

## 亥姆霍兹光声光谱多气体检测器设计和优化

赵彦东<sup>1,2</sup>, 方勇华<sup>1</sup>, 李扬裕<sup>1</sup>, 李大成<sup>1</sup>

1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 通用光学定标与表征技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 光声光谱技术作为一种先进的光学检测技术, 已成功应用于各种痕量气体检测场合。实现多气体的光声光谱检测, 同时保证高的检测灵敏度是检测器设计的核心目标。针对测量需求设计, 优化了一种基于亥姆霍兹共振的光声光谱多气体检测器, 使用有限元分析方法对检测器进行了设计和仿真分析, 对光声池的结构参数以及温度和压力特性进行了优化和分析。仿真结果表明: 对光声池结构参数进行优化和对温度压力进行控制可以提高检测器检测灵敏度; 采用光源 IR-19 时, 激发腔  $\Phi 38\text{ mm} \times 9\text{ mm}$ , 连接管  $\Phi 5.9\text{ mm} \times 10.2\text{ mm}$  和探测腔  $\Phi 30\text{ mm} \times 5.8\text{ mm}$  为光声光谱检测器的最优化参数。经实验验证, 检测器对 CO 气体的检测精度达到 5.08 ppm (1 ppm =  $10^{-6}$ )。研究结果为痕量多气体的光声光谱检测提供了设计参考。

**关键词:** 光声光谱; 亥姆霍兹共振; 有限元分析; 参数优化

**中图分类号:** O433.1 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA201746.0620005

## Design and optimization of Helmholtz-based photoacoustic spectroscopic sensor for multi-gas detection

Zhao Yandong<sup>1,2</sup>, Fang Yonghua<sup>1</sup>, Li Yangyu<sup>1</sup>, Li Dacheng<sup>1</sup>

1. Key Laboratory of Optical Calibration and Characterization, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. University of Science and Technology of China, Hefei 230031, China)

**Abstract:** As one of the most advanced optical detection techniques, photoacoustic spectroscopy has been successfully used in the area of trace gas detection. Realizing a multi-gas photoacoustic spectroscopy sensor while keeping a high detection sensitivity was the design purpose. For the detection application, a multi-gas photoacoustic spectroscopy sensor based on the Helmholtz resonance was designed and optimized. The sensor was modeled by using the finite element method and optimized for its parameters, including the dimensions of excitation cavity, connecting tube and detection cavity. Also the temperature and pressure properties of the sensor were investigated. As a result, the detection sensitivity could be improved by optimizing the parameters and controlling the temperature and pressure. The optimizing result

收稿日期: 2016-10-10; 修订日期: 2016-11-20

基金项目: 安徽省自然科学基金(1608085QD80)

作者简介: 赵彦东(1990-), 男, 博士生, 主要从事光声光谱检测技术方面的研究。Email: ydz2007274067@126.com

导师简介: 方勇华(1966-), 男, 研究员, 博士生导师, 主要从事遥感与光谱图像分析和红外遥感, 大气辐射校正等方面的研究。

Email: yhfang@aiofm.ac.cn

shows that the gas sensor has a best performance with the infrared light source IR-19, and parameters with excitation cavity of  $\Phi 38 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ , connecting tube of  $\Phi 5.9 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$  and detection cavity of  $\Phi 30 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$ . Tested by the experiment, the detection limit of 5.08 ppm is achieved for the CO gas detection. The study results also provide the reference for design of photoacoustic sensor in multi-gas detection.

**Key words:** photoacoustic spectroscopy; Helmholtz resonance; finite element analysis; parameter optimization

## 0 引言

光声光谱技术(PAS)作为一种先进的光学检测技术<sup>[1-2]</sup>,已经广泛应用于各种痕量气体检测领域。在大气研究<sup>[3]</sup>、工业过程<sup>[4]</sup>、医学诊断<sup>[5-6]</sup>、食品工业<sup>[7]</sup>以及污染物监测<sup>[8]</sup>等应用场合,通常需要对浓度量级为 PPM(Parts Per Million)的多种气体混合物进行定量检测分析,光声光谱技术在这方面有着巨大的应用潜力。其具有零背景检测,高灵敏度,高选择性,无损检测,在线实时检测和便携式检测等优点<sup>[9]</sup>。

基于亥姆霍兹共振的光声光谱气体检测方法,国内外学者做了大量相关研究。Stefano Barbieri 使用出射波长  $9.4 \mu\text{m}$  的 QCL(量子级联激光器)和亥姆霍兹光声池对乙醇气体进行检测,得到 1 ppm( $1 \text{ ppm} = 10^{-6}$ )的检测精度<sup>[10]</sup>。上述方法采用激光器只针对单一组分气体进行检测,而且 QCL 激光器成本较高。Mario Mattiello 采用亥姆霍兹共振光声池,结合铽化物激光器,对甲烷、氨气、氟化氢和一氧化碳进行了检测并得到相对较高的检测灵敏度<sup>[11]</sup>。此方法可以对四种气体同时进行检测,其使用的激发光源为红外连续可调谐激光器,但前提是待测气体的目标吸收峰波长相距较近(分别为  $2.35$ 、 $2.24$ 、 $2.45$ 、 $2.33 \mu\text{m}$ )。针对目标波长吸收峰相距较远的多气体测量,采用这种激光器难以实现。该研究采用宽光谱段光源和相应的滤光片获取不同波段的光,以实现多种气体(包括吸收峰相距较远)的种类和浓度进行检测。多气体测量中,由于滤光片透过光能量较低,且每种气体对应的红外吸收峰强度有差异,保证每种气体的检测灵敏度尤为重要。所以有必要通过对光声池结构参数优化得到高检测灵敏度。

