

# 相对湿度对光声信号的影响研究

都小凡<sup>1,2</sup>, 钱仙妹<sup>1</sup>, 刘 强<sup>1\*</sup>, 朱文越<sup>1</sup>, 曹振松<sup>1</sup>

<sup>1</sup>中国科学院安徽光学精密机械研究所中国科学院大气成分与光学重点实验室, 安徽 合肥 230031;

<sup>2</sup>中国科学技术大学研究生院科学岛分院, 安徽 合肥 230026

**摘要** 共振型光声光谱系统容易受到外界环境的影响, 其中相对湿度对光声信号的影响会直接降低光声光谱技术在痕量气体检测或气溶胶光吸收系数测量时的准确性。利用自制的 U 形光声池, 搭建了一套相对湿度可精确调节的光声光谱测量系统, 通过测量不同相对湿度下光声系统的性能参数, 分析了相对湿度对光声信号的影响, 获得了不同相对湿度下光声信号的修正参数。利用该参数, 测量了  $7172.699\text{ cm}^{-1}$  波长处水分子的吸收, 并定量分析了相对湿度的影响。该研究结果为光声光谱技术在不同相对湿度环境条件下的应用提供了重要参考。

**关键词** 光谱学; 相对湿度; U 形光声池; 修正参数

**中图分类号** O433.5 **文献标识码** A

**doi:** 10.3788/AOS201737.0230003

## Effect of Relative Humidity on Photoacoustic Signal

Du Xiaofan<sup>1,2</sup>, Qian Xianmei<sup>1</sup>, Liu Qiang<sup>1</sup>, Zhu Wenyue<sup>1</sup>, Cao Zhensong<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Key Laboratory of Atmospheric Composition and Optical Radiation, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei, Anhui 230031, China;

<sup>2</sup>Science Island Branch of Graduate School, University of Science and Technology of China, Hefei, Anhui 230026, China

**Abstract** The resonant photoacoustic spectroscopy system tends to be affected by the external environment, while the relative humidity has negative influence on the photoacoustic signal, which could reduce the accuracy of the photoacoustic spectroscopy technique for trace gas detection or aerosol light absorption coefficient measurement directly. A set of photoacoustic spectroscopy measurement system is built based on a homemade U-shaped photoacoustic cell, and its relative humidity can be precisely adjusted. Performance of the photoacoustic system is measured at different relative humidity, and the impact of relative humidity on photoacoustic signal is analyzed. The corrected parameters of the photoacoustic signal are also obtained based on the experimental results, with which the absorption of water molecules at  $7172.699\text{ cm}^{-1}$  wavelength is measured and the effects of relative humidity are quantitatively analyzed. The result provides reference for the application of photoacoustic spectroscopy technology in different relative humidity conditions.

**Key words** spectroscopy; relative humidity; U-shaped photoacoustic cell; corrected parameters

**OCIS codes** 300.6170; 300.1030; 300.6430; 010.1030

## 1 引 言

光声光谱技术(PAS)是以光声理论为基础的高灵敏度光谱分析检测技术, 光声效应最初由美国科学家 Bell<sup>[1]</sup>于 1880 年发现, 该技术具有灵敏度高, 选择性好, 动态检测范围大和不消耗被测气体等优点, 广泛应用于痕量气体检测、气溶胶光学特性测量等领域<sup>[2-3]</sup>。但是, 普遍使用的共振型光声光谱系统易受到外界工作环境, 特别是相对湿度和温度变化的影响, 这限制了测量的准确性, 因而, 分析这些因素所带来的具体影响成为亟待解决的问题。

