

光声池几何形状对光声光谱检测性能的影响

程刚¹, 曹亚南¹, 田兴¹, 曹渊², 刘锐^{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, 安徽 合肥 230031

摘要 随着现代化工业的高速发展, 痕量气体检测技术的重要性不言而喻, 目前痕量气体检测技术已广泛应用于环保、化学工业、生物生态以及医学检测等各个领域, 光声光谱技术由于它具有零背景检测、探测器不受波长限制、光学元件简单, 系统调节及维护方便等优点, 现已成为光谱学领域中非常重要的检测手段, 近些年来, 随着微弱信号检测与激光器技术的快速发展, 光声光谱技术也得到更多学者的关注与研究, 所取得的成果为光声光谱检测性能的提升提供了重要的设计参考, 然而, 当前文献报道较少地涉及到光声池的优化工作, 尤其是对光声池的形状构造等问题鲜有深入探索。光声光谱检测系统中最核心的部件之一即为光声池, 它是承载待测气体的腔体以及产生光声耦合作用的场所, 其形状构造在很大程度上影响着光-声之间的耦合状况, 以致于影响整机系统的信噪比与灵敏性, 因而探索设计光声池的形状具有重要的理论研究意义及工程应用价值。为此, 基于传统圆柱形光声池的设计基础, 探索研究了纵向截面为圆形、正三角形、椭圆等8种典型形状的光声池结构模型, 并对其声场特性进行了仿真分析, 借助3D打印技术制作了各类光声池实物, 通过实验对比分析了8种光声池的性能指标, 在限定光声池纵向长度及纵向截面周长相等的条件下, 仿真结果表明, 8种形状各异的光声池工作纵向声学模态振型均相同, 实验结果表明, 8种光声池的工作声学共振频率值基本相同, 受其激光光源与腔内声学模态耦合的影响, 其品质因素从大到小依次为: 圆形、短轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线形、正三角形、小圆轴线形、长轴椭圆, 池常数从大到小依次为: 圆形、长轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线形、小圆轴线形、正三角形、短轴椭圆, 整体结果显示, 对于光声光谱光声池的设计, 在没有特殊要求的情况下, 光声池应优先为圆形形状, 研究过程与结果为光声光谱中光声池的设计与优化探索提供了借鉴与参考。

关键词 光声光谱; 光声池; 几何形状; 仿真计算; 优化设计

中图分类号: TP212 **文献标识码:** A **DOI:** 10.3964/j.issn.1000-0593(2020)08-2345-07

引言

1880年, 物理学家 Bell 首次报道了固体光声现象, 1881年, Tynadall 等学者观测到了气体光声现象, 1938年, Veingerov 利用光声效应测定了混和物中的气体浓度, 此后光声理论及其应用成为了光学领域中一个热点研究问题^[1]。光声光谱(photoacoustic spectroscopy, PAS)技术基于光声效应原理可用于痕量气体的测量, 具有零背景检测、探测器不受波长限制、光学元件简单, 系统调节及维护方便等优点, 目前已衍生出各类商业化仪器产品, 现广泛应用于环保、化学工业、生物生态以及医学检测等各个领域。迄今为止, 为

了进一步提高光声光谱气体检测信号的强度与灵敏性, 国内外学者做出了诸多探索式研究, 如 Nodov 报道了一种内部小圆柱纵向振动与外部腔体径向谐振耦合的“H”型光声池, 品质因素高达 1800^[2]; Heritier 等提出了一种椭圆柱形光声池, 其中沿一个轴通过的激光产生的所有声能被聚焦到沿着另一个轴定位的圆柱形声学传感器上, 对液体介质进行了初步测量并显示出该系统的高灵敏度的检测性能^[3]; Kapitano 提出了一种亥姆霍兹共振型光声池在减压条件下的气体检测方式, 利用该系统并结合差分式测量对水汽检测可达 1.0×10^{-9} 水平, 其功率和带宽归一化最小等效吸收系数为 $(3 \sim 5) \times 10^{-7} \text{ W} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$ ^[4]; Webber 等利用光纤放大器来增强光声光谱信号, 研发了一种光声光谱超灵敏痕量气体检测

