

基于光声技术的火灾气体探测系统设计

陈涛, 苏国锋, 疏学明, 袁宏永, 范维澄

(中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室, 合肥 230027)

[摘要] 近年来, 针对标识性气体的探测成为火灾探测技术中发展最活跃领域之一。将可检测极低浓度的某一气体的光声检测技术应用于极早期火灾气体产物的检测是一个新的尝试, 将可能实现高灵敏度、高可靠性的火灾探测。但常规光声气体检测设备结构复杂、价格昂贵, 必须恰当的重新设计才能应用到火灾探测系统中。分析了该技术在火灾探测中应用的关键问题, 并提出了一种利用光声腔和光源间的“自由吸收路径”进行测量的光声气体探测系统, 避免了对光源的窄带滤波要求, 实现了在线式的气体检测。起始状态下, 光声腔密封有纯CO气体, 吸收光源中4.6 μm的辐射, 产生一定强度的初始光声信号; 当火灾气体产物流经吸收路径时, 其中的CO气体吸收使到达光声腔的光辐射在4.6 μm波长上发生衰减, 导致光声信号减弱, 这个信号的变化量就反映了吸收路径中的CO气体浓度。

[关键词] 火灾探测; 光声; 气体检测

[中图分类号] TK121, O433 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2004)07-0060-05

1 引言

火灾是一种在时空上失去控制的燃烧所引发的灾害, 造成大量的人员伤亡、财产损失、环境污染甚至生态失衡。火灾探测技术结合传感技术和信号处理技术去探测早期火灾并准确报警, 将为早期扑救和人员疏散赢得更多的时间, 避免造成更大的损失。

1.1 传统火灾探测技术

常规的感温感烟火灾探测器以火灾烟雾的浓度和温度等物理特性作为测量对象。但燃烧的材料种类、燃烧状况等很多因素都会显著影响这些参数, 从而降低了常规探测器的可靠性, 容易产生误报, 甚至有些探测器对特定的火灾不会响应。例如, 针对温升的探测器对阴燃火没有响应, 某些感烟探测器对酒精火等也没有响应。

为达到灵敏可靠的火灾早期报警, 当前从2个方面来提高火灾探测系统的性能^[1]。一是综合多

参数、多判据的复合探测, 它借助人工智能的方式有效地减少了系统的误报和漏报^[2-4]。但是这对于极早期的火灾探测还不够, 因为它没有从本质上提高系统的灵敏度。二是利用新的传感技术提取火灾特征信号。其中针对火灾特征气体的探测技术是一种有着广阔前景的探测手段^[5,6]。鉴于燃烧气体通常产生在烟雾和出现明显温升之前, 气体探测比传统火灾探测方法更灵敏且直接。

1.2 气体探测技术

燃烧通常都会产生一氧化碳、二氧化碳、氮氧化物、甲烷和水等气态产物, 而且这些产物通常在火灾发生的早期就会产生, 针对这些气态产物进行火灾探测具有灵敏度高、可靠性好的特点。一氧化碳则是其中最具有标志性的气体, 在通常情况下CO在空气中的含量极低, 一旦它被检测到有上升的趋势或达到某一临界值就可以作为火灾报警的一个依据。

当前所应用的气体传感器中, 半导体传感器居

[收稿日期] 2003-11-14

[基金项目] 中国科学院知识创新方向性资助项目(KGCX2-308); 九七三国家重点基础研究发展规划资助项目(2001CB409608)

[作者简介] 陈涛(1978-), 男, 山东东平县人, 中国科学技术大学火灾科学国家重点实验室博士研究生

多，但它的气体选择性并不令人满意。于是研究人员试图将其它高灵敏度的气体检测方法应用到火灾探测领域^[7,8]。光声谱法作为痕量气体检测的成熟技术，具有灵敏度、分辨率高的特点，应用于早期火灾产生的微量气体的探测非常适合。然而，光声气体检测方法设备比较复杂，价格昂贵，通常用于实验室，其检测分析的环境和实际火灾探测环境相差很大。如何实现实时在线监测，如何有效利用光声效应，怎样消除各种不利影响，以及如何进行探测室的设计，并推演其火灾报警响应模型，是其应用的难点。

