

引用格式: CHENG Gang, CHEN Jia-jin, CAO Ya-nan, *et al.* Influence of Cylindrical Photoacoustic Cell Structure and Environmental Factors on Acoustic Eigenfrequency[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2020, **49**(2):0230001

程刚,陈家金,曹亚南,等. 圆柱形光声池结构及环境因素对声学本征频率的影响[J]. 光子学报, 2020, **49**(2):0230001

圆柱形光声池结构及环境因素对声学本征频率的影响

程刚¹, 陈家金², 曹亚南¹, 田兴¹, 刘锬², 曹渊²

(1 安徽理工大学 深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室, 安徽 淮南 232001)

(2 中国科学院安徽光学精密机械研究所, 合肥 230031)

摘 要:以典型的圆柱形光声池为研究对象,建立光声池声学仿真有限元模型,并在此基础上,研究了光声池中谐振腔、缓冲腔、进出口孔结构参数以及温度、湿度因素对其声学本征频率的影响规律.研究结果表明:圆柱形光声池的进、出口孔对其声学本征频率影响极不敏感,设计计算中可以忽略不计,谐振腔的长度影响最为敏感,其次为谐振腔的直径.此外缓冲腔的长度与直径对其亦有一定影响,因而在准确计算时需要加以考虑.温度与湿度对光声池声学本征频率的影响均呈现正线性增长规律,温度的影响随着谐振腔长度的增大而减小,湿度的影响随着温度的升高而增大,仅计算光声池的声学本征频率时,湿度的影响在室温环境下且湿度变动较小的条件下可以忽略.

关键词:光声光谱;光吸收;声学谐振腔;计算机仿真;气体传感器

中图分类号:TP212;TN249

文献标识码:A

doi:10.3788/gzxb20204902.0230001

Influence of Cylindrical Photoacoustic Cell Structure and Environmental Factors on Acoustic Eigenfrequency

CHENG Gang¹, CHEN Jia-jin², CAO Ya-nan¹, TIAN Xing¹, LIU Kun², CAO Yuan²

(1 State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines, Anhui University of Science and Technology, Huainan, Anhui 232001, China)

(2 Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Taking the typical cylindrical photoacoustic cell as the research object, the accurate finite element model of photoacoustic cell acoustic simulation is established. On this basis, the structure parameters of resonant cavity, buffer cavity, intake and outlet holes, as well as temperature and humidity in the photoacoustic cell are studied. The influence of factors on its acoustic eigenfrequency is discussed. The results show that the inlet and outlet holes of a cylindrical photoacoustic cell are insensitive to its acoustic eigenfrequency, and can be neglected in design calculation. The length of the resonator is the most sensitive, followed by the diameter of the resonator. The simulation results also show that the length and diameter of the buffer chamber have a certain influence on it, so it needs to be taken into account when calculating accurately. The influence of temperature and humidity on the acoustic eigenfrequency of photoacoustic cells shows a positive linear growth law. The sensitivity of temperature effect decreases with the increase of resonator length, and the sensitivity of humidity effect decreases with the increase of temperature. When calculating the acoustic eigenfrequencies of photoacoustic units, the effect of humidity can be neglected under room temperature and low humidity.

基金项目:国家重点研发计划(No.2017YFC0209700),国家自然科学基金(Nos.41730103,41575030,41475023)

第一作者:程刚(1986—),男,讲师,博士,主要研究方向为光声光谱检测. Email: chgmech@mail.ustc.edu.cn

收稿日期:2019-09-10;录用日期:2019-10-22

<http://www.photon.ac.cn>

Key words: Photoacoustic spectroscopy; Light absorption; Acoustic resonators; Computer simulation; Gas detectors