收稿日期: 2019-08-02, 修订日期: 2019-12-15

基金项目: 国家重点研发计划项目(2017YFC0209700), 国家自然科学基金项目(41730103, 41575030, 41475023)资助

作者简介: 程刚, 1986年生, 安徽理工大学机械工程学院讲师 e-mail: chgmech@mail.ustc.edu.cn

* 通讯联系人 e-mail: liukun@aiofm.ac.cn

系统,并对氨气进行了测量,其功率和带宽归一化最小等效吸收系数为 $1.5 \times 10^{-9} \text{ W} \cdot \text{cm}^{-1} \cdot \text{Hz}^{-1/2[5]}$; Tittle 等开创性地提出了石英音叉增强型光声光谱技术 (quartz enhanced photoacoustic spectroscopy, QEPAS), 采用声频 32.768 kHz 商业石英音叉来替代高灵敏度麦克风, 进而对声场感知与检测, 由于石英音叉具有体积小、价格便宜等优点, 这在很大程度上减小系统的总体积、制造成本以及大幅度提升检测灵敏度, 在光声光谱技术历程中是一项里程碑式的研究^[6]; Ma 等采用 QPEAS 技术及掺铒光纤放大器 (erbium-doped fiber amplifier, EDFA) 实现了超高灵敏度乙炔的检测^[7]; Haouari 等采用声学三维拓扑优化的方法与平滑处理技术探讨了非轴对称形状的光声池, 最终通过模拟计算获得了一个类似于“土豆”结构形状的光声池模型, 所获声强增益效果约为之前的 2 倍^[8]; 史强等探索研究了球形光声池的性能, 理论计算与实验结果均表明, 球形光声池与圆柱形光声池相比具有更高的检测灵敏度, 球形光声池的声学品质因素高达 590^[9]; 程刚等提出了一种基于响应面代理模型与遗传算法相结合的光声池形状优化设计算法, 优化后光声池的谐振腔两端形貌为喇叭口形状, 其品质因素与池常数较之前得到一定幅度的提升^[10]; 郑德忠等提出了一种长度可调式纵向反馈圆柱形光声池, 解决了光声池声学共振频率随外界变化产生漂移的问题, 提高了系统的检测灵敏度^[11]。

上述文献内容为提升光声光谱检测性能提供了重要的设计途径, 而上述研究却较少地对光声池优化设计等方面开展过探讨研究, 尤其是针对光声池的形状构造等问题缺少深入的探索分析。光声光谱检测系统中最核心的组件之一即为光声池, 光声池是承载待测气体的容腔以及产生光声耦合作用的场所, 而光声池的形状构型很大程度会影响光-声之间的耦合情况, 以致于影响整机系统检测的信噪比与灵敏度, 因而探索设计光声池的形状具有重要的理论研究意义与工程应用价值。为此, 本文基于传统圆柱形光声池的设计基础, 探索研究几类典型的且形状不同的光声池结构模型, 并运用计算机仿真技术对光声池的声场分布进行模拟计算与分析, 同时借助 3D 打印技术制作了形状各异的光声池实物, 通过实验测试对比分析了几类光声池的性能指标。

1 基本理论基础

1.1 光声效应原理

光声光谱是一种间接式吸收光谱技术^[12], 它是光与物质作用下的光声效应为基本理论。光声效应是指待测介质吸收调制的光能后而被时变加热, 据从而引起的热效应和声效应的过程。气体光声效应是指待测气体分子吸收调制的光能后会由基态向激发态跃迁, 而后通过分子碰撞无辐射弛豫过程, 气体分子会由激发态退激至基态并释放能量, 时变产生的热能会引起声波的激发与传播, 从而激发光声信号, 通过高灵敏度声学传感器与解调技术便可以捕获携带气体浓度及其他信息的声学信号, 由此进行反演计算而获知待测气体的物态信息, 气体光声光谱的检测系统示意图如图 1 所示。

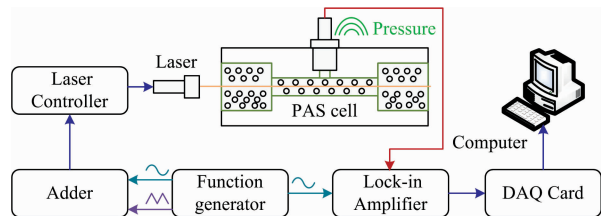


图 1 光声光谱气体检测系统示意图

Fig. 1 Schematic diagram of photoacoustic spectrum gas detection device

1.2 光声池形状设计理论依据

在光声池腔体内, 描述待测气体吸收所产生光声效应过程的声学波动方程为^[13]

$$\nabla^2 p - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 p}{\partial t^2} = -\frac{(\gamma-1)}{c^2} \frac{\partial H}{\partial t} \quad (1)$$