在进行光声光谱实验时, 国外研究者已给出了一些关于水汽影响吸收测量的推测分析, Raspert 等<sup>[4]</sup>发

**收稿日期:** 2016-09-05; **收到修改稿日期:** 2016-10-10

**基金项目:** 国家自然科学基金(41205021)、中国科学院安徽光学精密机械研究所所长基金(AGHH201501)

**作者简介:** 都小凡(1994—), 女, 硕士研究生, 主要从事气溶胶光学特性方面的研究。E-mail: duxf@mail.ustc.edu.cn

**导师简介:** 钱仙妹(1982—), 女, 博士, 副研究员, 主要从事光波大气传输特性方面的研究。E-mail: qianxianmei@aiofm.ac.cn

\* **通信联系人.** E-mail: liuq@aiofm.ac.cn

现相对湿度(RH)超过 70%时,大气气溶胶的吸收作用会明显减小,究其原因是水汽蒸发或冷凝对光声信号产生影响;Schilt 等<sup>[5]</sup>利用光声探测甲烷时指出分子弛豫时间过长将导致光声信号的衰减,水汽和氦气可以加速 CH<sub>4</sub>-O<sub>2</sub> 系统的弛豫时间;Kosterev 等<sup>[6]</sup>着重研究了不同压力下湿度对石英音叉增强型光声光谱(QEPAS)测量的影响,在低压下进行,水含量对光声信号幅值的影响更大;Lewis 等<sup>[7]</sup>利用 PAS 对生物质燃烧所产生的气溶胶进行了测量,得到与 Raspert 等相同的结论,即在高 RH 条件下,系统产生低偏差,且该偏差是气溶胶粒子对水蒸气的吸收或黑碳气溶胶在摄取水后形态发生改变引起的。国内针对光声光谱技术的研究主要应用于气体检测,对光声信号影响因素的研究着重于压力、温度和激光功率等方面<sup>[8]</sup>,关于相对湿度的影响研究偏少且不完善,蒙瑰等<sup>[9]</sup>针对光声信号受湿度影响提出了一种消除湿度影响的方法;孙善文等<sup>[10]</sup>研究了水汽含量对基于 QEPAS 甲烷气体探测性能的影响。根据上述研究结果可以发现,由于测量环境和实验对象的复杂性以及实验过程的不确定性,关于相对湿度对光声信号影响的研究仍然存在着较多分歧。

本文利用自制的 U 形光声池,搭建了一套相对湿度可精确调节的共振型光声光谱测量系统,利用该装置系统地研究了相对湿度对光声系统性能以及光声信号的影响,并进行了相应的理论分析。

## 2 光声光谱技术测量原理

光声光谱技术基于光声原理:当一束调制光或者脉冲光照射在样品上时,样品全部或部分吸收入射光能量,使自身加热并将热量传递至周围的空气,引起空气的热膨胀,进而产生声波,并由微音器探测输出,通过分析所获得信号可以得到样品的光吸收系数。其中,光声信号强度可以表示为<sup>[11]</sup>

$$S_{PA} = S_m P_{light} C_{cell} N \sigma C_m, \quad (1)$$

式中  $S_{PA}$  为光声信号的强度,单位为 V,  $S_m$  为微音器的灵敏度,单位为  $mV \cdot Pa^{-1}$ ,  $P_{light}$  为激光功率,单位为 W,  $N$  为样品数密度常数,  $\sigma$  为样品的吸收截面,  $C_m$  为样品的浓度,  $C_{cell}$  为光声池的池常数,单位为  $Pa / (cm^{-1} \cdot W)$ , 与光声池自身几何参数、测量条件等因素有关,也可表示为<sup>[11]</sup>

$$C_{cell} = (\gamma - 1) \frac{Q_j l}{\omega_j V_c} G, \quad (2)$$

式中  $\gamma$  为气体质量热容比,  $\omega_j$  为光声腔的共振频率,  $Q_j$  为光声腔的品质因子,  $l$  和  $V_c$  分别为光声腔的长度和体积,  $G$  为几何结构因子。在(1)式和(2)式中,微音器的灵敏度  $S_m$ <sup>[9]</sup>、共振频率  $\omega_j$  和品质因子  $Q_j$  均受到相对湿度变化的影响,因此,相对湿度的变化对光声信号的影响直接关系到光声光谱系统测量吸收的准确性。

## 3 光声光谱测量系统

### 3.1 实验装置

光声光谱测量样品吸收的实验装置如图 1 所示。其中,探测光源为中心波长  $1.395 \mu m$  的连续可调谐分布反馈式(DFB)二极管激光器(LDM-4980, ILX Lightwave, 美国),激光器的输入电流和温度由 ILX Lightwave LDC-3724 型激光控制器控制,函数发生器输出的三角波通过改变激光控制器的输出电流进而实现激光器输出波长的扫描。激光器发射的光束经斩波器(MC2000-MC1F30, Thorlabs, 美国)进行功率幅值调制后入射光声池,斩波器的工作频率设为光声池的共振频率。样品吸收入射光产生的光声信号由微音器(MP201, BSWA, 北京)探测,并经前置放大器(MA221, BSWA, 北京)放大后送入锁相放大器(SR830, Stanford Research Systems, 美国)进行解调,解调输出的电信号由数据采集卡(DAQ, NI-6356, National Instruments, 美国)和基于 LabVIEW 的采集程序进行采集并存储至计算机中。经光声池后的出射光功率由功率计(NOVAII, Ophir Optronics Solution 公司, 以色列)进行监测,已对光声信号进行功率归一化。扬声器(WBFK-30042-000, Knowles Electronics, 美国)由函数发生器输出的方波信号驱动,扫描该驱动电压的频率,微音器探测到的信号幅值最大处即为光声池的共振频率。光声池内样品的相对湿度由自制的相对湿度调节系统进行调节,光声池的进样口和出样口均安装了温湿度监测仪(DB4850-DB140-15-D, 大连北方测控, 大连),对样品的温度和湿度进行监测,监测仪的测量精度为  $\pm 2\%$ , 监测数据由监测仪自带的程序进行采集和保存。

