

Photoacoustic Combined Method Research Sensing for Methane and Coal Dust in the Mine *

FU Hua^{*}, XU Fan, XU Yaosong, XIE Sen

(Liaoning Technical University, Faculty of Electrical and Control Engineering, Huludao Liaoning 125105, China)

Abstract: The gas (CH₄) explosion and dust explosion often happened with each other in coal mine. The concentration of CH₄ and coal dust was detected separately in the past, which were bad for coal mine gas and coal dust explosion accurately forecast. This paper presents a photoacoustic method to meter CH₄ and dust concentration simultaneously in the mine gas. The mine gas, including gaseous components and dust particles, were metered in the measuring cell between the light source and the photoacoustic cells. Based on gas filter technology and particle scattering theory, a CH₄ gas cell and a reference gas cell (CO gas cell) were used together to meter the light attenuation caused by CH₄ absorption and dust particles extinction at two different wavelengths. When the mine gas and coal dust entered the measuring cell, CH₄ concentration and dust optical density were obtained by processing the photoacoustic signal attenuation of the two cells. The experimental data show that the photoacoustic combined method can sense for CH₄ and dust particles more accurately. Accuracy can be achieved 10⁻⁴ Orders of magnitude.

Key words: photoacoustic technology; gas filter technology; particle scattering theory; CH₄; coal dust

EEACC: 7320P; 7320Q

doi: 10.3969/j.issn.1004-1699.2013.07.004

矿井 CH₄ 和煤尘的光声复合检测方法研究 *

付 华^{*}, 许 凡, 徐耀松, 谢 森

(辽宁工程技术大学电气与控制工程学院, 辽宁 葫芦岛 125105)

摘 要: 煤矿瓦斯(CH₄)爆炸常常与煤尘爆炸相互伴随发生, 以往 CH₄ 和煤尘的浓度都是分开检测, 不利于煤矿瓦斯煤尘爆炸的准确预测。本文利用气体滤波光声技术和光散射原理对矿井气体中 CH₄ 和煤尘质量浓度进行复合测量。分别采用两个气体滤波光声腔作为 CH₄ 测量光声腔和煤尘参比光声腔(CO 测量光声腔), 在光源和光声腔之间建立 CH₄ 和煤尘的测量腔, 记录其进入该测量腔后光声信号强度的变化, 通过对两个滤波波长上 CH₄ 吸收和煤尘颗粒消光的相关处理, 同时得到 CH₄ 浓度和煤尘质量浓度。实验数据表明, 光声复合检测方法可以对 CH₄ 和煤尘质量浓度进行准确检测, 准确度达到 10⁻⁴ 数量级。

关键词: 光声技术; 气体滤波技术; 粒子散射; CH₄; 煤尘

中图分类号: TP212.1; X43

文献标识码: A

文章编号: 1004-1699(2013)07-0922-05

煤矿瓦斯煤尘爆炸一直是我国煤矿最严重的灾害之一, 给煤矿的安全生产带来极大的威胁^[1]。其中瓦斯气体的主要成分是烷烃(C_xH_y)、硫化氢(H₂S)、二氧化碳(CO₂)、氮(N₂)、水气(H₂O)、微量的惰性气体(He、Ar等), 其中甲烷(CH₄)占绝大多数。CH₄发生燃烧爆炸是一个复杂的物理化学过程, 是热反应和链反应机理共同作用的结果。而煤尘的参与使得爆炸更具破坏力, 从而造成更多的伤亡和财产损失^[2]。因此, 实现对 CH₄ 浓度和煤尘质

量浓度的准确检测成为煤矿灾害预测的主要手段。

目前, 瓦斯和煤尘的浓度需要分开检测。我国煤矿大多采用载体催化元件对瓦斯(CH₄)进行监控, 但存在使用寿命短、稳定性和精度差等问题, 而且容易产生催化剂中毒现象。其他几种 CH₄ 检测方法, 如气敏半导体、电化学式、光干涉等检测方法由于仪器调校困难, 易受其他气体影响, 也已不能满足 CH₄ 检测的需求^[3-4]。近年来, 气体检测技术发展较快^[5], 其中光声法是一种灵敏度和分辨率都非