式中: $H(r, t)$ 为热功率密度源; c 为腔内声速; p 为腔内声压; γ 为气体的定压热容与定容热容的比值, $\gamma = C_p / C_v$, C_p 为定压热容, C_v 为定容热容。当施加的激励光源为正弦调制时, 腔内声压 p 用“归一化声学模态 p_i ”的傅立叶变换, p 可表示为

$$p(r, \omega) = \sum_i A_i(\omega) p_i(r) \quad (2)$$

$$A_i(\omega) \propto \iint_V p_i^*(r) H(r, \omega) dV \quad (3)$$

式中: $p(r, \omega)$ 为光声池腔内声压; $A_i(\omega)$ 为腔内第 i 阶模态声压幅值; ω 为圆频率; $p_i(r)$ 为腔内第 i 阶声压模态归一化声压; $p_i^*(r)$ 为 $p_i(r)$ 的复数共轭模式; $H(r, \omega)$ 为热功率密度源; V 为光声池的体积。

由式(2)和式(3)可知, 光声池的声振模态和激光光源与其腔体耦合状况对池内激发的光声信号具有重要影响, 而光声池的几何形状是决定光声池声学模态的基础, 因而在其他物性参数相同的情况下, 可以预见, 改变光声池几何形状将可以获得不同的光声池腔内光声特性。

2 光声池形状探讨

根据上节理论可知, 选择不同几何形状的光声池将获得不同的光声效果, 但光声池的形状改变后, 对于非圆柱形光声池, 解析模型一般需要重新建立, 求解计算也较为繁琐, 且利用传统的机械加工方法, 非圆柱形光声池的加工制作也相对困难。鉴于当前计算机仿真与 3D 打印制造技术的应用优势, 据此光声池的几何形状便可以在更高自由度上开展探索与研究。本节将以传统圆柱形光声池几何形状为基础, 探索设计了不同形状的光声池, 并运用计算机仿真手段分析各类光声池的声学分布特性。图 2 所示的为传统圆柱形光声池的几何构造与相关尺寸, 圆柱体中轴向空腔部分即为光声池的谐振腔。为了使所设计的各类形状光声池的光声效应背景相同和实验加工的便捷性, 本文所探讨的仅为光声池中谐振腔纵向截面形状是规则图形下的不同形状光声池, 并且保证各种形状的光声池的纵向长度均相等(长度均为 100 mm),

同时，为了使得不同形状光声池腔内的粘滞性面损耗相等，设计中进一步限定各类形状光声池谐振腔的纵向截面周长均相等。不同形状光声池的拓扑研究思路如图 3 所示，(a) 组示意图是将圆形拓扑为正多边形几何形状，可变化的参数为正多边形的边数；(b) 组示意图是将圆形拓扑为椭圆形状，可变化的参数为椭圆的长短轴的大小；(c) 组示意图是将单个圆形拓扑为两个圆形组合，可改变的参数为两圆的半径大小。

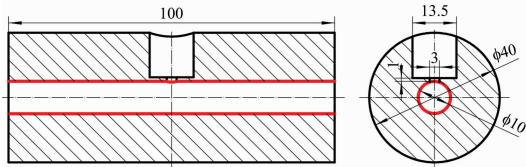


图 2 圆柱形光声池形状与几何尺寸

Fig. 2 Shape and geometric size of cylindrical photoacoustic cell

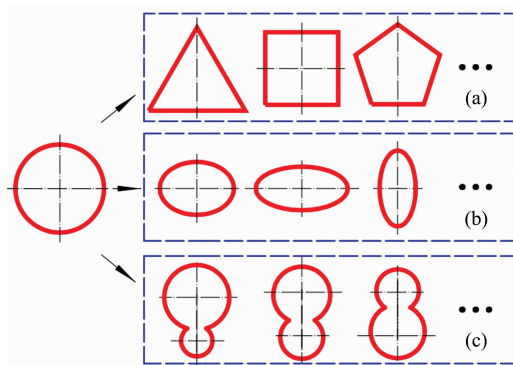


图 3 光声池形状拓扑思路

Fig. 3 Topology of photoacoustic cell shape

2.1 正多边形探讨

依据几何理论，几何圆形可视为正多边形演变而来的，当正多边形的边数越多时，其构造的形状欲趋近于圆形，另外正多边形形状的构型特征在于，它相对于圆形而言其内壁壁面具有明显的棱线。本节将探讨研究谐振腔纵向截面形状为正多边形的设计方案与其光声池声学特性，所探讨的正多边形形状仅限于正三角形、正方形与正五边形，依据上述不同光声池纵向长度及谐振腔纵向截面周长均相等的限定准则，截面形状为正多边形的谐振腔几何尺寸可以通过计算获得，图 4 所示的为三种正多边形光声池的几何构造形状及其相关尺寸。

