

## 呼吸性粉尘吸收系数的光声光谱探测

靳华伟<sup>1,2,3</sup>, 谢品华<sup>1,2</sup>, 胡仁志<sup>1,2\*</sup>, 刘文清<sup>1,2</sup>, 李治艳<sup>1,2</sup>, 陈浩<sup>1,2</sup>, 黄崇崇<sup>1,2</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230026
3. 安徽理工大学机械工程学院, 安徽 淮南 232001

**摘要** 针对呼吸性粉尘浓度连续、可靠、低成本的实时检测需求, 实现了光谱应用技术创新, 提出了一种基于光声光谱的呼吸性粉尘探测系统, 低功率二极管激光器光谱中心波长为 403.56 nm 及相应的 NO<sub>2</sub> 有效吸收截面为  $5.9485 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \cdot \text{mole}^{-1}$ ; 通过频率扫描拟合得到了 1.35 kHz 的谐振频率。开展了光声池结构的影响分析, 得到了光声池长度参数对本底噪声影响较小但对激光信号影响较大、内径参数对本底噪声存在一定影响但对本底噪声影响较小的结论。在考虑品质因数、加工条件、使用场合和待测对象属性等影响情况下, 选用 120 mm 的长度参数和 8 mm 的内径参数; 基于长度为 60 mm、内径为 25 mm 的缓冲腔结构, 开展了缓冲隔板对系统稳定性的影响分析, 通过在缓冲腔中设置缓冲隔板, 降低了本底噪声、稳定了系统, 其幅值及波动由  $(2.83 \pm 0.11) \mu\text{V}$  稳定为  $(1.26 \pm 0.03) \mu\text{V}$ 。分析得到了 NO<sub>2</sub> 的比吸收系数为  $195.28 \text{ Mm}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$ , 利用 NO<sub>2</sub> 气体在 405 nm 处的吸收对系统进行了标定, 得到了拟合斜率为 0.0436 8  $\mu\text{V}/\text{Mm}^{-1}$ 、相关系数为 0.998、池常数为  $300.24 \text{ Pa} \cdot \text{cm} \cdot \text{W}^{-1}$  的结论。同时在 1 min 平均时间下, 得到了系统探测浓度下限及吸收系数为  $2.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $0.448 \text{ Mm}^{-1}$ 。基于标准微球的聚苯乙烯作为气溶胶发生器对象开展了呼吸性粉尘的吸收系数影响分析, 进行了  $5 \mu\text{m}$  以下不同数浓度颗粒及同一数浓度下不同粒径颗粒吸收系数的测试, 结果表明: 呼吸性粉尘的吸收系数和数浓度成正比, 线性拟合后的斜率为  $10.598 \pm 0.64196$ , 相关系数为 0.993; 吸收系数曲线的方差在  $3 \sim 4 \text{ Mm}^{-1}$  间, 不同粒径的颗粒对吸收系数存在着一定的影响; 随着粒径增加, 吸收系数随之增加。开展了环境大气中 NO<sub>2</sub> 的测量, 选用  $0.2 \mu\text{m}$  的过滤膜滤除粉尘的干扰, 实验结果表明大气 NO<sub>2</sub> 浓度为  $16.4 \sim 61.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , 平均浓度为  $41.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为了证实测量系统的准确性, 与课题组自行研发的长光程差分吸收光谱系统(LP-DOAS)进行了对比测试, 测试结果显示了本光声光谱系统和 LP-DOAS 系统测量 NO<sub>2</sub> 浓度的相关性较好, 线性拟合后的斜率为  $1.01178 \pm 0.04013$ , 相关系数为 0.94781。开展了环境大气中呼吸性粉尘的测量, 选用  $5 \mu\text{m}$  过滤片过滤环境大气, 通过“NO<sub>2</sub> +  $5 \mu\text{m}$  粉尘”和“NO<sub>2</sub> +  $0.2 \mu\text{m}$  粉尘”两路测量对象的差分测量, 得到了呼吸性粉尘的变化趋势, 可以满足自然悬浮状态下的呼吸性粉尘吸收系数实时测量。

**关键词** 光声光谱; 呼吸性粉尘; 吸收系数; 长光程差分吸收光谱

**中图分类号:** O433.1 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2019)07-1993-06

## 引言

呼吸性粉尘是指呼吸到人体肺泡区的粉尘, 粒径多在  $5 \mu\text{m}$  以下, 不仅污染环境, 还影响人体身心健康, 严重的可导致尘肺病包、哮喘、支气管炎和心血管病等疾病<sup>[1]</sup>。随着我

