

研究报告

# 基于光声原理的火灾复合气体探测技术

蒋亚龙<sup>1</sup>, 袁宏永<sup>2</sup>, 张永明<sup>1</sup>, 刘勇<sup>1</sup>, 祝玉泉<sup>1</sup>, 王进军<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027;

2. 清华大学 公共安全研究中心, 北京 100084)

**[摘要]** 监测燃烧过程中产生的气体(主要是CO)来探测火灾逐渐成为火灾探测中的一个重要领域。各种现有的气体传感器灵敏度比较低,不利于火灾的早期报警,利用基于光声原理的复合气体探测技术来进行火灾探测,能极大地提高探测器的灵敏度。将CO和CO<sub>2</sub>的检测结合起来,可降低探测器的误报率,有利于提高早期报警。

**[关键词]** 光声;火灾探测;气体复合

**[中图分类号]** O433.4 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2006)08-0069-04

常规火灾探测器主要基于探测火灾过程中温度、烟雾等物理特性的变化<sup>[1]</sup>。这些探测器有其自身的优越性,但也存在着不少缺点。虽然依靠几种物理参数的组合可以降低探测器的误报率,但却不能实现火灾的超早期报警。研究表明,火灾的初期,气体的产生要早于烟雾的出现和温度的升高<sup>[2]</sup>。因此,利用气体作为参量来探测火灾将会大大提高其早期性和可靠性。随着检测气体的传感技术的不断发展,以气体作为参量已经被越来越广泛地应用于火灾探测领域<sup>[2,3]</sup>。

燃烧过程中产生很多种气体,例如一氧化碳、二氧化碳以及氮氧化物等,如果可燃物中含有其他元素(如S, F, Cl, Br),则还会产生一些含S的氧化物以及卤素的化合物。但对于自然界绝大部分可燃物来说都含有C, H两种元素,它们的燃烧产物中多含有CO<sub>2</sub>和CO,因此将CO和CO<sub>2</sub>作为探测的标识性气体是合适的。

目前能够检测气体的传感器种类有很多,各有特点,但用于火灾探测,其选择性、灵敏度、长时间工作能力等都不能令人满意。例如金属半导体气体传感器(metal oxide semiconductor)的气体选择性较差、长时间工作后灵敏度下降;电化学传感器的

(electrochemical sensor)价格高、寿命仅2年且存在中毒现象,无法预知其是否失效;利用仿生原理进行CO的探测,一般温度和湿度过高或过低会导致误报警,自身复位判断缓慢导致积累误报,需要每隔48小时复位、寿命仅2年。

利用光声原理实现的气体检测技术是基于气体的特征红外吸收,间接测量气体吸收的能量,因此灵敏度高,检测限低,且不存在传感器的老化问题。1971年Kreuzer从理论上分析了利用染料激光光源和高灵敏度传声器的光声技术的检测限,对于痕量气体分析,可达 $\varphi = 10^{-12}$ 数量级,灵敏度比传统红外光谱仪的灵敏度要高出 $10^4$ 倍<sup>[4,5]</sup>。

## 1 光声气体检测技术原理

光声是由于物质吸收一强度随时间变化的光(能)束或其他能量束而被加热时所引起的一系列声效应。当某个气体分子吸收一频率为 $\nu$ 的光子后,从基态 $E_0$ 跃迁至激发态 $E_1$ ,则两能级的能量差为 $E_1 - E_0 = h\nu$ 。受激分子将与气体中任一分子相碰撞,经无辐射弛豫过程而转变为相撞的两个分子的平均动能(即加热),通过这种方式释放能量从而返回基态。

**[收稿日期]** 2005-04-04; **修回日期** 2005-05-30

**[基金项目]** 国家自然科学基金资助项目(50476023)

**[作者简介]** 蒋亚龙(1977-),男,江苏张家港市人,中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

物质通过这种无辐射弛豫过程把吸收的光能部分地或者全部地转变成热能而被加热。如果入射光强度调制的频率小于该弛豫过程的弛豫频率,则这光强的调制就会在气体中产生相应的温度调制。根据气体定律,封闭在光声腔内的气体温度调制就会产生与光强调制频率相同的周期性起伏。也就是说,强度时变的光束在气体试样内激发出相应的声波,用传声器便可直接检测该信号。

