

# 痕量爆炸物的化学、生物、 MEMS 传感器探测技术

张成梅, 梅 涛, 孔德义, 张 彦

(中国科学院合肥智能机械研究所, 传感技术国家重点实验室, 安徽 合肥 230031)

(E-mail: cmzhang@mail.iim.ac.cn)

**摘要:** 利用爆炸物的化学或物理性质可实现多种爆炸物检测技术。现有的检测技术可分为两大类: 爆炸物的体探测技术与痕量爆炸物探测技术。重点介绍了三种痕量爆炸物探测技术, 即生物传感器技术、化学传感器技术及 MEMS 传感器技术, 并指出 MEMS 传感器技术具有其它技术无可比拟的价格低廉、体积小、携带方便等优点。

**关键词:** 痕量爆炸物; 化学传感器技术; 生物传感器技术; MEMS 传感器技术

**中图分类号:** TP212.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1671-4776(2003) 07/08-0481-03

## Trace explosive detection with chemical sensor, biosensor and MEMS sensor techniques

ZHANG Cheng-mei, MEI Tao, KONG De-yi, ZHANG Yan

(State Key Laboratory of Transducer Technology, Institute of Intelligent Machines,  
Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** There are many kinds of explosive detecting techniques based on explosive's chemical or physical characteristics. The current detecting technology can be divided into two parts: bulk explosive detecting technology and trace explosive detecting technology. In this paper three kinds of trace explosive detecting techniques are introduced in detail such as chemical sensor, biosensor and MEMS sensor technique. Also it showed that MEMS sensor technique has such advantages as low price, miniature and convenience etc, which any other technique can't have.

**Key words:** trace explosive; chemical sensor; biosensor; MEMS sensor

### 1 引言

据联合国估计, 现在全球 60 个国家的土地上埋设了 1 亿多颗地雷, 对平民形成了较大的威胁并严重污染了当地环境。当前, 航空安全正面临日益严重的恐怖主义威胁, 除劫机外, 将炸弹藏匿在货物及邮件中带上客机的事件也时有发生。

随着恐怖主义的日益严重及爆炸物封装技术的提高(现有炸药多为可塑炸药, 几乎不含有金属), 传

统的检测技术如人工检查、搜索犬检查、金属探测已不能满足当前检测的需要。

除传统的检测技术如人工检查、搜索犬检查、金属探测以外, 就现有的检测技术而言, 爆炸物探测技术基本上可分为两大类: 爆炸物的体探测技术和痕量爆炸物探测技术。

### 2 爆炸物的体探测技术

爆炸物的体探测技术即对爆炸物的整体外观进

收稿日期: 2003-05-15

基金项目: 863 机器人技术主题 MEMS 重大专项(2002AA404320)

行鉴别的技术。

爆炸物的探测技术是目前比较成熟与完善的技术,主要是扫描成像探测技术,包括 X 射线安全检查技术、探地雷达、红外成像技术等;核能探测技术包括热中子激活、中子后向散射、核四极矩共振以及超声探测技术等<sup>[1]</sup>。

由于运用上述技术造成的设备存在价格昂贵、灵敏度低、设备体积大等缺点,因而在应用方面存在局限性。相比之下,运用痕量爆炸物微粒探测技术原理制成的设备以其灵敏度高、体积小、成本低越来越引起人们的注意。

### 3 痕量爆炸物探测技术

痕量爆炸物探测的原理基于在对爆炸品的处理过程中必然会留下痕迹,这些痕迹会粘附于人体或任何接触的物件,因此可从物件抽取物体粒子或痕迹进行分析。但若采用此法进行检测,首先必须对采集的空气进行浓缩提纯,或者对被检测物品进行超声激励以促进爆炸物微粒从爆炸物品中逸出。因此爆炸物微粒探测系统一般由空气采样收集系统、压缩提纯系统和分析处理系统组成。

目前痕量爆炸物探测技术主要有以下几类:波谱探测技术包括中红外吸收光谱法、气相色谱法、质谱法、离子迁移光谱法等;化学传感器技术以及生物传感器技术;MEMS 传感器技术。其中离子迁移光谱法和气体色谱分析技术是目前已投入使用的领先技术,而以下几种化学传感器技术、生物传感器技术、MEMS 传感器技术仍基本处于研发阶段。