项目来源: 国家自然科学基金项目(51274118, 70971059); 辽宁省科技攻关项目(2011229011); 辽宁省教育厅基金项目(L2012119)

收稿日期: 2013-03-05 修改日期: 2013-06-03

常高的方法,对于气体分析,可达 10^{-13} 数量级^[6-7],灵敏度比传统的红外光谱仪要高出 10^4 倍。2006年,国外采用亥姆霍兹共振型光声腔,并结合 $7.9\ \mu\text{m}$ 的中红外光源,探测甲烷灵敏度达到 3×10^{-9} 。到目前为止,实验上激光激励的光声光谱仪对痕量气体检测灵敏度已经接近理论预期水平,达到ppt量级。与此同时,相关的光声光谱理论逐步建立起来,光声光谱的研究也达到了崭新的阶段。相对于CH₄浓度的检测,煤尘浓度的检测方法则略显单一。一般利用滤膜质量法测定煤尘浓度^[8],由于实际操作复杂,存在较大误差。所以可以利用准确性较好的光学检测方法对煤尘浓度进行检测。

在煤矿重特大爆炸事故中,多数是由于CH₄、煤尘共同参与爆炸所致,二者相互伴随发生^[9]。本文在光声气体分析理论的基础上,利用CH₄气体滤波技术、煤尘粒子散射消光原理,建立一种新的测量方法将煤矿中的气(CH₄)、固(煤尘)两项进行复合测量,从而避免了以往CH₄、煤尘分开检测所存在的弊端,可以更好的满足瓦斯、煤尘灾害预测的需要。

1 CH₄和煤尘光声复合检测系统构建

CH₄分子具有四种固有的振动方式,相应产生四个基频,波长分别为 $3.433\ \mu\text{m}$ 、 $6.522\ \mu\text{m}$ 、 $3.312\ \mu\text{m}$ 和 $7.658\ \mu\text{m}$ ^[10]。在近红外区,有许多泛频带和组合带。例如,CH₄气体在 1.33 和 $1.67\ \mu\text{m}$ 附近,都有较强的吸收。通过HITRAN数据库^[11]可以查得CH₄在 $1.33\ \mu\text{m}$ 、 $1.67\ \mu\text{m}$ 和 $3.31\ \mu\text{m}$ 处的线型强度之比为 $1:8:1\ 000$ 。可见CH₄在中红外区域的吸收线强度远远超过在近红外区域的吸收线强度。因此本文选用CH₄在 $3.31\ \mu\text{m}$ 处的波长检测CH₄气体浓度。其光谱图如图1所示。为了实现在检测CH₄浓度的同时,检测出煤尘的质量浓度,应在设计CH₄测量光声腔的同时,加入煤尘测量参比光声腔。考虑到CO的红外吸收波长为 $4.66\ \mu\text{m}$,可以很好的区别于CH₄的吸收波长,并且煤矿气体中很少含有CO气体,所以选用CO作为煤尘参比气体。

