

## Development of Explosive Detection with MEMS

KONG De-yi, ZHU Jian-bin, QI Yong-guang, LIN Bing-tao, ZHANG Zheng-yong, ZHANG Tao, LU Wei  
(Institute of Intelligent Machines, Chinese Academy of Sciences State Key Laboratory of Transducer Technology, Hefei 230031, China)

**Abstract:** The development of explosive detection with MEMS technology was briefly reviewed. Various detecting methods were classified in microcalorimetric spectroscopy, displacement measuring with light reflecting, strain monitoring with piezoresistance, and resonance frequency shift measuring. The principle of each method were respectively introduced, its advantage and the disadvantage were discussed. However, research in this area is still at experimental status, qualifications such as identification accuracy, robust, noise-proof still need to be improved before application.

**Key words:** MEMS; Explosive detection

**EEACC:** 7230

# MEMS 技术检测爆炸物的原理与研究进展

孔德义\*, 诸建彬, 齐永光, 林丙涛, 张正勇, 张涛, 路巍

(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, 合肥 230031)

**摘要:** 本文对国内外采用 MEMS 技术检测爆炸物的方法进行了分类, 主要将其分为测温法、位移法、压阻法、谐振法等, 分别介绍了它们的检测原理, 分析了在灵敏度、选择性、抗环境干扰能力、系统集成与小型化等方面它们各自的潜在优势以及不足之处。同时, 对近十年来该研究领域的进展和现状作了简要回顾, 这些研究目前基本上都还处于实验室阶段, 在真正达到实用化前还需要解决选择性、稳定性、抗环境干扰等技术难题。

**关键词:** MEMS; 爆炸物检测

**中图分类号:** TP212; TB41

**文献标识码:** A

**文章编号:** 1004-1699(2006)05-2096-04

爆炸物探测是一项重要的反恐内容。爆炸物探测技术种类较多, 归纳起来主要有两大类, 即体探测技术和痕量探测技术。体探测技术包括金属探测器探测、X 射线探测、热中子探测、四极共振分析、太赫兹成像技术等。痕量探测技术主要有光谱法、“电子鼻”、石英微晶天平技术、气相色谱与电子捕获器联用技术、化学喷显法、荧光检测法、离子迁移谱分析等, 另外利用经过训练的动物如警犬等也属于痕量检测之列。这些技术都各有一些特色和不足, 由于篇幅所限, 不能在此一一介绍。其中, 离子迁移谱技术相对而言发展和应用较为成熟, 产品有通道式、台式、便携式等多种型号, 灵敏度较高, 检测极限的范围在  $10^{-8} \sim 10^{-14}$  g 之间<sup>[1]</sup>。除了探测爆炸物以外,

还能检测多种其他化学物质, 如化学战剂等, 但其价格十分昂贵。其中, 便携式离子迁移谱仪由加拿大百灵捷公司于 1999 年率先推出<sup>[2]</sup>, 但它的灵敏度达不到通道式和台式离子迁移谱仪的水平。

随着 MEMS 技术的快速发展以及在多个领域的成功应用, 自然而然就会想到如何将 MEMS 技术用于爆炸物的检测, 即充分发挥 MEMS 技术的特点, 研制出体积更小、重量更轻、价格更低的便携式爆炸物探测器。下面将介绍采用 MEMS 技术检测爆炸物的一些原理和方法。

## 1 MEMS 技术检测爆炸物的方法

MEMS 检测爆炸物技术属于痕量检测技术, 通

收稿日期: 2006-07-01

基金项目: 国家自然科学基金资助(60574093)

作者简介: 孔德义(1966-), 男, 博士, 研究员(通讯联系人), 主要研究方向是 MEMS 微传感器与微系统, Kongdy@iim.ac.cn

常采用灵敏度较高的硅梁作为敏感结构. 硅梁与爆炸物样品直接接触, 通过热激励或光激励, 使爆炸物发生反应, 引起硅梁的温度、位移、应力、谐振频率等物理量发生变化, 并用光学或电学方法进行检测. 根据被测硅梁的物理量的不同, 将其分为测温法、位移法、压阻法、谐振法四种.