在光声光谱技术中,通常使用高灵敏度微音器探测光声池中声压<sup>[12]</sup>。最近的相关研究报道了几种新型声波探测器以提高检测灵敏度,例如石英音叉<sup>[13]</sup>,

MEMS 微音器<sup>[14]</sup>和悬臂梁<sup>[15]</sup>等。考虑到设计成本以及亥姆霍兹共振池的低共振频率特性,选择微音器为光声光谱检测的声波探测器。

文中针对基于亥姆霍兹共振的光声光谱技术开展了两方面工作:一是使用有限元分析方法对光声池的设计和优化进行了仿真,包括激发腔,探测腔和连接管的结构特性,从而得到最优优化参数;二是对光声池内部声场的温度和压力特性进行了研究分析,得到在正常环境条件下,光声光谱检测对应的最优检测温度和压力。并通过建立实验装置对仿真优化的合理性进行了验证。

## 1 理论分析

光声池内声场的分布可以通过求解池内波动方程所得到。当光声池的尺寸远小于声波波长时,声波在光声池内各点处声压近似相同,不存在声波模式。亥姆霍兹共振器即属于这种情况,其包括两个空腔和中间相连的细管,如图 1(a)所示。不同于常用纵向共振光声池的共振模式,亥姆霍兹共振模式由气体在腔之间来回谐振而激发,池内部并没有形成独立传播的声波<sup>[16]</sup>。当连接管尺寸远小于两个空腔时,亥姆霍兹共振器的工作原理可以用 RLC 等效电路来描述,如图 1(b)所示。其中,共振器的两端两个空腔等效为电容,连接管等效为电感和电阻。故亥姆霍兹共振器的共振频率可以按下式求得:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L \cdot C_{eq}}} \quad (1)$$

式中: $C_{eq}$ 表示等效电容。

$$C_{eq} = \frac{C_1 \cdot C_2}{C_1 + C_2} \quad (2)$$

共振品质因素由下式给出:

$$Q = 2\pi f_0 \frac{L}{R} \quad (3)$$

在此等效模型中, $R$ 、 $L$ 和 $C$ 参数由共振器的尺

寸和形状决定,具体理论在相关研究有详细分析<sup>[11]</sup>。

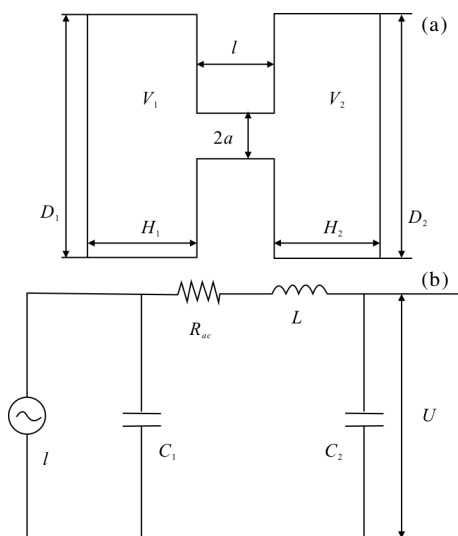


图 1 亥姆霍兹共振器及等效电路

Fig.1 Helmholtz resonator and equivalent circuit

光声池的共振效率通常使用池常数来描述,池常数越大表示共振池的效率越高。根据以上的理论推导可以得到在共振条件下池常数的表达式:

$$C_{cell}(\gamma-1) = \frac{\pi a^2 Q c^2}{l' V_1 V_2 (2\pi f_0)^3} \propto a^{\frac{1}{2}} \cdot (l+1.7a)^{\frac{1}{4}} \cdot V^{\frac{3}{4}} \quad (4)$$

由公式(4)可以看出,光声池共振效率由光声池的尺寸决定。连接管尺寸越大共振效率越高;两个腔的体积越小共振效率越高。但是,亥姆霍兹共振器的等效模型成立的前提是连接管的尺寸远小于腔的尺寸,当连接管的尺寸增大到一定程度,亥姆霍兹共振理论不成立<sup>[11]</sup>,故在实际设计时,在得到最大共振效率同时需考虑亥姆霍兹共振的成立条件。

## 2 光声池结构设计

基于亥姆霍兹共振的光声池结构如图 2(a)所示。亥姆霍兹共振池两个腔分别定义为激发腔和探测腔,中间管定义为连接管。在激发腔腔壁装有窗口,光源通过窗片照射到激发腔内部激发气体产生光声效应。激发腔内声压通过声波共振传递到检测腔,麦克风安装在探测腔底部以检测声压。设计中采用光源为 IR-19 型非相干光源,光谱范围为 1~20 μm,配合对应的窄带滤光片可以对多气体同时检测。光源可以近似看作黑体辐射,辐射波长分布与光源本身温度有关,辐射出射度由普朗克公式可以得到。光源发光体

