

# H<sub>2</sub>S及CO的近红外波段光声光谱检测技术

张晓星<sup>1,2</sup>, 陈振伟<sup>1</sup>, 程宏图<sup>1</sup>, 张引<sup>2</sup>, 唐炬<sup>1</sup>, 肖淞<sup>1</sup>

(1. 武汉大学 电气与自动化学院, 湖北 武汉 430072;

2. 湖北工业大学 电气与电子工程学院, 湖北 武汉 430068)

**摘要:** SF<sub>6</sub>常用于电力设备内部充当绝缘介质,在SF<sub>6</sub>绝缘设备内部出现过热或局部放电时,进一步反应后还会出现SO<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、CO等分解产物。本研究基于光声光谱检测技术对H<sub>2</sub>S、CO进行定量测量,从理论出发对影响光声信号的因素进行探讨,搭建光声光谱试验平台,根据气体的光声效应对气体进行光声光谱检测。通过选择合适的气体吸收谱线作为特征谱线进行检测,避免其他组分气体存在潜在的交叉干扰。根据HITRAN仿真结果,选定的H<sub>2</sub>S气体特征谱线为6 336.6 cm<sup>-1</sup>,CO气体特征谱线为6 380.3 cm<sup>-1</sup>。结果表明:所测气体CO、H<sub>2</sub>S的气体浓度与净光声信号幅值之间的线性度非常高,即通过测量气体光声信号值可精确反演计算出气体浓度。在SF<sub>6</sub>作为背景气体情况下,CO检测下限为9.88×10<sup>-6</sup>,H<sub>2</sub>S检测下限为1.75×10<sup>-6</sup>。

**关键词:** 气体近红外吸收;光声光谱;痕量气体检测;SF<sub>6</sub>分解组分

中图分类号:TM213 文献标志码:A 文章编号:1009-9239(2021)04-0095-07

DOI:10.16790/j.cnki.1009-9239.im.2021.04.016

## Near Infrared Photoacoustic Spectrum Detection Technology of H<sub>2</sub>S and CO

ZHANG Xiaoxing<sup>1,2</sup>, CHEN Zhenwei<sup>1</sup>, CHENG Hongtu<sup>1</sup>, ZHANG Yin<sup>2</sup>, TANG Ju<sup>1</sup>, XIAO Song<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Engineering and Automation, Wuhan University, Wuhan 430072, China; 2. School of Electrical and Electronic Engineering, Hubei University of Technology, Wuhan 430068, China)

**Abstract:** SF<sub>6</sub> is often used in GIE as an insulating medium, it will decompose when overheating or appearing partial discharge inside GIE, the decomposition products, such as SO<sub>2</sub>, SOF<sub>2</sub>, SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>, H<sub>2</sub>S, and CO will produce after further reaction. In this paper, the components H<sub>2</sub>S and CO were quantitatively measured by photoacoustic spectroscopy detection technology, and the factors affecting photoacoustic signal were discussed theoretically. A photoacoustic spectrum experiment platform was built, and the gas was measured quantitatively based on the photoacoustic effect. Appropriate gas absorption lines were chosen as characteristic spectrum line to avoid the potential cross-interference of other gas components. According to the results of HITRAN simulation, the characteristic spectrum line of H<sub>2</sub>S was chosen as 6 336.6 cm<sup>-1</sup>, and the characteristic spectrum line of CO was chosen as 6 380.3 cm<sup>-1</sup>. The results show that the linearity between the gas concentration of CO and H<sub>2</sub>S and the amplitude of pure photoacoustic signal is extremely high, which suggests that the gas concentration can be accurately calculated through the measurement of photoacoustic signal value of gas. With the background gas of SF<sub>6</sub>, the lower limit of detection for CO is 9.88×10<sup>-6</sup>, and the lower limit of detection for H<sub>2</sub>S is 1.75×10<sup>-6</sup>.

