引用格式: CHENG Gang, CAO Yanan, TIAN Xing, et al. Calculation and Evaluation of Acoustic and Flow Field Characteristics of Trapezoid Compound Photoacoustic Cell[J]. Acta Photonica Sinica, 2021, 50(2):0230001 程刚,曹亚南,田兴,等. 阶梯复合形光声池声-流特性计算与评估[J].光子学报,2021,50(2):0230001

# 阶梯复合形光声池声-流特性计算与评估

程刚<sup>1</sup>,曹亚南<sup>1</sup>,田兴<sup>1</sup>,刘锟<sup>2</sup>,陈家金<sup>2</sup>

(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:为了提高光声池的检测性能,提出并分析了一种阶梯复合形光声池。以传统圆柱共振型光声 池为基准模型,通过对比解析与模拟计算结果,验证了所采用模拟方法的可靠性,基于模拟方法求解并 获得了阶梯腔半径、阶梯腔长度和阶梯腔数量对阶梯复合形光声池声-流特性的影响规律。结果表明: 减小阶梯复合形光声池中阶梯腔半径,光声信号相对增强,阶梯腔长度存在最佳尺寸使得光声信号达 到最强,阶梯腔数目应选1为宜;流场方面,阶梯复合形光声池构型特征改善了腔内气体涡漩回流的情 况,若进一步对其腔内过渡处进行圆角或倒角处理,腔内流速梯度将变得更为平稳。选择一组设计参 数进行构型与计算,得到阶梯复合形光声池腔体容积降低为对应圆柱共振型光声池的39.7%,光声信号 相对提升约18.7%,同时其频响带宽变窄,品质因数相对得到提升,整体结果显示阶梯复合形光声池声-流特性要优于对应的圆柱共振型光声池。研究内容可为光声光谱光声池的结构优化与改进提供参考。 关键词:光声光谱;结构设计;数值模拟;优化设计;声学;流场 中图分类号:TP212;TN249 文献标识码:A doi:10.3788/gzxb20215002.0230001

Calculation and Evaluation of Acoustic and Flow Field Characteristics of Trapezoid Compound Photoacoustic Cell

CHENG Gang<sup>1</sup>, CAO Yanan<sup>1</sup>, TIAN Xing<sup>1</sup>, LIU Kun<sup>2</sup>, CHENG Jiajin<sup>2</sup>

(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**: To improve the detection performance of the photoacoustic cell, a trapezoid compound photoacoustic cell is proposed and analyzed. Taking the traditional cylindrical resonant photoacoustic cell as the reference model, the reliability of the simulation method is verified by comparing the results of analysis and simulation. Based on the simulation method, the influence of the radius, length, and the number of the stepped cavity on the acoustic field and flow field characteristics of the trapezoidal composite photoacoustic cell is calculated. The results show that reducing the stepped cavity radius of the stepped cavity can make the photoacoustic signal to be the strongest, and the number of the stepped cavity should be one. In terms of the flow field, the configuration characteristics of the trapezoidal composite photoacoustic cell improve the condition of gas vortex return to the cavity. If the transition to the cavity is furthering rounded or chamfered, the velocity gradient in the cavity will become more stable. Select a set of design parameters, the calculation results show that the volume of the trapezoid compound photoacoustic cell

http://www.photon.ac.cn

基金项目:国家自然科学基金(Nos.41575030,41475023),深部煤矿采动响应与灾害防控国家重点实验室开放基金(No.SKLMRDPC19KF12) 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:2020-08-13;录用日期:2020-10-08

cavity is reduced to 39.7% of the corresponding cylindrical resonant photoacoustic cell, and the photoacoustic signal is increased by about 18.7%. In addition, its frequency response bandwidth is narrowed, and its quality factor is improved. The overall results show that the acoustic field and flow field characteristics of the trapezoidal composite photoacoustic cell are better than that of the corresponding cylindrical resonant photoacoustic cell. The research content can provide reference for the structural optimization and improvement of the photoacoustic spectral photoacoustic cell.