由氮化硅棒制成,为了得到高灵敏度,光源功率 19.5 W,最高温度可达到 1175 °C。采用不同的光源时,其功率改变,辐射波长分布基本不变。在光源后部设计椭球面反射镜将光束反射到光声池激发腔内。

气体的光声效应发生在激发腔内,故激发腔的设计主要考虑池内光与声场的耦合,具体因素包括入射窗口尺寸,激发腔形状以及尺寸。光源光束特性如图 2(b)所示。经椭球面反射镜聚焦后光束聚焦截面直径约为 9 mm,整个光晕直径达到 40 mm,焦距为 20 mm。采用圆柱腔为激发腔的形状,窗口位于柱面侧壁,池内壁镀金以实现光的多次反射。由于光束的最小直径约为 9 mm,焦距约为 20 mm,腔的初始结构选择半径 20 mm,高度 9 mm。窗口安装 ZnSe 窗片和 CPC(Compound Parabolic Concentrator)将光源发散的光收集到激发腔内部以提高光能利用率。连接管初始尺寸选择半径为 3 mm,长度 10 mm。探测腔的设计主要考虑微音器和出气口的安装尺寸,选择初始半径为 17 mm,高度为 8 mm。以上的结构参数均为初始结构,具体参数优化在以下部分介绍。

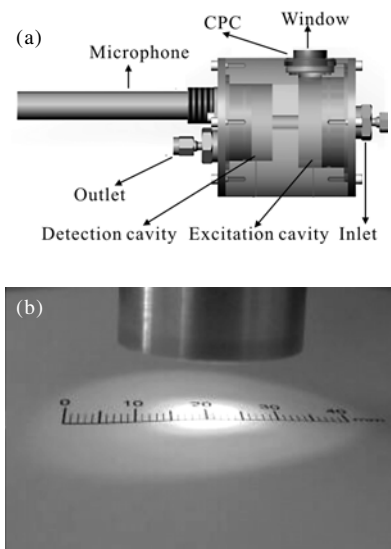


图 2 亥姆霍兹光声池结构设计

Fig.2 Design of Helmholtz photoacoustic cell

## 3 仿真及优化分析

由于光声池内部光声效应以及声场耦合效率比较复杂,对光声池内声场特性进行解析计算具有一定的难度。有限元分析方法可以通过对池体内部进行精细网格划分,在每个单元求解热声波方程,从而求得池内

气体的声场特性，以完成对光声池内部声场特性的仿真计算。

### 3.1 模型建立

使用 Comsol Multiphysics 有限元分析软件对

光声池进行建模和仿真。光声检测器测量目标气体的载气为氮气，检测环境温度为 293 K，压力为一个大气压。模型所用到的仿真条件如表 1 所示。

表 1 仿真条件

Tab.1 Simulation conditions

Heat capacity at constant pressure / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Heat capacity at constant volume / $\text{kJ} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$	Ratio of specific heats	Dynamic viscosity / $\text{Pa} \cdot \text{s}$	Speed of sound / $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$	Density / $\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$	Thermal conductivity / $\text{W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$
1.038	0.741	1.401	175.44	349	1.25	0.024 75

光声池的几何模型如图 3 所示。光声池的网格划分采用自由四面体划分,如图 3(a)所示。由于气体光声效应产生过程为气体分子吸收光能,通过弛豫辐射将光能转换为热能,在仿真时采用研究模块为热声学模块。光声池的边界条件均设置为刚性边界条件;光束在激发腔内部经过多次反射充满整个腔,故声场的激发源设置为整个激发腔区域。针对不同的激发光源,仿真模型中采用归一化声压来描述池内声场,这样仿真结果对不同的光源都适用。对模型进行的研究方法设置为频域特性研究,通过声波方程计算可以得到光声池的频域特性,包括共振频率,品质因素以及归一化声压。当滤光片切换时,透过滤光片光的波长发生变化。由于气体分子的光声效应将光转化为热,所以对应热源的功率会改变,而光声池归一化声压同

样适用,共振频率和品质因素作为池固有特性不变。光声池内声压的分布如图 3(b)所示。

微音器的频率响应在较宽范围(10 Hz~6 kHz)保持恒定,故在研究过程中,对光声池优化的指标主要是归一化声压和品质因素。当噪声一定时,归一化声压越大,光声信号的信噪比越高;当光声信号一定时,品质因素越高,共振频率范围内噪声越小,检测信噪比越高。

### 3.2 激发腔参数优化分析

首先研究激发腔尺寸对光声池的影响。在探测腔和连接管的尺寸保持初始结构参数的情况下对激发腔的半径和高度进行参数扫描,得到光声池频率响应和特性曲线,如图 4 所示。其中图(a)和(b)分别表示在不同半径和高度下的光声池特性曲线。

