

微痕量爆炸物检测技术研究进展

初凤红

(上海电力学院计算机与信息工程学院, 上海 200090)

摘要 综述了微痕量爆炸物检测技术的发展现状和研究进展。主要介绍了各种光谱分析技术、气相色谱技术、离子迁移谱技术、声表面波技术、微机电系统传感技术、质谱法、荧光传感技术、生物传感技术等。对于不同原理传感器的传感机理和达到的不同检测效果做了介绍。

关键词 检测; 爆炸物; 传感器; 微痕量

中图分类号 TP212 OCIS 040.1880 280.4788 文献标识码 A

Research Progress of Sensors Used in Trace Explosives Detection

Chu Fenghong

(College of Computer Science and Information Engineering, Shanghai University of Electric Power,
Shanghai 200090, China)

Abstract A review on the research status and advances of sensors used in the trace explosives detection is presented. Various trace detection technologies such as optical wave spectroscopy, gas chromatographic technique, Ion mobility spectrometry, surface acoustic wave, MEMS, mass spectrometry, fluorescence and biosensor are introduced. Working principles and detection performance of different sensors are analyzed.

Key words detection; explosive; sensor; trace

1 引言

爆炸物的检测技术可分为体探测技术和微痕量检测技术。体检测技术是对爆炸物的整体外观进行探测的技术,存在价格昂贵、灵敏度低、设备体积大等缺点,在应用方面存在局限性。微痕量检测技术主要是对爆炸物挥发出来的蒸气和黏附于爆炸物容器表面以及任何接触过爆炸物的物(包括人体)表面所残留的微痕量爆炸物进行检测的技术。与体检测技术相比微痕量检测技术具有可靠性高、性能优异、多功能集成、可以批量生产等优点,使爆炸物探测器实现小型化、低成本、高精度成为可能。目前,可用于对微痕量爆炸物进行检测的技术主要是各种光谱技术、声表面波(SAW)技术、微机电系统(MEMS)传感技术、质谱法、基于荧光猝灭原理的传感技术以及生物传感技术等。本文将对各种微痕量爆炸物检测技术的原理与发展现状进行介绍。

2 各种微痕量检测技术

2.1 光谱检测技术

2.1.1 太赫兹光谱法

许多物质的太赫兹(THz)光谱包含有丰富的物理和化学信息,如分子的振动和转动光谱。THz波技术应用用于安全检测方面,特别是对爆炸物及其相关材料检测研究方面已成为一个热点^[1,2], THz波在爆炸物及其

收稿日期: 2009-09-11; 收到修改稿日期: 2009-11-27

基金项目: 上海市教育委员会科研创新项目(09YZ337、09ZZ185)资助课题。

作者简介: 初凤红(1979—), 女, 博士, 讲师, 主要从事集成光波导器件及光纤在化学传感等方面的研究。

E-mail: chufenghong@mail.siom.ac.cn

相关材料检测研究中的优势主要有^[3]: 1) 不同爆炸物材料在THz波段具有不同的特征吸收, 可以进行爆炸物的鉴别; 2) THz波可以穿透非金属和非极性材料, 可以探测隐藏在包装材料中的爆炸物; 3) THz波的能量比较低, 不会导致生物组织电离, 可以对人体和生物材料等进行无损检测。

近年来, 很多研究小组采用不同技术对爆炸物及其相关材料进行了THz光谱研究, 主要技术包括THz时域光谱技术(THz-TDS)和傅里叶变换红外光谱技术(FTIR)。THz-TDS技术于1983年首先由D. H. Auston等提出, 利用物质对太赫兹频带的不同特征吸收谱分析研究物质成分、结构及其相互作用关系, 是最新的太赫兹波技术。与其他远红外光谱探测技术相比, THz-TDS对热背景噪声不敏感, 具有很高的信噪比, 并且辐射热探测器不需要低温冷却。1988年, IBM的D. Grischkowsky等发展了这项技术, 并正式将其称为THz时域光谱技术。在此后的十几年内, 该技术被广泛应用于研究各种材料在THz波段的光学性质, 包括半导体材料、超导材料等。