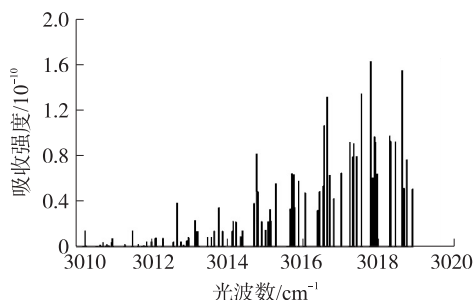


图1 CH₄在 $3.3\ \mu\text{m}$ 的吸收光谱图

在此基础上,设计系统结构如图2所示。基于气体滤波原理,通过气体滤波器中待测气体和被分析组分中气体的振动-转动精细光谱的比较,替代一般窄带滤光片的功能实现系统的气体选择性。系统中气体滤波光声腔所得到的是某一波长(与气体滤波器中气体的特征吸收对应)的红外光衰减量。红外光源的波长覆盖了两个气体滤波光声腔的吸收波段范围,光声腔工作在非共振模式下。图中所示两个光声腔分别是CH₄滤波光声腔和煤尘参比滤波光声腔。在前一光声腔中充入纯CH₄,该光声腔的声信号源于CH₄吸收了光源光谱中 $3.31\ \mu\text{m}$ (CH₄特征吸收谱线)上的光辐射所激发的光声信号。根据与CH₄滤波器同样的原理,在后一气体滤波光声腔中充入参比气体:纯的一氧化碳(CO),则该气体滤波光声腔的声信号源于CO吸收了光源谱线中 $4.66\ \mu\text{m}$ (CO特征吸收谱线)上的光辐射所激发的光声信号。此时,光声腔不仅作为一个气体滤波器使用,而且它的信号反映了到达光声腔的对应CH₄吸收谱部分的辐射强度。测量腔是光源和光声腔间的附加吸收路径,因此,它可以记录测量腔中进入CH₄-煤尘气体后 $3.31\ \mu\text{m}$ 、 $4.66\ \mu\text{m}$ 两个波长上光衰减造成的光声信号变化量。起始状态下,测量腔的吸收路径中没有CH₄-煤尘气体,光声腔产生一定强度的信号;当CH₄-煤尘气体流经测量腔时,产生如下情形:①煤尘颗粒的消光作用是广谱的,CH₄的特征吸收和煤尘颗粒在 $3.31\ \mu\text{m}$ 的消光,使到达CH₄光声腔的光强减弱,导致光声信号的衰减。②由于CH₄-煤尘气体几乎很少含有CO,其产生量相比CH₄少得多,煤尘颗粒在 $4.66\ \mu\text{m}$ 的消光造成CO光声腔的信号衰减。这样,CO光声腔的信号衰减直接与煤尘的光学浓度相关。两个光声腔信号的衰减量可以通过煤尘颗粒在两个波长上的消光而关联起来,如果在两个波长的煤尘颗粒消光量之间建立关系,则可通过两个光声腔信号的相关处理分离出CH₄光声腔的信号衰减中CH₄吸收的贡献值。

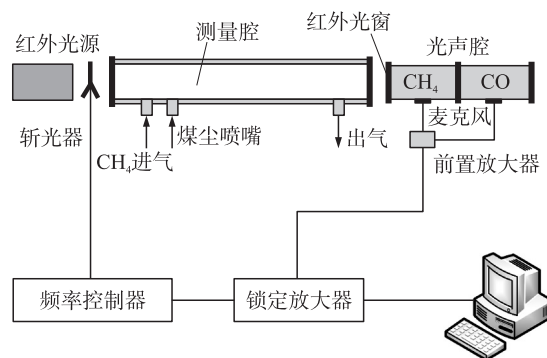


图2 CH₄和煤尘复合检测系统示意图

2 CH₄ 和煤尘光声复合检测方法分析

2.1 建立光声复合检测模型

在光声气体检测中,假设经调制的光源强度为 I_0 , 调制的人射光表示为:

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

根据 Lambert-Beer 定律,光声腔中气体吸收为^[12]

$$I_{\text{abs}} = I(t) [1 - \exp(-\alpha cl)] \quad (2)$$

其中: α 为气体的吸收系数, c 是光声腔中气体的浓度, l 为光声腔的长度。对于非共振式的光声腔,如果放置在光声腔的微音器灵敏度为 Q , 经锁相放大器后检测到的压力信号(初始测量光声信号)可以表示为

$$S = Q \frac{1}{V} (\gamma - 1) \frac{I_0 [1 - \exp(-\alpha cl)]}{\sqrt{1/\tau_r^2 + \omega^2}} \quad (3)$$

其中: V 代表光声腔的体积, γ 代表了气体的比热容,而常数 τ_r 是光声腔的热弛豫系数,表示光声腔中的热传导和扩散。下面分别对两个光声腔的信号进行分析。当含有 CH₄ 和煤尘的气体流经测量腔时,CH₄ 吸收和煤尘消光使到达 CH₄ 光声腔的光强衰减至 I_m :

$$I_m = I(t) \exp[-(k_1 c_s + \alpha c_m) L] \quad (4)$$

式中: c_m 表示测量腔中的 CH₄ 气体浓度, L 代表测量腔中的吸收路径长度, k_1 为井下气体在 3.31 μm 波长的比消光系数, c_s 为煤尘质量浓度。