图 4(a)中,激发腔的半径由 15mm 变化到 25mm,光声池的共振频率由 1 305 Hz 降低到 1 050 Hz,和公式(1)算得的结果一致;品质因素由 207.1 降低到 174.1,归一化声压由 4.6 mPa 上升到 7.4 mPa。为达到最高信噪比,须在归一化声压和品质因素之间找最优参数,选择交点 19mm 激发腔半径为最优半径。图 4(b)显示了激发腔的高度由 6mm 变化到 12mm,对应共振频率,归一化声压和品质因素的变化情况。共振频率随高度增加而降低,归一化声压由 4.5 mPa

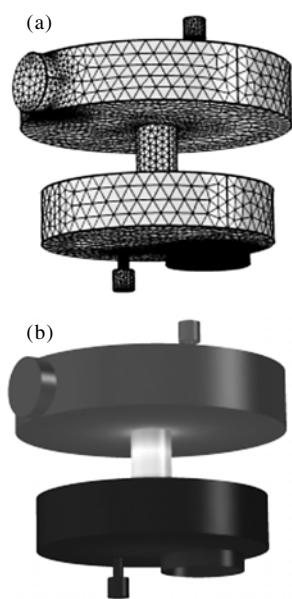
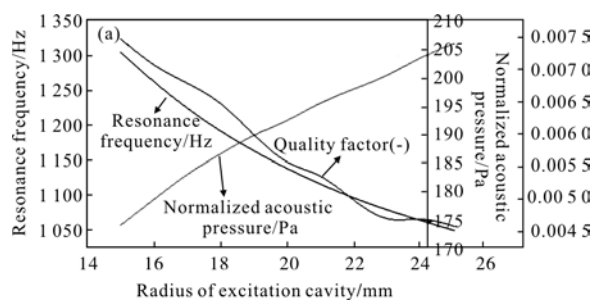


图 3 光声池有限元分析模型

Fig.3 Model of photoacoustic cell in finite element analysis software



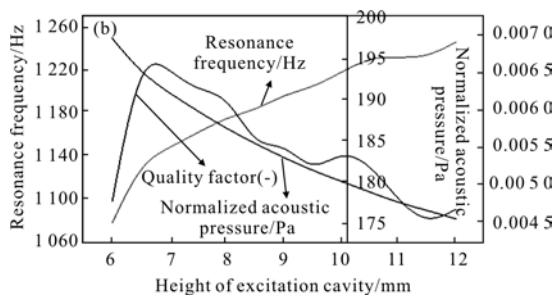


图 4 激发腔结构参数优化

Fig.4 Optimization for structure parameters of excitation cavity

增加到 6.9 mPa, 品质因素在高度为 6.5 mm 时达到极大值 196.0, 之后一直下降到 176.6。当激发腔的高度小于 6 时, 连接管相对腔的尺寸变大, 此时亥姆霍兹共振条件不成立, 造成品质因素的迅速下降。在激发腔高度为 8.2 mm 时, 品质因素和池内声压达到平衡最优。由于受到入射光束直半径的限制, 选择 9 mm 为激发腔的最优高度。

综上所述, 共振频率和品质因素随激发腔体积增大而减小, 而归一化声压随着激发腔体积增大而增大。由公式(4)得知, 两端腔的体积越小, 光声池的效率越大。但是计算结果呈相反的趋势, 这是因为在建立的模型中, 热源设置为充满整个激发腔的气体分子, 随着激发腔体积的增大, 光声池内部被激发的气体的分子数量增多, 造成光声池内归一化声压的增大。激发腔的体积太大一方面会造成品质因素降低从而降低检测器信噪比, 另一方面会降低检测器的便携性。所以, 最优化激发腔尺寸选择为半径 19 mm 和高度 9 mm。

### 3.3 连接管参数优化分析

从等效电路图 1 可以看出, 在亥姆霍兹共振器中, 连接管起着声能量传递的作用。一方面气体在光声池振动会在连接管之间形成零声压点; 另一方面连接管内存在声波能量损耗。在模型中对连接管的半径和长度分别进行参数扫描, 结果如图 5 所示。其中图(a)和(b)分别表示在不同半径和长度下的光声池特性曲线。

在图 5(a)中, 随着半径由 2.5 mm 增加到 3.5 mm, 共振频率增大, 品质因素和归一化声压也在增大, 但是两者都会在半径 2.95 mm 处形成极大值。选择极大值处所对应的管半径即为最优化半径。在图 5(b)中, 随着连接管长度由 7 mm 增加到 13 mm, 光声池共振频率降低, 品质因素和归一化声压在 8 mm 到

13 mm 有一段周期性变化, 均存在两个极小值和三个极大值, 但声压的整体变化趋势呈现为增加, 品质因素的整体变化趋于减小。极大值对应的连接管长度选择为最优化长度。

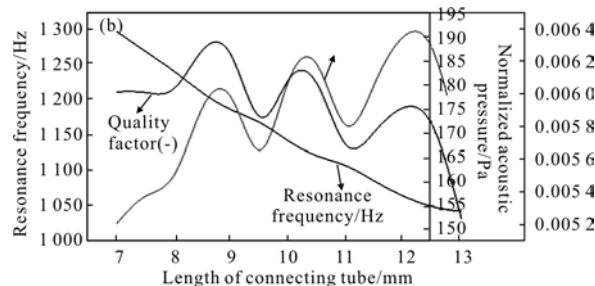
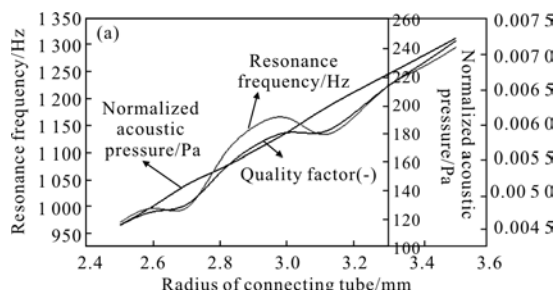