Key words: Photoacoustic spectroscopy; Structural design; Numerical simulation; Optimal design; Acoustic; Flow field

OCIS Codes: 300.6340; 120.6810; 280.4788; 300.6380

# 0 引言

利用光声光谱技术可以准确地识别和测量痕量气体的种类及其浓度信息,与其它光谱学测量技术相 比,光声光谱检测技术具有理论零背景噪声检测、探测器与波长无关、提高激励光源功率可以提高检测性 能、光学元件少、整体结构简单等独特的优势<sup>[14]</sup>,已在环境监测<sup>[5]</sup>、工业生产<sup>[6]</sup>、医学诊断<sup>[7]</sup>等领域发挥着重 要的作用。鉴于光声效应产生声波微弱,为提升光声光谱检测的灵敏性与信噪比,通常需要采用声学放大 单元来增强其光声信号。光声池是光声光谱检测装置中最重要的组成部分,起着光声转化及声学放大的功 能,合理的光声池结构设计可以显著提升系统的检测指标<sup>[8]</sup>。然而现有的光声池基本以单纯圆柱形几何结 构为主,可优化的空间较窄,其它形状光声池的光声耦合问题解析式难以建立与求解,其加工制作较为困 难,物理实验费用昂贵,因而相关研究较为少见。文献[9]中对球型结构光声池进行了初步的理论与实验探 索;文献[10]探讨了由多个轴对称锥体连续连接形状的光声池性能;文献[11]采用声学拓扑优化方法探讨 了非规则形状的光声池设计及其性能;文献[12]提出了一种采用 3D 打印技术设计微型光声痕量气体传感 器的新方法。上述文献在一定程度上拓宽了光声池的设计思路,但仍存在着理论设计与机械加工两者难以 兼顾的问题。考虑光声池本体金属材质的可靠性,探索和设计出一种性能优良且易于传统机械加工的光声 池具有重要意义。随着模拟技术的发展,用有限元方法模拟计算光声效应是一种理想的选择,借助先进的 计算机模拟技术,不仅可以降低产品设计前期的试验成本,同时还可以更加自由地探索光声池的结构设计 与形状构型<sup>[13]</sup>。

为了同时满足光声池对信号提升和机械易加工的要求,并使得设计参数更具可操作性,本文基于光声 光谱技术的相关理论,提出并设计了一种综合性能较好、易于机加工的阶梯过渡形的光声池。用有限元仿 真技术对所提出的光声池进行了数值模拟,着重分析了光声池阶梯过渡的台阶数、径长比、面积比、圆弧与 倒角过渡等参数对其声-流特性的影响规律,并根据分析结果给出了阶梯过渡形光声池的一组参数组合,参 照圆柱形光声池的特性指标,综合评估了阶梯过渡形光声池的相关性能。

# 1 基准模型与模拟计算验证

# 1.1 基准模型建立

用于气体光声光谱检测的光声池通常为圆柱共振型光声池,形状类似"哑铃",其特征是中间为圆柱形 谐振腔,两端对称加工有圆柱形缓冲腔,这种光声池整体结构简单,且易于通过传统机加工获得。圆柱共振 型光声池中光声效应相关的数学模型和解析式公式早已建立,应用相当成熟,工程实践中也表明了公式计 算的准确性与有效性<sup>[14]</sup>,但由于光声池中光声效应的耦合情况较为复杂,所获得的圆柱形光声池的解析公 式并不适用于其它形状的光声池,局限了光声池的形状探索与计算,因而本文采用计算机模拟的方法,对所 研究的光声池特性进行模拟计算,不仅可以避免繁杂的公式推导过程,还可以通过计算机后处理对物理场 的分布规律进行可视化分析。为了保证模拟计算结果的可靠性,需要对所采取的模拟方法进行验证,采用 实验室加工的圆柱共振型光声池作为模拟计算的基准模型,以其解析式计算结果为基础,计算不同几何参 数下的描述光声信号的表征量,进而分析与验证模拟计算方法的准确性。圆柱共振型光声池结构模型如图 1所示,其谐振腔长度L<sub>e</sub>=100 mm,半径R<sub>e</sub>=4 mm;缓冲腔长度L<sub>buff</sub>=60 mm,半径R<sub>buff</sub>=35 mm。