**Key words:** near infrared absorption of gas; photoacoustic spectrum; trace gas detection; SF<sub>6</sub> decomposition components

## 0 引言

六氟化硫(SF<sub>6</sub>)由于其优良的电气绝缘强度和良好的灭弧性能而常被用作高压电气设备的绝缘介质。SF<sub>6</sub>气体绝缘设备具有可靠性高、占地面积小、结构设计和制造工艺灵活、维护成本低等特

收稿日期:2020-07-03 修回日期:2020-08-12

基金项目:国家重点研发计划项目(2017YFB0903805);国网江苏省电力有限公司科技项目(SGJSDK00ZPJS1800293)

作者简介:张晓星(1972-),男(汉族),湖北潜江人,教授,研究方向为电力设备故障评估与在线监测。

点<sup>[1-3]</sup>。SF<sub>6</sub>气体绝缘设备在制造、安装、运行过程中可能产生绝缘缺陷,在缺陷处易出现局部放电和过热,进而导致SF<sub>6</sub>气体分解生成各种低氟化物SF<sub>x</sub>(x=1~5),在无水无氧的纯SF<sub>6</sub>条件下,温度降低,低氟化物反应还原成SF<sub>6</sub>,但气体绝缘设备内部不可避免地存在微水、微氧,在该环境下,SF<sub>x</sub>进一步反应生成SO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、CS<sub>2</sub>等多种分解产物<sup>[4-5]</sup>。此外,故障区域的固体绝缘材料如环氧树脂、绝缘纸等也会参与反应,生成CO、CO<sub>2</sub>等产物<sup>[6]</sup>。研究表明,SF<sub>6</sub>电力设备内的分解组分气体浓度可作为评估电力设备运行状态的评价依据<sup>[7-8]</sup>。

目前用于检测SF<sub>6</sub>绝缘设备内分解气体产物的方法主要有气相色谱法、电化学传感法<sup>[9-10]</sup>、光谱法<sup>[11-12]</sup>等。其中,气相色谱法需要用到的气相色谱仪价格昂贵,且不利于实现在线监测。电化学传感法存在传感器中毒等问题。近些年,利用光谱法进行痕量气体检测的技术取得飞速发展,近红外光声光谱检测是光谱法检测的一个分支,具有检测灵敏度高、稳定性好、响应速度快、抗干扰能力强的优点,且近红外光源价格大幅低于中、远红外光源<sup>[11-14]</sup>,在电气设备在线监测方面有着广阔的应用前景。陈伟根等<sup>[15]</sup>将光声光谱技术运用于油中溶解气体的检测,在近红外波段6 578.58 cm<sup>-1</sup>处,对乙炔(C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>)气体浓度进行了高灵敏度检测。马凤翔等<sup>[16]</sup>将油气分离膜与光声气体传感器进行集成,并运用在C<sub>2</sub>H<sub>2</sub>气体的检测上,进一步满足了油浸式电力设备在线监测的需求。张英等<sup>[17]</sup>在位于中红外区的1 361 cm<sup>-1</sup>、938.7 cm<sup>-1</sup>处实现了SO<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>气体的光声光谱定量检测,其他具有红外吸收的气体如SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、SOF<sub>2</sub>、SOF<sub>4</sub>等,亦都有望能通过光声光谱技术进行定量检测,该检测技术具有极佳的气体检测适用性。

光声池是气体发生光声反应的场所,光声池存在共振和非共振两种工作模式,其中共振光声池结构较复杂,且所需光声池体积较大,不适合仪器小型化<sup>[18-19]</sup>。本研究搭建基于非共振光声池的光声光谱检测平台,选取抗交叉感染能力强的吸收谱线作为气体的特征吸收谱线,分别对CO、H<sub>2</sub>S气体浓度进行光声光谱定性定量检测。

## 1 光声光谱检测原理

红外激光照射气体分子时,气体分子吸收能量,由基态转变为激发态。若把红外激光进行频率

调制和光功率调制,则当气体分子受到周期性的红外激光照射时,气体分子对红外光进行周期性的吸收,其温度周期性改变,引起气体分子体积的周期性变化。周期性膨胀或收缩的气体分子能向外辐射声信号。通过选用带宽满足要求的检测器件对声信号进行检测,即可完成声信号对电信号的转换,并最终输出电信号。由于分子内部的特殊能级结构,分子只对特定波长的光进行吸收,这一点是进行气体定性检测的基础。

光声池检测涉及的能量转化包括光、热、声、电的转化,在气密性良好的光声池内,温度的变化也将引起声压信号的变化,声信号 $p(r,t)$ 的波动方程<sup>[20-22]</sup>可表示为式(1)。