国经济和社会的发展, 人们逐渐意识到呼吸性粉尘的危害, 明确了呼吸性粉尘检测的重要性<sup>[2]</sup>。以煤矿为例, 《煤矿安全规程》规定, 煤矿企业对井下生产性粉尘必须进行监测(当粉尘中游离 SiO<sub>2</sub> 含量  $< 10\%$  时, 呼吸性粉尘应小于  $3.5 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ , 总粉尘应小于  $10 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ )<sup>[3]</sup>。因此, 对呼吸性粉尘的吸收特性进行研究具有重要的意义。

**收稿日期:** 2018-12-24, **修订日期:** 2019-03-05

**基金项目:** 国家自然科学基金项目(91644107, 61575206), 国家重点研发计划项目(2017YFC0209403, 2017YFC0209902)和安徽省高校优秀青年人才支持项目(gxyq2019167)资助

**作者简介:** 靳华伟, 1986年生, 中国科学院安徽光学精密机械研究所博士研究生 e-mail: hwjin@aiofm.ac.cn

\* 通讯联系人 e-mail: rzhu@aiofm.ac.cn

目前呼吸性粉尘浓度测试方法主要有称重法<sup>[4]</sup>、 $\beta$ 射线法<sup>[4]</sup>、光散射法<sup>[5]</sup>、电荷感应法<sup>[6-7]</sup>、光吸收法<sup>[8]</sup>、红外分光光度法<sup>[8]</sup>、超声波法<sup>[8]</sup>等,这些方法对于研究呼吸性粉尘起到了重要作用,但如何连续、可靠、低成本实时检测呼吸性粉尘仍需要进一步研究。光声光谱技术(PAS)在粉尘检测方面,与其他技术相比,具有高灵敏度、高动态范围、无波长选择性、可直接测量自然悬浮状态下的粒子等优点<sup>[9-11]</sup>,且已成功应用于农业谷物等光学吸收特性研究<sup>[12]</sup>,但将其应用于呼吸性粉尘吸收系数检测领域未见报道。基于此,创新性地提出了一种基于光声光谱的呼吸性粉尘探测系统,围绕呼吸性粉尘的吸收特性探究了优化系统结构提高系统性能的方法,分析了粒径和数浓度等影响因素,获得了系统的探测限。并将该系统应用于环境大气中呼吸性粉尘的实际测量,与差分吸收光谱系统进行了对比。

## 1 光声光谱测量原理

光声光谱技术是一种基于光声效应的检测方法,具体是指在密闭的光声腔内,气体分子吸收调制光能而形成的具有周期性变化的热功率密度源,进而使腔内气体压力发生周期性变化,激励出声信号<sup>[13]</sup>。对于谐振腔而言,光声信号强度可表示为

$$S_{PA} = P_m C_{cell} \alpha P_0 \quad (1)$$

式中: $\alpha(\text{cm}^{-1})$ 为吸收系数,等于物质浓度和吸收截面的乘积; $S_{PA}(\text{V})$ 为光声信号值; $P_m(\text{mV} \cdot \text{Pa}^{-1})$ 为麦克风的灵敏

度; $C_{cell}[\text{Pa} \cdot (\text{cm}^{-1} \cdot \text{W})^{-1}]$ 为光声池的池常数; $P_0(\text{W})$ 为二极管功率。

池常数是光声池的固有属性,对光声信号强度起到决定性的作用,与谐振腔的体积成密切相关,可表示为

$$C_{cell} = \frac{Q_j}{\omega_j} \frac{(\gamma - 1) \int p_j^*(\vec{r}) g(\vec{r}, \omega) dV}{V_c} \quad (2)$$

式中: $Q_j$ 为第  $j$  模的品质因数; $\gamma$ 为等压和等容比热; $g(\vec{r}, \omega)$ 为归一化的光分布函数; $p_j(\vec{r})$ 为简正模式; $\omega_j$ 为模式  $j$  的声共振频率; $V_c$ 为共振腔的体积。

## 2 实验部分

本光声光谱实验系统主要包含二极管激光器、光声池和采集系统,如图 1 所示。幅值为 0~1 V、频率 100 Hz~9 kHz 可调的方波信号同时激发 120 mW 二极管激光器(DL-405, 上海熙隆光电)和锁相放大器(OE1022D, 中大科仪)。环境大气经过 5  $\mu\text{m}$  过滤片(深圳恒歌, 粉末烧结不锈钢过滤片),由质量流量计(七星华创, CS200)控制以 200  $\text{mL} \cdot \text{min}^{-1}$  进入光声池(内部抛光, 铝制圆柱空腔)。麦克风(MP201, 53.7  $\text{mV} \cdot \text{Pa}^{-1}$ , 北京声望声电)采集扰动信号,经前置放大器(MA221)送入锁相放大器,由 LabVIEW 控制程序采集处理。系统同时配有样气系统,用于标定。锁相放大器的时间常数为 3 s,灵敏度为 200  $\mu\text{V}$ ,衰减速率为 12 dB,采用时间为 1 000 ms。