作为火灾过程中的标识性气体,CO和CO<sub>2</sub>在红外波段均有特征吸收峰。其中CO的吸收峰分别位于4 310 cm<sup>-1</sup> (2.32 μm), 2 151 cm<sup>-1</sup> (4.65 μm)处,CO<sub>2</sub>的吸收峰分别位于2 347 cm<sup>-1</sup> (4.26 μm)和667 cm<sup>-1</sup> (14.99 μm)处。在火灾探测应用中,考虑到水蒸气吸收的影响,分别选择2 151 cm<sup>-1</sup>和2 347 cm<sup>-1</sup>处强吸收峰来检测CO和CO<sub>2</sub>。

气体光声检测系统通常由激光器(或普通单色光源)、调制器(使光束作强度调制,例如机械切光器、电光调制器等)、充有被测吸收气体和装有检测传声器的光声腔以及信号采集处理系统组成,如图1<sup>[6]</sup>所示。图2<sup>[6]</sup>是气体信号的产生和检测过程的框图。

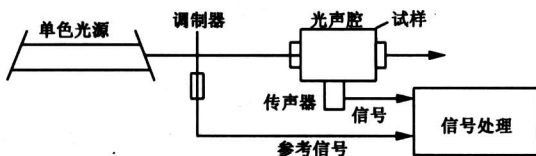


图1 气体光声检测系统

Fig.1 Photoacoustic gas detection system

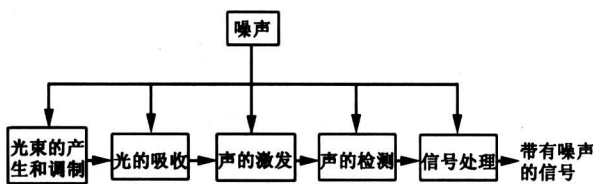


图2 光声信号的产生和检测过程

Fig.2 Generation and measuring procedure of photoacoustic signal

## 2 系统设计及实验

### 2.1 系统设计

实验系统结构如图3所示。实验中所用的光源为一广谱红外光源,光源经反射镜形成的光束经过斩光器进行调制,斩光器的频率由频率控制器控制

并将参考频率信号提供给锁定放大器作为锁定参考。调制后的红外光进入吸收路径,火灾气体产物在吸收路径中进行检测。两光声腔(分别载有CO和CO<sub>2</sub>)的声信号经高灵敏度传声器采集,经过前置放大器、适调放大器、锁定放大器进行信号的滤波放大和频率锁定放大,然后进入多路信号采集器,最终进入计算机进行数据记录和处理。

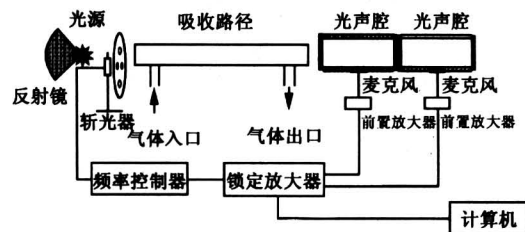


图3 CO, CO<sub>2</sub> 复合的光声气体探测实验系统

Fig.3 Multiple CO, CO<sub>2</sub> photoacoustic gas measuring system

CO光声腔和CO<sub>2</sub>光声腔采用串联的方式,并都工作在非谐振模式下。吸收路径中气体浓度的变化将引起光声腔内压力的变化,从而导致麦克风信号的变化。由于吸收路径是和周围环境相通的,因此通过对该光声信号的监测和分析就可以实现对被测环境的实时监控。

