

生物/化学战剂激光遥测技术新进展

张艳^{1,2} 杨泽后² 李晓峰² 陈涌² 周鼎富² 侯天晋²

¹贵阳学院电子与通信工程学院, 贵州 贵阳 550005; ²西南技术物理研究所, 四川 成都 610041

摘要 概述了生物/化学战剂激光遥测主要技术的原理和特点, 分析了国外利用差分激光雷达技术、拉曼光谱技术和激光诱导荧光技术对生物/化学战剂进行激光遥测的发展现状, 重点介绍了光声光谱、拉曼荧光复合探测、量子级联激光器和红外焦平面阵列等新兴技术在生物/化学战剂激光遥测中的应用, 指出了生物/化学战剂激光遥测技术的发展趋势。

关键词 测量; 生物/化学战剂; 激光遥测; 差分激光雷达; 拉曼光谱技术; 激光诱导击穿光谱技术

中图分类号 TN958.98 文献标识码 A doi: 10.3788/LOP51.030002

Development of Lidar Detection Technology for Chemical/Biological Agents

Zhang Yan^{1,2} Yang Zehou² Li Xiaofeng² Chen Yong² Zhou Dingfu² Hou Tianjin²

¹School of Electronic and Communication engineering, Guiyang University, Guiyang, Guizhou 550005, China

²Southwest Institute Technology of Physics, Chengdu, Sichuan 610041, China

Abstract The principle and main characteristics of lidar detection technologies for biological/chemical warfare agents are described. The foreign developments of the primary lidar detection technologies such as differential laser radar technology, Raman spectroscopy and laser-induced fluorescence technique are analyzed. Some newest technologies are introduced such as photo-acoustic spectroscopy, Raman fluorescence detection, quantum cascade lasers and infrared focal planar array to detect biological/chemical warfare agents. Finally, the review points out the development trend of lidar detection technology for biological/chemical warfare agents.

Key words measurement; chemical/biological agents; lidar detection; differential lidar; raman lidar; laser induced breakdown spectroscopy

OCIS codes 140.3440; 300.2530; 300.6365; 280.3375

1 引言

生物/化学战剂的常规探测方法有很多, 如色谱法、红外光谱法、色-质联机法、生-化传感器探测法、核磁共振法、分光光度法、毛细管电泳法等, 虽然其中很多方法已经达到了相当高的探测灵敏度, 但是大多需要对现场样品进行采样分析, 难以适用于复杂环境下对生物/化学战剂的检测预警。对生物/化学战剂检测预警的关键是在生物/化学战剂侵入战区和居民区之前就能远距离检测到生物/化学战剂的存在, 或者在较近距离对极微量、低浓度的生物/化学战剂进行检测和识别。发展生物/化学战剂遥测技术是建立完整高效的侦察防御体系的首选。

由于激光遥测技术具有探测距离远、灵敏度高的特点, 成为近年来对生物/化学战剂检测的研究热点^[1-4], 该技术主要利用生物/化学物质的特征吸收/发射光谱来实现对物质种类及浓度的判定与测量。

2 生物/化学战剂激光遥测技术的主要方法

根据工作方式的不同, 生物/化学战剂激光遥测技术分为主动遥测技术和被动遥测技术。激光主动遥测

收稿日期: 2013-10-13; 收到修改稿日期: 2013-12-24; 网络出版日期: 2013-02-20

基金项目: 贵州省教育厅自然科学基金重点项目(黔教合 KY 字[2013]170), 贵阳学院引进人才启动资金

作者简介: 张艳(1977—), 女, 副教授, 主要从事光电探测、激光雷达等方面的研究。E-mail: Eileen_zy001@sohu.com

技术是基于生物/化学毒剂仅吸收特定波长的激光,对其他波长的激光则是透明的这种特性,充分发挥激光的高单色性、高亮度性、高相干性、高准直性等优点,使得人们可以利用激光雷达对生物/化学战剂进行远距离、全方位、实时对战地环境进行监测和识别。被动红外遥测技术依据背景和生物/化学毒剂的红外辐射、特征光谱吸收特性,能在很宽广的范围内进行机动、快速的遥测,探测距离可达几公里,但其灵敏度比主动式低,且随着背景与被探测物的温度差的减小而降低。下面重点介绍激光主动遥测技术的相关类型和特点。