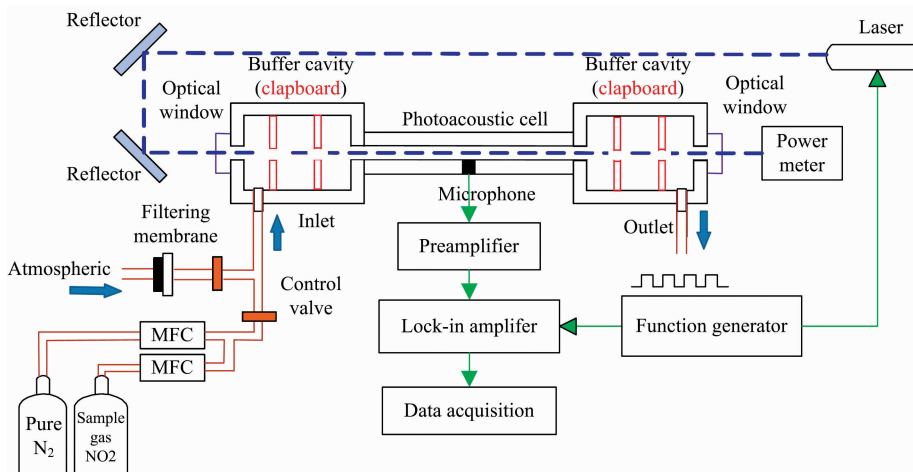


图 1 呼吸性粉尘吸收特性测量系统

Fig. 1 Measurement system of absorption characteristic for respirable dust

由于粉尘无明显吸收峰,故常采用已知吸收系数的  $\text{NO}_2$  气体对系统进行标定研究。 $\text{NO}_2$  的有效吸收截面可由 MPI Mainz 数据库(Bogumil, 2003, 293K)获取(图 2 蓝线),为了排除水气及其他气体的吸收影响<sup>[14]</sup>,选用蓝光激光器(DL-405, 上海熙隆光电)。该激光器的光谱(图 2 粉线)中心波长为 403.56 nm,对应的  $\text{NO}_2$  有效吸收截面为  $5.948 5 \times 10^{-19} \text{cm}^2 \cdot \text{mole}^{-1}$ 。在该中心波长下,选定光声池结构(长度 120 mm、内径为 8 mm),该激光器经方波调制后激发特定浓度

的  $\text{NO}_2$ ,经 1.10~1.55 kHz 频率范围内的扫描,获取光声信号幅值变化(图 2 红线),据此可拟合得到 1.35 kHz 的谐振频率。

## 3 结果与讨论

### 3.1 光声池结构的影响分析

理论上,光声池的池常数反映光声信号强度,光声信号

强度与长度参数成正比、体积参数成反比。故以  $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  流量通入纯  $\text{N}_2$  和  $7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$   $\text{NO}_2$  (经课题组研发的长光程校准) 后, 则具有不同光声池结构的系统对比测试如图 3 所示, 测试结果见表 1。需要说明的是, 不同池结构的系统在测试前均需要进行谐振频率测试, 以确保调制频率与谐振频率同步。

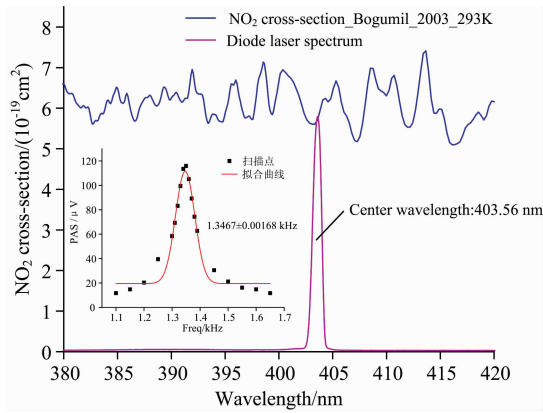


图 2  $\text{NO}_2$  的吸收截面、二极管激光光谱及谐振频率  
Fig. 2 Cross sections of  $\text{NO}_2$ , diode laser spectrum and resonant frequency