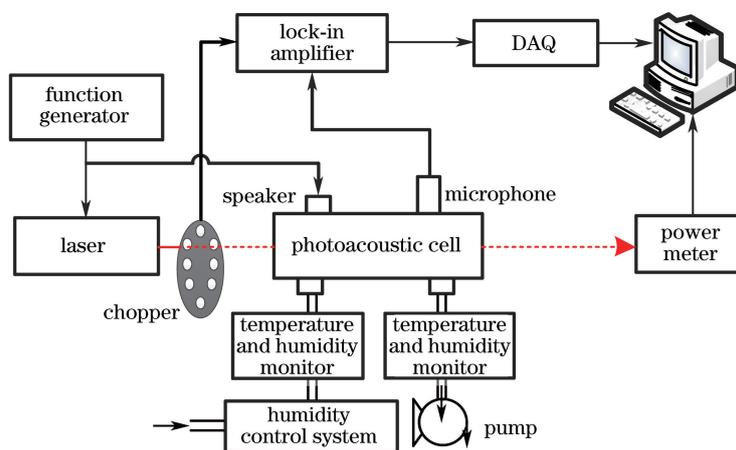


图 1 光声光谱测量系统装置图

Fig. 1 Schematic of photoacoustic spectroscopy measurement system

### 3.2 U形光声池设计

光声光谱测量系统中使用的自制 U 形光声池<sup>[12-14]</sup>结构如图 2(a)所示。其主要由三部分组成,中间的共振腔和左右两侧的配合体。其中,共振腔水平长度为  $1/2\lambda$  ( $\lambda$  为声波波长),竖直部分长度为  $1/4\lambda$ ,竖直部分的两个端口分别安装扬声器和微音器。共振频率处的声波在共振腔内形成驻波,其能量分布如图 2(b)所示,微音器、扬声器均位于驻波的波腹位置。配合体主要由缓冲腔、声过滤器和样品进出口组成,左右两侧的缓冲腔通过窗片(玻璃或者氟化钙材质)进行密封,窗片吸收入射光产生的噪声以及样品流动产生的振动噪声由缓冲腔和声过滤器阻隔,以降低对共振腔内声信号的影响。扬声器作为声源,在一定范围内进行扫频可以实时跟踪光声池的共振频率<sup>[9,14]</sup>。同时,U形光声池的设计还可以有效地减少流动样品与微音器、扬声器直接接触所造成的器件损耗,减小测量误差。

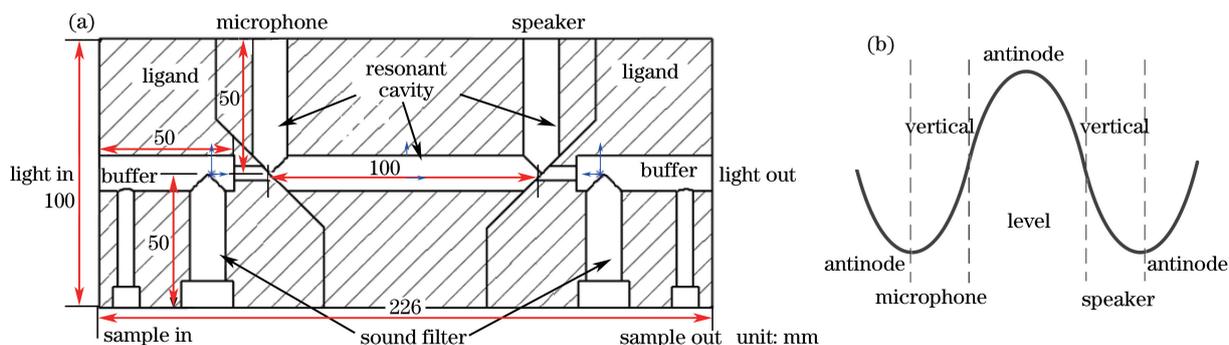


图 2 U形光声池。(a)内部结构;(b)共振腔内的声能量分布

Fig. 2 U-shaped photoacoustic cell. (a) Internal structure; (b) distribution of acoustic energy in the resonant cavity