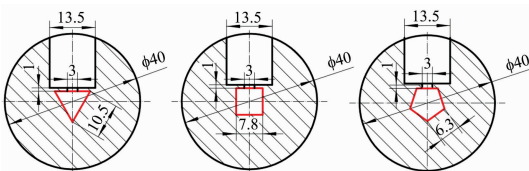


图 4 正多边形光声池形状与几何尺寸

(a): 正三角形; (b): 正方形; (c): 正五边形

Fig. 4 Shape and geometric size of orthogonal polygon photoacoustic cell

(a): Regular triangle; (b): Square; (c): Regular pentagon

图 5 所示的是利用计算机仿真技术模拟的光声池空腔声学模态及其声场压力分布。其中，光声池空腔声学模态只给出了其工作纵向声学模态振型^[10]。仿真参数与边界条件设置如下：定义光声池空腔中流体材料为氮气，密度为 $1.25 \text{ g} \cdot \text{L}^{-1}$ ，比热比为 1.4，声速为 $349 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ，仅抽取光声池的谐振腔为声学求解域模型，利用声学三维仿真计算方法，对模型进行四面体网格单元划分以及网格无关性验证，设定仿真模型的轴向两端面为软声场条件，即端面相对压力定为 0 Pa，其余外壁为硬声场边界条件，即速度边界条件：法向速度为 0，初始相对压力为 0 Pa，温度设置为 293 K，绝对压力为 1 atm。

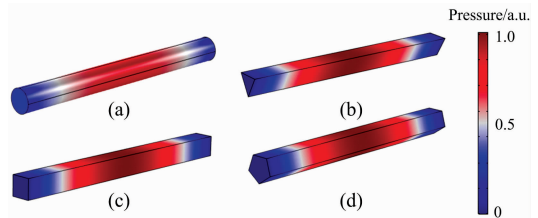


图 5 圆形与正多边形光声池声学仿真结果

Fig. 5 Acoustic simulation results of circular and regular polygon photoacoustic cells

图 6 给出的是正方形腔体沿外壁中线的模态声压扫描情况，其余如截面形状为圆形、正三角形与正五边形的腔体模态声压扫描情况的仿真计算表明，其声学分布均与正方形相同。根据图 5 和图 6 结果可知，当正多边形光声池的工作纵向声学模态被激发后，其所表现的声学模态振型与圆形光声池相同，声场波腹的地方均为谐振腔的中部，即安装高灵敏度麦克风探测的位置，同时从图 6 中可以观察到，光声池谐振腔中部的纵向截面处声压值处处相等，通过拾取扫描路径上的声压，声压分布呈正弦函数形式。

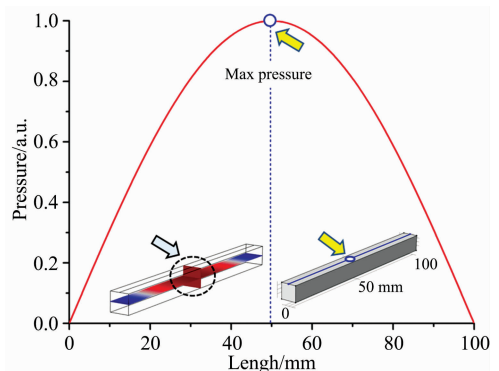


图 6 正方形腔体沿外壁中线的归一化声压扫描情况

Fig. 6 Normalized sound pressure scanning of a square cavity along the outer wall midline

2.2 椭圆形探讨

研究谐振腔纵向截面形状为椭圆形的设计方案与其光声池声学特性，根据所述不同光声池纵向长度及谐振腔纵向截面周长均相等的设定准则，所演变的椭圆形的几何尺寸并不能惟一确定，进一步限定椭圆形的长轴与短轴之比为 2 : 1，

并考虑椭圆的两种布置方式,即麦克风开槽分别位于椭圆的短轴和长轴方向上,图 7 所示的为两种椭圆形光声池的几何构形与相关尺寸。

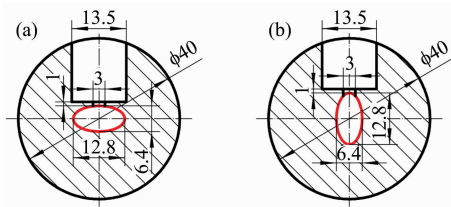


图 7 椭圆形光声池形状与几何尺寸

(a): 短轴方向椭圆; (b): 长轴方向椭圆

Fig. 7 Shape and geometric size of elliptical photoacoustic cell

(a): Short axis direction ellipse;