2.1 差分吸收/散射技术

差分吸收激光雷达(DIAL)的工作原理是以同一光路向被测气体发射波长接近的两束脉冲激光,其中一个波长处于被测气体的吸收线上,它被待测气体强烈吸收;另一个波长处于待测气体吸收线的边翼上或吸收线外,待测气体对它吸收很小或没有吸收。由于这两束激光波长相近,对其他气体分子和气溶胶的消光基本相同,两束激光回波强度的差异只是由待测气体分子的吸收引起。从而根据两个波长回波强度的差异可以得到待测气体分子的分布数据。在实际工作中需要地物配合目标进行探测,具有探测灵敏度高、作用距离远、探测范围广、抗干扰能力强等优点,同时还能进行二维和三维的各种气体成分测定,精确、实时地测出大气污染气体或化学毒剂的种类及其浓度随时间和空间的变化规律。系统结构相对简单,单元技术成熟。

差分散射激光雷达(DISC)的工作原理与差分吸收激光雷达类似,以同一光路向被测气体发出波长接近的两束脉冲激光,无需地物目标配合,直接对战剂云团进行测量,根据这两束激光经战剂云团散射的回波信号的差异可以得到被测战剂在各个距离处的浓度值,进而可获得战剂的三维浓度影像信息,实现距离分辨。差分散射激光雷达系统庞大复杂,多采用相干外差方式,对激光器要求较高。

2.2 拉曼光谱技术

利用拉曼散射进行物质检测的原理是当激光与物质相互作用时,散射回波不但改变传播方向,频率也发生改变,而入射激光与散射激光频率的差异对应于被测物质分子体系的激发。由于每个分子的化学结构或物理状态不同,因此各分子都有特定的拉曼光谱。

利用拉曼光谱对生化战剂进行检测,具有如下优点:1) 由于水的拉曼散射很微弱,利用拉曼光谱是研究水溶液中生化战剂的理想工具;2) 拉曼光谱可同时覆盖50~4000波数的区间,可对有机物以及无机物进行分析,可用于常见生化战剂的检测;3) 利用拉曼光谱可对固体、液体、膏状体中的生化战剂进行检测。

2.3 激光诱导击穿光谱分析技术

激光诱导击穿光谱分析技术(LIBS)的工作原理是用一束短脉冲激光聚焦到被测样品上,产生局部等离子体,样品物质的电子跃迁至高能态,返回初始能态时会发出特定光谱辐射,每一种物质都对应各自的特征光谱,再用微型高分辨率光谱仪对该光谱进行适时在线快速分析,在1~3 min甚至几秒钟内就可以得到被测物质的成分与浓度。

激光诱导击穿光谱技术用于生化战剂检测的主要优点:1) 采用全光学方法,可在人流量大、环境复杂的现场对各种液体/气体以及固体等有害生物物进行实时检测;2) 取样小,安全可靠,只对激光光斑大小的区域进行检测,采样质量可低到纳克甚至皮克,不会破坏被检测物质,更不会导致易燃易爆物的引爆;3) 探测灵敏度高,是目前唯一的适合固体(可以探测直径为20~1000 nm的粒子)、液体与气体样品的分析方法。最近几年激光诱导击穿光谱技术在西方发达国家得到迅猛发展,由美军资助的MIT甚至认为该技术第一次将在实验室进行的微量分析搬到了现场。

3 国外研究现状

3.1 差分吸收激光雷达的研究现状

传统的CO₂激光器(9~11 μm)通常用于探测主要的化学战剂,由于CO₂ DIAL/DISC系统的优越性和广泛的应用前景,成为国内外研究的热点。2000年后,CO₂ DIAL/DISC系统逐渐成熟,部分开始装备应用,其中有的已经在海湾战争中得到验证应用,如美国的野猫化学侦察车(WCS);捷克的DD-CW-A/S化学战剂侦测仪器等。