### 2.2 信号分析

令调制光源对应于CO的原始光强为 $I_{01}$ ,则当在正常状态(即无火灾发生)下有:

$$I_{abs1} = I_{01} [1 - \exp(-\alpha_1 c_1 l)] \quad (1)$$

其中 $I_{abs1}$ 为正常状态下CO光声腔中的吸收幅值, $\alpha_1$ 为CO的吸收系数, $c_1$ 为光声腔中CO的浓度, $l$ 为CO光声腔的长度。

由于光声腔工作在非谐振模式下,假设放置在光声腔内的传声器灵敏度为 $Q$ ,光声腔检测到的压力信号<sup>[6]</sup> ( $S_1$ )为

$$S_1 = Q \frac{a_1}{V} \frac{I_{abs1}}{\sqrt{\lambda_1^2 + \omega^2}} \quad (2)$$

其中 $a_1$ 表示CO的热力学性质, $V$ , $\omega$ 分别表示光声腔的体积和光源调制频率。 $\lambda_1$ 表示CO光声腔内的热传导和扩散。

由于正常环境下空气中也会含有一定数量的CO<sub>2</sub>,因此CO<sub>2</sub>光声腔中的吸收幅值( $I_{abs2}$ )可以表示为:

$$I_{abs2} = I_{02} \exp(-\alpha_2 c_{env} L) [1 - \exp(-\alpha_2 c_2 l)] \quad (3)$$

其中  $I_{02}$  为调制光源对应于  $\text{CO}_2$  的原始光强,  $\alpha_2$  为  $\text{CO}_2$  的吸收系数,  $c_{\text{env}}$  为空气中的  $\text{CO}_2$  浓度,  $c_2$  为光声腔中  $\text{CO}_2$  的浓度,  $L$  为吸收路径长度,  $l$  为  $\text{CO}_2$  光声腔的长度。

光声腔检测到的压力信号值<sup>[6]</sup> ( $S_2$ ) 可表示为

$$S_2 = Q \frac{a_2}{V} \frac{I_{\text{abs}2}}{\sqrt{\lambda_2^2 + \omega^2}} \quad (4)$$

其中  $a_2$  表示  $\text{CO}_2$  的热力学性质,  $\lambda_2$  表示  $\text{CO}_2$  光声腔内的热传导和扩散。  $V, \omega$  的含义同 (2) 式。

若发生火灾时, 现场环境中的燃烧产物将由图 3 中的气体入口进入到吸收路径中, 此时吸收路径中将有  $\text{CO}$  出现,  $\text{CO}_2$  的浓度也会增加。则  $\text{CO}$  光声腔中的吸收幅值  $I'_{\text{abs}1}$  将变为:

$$I'_{\text{abs}1} = I_{01} \exp(-\alpha_1 c_{x1} L) [1 - \exp(-\alpha_1 c_1 l)] \quad (5)$$

相应的压力信号值 ( $S'_1$ ) 为

$$S'_1 = Q \frac{a_1}{V} \frac{I'_{\text{abs}1}}{\sqrt{\lambda_1^2 + \omega^2}} \quad (6)$$

其中  $c_{x1}$  为燃烧产物中的  $\text{CO}$  浓度。

$\text{CO}_2$  光声腔中的吸收幅值  $I'_{\text{abs}2}$  将变为:

$$I'_{\text{abs}2} = I_{02} \exp[-\alpha_2 (c_{\text{env}} + c_{x2}) L] [1 - \exp(-\alpha_2 c_2 l)] \quad (7)$$

其中  $c_{x2}$  为燃烧产物中的  $\text{CO}_2$  浓度。

其相应的压力信号值 ( $S'_2$ ) 可表示为

$$S'_2 = Q \frac{a_2}{V} \frac{I'_{\text{abs}2}}{\sqrt{\lambda_2^2 + \omega^2}} \quad (8)$$

分别联列式 (2), 式 (6) 和式 (4), 式 (8)