图 1 圆柱共振型光声池结构模型 Fig. 1 Cylindrical acoustic resonant photoacoustic cell model

#### 1.2 模拟计算方法与验证

光声池中声学效应是由热粘性声学方程来控制的,考虑了压力、速度和温度产生的声波扰动。为了计 算光声池中的光声信号值,采用多物理场数值计算平台来模拟其光声效应。为保证计算精度,同时减少运 算时间,采用二维对称模型进行建模与计算,建模条件为:1)将光声池的几何模型视为理想化模型,不考虑 加工制造的缺陷以及工艺误差;2)忽略一些微小元素,如用于装配螺钉及其对应的孔等;3)光声池腔内流体 材质设定为理想化气体,且在腔内均匀分布;4)仅抽取光声池的主要流体域即谐振腔与缓冲腔部分作为光 声池的求解域。模拟参数与边界条件设置为:光声池空腔中流体介质为空气,密度为1.29 g/L,声速为343 m/s, 温度为293 K,腔内气压为101.325 kPa,缓冲腔的两外端口处与腔体内壁设置均为无滑移等温边界条件,激 励源为激光高斯光源并沿光声池轴线(Z轴)穿出。因本文不研究激光因素对光声信号的影响,所以在对比 不同条件下的模拟结果时,载荷值施加不变即可,具体数值可以任意选取,不会影响对比结果,激光光束轴 线处的强度表达式为<sup>[15]</sup>

$$H(\mathbf{r}) = \alpha c I(\mathbf{r}) = \alpha c \frac{P_0}{\pi \sigma_0^2} \exp\left(-2\frac{r^2}{\sigma_0^2}\right)$$
(1)

式中, $H(\mathbf{r})$ 为热功率密度源( $W/cm^3$ ); $\alpha$ 为气体吸收系数( $cm^{-1}$ );c为待测气体体积浓度(mol/mol); $I(\mathbf{r})$ 为激光强度( $W/cm^2$ ); $P_0$ 为激光功率(W),r为距轴线的径向距离(cm); $\sigma_0$ 为激光束腰半径(cm)。

通过对求解域的离散化处理及网格计算无关性验证,以圆柱共振型光声池为基准模型的有限元求解模型与模拟结果如图2所示。由图2(b)可知,光声池在扫频频率1607Hz时发生声学共振,光声池谐振腔的中部声压值最大,声压分布由中部沿轴向两端逐步减小,解析计算中腔内声场分布为正弦函数规律<sup>[16]</sup>,谐振腔的中部为声压波峰处,因而模拟结果与解析计算吻合度高。



图 2 光声池网格离散化模型与声压模拟结果 Fig. 2 Grid model of photoacoustic cell and simulation results of sound pressure 为进一步验证所采用模拟方法的准确性,保持其它参数不变,仅改变谐振腔的长度L<sub>e</sub>,分别通过模拟与 解析两种方法计算声压信号并分析两者之间的差异。为消除数据之间量纲影响,对模拟和解析计算数据进 行归一化处理,使两者声压数值均映射到[0,1]之间,转换函数为<sup>[17]</sup>

$$P_{\rm nu} = \frac{x - x_{\rm min}}{x_{\rm max} - x_{\rm min}} \tag{2}$$

式中, P<sub>nu</sub>为归一化后声压大小; x为归一化前样本数据; x<sub>max</sub>, x<sub>min</sub>分别为归一化前样本数据的最大值和最小 值。对比结果如图3所示,可知模拟和解析计算结果非常接近,最大相对误差为5.4%,在可接受范围内。因 此,本文所采用的模拟方法对于计算光声池的光声信号是有效可行的,该方法将被用来计算和分析新型光 声池。



图 3 解析与模拟计算结果对比 Fig. 3 Comparison of analytical and simulation results

# 2 阶梯复合形光声池设计

# 2.1 结构模型与参数

本文提出的阶梯复合形光声池,结构如图4所示,该光声池是将原圆柱共振型光声池中的原缓冲腔拆分 成缓冲腔与梯形腔的组合形式。采取这种结构设计的优势可以预期:1)该结构设计相对增加了谐振腔的长 度,光声信号将有望提升;2)该结构光声池填充体积相对较小,可以降低填充采样时间,有望提升动态检测 效率;3)阶梯形结构可以改善气体入口到出口之间的截面突变部分,预期可减弱光声池在动态采样时的气 体流动噪声;4)该结构可以通过传统机加工实现加工与处理。阶梯复合形光声池的设计参数主要有梯形腔 的长度L,与半径R,采用多个梯形腔设计的情况下,还有梯形腔的数目参数N。