由于大量的生物/化学战剂在3~4 μm和9~11 μm有明显的吸收带,并且在这两个波段内大气衰减不明显,所以这两个波段成为探测生物/化学战剂的首选工作波段。然而,单个激光器在这两个波段难以达到要

求的高峰值功率。2011年,印度设计了以光参量振荡器(OPO)可调谐激光器和Nd:YAG激光器作为复合光源的DIAL雷达系统^[6],系统工作原理如图1所示。

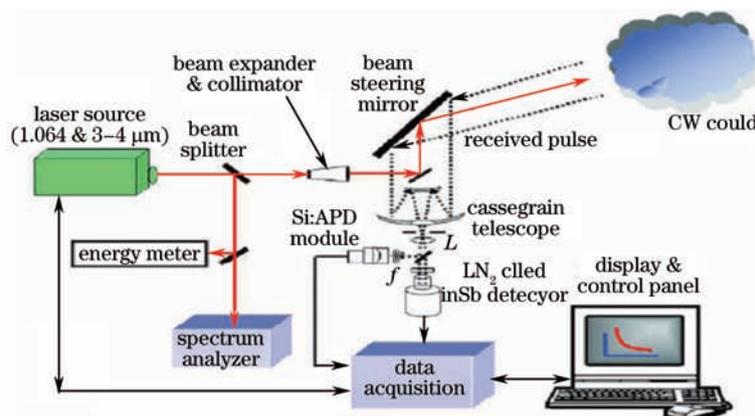


图1 OPO和Nd:YAG作为光源的差分吸收雷达系统

Fig.1 DIAL system with source of OPO and Nd:YAG

OPO和Nd:YAG作为光源的差分吸收雷达系统具有以下优点:OPO输出的中波红外(3~4 μm)激光作为系统的主要发射激光;Nd:YAG发出的激光(1.064 μm)用来确定化学云团的距离和方位。两个波长(3~4 μm,1.064 μm)的激光共用发射天线和接收天线,选择合适干涉片将这两个波长的回波信号输入相应的探测器,实现对这两个波长的同时探测。早期利用OPO技术的激光雷达只用了一个波段,不能同时进行生物战剂和化学战剂的探测。采用OPO(3~4 μm)和Nd:YAG(1.064 μm)复合光源,扩展了DIAL的工作波长,广泛适用于生物和化学战剂的遥测。

传统的DIAL采用双波长,只能对一种化学气体进行探测。随着激光器调谐技术的进步,单激光器可以在非常短的时间内快速调谐出许多波长,为同时探测多种化学气体提供了可能。从国外DIAL系统的发展动态可以看出,DIAL系统的研究经历了从双波长到多波长,从测量单种气体到测量多种气体的过程。随着大功率超宽光谱源技术的发展,其产生的超连续谱为同时更精确地探测更多化学气体提供了可能,可以预测多波长激光雷达将成为生物/化学战剂激光遥测技术发展的新方向。

3.2 拉曼光谱技术的研究现状

2010年,美国利用拉曼光谱对隐藏在玻璃和塑料容器中的危险液体进行检测^[6],采用488 nm的激光,样品放在22英尺(6.7 m)以外进行探测,将模拟的危险液体放到不同颜色的玻璃和塑料容器中进行拉曼探测。

2012年,美国对点爆炸物探测系统进行改进^[7],该系统集成了多波长拉曼散射和激光诱导击穿光谱的探测能力,用于爆炸物痕迹探测。系统采用紫外拉曼散射,相比其他波段的拉曼散射,紫外激光能使共振或共振前的拉曼信号增强,从而有效消除荧光的影响,提高了系统探测性能。在人眼安全性方面进行改进,优化激光波长并利用人眼的生物机能,做到完全的人眼安全,优化了探测爆炸物的算法,减小了探测时间,持续改进了爆炸物的光谱库。