图1(a)是典型的THz-TDS实验系统^[4]。该系统主要是由飞秒脉冲激光器、THz发射元件、THz探测系统和时间延迟控制系统组成。对THz时间波形进行傅里叶变换, 就可以得到THz脉冲的频谱, 对其频谱进行分析和处理, 即可获得被测样品的吸收系数、折射率等物理信息。图1(b)是几种典型爆炸物的THz光谱, 其中的爆炸物SX2是由RDX和PETN混合组成, 从图中可以看出不同的爆炸物有各自不同的THz吸收光谱。

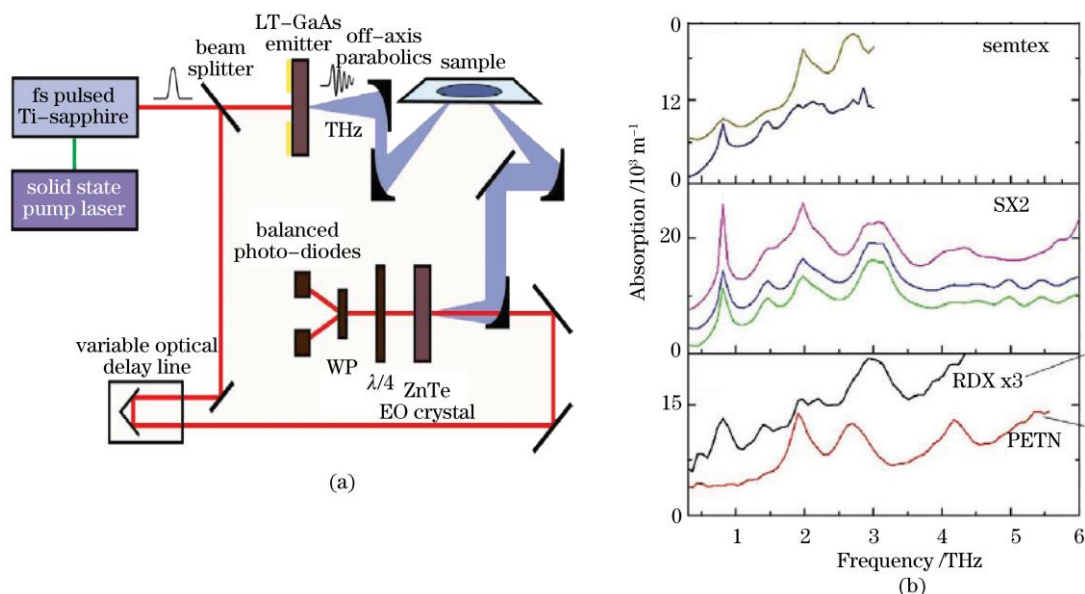


图 1(a)THz-TDS 实验系统; (b)几种典型爆炸物的太赫兹光谱
Fig.1 (a)Schematic of a THz-TDS system; (b) THz absorption spectra of some typical explosives

但是太赫兹光谱技术目前还处于实验室阶段, 把这种技术应用到实际的检测中还有许多问题有待解决。空气中水蒸气对THz波的吸收会限制THz波的有效传输距离, 是THz应用方面面临的主要问题。

2.1.2 拉曼光谱法

拉曼光谱是对红外光谱的补充, 通过拉曼光谱可以得到分子的振转信息。拉曼谱用于检测爆炸物的优点是样品不需要预处理、是非侵入非破坏性的测量、需要样品很少, 缺点是拉曼光谱较弱、易受荧光干扰。目前已经得到了多种爆炸物物质如TNT, RDX, PETN, HMX等的拉曼光谱。