图 5 连接管结构参数优化

Fig.5 Optimization for structure parameters of connecting tube

综上所述, 连接管的半径和长度分别对光声池特性有不同的影响。出现周期性变化的原因是随着连接管尺寸的增加, 池内的声压在连接管内出现不可忽略的振动模式。通过选择合适的参数可以得到高检测灵敏度。最优化的连接管尺寸选择为半径 2.95 mm, 长度 10.2 mm。

### 3.4 探测腔参数优化分析

研究探测腔尺寸对光声池特性的影响。对探测腔的半径和高度进行参数扫描, 结果如图 6 所示。其中图(a)和(b)分别表示在不同半径和高度下的光声池特性曲线。

在图 6(a)中, 随着半径从 12 mm 增加到 22 mm, 探测腔共振频率由 1448 Hz 减少到 984 Hz, 品质因素由 233.9 降低到 159.0, 归一化声压则由 7.8 mPa 降低到 4.9 mPa。它们与探测腔半径的关系都近似成线性反比关系。在图 6(b)中, 当探测腔的高度由 5 mm 增加到 11 mm, 共振频率由 1330 Hz 减小到 1040 Hz, 归一化声压信号和品质因素都在 5.8 mm 处达到极大值, 之后开始下降。归一化声压的极大值为 6.9 mPa, 品质因素极大值达到 204.8。随着探测腔体积减小,

共振强度逐渐增加,而当腔高度小于 5.8 mm 时,共振条件不成立,共振强度迅速减小。应该选取极大值对应的高度作为最优化探测腔高度。

在探测腔内部,光声池共振频率和品质因素随腔体积变化和激发腔有相同的变化趋势,但归一化声压变化呈现相反趋势。这是因为在激发腔内,热声源对声压也有贡献,造成激发腔内声压呈增大趋势,而探测腔内部没有热源,其归一化声压呈降低趋势。这里将微音器尺寸(12 mm)和出气口安装尺寸约束考虑在内,选择探测腔最优化参数为半径 15 mm,高度 5.8 mm。

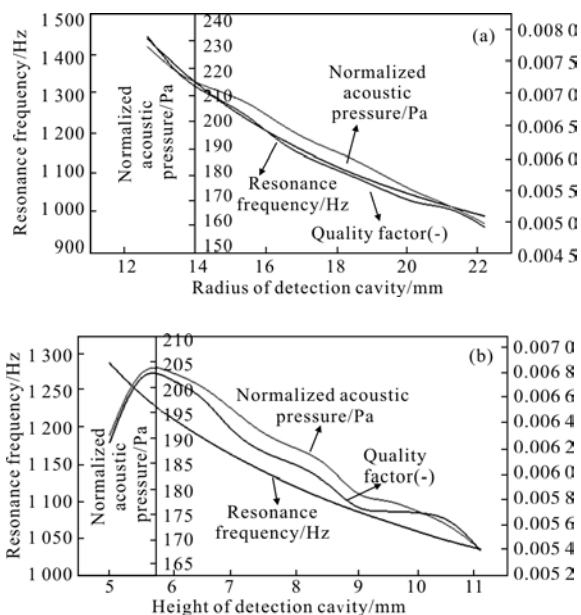


图 6 探测腔结构参数优化

Fig.6 Optimization for structure parameters of detection cavity

综上所述,可以得到光声池的最优化结构参数为:激发腔  $\Phi 38 \text{ mm} \times 9 \text{ mm}$ ,连接管  $\Phi 6 \text{ mm} \times 10.2 \text{ mm}$  和探测腔  $\Phi 30 \text{ mm} \times 5.8 \text{ mm}$ 。

#### 4 温度和压力特性分析

温度和压力是影响光声池内光声信号的两个重要因素。在实际测量中,光声池内温度不可避免会受到环境温度的影响,对光声信号造成的干扰会导致检测结果存在误差。在 COMSOL 软件中,氮气的材料属性里包含其温度特性,对其平衡温度进行参数扫描即可得到光声池温度特性。在实际测量中,环境温度范围通常在 253~323 K 之间,在此范围内光声