2012年,瑞典利用拉曼光谱对爆炸物进行探测^[8],该系统采用532 nm绿光的原因是短波的拉曼回波信号更强,并且绿光适用于有伪装、不透紫外或者极端天气条件。在实验中将2 g的TATP样品放在临时搭建的厨房的炉子上,利用532 nm绿光穿透厨房的双层玻璃窗,在10 s内实现了对距离200 m处样品的探测。分析表明,采用更短波长(如紫外)激光可以实现共振增强的拉曼散射,而利用共振增强的拉曼光谱(RRS)可以获得对气态物质探测的更高灵敏度。

3.3 激光诱导击穿光谱技术的研究现状

2012年,美国利用飞秒光纤激光进行激光诱导击穿光谱技术的研究^[9],利用近红外飞秒激光和没加门控的宽带高灵敏度光谱仪可以获得大气的高质量激光诱导荧光,采用波长为1030 nm、脉宽为750 fs的脉冲激光,脉冲重复频率在1 Hz~1 MHz范围内可调,最大输出能量为10 μJ。与传统激光诱导击穿光谱系统相比,飞秒激光的激光诱导击穿光谱系统具有以下优点:使样品具有更小的热损伤;更好的空间分辨率;更高的信噪比;结构紧凑、可靠性高、性价比高。

为提高系统灵敏度,研究了不同激光参数如脉冲能量、扫描速度等的影响,结果表明,更快的扫描速度和更高的脉冲能量能增加信号强度。对于飞秒激光诱导击穿光谱技术,有待进一步研究的问题是优化激光参数,提高信噪比,进一步降低连续的背景辐射。

3.4 其他新技术的应用

3.4.1 光声光谱技术

迄今为止,遥感探测主要依赖于直接探测电磁波,比如,光探测以及用于大气污染检测的雷达技术主要都是探测反射或散射光信号。因而,雷达系统灵敏度主要依赖于所选择的透过窗和参考光路。利用光声光谱技术对物质进行探测则避免了传输过程中透过窗等因素对系统灵敏度的影响。

传统的光声光谱技术是用一束强度可调制的激光照射到密封于光声池中的样品上,样品吸收光能,并以释放热能的方式退激,释放的热能对样品和周围介质按光的调制频率进行周期性加热,从而导致介质产生周期性压力波动,这种压力波动可用灵敏的微音器或压电陶瓷传声器检测,并通过放大得到光声信号,这就是光声效应。光声腔是一个装有传声器、放置被测样品的密闭腔体,其实质就是“光-热-声”的转换器。若入射单色光波长可变,则可测到随波长而变的光声信号图谱,这就是传统光声光谱检测的原理。1982年,Brassington^[10]首次利用脉冲激光和抛物面反射镜对开放空气中的光声信号进行遥感探测。其中,抛物面发射镜增加了前向的探测灵敏度。2002和2003年,Yonak^[11]又先后研制了气体泄漏探测和定位系统,该系统利用CO₂激光对开放空间中的少量SF₆气团进行扫描,并利用4个微型扩音器构成的线阵探测器对光声光谱信号的相位进行探测。2012年,Chien等^[12]利用光声光谱技术对开放环境中的臭氧进行远距离平衡探测。

2012年,美国利用光声光谱系统进行化学战剂遥感探测^[13],其系统如图2所示。该系统主要由带有水冷装置的输出功率为7 W的CO₂激光器、双频光斩波器(8 Hz~6 kHz)、声学探测器、抛物线反射镜以及声学谐振腔等构成。采用CO₂激光器的优点是其发射波段在9~11 μm,覆盖了大多数化学战剂和爆炸物的光学指纹。声学谐振腔主要由抛物面反射镜和窄带的圆柱状谐振器构成,并能与激光的调制频率形成共振,使得信噪比显著提高。当脉冲激光穿透低气压化学试剂时形成的热波将产生声音信号,而这个声音信号常常是比较微弱而短程的,利用扩音器就可以对开放空气中的光声信号进行遥感探测。光声腔中大多数的衬底材料,如高硬度的耐火玻璃和不锈钢,能够吸收CO₂激光的能量,使得表面温度升高,导致衬底材料也会产生光声信号,并且这个光声信号难以与三硝基甲苯(TNT)产生的光声信号进行区别。但ZnSe窗口对CO₂激光是透明的,在ZnSe窗口上产生的光声信号仅仅是由TNT产生。因此,CO₂激光辐射带的TNT声光光谱可以被测量。