图2(a)是一种拉曼光谱测试系统。该系统主要由激光器、带通滤波器、二向色镜和光谱仪组成^[5]。激光器是最重要的组成部分, 带通滤波器(BP)滤掉激发光以外的杂散光, 二向色镜(DC)可以透射激发光, 反射激发的拉曼光。透镜把光源的光聚焦到样品上, 并且收集拉曼散射光, 高通滤波器(LWP)可以滤掉光源的光。用光谱仪记录拉曼光。拉曼光谱光源最常用的是785 nm的半导体激光器, 也有Nd:YAG激光器倍频

的532 nm的绿光激光器。Esam M. A. 等^[6]利用共焦拉曼光谱法测量衣物纤维里的TNT，在不需对样品预处理的情况下，检测精度可以达到皮克量级，检测时间小于90 s。图2(b)是典型爆炸物TNT和HMX的拉曼光谱。但是由于拉曼光谱较弱，所以光源的光功率要达到几百毫瓦。拉曼散射光谱强度小和笨重的测量仪器是影响拉曼光谱应用的两个主要因素。发展增强技术以及傅里叶变换拉曼光谱仪是解决这些问题的主要方法^[7,8]。

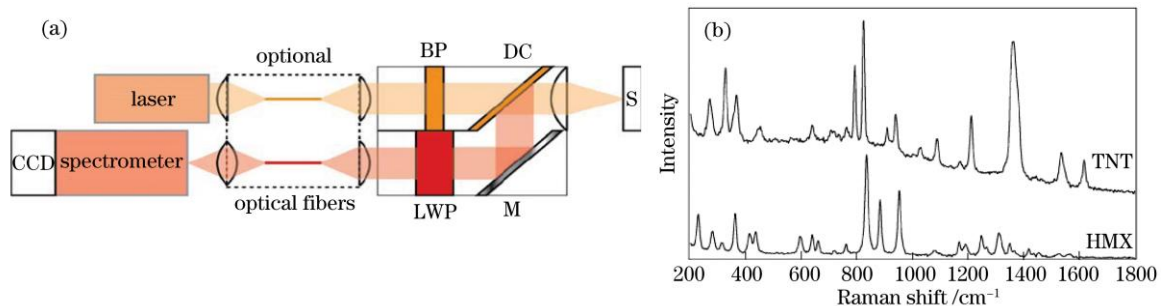


图 2 (a)拉曼光谱测试系统的主要元件；(b)TNT 和 HMX 的拉曼光谱
Fig.2 (a)Essential elements of a portable Raman system;(b) Raman spectra of TNT and HMX

2.2 气相色谱法

气相色谱(GC)是基于时间差别的分离检测技术。将气化的混合物或气体通过含有某种物质的管，基于管中物质对不同化合物的保留性能不同而得到分离，这就是基于时间差别对化合物进行分离。样品经过检测器以后被记录的就是色谱图，图3(a)和(b)分别是气相色谱示意图和典型的色谱图。图3(b)每一个峰代表最初混合样品中不同的组分峰出现的时间，称为保留时间，可以用来对每个组分进行定性分析，而峰的大小、峰高或峰面积则是组分含量大小的度量。国内外有很多研究机构报道了利用气相色谱技术进行爆炸物检测。朱玉霞^[9]用氢火焰气相色谱法检测污水水样中TNT的含量，TNT的检测下限的质量浓度为0.02 mg/L。Lawrence V. Haley等^[10]用气相色谱离子迁移谱联用技术探测爆炸物，可以提高探测性能，降低误报率。Thomas等^[11]用顶空气相色谱检测TNT，检测下限的质量浓度可以达到0.07 ng/L。