### 3.3 相对湿度调节装置

相对湿度调节装置的作用是实现对样气(干燥空气)的加湿及相对湿度的调节,结构如图 3 所示,其主要由加湿和配气两部分组成。图 3 右上方虚线框内为加湿装置,用来实现样气加湿的功能,该部分主要由加湿管(MH-110-24S-4,Perma pure,美国)和循环水泵组成。加湿管为 Nafion 材料,该材料对水汽具有高度选择性以及半渗透膜的特性,其利用管内外水蒸气分压差来实现水分转移,从而达到加湿样气的作用<sup>[15-16]</sup>。加湿管由两条独立的通道组成,一条为干燥样气通路,另一条为去离子水通路,两条通路的流向相反,实验时设置流速分别为  $0.4 \text{ L/min}$  和  $1.5 \text{ L/min}$ 。利用循环水泵在加湿管外围连接导管实现去离子水通路中水的循环流动,以保证加湿过程中水流速的稳定以及水温的恒定。经过测试,该装置在 2 h 左右可将样气加湿至相对湿度 90% 以上,符合实验的需求,相对湿度调节效果如图 4 所示,可见在每一相对湿度处均保持了较好的稳定性,测量过程中相对湿度的浮动值小于 0.5%,相对湿度为 40% 时的标准偏差约为 0.073。

图 3 中左下部为配气部分,用来调节样气相对湿度。样气瓶中输出的干燥空气分出两路,分别由质量流

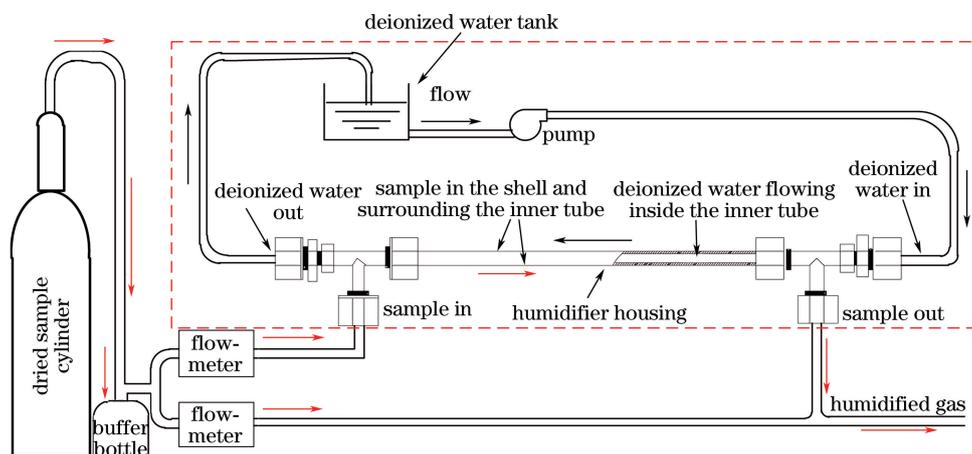


图 3 相对湿度调节装置图

Fig. 3 Schematic of the relative humidity adjusting device

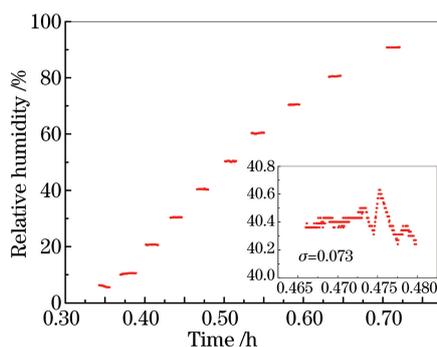


图 4 相对湿度调节效果

Fig. 4 Relative humidity adjusting effect

量计控制，一路进入加湿装置，另一路与加湿管加湿后的空气进行混合，精确控制两路样气的流量比，从而得到不同相对湿度的样气，进而可以根据实验需要调节光声池内样气的相对湿度。为保证实验过程中光声池内流动噪声处于同一水平，需保持通过光声池的总样气流量不变。该套相对湿度调节系统具有相对湿度调节范围大，分布均匀，以及可长时间维持稳定等优点。

## 4 实验过程及结果分析

### 4.1 相对湿度对光声系统性能的影响

#### 4.1.1 对共振频率的影响

研究相对湿度对光声系统自身的影响可以为光声信号的测量值提供修正参数，避免由此带来的测量误差。实验系统中使用的是共振型光声池，在连续测量过程中激光器的调制频率需始终处于光声池的共振频率处。光声池的共振频率由样品中声音的传播速度决定，与样品的压强、温度和湿度等参数有关。