OCIS Codes: 300.6340; 300.6380; 120.6810; 280.4788

0 引言

19世纪80年代, BELL A G发现了光声现象, 此后, 由于激光器、高灵敏度麦克风以及微弱信号检测技术的快速发展, 光声光谱技术已成为较为成熟的物质检测与分析手段^[1-2]. 在光声光谱(Photoacoustic Spectroscopy, PAS)诸多应用领域中, 气体样品检测是最早和最为典型的技术示范, 气体光声检测技术具有高灵敏性、高选择性、快速响应、在线监测和无耗材等优点, 目前已广泛应用于农业生态^[3]、环境监测^[4-5]、工业生产^[6]、生物医学^[7]、石油化工^[8]等领域, 开发前景极为广阔. 在光声光谱检测系统的组成中, 光声池是最为核心的组件之一, 它不仅是样品气体装载的贮存器, 同时也是气体吸收光辐射后光-热-声能量转换的场所, 因而对于光声池的结构设计与性能计算尤为重要. 根据工作方式的不同, 光声池可分为共振型光声池与非共振型光声池, 由于气体产生的光声信号极其微弱, 通常情况下光声光谱检测装置采用的是驻波声振放大的原理, 即共振型光声池, 来实现信号增强与高质量信噪比. 共振型光声池在工作时须要求激励光源的调制频率与光声池声学本征频率吻合, 而光声池的声学本征频率与其结构形状、几何尺寸以及温度、湿度等环境因素有关, 因此准确计算光声池的声学本征频率与了解各类因素对其影响规律至关重要.

现有的光声池形状主要以圆柱形为主, 其声学本征频率的计算依据管道中声波传播理论, 且简化的计算公式已被研究人员广泛使用. KARBACH A等给出了圆柱形光声池的声学本征频率的计算公式^[9]; 考虑到圆柱光声池一维谐振腔的末端边缘效应, BESSON J P给出了公式中谐振腔长度修正因子^[10]. 根据传统的简化公式, 通常认为圆柱形光声池的声学本征频率主要与谐振腔长度相关, 与其半径相关但不敏感, 但实际上圆柱形光声池是由一段细长的谐振腔与两端衔接的缓冲腔构成, 并且腔体上还开设有进、出气孔等结构, 因而传统计算公式中仅考虑谐振腔的结构参量是存在缺陷的, 如BIJNEN F G C通过实验表明了圆柱形光声池缓冲腔几何尺寸对声学本征频率具有一定影响^[11]. 此外还有温度、湿度等环境因素对光声池声学本征频率也会产生影响, 陈伟根等通过理论与实验研究表明, 温度变化会引起光声池声学本征频率的漂移^[12]; 刘强等通过搭建相对湿度可精确调节的光声光谱测量系统, 研究并获得了湿度因素对光声池的声学本征频率及其性能的影响情况等^[13].

现有文献中, 有关各类参量对光声池声学本征频率的影响的系统化研究较少, 在以往的处理中, 光声池的声学本征频率主要通过后期实验进行标定, 然而这种方法并不有益于光声池的前期设计工作. 近年来, 数值模拟已成为一种准确与快速的辅助设计方法, 它不仅可以减少实物样机的制作时间和降低材料成本, 同时还具有很强的产品设计的预研特点, 为此本文将借助数值模拟技术, 以圆柱形光声池为研究对象, 结合实验建立较为准确的光声池声场仿真模型, 研究并分析光声池中谐振腔、缓冲腔、进出气孔结构参数以及温度、湿度等环境因素对其影响规律, 从而为光声池的前期设计提供技术支持.

1 光声光谱理论与实验装置

1.1 理论基础

光声光谱气体检测是以吸收光谱为基础理论, 基于光-热-声效应实现对气体定性与定量测量的一种间接式检测技术. 气体光-热-声效应是指样品气体吸收特定波长与调制的光能后会由基态向激发态跃迁, 由于气体分子的无辐射弛豫现象, 气体分子会由激发态退激至基态并释放能量, 释放的能量使气体按光能调制的频率产生周期性加热. 根据气体定律, 时变温度在光声池内会激发相应的压力声波, 利用高灵敏度声学传感装置如麦克风、石英音叉、压电薄膜等便可以感知出压力声波, 进而通过反演计算获得气体的浓度等相关信息, 这种光-热-声物理过程可以用数学方程描述为^[14]

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c_0^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = - \left[\frac{(\gamma-1)}{c_0^2} \right] \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中, p 表示声压, c_0 表示声速, H 表示热功率密度源, γ 表示样品气体的比热容比.