(b): Long axis direction ellipse

图 8 给出了椭圆形光声池的空腔声学模态及声场分布的仿真结果。其中,椭圆形光声池空腔声学模态只给出了其工作纵向声学模态振型,仿真参数与边界条件设置与上节相同。仿真结果表明,椭圆形光声池工作纵向声学模态被激发后,其所表现的声学模态振型及声压分布特性与圆形、正多边形完全相同,并且可以观察到,椭圆形光声池谐振腔中部的纵向截面处声压值亦处处相等,由于短轴方向椭圆与长轴方向椭圆形状与尺寸相同,其声学模态特性亦相同,因而可知上述两种麦克风开槽方式下的椭圆形光声池所产生的模态声压是相等的。

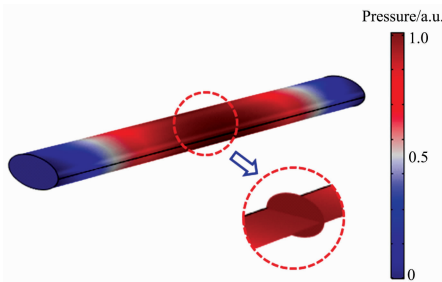


图 8 椭圆形光声池声学仿真结果

Fig. 8 Acoustic simulation results of elliptical photoacoustic cell

2.3 圆形分割式探讨

本节将探讨研究谐振腔纵向截面圆形分割设计方案与其光声池声学特性,根据所述不同光声池纵向长度及谐振腔纵向截面周长均相等的设定准则,并考虑在设计中避免让激光光源与光声池内壁接触产生背景信号,设计中进一步限定谐振腔的半径大小,同时将圆形的分割数量限定为 2 个,分析其两种布置方式,即激光光束分别穿过大圆和小圆轴线上,图 9 所示的为圆形分割光声池的几何构形与相关尺寸。

图 10 所示的是利用仿真软件模拟计算的圆形分割式光声池的空腔声学模态及其声场分布。其中,圆形分割式光声池空腔声学模态只给出了其工作纵向声学模态振型,仿真参数与边界条件设置与上节相同。仿真结果表明,圆形分割式光声池工作纵向声学模态被激发后,其所表现的声学模态振

型与声压分布特性与前述几类情况完全相同,并且可以观察到,圆形分割式光声池谐振腔中部的纵向截面处声压值亦处处相等,由于大圆轴线与小圆轴线的形状与尺寸相同,因而其声学模态特性亦相同,因而可知所述两种布置方式下光声池所产生的模态声压是相等的。

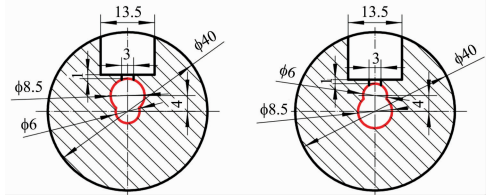


图 9 圆形分割式光声池形状与几何尺寸

(a): 小圆轴线形; (b): 大圆轴线形

Fig. 9 Shape and geometric size of circular partitioned photoacoustic cell

(a) Small circular axis; (b): Large circular axis

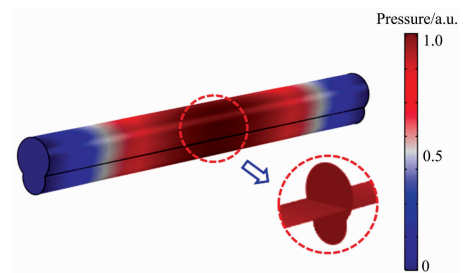


图 10 圆形分割式光声池声学仿真结果

Fig. 10 Acoustic simulation results of circular partitioned photoacoustic cell

3 实验部分

3.1 光声池组件与 3D 打印

为了便于实验测试,所设计的光声池组件需要考虑以下问题,一是光声池组件的抗噪与密封性设计,二是光声池的易装配和互换性设计。根据光学与声学相关理论,所设计的光声池组件主要包括缓冲腔、入射窗口、出射窗口、进、出气孔、光声池谐振腔、麦克风插槽、隔音套等,为了便于更换光声池开展互换性实验,光声池与缓冲腔采用的是分离式结构,光声池可以独立取出与更换,光声池组件中结构部件所涉及连接的部分均采用橡胶密封圈进行密封,光声池组件纵向剖面图如图 11 所示。