实验在常压下进行，环境温度由实验室内的空调系统控制在 25 °C 左右。利用前述相对湿度调节系统，将光声池内的相对湿度控制在 6%~90% 范围内，同时测量光声池内的共振频率。共振频率的测量过程如下：在一定范围内(1630~2000 Hz)扫描扬声器的驱动频率，麦克风测量扬声器发出的声信号，对采集得到的声信号频率谱进行洛仑兹拟合，拟合所得的声信号最大值处即为该相对湿度条件下的共振频率。实验中，扬声器的驱动信号由函数发生器产生的幅值为 0.5 V<sub>pp</sub> 的方波信号提供。

根据声音在管道内的传输理论，圆柱形谐振腔的共振频率可以表示为<sup>[2]</sup>

$$f_{jmn} = \frac{c_s}{2} \sqrt{\left(\frac{j}{L_{\text{eff}}}\right)^2 + \left(\frac{\alpha_{mn}}{R_c}\right)^2}, \quad (3)$$

式中本征值(j, m, n)分别代表纵向、角向和径向模式数，L<sub>eff</sub>、R<sub>c</sub> 分别为共振腔的有效长度和半径，c<sub>s</sub> 为介质

中的声速,  $\alpha_{mn}$  为  $m$  阶贝塞尔函数的第  $n$  个根除以  $\pi$ 。其中,  $L_{\text{eff}}$  与声学共振管的构造有关, 可通过阻抗转移得到<sup>[17]</sup>

$$Z(L_{\text{eff}}) = \left[ Z(0) - \frac{i\rho v}{S} \tan(kL_{\text{eff}}) \right] / \left[ 1 + \frac{SZ(0)}{i\rho v} \tan(kL_{\text{eff}}) \right] \quad (4)$$

当管发生共振时, 完全开放末端的声学阻抗  $Z=0$ , 完全封闭端的声学阻抗  $Z$  趋于  $\infty$ 。一般情况下, 两端完全封闭和两端完全开放的管的有效长度为管内声波波长的一半。

空气中的声速可以表示为<sup>[2]</sup>

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{M}}, \quad (5)$$

式中  $R$  为气体常数,  $T$  为空气的绝对温度,  $M$  为空气的平均分子质量,  $\gamma$  为空气的定压比热容与定容比热容之比。对于干燥空气,  $\gamma=1.4, M=29$ ; 对于潮湿空气, 该值需要修正。若将空气中水分子的分压定义为  $h$ , 可得修正后的声速为<sup>[2]</sup>

$$c = \sqrt{\gamma \frac{RT}{29 - 11h}} \quad (6)$$

根据上述理论计算和实验装置测量得到的每一相对湿度下的共振频率如图 5 所示。可见计算值和测量值均与相对湿度呈正线性相关关系, 二者差值约为 21 Hz, 误差低于 1.18%, 误差可能源自理论计算时共振腔有效长度末端修正的误差, 但二者线性拟合斜率分别为 0.09475、0.09044, 因此可以认为实际测量值与理论计算值相吻合。从以上分析可见, 无论是测量还是计算结果, 光声池的共振频率随相对湿度的变化均呈现出明显的漂移, 根据测量结果, 相对湿度从 6% 升高至 90%, 共振频率漂移量约为 7.85 Hz。若在任一相对湿度下均保持激光器的调制频率不变, 并将调制频率设定为 1810 Hz, 调节相对湿度从 6% 升高至 90%, 测量得到的扬声器信号如图 6 所示。可见相对湿度为 6% 时的信号幅值为 131.842 mV, 相对湿度为 90% 时的信号幅值为 149.994 mV, 信号幅值增加了 13.76%。同时, 在共振频率处测量相对湿度为 90% 时的扬声器信号幅值达到了 154.868 mV。比较相对湿度为 90% 时的两个信号幅值可以发现, 调制频率保持不变的情况下, 信号幅值衰减达到了 3.147%。因此, 在实际测量过程中, 对光声池共振频率的实时追踪是非常必要的。