经锁相放大后得到测量过程中的 CH₄ 光声腔光声信号为:

$$S_m = Q \frac{1}{V} (\gamma - 1) [1 - (k_1 c_s + \alpha c_m) L] \times \frac{I_0 [1 - \exp(-\alpha cl)]}{\sqrt{1/\tau_r^2 + \omega^2}} \quad (5)$$

同样地,对于 CO 光声腔的信号,可以得到

$$S'_m = Q \frac{1}{V} (\gamma' - 1) [1 - k_2 c_s L] \frac{I_0 [1 - \exp(-\alpha' cl)]}{\sqrt{1/\tau_r'^2 + \omega^2}} \quad (6)$$

其中带有“'”上标的表示 CO 及相应光声腔的参数, k_2 表示煤尘在 4.66 μm 的比消光系数。从式(5)、式(6)可得:

$$\begin{cases} c_s = \frac{S' - S'_m}{k_2 S' * L} \\ c_m = \frac{1}{\alpha} \left(\frac{S - S_m}{S * L} - q \frac{S' - S'_m}{S' * L} \right) \end{cases} \quad (7)$$

其中 S 和 S' 为 CH₄ 光声腔和 CO 光声腔初始的光声信号。 $q = k_1/k_2$, 表示上述两波长上煤尘颗粒比消光

系数之比。这样,采用 CH₄ 标准气体标定了 α , 再由散射原理确定 q , 就可求解 c_s 和 c_m 。

2.2 煤尘消光系数比值 q 的确定

一般条件下,井下气体散射满足不相关散射和独立散射条件,比消光系数可以表示为:

$$k = \frac{\pi}{4} d^2 N Q_{\text{ex}}(x, d) \quad (8)$$

其中: Q_{ex} 为消光效率因子, d 为煤尘粒子平均粒径, N 为粒子群粒子个数。这样有

$$q = \frac{Q_{\text{ex}1}}{Q_{\text{ex}2}} \quad (9)$$

$Q_{\text{ex}1}$ 和 $Q_{\text{ex}2}$ 分别表示 3.31 μm 和 4.66 μm 处的消光效率因子。在 Rayleigh 散射和 Mie 散射范围中 Q_{ex} 是不同的,以 m 表示煤尘折射率, Rayleigh 散射可视作 Mie 散射在比例因子 $x \ll 1$ 且 $|m x| \ll 1$ 时的特殊情况,造成的误差在 x^3 数量级。在一般的精度要求下, Rayleigh 散射可以放宽到 $x < 0.3$ ^[13]。根据标准煤尘粒径数据进行计算(最大 246 nm), 最大的尺度因子 x 为 0.23, 可采用 Rayleigh 散射近似,则:

$$Q_{\text{ex}} = \frac{8}{3} x^4 \text{Re} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right)^2 - 4x \text{Im} \left(\frac{m^2 - 1}{m^2 + 2} \right) \quad (10)$$

Dalzell、Chang^[14] 分别给出了 0.43 μm ~ 10 μm 、0.4 μm ~ 28.4 μm 煤尘颗粒的折射率数据,其实部和虚部在同一数量级。利用这些文献的结果,当 $x < 0.3$ 时,式(10)的 x^4 项是 x 项的高阶小量,则有:

$$q = f_m \frac{\lambda_2}{\lambda_1} \quad (11)$$

$$f_m = \text{Im} \left(\frac{m_1^2 - 1}{m_1^2 + 2} \right) / \text{Im} \left(\frac{m_2^2 - 1}{m_2^2 + 2} \right) \quad (12)$$

f_m 作为与折射率有关的修正因子,即同一煤尘粒子群在两个波长上的消光强度之比等于两个波长的倒数比(乘以修正因子 f_m)。由于折射率是波长的函数, q 值仅与入射波长相关,其数值的确定可以依据上述理论推导。

3 实验研究

3.1 实验过程

实验过程中,光声腔的性能在光声传感器中起着决定性作用,光声方法的灵敏度与器件体积成反比,腔体的结构大小对传感器的灵敏度具有决定性作用。对于光声腔,在结构上应尽量减小腔体的横截面 S , 即减小腔体体积。但过分小的横截面,不仅不利于光束的准直调准,增加传声器安装的困难,而且使横向热传导的影响增大。综上所述,本文设计

