

doi: 10.3788/lop47.050401

多组分固体粉末的光声检测

王习东¹ 黄佐华² 刘高潮¹¹三峡大学理学院, 湖北 宜昌 443002; ²华南师范大学物理与电信工程学院, 广东 广州 510631)

摘要 为了快速无损地鉴别物质的成分, 提高光声光谱(PAS)检测多组分固体粉末物的能力, 对光声光谱固体颗粒检测系统和光声信号提取分析方法进行了研究。根据 R-G 理论, 优化设计了基于传声器的非共振圆形光声池。组建了由大功率氙灯、斩波器、锁相放大器、光栅单色仪、数据采集系统和光声池等主要部件构成的系统。采用高灵敏度的声探测器和透过率高的光窗, 使用低噪声高信噪比(SNR)放大电路, 增强光声信号的强度。实验证实, 检测系统性能稳定可靠。采用小波分析提高光声信号分析能力。将硝基化合物粉末和硫酸铜粉末混合物光声信号与两种物质各自的光声信号分析对比, 方便准确快速地判断两种物质的存在, 为物质鉴别提供依据。

关键词 光声光谱; 光声池; 小波分析; 氙灯; 硝基化合物

中图分类号 O433.5+9 OCIS 040.1880 070.4790 文献标识码 A

Photoacoustic Detection of Multi-Component Solid Powder

Wang Xidong¹ Huang Zuohua² Liu Gaochao¹

¹College of Science, China Three Gorges University, Yichang, Hubei 443002, China
²School of Physics & Telecommunication Engineering, South China Normal University,
 Guangzhou, Guangdong 510631, China

Abstract Photoacoustic detection system of solid powder and signal analysis methods, which are used to distinguish material component quickly without damage and improve detection ability, are researched. Nonresonant cylinder photoacoustic cell is designed based on the theory of R-G. The system consists of high power xenon lamp, chopper, lock-in amplifier, grating monochromator, data acquisition system and photoacoustic cell. The methods of enhancing the amplitude of signal are used to improve resolution ability, such as choosing high sensitivity sound detector, increasing permeation rate, designing low noise and high signal-to-noise ratio circuit. The experimental system is stable and reliable. Wavelet is applied to improving analysis ability. It provides identification evidence conveniently and quickly by the photoacoustic signal analysis of nitrocompound, copper sulphate and mixture.

Key words photoacoustic spectrum; photoacoustic cell; wavelet analysis; xenon lamp; nitro compound

1 引言

光声是光与物质相互作用过程中产生的一种效应^[1,2]。光声光谱(PAS)作为一种高灵敏度的无损检测技术, 广泛应用于波谱分析、化学、表面、生物医学、层析成像等研究领域^[3-8]。近几年, 在气体的超痕量分析、光合作用、土壤分析、光声成像等多方面都取得了较大的进展^[9-14]。由于检测系统结构、光功率和探测器等性能的影响, 通常情况下获得的光声信号非常微弱。为了改善光声光谱对固体粉末检测分析能力, 本文结合光声光谱的理论和实际, 讨论了固体的光声光谱探测系统的优化, 通过小波分析方法提高物质的鉴别效率^[15]。

收稿日期: 2009-08-01; 收到修改稿日期: 2009-10-22

基金项目: 三峡大学青年科学基金(KJ2008A022)资助课题。

作者简介: 王习东(1976—), 男, 硕士, 讲师, 主要从事光声光谱、光电技术及系统等方面的研究。

E-mail: wang-xidong@163.com

2 光声光谱理论和实验系统

物质的光声效应的产生源于对入射调制光能的吸收，部分能量以热能的形式传给周围气体，引起温度场的变化，从而产生周期性的气体热扩散。周期性的热扩散会在密闭的空间中产生周期性压力振动，并且在空气中传播，通过高灵敏度的探测系统获取该物质的光声信号，鉴别不同物质的特征参数从而获得物质的相关信息。在某种特定圆柱形腔体光声池的检测系统中^[1,2,16]，对于非透明的热厚试样，光声信号的强度 $p_g = k\beta(\lambda)I_0(\lambda)$ ，式中 k 是与光声池的几何结构、斩波频率、传声器灵敏度等有关的比例常数， $\beta(\lambda)$ 为样品对光吸收系数， $I_0(\lambda)$ 为入射光束的光强。

根据基于圆柱形腔光声池的光声光谱 R-G 理论和探测原理，设计了基于驻极体传声器为声探测器的光声实验系统。光声光谱系统主要由氙灯光源、斩波器、单色仪、光声池、声探测器、放大器和信号处理系统组成，系统的功能框图如图 1 所示。