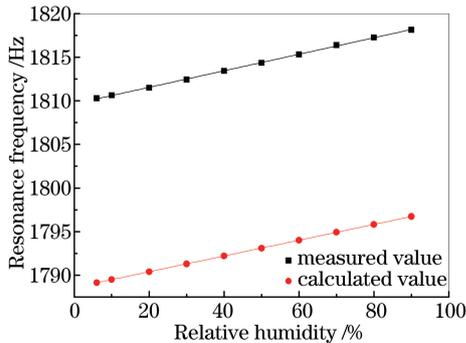


图 5 谐振腔的共振频率随相对湿度的变化

Fig. 5 Resonance frequency of cavity versus relative humidity

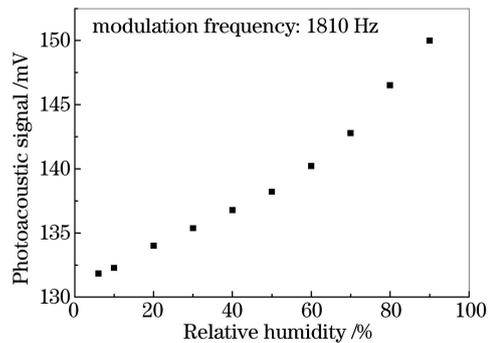


图 6 扬声器信号随相对湿度的变化

Fig. 6 Speaker signal versus relative humidity

#### 4.1.2 对光声池内声信号传播的影响

上述实验不仅得到了共振频率变化值, 还得到了共振频率处声信号幅值的变化, 具体结果如图 7 所示, 纵坐标表示以相对湿度为 10% 时的声强为基准的归一化结果。从测量结果可见, 随着相对湿度的增加, 麦克风测量得到的声信号幅值逐渐升高, 相对湿度 90% 处的幅值较 10% 处的幅值增加了约 15.47%; 随着相对湿度的增加, 声强增长速率变大。分析产生该现象的原因可能有: 1) 随着相对湿度的升高, 电容式驻极体麦克风的灵敏度越高, 同等幅值的声信号转化得到的电压幅值也越大<sup>[9]</sup>; 2) 相对湿度越大, 空气对声信号的衰减越弱, 传递至麦克风处的声能量越强, 每 100 m 的衰减系数如表 1 所示<sup>[18]</sup>。图 7 所示结果还表明, 若要得到更准确的光声信号, 需要对不同相对湿度下的光声信号进行修正, 即将声强归一化值作为修正参数, 用直接测量得到的光声信号除以修正参数, 从而消除相对湿度变化引起的测量误差。

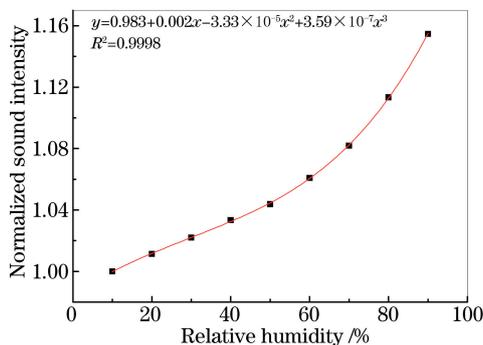


图 7 麦克风测量信号随相对湿度的变化

Fig. 7 Signal detected by microphone versus relative humidity

表 1 大气中的声波衰减

Table 1 Acoustic attenuation in atmosphere

T / °C	Frequency / Hz	Acoustic attenuation / dB								
		20%	30%	40%	50%	60%	70%	80%	90%	100%
25	500	0.238	0.205	0.184	0.170	0.159	0.150	0.143	0.137	0.132
	1000	0.579	0.501	0.448	0.414	0.388	0.367	0.350	0.336	0.323
	2000	1.561	1.223	1.117	1.032	0.960	0.911	0.872	0.838	0.807
	4000	5.088	3.399	2.791	2.555	2.407	2.288	2.186	2.095	2.017

#### 4.2 水分子吸收的测量

为测量不同相对湿度下水分子的吸收,同时避免其他气体吸收的干扰以及吸收饱和现象的发生,实验选择了位于  $7172.699\text{ cm}^{-1}$  波长处的一条水分子吸收线进行测量。实验测量之前,对激光器的输出波长进行标定,将激光器的温度控制在  $17\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,输入电流在  $40\sim 100\text{ mA}$  范围内扫描时,激光器的输出波长范围为  $7171.8983\sim 7173.4005\text{ cm}^{-1}$ ,可完全覆盖目标吸收线。整个实验过程在常压下进行,由空调控制室温在  $25\text{ }^{\circ}\text{C}$  左右。实验时,先通过扫描扬声器的驱动信号频率获取当前相对湿度下的共振频率,然后将斩波器调至该频率处工作,再由函数发生器提供的三角波信号对激光器的输出波长进行扫描,从而得到水分子的吸收光谱。激光器扫描信号三角波的峰峰值为  $2V_{pp}$ 、频率为  $3\text{ Hz}$ ,采集得到的水分子吸收光谱如图 8 所示。

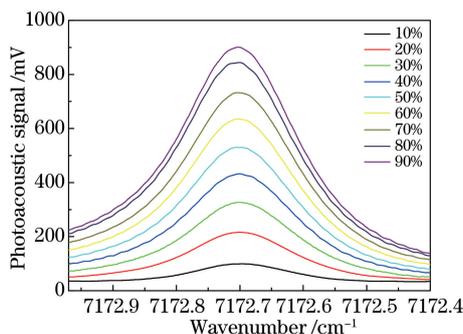


图 8 不同相对湿度下的水分子吸收谱线

Fig. 8 Absorption spectral lines of water molecules in different relative humidity conditions