### 1.1 测温法

测温法是利用集成在硅梁上的测温电阻, 直接测量爆炸物微反应过程中硅梁温度的异常变化, 该异常变化主要是爆炸物吸热或放热反应分别导致硅梁温度的瞬间降低或升高. 以图 1 所示的情形为例<sup>[3]</sup>, 它是利用爆炸物的熔化吸热特性来检测. 由于不同的爆炸物其熔点各不相同, 因此可以将熔点作为识别爆炸物的一个重要特征参数. 由于是直接测量硅梁的温度变化, 因此可以采用结构更加稳固的双端固支梁作为敏感结构, 在硅梁上有加热元件和测温元件, 通过加热元件将硅梁加热到略高于爆炸物熔点的某一温度, 爆炸物熔化时从硅梁上吸收热量, 此时测温电阻会检测到硅梁温度有一个异常的下降. 该方法具有较高的选择性和抗环境干扰能力, 并且易于实现检测系统的小型化, 但难以达到很高的检测极限.

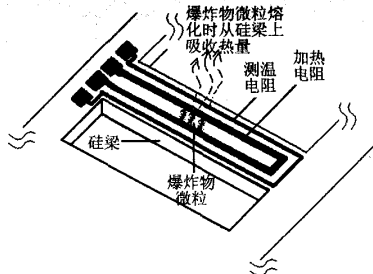


图 1 测温法检测原理示意图

### 1.2 位移法

位移法的检测原理如图 2 所示, 其敏感结构是一个具有双金属效应的悬臂梁, 在其上方有一个激光器和一个位置敏感器件 (PSD), 激光器发出的光束经过硅悬臂梁自由端表面的金属反射后, 到达

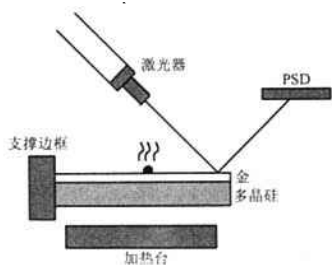


图 2 位移法检测原理示意图

PSD, PSD 能够检测出反射光的位置偏移量. 当检测时, 通过外部将硅悬臂梁加热到爆炸物的微反应温度, 一旦硅梁上有爆炸物并发生反应, 反应时硅梁的温度变化以及爆炸物的质量变化, 均会引起硅悬臂梁自由端产生异常的位移, 因此反射到 PSD 的激光位置也会随之偏移. 该方法灵敏度较高, 但需要从外部引入光学系统, 难以实现小型化, 并且抗环境干扰能力较差.

### 1.3 压阻法

压阻法采用的是图 3 所示的硅悬臂梁结构<sup>[4]</sup>, 在硅梁的根部有一个多晶硅压敏电阻. 另外, 在硅梁的表面覆盖有一层对特定爆炸物有较高选择性的有机物薄膜, 当携带有爆炸物蒸气的气流经过硅梁表面时, 爆炸物蒸气会被选择性吸附而使硅梁的总质量增加, 这会改变硅梁自由端的位移, 进而改变硅梁根部多晶硅压敏电阻的输出信号. 该方法最大的优点是直接利用压阻效应检测硅悬臂梁自由端的位移, 不再需要从外部引入一个较为复杂的光学系统, 因而便于实现检测系统的小型化. 其缺点是, 目前尚没有对爆炸物进行特异性吸附的选择性吸附膜, 因此选择性并不好, 并且抗环境干扰能力较差.