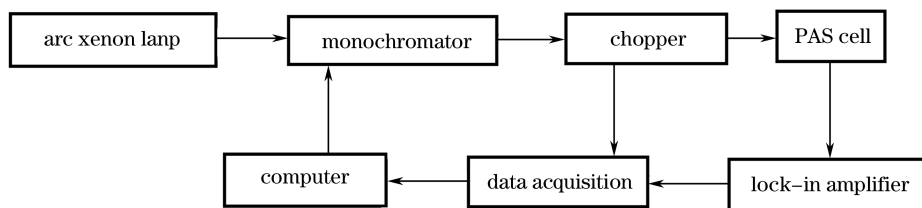


图1 光声光谱实验系统功能框图
Fig.1 Functional block diagram of PAS experimental system

光源系统采用广东飞驰技术有限公司制造的 1000 W 大功率立式弧光氙灯，氙灯发射光谱能覆盖从紫外到近红外较宽的波谱范围，通过会聚系统后则可以获得较小的光斑，避免了在单色仪的反射镜上形成阴影影响光谱光能的利用，而且有利于提高光谱分辨率。斩波器的型号为 EG&G Model-197，斩波频率调节范围为 15~3000 Hz，工作过程中同时提供同步方波参考信号。系统中采用卓立汉光具有自动转换光栅的功能的 SBP300 型单色仪，光谱范围在 200~2500 nm 内连续可调，其读数精度达 0.1 nm，并采用配套的单色仪控制及数据采集系统。锁相放大器型号为 SR510(STANFORD RESEARCH SYSTEM)，其输入参考信号由斩波器提供。根据光声理论和一维活塞模型，研制了非共振圆柱腔体光声池，玻璃窗为高透率 1.5 mm 厚的石英玻璃，结构如图 2 所示。

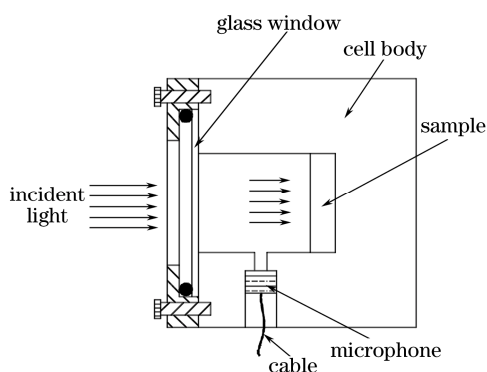


图2 光声池结构图
Fig.2 Structure of photoacoustic cell

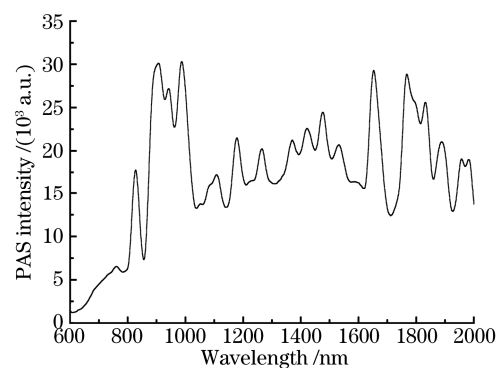


图3 氙灯在 600~2000 nm 的光声光谱(扫描步进为 0.5 nm)
Fig.3 Xenon lamp's PAS with 600~2000 nm (scanning step: 0.5 nm)

光声池的声探测器为 WM-034BX 驻极体传声器，性能稳定，频率响应范围宽，信噪比大于 60 dB，还研制了与其配套工作的低噪声带通前置放大电路。测试结果表明，氙灯发射谱特征，与以前探测系统相

比, 提升了信号的强度和信噪比, 系统稳定可靠。用第二光栅扫描, 单色仪步进为 0.5 nm, 进行测试后, 获得了氙灯在 600~2000 nm 的光声光谱, 如图 3 所示。

3 光声信号分析

在环境污染中, 二噁英、硝基化合物等有毒有害物质的监测非常重要。实验中, 分别取一定量的硝基化合物、硫酸铜、硝基化合物和硫酸铜按质量比 1:1 充分均匀混合的混合物, 通过光声实验系统检测得到它们的光声光谱, 其归一化光声光谱如图 4 所示。