图 4 阶梯复合形光声池结构 Fig. 4 Structure of the trapezoid compound photoacoustic cell

## 2.2 声学特性分析

## 2.2.1 半径R<sub>t</sub>影响

固定光声池 $L_c=100 \text{ mm}, R_c=4 \text{ mm},$ 将原缓冲腔沿轴向分解成两等分长度,使得 $L_t=L'_{\text{buff}}=30 \text{ mm},$ 参数 $R_t$ 对光声池性能的影响如图5所示。可知声压值随着 $R_t$ 的增大先呈现减小趋势,后逐渐趋于平稳,在 $R_t$ <

20 mm时, *R*<sub>t</sub>变化对声压值的影响很大; 声学共振频率随着 *R*<sub>t</sub>的增大先呈现增长趋势, 后逐渐趋于平稳, 同时在 *R*<sub>t</sub><20 mm时, *R*<sub>t</sub>的变化对声学共振频率的影响也相对较大。以上结果原因在于, *R*<sub>t</sub>的变化相当于在一定程度上改变了谐振腔的长度, *R*<sub>t</sub>越接近 *R*<sub>c</sub>的几何尺寸, 影响效果越明显, 进一步推断, 当 *R*<sub>t</sub><4*R*<sub>c</sub>时, *R*<sub>t</sub>的变化对于声学信号和声学共振频率有较大影响, 反之影响敏感度较弱。



图 5 梯形腔半径对光声池性能影响 Fig. 5 Effect of trapezoidal cavity radius on the performance of the photoacoustic cell

#### 2.2.2 长度L<sub>1</sub>影响

固定光声池L<sub>c</sub>=100 mm, R<sub>c</sub>=4 mm, R<sub>i</sub>=10 mm, 使得缓冲腔与梯形腔总长L<sub>i</sub>+L'<sub>buff</sub>=constant=60 mm, 参数L<sub>i</sub>对光声池性能的影响如图6所示。可知声压值随着L<sub>i</sub>的增大先呈现增大趋势, 当L<sub>i</sub>=40~45 mm时, 声压信号存在一个极大值, 当L<sub>i</sub>继续增大, 声压值急剧减小, 这说明L<sub>i</sub>并非越大越好; 声学共振频率随L<sub>i</sub>的 增大先呈现类似线性递减趋势, 当L<sub>i</sub>在 50 mm 附近时, 声学共振频率获得一个极小值, 当L<sub>i</sub>继续增大时, 声 学共振频率随着L<sub>i</sub>的增大而增大。以上结果的原因在于, L<sub>i</sub>在初始变化时会影响谐振腔的相对长度, 当L<sub>i</sub>变 化到一定程度时, 光声池腔内的声场特性出现了改变, 从而对其声学模态及光声耦合产生影响, 可以推断基 于以上条件, L<sub>i</sub>的选择必须合理, 否则会产生负面影响。



图 6 梯形腔长度对光声池性能影响 Fig. 6 Effect of trapezoidal cavity length on performance of the photoacoustic cell

## 2.2.3 阶梯数N影响

固定光声池 $L_c=100 \text{ mm}, R_c=4 \text{ mm}, 使缓冲腔与梯形腔总长不变: <math>\Sigma L_u + L'_{buff}=\text{constant}=60 \text{ mm}(i=N), 尝试设计多个阶梯结构以形成多层梯形腔互联方案,在设计中,各梯形腔半径大小沿轴向依次呈等差数$ 列安排,模型的结构及尺寸如图7所示,参数N对光声池性能的影响如表1所示。可知随着N的增大,声压值越来越小,且减小的程度趋于变弱,整体而言,影响程度并不显著;声学共振频率随N的增加呈增长的趋势,但多个梯形腔结构对光声池腔体的声学振型并没有影响,声压云图表明,三种阶梯复合形中谐振腔中部均为声压最大位置,且声压由中部沿轴向两端呈减小分布规律。综上,对于阶梯复合形光声池的设计,选用N=1为宜,这样不仅可以获得相对较高的声压信号,同时还可以减小机械加工量。可以推断,N增加其声学 性能越差是由于在光声模拟计算中考虑了声学热粘性损耗,N的增加必然会增加光声池腔内声学面损耗,进 而影响了腔内声能量的耦合效果。