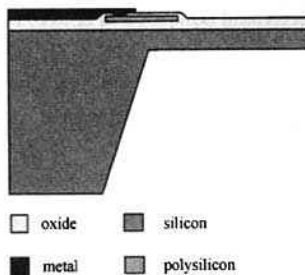


图 3 具有压阻效应的硅悬臂梁

### 1.4 谐振法

图 4 是一种利用谐振法检测的硅悬臂梁结构<sup>[5]</sup>, 在硅梁上集成有 ZnO 压电元件和重掺杂多晶硅加热元件. 工作时通过加热元件对硅梁进行加热, 并通过 ZnO 压电元件工作在自检测模式下来检测悬臂梁的谐振频率<sup>[6]</sup>. 当硅梁上有爆炸物存在时, 会

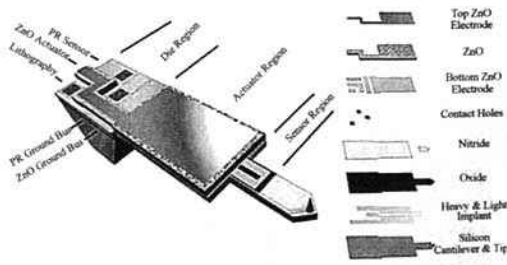


图 4 谐振硅梁

发生爆燃现象,引起硅梁的总质量发生变化,进而导致硅梁的谐振频率发生偏移.通过确定发生频率漂移的温度点,可以判定爆炸物的种类;通过比较爆炸物爆燃前后硅梁的谐振频率的变化大小,理论可以计算出参与反应的爆炸物的质量.该方法灵敏度较高,但易受到环境压力、温度、工艺应力、振动等因素的干扰.

## 2 MEMS 技术检测爆炸物的研究进展

1995年,美国橡树岭国家实验室的 Thomas Thundat 等人采用 MEMS 技术研制出一种用于气体检测的谐振硅梁<sup>[7]</sup>,为该实验室日后采用谐振法检测爆炸物奠定了较好的基础.

1997年,美国杜克大学的 R. B. Fair 等人采用测温法对梯恩梯微粒进行检测<sup>[8]</sup>.具体做法是,先向目标物体发射超声波,使可能含有梯恩梯微粒的样品脱附并被收集到一个硅梁表面,然后采用波长为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的红外光源对硅梁上的梯恩梯微粒进行选择加热并使其蒸发,同时直接测量梯恩梯微粒蒸发时所引起的硅梁的温度变化.这种方法的优点是,波长为  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  的红外辐射正好覆盖了梯恩梯的特征吸收波长,而硅梁由于不吸收该波段红外辐射,因此不会被加热,硅梁的温度变化主要由梯恩梯蒸发吸热所引起,因此信噪比很大,便于检测.其不足之处在于需要从外部引入一个具有特定带宽的红外光源,因而增加了整个检测系统的尺寸和重量,并增加了其复杂性.此外,除了梯恩梯以外,多种有机物(如甲烷等)和无机物(如一氧化碳等)也会强烈吸收  $3\sim 5\ \mu\text{m}$  波段的中红外辐射,因此该方法其实选择性并不高.

1999年,杜克大学的 V. K. Pamula 和 R. B. Fair 采用位移法对梯恩梯和黑索金微粒进行检测<sup>[9]</sup>.实验中采用的双金属效应硅悬臂梁由多晶硅和金组成,用紫外灯对硅梁加热,使附着在硅梁上的梯恩梯和黑索金微粒蒸发,用激光器和位置敏感器件(PSD)检测硅梁自由端的位移变化.据称检测极限达到纳克量级( $10^{-9}\ \text{g}$ ).

2000年,橡树岭实验室的 Thomas Thundat 提出了一种新的观点,他认为在  $575^\circ\text{C}$  时,梯恩梯微粒会发生微小的爆炸<sup>[10]</sup>.而早在 1998年,杜克大学的 R. B. Fair 就已经撰文指出,微量的梯恩梯微粒被加热时不会爆炸,只会爆燃<sup>[11]</sup>.

2003年,橡树岭实验室的 L. A. Pinnaduwege 等人采用谐振法对梯恩梯蒸气进行检测<sup>[5]</sup>.实验中采用的谐振硅梁如图 4 所示.具体做法是,先将硅梁

放置在充满梯恩梯蒸气的腔体中,经过一段时间后取出,此时硅梁表面粘附有梯恩梯蒸气.随后,通过压电元件对硅梁进行激励,使其工作在谐振状态,并通过电阻元件对硅梁加热,使硅梁上粘附的梯恩梯蒸气发生爆燃反应,并通过计算机计算出硅梁谐振频率的漂移情况.据文献<sup>[5]</sup>介绍,其检测极限达到 70 皮克( $10^{-12}\ \text{g}$ ).