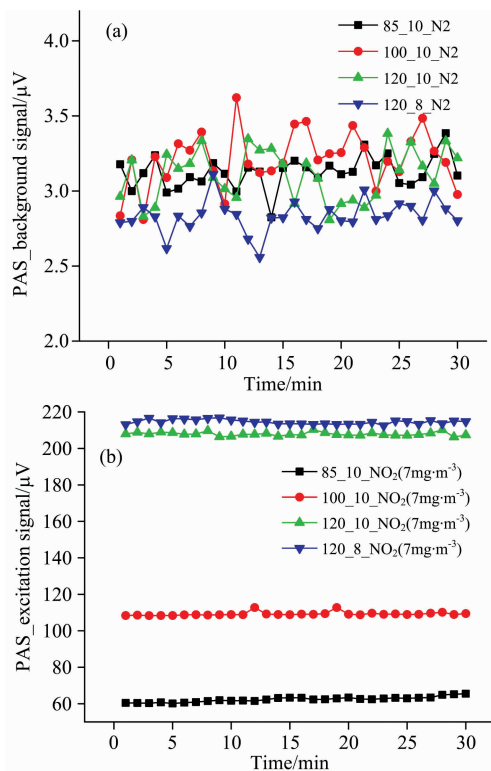


图 3 (a) 光声池结构对背景噪声影响分析;  
(b) 光声池结构对激发信号影响分析

Fig. 3 (a) The influence analysis of photo-acoustic cell structure on background noise; (b) The influence analysis of photo-acoustic cell structure on excitation signal

别为 85, 100 和 120 mm 光声池的本底测试信号[图 3(a)黑色、红色和绿色]较为接近, 可见光声池长度参数对本底噪声影响较小; 当长度为 120 mm 定值时, 内径分别为 8 和 10 mm 光声池的本底测试信号[图 3(a)绿色和蓝色]幅值上存在一定差异 ( $0.32 \mu\text{V}$ ), 可见光声池内径参数对本底噪声存在一定影响。图 3(b)的  $7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$   $\text{NO}_2$  激发测试中, 当内径为 10 mm 定值时, 长度分别为 85, 100 和 120 mm 光声池的本底测试信号[图 3(b)黑色、红色和绿色]在幅值上差异较大, 可见光声池长度参数对激光信号存在较大影响, 随着长度增大, 信号幅值相应增大; 当长度为 120 mm 定值时, 内径分别为 8 和 10 mm 光声池的本底测试信号[图 3(a)绿色和蓝色]较为接近, 可见光声池内径参数对本底噪声影响较小。

表 1 测试结果  
Table 1 Test results

光声池结构	本底噪声/ $\mu\text{V}$	激发信号/ $\mu\text{V}$
85_10	$3.12 \pm 0.11$	$62.36 \pm 1.42$
100_10	$3.21 \pm 0.19$	$109.22 \pm 1.04$
120_10	$3.11 \pm 0.17$	$207.91 \pm 1.01$
120_8	$2.83 \pm 0.11$	$214.55 \pm 1.23$

实验结果验证了理论, 但需要考虑到光声池长度和内径参数对品质因数和抗干扰能力的影响, 故光声池长度不宜过大, 本系统选用 120 mm 的长度参数。考虑加工条件、使用场合和待测对象属性的影响, 以及匹配二极管激光器 (DL-405, 上海熙隆光电, 光束发散角  $< 1 \text{ mrad}$ , 准直光斑  $\sim 10 \text{ mm}$ , 准直发散角  $< 8 \text{ mrad}$ ), 选用 8 mm 的内径参数。

### 3.2 缓冲隔板对系统稳定性的影响

为了使谐振腔中的能量尽量多的反射回腔体, 多采用长度为谐振腔长度 1/2、半径大于谐振腔 3 倍的缓冲腔, 故本系统设置缓冲腔的长度为 60 mm、内径为 25 mm。同时采用长 120 mm、内径 8 mm 的光声池作为谐振腔, 以  $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  流量通  $\text{N}_2$  进行本底噪声测试 (图 4 蓝线), 幅值及波动为  $(2.83 \pm 0.11) \mu\text{V}$ 。由于气流进入光声池后形成湍流, 进而产生较大噪声, 和外界振动等引起的噪声一同由缓冲池引入到腔体内, 影响系统的稳定性。而湍流和振动等噪声的传播是基于声音在腔体内的传播理论, 通过对声压和体积速度连

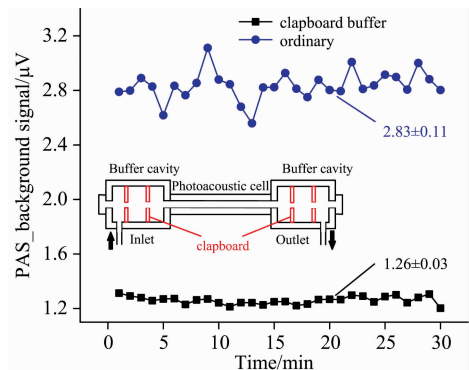


图 4 缓冲隔板对稳定性影响

Fig. 4 Impact of buffer plate on stability

图 3(a)的本底测试中, 当内径为 10 mm 定值时, 长度分

续边界条件的优化,进行反射波和透射波的设计,可以降低噪声的影响,基于此,采用缓冲隔板降低噪声。测试结果如图 4 中黑线所示,其幅值及波动为 $(1.26 \pm 0.03) \mu\text{V}$ ,可见缓冲隔板显著的降低了本底噪声,较好的稳定了系统。