图 7 不同阶梯数下的结构模型 Fig. 7 Structural models with different number of steps

表 1 不同 N 下的模拟结果 Table 1 Simulation results with different N

Ν	Pressure/Pa	Frequence/Hz	Sound pressure distribution
1	$2.49  imes 10^{-5}$	1 457	
2	$2.37 \times 10^{-5}$	1 519	
3	$2.33 \times 10^{-5}$	1 540	

## 2.3 流场特性分析

光声池的检测性能不仅取决于其光声信号,在动态检测的条件下,连续采样时腔内气体流动对光声检测品质亦有重要影响,文献[18-19]中均有实验与模拟相应结果。因此,进一步比较分析阶梯复合形光声池与圆柱共振型光声池的腔内流场差异,将有助于全面了解其性能特点。由于通过实验来观测腔内流场较为困难,因而本文将延用文献[18]中所采用的计算流体动力学(Computational Fluid Dynamics,CFD)技术进行模拟计算,并且分析在不同形状、参数条件下的光声池腔内气体流动规律与流场特性。 2.3.1 计算条件与结果

光声池流场计算为内部稳态求解类型,对光声池三维模型适当处理,建立腔内封闭的流场计算域。光声池进、出气孔为NPT1/8标准螺纹孔尺寸,进气与出气孔的间距L<sub>g</sub>=200 mm,阶梯结构参数N=1,R<sub>i</sub>=10 mm, L<sub>i</sub>=40 mm,其余尺寸设定与基准模型相同。光声池腔内流体材质定义为空气,流体与固体温度均设定为 293 K,定义进出口计算边界条件:进气口为流速边界 V<sub>in</sub>=1 m/s并施加充分流动条件,出气口为静压边界 101.325 kPa,固体壁面采用绝热壁面条件,以流体平均速度与平均动压为收敛目标,对模型网格以及求解精 度进行适度设定,流场模拟结果如图8所示。

识别腔内流体域,计算可知阶梯复合形光声池气体容积降低为圆柱共振型光声池的39.7%,容积小将 会缩短样品采样时间,有助于提升动态检测效率。从图8流场图可知,气体流经光声池腔体时,在进、出气口 以及谐振腔位置流速相对较大,谐振腔中流速较为平稳,由于气流的冲击作用,气体在进入和离开谐振腔时 流体附近速度梯度较为显著;对比图8(a)、(b)可知,圆柱共振型光声池的缓冲腔与谐振腔之间的截面突变 相对剧烈,因而两侧缓冲腔内均出现了较大的涡漩回流区域,涡漩回流不仅会增加气体流动时的阻力,降低 腔内气体浓度的交换效果,同时还会产生能量损失诱发气体噪声;阶梯复合形光声池腔内截面的逐步变化 起到了导流作用,因而其涡漩回流区域及其程度都得到一定改善,流场特性明显要优于圆柱共振型光声池。



图 8 光声池前后对称面流场切面分布云图 Fig. 8 Flow field distribution in front and back symmetrical section of the photoacoustic cell

2.3.2 过渡处结构改进

对阶梯复合形光声池结构过渡处进行改进,分析将光声池梯形腔与缓冲腔、谐振腔的转接处改成倒角 或圆角结构的流场特性。为简化设计,设定光声池中的所有倒角C或圆角R尺寸均相等,对比分析C为1.5 mm、 3 mm或R为1.5 mm、3 mm条件下的流场情况。模拟结果显示,过渡处采用倒角或者圆角对池内流场影响 基本相同,相比而言圆角过渡稍好,随着C或R的增大,流场性能表现越好。图9给出了R=3 mm的流场模 拟结果,对比图8(b)可知,带有圆角的阶梯复合形光声池的流速有所降低,流速分布得到了改善。