从图 8 中可见,常压下吸收谱线压力展宽较大,随着相对湿度的增加,样品中水汽含量增多,光声信号的幅值逐渐增大。图中光声信号的幅值包含了系统的本底噪声,数据处理时,将吸收谱远翼处的信号值作为本底噪声着扣除,再结合 4.1.2 节的修正参数,得到最终修正后的光声信号。

图 9 给出了吸收峰中心位置( $7172.699\text{ cm}^{-1}$ )处光声信号随相对湿度的变化情况,可见修正后的光声信号与相对湿度呈非线性关系。在该实验条件下,水分子吸收截面的变化非常微弱,不足  $0.3\%$ ,其变化可以忽略不计。根据(1)式可以看出,理论上气体分子吸收入射光后,光声效应产生的信号幅值应与分子浓度呈线性关系,而从图 10 显示的修正后光声信号的多项式拟合与线性拟合的结果来看并非如此,为了定量分析两

种拟合方式的差异,给出两条拟合线的相对偏差(二者相减后除以多项式的拟合结果)。在相对湿度为 10% 时,两种拟合方式的相对偏差达到最大,为 54.90%;二者相交于相对湿度为 26.16% 与 77.88% 处;当相对湿度大于 77.88% 时,二者的相对偏差继续增大;相对湿度为 90% 时,相对偏差达到 6.68%。

由此可见,相对湿度的变化导致声信号传播过程中的衰减系数发生变化,微音器灵敏度发生变化,造成了光声信号与水分子浓度之间的非线性关系。另外,随着相对湿度的增加,分子弛豫效应的变化也可能是导致该现象的原因<sup>[11]</sup>。因此,利用光声光谱技术在相对湿度变化的环境条件下进行痕量气体的测量,需要考虑相对湿度对光声信号幅值的影响,并利用修正参数对实验结果进行校正,以提高测量结果的准确性。

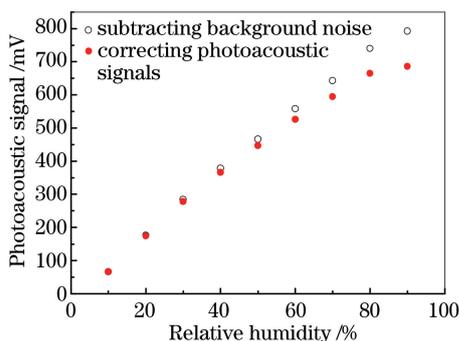


图 9 修正后的光声信号

Fig. 9 Corrected photoacoustic signals

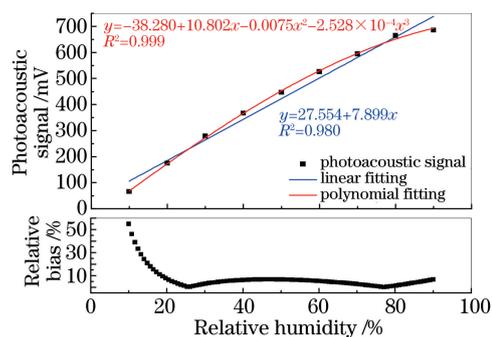


图 10 两种拟合结果的比较

Fig. 10 Comparison of two fitting methods

## 5 结 论

利用自制的 U 形光声池搭建了一套相对湿度可调节范围为 6%~90% 的光声光谱测量系统,并通过安装扬声器实现了共振频率的实时跟踪,根据测量结果得到了光声信号的修正参数。选择  $7172.699 \text{ cm}^{-1}$  波长处的一条水分子吸收线进行测量,发现由于相对湿度的变化,声信号的传播效率、探测器的灵敏度等随之变化,导致光声信号与水分子浓度呈非线性关系,因此,在实际测量过程中,环境相对湿度的监测以及对光声信号进行相应的修正对于提高测量结果的准确性是非常必要的。实验结果为相对湿度变化较大的环境条件下进行痕量气体探测及气溶胶光吸收系数测量提供了参考。另外,实验仍存在待改进之处,整个实验过程是利用实验室空调对温度进行控制,但其温度精度只能达到  $\pm 0.4 \text{ }^\circ\text{C}$ ,温度的变化可能会对实验结果产生一些未知影响,需要进行进一步研究。