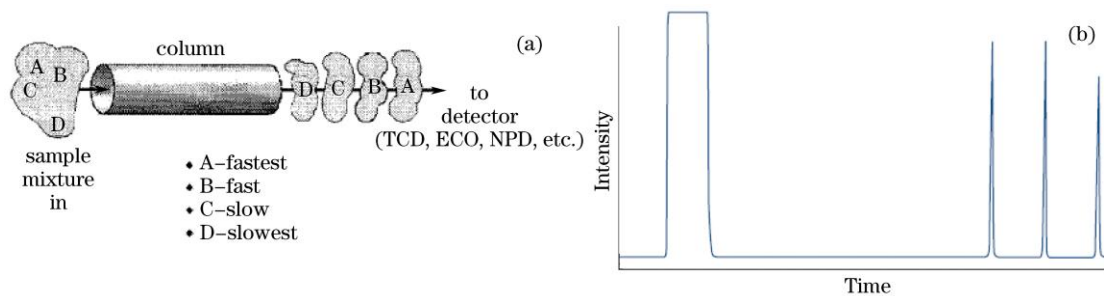


图 3 (a)气相色谱示意图；(b)典型的色谱图
Fig.3 (a) Schematic of gas chromatography; (b)typical GC

2.3 离子迁移谱法

离子迁移谱(IMS)法是一种在爆炸物检测中较成熟的技术，这种类型的检测器原理是：首先，使被检测的样品蒸气或微粒电离形成离子；然后，让离子在一弱电场中产生漂移，并测量出离子通过电场所用的时间，进而根据离子所用的漂移时间计算出离子的迁移率(迁移率的定义是在单位电场强度作用下，离子的漂移速度)。由于在一定的条件下，各种物质离子的迁移率各不相同，因而，也就导致不同的离子通过电场的漂移时间不同，可以根据漂移时间的测量来达到对样品的分离和检测^[12]。传统的离子迁移检测器可以在8 s内检测40种痕量爆炸物，检测时间主要用于痕量爆炸物气体的捕获和气体的清洗。2002年，这类传感器在盐湖城冬奥会上和检测犬一同被部署用于防止恐怖袭击。最新的进展是已经商业化的二极管IMS用于个人

检测使用。2004年9月,开始在美国机场安检使用。图4是T. Khayamian 等^[13]探测RDX时的离子迁移谱实验装置示意图和爆炸物RDX的离子迁移谱。

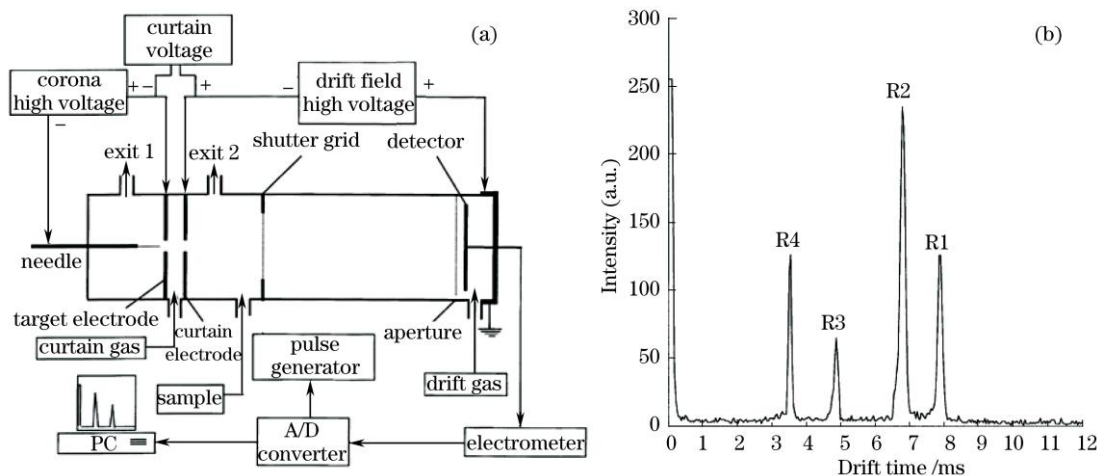


图 4 (a)离子迁移谱实验装置示意图; (b)RDX 的离子迁移谱
Fig.4 (a)Schematic of IMS experiment setup;(b) IMS of RDX