池温度响应如图 7 所示。

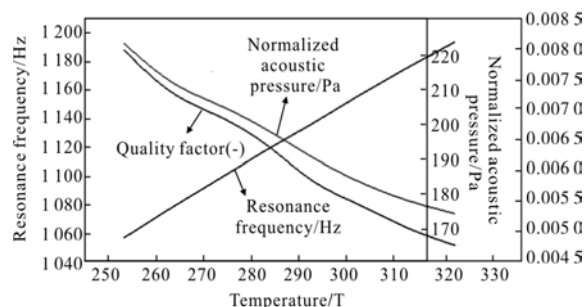


图 7 光声池温度特性

Fig.7 Temperature properties of the photoacoustic cell

在图 7 中,温度从 253 K 升高到 323 K,光声池共振频率由 1 057 Hz 直线增加到 1 194 Hz,但归一化声压和品质因素分别由 8.1 mPa 和 221.6 直线下降至 5.3 mPa 和 165.4。由公式(1)可知,共振频率是由光声池几何尺寸以及气体声速决定,在光声池的几何尺寸不变的情况下,共振频率只受到声速的影响。声速可以描述为:

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

式中: $\gamma$  为比热容; $K$  为玻尔兹曼常数; $m$  为分子质量。温度变化引起了声速的变化,所以共振频率随温度升高而增加。

光声池品质因素随温度下降的原因为光声池内部损耗随着温度升高而增加。对于亥姆霍兹共振光声池,其品质因素主要受到气体粘滞损耗和热损耗的影响。这两种损耗分别用粘滞边界层和热边界层描述<sup>[7]</sup>:

$$d_v = \sqrt{\frac{2\eta}{\rho\omega}} \quad (6)$$

$$d_h = \sqrt{\frac{2\kappa_T}{\rho\omega C_p}} \quad (7)$$

$$\eta = \frac{1}{3} mn \bar{\lambda} \bar{v} = \frac{1}{3} mn \frac{KT}{\sqrt{2} \pi d^2 P} \sqrt{\frac{8KT}{\pi m}} \quad (8)$$

式中: $\rho=mn$  为气体密度; $\bar{\lambda}$  为分子平均自由能; $\bar{v}$  为热运动平均速率; $d$  表示分子平均间距; $P$  表示气体压力。在公式(6)~(8)中,粘滞系数和热导率均为温度的函数,当温度升高,粘滞系数和热导率增加,引起光声池内部粘滞损耗和热损耗增加,对应  $d_v$  和  $d_h$  增加,品质因素降低。由图 7 及分析可知,光声池最佳检测温度为 253 K。但在实际应用场合下,实现 253 K 的制冷难度比较大,通常检测温度处于常温状态下。

由上述分析计算得到:在常温 296 K 条件下,归一化光声信号为 323 K 下的 1.28 倍,为 253 K 下的 76.8%;品质因素为 323 K 下的 1.07 倍,为 253 K 下的 83.6%。灵敏度也会随着温度升高近似直线下降。故在实际应用场合可以采取风扇散热的方法避免温度升高造成的灵敏度下降。此外,在检测灵敏度要求较高的场合,可以通过适当制冷提高检测灵敏度。考虑到成本问题,采用常温 296 K 作为检测温度。

光声池内部压力也是影响光声信号的因素之一。考虑到具体应用,池内气体压力范围选择 40~140 kPa。对光声池的压力特性进行仿真分析,其共振频率,品质因素和归一化光声信号变化如图 8 所示。

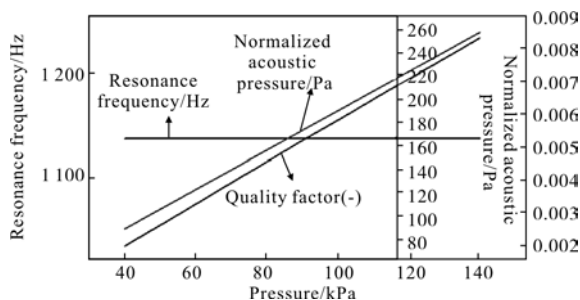


图 8 光声池压力特性

Fig.8 Pressure properties of the photoacoustic cell

由图 8 可以看出,随着池内气体压力增加,光声池的共振频率没有发生变化,说明压力对共振频率没有影响;但光声池品质因素和归一化声压随着压力的变化增加。由公式(8)可知,粘滞系数也会受到压力的影响。压力的增加会导致气体粘滞系数减少,声场边界上粘滞层厚度减少,从而品质因素和归一化声压增加。由于采用热声源为归一化单位热声源,模型并未考虑压力对气体吸收系数的影响<sup>[18]</sup>。所以,池内气体压力适当增加有利于提高光声池的灵敏度。在 140 kPa 气压下,归一化光声信号为一个大气压下的 1.3 倍,品质因素为一个大气压下的 1.1 倍,计算得到 140kPa 气压下检测灵敏度相比于其在在一个大气压下会提高约 1.43 倍。故实际应用中,在进气口接压力控制阀以控制压力 140kPa 作为检测压力。

综上所述,在正常环境条件范围内,低温高压检测环境有利于提高光声光谱检测器的检测精度。

通过对光声池结构以及温度压力特性进行仿真分析,结果如表 2 所列。可以看出参数在经过优

化之后,光声检测器的信噪比得到了提高,整体提高 2.34 倍。

表 2 参数优化结果对比

Tab.2 Comparison of the results of parameter optimization

Photoacoustic cell parameters	Original structure	Optimization structure	Improvement of SNR
Volume of excitation cavity/mm <sup>3</sup>	11 309.73	10 207.03	1.005
Length of connecting tube /mm	10	10.2	1.007
Radius of connecting tube /mm	3	2.95	1.106
Volume of detection cavity /mm <sup>3</sup>	7 263.36	4 099.78	1.462
Temperature /K	296	296	1
Pressure/kPa	101	140	1.43