样品气体低浓度情况下, 气体光声信号与其浓度成正比例关系, 对应关系式为

$$S_{PA} = S_m P_{laser} C_{cell} \alpha c \quad (2)$$

式中, S_{PA} 表示光声信号值, S_m 表示麦克风灵敏度, P_{laser} 表示激光功率, C_{cell} 表示光声池池常数, α 表示样品气体吸收系数, c 表示样品气体体积浓度。

对于可视为一维谐振腔的圆柱形光声池而言, 在两端开口或两端封闭的边界条件下, 根据相关理论, 光声池一阶纵向声学本征频率的计算公式为^[15]

$$f_{100} = \frac{c_0}{2L_{eff}} \quad (3)$$

$$L_{eff} = L_c + \frac{8}{3\pi} D_c \quad (4)$$

式中, f_{100} 表示光声池一阶纵向声学本征频率, L_{eff} 表示谐振腔修正长度, L_c 表示谐振腔长度, D_c 表示谐振腔直径。

在小振幅声波情况下, 根据理想气体的物态方程, 可以求得声速与气体压强及密度之间的关系为^[16]

$$c_0 = \sqrt{\frac{\gamma P_0}{\rho_0}} = \sqrt{\frac{\gamma R}{M} T} \quad (5)$$

式中, γ 表示气体的比热比; P_0 表示气体压强; ρ_0 表示气体密度; M 表示气体摩尔量; R 表示气体常数; T 表示热力学温度。

1.2 光声池与实验装置

典型的圆柱形光声池的结构组成如图 1 所示, 整个光声池是以硬铝材料的长方体外壳为基础, 光声池外壳中部为产生声学驻波的圆柱形谐振腔, 谐振腔两端衔接有降低声学背景噪声的圆柱形缓冲腔, 缓冲腔正交位置上方开设有用于进气和出气的进、出气口, 紧贴谐振腔正交位置上加工有开音孔, 其上方开设有用于安装高灵敏度麦克风的插槽孔。谐振腔长度与直径分别为 $L_c = 100$ mm, $D_c = 10$ mm; 缓冲腔长度与直径分别为 $L_{buff} = 50$ mm, $D_{buff} = 40$ mm; 进、出气孔间距与直径分别为 $L_{let} = 165$ mm, $D_{let} = 7.9$ mm; 开音孔高度与直径分别为 $L_k = 1$ mm, $D_k = 3$ mm; 插槽孔气隙与直径分别为 $L_g = 1.5$ mm, $D_g = 13.5$ mm。

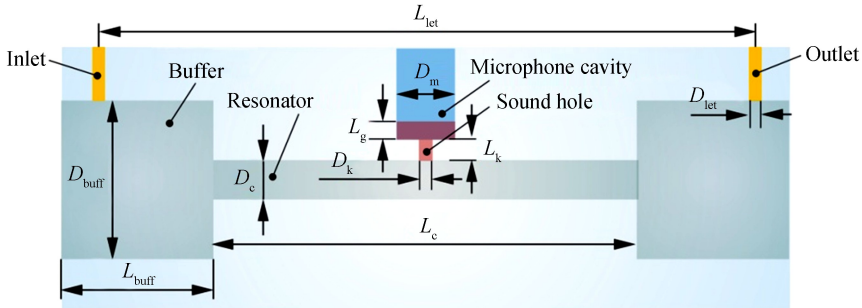


图 1 圆柱形光声池结构组成

Fig.1 Structure composition of cylindrical photoacoustic cell

建立的光声光谱气体检测实验系统示意图如图 2 所示, 实验中以浓度为 $508 \mu\text{L/L}$ 的 $\text{CH}_4 : \text{N}_2$ 混合气为样品气体, 采用波长调制 (Wavelength Modulation Spectroscopy, WMS) 与二次谐波检测技术, 所选 CH_4 目标探测谱线为 $6\,046.95 \text{ cm}^{-1}$, 选择连续波分布反馈 (Distributed Feedback, DFB) (NEL, $1\,653 \text{ nm}$) 作为激励光源, 最大输出功率近 10 mW , 通过激光控制器控制激光器 (THORLABS, CLD1015) 的注入温度和电流, 进而改变激光器的输出波长, 通过函数发生器 (RIGOL, DG1032) 对激光波长进行扫描与频率调制, 采用高灵敏声学传感器 (北京声望, MP201) 感知声压信号, 通过锁相放大器 (Stanford Research System, SR830) 进行二次谐波的解调, 后期利用采集卡 (NI, USB-6210) 与自行编制的软件程序对信号数据进行采集与处理, 实验前将波长调制深度与锁相积分时间等参数调整到最优化值, 后期参数均保持不变, 实验过程中不断调节激光的调制频率 f , 精确度为 1 Hz , 当采集的二次谐波幅值达到最大时即认定 $2f$ 为光声池的一阶纵向声学本征频率。