离子迁移谱技术发展至今,虽然已出现了多种不同的技术形式而且在很多领域也都有了成功的应用,但仪器的商业化和通用化程度都还较低。这是因为不同类型化合物的离子化反应和产物离子的稳定性(或寿命)不同,需要的气体试剂和漂移管温度等测试参数也有差异,有时针对特定的检测对象,还需要对漂移管的材料和结构进行专门的研究和设计。这是制约IMS仪器的商业化和通用化程度的重要因素。随着IMS技术研究的深入和应用的发展,适应多种不同测量需求的漂移管也有可能实现商业化,如此,IMS技术将会越来越多地应用于爆炸物检测领域。

2.4 声表面波法

压电物质可产生表面波,并且这种表面波是可以复制的。当压电物质表面存在气体时,表面波可以和气体中的分子相互作用,这种相互作用改变了表面波的某些特性(如振幅、相位等),表面波特性的变化可以使用一种敏感的指示器来测量;当有分析气体时,测定表面波的特征变化从而达到分析的目的,这种传感器被称为声SAW传感器。

SAW传感器如果覆盖了对爆炸物具有化学选择性的聚合物,就可以增强爆炸物气体的吸附。通过聚合物材料的选择性和高吸附性可以提高检测下限^[14]。G. K. Kannan等^[15]用Carbowax-1000聚合物制作基于声表面波的爆炸物检测装置,实验表明具有良好的效果。Carbowax-1000聚合物具有酸性氢键,可以吸附和解吸附硝基芳烃类爆炸物,在实验室条件下检测2,4DNT的范围为 10^{-9} 量级。R. A. McGill等^[16]用选择性聚合物制作SAW传感器,研究对硝基芳烃类爆炸物的选择特性。该传感器对硝基苯和DNT的检测下限分别是 10^{-9} 和 10^{-12} 量级。有人将PMHS聚合物利用自组装特性附着在功能二氧化硅表面来制作SAW传感器,该传感器对DNT和硝基苯具有高的灵敏度^[17]。

2.5 MEMS传感器技术

随着微机电系统工艺技术的日趋成熟,人们也将MEMS技术应用到爆炸物探测器件的研究工作中。MEMS器件和系统具有传统传感器无法相比的优点:体积小、质量轻、功耗低、成本低、可靠性高、性能优异、多功能集成、可以批量生产等。其简单实用的结构使爆炸物探测器实现小型化、低成本、高精度成为可能。它是利用爆炸物微粒溶解吸热这个特性对其进行检测研究的。

美国能源部橡树岭国家实验室开发出一种悬臂梁微传感器可以侦测出非常微量的TNT爆炸物颗粒^[18]。其检测原理是:首先利用微机电技术在硅芯片上加工出只有头发十分之一宽度的悬臂梁,然后将悬臂梁加

热至所吸附TNT的特征温度575 °C，引发所吸附的TNT微粒的爆燃反应，产生的微小热扰动使悬臂梁振动并产生位移。通过测量悬臂梁顶端位置的变化就可判断TNT是否存在。这种传感器的灵敏度可达到皮克量级，并且通过调整悬臂梁的温度，还可以检测其他爆炸物成分。

张彦等^[19]提出一种基于MEMS技术，利用爆炸物微粒本身特性来检测爆炸物的新型微梁式爆炸物探测器，这种探测器利用不同爆炸物具有不同的熔点及蒸发点，并且在溶解过程中吸收热量的原理，使落在悬臂梁上的痕量爆炸物微粒在蒸发时的热量变化可以通过梁的弯曲变形反映出来，根据梁的弯曲变化来检测爆炸物。

MEMS技术有分析速度快、灵敏度高、精度高、小型低功耗的优点。但仍有诸多缺陷：1) 检测悬臂梁顶端位置微小变化的装置比较复杂，增加了整个系统的体积和重量；2) 周围环境微小的振动就会影响到检测的结果；3) 系统的机械强度较差，抗冲击能力较弱。