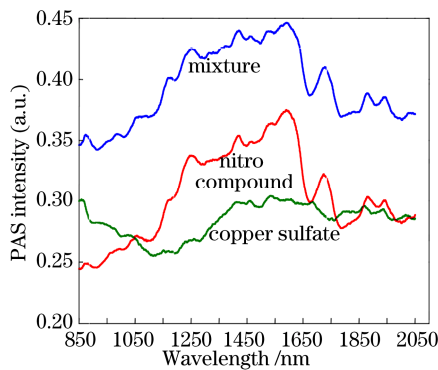


图 4 硝基化合物、硫酸铜、混合物的归一化光声光谱
Fig.4 Normal PAS of nitro compound, copper sulfate and mixture

光声信号的获取为检测提供了必要的条件, 信号处理和分析则为科学判断提供依据。光声信号的分析一般可采用导数、小波分析等方法^[4,5], 结合多组分固体颗粒物光声信号的复杂性和小波分析的优点, 利用 Matlab2009a 中一维多信号分析工具箱对信号进行分析。Wavelet 选择为 db (Daubechies)小波, 分解层数选择 10, Ext. mode 选择 sym, 分解层数为 11, 对 3 个信号同时进行小波分解, 其结果如图 5 所示, 横坐标对应波长, 纵坐标对应信号的幅度。小波分解后, 其中混合物和硝基化合物的分解系数 DET11 如图 6 所示。

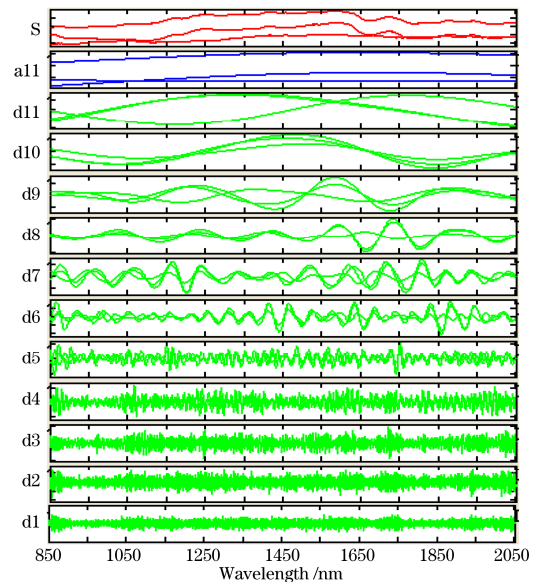


图 5 光声光谱信号的小波分解
Fig.5 Wavelet decomposition of PAS

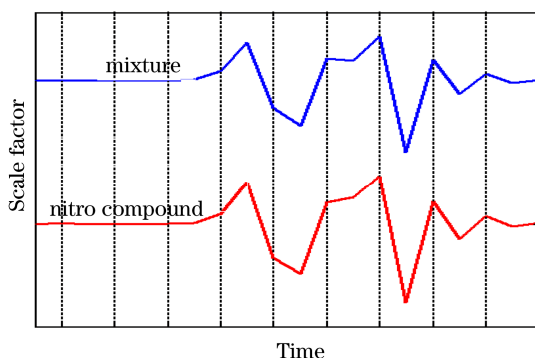


图 6 混合物和硝基化合物的小波分解系数 DET11
Fig.6 Wavelet decomposition coefficient DET11 of maxture and nitro compound

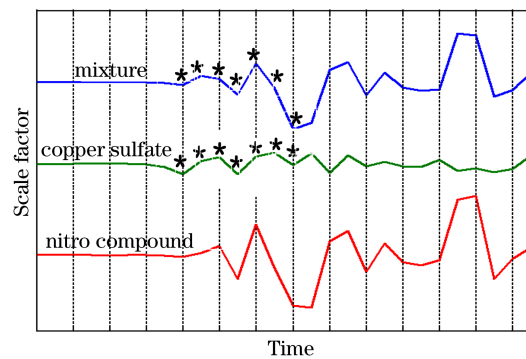


图 7 混合物和硫酸铜的小波分解系数 DET8
Fig.7 Wavelet decomposition coefficient DET8 of mixture and copper sulfate

两物质的波形基本相同, 峰值位置一致, 结合 S ~ d1 波形, 由此可以判断混合物中硝基化合物的存在。由于硫酸铜的光声光谱信号比较平缓, 取混合物和硫酸铜光声信号的分解系数 DET8, 如图 7 所示。可以

清楚看到硫酸铜光声信号分解系数波形带星号转折点与混合物的——对应，结合S~d1波形，由此可以判定为混合物中含有硫酸铜。

4 结 论

设计了一套高性能的宽谱带光声光谱实验系统。多组分固体颗粒物的光声光谱分析中，不仅可改善检测系统性能，还可以在信号处理时采用小波分析的方法对其信号进行多层分解，有利于对物质的成分进行检定，使光声光谱技术为固体颗粒物的分析提供一种新的途径和方法，但对于物质的定量检测则有待更进一步的验证和分析。