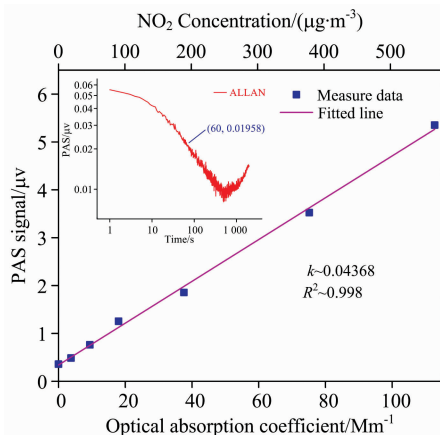


图 5 标定及分析

Fig. 5 Calibration and analysis

### 3.3 系统标定

为了获得系统的标定参数,利用  $\text{NO}_2$  气体在  $403.56 \text{ nm}$  波长的吸收对光声池进行标定。通过精确控制质量流量计,将  $7 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$   $\text{NO}_2$  分别稀释到  $19.2, 48.1, 92.2, 192.5, 384.9$  和  $577.4 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,并以  $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  流量通入系统,记录光声信号值。结合本实验条件 ( $293 \text{ K}, 101.325 \text{ kPa}$ ),由 Arnott 小组对  $\text{NO}_2$  的比吸收系数研究<sup>[15]</sup>分析得到  $\text{NO}_2$  的比吸收系数为  $195.28$ ,进而可得系统标定曲线(图 5 粉线)。标定曲线拟合后的斜率为  $0.04368 \mu\text{V}/\text{Mm}^{-1}$ ,  $R^2$  为  $0.998$ 。由式(1)可知,池常数为  $300.24 \text{ Pa} \cdot \text{cm} \cdot \text{W}^{-1}$ 。又由系统的 ALLAN 方差分析(图 5 红线)可知,在  $1 \text{ min}$  平均时间下,系统的探测浓度下限为  $2.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,相应的吸收系数为  $0.448 \text{ Mm}^{-1}$ 。

### 3.4 呼吸性粉尘的吸收系数

研究呼吸性粉尘的吸收系数受粒径、数浓度和化学成分相关。当限定粒径后,吸收系数大小取决于数浓度<sup>[15]</sup>。系统采用基于 DUKE 标准微球尺寸标准的平均粒径为  $5.027 \sim 0.047 \mu\text{m}$  的聚苯乙烯微球(Thermo DUKE standards Microsphere, 4205A)作为气溶胶发生器(Hach Co., Met One)的发生液体,微球密度为  $1.05 \text{ g} \cdot \text{cm}^{-3}$ 。聚苯乙烯微球经离子水前期稀释后,控制仪器自带的干燥流量计和雾化空气流量计,使干燥气路分别以  $1, 2.5, 4$  和  $5.5 \text{ L}$  流量吹扫目标微球,同时保持雾化气路大流量稀释,总流量为  $30 \text{ L}$ 。此时,目标微球密度分别被稀释到  $3.3\%, 8.3\%, 13.3\%$  和  $18.3\%$ 。被稀释的  $5 \mu\text{m}$  以下的不同数浓度的颗粒以  $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  通入光声池,测得的吸收系数如图 6 所示。可见,呼吸性粉尘的吸收系数和数浓度成正比,线性拟合后的斜率为  $10.598 \pm 0.64196$ ,相关系数为  $0.993$ ;吸收系数曲线的方差在  $3 \sim 4 \text{ Mm}^{-1}$  间,这是由于  $5 \mu\text{m}$  以下颗粒较多,不同粒径的颗粒对吸收系数存在着一定的影响。图 7 为粒径分别

在  $1.6, 2, 5$  和  $8 \mu\text{m}$  以下颗粒的吸收系数,随着粒径增加,吸收系数逐渐增加。上述方差的波动是由于同一粒径或同一数浓度皆为相对量。