作者采用一种新的系统设计方式和信号处理模式来为在线式光声火灾气体探测系统提出一个解决

方案。

2 光声气体检测技术原理

红外光声气体检测技术是基于红外吸收原理。大气中的许多分子和燃烧产物气体的分子通常都具有特征的红外吸收波长，可以根据这些特定吸收波长来标识。在通常的光声检测中，气体被密封在一个小腔内（称为光声腔），当用一束调制（强度随时间周期性变化）的红外光照射气体时，气体分子吸收光能而被周期性地加热，温升导致气体膨胀，由此引起的周期性压力波动可以用一只麦克风检测到。其信号强度与气体浓度相关，因此可以用于气体检测。

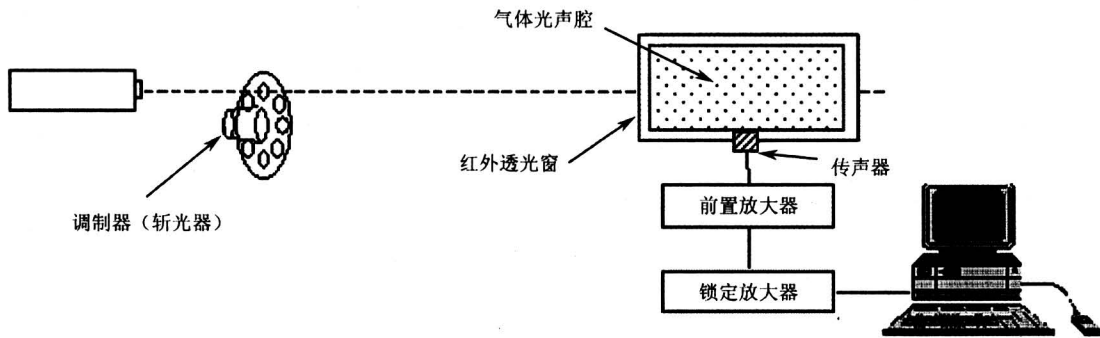


图 1 常规的光声气体检测系统原理图

Fig.1 Common photoacoustic gas detection system in laboratory

光声信号的大小与光声腔的设计方式密切相关。非谐振式、谐振式和 Helmholtz 谐振式光声腔的信号响应模式有着很大的不同。对于非谐振式光声腔，其光声腔的设计和光声信号的分析相对比较简单。

光声气体检测中，若将调制光源强度表示为

$$I(t) = I_0[1 + m \sin(\omega t)], \quad (1)$$

其中 ω 表示调制频率， m 表示调制深度。根据朗伯-比尔定律，光声腔中某一气体吸收的光强度幅值为

$$\Delta I = I_0[1 - \exp(-\alpha cl)], \quad (2)$$

其中 α 为气体的吸收系数， c 是气体的浓度， l 为光声腔的长度。

如果放置在光声腔的传声器灵敏度为 Q ，它所检测到的压力信号幅值在非共振情况下可以表示为^[9]

$$S = Q \frac{1}{V} a \frac{\Delta J}{\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}}, \quad (3)$$

其中 V 代表光声腔的体积， a 代表了气体的热力学

性质，而常数 λ 表示了光声腔中的热传导和扩散。

对于低吸收的气体和尺寸的光声腔，可以有 $\alpha cl \ll 1$ ，式 (3) 可以变为

$$S = Q \frac{1}{V} a \frac{I_0 \alpha cl}{\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}}, \quad (4)$$

即为一般非谐振光声腔的信号表达式。

3 探测系统的设计

3.1 关键问题分析

光声气体检测具有极高的灵敏度（可达 10^{-6} 量级），是一种强大的气体分析手段。但是，用于实际环境的火灾探测器对可靠性、经济性和实时性有着很高要求。为了满足现场长期监测的需要，系统必须避免复杂和脆弱的设计，并能实时在线检测。常规的光声系统设计方法就很难满足火灾气体探测的需要。