可以解出  $c_{x1}, c_{x2}$ :

$$c_{x1} = -\frac{\ln^{1-A}}{\alpha_1 L} \quad (9)$$

$$c_{x2} = -\frac{\ln[e^C - B] - C}{\alpha_2 L} \quad (10)$$

其中  $A = \frac{V \sqrt{\lambda_1^2 + \omega^2}}{Q a_1 I_{01} [1 - \exp(-\alpha_1 c_1 l)]} (S_1 - S'_1);$

$$B = \frac{V \sqrt{\lambda_2^2 + \omega^2}}{Q a_2 I_{02} [1 - \exp(-\alpha_2 c_2 l)]} (S_2 - S'_2);$$

$$C = -\alpha_2 c_{\text{env}} L$$

### 2.3 实验及结果

为了测试系统对火灾响应的性能, 分别进行了木材明火燃烧和木材热解实验。

实验中的测试箱空间尺寸为  $1.0 \text{ m} \times 1.0 \text{ m} \times 1.2 \text{ m}$  (长  $\times$  宽  $\times$  高), 燃烧盘和加热盘放置在测试

室中心。进行明火实验时, 将山毛榉 ( $1 \text{ cm} \times 2 \text{ cm} \times 3.5 \text{ cm}$ ) 木块放置在燃烧盘中, 用少许酒精点燃。燃烧产物由测试箱的顶部经一 PVC 管进入到系统的吸收路径, 整个过程由计算机控制。热解实验则在加热盘中进行, 将相同的山毛榉木块呈辐射状放置于直径为  $220 \text{ mm}$  的加热盘上, 通电直至加热到  $500^\circ\text{C}$  左右。为消除随机噪声的影响, 实验中采用了时域平均 (固定窗口平滑处理) 的方法。图 4, 图 5 分别给出了木材明火和木材热解中  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  相对浓度的变化测试结果。

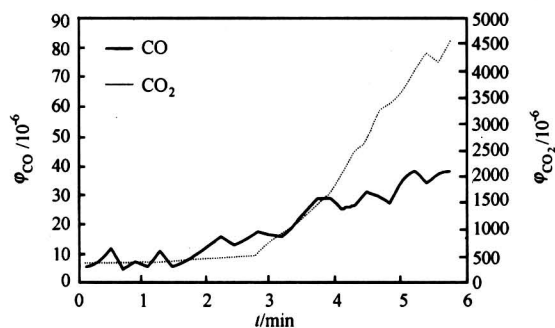


图 4 木材明火  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  相对浓度

Fig.4 The relative concentration of  $\text{CO}$  and  $\text{CO}_2$  in a flaming wood fire

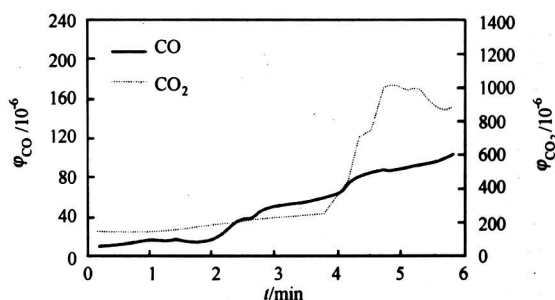


图 5 木材热解  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  相对浓度的变化

Fig.5 The relative concentration of  $\text{CO}$  and  $\text{CO}_2$  in a smoldering wood fire

从图 4, 图 5 可以看出, 实验开始后,  $\text{CO}$ ,  $\text{CO}_2$  的体积分数均上升, 并且远高于正常环境下这两种气体的数值, 其最小体积分数分别超过  $30 \times 10^{-6}$  和  $1000 \times 10^{-6}$ 。因此, 将  $\text{CO}$  和  $\text{CO}_2$  气体进行复合, 根据被测环境中这两种气体的体积分数变化趋势就可以判别被测环境中是否有火灾发生。

为了确定系统对  $\text{CO}$  气体的检测限, 用  $\varphi = 3 \times 10^{-6}$  的  $\text{CO}$  标准气体进行了测试。在此  $\text{CO}$  体积分数下系统对信号响应的衰减达到  $2.97 \text{ mV}$ 。因此