#### 3.1 化学传感器技术

化学传感器技术原理基于化学敏感材料与采样物质中的爆炸物分子相互接触时直接或间接地引起电极电势等电信号的变化,从而检测出爆炸物质的种类和浓度。

##### 3.1.1 电子鼻

俄罗斯莫斯科动力学院的专家研制出一种气体传感器主要由传感器和微处理器构成。传感器的关键部件是一个非常薄的半导体金属氧化物薄膜,当它接触到不同物质时,其电阻发生相应的变化,同时输出不同的信号。与其相接的微处理器对输出信号进行分析后即可立即显示被检查的物体中是否有毒品或爆炸物。据国际文传电讯社报道,此“电子鼻”配上电池后大小相当一部手机,便于海关、边防及公安人员随身携带,使用十分方便。由于其灵敏度非常高,还可用于对瓦斯、煤气和其它可燃及有毒气体进行检测<sup>[2]</sup>。

德国科学家的新型“嗅觉扫雷仪器”的探测部分有 3 个电极,之间具有一定的电压。当化学气味探头在空气中探测到 TNT 等爆炸物质的特定化学气味后,会在 3 个电极之间引起化学反应,导致电极的电流强度增大,从而发出警报。电流强度越大,则表明 TNT 成分浓度越高,即离地雷位置越近。此外,该“嗅觉扫雷仪”在空气中 TNT 浓度较低的情况下依然有效。通过对地雷中的主要爆炸物质进行气味辨别,可以有效发现地雷,与传统的金属探测法相比大大提高了准确性与安全性<sup>[3]</sup>。

##### 3.1.2 分子链荧光检测

美国麻省理工学院的 Jye-Shane Yang 和 Timothy M. Swager 提出了一种比较特别技术——分子链荧光聚合物技术<sup>[4,5]</sup>。

分子链的效应在于当一个 TNT 分子落在受体链上时,整个链的物理特性发生了改变(图 1)。因此极小浓度的 TNT 便可以引起很多受体分子的改变,从而导致一个较大、易检测到的信号产生,使此探测器有很高的灵敏度。

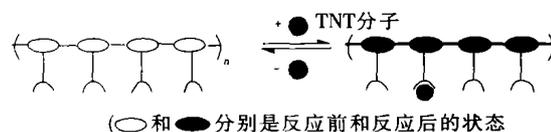


图 1 分子链反应机理

分子链荧光聚合物技术的原理在于当 TNT 分子与荧光聚合物分子链发生反应,聚合物的荧光特性便发生了改变,根据反应后所发射的特征波长的强度便可以推断 TNT 分子浓度(图 2)。

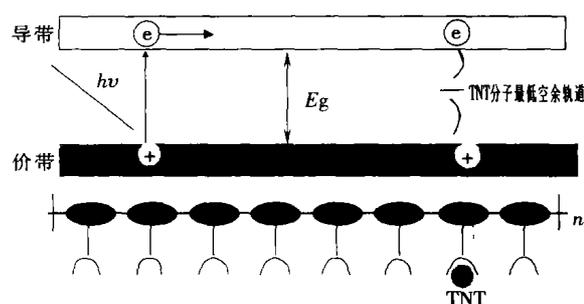


图 2 TNT 改变聚合物荧光特性的原理图

化学传感器具有选择性多、灵敏度高的优点,但化学传感器具有化学稳定性差的缺点。

#### 3.2 生物传感器技术

其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几种变化可以通过换能器转换为电信号,然后加以检测。

### 3.2.1 自然生物体——细菌检测

早在 1990 年,美国国防部就将生物传感器列入国防关键技术中。经过数年的研究发现,一种适合在黑暗环境中生长,并以爆炸物散发出来的浓烈气味为生、会发光的自然细菌将成为人类排雷扫雷的好帮手。

美国南卡罗莱纳州某研究小组发现,一种自然状态的细菌靠吞噬 TNT 繁衍后代,而世界上 90% 的埋设式地雷中的爆炸物其主要成分为 TNT。因此,一旦找到了雷场,只需把这种特殊的细菌撒播在地上,那么细菌将在埋有地雷的那个地方生长繁殖起来,并且在黑夜放出光芒。这样,细菌就成为最有用的探雷生物传感器。

美国橡树岭实验室的工作人员将食炸药细菌的基因和能发荧光的水母的蛋白质基因结合制造出接近炸药即会产生荧光的细菌,当细菌对炸药产生反应时便启动吃炸药的基因,这样就会连带启动会转为荧光的基因,这些会发荧光的细菌可用来做标示,但水母的绿色荧光蛋白质基因只在紫外线刺激下才看得见<sup>[3]</sup>。