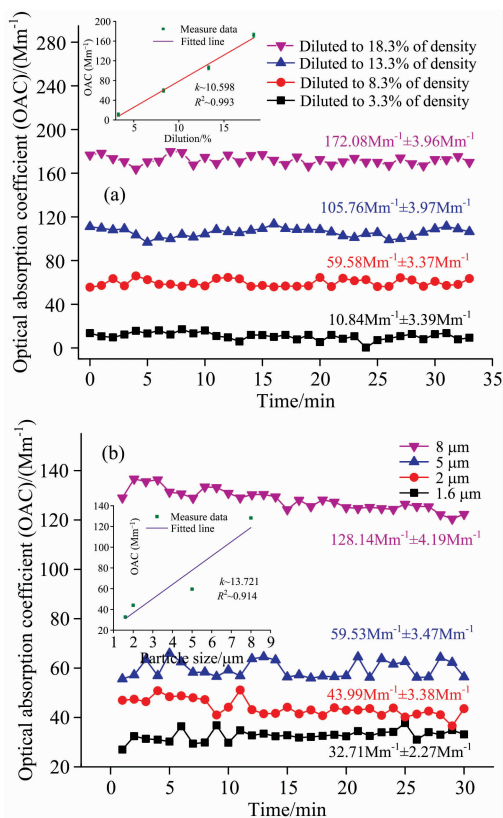


图 6 (a)  $5 \mu\text{m}$  以下不同数浓度颗粒的吸收系数;  
(b) 同一数浓度下不同粒径颗粒吸收系数

Fig. 6 (a) Optical absorption coefficients of different particle concentrations below  $5 \mu\text{m}$ ; (b) Optical absorption coefficients of different particles sizes at the same concentration

### 3.5 环境大气 $\text{NO}_2$ 测量

由于环境大气中  $\text{NO}_2$  对粉尘光声信号造成较大的影响,光声信号为呼吸性粉尘和  $\text{NO}_2$  的激发之和,故为了精确获得呼吸性粉尘的吸收特性,需精确掌握  $\text{NO}_2$  的浓度,进而差分求值。实验地点在安徽省合肥市董铺水库(北纬  $31^\circ 54' 31''$ , 东经  $117^\circ 9' 36''$ , 海拔  $20 \text{ m}$ ),远离市区,粉尘成分较为稳定。于 2018 年 11 月 1 日开展对环境大气中  $\text{NO}_2$  的测量,选用  $0.2 \mu\text{m}$  的过滤膜滤除粉尘的干扰,环境大气以  $200 \text{ mL} \cdot \text{min}^{-1}$  进入系统[图 7(a)]。通过前期测量本底后,光声信号曲线( $60 \text{ s}$  平均)如图 7(a)红线所示。可见,大气  $\text{NO}_2$  浓度为  $16.4 \sim 61.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ ,平均浓度为  $41.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ 。为了证实系统的测量结果,同时使用课题组自行研发的长光程差分吸收光谱(LP-DOAS,单向光程  $350 \text{ m}$ ,光谱分辨率  $0.2 \text{ nm}$ )系统对比测试,测量结果如图 7(a)黑线所示。图 7(b)显示了本 PAS 系统和 LP-DOAS 系统测量  $\text{NO}_2$  浓度的相关性,线性拟合后的斜率为  $1.01178 \pm 0.04013$ ,相关系数为  $0.94781$ 。可见,本 PAS 系统测量  $\text{NO}_2$  的准确性较高。



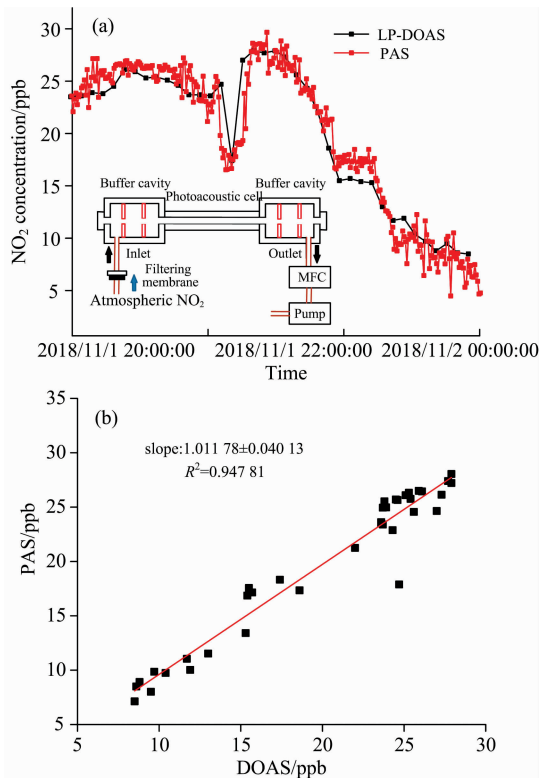


图 7 (a) 本 PAS 系统和 LP-DOAS 系统测得的环境大气  $\text{NO}_2$  浓度; (b) 本 PAS 系统和 LP-DOAS 系统  $\text{NO}_2$  测量结果对比

Fig. 7 (a) Simultaneous measurement of atmospheric  $\text{NO}_2$  concentrations by PAS and LP-DOAS systems; (b) Correlation between the atmospheric  $\text{NO}_2$  concentrations measured by PAS and LP-DOAS systems

### 3.6 环境大气呼吸性粉尘测量

于 2018 年 11 月 20 日—22 日开展对环境大气中呼吸性粉尘的测量, 选用  $5 \mu\text{m}$  过滤片(深圳恒歌, 粉末烧结不锈钢过滤片)过滤环境大气。由于反演的吸收系数为  $\text{NO}_2$  和呼吸