首先，低交叉敏感性是光声气体检测中的一个关键因素，它依赖于气体吸收波长和光源辐射波长

的吻合,而这在一般光声系统中是依靠复杂的光路或者昂贵的激光光源来实现的,在用于火灾探测场合则不能满足简单、经济及可靠性的要求。即使用带通滤波片来对简单的红外光源进行滤波,价格也比较昂贵,而且难以找到对应气体特定吸收波长的滤波片。因此,建立光声火灾探测系统不能依赖高分辨率光源和窄带滤波片。

其次,对于一般的光声系统,密封的光声腔难以实现实时在线监测的要求。密封气体处于非自由流动状态,这将严重影响探测器的早期快速响应能力。火灾探测对实时性要求非常高,因此不可能采取预先采样封存后再进行分析的方式。如果采用文献[8]中所使用的方法,利用气体渗透膜,也无法保证光声信号产生的等容过程,而且排空光声腔并重新充满新鲜空气需要很长时间,实时性较差,在用于火灾探测时可能会延误火灾报警,并使得火灾报警信号保持很长时间而不能很快复位。

最后,光声气体检测的基础是气体具有特征吸收谱线。几乎所有的气体分子在 $2\sim 15\ \mu\text{m}$ 之间都

具有可以检测的吸收谱线,例如对于 CO ,它的吸收波长为 $2.32\ \mu\text{m}$ 和 $4.6\ \mu\text{m}$ 。对于火灾探测来说,在常规的光声气体检测仪器的波长分辨能力下,所选择的探测气体必须有能区别于其它气体的特征吸收谱线,且能够避开蒸汽态水分子的宽而强的吸收谱线,因水蒸气大量存在于空气及燃烧产物中。对于 CO 探测气体来说,可选择 $4.6\ \mu\text{m}$ 的吸收谱线,它处于水蒸气吸收较弱的波长范围。

3.2 探测系统设计

作者采用了一种特殊的系统设计方式(图2)。密封腔室里预先充以被探测气体,如 CO ,在探测腔室与光源之间留出一定的空隙,相当于增加一段附加的吸收路径,气体将在这一段吸收路径中被测量,而密封的光声腔则实现了波长的选择和信号发生。红外光源是一个广谱红外光源,在 $3\sim 5\ \mu\text{m}$ 的红外发射涵盖了 CO 的特征吸收波长。光声腔内密封纯 CO ,窗口使用红外透光材料,并工作在非共振模式下。