### 3.2.2 生物分子识别体——抗体检测

抗体对被测物分子具有很好的选择性,因此利用唯一与 TNT 分子反应的抗体制成传感器将具有很高的灵敏度。

英国高级航空技术有限公司研制的抗体生物传感器主要由以下 3 部分组成:空气采样收集部分、压缩提纯部分和检测与分析部分<sup>[6]</sup>(图 3)。

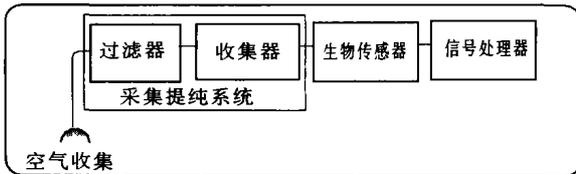


图 3 系统简图

此传感器的探测原理为(图 4),当有 TNT 分子存在时,附于压电石英晶体表面的抗体便脱离抗体-抗原对,与 TNT 分子反应,由此导致的质量变化改变了石英晶体的谐振频率,从而得到被测物信息。

由于 TNT 抗体是一个气体 TNT 分子质量的 600 多倍,这就产生了一种放大效应,因此它具有很高的灵敏度。

生物传感器具有高选择性、可快速连续检测的优点,但它与化学传感器一样也有生物响应稳定性差的缺点。

### 3.3 MEMS 传感器技术

美国能源部橡树岭国家实验室开发出一种悬臂

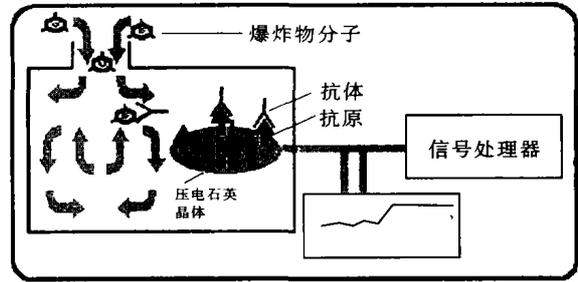


图 4 抗体传感器原理图

梁微传感器,可以侦测出非常微量的 TNT 炸药颗粒<sup>[7]</sup>。

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,如图 5 所示,然后将此悬臂梁加热至所吸附 TNT 的特征温度 575 ℃,引发 TNT 微粒微小爆燃反应,产生的微小热扰动使悬臂梁振动并产生位移。最后用位移传感器检测出悬臂梁的变化信息并判定 TNT 炸药的存在。

这种传感器的灵敏度可达  $10^{-12}$  量级。此外,通过调整传感器的温度范围,它还可以用来检测除 TNT 外的其他爆炸物成分。

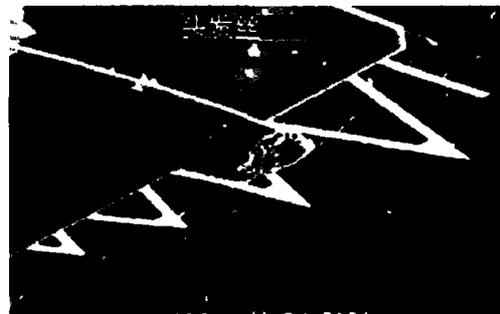


图 5 微悬臂梁阵列

美国 DUKE 大学也在从事该项研究工作<sup>[8]</sup>,他们采用 MEMS 技术制作了具有双金属效应的悬臂梁,用红外光对附在悬臂梁表面的爆炸微粒照射直至其爆燃,爆燃放出的热量引起悬臂梁变形,从而检测出爆炸物信息,其原理图如图 6 所示。

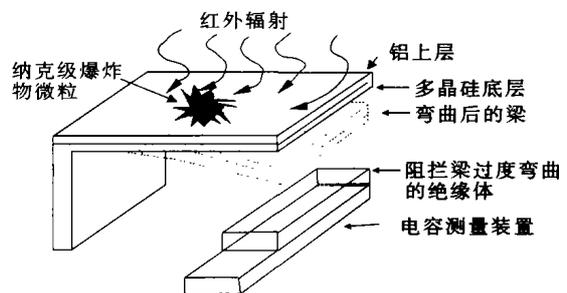


图 6 悬臂梁探测痕量爆炸物简图

(下转第 491 页)

表 2 补偿后的数据记录

温度/°C	温度/°C	相对误差/%FS	输出/V	输出/V	相对误差/%FS
25	1.2493	0.0708	25	1.7745	0.0685
-40	1.2459		60	1.7712	