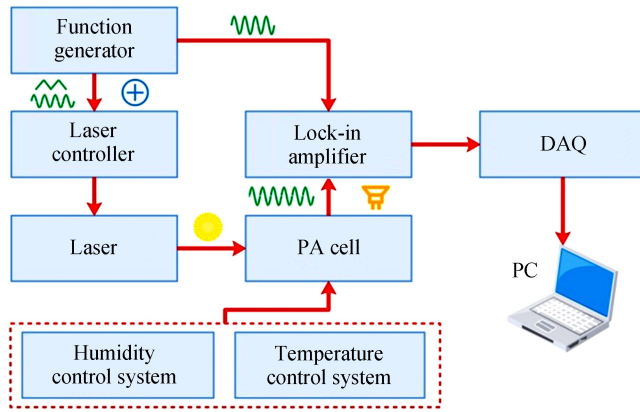


图2 光声光谱气体检测实验系统示意图

Fig.2 Schematic diagram of photoacoustic spectrum gas detection experimental system

2 仿真验证与因素分析

2.1 仿真计算与实验验证

利用有限元分析方法(Finite Element Analysis, FEA)对光声池的声学共振模态与声学本征频率进行仿真计算.光声池三维数字模型以图1结构为基础,抽取其内部空气域作为实体模型,构建的光声池有限元模型如图3(a)所示.仿真中定义光声池腔体中气体介质为氮气,其温度、压力等条件的施加与实验工况保持相同,通过设置声学边界条件、网格划分和求解参数等,得到仿真结果如图3(b)所示,可知光声池被激发的纵向声学本征频率值为1612 Hz,声学振型分布显示声压最大值位于谐振腔的中部即麦克风的采集位置,声压值沿谐振腔两端逐渐降低,缓冲腔处的声压接近于0,具体声压分布情况如图3(c)光声池轴向声压路径扫描图,由此推断,开设在缓冲腔上方的进、出口孔腔体占比虽然较大,但对光声池激发的本征声场分布影响将非常弱.

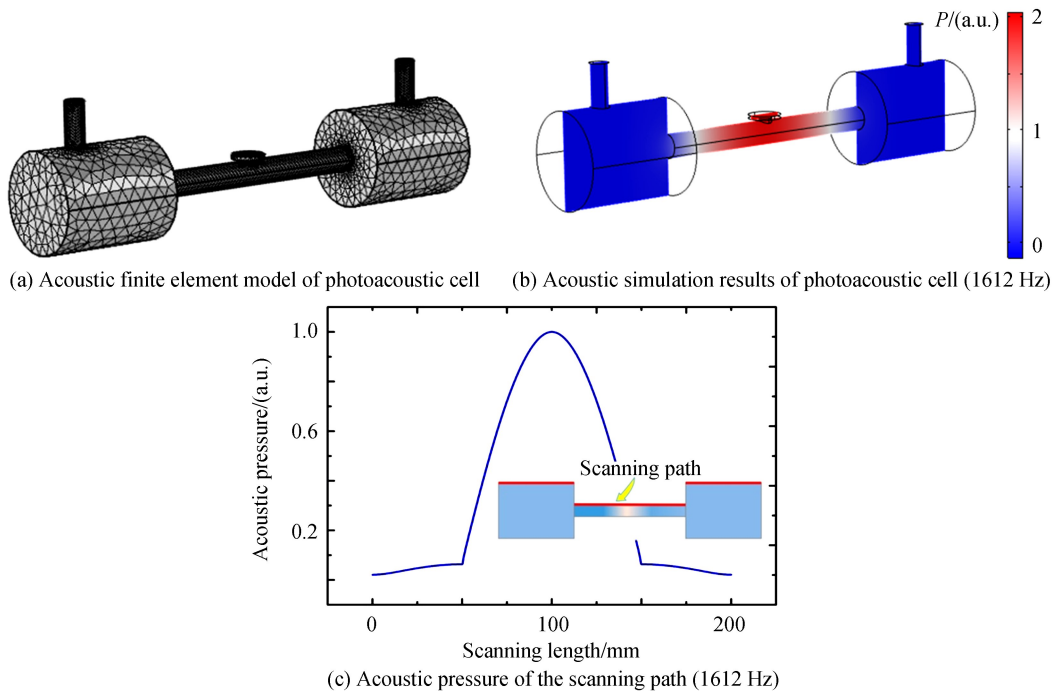


图3 光声池声学有限元模型与仿真结果

Fig.3 Acoustic finite element model and simulation results of photoacoustic cell

通过所建立的实验平台实测光声池的声学本征频率,结合理论计算公式,三者结果如表1所示,可以看出,三者之间非常吻合,实验测量与有限元仿真误差约1.0%,与理论计算误差约为0.75%,计算误差微小,可

以认定有限元仿真计算的可行性. 仅从结果比较, 理论计算比有限元仿真更为准确一些, 但理论计算公式(3)、(4)中只有谐振腔的长度与半径两个变量, 计算公式明显存在缺陷, 后文将会对缓冲腔几何参数等因素进行分析.