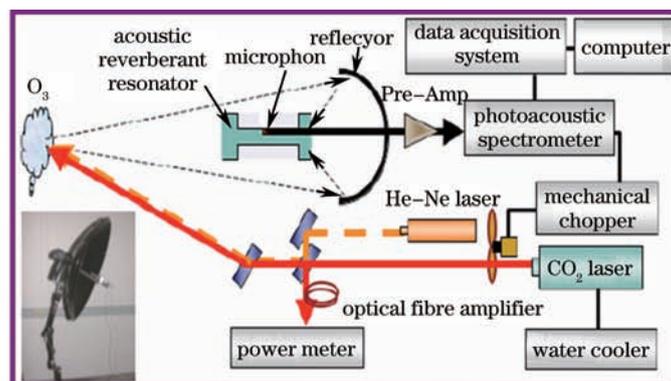


图2 利用光声光谱系统进行化学战剂遥测的原理图

Fig.2 Schemat of the photoacoustic remote sensing system

图2所示的系统可以用于气体和固体物质的探测。对气体可以直接实现远距离探测。固态物质的声光信号是由热波的边界层产生的,因此这个声光信号的强度取决于空气中的热扩散长度和近场的状况。对于TNT爆炸物这类的固体物质,可以在近场实现遥感探测。

光声光谱技术可用于测定传统光谱法难以测定的光散射强或不透明的样品,如凝胶、溶胶、粉末、生物试样等,目前广泛应用于物理、化学、生物医学和环境保护等领域。由于光声光谱测量的是样品吸收光能的大小,因而反射光、散射光等对测量干扰很小,故光声光谱适于测量高散射样品、不透光样品、吸收光强与入

射光强比值很小的弱吸收样品和低浓度样品等,而且样品无论是晶体、粉末、胶体等均可测量,这是普通光谱做不到的。光声效应与调制频率有关,改变调制频率可获得样品表面不同深度的信息,所以它是提供表面不同深度结构信息的无损探测方法。光声光谱技术主要用于开放环境中化学物质的探测,特别适合在现场条件下的气体痕迹探测。

3.4.2 拉曼荧光复合探测技术

2012年,美国利用深紫外激光同时激发拉曼光谱和荧光光谱探测改进生化战剂的激光遥测技术^[14]。其中深紫外传感器是美国军方 STTR 和 DTRA 研究计划的成果,这种传感器可以在 10 m 远的地方检测和识别浓度小于 $1 \mu\text{g}/\text{cm}^2$ 的爆炸物或者 10^4 个细菌孢子,也可以在 1 m 远的地方检测和识别浓度为 $1 \text{ ng}/\text{cm}^2$ 的爆炸物或者 10^2 个细菌孢子。这种传感器能在 1 ms 内同时探测深紫外激光激发的增强拉曼散射光谱和荧光光谱,准确探测识别表面的微量物质,采样率高达 20 Hz。这种定向的深紫外生化爆炸物(TUCBE)传感器号称 15 磅(6.8 kg)重,能耗低于 20 W,主要装备在小型的军事机器人上,除了用于对化学、生物、爆炸物的含量进行近距离探测,还可用于南极、北极和深海远征等野外探测。利用这类简单、无需试剂、手持或机器人装载的平衡探测器来检测物体表面残留的化学、生物、爆炸物的微量水平,代表了现在化学、生物、爆炸物探测技术的主要发展方向。