使用长为20 cm,横截面直径为3 cm的光声腔。对于测量腔,增加吸收路径的长度可以提高系统的灵敏度,但是考虑到实验的方便,本文设计使用长为30 cm,横截面直径为3 cm的测量腔。实验设计的两个光声腔和测量腔结构和尺寸如图3所示。由于光声信号的强度正比于进入光声腔的光辐射强度,所以光源必须有很高的光谱辐射率,才能产生强信号,达到更高的灵敏度。实验所用光源为红外电热发光陶瓷,它可以提供单色性好、准直和大功率的辐射源,其在2.5 μm到10 μm波段的发光效率为20%,峰值辐射波长约在5.5 μm,可以很好地满足本实验的要求。光声腔工作在非共振模式,采用可变频率斩光器NW4-ND-4将入射光调制在16.8 Hz,微音器选用B&K4192型,响应频段3.15 Hz到20 kHz,灵敏度为12.5 mV/Pa。红外光窗材料为3 μm至5 μm透过率大于90%的氟化物玻璃,它具有折射率低、阿贝数大、非线性折射率小和化学稳定性好等优点,虽然价格较贵,但它作为红外光窗材料理论散射损耗估计在0.1 dB/m,可以很好地提升实验效果。同时光声腔下垫有3 cm厚的海绵避免设备震动干扰。

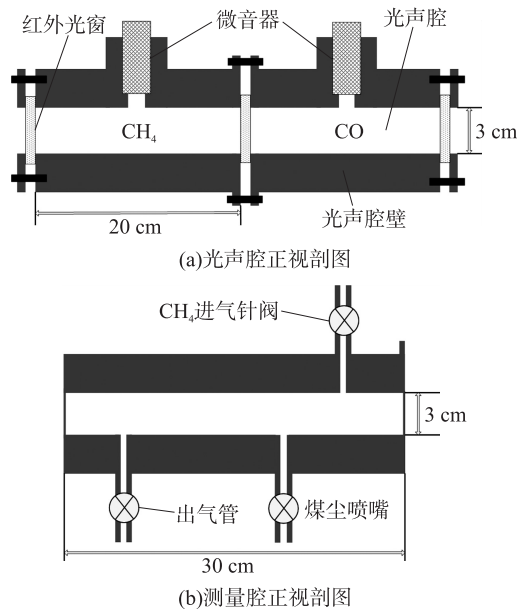


图3 光声腔、测量腔结构和尺寸图

实验采用出厂标定为 4.23×10^{-4} 的CH₄气体(N₂作为配气)对实验的仪器常数 α 进行标定,作为对CH₄浓度测量的基准。实验中先打开进气针阀和出气管通入N₂,然后关闭出气管,通过针阀和煤尘喷嘴匀速向测量腔注入CH₄气体和煤尘,所以本实验中CH₄气体浓度和煤尘质量浓度应按正比例时间函数增长。

3.2 实验结果

采用式(11)、式(12) Rayleigh 散射近似处理,将煤尘颗粒折射率与波长关系的拟合公式代入式(12),可以得到 $f_m \approx 1$,即 $q \approx 1.4$ 。此时可以得到CH₄的浓度 c_m 和煤尘质量浓度 c_s ,如图4、图5所示。

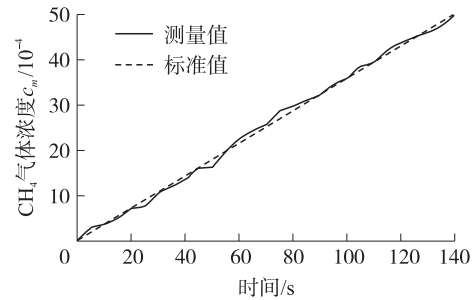


图4 CH₄气体浓度 c_m

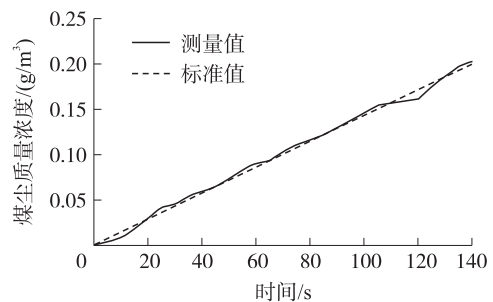


图5 煤尘质量浓度 c_s

从图中可以看出,CH₄的浓度 c_m 和煤尘质量浓度 c_s 按实验设计的正比例函数趋势增长。其中 c_m 在时间 $t=75$ s时,出现最大误差,绝对误差为 1.74×10^{-4} ; c_s 在时间 $t=120$ s时,出现最大误差,绝对误差为 0.010 g/m³。由此可见,本文的测量结果较传统的测量方法精度有所提高。