表1 光声池理论、有限元仿真及实验得到的声学本征频率值

Table 1 Acoustic eigenfrequency results by photoacoustic cell theory, finite element simulation and experiment

Scheme	Theoretical value	FEA value	Experimental value
Frequency/Hz	1 608	1 612	1 596

2.2 进、出口孔几何参数影响

保持其它因素不变, 以光声池的进、出口间距 L_{let} 与直径 D_{let} 为变量, 通过有限元仿真计算光声池的声学本征频率随变量变化的规律, 结果如图4所示. 从图中可知, 当 L_{let} 与 D_{let} 两参数变化时, 光声池声学本征频率变化极其微弱, 可忽略不计, 说明进、出口孔对光声池声学本征频率影响极不敏感, 同时仿真结果也验证了2.1节中进、出口孔位于缓冲腔0声压的位置对声场影响较小的推断. 根据上述结论可知, 对于光声池进、出口孔的设计, 若位置选择在缓冲腔体上, 对光声池的声学本征频率基本不会产生影响, 因而在计算中可以忽略.

2.3 谐振腔几何参数影响

保持其它因素不变, 以光声池的谐振腔长度 L_c 与直径 D_c 为变量, 通过有限元仿真计算光声池的声学本征频率随变量变化的规律, 结果如图5所示. 从图中可知, 当 D_c 恒定时, 光声池声学本征频率随着 L_c 的增大而减小, 呈非线性函数规律, 与理论计算公式(3)吻合; 当 $D_c = 10$ mm, L_c 由 70 mm 增大到 140 mm 时, 光声池声学本征频率减小了 980 Hz, 减小幅度较大, 通过对数据的非线性函数拟合, 可计算出 $\partial f / \partial L_c |_{L_c=100} \approx -14.9$ Hz/mm, $\partial f / \partial L_c |_{L_c=70} \approx -21.9$ Hz/mm, $\partial f / \partial L_c |_{L_c=140} \approx -5.5$ Hz/mm, 可见谐振腔长度 L_c 对光声池声学本征频率的影响敏感度较高, 并随着 L_c 的增大其灵敏度趋于降低; 当 L_c 恒定时, 光声池声学本征频率随着 D_c 的增大而增大, 但增大幅度相对较小, 当 $L_c = 100$ mm, D_c 由 8 mm 增大到 12 mm 时, 光声池声学本征频率增加了 29 Hz, 影响灵敏度约为 7.3 Hz/mm. 由此可知, 改变谐振腔长度可以有效调节光声池的声学本征频率值.

2.4 缓冲腔几何参数影响

保持其它因素不变, 分别以光声池的缓冲腔长度 L_{buff} 与直径 D_{buff} 为变量, 在不同的谐振腔长度 L_c 条件下, 通过有限元仿真计算光声池的声学本征频率随变量变化的规律, 结果如图6、7所示. 从图6中可知, 当 L_c 恒定时, 光声池声学本征频率随着 L_{buff} 的增大而减小, 呈现线性函数关系, 但整体影响程度较弱, 当 $L_c = 100$ mm, L_{buff} 由 30 mm 增大到 65 mm 时, 光声池声学本征频率减小了 67 Hz, 影响灵敏度约为 -1.9 Hz/mm. 从图7中可知, 当 L_c 恒定时, 光声池声学本征频率随着 D_{buff} 的增大而减小, 其减小幅度越来越小, 当 $D_{\text{buff}} \geq 50$ mm 时, 光声池声学本征频率趋于稳定; 当 $L_c = 100$ mm, D_{buff} 由 20 mm 增大到 55 mm 时, 光声池声学本征频率减小了 64 Hz, 影响灵敏度约为 -1.8 Hz/mm. 可知在准确计算光声池的本征频率时应将缓冲腔的几何参数考虑在内, 而式(3)、(4)中没有缓冲腔参量, 因而需对传统的简化计算公式进行一定修正.