当激光被目标材料散射或吸收时,将产生瑞利散射、拉曼散射、荧光和磷光辐射。这些辐射将被一个后向散射光学系统收集,该光学系统包括光学扩束器、激光发射器、带有变焦望远镜的反射镜系统、适用瑞利-拉曼-荧光光谱区的分光系统、单独的摄谱仪以及适用于拉曼和荧光光谱的探测器阵列。瑞利散射有效提供了目标物质的吸光率或反射率数据。拉曼光谱非常微弱,它提供的数据可用于判断被测物质中是否存在特别的分子结构或者功能团。对于脂类化合物和简单的化合物等不发荧光的物质而言,拉曼光谱信息是根本的。荧光比拉曼散射要强 5~10 个数量级,能够提供了目标分子的电子结构和分子复杂结构的信息。

在该系统中,采用深紫外激光来激发拉曼和荧光光谱,主要是由于相对近紫外、可见、近红外波段而言,深紫外激光具有以下优势:1) 利用 220~250 nm 紫外激光,其拉曼光谱区没有荧光,能消除目标或周围材料的荧光对微弱拉曼信号的干扰;2) 由于拉曼和荧光占据不同的光谱范围,使探测能够同时进行,提供了目标更广泛的信息;3) 瑞利法则和共振效应增强了拉曼信号的强度和探测灵敏度;4) 深紫外激光的穿透深度短,能将目标材料从背景或基底材料中分离出来。

脉冲激光所激发光谱的所有数据都在脉冲持续时间内被采集,各类数据被分开处理,然后通过数据融合处理的拉曼和荧光化学计量方法,可对被测目标的化学结构进行描述,其数据处理流程如图 3 所示。该方

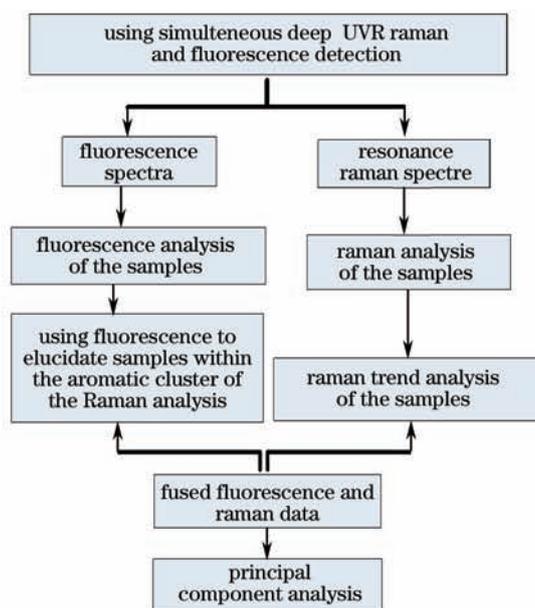


图3 拉曼和荧光探测的数据融合处理流程图

Fig.3 Analysis processing of fused fluorescence and Raman data

法能够综合利用荧光数据和拉曼数据来确定样品类型,提高了生物/化学战剂探测的种类和灵敏度,避免了单独采用荧光数据或者拉曼数据,容易导致样品虚假分类的问题。综合利用拉曼和荧光信号进行探测对信号处理、模式识别、数据融合提出了较高要求,对于种类繁多的生化战剂在建立荧光和拉曼光谱特征数据库时,工作量大、精度要求较高。

3.4.3 量子级联激光器 + 红外焦平面阵列的应用

现阶段针对爆炸物残留和生物制剂粉末的常规探测技术,往往只允许对物质进行点探测,并且需要几秒钟来分析物质。利用量子级联激光器(QCL)和红外焦平面阵列(FPA)可以对残留物和粉末进行非接触的实时化学分析,具有良好的应用前景,其基本原理如下:仅凭肉眼很难将杆菌类的细菌孢子与常见的白色粉末进行区别,无色的细菌孢子在可见光下因散射而呈现出“白色”,很容易与和家庭常用的淀粉、糖、发酵粉等物质混淆。然而,在不同的光谱区域,细菌孢子不再保持“无色”状态。特别是在2~20 μm 的中红外光谱区,对于大多数物质而言,光子能量对应于很强的分子震动,使得中红外激光能被细菌孢子强烈吸收或者反射,吸收波长取决于物质的化学成分,从而不同物质的吸收具有独特的光谱特征。这个特征光谱使得利用中红外光谱来识别无害的白色粉末、爆炸物残留以及杆菌类的细菌孢子成为可能。