图 9 阶梯复合形光声池流场切面分布云图(R=3 mm) Fig. 9 Flow field section distribution of the photoacoustic cell (R = 3 mm)

为了更清晰地比较上述结构下的流场特性,以光声池的轴线为路径目标,探测其流速分布,结果如图10所示。可知三种光声池(圆柱型、阶梯型以及带圆角过渡的阶梯型)流速分布均呈现中间高、两端低的特点。当 气体进入和离开谐振腔时,均表现出较大的流速梯度,尤其是圆柱共振型光声池流速梯度非常剧烈,显然不利 于光声系统动态检测。阶梯复合形光声池结构设计改善了气体流动,在光声池腔体右侧表现得较为明显,从 剧烈的流速变化变为较为平缓的过渡,加设圆角过渡,谐振腔中流速出现了一定幅度的降低,同时,光声池腔 体右侧部分流速变化得更为平滑,但对于右侧部分流速有一定的提升,整体而言,其效果要优于另外两种。



图 10 三种结构光声池轴线气体流速分布情况 Fig. 10 Gas velocity distribution along the axis of three photoacoustic cells

## 2.4 综合评估

阶梯复合形光声池采用圆角处理方案可以进一步优化截面突变处的气体流动,但结构上发生了一定的 变化,这需要对其声学特性进行重新评估。为了确定阶梯复合形光声池的最终结构设计,对上述三种结构 光声池进行声学激励频扫模拟计算(扫频范围为1000~2000 Hz,步长为2 Hz),结果如图11所示,可知阶 梯复合形及其带圆角的两种光声池声压值基本相同,这说明圆角处理对其声学特性的影响甚微,因而在设 计中可以优选圆角处理方案;通过计算,阶梯复合形光声池声压值较圆柱共振型光声池提升约18.7%,提升 幅度较为显著;其次,从图中还可以观察出,阶梯复合形及其带圆角的两种光声池均比圆柱共振型光声池具 有更窄的频响带宽,同时声学共振频率又相对降低,因而其品质因数将高于圆柱共振型光声池,从理论上 讲,品质因数高可以提升检测信号的灵敏性。综上,阶梯复合形光声池是一种光声池结构的可选设计,整体 声-流特性优于传统圆柱共振型光声池。



图 11 三种结构光声池频扫结果 Fig. 11 Frequency scanning results of three photoacoustic cells

# 3 结论

以圆柱共振型光声池为基础,提出了一种阶梯复合形光声池的设计方案,在验证模拟方法正确的基础 上,通过模拟分析对比了设计参数对光声池声-流特性的影响,结果表明:

1)在参数研究范围内,减小阶梯腔半径,光声信号相对增强;阶梯腔长度存在最佳尺寸,使得光声信号 达到最强;单阶梯腔结构设计,光声信号相对较好;

2)阶梯复合形光声池改善了缓冲腔与谐振腔之间的截面突变导致的气体涡漩回流情况,流场特性相对 较好,进一步对腔内过渡处进行圆角或倒角处理,可使得腔内流速变得更为平稳;

3)在所选参数的条件下,阶梯复合形光声池气体容积降低为圆柱共振型光声池的39.7%,其光声信号 相对提升约18.7%,其频响带宽变窄,光声池品质因数得到提升。

#### 参考文献

- [1] MA Y F. Review of recent advances in QEPAS-based trace gas sensing[J]. Applied Sciences, 2018, 8(10): 1822.
- [2] LIU K, CAO Y, WANG G S, et al. A novel photoacoustic spectroscopy gas sensor using a low cost polyvinylidene fluoride film[J]. Sensors & Actuators: B. Chemical, 2018, 277: 571-575.
- [3] MA Ying, YU Liang, ZHENG Huadan, et al. Optimization of overtone resonance based quartz-enhanced photoacoustic spectroscopy spectrophone [J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(8): 0811002.
  马英,余亮,郑化丹,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.
- [4] YIN X K, WU H P, DONG L, et al. ppb-Level SO<sub>2</sub> Photoacoustic sensors with a suppressed absorption desorption effect by using a 7.41 μm external-cavity quantum cascade laser[J]. ACS Sensors, 2020, 5(2): 549-556.
- [5] DONG Lei, MA Weiguang, ZHANG Lei, et al. Mid-IR ultra-sensitive CO detection based on pulsed quartz enhanced photoacoustic spectroscopy[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(1): 295–299.