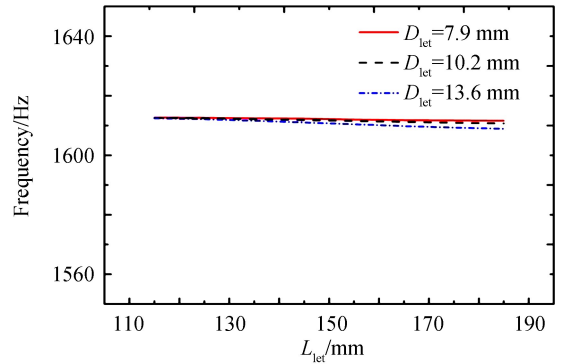


图4 进、出口孔几何参数影响

Fig.4 Influence of geometric parameters of inlet and outlet

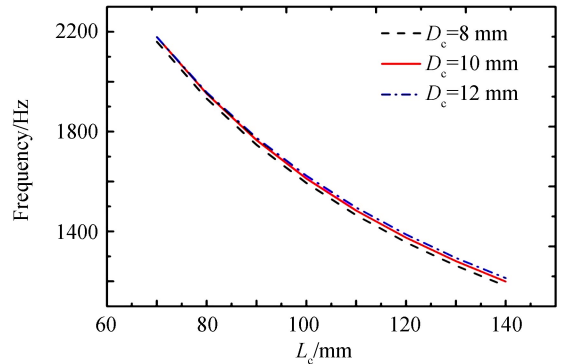


图5 谐振腔几何参数影响

Fig.5 Influence of geometric parameters of resonator

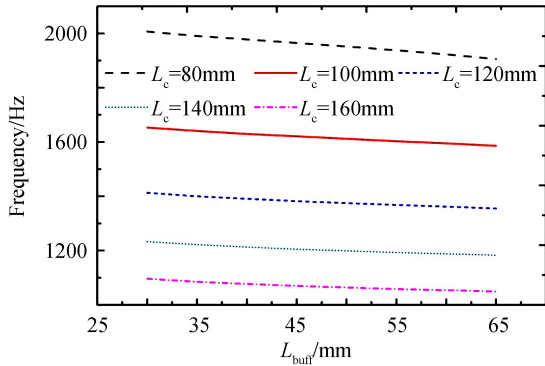


图6 缓冲腔长度影响

Fig.6 Effect of buffer length

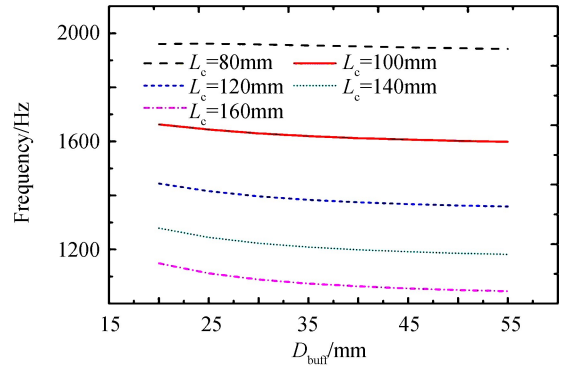


图7 缓冲腔半径影响

Fig.7 Effect of buffer radius

2.5 温度、湿度因素影响

光声池的性能易受到外界环境的干扰而发生改变,温度、湿度等是最常见的外界扰动因素,包括昼夜温差、仪器设备散热、雾气雨水天气等.温度、湿度变化会导致光声池本征频率的漂移,进而会导致检测结果的不准确,因而研究温度与湿度因素对光声池本征频率的影响规律可为光声检测结果的修正提供理论依据.保持其它因素不变,以光声池的环境温度 T 为变量,通过有限元仿真计算光声池的声学本征频率随变量变化的规律,结果如图8所示.可知当 L_c 恒定时,光声池声学本征频率随着 T 的增大而增大,呈现线性函数关系,当 $L_c=100$ mm, T 由 10°C 增大到 45°C 时,光声池声学本征频率增加了 96 Hz,影响灵敏度约为 2.1 Hz/ $^\circ\text{C}$.同时从图中可知, L_c 越小时,光声池声学本征频率的增长率相对偏大,当 $L_c=80$ mm,温度影响灵敏度约为 3.3 Hz/ $^\circ\text{C}$,当 $L_c=160$ mm,温度影响灵敏度约为 1.8 Hz/ $^\circ\text{C}$,因此光声光谱检测环境中温度变动较大时,光声池在设计时可以适当增加谐振腔的长度,以此降低温变对光声池本征频率影响的灵敏性.