2012年,美国利用量子级联激光器和红外焦平面阵列对残留粉末进行激光辅助的红外实时成像研究^[15],系统结构如图4所示,量子级联激光器可以提供超宽的光谱范围[从中红外到太赫兹波段(THz)],具有极好的波长可调谐性和很高的输出功率,并且可以工作于室温,便于对多种生物/化学战剂进行探测。利用微机电系统(MEMS)技术可以将尺寸为17 $\mu\text{m} \times 17 \mu\text{m}$ 的单元测微辐射热计集成为焦平面阵列。工作于室温的高灵敏度碲镉汞探测器或者测微辐射热计使得中波红外相机能够对残留粉末的实时成像。

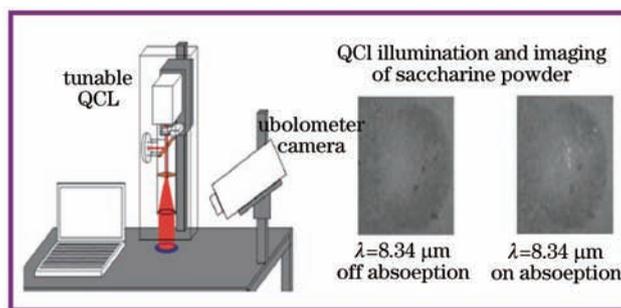


图4 量子级联激光器和红外焦平面阵列进行激光辅助成像的示意图

Fig.4 Experimental setup using daylight solutions tunable QCL with microbolometer FPA for detection of photothermal excitation in powders

在实验中,利用测微辐射热计的焦平面阵列实现3~12 μm 波段探测,相机离轴成像避开了直接的反射光。可以看出当入射波长 $\lambda=8.34 \mu\text{m}$ 时,不在样品粉末的吸收峰上,焦平面阵列探测到的热像较为均匀;当入射波长恰好在样品粉末的吸收峰($\lambda=8.63 \mu\text{m}$)时,热像反映样品粉末发热的斑点。这是由于当入射激光与样品的吸收峰一致时,样品被局部加热后将产生二级光热信号,这个二级光热信号将被红外相机探测到。相对块状物质而言,粉末将产生更强的光热信号,这是因为粉末颗粒接触更少,颗粒之间的空气形成了相对的绝热层,在相同的入射光照射下,颗粒更热并且更长时间地保存热量,从而产生了更强的光热信号。光热信号的衰减特性包含了粉末的浓度信息和颗粒尺寸的信息。可见,利用量子级联激光器和红外焦平面阵列可以对微量的炭疽或芽孢杆菌类物质进行探测。

利用热像技术探测爆炸物残留和生物制剂有以下优势:热像技术对粉末状的炭疽杆菌等生物孢子非常敏感;采用图像技术能够提供点探测方法所缺失的环境警示信息;相比常规的点探测方法和化学分析方法,利用热像技术可以在不破坏样品的情况下,对样品进行扫描,实现非接触的实时成像;对于粉末物质,热电信号显著增强,有利于从背景中将粉末信号识别出来;通过中波红外光谱,能够快速评估无毒粉末和炭疽等细菌孢子;随着元件集成的商业化、小型化发展,可以实现手持式扫描探测,更好的用于爆炸物残留和生化战剂的现场探测。