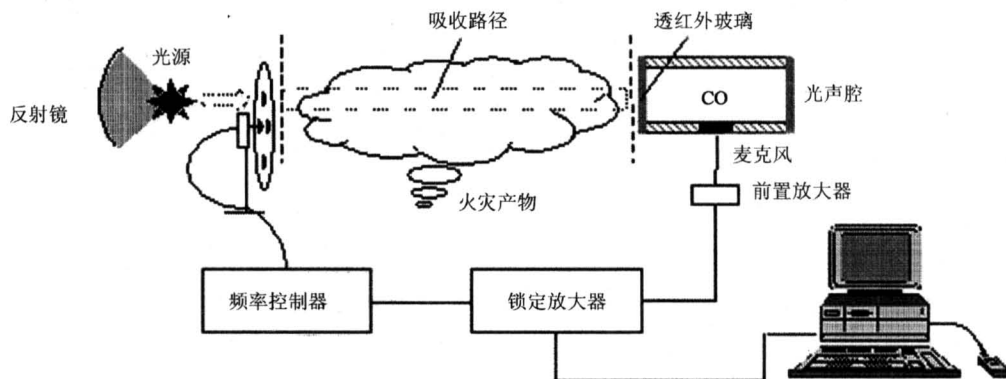


图2 有自由吸收路径的光声 CO 气体探测系统

Fig.2 Photoacoustic CO detection system with an exposed absorption path

基于这种系统设计方式,光声腔信号记录了吸收路径上特定波长的光衰减,波长选择由密封在光声腔中的 CO 气体自身完成,因此波长的分辨率不再成为困扰。起始状态下,在空气中没有 CO 气体, CO 光声腔会产生一定强度的光声信号。当含有 CO 的火灾产物流经吸收路径时,其中的气体成分将吸收不同波长的光源辐射,对于到达光声腔的光辐射,只有那些在 $4.6\ \mu\text{m}$ 上的吸收才会导致 CO 光声腔信号的衰减,而这部分衰减恰恰是吸收路径上的 CO 气体的吸收。这样,光声腔信号的变化量将反映 CO 在吸收路径中对光源辐射的吸收。

可以在空气中的 CO 浓度和光声信号的衰减量之间建立一个关系从而检测空气中的 CO 。而且,吸收路径与环境空气连通,因此这种设计方式实现了气体的实时在线监测。

4 系统分析

4.1 信号响应

对于图2所示的探测系统,当吸收路径中没有 CO 出现时的光声信号强度(初始信号强度)可以用式(4)表示。

当含有 CO 的空气流经吸收路径时,其中 CO

成分对红外的最大吸收可以表示为:

$$I_m = I_0[1 - \exp(-\alpha c_m L)], \quad (5)$$

式中 L 代表吸收路径长度, c_m 表示吸收路径中的 CO 气体浓度。

把式 (5) 代入式 (4) 中可以得到传声器所记录到的光声信号为:

$$S_m = Q \frac{1}{V^\alpha} \frac{I_0 \cdot (1 - \alpha c_m L) \cdot \alpha c l}{\sqrt{\lambda^2 + \omega^2}}, \quad (6)$$

式中 S 代表初始的光声信号幅值, S_m 代表吸收路径中流过含有 CO 成分的气体时的光声信号幅值。因此, 式 (6) 减去式 (4) 即可得到吸收路径中的 CO 成分吸收所导致的光声信号衰减量, 继而可以得到 c_m 和 S 及 S_m 之间的关系:

$$c_m = \frac{V \sqrt{\lambda^2 + \omega^2}}{Q \alpha \cdot I_0 \alpha L [1 - \exp(-\alpha c l)]} \cdot (S - S_m). \quad (7)$$

式 (7) 给出了吸收路径中的 CO 浓度, 因为吸收路径与环境相通, 因此一般情况下即可代表环境中的 CO 浓度。

4.2 系统适用性考察

4.2.1 光源和调制部分 在光声气体检测系统中, 光源的稳定性必须得到保证, 因为光声信号与它是直接的成正比关系。如果光源的发光强度不够稳定, 将在低浓度测量中导致错误并降低检出限。设计中所使用的光源为一个红外发光陶瓷, 其发光方式为无金属丝直热式, 热响应时间比较长, 无法使用电脉冲的方法进行调制, 但这在一定程度上保证了其发射稳定性。

4.2.2 光声腔的设计 采用何种形式的光声腔, 如非共振型、共振型和 Helmholtz 共振型将会影响系统的体积和结构。此处采用的是非共振型光声腔, 它工作在小于 20 Hz 的低频次声波段, 调制频率比较低, 易于实现机械斩波, 这个波段的环境干扰也比较小, 有利于信号的提取, 而且非共振型光声腔的体积小, 适于集成到光声气体火灾探测器中。

4.2.3 信号处理模式 用密封在光声腔里的气体来实现波长选择并产生信号, 因此密封气体应该与所要探测的气体一致。一般来说可以密封纯的被探测气体, 也可以将其与其他不具有红外吸收的气体(配气)一起密封在其中, 因为这些气体不会产生干扰光声信号。这样, 可以通过控制光声腔中被探测气体的浓度来控制光声信号强度并用于标定光声系统。比如, N_2 可以作为一种配气与 CO 混合封