### 3 结 论

与其他补偿方法相比,利用 pn 结对硅基传感器进行温度补偿,是一种简单而且实用的方法,其优点是所用元件少,使用简便,补偿是动态进行的;其缺点是要根据每个传感器不同的温度特性来进行,

(上接第 483 页)

MEMS 技术所具有的高精度、多功能集成、小型低功耗、坚固耐用和批量制造等特点使整个爆炸物检测系统具有微型化、集成化和智能化的特点,因而具有以下优点<sup>[9]</sup>:

- 1) 分析速度快,可以提高 2~3 个数量级;
- 2) 灵敏度高,可以达到  $10^{-6}$  乃至  $10^{-12}$  量级;
- 3) 系统外部连接最少,可以自启动、自治、自闭;
- 4) 污染少,实行一次性使用;
- 5) 可以实时、原位、连续检测,并可用于无法接近的微环境下;
- 6) 可实现批量制造、降低成本等。

这样的分析系统将为爆炸物探测带来一场重大的革新,成为痕量爆炸物探测技术主要发展方向。

### 4 结 论

痕量爆炸物探测技术能够方便、有效、快速、准确、安全地在机场、码头、车站以及其他公共场所对人体和行李进行爆炸物品的检查以及清除战争中遗留的地雷等,因此痕量爆炸物探测技术正发挥着越来越重要的作用。

尤其对于 MEMS 传感器技术, MEMS 是微电子技术的拓宽和延伸,它将微电子技术和精密机械加工技术相互融合,实现了微电子与机械融为一体,它不仅可以降低机电系统的成本,而且还可以完成许多大尺寸机电系统所不能完成的任务, MEMS 技术的日趋成熟将为制作实用化的微小型的痕量爆炸物探测系统提供技术基础。

#### 参考文献:

- [1] BRUSCHINI C, GROS B. A Survey of research on sensor

且要经过两次高低温实验,增加了传感器的成本。

#### 参考文献:

- [1] 袁智荣. 压阻式压力传感器在无人机上的应用 [J]. 传感器技术, 2001, 20(1): 48-49.  
 [2] 鲍敏杭, 吴宪平. 集成传感器 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1987, 86-88.  
 [3] ICSENSORS. 传感器手册 [M]. 3-4.  
 [4] 关玲, 吴芳. 一种压力传感器零位温漂的补偿方法 [J]. 新技术新仪器, 2000, 20(3): 20-22.

#### 作者简介:

郭 涛 (1971-), 男, 讲师, 华北工学院电子工程系, 主要从事微机械传感器研究。

technology for landmine detection [J]. Journal of Humanitarian Demining, 1998, 2(1).

- [2] <http://news.fm365.com/keji/20001130/191002.htm>.  
 [3] <http://news.enorth.com.cn/system/2002/09/15/000418352.shtml>.  
 [4] SWAGER T M. The molecular wire approach to sensory signal amplification [J]. Accts. Chem Res, 1998, (31): 201-207.  
 [5] FISHER M, CUMMING C, FOX M, et al. A man-portable chemical sniffer utilizing novel fluorescent polymers for detection of ultra-trace concentrations of explosives emanating from landmines [A]. The 4th Int Symp on Technology and the Mine Problem [C]. Monterey, USA, 2000. 3.  
 [6] O'NEIL K E. The bio-sensor: An effective drugs and explosives detection system [J]. Passenger Terminal World, 2000, 2.  
 [7] THUNDAT T, CHEN G Y, WARMCK R J. Vapor detection using resonating microcantilever [J]. Anal Chem, 1995, 67(3): 519-521.  
 [8] FAIR R B, PAMULA V K. MEMS-based explosive particle detection and remote particle stimulation [A]. Proc of SPIE 1997: Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets II [C]. 1997, 3079, 671-679.  
 [9] 崔大付. 微全分析系统中的 MEMS 技术 [J]. 现代科学仪器, 2001(4): 27-31.

#### 作者简介:

张成梅 (1978-), 女, 山东省青岛人, 中科院合肥智能机械研究所读硕士研究生, 主要研究方向为 MEMS(微电子机械系统)和 MOEMS(微光电机系统);

梅 涛 (1962-), 男, 江西省南城人, 中国科学院合肥智能机械研究所常务副所长、研究员, 中国科学技术大学博士生导师(精密仪器与机械博士点), 中国科学院青年联合会副主席;

孔德义 (1966-), 男, 安徽省铜陵人, 博士, 副研究员, 传感技术中心微传感器与微机器人实验室副主任。