2.6 质谱法

质谱法用于物质成分的分析已有多年的历史。该技术首先是将待测样品离子化，然后将离子化了的样品送入真空电场区，在这一区域中，带电颗粒的运动时间参数和运动距离决定于带电颗粒的质量电荷比值，据此确定被测样品的成分。目前，在质谱法检测痕量爆炸物的技术研究中，主要是开发新的离子化技术和提高检测系统的特异性。

2.7 荧光检测技术

荧光检测技术是基于待分析物出现前后，荧光物质的荧光强度、荧光光谱形状、激发态寿命、以及荧光偏振或荧光各向异性等基本光物理性质发生改变这一原理来实现对待测物质检测的技术。用荧光化学传感器检测硝基化合物近年来也引起了人们的兴趣，并有较快的发展。

2.7.1 荧光单分子爆炸物传感器

单个的荧光分子与被检测的爆炸物单个分子相互作用使荧光增强或减弱。只有当荧光分子与被分析物分子直接作用才会引起荧光改变。

苯并荧蒹(BkF)是一种给电子稠环化合物，可产生荧光，能够与缺电子的芳香族硝基化合物发生相互作用。Digambara Patra等^[20]用苯并荧蒹来检测硝基芳烃类爆炸物，检测时间为2~10 s，检测下限的浓度为 10^{-5} mol/L。Albert等^[21]将尼罗红荧光染料固定于硅胶颗粒中，形成敏感膜，当爆炸物与尼罗红相互作用时，荧光强度就会减弱，该传感器的响应时间为200 ms。Melissa S. Meaney等^[22]对苯胺，苯甲酸和酚类物质对硝基类爆炸物的敏感性进行了研究。结果表明红紫素、孔雀石和酚红对硝基爆炸物最为敏感。

2.7.2 荧光高分子爆炸物传感器

采用单个荧光分子制成的爆炸物检测装置，其检测限往往达不到埋雷表面的硝基化合物浓度，不能在实际中得以应用。如果能将荧光分子接枝到高分子链上，合成出共轭荧光聚合物，使电子给体点增多，可以极大提高传感器的灵敏度。

共轭荧光聚合物的共同特征是分子内有大的线性共轭电子体系，这给载流子或激发子提供了离域迁移的条件。荧光共轭聚合物链吸收激发波长的光子($h\nu$)后产生激发子或等摩尔的载流子，受激产生的激发子或载流子可沿整个共轭体系迁移。当激发子(或载流子)在迁移过程中遇到与受体官能团作用的淬灭剂时，激发到导带的电子发生转移，电子从聚合物转移到淬灭剂，而相反的电荷向聚合物转移，其结果是激发子或载流子沿共轭体系的迁移受阻，激发态分子被有效地去活化，导致整个聚合物不能发射光子，整体表现为聚合物的荧光被有效的淬灭。这就是共轭聚合物表现出来的特殊的“分子链效应”，正是这个效应使其能在不改变功能基团与识别分子结合常数的情况下成百倍地放大传感的响应信号。Mark Fisher等^[23]用共轭荧光聚合物制作了爆炸物检测装置Fido并且探测了装置对TNT的响应。

S. Yang等^[24]在共轭荧光聚合物传感器方面也做了大量的研究工作。他们将多元稠环分子的刚性三维结构引入到聚合物的骨架上,和一般的荧光分子比较,这种荧光高分子作为荧光传感器敏感材料有传感膜的稳定性好、爆炸物等高分子在膜中的溶解性能强的优点。

Changping Chang等^[25]将3种经典的共轭荧光高分子(聚苯乙烯衍生物MEH-PPV和DP10-PPV,以及聚苯乙炔衍生物BuPA)分别加工成薄膜,以其作为荧光传感薄膜,实现了对硝基芳烃类化合物蒸气的灵敏检测,灵敏度达到 10^{-9} 级。能用常用化学试剂经简单的合成得到敏感性良好的荧光高分子。

2.8 生物传感技术

生物传感器检测爆炸物的原理为自然生物体或者生物分子识别体(如抗体)与被测爆炸物接触可以发生化学变化、热变化、光变化以及直接诱导电信号,与生物分子识别体发生的前3种变化可以通过换能器转换为电信号,然后加以检测。