2004年,橡树岭实验室的 L. A. Pinnaduwege 等人另辟蹊径,用压阻法检测黑索金和太安炸药蒸气<sup>[4]</sup>.实验中他们采用的硅悬臂梁由丹麦 Cation 公司提供,尺寸为  $125\ \mu\text{m}\times 50\ \mu\text{m}\times 0.5\ \mu\text{m}$ ,在硅梁的根部有多晶硅压敏电阻.硅梁表面的选择性吸附膜是被称作 4-MBA(4-Mercaptobenzoic Acid)的物质,实验中发现它除了吸附黑索金和太安炸药蒸气以外,还吸附其他多种化学物质,因此选择性不好,抗环境干扰能力较差.不过,由于压阻法较容易实现检测装置的小型化,因此他们研制出的样机只有电视遥控器大小,如图 5 所示.



图 5 橡树岭实验室研制的爆炸物探测器样机

国内方面,从 2002 年开始,中国科学院合肥智能机械研究所采用测温法检测梯恩梯和黑索金微粒<sup>[3,12-17]</sup>,敏感结构为双端固支硅梁,如图 6 所示.为了便于采样,硅梁尺寸取值较大,为  $4\ 000\ \mu\text{m}\times 400\ \mu\text{m}\times 10\ \mu\text{m}$ ,因而其热容量较大,所以灵敏度不是很高,实验中只能检测出微克量级的梯恩梯和黑索金微粒.图 7 是由硅梁、微反应腔、信号处理电路、计算机等组成的爆炸物检测系统.

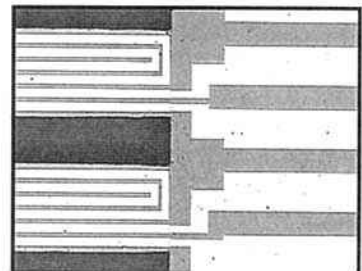


图 6 集成有加热和测温元件的硅梁(局部)

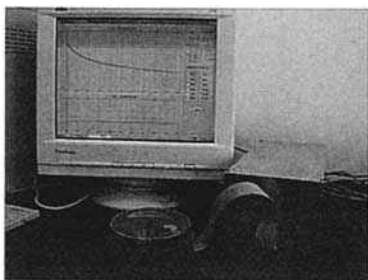


图7 智能所研制的爆炸物检测系统样机

### 3 结束语

本文中介绍的几种采用 MEMS 技术检测爆炸物的方法都各有其特点。就灵敏度和检测极限而言, 谐振法较高; 从抗干扰性能方面考虑, 测温法较好; 从准确性角度来看, 直接利用爆炸物本身固有的物理参数如熔点、爆燃点等, 比采用选择性吸附膜要更为可靠。虽然从 1997 年国外就已经开始了将 MEMS 技术用于爆炸物检测的研究, 但目前还未真正达到可实用化的程度, 还需要进一步加大力、物力、财力等方面的投入。