采用 3D 打印技术制作光声池相关文献已有报道^[14-15],它可以突破传统加工制造的约束,基本上可以对任意形状的几何零件进行制造加工,具有快速高效性,相比传统的加工制造技术,具有设计潜力大、自由空间度高等优点,由于所设计的光声池形状较为复杂,传统的机械加工甚为困难,因而本文将采用 3D 打印机(UnionTech, Lite600)对所设计的光声池进行加工制作,光声池打印材料选为 8000 光敏树脂,各类形状光声池的 3D 打印实物如图 12 所示。

3.2 实验系统搭建

搭建光声光谱气体测试平台,采用波长调制与二次谐波

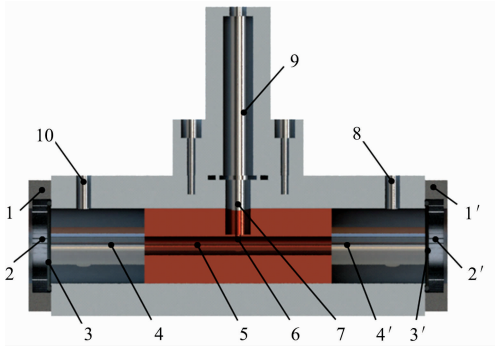


图 11 光声池组件纵向剖面图

1, 1': 窗口面板; 2, 2': 石英窗片; 3, 3': 橡胶密封圈; 4, 4': 缓冲腔; 5: 谐振腔体; 6: 开音孔; 7: 麦克风插槽; 8: 出气孔; 9: 麦克风隔音套; 10: 进气孔

Fig. 11 Longitudinal profile of photoacoustic cell components

1, 1': Window panel; 2, 2': Quartz window; 3, 3': Rubber sealing ring; 4, 4': Buffer chamber; 5: Resonant chamber; 6: Sound opening; 7: Microphone; 8: Outlet; 9: Microphone slot; 10: Inlet

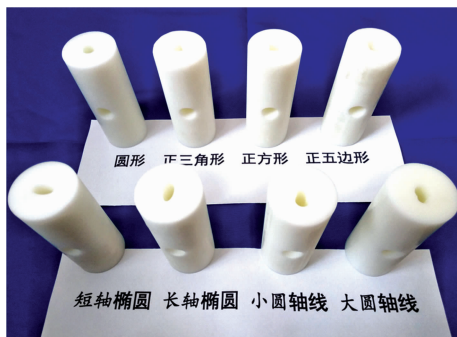


图 12 各类形状光声池 3D 打印实物图

Fig. 12 3D printing of photoacoustic cells with various shapes

技术作为系统的检测方法。激光光源选用 DFB 半导体激光器 (NEL, 1 653 nm DFB); 激光控制器 (THORLABS, CLD1015) 控制激光器温度与电流, 其工作温度设置为 23 °C, 中心电流为 70 mA; 函数发生器 (RIGOL, DG1032), 三角波扫频设置为 0.5 Hz, 振幅 300 mV, 正弦波扫频设置为 $f_i/2$ (f_i 为光声池的工作纵向声学频率值), 振幅 100 mV; 锁相放大器 (Stanford Research System, SR830), 积分时间 30 ms, 倍频程衰减速率 18 dB, 灵敏度 10 mV; 高灵敏度麦克风 (北京声望, MP201) 感应声压; 采集卡 (NI, USB-6210) 与计算机连接采集声学信号, 实验中选用标准甲烷气体 $509 \mu\text{L} \cdot \text{L}^{-1}$ (南京特种气体厂) 作为样品气体, 测量时首先利用真空泵 (VALUE 飞越, V-i120SV) 将光声池腔内抽成真空, 然后通入甲烷样品气体, 并保持腔内为一个标准大气压, 信号测量取 20 次平均值, 对采集的数据进行拟合与处理。为避免 3D 打印的光声池内腔有残余粉末等杂质, 在实验过程中, 每次更换新光声池之前需要将树脂光声池的内腔擦拭清洁并干燥后使用。所设计的光声光谱系统装置实验图如图 13 所示。