保持其它因素不变,以光声池的环境相对湿度 RH 为变量,通过有限元仿真计算光声池的声学本征频率随变量变化的规律,根据相关理论可知,相对湿度与温度因素密切相关,对应关系式为^[17]

$$h = 0.01RH \frac{e(T)}{P_0} \quad (6)$$

$$c_0 = \sqrt{\gamma \frac{R}{28 - 11h} T} \quad (7)$$

式中, h 表示样品气体中水分子的分压; $e(T)$ 表示温度为 T 时水的饱和蒸汽压,如表2^[18]所示; RH 表示相对湿度.

表2 不同温度下的水的饱和蒸汽压

Table 2 Saturated vapor pressure of water at different temperatures

$T/^\circ\text{C}$	10	20	30	40	50
$e(T)/\text{Pa}$	1 228	2 339	4 245	7 381	12 345

针对不同温度条件的湿度影响进行了仿真计算,结果如图9所示.可知光声池声学本征频率随着 RH 的增大而增大,呈现线性函数关系,并且 T 较高时,其线性增长率相对偏大;当 $T=10^\circ\text{C}$, RH 由 0 增大到 70%

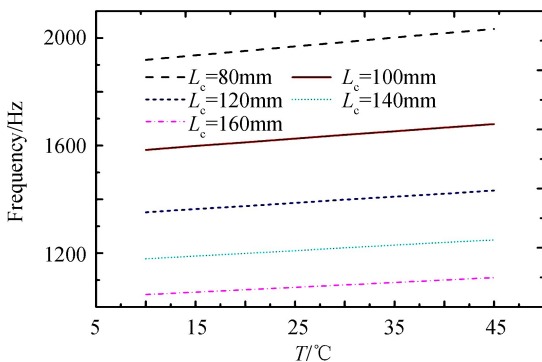


图8 温度因素影响

Fig.8 Effect of temperature

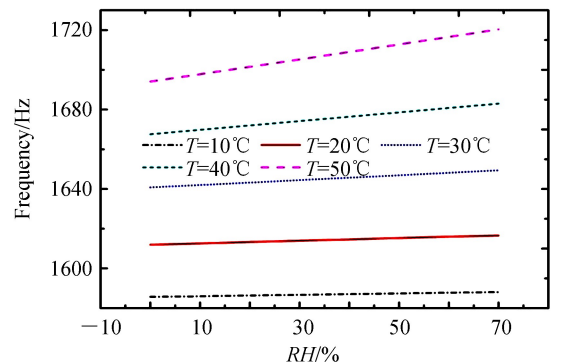


图9 相对湿度因素影响

Fig.9 Effect of humidity

时,光声池声学本征频率仅增加了 2.4 Hz,影响灵敏度约为 0.03 Hz/%;当 $T=50^{\circ}\text{C}$,RH 由 0 增大到 70% 时,光声池声学本征频率增加了 26.3 Hz,影响灵敏度约为 0.38 Hz/%.显然温度较高时,相对湿度的影响灵敏性较强,但整体而言,湿度对光声池的声学本征频率的影响并不强烈,在室温条件且湿度变动较小的环境下可以忽略湿度变化所引起声学本征频率漂移的影响.

3 结论

本文结合实验与仿真研究分析了圆柱形光声池结构和环境因素对其声学本征频率的影响,结果表明:

1)光声池进、出口孔对其声学本征频率的影响极不敏感,若开设位置选择在缓冲腔体上,对于光声池的声学本征频率几乎无影响,可以直接忽略;

2)谐振腔长度对光声池声学本征频率的影响最为敏感,是其主要因素,谐振腔的直径影响较为敏感,缓冲腔的长度与直径也具有一定影响,准确计算光声池的声学本征频率时需将其尺寸参数考虑在内,因而简化的理论计算公式需做进一步修正;

3)光声池声学本征频率随着温度与相对湿度的增大而增大,均呈现线性增长关系,温度影响灵敏性随着谐振腔长度的增大而减小,在温度较高时相对较强,但在室温环境且湿度变动较小的条件下可忽略其变化所带来的影响.