认定系统对 CO 的检测极限体积浓度小于  $3 \times 10^{-6}$ 。

实验对 TF1, TF2, TF3, TF4 和 TF5 这五种标准火进行了测试, 所有的响应时间均小于 20 s, 其中最小的达到 12 s。表 1 中给出了几种探测方式之间的比较。目前系统的检测极限体积浓度虽然为 3

$\times 10^{-6}$ , 这对于火灾探测应用已足够, 而且响应时间较短, 寿命较长。单一的 CO 光声探测和复合光声探测本质上没多大不同, 但复合探测中将  $\text{CO}_2$  作为辅助气体实现了双重判断, 在很大程度上降低了系统的误报率, 提高了探测系统的可靠性。

表 1 几种探测方式的比较

Table 1 Comparison among several measuring methods

类别	最低检测限 $\varphi/10^{-6}$	响应时间/s	系统性能	寿命
光声 $\text{CO}$ , $\text{CO}_2$ 复合	$\leq 3$	12	不易误报	比较长
光声 $\text{CO}$	$\leq 3$	12	易误报	比较长
各种 CO 传感器 (半导体、电解式等)	不等, 一般为 1	不等, $\leq 40$	易误报, 且长时间工作后性能退化	短 (一般只有几年)

### 3 结语

早在 1880 年, Bell 就在固体中观测到了光声效应, 随着现代声电弱信号检测技术的不断发展以及各种强激光器的出现, 光声效应已广泛地应用于物理、化学、生物等各个领域。但是将光声效应应用于火灾探测, 还是一个新的尝试。通过实验验证了这种方法的可行性。借助光声原理极高的灵敏度, 通过测量火灾早期生成的 CO, 可以提高火灾探测的早期性, 同时辅以  $\text{CO}_2$  作为双重判据, 又能提高火灾探测的可靠性。

#### 参考文献

[1] Nebiber P W, Pleisch R E. Photoacoustic gas detection for fire warning[J]. Fire Safety Journal, 2001, 36: 173 ~

180

- [2] Hagen B, Milke J A. The use of gaseous fire signatures as a means to detect fires[J]. Fire Safety Journal, 2000, 34: 55 ~ 67
- [3] Chen Tao, Su Guofeng, Yuan Hongyong. In situ gas filter correlation: photoacoustic CO detection method for fire warning[J]. Sensors and Actuators B, 2005. 109: 233 ~ 237
- [4] Kreuzer L B, Patel C K N. Nitric oxide air pollution detection by optoacoustic spectroscopy [J]. Science, 1971, 173: 45 ~ 47
- [5] Kreuzer L B. Ultralow gas concentration infrared absorption spectroscopy[J]. Journal of Applied Physics, 1971, 42: 2934 ~ 2943
- [6] 殷庆瑞, 王 通, 钱梦霖. 光声光热技术及其应用 [M]. 北京: 科学出版社, 1999. 12 ~ 17

## The Fire Detection Technology of Multiple Gases Based on Photoacoustic Principle

Jiang Yalong<sup>1</sup>, Yuan Hongyong<sup>2</sup>, Zhang Yongming<sup>1</sup>, Liu Yong<sup>1</sup>, Zhu Yuquan<sup>1</sup>, Wang Jinjun<sup>1</sup>

(1. State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China; 2. Center for Public Safety Studies of Tsinghua University, Beijing 100084, China)

[Abstract] Smoke particles and heat will be generated in fire, conventional fire detectors detect fire just by these physical effects. But the measurement of physical parameters is not enough for an early fire detection. Nowadays another method has been an area of major interest for early fire detection which make use of the gases (for example CO) generated from combustion process to detect fire. A majority of existing gas sensors are not good for a early fire detection because of their low sensitivity. A detection method for measuring the gas concentration based on photoacoustic principle is reported in this work, which increased the sensitivity enomously. The rate of false alarm is decreased greatly also by combining carbon monoxide detection with carbon dioxide detection.

[Key words] photoacoustic; fire detection; multiple gas