图 13 光声光谱系统装置实验图

Fig. 13 Experimental diagram of photoacoustic spectroscopy system device

4 结果与讨论

表 1 给出了不同形状光声池性能的实验检测结果, 主要对比了光声池的工作纵向声学共振频率、品质因素以及池常数三项性能指标, 并以传统圆柱形光声池性能指标为基准对实验数据进行了标准化处理, 实验测试中不考虑由于 3D 打印制造所带来的微弱偏差。从表中可知: (1) 在相同的测试条件下, 8 种形状不同的光声池, 其工作纵向声学共振频率大小基本相等, 原因在于, 光声池的纵向声学共振频率主要与其纵向长度相关, 鉴于所设计的 8 种光声池纵向长度均相等, 因而实验结果与理论基本相符; (2) 8 种形状不同的光声池的品质因素与池常数差异较大, 其品质因素从大到小依次为: 圆形、短轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线、正三角形、小圆轴线、长轴椭圆; 池常数从大到小依次为: 圆形、长轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线、小圆轴线、正三角形、短轴椭圆, 相对而言, 圆形效果性能整体最优; (3) 对比圆形与 3 种正多边形光声池性能指标可知, 光声池品质因素与池常数均随着正多边形边数的增加而增大, 变化规律较为显著, 可以预见当正多边形边数越多时, 其性能指标越接近于圆形, 这说明光声池内壁过渡形式越流畅, 光声性能将越佳; 对比圆形与 2 种椭圆形光声池指标可知, 长轴方向椭圆

表 1 不同形状光声池性能实验测量结果

Table 1 Experimental results of performance of photoacoustic cells with different shapes

序号	截面形状	f_i/f_1	Q_i/Q_1	C_i/C_1
1	圆形	1.0	1.0	1.0
2	正三角形	0.97	0.43	0.58
3	正方形	1.0	0.65	0.77
4	正五边形	1.0	0.76	0.87
5	短轴椭圆	0.98	0.79	0.47
6	长轴椭圆	0.99	0.39	0.99
7	小圆轴线	1.0	0.41	0.63
8	大圆轴线	1.0	0.54	0.76

注: f , Q , C 分别表示为光声池纵向声学共振频率、品质因素和池常数, 参量下标“1”代表圆形、“ i ”为表中序号所对应的形状, 表头中的参量比为各类形状光声池性能与圆形的相对比值

与短轴方向椭圆的光声池的品质因素及池常数呈此消彼长的规律,且均低于圆形光声池对应指标,主要原因是由于椭圆形状降低了激光光束与其腔内声学模式耦合程度,同理如大圆轴线和小圆轴线光声池性能低于圆形光声池对应指标。整体结果显示,对于光声光谱光声池的设计,在没有特殊要求的情况下,应优先选截面为圆形形状的光声池,圆形光声池不仅理论计算清晰,同时易于传统的机械加工,材料上也比 3D 打印制作具有更大的选择空间。

5 结 论

基于光声光谱的基本理论,运用理论分析、计算机仿真以及实验测试相结合的方法,探索分析了 8 种谐振腔纵向截面不同形状的光声池对其性能指标的影响,其主要结论如下:

(1)在约束光声池纵向长度与纵向截面周长相等的情况下,计算机仿真结果表明,8 种形状各异的光声池,其工作纵向声学模式振型相同,声场波腹的位置均为谐振腔的中部,且沿谐振腔壁面纵向扫描的声压分布呈现正弦函数形式;

(2)设计并加工了可用于互换光声池的光声池组件,建立了光声光谱气体检测实验平台,并以甲烷为样品气体,完成了 8 种形状光声池的性能测试,实验结果表明,8 种光声池的工作纵向声学共振频率基本相同,受其激光光源与腔内声学模式耦合的影响,8 种光声池的品质因素从大到小依次为:圆形、短轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线形、正三角形、小圆轴线形、长轴椭圆;池常数从大到小依次为:圆形、长轴椭圆、正五边形、正方形、大圆轴线形、小圆轴线形、正三角形、短轴椭圆,整体结果显示,在没有特殊要求的情况下,应优先选截面为圆形形状的光声池。