入光声腔, 因为 N_2 在相应波长范围内没有明显的红外吸收。

上述系统适于极早期火灾气体产物的检测, 但无法测量火灾烟雾, 且火灾烟雾中的颗粒对光的散射吸收是广谱的, 会导致测量的偏差。因此如果要测量火灾烟雾中的气体则需要在其进入吸收路径前进行过滤, 滤掉其中的颗粒。

5 结语

将光声技术用于早期火灾中低浓度 CO、CO₂、CH₄ 等气体的检测, 在火灾探测领域是一个新的尝试, 能大大提高现有火灾探测设备的灵敏度和可靠性。笔者的设计避免了使用高分辨率光源或对光源窄带滤波的要求, 使用密封被探测气体的光声腔实现了气体选择, 降低系统成本和复杂度, 并利用附加吸收路径实现了在线式的气体测量, 适合于火灾探测的实时性要求。基于此的系统设计正在进一步的研究和实验中。如何实现烟雾中气体和颗粒的复合测量将是未来的一个重要研究内容。当前的光声气体探测系统设计中光源和斩波调制部分的功率比较大, 使其不能作为一个点式的火灾探测设备, 但如果应用空气采样技术(吸气式)将现场空气吸到后端集成处理设备中进行分析, 就有可能实现探测系统的工程化。

参考文献

- [1] 陈涛, 袁宏永, 范维澄. 火灾探测技术研究的展望[J]. 火灾科学, 2001, 10(2):108~112
- [2] Rose-Pehrsson S L, Shaffer R E, Hart S J, et al. Multi-criteria fire detection systems using a probabilistic neural network [J]. Sensors and Actuators B, 2000, 69(3):325~335
- [3] Gottuk D T, Peatross M J, Roby R J, et al. Advanced fire detection using multi-signature alarm algorithms [J]. Fire Safety J, 2002, 37(4):381~394
- [4] Milke J A. Using multiple sensors for discriminating fire detection [A]. Fire Suppression and Detection Research Application Symposium. Research and Practice: Bridging the Gap. Proceedings[C]. Orlando FL: National Fire Protection Research Foundation, 1999. 150~164
- [5] Hagen B Chr, Milke J A. The use of gaseous fire signatures as a mean to detect fires [J]. Fire Safety J. 2000, 34(1):55~67

- [6] Jackson M A, Robins I. Gas sensing for fire detection: measurements of CO, CO₂, H₂, O₂ and smoke density in European standard fire tests [J]. *Fire Safety J.* 1994, 22(2):181~205
- [7] Blevins L G. and Pitts W M. Carbon monoxide measurement using a near-infrared tunable diode laser [R]. Annual conference on fire research, book of abstracts [C]. 1998. NISTIR 6242.
- [8] Nebiker P W, Pleisch R E. Photoacoustic gas detection for fire warning [J]. *Fire Safety J.* 2001, 36(2):173~180
- [9] 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, 1991. 146~150

Design of a Photoacoustic Gas Detection System for Fire Warning

Chen Tao, Su Guofeng, Shu Xueming, Yuan Hongyong, Fan Weicheng

(*State Key Laboratory of Fire Science, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China*)

[**Abstract**] The requirements and principles of using photoacoustic gas detection technique in fire detection area are discussed and an unusual photoacoustic gas detection system is presented. Common photoacoustic gas detection systems in laboratories are not suitable for fire warning because of their poor real-time performance and high wavelength qualification for the optical setup. Besides, they are too complex and expensive. These limitations can be solved with a different system design in which an enclosed photoacoustic cell filled with CO is used to achieve CO selection instead of optical filters or laser infrared source. Online CO measurement is realized in an exposed absorption path between the cell and the IR source. At first when there is no combustion gas in the absorption path, the CO cell absorbs the light radiation at 4.6 μm and gives an initial photoacoustic signal. Once combustion gases pass through, the contained CO composition can reduce the radiation that reaches the cell at 4.6 μm and accordingly attenuate the initial photoacoustic signal. Thus CO selection in the absorption path is achieved by enclosed CO itself in the cell, and the photoacoustic signal attenuation further indicates the CO concentration in the absorption path.

[**Key words**] fire detection; photoacoustic; gas detection