参考文献

- [1] MIKLOS A, HESS P. Application of acoustic resonators in photoacoustic trace gas analysis and metrology[J].*Review of Scientific Instruments*, 2001, **72**(4):1937-1955.
- [2] WU Hong-peng, YIN Xu-kun, DONG Lei, et al. Simultaneous dual-gas QEPAS detection based on a fundamental and overtone combined vibration of quartz tuning fork[J]. *Applied Physics Letters*, 2017, **110**(12):121104.
- [3] WEBBER M E, MACDONALD T, PUSHKARSKY M B, et al. Agricultural ammonia sensor using diode lasers and photoacoustic spectroscopy[J]. *Measurement Science & Technology*, 2005, **16**(2005):1547-1553.
- [4] JAHJAH M, JIANG W Z, SANCHEZ N P, et al. Atmospheric CH_4 and N_2O measurements near Greater Houston area landfills using a QCL-based QEPAS sensor system during DISCOVER-AQ 2013[J]. *Optics Letters*, 2014, **39**(4):957-959.
- [5] MA Ying, YU Liang, ZHENG Hua-dan, et al. Optimization of overtone resonance based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy spectrophone[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(8):0811002.
马英,余亮,郑华丹,等.基于泛频振动的石英增强光声光谱测声器优化设计[J].*光子学报*, 2017, **46**(8):0811002.
- [6] MA Yu-fei, QIAO Shun-da, HE Ying, et al. Highly sensitive acetylene detection based on multi-pass retro-reflection-cavity-enhanced photoacoustic spectroscopy and a fiber amplified diode laser[J]. *Optics Express*, 2019, **27**(10): 14163-14172.
- [7] LIU Kun, CAO Yuan, WANG Gui-shi, et al. A novel photoacoustic spectroscopy gas sensor using a low cost polyvinylidene fluoride film[J]. *Sensors and Actuators B: Chemical*, 2018, **227**(2018):571-575.
- [8] QIAO Shun-da, MA Yu-fei, HE Ying, et al. A sensitive carbon monoxide sensor based on photoacoustic spectroscopy with a 2.3 μm mid-infrared high-power laser and enhanced gas absorption[J]. *Sensors*, 2019, **19**(2019):3202.
- [9] KARBACH A, HESS P. High precision acoustic spectroscopy by laser excitation of resonator modes[J].*The Journal of Chemical Physics*, 1985, **83**(3):1075-1083.
- [10] BESSON J P, SCHILT S, THEVENAZ L. Multi-gas sensing based on photoacoustic spectroscopy using tunable laser diodes[J]. *Spectrochimica Acta Part A Molecular and Biomolecular Spectroscopy*, 2004, **60**(14):3449-3456.
- [11] BIJNEN F G C, REUSS J, HARREN F J M. Geometrical optimization of a longitudinal resonant photoacoustic cell for sensitive and fast trace gas detection[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1996, **67**(8):2914-2923.
- [12] CHEN Wei-gen, LIU Bing-jie, ZHOU Heng-yi, et al. The temperature characteristics of photoacoustic spectroscopy detection for dissolved gases in transformer oil[J].*Transactions of China Electrotechnical Society*, 2010, **25**(11):15-20.
陈伟根,刘冰洁,周恒逸,等.变压器油中溶解气体光声光谱检测的温度特性[J].*电工技术学报*, 2010, **25**(11):15-20.
- [13] DU Xiao-fan, QIAN Xian-mei, LIU Qiang, et al. Effect of relative humidity on photoacoustic signal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2017, **37**(2):0230003.
都小凡,钱仙妹,刘强,等.相对湿度对光声信号的影响研究[J].*光学学报*, 2017, **37**(2):0230003.
- [14] ZHA Shen-long, LIU Kun, TAN Tu, et al. Application of photoacoustic spectroscopy in multi-component gas concentration detection[J].*Acta Photonica Sinica*, 2017, **46**(6):0612002.
查申龙,刘锟,谈图,等.光声光谱技术在多组分气体浓度探测中的应用[J].*光子学报*, 2017, **46**(6):0612002.
- [15] CHENG Gang, CAO Yuan, LIU Kun, et al. Numerical calculation and optimization of photoacoustic cell for photoacoustic spectrometer[J]. *Acta Physica Sinica*, 2019, **68**(7): 074202.

- 程刚,曹渊,刘锬,等. 光声光谱检测装置中光声池的数值计算及优化[J].物理学报,2019, **68**(7): 074202.
- [16] 杜功焕,朱哲民,龚秀芬.声学基础[M].南京:南京大学出版社,2012.
- [17] LIU Qiang. Research on absorption properties of atmospheric aerosol based on photoacoustic spectroscopy[D]. Hefei: University of Science and Technology of China,2014:55-56.
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,2014:55-56.
- [18] 严家驊,余晓福.水和水蒸气热力性质图表[M].北京:高等教育出版社,2001.