References

- [1] Miklós A, Hess P, Bozóki Z. *Review of Scientific Instruments*, 2001, 72(4): 1937.
- [2] Nodov E. *Applied Optics*, 1978, 17(7): 1110.
- [3] Heritier J M, Fouquet J E, Siegman A E. *Applied Optics*, 1982, 21(1): 90.
- [4] Kapitanov V A, Ponomarev Y N, Song K, et al. *Applied Physics B (Lasers and Optics)*, 2001, 73(7): 745.
- [5] Webber M E, Pushkarsky M B, Patel C K N. *Proceedings of SPIE—The International Society for Optical Engineering*, 2002, 4817: 1.
- [6] Kosterev A A, Bakhrkin Y A, Curl R F, et al. *Optics Letters*, 2002, 27(21): 1902.
- [7] Ma Yufei, He Ying, Zhang Ligong, et al. *Applied Physics Letters*, 2017, 110(3): 031107.
- [8] Haouari R, Rochus V, Lagae L, et al. Rotterdam, Netherlands, 2017 COMSOL Conference.
- [9] SHI Qiang, HU Shui-ming, CHEN Jun, et al(史强, 胡水明, 陈军, 等). *Chinese Journal of Chemical Physics(化学物理学报)*, 1998, 11(1): 20.
- [10] CHENG Gang, CAO Yuan, LIU Kun, et al(程刚, 曹渊, 刘锃, 等). *Acta Physica Sinica(物理学报)*, 2019, 68(7): 074202.
- [11] ZHENG De-zhong, ZHAO Nan(郑德忠, 赵南). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2014, 41(4): 0415002.
- [12] DONG Lei, WU Hong-peng, ZHENG Hua-dan, et al(董磊, 武红鹏, 郑华丹, 等). *Chinese Journal of Lasers(中国激光)*, 2018, 45(9): 0911004.
- [13] ZHA Shen-long, LIU Kun, ZHU Gong-dong, et al(查申龙, 刘锃, 朱公栋, 等). *Spectroscopy and Spectral Analysis(光谱学与光谱分析)*, 2017, 37(9): 2673.
- [14] Bauer R, Stewart G, Johnstone W, et al. *Optics Letters*, 2014, 39(16): 4796.
- [15] He Y, Ma Y F, Tong Y, et al. *Optics Express*, 2018, 26(8): 9666.

Influence of Photoacoustic Cell Geometrical Shape on the Performance of Photoacoustic Spectroscopy

CHENG Gang¹, CAO Ya-nan¹, TIAN Xing¹, CAO Yuan², LIU Kun^{2*}

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

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

Abstract With the rapid development of modern industry, the importance of trace gas detection technology is self-evident. At present, trace gas detection technology has been widely used in environmental protection, chemical industry, bio-ecological and medical detection and other fields. Photoacoustic spectroscopy (PAS) has become one of the most important analytical methods in spectroscopic detection due to its advantages of zero background detection, no wavelength limitation of detectors, simple optical elements, convenient system regulation and maintenance. In recent years, with the rapid development of weak signal detection and laser technology, photoacoustic spectroscopy has also attracted more attention of scholars. Relevant research results provide an important design reference for improving the detection performance of photoacoustic spectroscopy. However, the current literature report rarely involves the optimization of photoacoustic cells, such as the shape of photoacoustic cells. There is a lack of in-depth exploration on such problems as the shape structure. The photoacoustic cell is one of the most important core components in the photoacoustic spectroscopy detection system. It is the cavity for carrying the gas to be tested and the place where photoacoustic coupling occurs. Its shape greatly affects the relationship between light and sound. The coupling situation affects the signal-to-noise ratio and sensitivity of the whole system. Therefore, exploring the shape of the photoacoustic pool has important theoretical significance and engineering application value. Therefore, based on the design basis of the traditional cylindrical photoacoustic cell, this paper explores and studies the structural model of the photoacoustic cell with eight typical shapes such as circle, triangle, ellipse and so on, and simulates its sound field characteristics. 3D printing technology has produced all kinds of photoacoustic cells, and analyzed the performance indexes of 8 photoacoustic cells through experiments. The longitudinal length of the photoacoustic cell designed by the constraint is equal to the perimeter of the longitudinal section. The simulation results show that the longitudinal acoustic modes of the eight photoacoustic cells are the same. The experimental results show that the acoustic resonance frequencies of the eight photoacoustic cells are the same. The size is basically the same, and is affected by the coupling of the laser source and the acoustic mode in the cavity. Their quality factors are arranged from large to small: circular, short-axis ellipse, regular pentagon, square, large circular axis, and equilateral triangle. Small circle axis shape, long axis ellipse, their cell constants are arranged in order from large to small: circular, long axis ellipse, regular pentagon, square, large circular axis shape, small circular axis shape, regular triangle, short axis ellipse. The overall results show that for the design of the photoacoustic cell in photoacoustic spectroscopy, the shape of photoacoustic cell should be circular in priority without special requirements. The research process and results of this paper can provide a reference for the optimization design of the photoacoustic cell in photoacoustic spectroscopy.

Keywords Photoacoustic spectroscopy; Photoacoustic cell; Geometric shape; Simulation calculation; Optimum design

(Received Aug. 2, 2019; accepted Dec. 15, 2019)

* Corresponding author