参 考 文 献

- 1 Yin Qinrui, Wang Tong. Photoacoustic Photothermic Technology and Application[M]. Beijing: Science Press, 1991. 12~36
殷庆瑞, 王 通. 光声光热技术及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 1991. 12~36
- 2 Tang Zhilie, Liu Jinlong, Xia Yunfei. Detection of human's characteristic absorption peak with differential photoacoustic spectroscopy[J]. *Chinese Science Bulletin*, 2002, **47**(22): 1702~1706
唐志列, 刘金龙, 夏云飞. 用导数光声光谱技术测量人血特征吸收峰[J]. 科学通报, 2002, **47**(22): 1702~1706
- 3 Koditala Subba Ramalha, Anil Kumar Bhatnagar. The effect of sulfur concentration on the properties of chemical bath deposited CdS thin films[J]. *J. Mater. Sci. Mater. Electron.*, 2000, **11**(3): 269~277
- 4 Li Wan, Chen Gang, Shao Xueguang *et al.*. Photoacoustic data analysis using wavelet[J]. *Chemistry*, 1999, (4): 44~48
李 婉, 陈 刚, 邵学广 等. 小波变换用于光声光谱的数据分析[J]. 化学通报, 1999, (4): 44~48
- 5 Du Changwen, Zhou Jianmin, Wang Huoyan *et al.*. Study on the soil mid-infrared photoacoustic spectroscopy[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(6): 1242~1245
杜昌文, 周健民, 王火焰 等. 土壤的中红外光声光谱研究[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(6): 1242~1245
- 6 Yang Yuetao, Chen Wansong, Li Junjia *et al.*. Study of lanthanide complexes-doped silica gels and the co-fluorescence effect by photoacoustic spectroscopy in Situ[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, **28**(9): 2024~2027
杨跃涛, 陈万松, 李俊嘉 等. 稀土配合物掺杂凝胶的原位光声光谱研究及其共发光效应[J]. 光谱学与光谱分析, 2008, **28**(9): 2024~2027
- 7 Peng Yong, Yu Qingxu. Tunable fiber laser based photoacoustic spectroscopy for acetylene detection[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2009, **29**(8): 2030~2033
彭 勇, 于清旭. 基于可调谐光纤激光器的C₂H₂ 气体光声光谱检测[J]. 光谱学与光谱分析, 2009, **29**(8): 2030~2033
- 8 Wang Xidong, Huang Zuohua, Tang Zhilie. Photoacoustic study on the possible components of total suspended particles[C]. *SPIE*, 2005, **6150**: 61502E
- 9 Zhang Chi, Wang Yuanyuan. Reconstruction algorithm of photoacoustic tomography with acoustic speed heterogeneity[J]. *Acta Optica Sinica*, 2008, **28**(12): 2296~2301
张 弛, 汪源源. 声速不均匀介质的光声成像重建算法[J]. 光学学报, 2008, **28**(12): 2296~2301
- 10 Tao Lu, Zhiyuan Song, Yixiong Su *et al.*. Feasibility of photoacoustic tomography for ophthalmology[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2007, **5**(8): 475~476
- 11 Thomas Schmid. Photoacoustic spectroscopy for process analysis[J]. *Anal. Bioanal. Chem.*, 2005, **255**(1): 101~104
- 12 Giorgio Forti, Angela Agostiano, Roberto Barbato *et al.*. Photosynthesis research in Italy: a review[J]. *Photosynth. Res.*, 2006, **88**(3): 211~240
- 13 Milton Roque Bugs. A new biophysics approach using photoacoustic spectroscopy to study the DNA-ethidium bromide interaction[J]. *Eur. Biophys. J.*, 2002, **31**(3): 232~240
- 14 Robert F. Adamowicz , Kee P. Koo. Characteristics of a photoacoustic air pollution detector at CO₂ laser frequencies[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **18**(17): 2938~2946
- 15 Xueguang Shao, Chunyan Pang, Qingde Su. A novel method to calculate the approximate derivative photoacoustic spectrum using continuous wavelet transform[J]. *Fresenius J. Anal. Chem.*, 2000, **367**(6): 525~529
- 16 L. C. Aamodt, J. C. Murphy, J. G. Parker. Size considerations in the design of cells for photoacoustic spectroscopy[J]. *J. Appl. Phys.*, 1977, **48**(3): 927~933