性粉尘之和, 故通过电磁阀以 1 min 频率切换管路, 一路采集“ $\text{NO}_2 + 5 \mu\text{m}$  粉尘”光声光谱数据(图 8 黑线), 另一路采集“ $\text{NO}_2 + 0.2 \mu\text{m}$  粉尘”光声光谱数据(图 8 蓝线)(在这里认为已滤除粉尘), 据此差分求得呼吸性粉尘的变化趋势(图 8 红线)。由图可见, 由于检测点位于水库周边, 粉尘影响较小, 故呼吸性粉尘吸收系数与  $\text{NO}_2$  变化趋势较为一致。

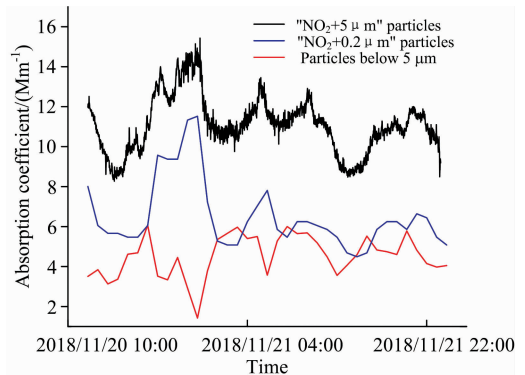


图 8 环境大气呼吸性粉尘测量  
Fig. 8 Measurement of respirable dust in the ambient atmosphere

## 4 结 论

基于 405 nm 蓝光激光器研制了光声光谱测量呼吸性粉尘的系统。通过光声池的优化和缓冲隔板的设计有效降低了本底噪声和稳定了系统, 实现了  $2.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  和  $0.448 \text{Mm}^{-1}$  的系统探测浓度下限及吸收系数。通过数浓度和粒径的不同组合测试, 得到了呼吸性粉尘吸收系数与数浓度和粒径的关系。将系统应用于环境大气中  $\text{NO}_2$  测量, 并与长光程差分吸收光谱系统对比, 结果表明一致性较好。应用于呼吸性粉尘测量, 得到了吸收系数的变化趋势, 可以满足自然悬浮状态下的呼吸性粉尘吸收系数实时测量。该系统结构简单小巧、成本低且不受其他气体干扰, 为呼吸性粉尘的精确检测提供了一种新的方法。

## References

- [1] Cohen R A, Petsonk E L, Rose C, et al. American Journal of Respiratory and Critical Care Medicine, 2016, 193(6): 673.
- [2] DUO Ying-quan, LIU Yao-nan, HU Xin-sheng(多英全, 刘焘楠, 胡馨升). Journal of Safety Science and Technology(中国安全生产科学技术), 2015, 11(2): 186.
- [3] Perret Jennifer L, Plush Brian Lachapelle, Philippe, et al. Respiratory, 2017, 22(4): 662.
- [4] WU Liang(巫亮). Environmental Engineering(环境工程), 2018, 36(7): 170.
- [5] JIANG Wa-lu, LEI Ya-fei, DAI Hao-dong, et al(姜万录, 雷亚飞, 代皓东). Chinese Journal of Scientific Instrument(仪器仪表学报), 2018, 39(1): 200.
- [6] LIU Dan-dan, JING Ran, TANG Chun-rui(刘丹丹, 景然, 汤春瑞). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2018, 43(3): 897.
- [7] CHEN Jian-ge, WU Fu-xiang, WANG Jie(陈建阁, 吴付祥, 王杰). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2015, 40(3): 713.
- [8] LIU Dan-dan, WEI Chong-yu, LI De-wen(刘丹丹, 魏重宇, 李德文). Journal of China Coal Society(煤炭学报), 2016, 41(7): 1866.
- [9] Utry N, Ajtai T, Pinter M, et al. Atmos Meas Tech, 2015, 8(1): 401.
- [10] FU Hua, XU Fan, XU Yao-song, et al(付华, 许凡, 徐耀松, 等). Chinese Journal of Sensors and Actuators(传感技术学报), 2013, 26(7): 922.
- [11] Yin X K, Dong L, Wu H P, et al. Sensors and Actuators B: Chemical, 2017, 247(8): 329.

- [12] Rodriguez-Paez C L, Carballo-Carballo A, Rico-Molina R, et al. *International Journal of Thermophysics*, 2017, 38(1): 1.
- [13] Pourhashemi A, Farrell R M, Cohen D A, et al. *Electronics Letters*, 2016, 52(24): 2003.
- [14] HU Ren-zhi, WANG Dan, XIE Pin-hua, et al(胡仁志, 王丹, 谢品华, 等). *Acta Optica Sinica(光学学报)*, 2016, 36(2): 312.
- [15] CHA Shen-long, LIU Kun, ZHU Gong-dong, et al(查申龙, 刘 隰, 朱公栋, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(9): 2673.