Irina B. Bakaltcheva等^[26]用荧光抗体Cy5-EDA-TNB和Cy5-EDA-RDH来检测TNT和RDX,检测下限质量浓度为6 ng/mL。而免疫传感器是在硝基化合物检测中应用最多的一种生物传感器。

免疫传感器是将免疫测定法与传感技术相结合而构建的一类新型生物传感器。它利用动物体内抗原、抗体能发生特异性的吸附反应的性质,将抗原(或抗体)固定在传感器基体上,通过检测相应的信号来测定环境中待测分子的浓度。免疫传感器能识别较大分子之间的微小差异,具有很强的特异性,在检测硝基化合物有巨大的潜力。

Eva Ehrentreich Förster等^[27]将核酸适体(apptamer,单链的核酸,能够与特定的爆炸物分子结合)涂在光纤侧面,通过探测光强的变化对爆炸物进行传感。这种生物传感器的优点是传感器坚固耐用,可以区分不同的爆炸物分子,并可制成手持式小型传感器。

3 结束语

分析了各种爆炸物检测器的优缺点,综合各方面的性能,荧光传感器和生物传感器具有很大的发展潜力。本实验室也正在开展荧光猝灭法来测量爆炸物浓度的研究。爆炸物检测用传感器今后发展的重要方向是小型化、高精度、集成化、智能化。目前,各国研究人员正在采用各种技术来实现这一目标,例如采用集成电路技术,应用敏感性更高的膜材料等。在不久的将来就会出现轻便、可靠的用来对爆炸物进行检测的传感器。

参 考 文 献

- 1 Ying Hu, Ping Huang, Lantao Guo *et al.*. Terahertz spectroscopic investigations of explosives[J]. *Phys. Lett. A*, 2006, **359**(6): 728~732
- 2 Zhengwei Zhang, Yan Zhang, Guozhong Zhao *et al.*. Terahertz time-domain spectroscopy for explosive imaging[J]. *Optik*, 2007, **118**(7): 325~329
- 3 Hu Ying, Zhang Cunlin, Guo Lantao *et al.*. Recent progress of THz spectroscopy in the detection of explosives[J]. *Physics*, 2007, **36**(1): 68~72
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
- 4 A. Giles Davies, Andrew D. Burnett, Wenhui Fan. Terahertz spectroscopy of explosives and drugs[J]. *Mater. Today*, 2008, **11**(3): 18~26
- 5 David S. Moore, R. Jason Scharff. Portable raman explosives detection[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2008, **11**(6~7):1~8
- 6 Esam M. A. Ali, Howell G. M. Edwards, Ian J. Scowen. In-situ detection of single particles of explosive on clothing with confocal Raman microscopy[J]. *Talanta*, 2009, **78**(3): 1201~1203
- 7 Jacqueline Akhavan. Analysis of high explosive samples by Fourier transform Raman spectroscopy[J]. *Spectrochim. Acta Part A*, 1991, **47**(9): 1247~1250