## 参 考 文 献

- [1] Bell A G. On the production and reproduction of sound by light[J]. American Journal of Science, 1880, 20(118): 305-324.
- [2] Liu Qiang. Research on absorption properties of atmospheric aerosol based on photoacoustic spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014: 11-15.  
刘 强. 光声光谱技术测量大气气溶胶吸收特性研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2014: 11-15.
- [3] Zheng Longjiang, Li Peng, Qin Ruifeng, *et al.* Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2008, 45(8): 24-32.  
郑龙江, 李 鹏, 秦瑞峰, 等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. 激光与光电子学进展, 2008, 45(8): 24-32.
- [4] Raspert R, Slaton W V, Arnott W P, *et al.* Evaporation-condensation effects on resonant photoacoustics of volatile aerosol[J]. Journal of Atmospheric and Oceanic Technology, 2003, 20(5): 685-695.
- [5] Schilt S, Besson J P, Thévenaz L. Near-infrared laser photoacoustic detection of methane: the impact of molecular relaxation[J]. Applied Physics B, 2006, 82(2): 319-328.
- [6] Kosterev A A, Mosely T S, Tittel F K, *et al.* Impact of humidity on quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy based detection of HCN[J]. Applied Physics B, 2006, 85(2): 295-300.
- [7] Lewis K A, Arnott W P, Moosmüller H, *et al.* Reduction in biomass burning aerosol light absorption upon

- humidification: roles of inorganically-induced hygroscopicity, particle collapse, and photoacoustic heat and mass transfer [J]. *Atmospheric Chemistry and Physics*, 2009, 9(22): 8949-8966.
- [8] Chen Weigen, Liu Bingjie, Hu Jinxing, *et al.* Influential factors analysis on photoacoustic signal of photoacoustic spectroscopy monitoring trace gases[J]. *Journal of Chongqing University*, 2011, 34(2): 7-13.  
陈伟根, 刘冰洁, 胡金星, 等. 微弱气体光声光谱监测光声信号影响因素分析[J]. *重庆大学学报*, 2011, 34(2): 7-13.
- [9] Meng Gui, Liu Xianyong, Yuan Changying, *et al.* Research on the effect of gas humidity on photoacoustic spectroscopy gas detection system[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2011, 31(7): 1819-1822.  
蒙 瑰, 刘先勇, 袁长迎, 等. 光声光谱技术气体检测系统中气体湿度的影响研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2011, 31(7): 1819-1822.
- [10] Sun Shanwen, Yi Hongming, Wang Guishi, *et al.* Impact of water on quartz enhanced photo-acoustic absorption spectroscopy methane sensor performance[J]. *Chinese J Lasers*, 2012, 39(7): 0715001.  
孙善文, 易红明, 王贵师, 等. 水气含量对基于 QEPAS 甲烷气体探测性能的影响[J]. *中国激光*, 2012, 39(7): 0715001.
- [11] Li Jinsong, Liu Kun, Zhang Weijun, *et al.* The influence of CO<sub>2</sub> molecular relaxation dynamics on photoacoustic signal in near infrared range (NIR)[J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2008, 28(9): 1953-1957.  
李劲松, 刘 锟, 张为俊, 等. 近红外波段 CO<sub>2</sub> 分子弛豫动力学效应对光声信号的影响[J]. *光谱学与光谱分析*, 2008, 28(9): 1953-1957.
- [12] Arnott W P, Moosmüller H, Rogers C F, *et al.* Photoacoustic spectrometer for measuring light absorption by aerosol: instrument description[J]. *Atmospheric Environment*, 1999, 33(17): 2845-2852.
- [13] Arnott W P, Moosmüller H, Walker J W, *et al.* Nitrogen dioxide and kerosene-flame soot calibration of photoacoustic instruments for measurement of light absorption by aerosols[J]. *Review of Scientific Instruments*, 2000, 71(12): 4545-4552.
- [14] Arnott W P, Zielinska B, Rogers C F, *et al.* Evaluation of 1047 nm photoacoustic instruments and photoelectric aerosol sensors in source-sampling of black carbon aerosol and particle-bound PAHs from gasoline and diesel powered vehicles [J]. *Environmental Science & Technology*, 2005, 39(14): 5398-5406.
- [15] Day D E, Malm W C. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity: a comparison between measurements made at three different sites[J]. *Atmospheric Environment*, 2001, 35(30): 5169-5176.
- [16] Day D E, Malm W C, Kreidenweis S M. Aerosol light scattering measurements as a function of relative humidity[J]. *Journal of the Air & Waste Management Association*, 2000, 50(5): 710-716.
- [17] Yi Hongming. Theoretical and experimental research of quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy technique [D]. Hefei: Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, 2012: 65-72.  
易红明. 石英音叉增强型光声光谱技术理论与实验研究[D]. 合肥: 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 2012: 65-72.
- [18] Ma Dayou, Shen Hao. Sound manual[M]. Beijing: Science Press, 2004: 142-144.  
马大猷, 沈 壕. 声学手册[M]. 北京: 科学出版社, 2004: 142-144.