#### 参考文献:

- [1] Trace Detection of Narcotics Using a Preconcentrator/Ion Mobility Spectrometer System, NIJ Report 602 - 00, Presented by National Institute of Justice of USA, April 2001.
- [2] <http://www.avsec.com.cn/bailingjie.htm>[EB/OL].
- [3] 孔德义等, 一种用于探测爆炸物微粒的 MEMS 敏感阵列设计及制作[C]//第五届全球智能控制与自动化大会, 2004(6), 杭州, 3611-3614.
- [4] L. A. Pinnaduwaige et al., A Sensitive Handheld Vapor Sensor Based on Microcantilevers, Review of Scientific Instruments, 2004, 75:4554-4557.
- [5] L. A. Pinnaduwaige et al., A Microsensor for Trinitrotoluene Vapour, Nature, 2003, 425:474.
- [6] B. Rogers et al., Mercury Vapor Detection with a Self-Sensing Resonating Piezoelectric Cantilever[J]. Review of Scientific Instruments, 2003, 74:4899.
- [7] Thomas Thundat. et al., Vapor Detection Using Resonating Microcantilever[J]. Anal. Chem., 1995, 67(3):519-521.
- [8] R. B. Fair et al., MEMS-Based Explosive Particle Detection and Remote Particle Stimulation[C]//Part of the SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, SPIE, 3079, 1997:671-679.
- [9] V. K. Pamula et al., Detection of Nanogram Explosive Particles with a MEMS Sensor[C]//Part of the SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, SPIE, 1999, 3710:321-327.
- [10] <http://bio.lsd.ornl.gov/highlights/2000feb2.html>[EB/OL].
- [11] R. B. Fair et al., MEMS Devices for Detecting the Presence of Explosive Material Residues in Mine Fields[C]//Part of the SPIE Conference on Detection and Remediation Technologies for Mines and Minelike Targets, SPIE, 1998, 3392:409-417.
- [12] 孔德义等, 一种基于 MEMS 技术的轻小型爆炸物探测器研究[J]. 中国机械工程, 2005 年 7 月, 16:163-165.
- [13] Y. Tao et al., Development of an Explosive Detector with a MEMS Sensor Array[J]. International Journal of Information Acquisition, 2004, 1(4):337-343.
- [14] Deyi Kong et al., A MEMS Sensor Array for Explosive Particle Detection[C]//Proceedings of 2004 International Conference on Information Acquisition, June 21-25, 2004, Hefei, China:278-281.
- [15] Zhang Yan et al., Principle and Experimental Study of a MEMS Explosive Particle Detector[C]//2003 ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition (IMECE'03), November 16-21, 2003, Washington, D. C. USA.
- [16] 张成梅等, 痕量爆炸物的化学、生物、MEMS 传感器探测技术[J]. 微纳电子技术, 2003 年 7/8:481-483.
- [17] 张彦等, MEMS 技术检测痕量爆炸物微粒的原理和实验方法研究[J]. 微纳电子技术, 2003 年 3 月, 25-28.

(上接第 2095 页)

- [5] Wu X, Yeh S, Jeng T and Khalil O S. Noninvasive Determination of Hemoglobin and Hematocrit Using a Temperature-Controlled Localized Reflectance Tissue Photometer[J]. Analytical Biochemistry, 2000, 287: 284-293.
- [6] Steinke J M and Shepherd A P. Reflectance Measurements of Hematocrit and Oxyhemoglobin Saturation[J]. American Journal of Physiology, 1987, 253: H147-H153.
- [7] 朱小清. 血红蛋白自动检测仪的研制[J]. 中国医疗器械杂志, 1991, 15(1): 13-15.
- [8] 袁玉峰, 黄勤. 智能式血红蛋白检测仪[J]. 武汉冶金科技大学学报, 1997, 20(3): 365-368.
- [9] Jiang Liying, Liu Chunxiu, Li Huaqing, Luo Xianbo, Wu Yirong, Cai Xinxia. Performance of an Amperometric Biosensor for the Determination of Hemoglobin[J]. Journal of Nanoscience and Nanotechnology, 2005, 5: 1301-1304.
- [10] He B, Zhou A, Yue W, Jiang L, Liu C, Cai X. Research on Optic Biosensor for Rapid Detection of Hemoglobin[C]//1st Annual IEEE Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems 2006, Zhuhai, China, 2006: 134.
- [11] Zhou A, He B, Wang H, Jiang L, Cai X. A Portable System for Determination of Biochemical Parameters by Optic Reflection[C]//1st Annual IEEE Conference on Nano/Micro Engineered and Molecular Systems 2006, Zhuhai, China, 2006: 142.
- [12] 宋吉江, 牛铁霞. 光敏电阻的特性及应用[J]. 微电子技术, 2000, 28(1):55-57.