## Study on Photo-Acoustic Spectrum Detection Technology of Respiratory Dust Absorption Coefficient

JIN Hua-wei<sup>1, 2, 3</sup>, XIE Pin-hua<sup>1, 2</sup>, HU Ren-zhi<sup>1, 2\*</sup>, LIU Wen-qing<sup>1, 2</sup>, LI Zhi-yan<sup>1, 2</sup>, CHEN Hao<sup>1, 2</sup>, HUANG Chong-chong<sup>1, 2</sup>

1. Key Laboratory of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China

2. University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China

3. School of Mechanical Engineering, Anhui University of Science and Technology, Huainan 232001, China

**Abstract** In this paper, combined with the continuous, reliable and low-cost real-time detection requirements of respiratory dust concentration, a spectral application technology innovation is realized, and the detection system with respiratory dust based on photo-acoustic spectroscopy is proposed. The center wavelength of the spectrum of the low-power diode laser is 403.56 nm and the corresponding effective absorption cross-section of NO<sub>2</sub> is  $5.9485 \times 10^{-19} \text{ cm}^2 \cdot \text{mole}^{-1}$ . In addition, the resonance frequency of 1.35 kHz was obtained by using frequency scanning fitting. The influence analysis of photo-acoustic cell structure is carried out. The conclusion is drawn that the length parameter of the photo-acoustic cell has little influence on the background noise but great influence on the laser signal and the inner diameter parameter has some influence on the background noise but little influence on the background noise. Considering the influence of quality factors, processing conditions, service occasions and properties of the objects to be tested, length parameters of 120 mm and inner diameter parameters of 8 mm are selected. Besides, based on the buffer cavity structure with a length of 60 mm and an inner diameter of 25 mm, the influence of buffer partition on system stability is analyzed. The background noise is reduced and the signal fluctuation is optimized from  $(2.83 \pm 0.11)$  to  $(1.26 \pm 0.03) \mu\text{V}$ . The specific absorption coefficient of NO<sub>2</sub> with  $195.28 \text{ Mm}^{-1} \cdot (\text{mg} \cdot \text{m}^{-3})^{-1}$  is analyzed. The system is calibrated using NO<sub>2</sub> gas absorption at 405 nm. The fitting slope is  $0.04368 \mu\text{V}/\text{Mm}^{-1}$ , the correlation coefficient is 0.998, and the pool constant is  $300.24 \text{ Pa} \cdot \text{cm} \cdot \text{w}^{-1}$ . At the same time, the lower limit of the detected concentration and the absorption coefficient are  $2.30 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$  and  $0.448 \text{ Mm}^{-1}$ . The influence of absorption coefficient of respirable dust on polystyrene based on standard microspheres as aerosol generator is analyzed. What's more, the absorption coefficients of particles with different concentration and different diameters at the same concentration are measured. The absorption coefficient of respirable dust is directly proportional to the number concentration. The slope after linear fitting is  $10.598 \pm 0.64196$ , and the correlation coefficient is 0.993. The variance of the absorption coefficient curve is between  $3 \sim 4 \text{ Mm}^{-1}$ , and the absorption coefficient is affected by particles of different particle sizes. At the same time, the absorption coefficient increases with the increase of particle size. The NO<sub>2</sub> measurements have been carried out in the ambient atmosphere. The filter membrane with  $0.2 \mu\text{m}$  has been used to remove dust interference. The experimental results show that the concentration of NO<sub>2</sub> in the atmosphere is  $16.4 \sim 61.6 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , and the average concentration is  $41.1 \mu\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ . In order to verify the accuracy of the measurement system, the long-path differential absorption spectrum system developed by our group is compared. The test results show that there is a good correlation between the concentration of NO<sub>2</sub> measured by the photo-acoustic spectroscopy system and the LP-DOAS system. The slope after linear fitting is  $1.01178 \pm 0.04013$ , and the correlation coefficient is 0.94781. The respirable dust in the ambient atmosphere is measured. The filter membrane with  $5 \mu\text{m}$  is selected to filter the ambient atmosphere. The "NO<sub>2</sub> + 5  $\mu\text{m}$  dust" and "NO<sub>2</sub> + 0.2  $\mu\text{m}$  dust" are measured. The change trend of respirable dust is obtained, which can satisfy the real-time measurement of respirable dust absorption coefficient under natural suspension state.

**Keywords** Photo-acoustic spectroscopy; Respirable dust; Absorption coefficient; Long path differential optical absorption spectroscopy

\* Corresponding author

(Received Dec. 24, 2018; accepted Mar. 5, 2019)