4 结论

本文利用气体滤波技术建立CH₄光声腔与煤尘参比光声腔分离的理论模型。在检测煤矿井下气体时,可以实现CH₄和煤尘的复合检测。本方法中煤尘粒子的浓度正比于CO光声腔在测量前后的信号相对变化率,CH₄浓度则正比于CH₄光声腔测量前后信号相对变化率和CO光声腔测量前后信号相对变化率乘以 q 的差值。在测量CH₄时,共存在CH₄中的CO₂和残留水蒸气虽然有重叠吸收现象,但误差却很小,这是气体滤波技术的最大优点。本方法同样适用于其他气体与煤尘的复合测量,所不同的是气体滤波光声腔中所充入的气体应改为所测气体。系统的检测精度受光声腔的加工精度等因素影响较大,通过对光声腔进行优化设计,可以提高系统灵敏度和实现装置的小型化。

参考文献:

- [1] 宫广东,刘庆明,胡永利,等.管道中煤尘爆炸特性实验[J].煤炭学报,2010,35(4):609-612.
- [2] 李庆钊,翟成,吴海进,等.基于20L球形爆炸装置的煤尘爆炸特性研究[J].煤炭学报,2011,36(1):119-123.
- [3] 赵正杰,刘东旭,张记龙,等.电调制非分光红外瓦斯传感系统设计[J].光谱学与光谱分析,2011,31(2):570-572.
- [4] 杨建春,徐龙君,陈伟民.基于敏感膜折射率变化的光纤甲烷传感器[J].煤炭学报,2010,35(3):420-423.
- [5] 付华,杨羲葵,刘宇佳.双差分法检测瓦斯含量新技术的实验研究[J].煤炭学报,2012,37(7):1161-1164.
- [6] 云玉新,陈伟根,孙才新,等.变压器油中甲烷气体的光声光谱检测方法[J].中国电机工程学报,2008,28(34):40-45.
- [7] 张贵银,靳一东.NO分子光声光谱的理论分析[J].光谱学与光谱分析,2010,30(2):297-299.
- [8] 鹿德智,宋志方,杨海兵,等.煤矿粉尘监测与矿尘成分分析[J].中国安全生产科学技术,2008,4(1):35-37.
- [9] 毕明树,王洪雨.甲烷-煤尘复合爆炸威力实验[J].煤炭学报,2008,33(7):784-787.
- [10] 罗达峰,杨建华,仲崇贵.基于红外吸收光谱的瓦斯气体浓度检测技术[J].光谱学与光谱分析,2011,31(2):384.
- [11] Brown L R, Chris D Benner, Champion J P, et al. Methane Line Parameters in HITRAN[J]. Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer, 2003, 82:219-220.
- [12] 王焱,符江.基于积分球算法的多气体检测系统研究[J].传感技术学报,2011,24(2):165-166.
- [13] 范宗尉,杨克己,陈子辰.任意声场中非规则形状 Rayleigh 散射体的声辐射力研究[J].声学学报,2008,33(6):491-493.
- [14] 陈涛,苏国锋,申世飞,等.火灾烟气中CO和烟颗粒的光声复合探测方法[J].传感技术学报,2006,19(3):597-601.



付华(1962-),女,辽宁阜新人,教授,博士生导师,博士(后),主要从事智能检测和数据融合等方面的研究。主持国家自然科学基金2项、主持及参与国家863和省部级项目30余项,发表学术论文40余篇,申请专利24项,xfuhua@163.com;



许凡(1989-),男,江苏连云港人,硕士研究生。主要研究方向为智能检测与智能控制, xufan_0705010220@126.com。