### 5 实验验证

为了验证上述亥姆霍兹光声池设计和优化的合理性,建立光声光谱检测装置如图 9 所示。装置主要由光源,滤光片,斩波器,光声池,麦克风以及锁相放大器组成。光声池的尺寸和最优化参数保持一致。光源为 IR-19 宽波段光源,功率 19.5 W,覆盖光谱范围 1~20 μm。由于待测气体选择 CO 气体,选择相应的滤光片参数为中心波长 4.7 μm,半高全宽 150 nm。

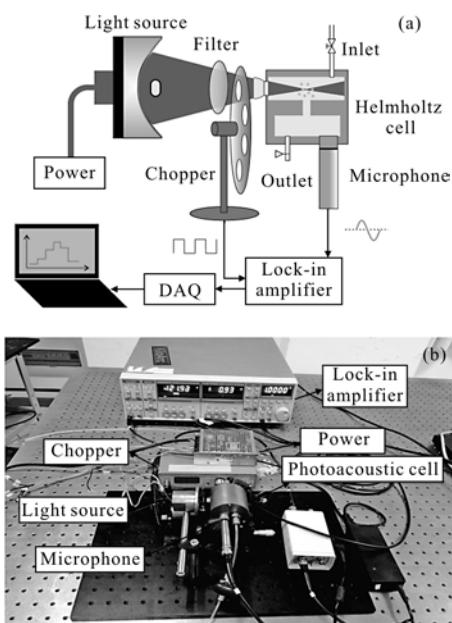


图 9 亥姆霍兹光声光谱检测实验装置示意图和实物图

Fig.9 Schematic and photo of the Helmholtz based photoacoustic spectroscopy setup

微音器采用采用 1/2 inch 电容式微音器。斩波器 (SR-540)对光幅值进行调制,并输出参考触发信号。微音器输出的信号经过放大电路后经锁相放大器 (Stanford Model RS830)进行解调得到光声信号。数据采集卡(DAQ USB1902)采集到光声信号值并传到 PC 上进行分析及浓度计算。

对浓度为 0~499 ppm浓度的 CO 气体(载气为氮气)进行实验,实验条件保持为室温 293 K,压力为 140 kPa。采用质量流量控制器(MFC)以 50 CCM(ml/min)的流速将混合气体充入光声池,关闭气阀后等待 2s 进行数据采集以减少气阀和气体湍流引起的噪声。锁相放大器积分时间设为 1s。使用流量控制器配置不同浓度的 CO 标准气体进行检测,得到光声信号如图 10 所示。通过最小二乘法对实验结果进行拟合,可以看出 CO 浓度和光声信号之间的关系成线性关系,线性度达到 0.997。图中,由于窗片吸收和斩波器噪声的存在,拟合线并不经过原点。对光声信号重复测量得到其噪声水平为 0.108 mV,计算得到信噪比为 10.09,对应 CO 检测极限为 5.08ppm。

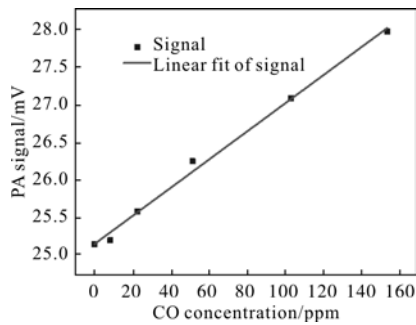


图 10 不同浓度 CO 光声信号值

Fig.10 PA signal for different CO concentration values

实验结果表明,经优化设计的亥姆霍兹气体检测器对CO 气体检测精度达到 ppm 量级。

## 6 结 论

针对光声光谱技术的多气体高灵敏度检测需求,设计了基于亥姆霍兹共振的多气体光声光谱检测器。相比于传统光声光谱检测器,满足多种气体检测的同时提高了检测灵敏度。利用有限元分析方法对光声池的主要结构参数(激发腔尺寸,连接管形状和探测腔尺寸)进行了优化,对其温度和压力特性进行了仿真研究。分析表明:通过对光声池结

构参数进行优化可以增加检测器的信噪比,提高检测灵敏度。在使用 IR-19 为激发源时,最优结构参数为激发腔  $\Phi 38\text{ mm}\times 9\text{ mm}$ ,连接管  $\Phi 5.9\text{ mm}\times 10.2\text{ mm}$ 和探测腔  $\Phi 30\text{ mm}\times 5.8\text{ mm}$ ,并且相对低温和高压的环境条件有利于提高光声光谱气体检测器的检测精度。实验表明,该检测器对 CO 气体的检测精度达到 5.08 ppm,适用于气体检测场合。该研究设计优化的亥姆霍兹共振气体检测器同时具有小型化的特点,为多气体光声光谱测量提供了设计参考。