- 8 K. L. McNesby, C. S. Coffey. Spectroscopic determination of impact sensitivities of explosives[J]. *J. Phys. Chem. B*, 1997, **101**(16): 3097~3104
- 9 Zhu Yuxia. Detection of TNT in contaminate water sample by hydrogen flame GC[J]. *Career and Health*, 2000, **16**(8): 55
朱玉霞. 氢火焰气相色谱法测定污染水样中TNT的含量[J]. 职业与健康, 2000,**16**(8): 55
- 10 Lawrence V. Haley, Julian M. Romeskie. Development of an explosive detection system using fast GC-IMS technology[C]. Proceedings 32 nd Annual International Carnahan Conference on Security Technology, 1998. 59~64
- 11 Thomas F. Jenkins, Daniel C. Leggett, Paul H. Miyares. Chemical signatures of TNT-filled land mines[J]. *Talanta*, 2001, **54**(3): 501~513
- 12 R. G. Ewing, D. A. Atkinson, G.A. Eiceman. A critical review of ion mobility spectrometry for the detection of explosives and explosive related compounds[J]. *Talanta*, 2001, **54**(3): 515~529
- 13 T. Khayamian, M. Tabrizchi, M. T. Jafari. Analysis of 2,4,6-trinitrotoluene, pentaerythritol tetranitrate and cyclo-1,3,5-trimethylene-2,4,6-trinitramine using negative corona discharge ion mobility spectrometry[J]. *Talanta*, 2003, **59**(2): 327~333
- 14 E. J. Houser, T. E. Mlsna, V. K. Nguyen *et al.*. Rational materials design of sorbent coatings for explosives: applications with chemical sensors[J]. *Talanta*, 2001, **54**(3): 469~485
- 15 G. K. Kannan, A. T. Nimal, U. Mittal *et al.*. Adsorption studies of carbowax coated surface acoustic wave (SAW) sensor for 2,4-dinitrotoluene (DNT) vapour detection[J]. *Sens. Actuators B*, 2004, **101**(3): 328~334
- 16 R. A. McGill, T. E. M. Isna, R. Chung *et al.*. The design of functionalized silicone polymers for chemical sensor detection of nitroaromatic compounds[J]. *Sens. Actuators B*, 2000, **65**(1~3): 5~9
- 17 X. Yang, X.X. Du, J. Shi *et al.*. Molecular recognition and selfassembled polymer films for vapor phase detection of explosives[J]. *Talanta*, 2001, **54**(3): 439~445
- 18 T. Thundat, E. A. Wachter, S. L. Sharp. Vapor detection using resonating micro cantilevers[J]. *Anal. Chem.* 1995, **67**(3): 519~521
- 19 Zhang Yan, Mei Tao, Kong Deyi *et al.*. Research on principle and experiments of trace explosive particle detection with MEMS[J]. *MEMS Device Technol.*, 2003, **40**(3): 25~28
张彦, 梅涛, 孔德义等. MEMS技术检测痕量爆炸物微粒的原理与实验方法研究[J]. 微纳电子技术, 2003, **40**(3): 25~28
- 20 Digambara Patra, A. K. Mishra. Fluorescence quenching of benzo[k]fluoranthene on poly (vinyl alcohol) film: a possible optical sensor for nitro aromatic compounds[J]. *Sens. Actuators B*, 2001, **80**(3): 278~282
- 21 Keith J. Albert, David R. Walt. High-speed fluorescence detection of explosives-like vapors[J]. *Anal. Chem.* 2000, **72**(9): 1947~1955
- 22 Melissa S. Meaney, Victoria L. McGuffin. Investigation of common fluorophores for the detection of nitrated explosives by fluorescence quenching[J]. *Anal. Chim. Acta*, 2008, **610**(1): 57~67
- 23 Mark Fisher, John Sikes. Minefield edge detection using a novel chemical vapor sensing technique[C]. Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets VIII, 2003
- 24 S. Yang, T. M. Swager. Porous shape persistent fluorescent polymer films: an approach to TNT sensory materials[J]. *J. Am. Chem. Soc.*, 1998, **120**(): 5321~5322
- 25 Changping Chang, Chunyu Chao. Fluorescent conjugated polymer films as TNT chemosensors[J]. *Synthetic Metals*, 2004, **144**(3): 297~301
- 26 Irina B. Bakaltcheva, Frances S. Ligler, Charles H. Patterson *et al.*. Multi-analyte explosive detection using a fiber optic biosensor[J]. *Anal. Chim. Acta*, 1999, **399**(1~2): 13~20
- 27 Eva Ehrentreich-Fürster, Dagmar Orgel, Andrea Krause-Griep. Biosensor-based on-site explosives detection using aptamers as recognition elements[J]. *Anal Bioanal Chem*, 2008, **391**(5): 1793~1800