TAYRO E Acosta,et al. Portable standoff Raman system for fast detection of homemade explosives through glass, plastic and water[J]. Proceedings of SPIE, 2012(8358):835811-1.
- [10] VAN Neste C W,SENEAC L R,THUNDAT T. Standoff spectroscopy of surface adsorbed chemicals[J]. Analytical Chemistry, 2009,81(5):1952-1956.

作者简介:



汪 辉(1989-), 男, 江西省抚州市人, 硕士, 研究方向为爆炸物探测技术 .email: huiwang198928@126.com.

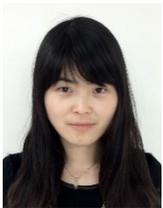
方 东(1971-), 男, 江苏省无锡市人, 副研究员, 研究方向为爆炸物探测技术.

凌国平(1970-), 男, 江苏省丹阳市人, 高级工程师, 研究方向为爆炸物探测技术.

王 群(1966-), 男, 江苏省盐城市人, 高级工程师, 研究方向为爆炸物探测技术.

(上接第 46 页)

作者简介:



周 叶(1991-), 女, 江苏省盐城市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线通信系统中全双工 MIMO 技术 .email:1337668971@qq.com.

束 锋(1973-), 男, 安徽省桐城市人, 博士, 研究员, 博士生导师。发表期刊和会议论文近 200 篇, 其中 SCI/SCIE 检索论文 26 篇, EI 检索近 80 篇。论文被国内外学者引用 361 次。申请国家发明专利 15 项。已经和正在主持国家层次项目 4 项。

刘婷婷(1982-), 女, 江苏省淮安市人, 副教授, 博士, 主要研究方向为认知无线电频谱感知、资源分配、干扰控制以及认知无线网络安全等。

崔玉菽(1992-), 女, 黑龙江省齐齐哈尔市人, 在读硕士研究生, 主要研究方向为无线中继技术。

陆锦辉(1962-), 男, 南京市人, 教授, 主持参与 863、国家自然科学基金等国家项目近 10 项。