董磊,马维光,张雷,等.基于脉冲石英增强光声光谱的中红外超高灵敏CO探测[J].光学学报,2014,34(1):295-299.

- [6] LINHARES F G, LIMA M A, MOTHE G A, et al. Photoacoustic spectroscopy for detection of N<sub>2</sub>O emitted from combustion of diesel/beef tallow biodiesel/sugarcane diesel and diesel/beef tallow biodiesel blends[J]. Biomass Conversion and Biorefinery, 2019, 9(3): 577-583.
- [7] LI Li, XIE Wenning, LI Hui. Applications of photoacoustic spectroscopy in the field of modern biomedicine[J]. Laser &-

Optoelectronics Progress, 2012, 49(10): 69-76.

李莉,谢文明,李晖.光声光谱技术在现代生物医学领域的应用[J].激光与光电子学进展,2012,49(10):69-76.

- [8] BESSON J P, STEPHANE S, THEVENAZ L. Multi-gas sensing based on photoacoustic spectroscopy using tunable laser diodes[J]. Spectrochimica Acta Part A, 2004, 60(14):3449-3456.
- [9] ZHAO Junjuan, ZHAO Zhan, DU Lidong, et al. Detection of CO<sub>2</sub> in the spherical photoacoustic cell[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2012, 25(3): 289–292.

赵俊娟,赵湛,杜利东,等.球形光声腔中二氧化碳的检测[J].传感技术学报,2012,25(3):289-292.

- [10] KOST B, BAUMANN B, GERMER M. Numerical shape optimization of photoacoustic resonators [J]. Applied Physics B Lasers & Optics, 2011, 102:87–93.
- [11] HAOUARI R, ROCHUS V, LAGAE L, et al. Topology optimization of an acoustical cell for gaseous photoacoustic spectroscopy using COMSOL® multiphysics[C]. Rotterdam, Netherlands, 2017 COMSOL Conference.
- [12] BAUER R, STEWART G, JOHNSTONE W, et al. 3D-printed miniature gas cell for photoacoustic spectroscopy of trace gases[J]. Optics Letters, 2014, 39(16): 4796-4799.
- [13] DUGGEN L, LOPES N, WILLATZEN M, et al. Finite Element Simulation of Photoacoustic Pressure in a Resonant Photoacoustic Cell Using Lossy Boundary Conditions[J]. International Journal of Thermophysics, 2011, 32: 774 - 785.
- [14] 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,刘锟,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.
- [15] COTTERELL M I, WARD G P, HIBBINS A P, et al. Optimizing the performance of aerosol photoacoustic cells using a finite element model. Part 1: method validation and application to single-resonator multipass cells[J]. Aerosol Science and Technology, 2019, 53(10): 1107-1127.
- [16] ZHANG X J, ZAHNG Y G. Resonate modes in photoacoustic cell for gas sensing[J]. Journal of Infrared and Millimeter Waves, 2010, 29(5): 321-324+341.
- [17] WANG Dongsheng, YANG Youwen, TIAN Zongjun, et al. Process optimization of thick nanostructured ceramic coating by laser multi-layer cladding based on neural network and genetic algorithm[J]. Chinese Journal of Lasers, 2013, 40(9): 0903001.

王东生,杨友文,田宗军,等.基于神经网络和遗传算法的激光多层熔覆厚纳米陶瓷涂层工艺优化[J].中国激光,2013, 40(9):0903001.

- [18] MIKAEL L, DAVID B H, ANDERS B, et al. Design and experimental verification of a photoacoustic flow sensor using computational fluid dynamics[J]. Applied Optics, 2018, 57(4): 802–806.
- [19] LIU Qian. Research on absorption properties of atmospheric aerosol based on photoacoustic spectroscopy [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2014.
   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.

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (Nos. 41575030,41475023), Open Fund of State Key Laboratory of Mining Response and Disaster Prevention and Control in Deep Coal Mines (No. SKLMRDPC19KF12)