## 参考文献:

- [1] Zheng Shouguo, Liu Miao, Zhang Jian, et al. Design and implementation of  $\text{N}_2\text{O}$  detection system [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2012, 20(10): 2154-2160. (in Chinese) 郑守国,李淼,张健,等.痕量  $\text{N}_2\text{O}$  气体检测系统的设计与实现[J]. *光学精密工程*, 2012, 20(10): 2154-2160.
- [2] Zhang Zhirong, Xia Hua, Dong Fengzhong, et al. Simultaneous and on-line detection of multiple gas concentration with tunable diode laser absorption spectroscopy [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2013, 21(11): 2771-2777. (in Chinese) 张志荣,夏滑,董凤忠,等.利用可调谐半导体激光吸收光谱法同时在线监测多组分气体浓度[J]. *光学精密工程*, 2013, 21(11): 2771-2777.
- [3] Zhao Yongjing, Pan Yuee, Rutherford Jerry, et al. Estimation of the interference in multi-gas measurements using infrared photoacoustic analyzers [J]. *Atmos*, 2012, 3 (2): 246-265.
- [4] Stenberg J, Amand L E, Hernberg R, et al. Measurement of gas concentrations in a fluidized bed combustor using laser-induced photoacoustic spectroscopy [J]. *Combustion Flame*, 1998, 113(4): 477-486.
- [5] Choi S S. Wavelength-modulated differential photoacoustic spectroscopy for early detection of breast cancer and Hypoxia monitoring [J]. *University of Toronto*, 2015: 36(5): 1305-1311.
- [6] Miao Shaofeng, Yang Hong, Huang Yuanhui, et al. Research progresses of photoacoustic imaging [J]. *Chinese Optics*, 2015, 8(5): 700-713. (in Chinese) 苗少峰,杨虹,黄远辉,等.光声成像研究进展[J]. *中国光学*, 2015, 8(5): 700-713.
- [7] Favier J P, Buijs J, Miklós A, et al. Photoacoustic



- characterization of different food samples[J]. *European Food Reserch and Technology*, 1994, 199(1): 59–63.
- [8] Adamowicz R, Koo K. Characteristics of a photoacoustic air pollution detector at CO<sub>2</sub> laser frequencies [J]. *Appl Opt*, 1979, 18(17): 2938–2946.
- [9] Zheng Huadan, Dong Lei, Ma Ying, et al. Scattered light modulation cancellation method for sub -ppb -level NO<sub>2</sub> detection in a LD-excited QEPAS system [J]. *Opt Express*, 2016, 24(10): 752–761.
- [10] Barbieri S, Pellaux J P, Studemann E, et al. Gas detection with quantum cascade lasers: an adapted photoacoustic sensor based on Helmholtz resonance [J]. *Rev Sci Instr*, 2002, 73(6): 2458–2461.
- [11] Mattiello Mario, Niklès Marc, Schilt Stéphane, et al. Novel Helmholtz-based photoacoustic sensor for trace gas detection at ppm level using GaInAsSb/GaAlAsSb DFB lasers [J]. *Spectrochim Acta Pt A*, 2006, 63(5): 952–958.
- [12] Liu Qiang, Wang Guishi, Liu Kun, et al. Measurements of atmospheric aerosol optical absorption coefficients using photoacoustic spectrometer [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2014, 43(9): 3010–3014. (in Chinese)  
刘强, 王贵师, 刘锬, 等. 基于光声光谱技术的大气气溶胶吸收系数测量[J]. 红外与激光工程, 2014, 43(9): 3010–3014.
- [13] Kosterev A A, Bakhirkin Yu A, Tittel F K, et al. Quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy [J]. *Opt Lett*, 2002, 27(12): 1902–1904.
- [14] Wu Xiaoye, Zhang Lichao, Shi Guang. Optical-thermal and optical -acoustic detecting techniques applied for characterization of high performance optical thin films [J]. *Chinese Optics*, 2014, 7(5): 701–711. (in Chinese)  
武潇野, 张立超, 时光. 应用于高性能光学薄膜表征的光热光声检测技术[J]. 中国光学, 2014, 7(5): 701–711.
- [15] Koskinen V, Fonsen J, Kauppinen J, et al. Extremely sensitive trace gas analysis with modern photoacoustic spectroscopy [J]. *Vib Spectrosc*, 2006, 42(2): 239–242.
- [16] Ulasevich A L, Gorelik A V, Kouzmouk A A, et al. A miniaturized prototype of resonant banana-shaped photoacoustic cell for gas sensing [J]. *Infrared Physics and Technology*, 2013, 60(5): 174–182.
- [17] Chen Weigen, Wan Fu, Zhou Qu, et al. Pressure characteristics of dissolved Acetylene in transformer oil based on photoacoustic spectroscopy detection [J]. *Transactions of China Electrotechnical Society*, 2015, 30(1): 112–119. (in Chinese)  
陈伟根, 万福, 周渠, 等. 基于光声光谱检测的变压器油中溶解乙炔气体的压强特性[J]. 电工技术学报, 2015, 30(1): 112–119.
- [18] Yun Yuxin, Lv Tianguang, Han Hong, et al. Effects of pressure and temperature on gaseous infrared absorption properties [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2011, 40(6): 992–996. (in Chinese)  
云玉新, 吕天光, 韩洪, 等. 气体红外吸收特性受压强与温度的影响分析[J]. 红外与激光工程, 2011, 40(6): 992–996.