4 结束语

生物/化学战剂进行激光遥测技术的发展方向:1) 优化激光光源(如采用OPO、THz激光器、量子级联激光器等),实现工作波段的扩展,为同时探测多种类型的生物/化学战剂提供了可能;2) 采用复合光源,通过系统集成,具备多波长探测的能力,实现同时探测不同类型的生物/化学战剂;3) 通过多种遥测技术的融合(如拉曼和荧光探测的融合),实现对不同类型的生物/化学战剂的同时探测;4) 通过多光谱成像技术和多波段图像融合,实现对不同种类的不同结构的生物/化学战剂的检测预警;5) 以信号处理技术、现代模式识别为代表的算法研究也是未来化学战剂遥感技术研究领域的重点。

参考文献

- 1 Luo Zhenkun, Wang Qihua. Lidar detection technology for chemical/biological agents[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(1): 81-84.
罗振坤, 王秋华. 化学/生物战剂激光雷达探测技术[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(1): 81-84.
- 2 Cao Qiusheng. Detecion of chemical warfare agents and lidar[J]. Electronic and Electro-Optical Systems, 2011, 3: 1-8.
曹秋生. 化学/生物战剂探测与激光雷达[J]. 电光系统, 2011, 3: 1-8.
- 3 Chen Feng, Wu Taihu, Wang Yundou, *et al.*. Development situation of detection technologies for biological and chemical agents[J]. Chinese Medical Equipment Journal, 2011, 32(1): 72-73.
陈峰, 吴太虎, 王运斗, 等. 生物及化学毒剂侦检技术发展现状[J]. 医疗卫生装备, 2011, 32(1): 72-73.
- 4 Zhang Chao, Wei Dongwei, Li Fusheng. Recent progress on analytical methods of chemical war agents[J]. PTCA(PART B:CHEM.ANAL), 2010, 46(2): 211-216.
张超, 魏东伟, 李复生. 化学战剂检测技术的研究进展[J]. 理化检验-化学分册, 2010, 46(2): 211-216.
- 5 S Veerabuthiran, A K Razdan. Lidar for detection of chemical and biological warfare agents[J]. Defence Science Journal, 2011, 61(3): 241-250.
- 6 M L Ramírez-Cedeño, W Ortiz-Rivera, L C Pacheco-Londoño, *et al.*. Remote detection of hazardous liquids concealed in glass and plastic containers[J]. IEEE Sensors Journal, 2010, 10(3): 693-698.
- 7 Rob Waterbury, Darius Vunck, Adam J Hopkins, *et al.*. Recent improvements and testing of a check point explosives detection system[J]. SPIE, 2012, 8358: 83580N.
- 8 Sara Wallin, Anna Pettersson, Hans Önnnerud, *et al.*. Possibilities for standoff raman detection applications for explosives[C]. SPIE, 2012, 8358: 83580P.
- 9 Huan Huang, Lihmei Yang, Jian Liu. Femtosecond fiber-laser-based laser-induced breakdown spectroscopy[C]. SPIE, 2012, 8358: 835817.
- 10 S H Yonak, D R Dowling. Parametric dependencies for photoacoustic leak localization[J]. J Acoust Soc Am, 2002, 112(1): 145-155.
- 11 S H Yonak, D R Dowling. Gas-phase generation of photoacoustic sound in an open environment[C]. J Acoust Soc Am, 2003, 114(4): 3167-3178.
- 12 H T Chien, K Wang, S H Sheen, *et al.*. Standoff detection of ozone in an open environment using photoacoustic spectroscopy technique[J]. Appl Phys Lett, 2012, 100(10): 104102.
- 13 H T Chien, K Wang, S H Sheen, *et al.*. Photoacoustic spectroscopy (PAS) system for remote detection of explosives, chemicals and special nuclear materials[C]. SPIE, 2012, 8358: 83581K.
- 14 R Bhartia, W F Hugb, R D Reidb, *et al.*. Improved sensing using simultaneous deep UV Raman and fluorescence detection[C]. SPIE, 2012, 8358: 83581A.
- 15 Miles Weida, Patrick Mock, Peter Buerki, *et al.*. Real-time residue and powder analysis with laser-assisted infrared imaging[C]. SPIE, 2012, 8358: 835813.