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

式(1)中: $H(r,t)$ 为热功率密度; $\gamma$ 为气体的比热容, $v$ 为气体中的声速; $t$ 为时间。

对式(1)进行傅里叶变化得式(2)。

$$(\nabla^2 + \frac{\omega^2}{v^2})p(r,\omega) = \frac{(\gamma-1)}{v^2}i\omega H(r,\omega) \quad (2)$$

式(2)中: $\omega$ 为声信号频率,对于工作在非共振状态的光声池而言, $\omega$ 同时是热源变化频率、入射光频率,即所调制的光源频率。

对于非共振光声池而言,光源的调制频率远小于光声池最低简正频率,非共振光声池不具有与声信号进行耦合的能力,故光声池工作在平面波模式。因而可运用简正模式<sup>[21-22]</sup>来求解非齐次方程的波动方程得到声信号振幅,如式(3)所示。

$$|A(\omega)| = \frac{P_0 \alpha (\gamma-1) e^{-2\frac{r^2}{a^2}}}{\pi r^2 \sqrt{(\omega^2 + 1/(\omega\tau_0)^2)}} \quad (3)$$

式(3)中: $a$ 为光源的入射光束半径; $\alpha$ 为光吸收系数; $P_0$ 为光源入射功率; $r$ 为光声池半径; $\omega$ 为光源调制角频率; $\tau_0$ 为跃迁寿命。

在对比热容为 $\gamma$ 的气体进行光声光谱检测时,光源的入射光束半径 $a$ 、光源入射功率 $P_0$ 、光声池半径 $r$ 、光源调制的频率 $\omega$ 都是确定的数值,根据式(3)可知,所检测的光声信号幅值只与气体的光吸收系数 $\alpha$ 有关,且成正比关系。气体对某特定波长光强的吸收正比于其在该位置的吸收系数和气体浓度,吸收系数为常数,故通过检测光声信号可得到待测气体的浓度,从而实现定量测量。同时,需要特别指出的是,由式(3)可知,非共振光声池的光声信号随着光声池半径的增大而减小,但当半径过

小时,入射光进入到光声池内会受到影响,且光声池壁会因光吸收而引入大量的噪声。因此,本研究中光声池半径为2.5 mm。

## 2 试验

### 2.1 抗交叉干扰的特征检测波段确定

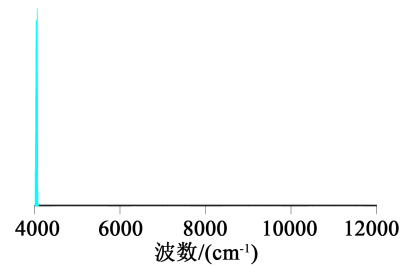
研究表明, SF<sub>6</sub> 气体绝缘电气设备内部 SF<sub>6</sub> 气体的故障分解产物主要有 SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub>、CF<sub>4</sub>、SO<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、HF、H<sub>2</sub>S 等。本研究对其中的 CO 和 H<sub>2</sub>S 气体进行光声光谱检测,将该技术应用在 SF<sub>6</sub> 气体绝缘电气设备中进行检测的前提条件是需避免 SF<sub>6</sub> 和其他 SF<sub>6</sub> 分解组分对 CO 及 H<sub>2</sub>S 的光谱定量检测造成交叉干扰。通过选择气体独有的吸收峰位置进行检测可以实现消除交叉干扰这一目的,因此需要先对 SF<sub>6</sub> 及其分解组分的红外吸收光谱进行对比。本研究选择的待检测气体检测波段位于近红外波段区域,而 SF<sub>6</sub>、SOF<sub>2</sub>、SO<sub>2</sub>F<sub>2</sub> 和 CF<sub>4</sub> 的主要吸收峰均分布于中红外波段区域,故这 4 种气体不会对 H<sub>2</sub>S 及 CO 的近红外光谱检测造成干扰,只需就 SO<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、HF、H<sub>2</sub>S 及 H<sub>2</sub>O 气体的近红外吸收光谱进行对比,从而选择具有抗交叉干扰的 H<sub>2</sub>S 及 CO 分子的特征吸收谱线。

利用基于 HITRAN 数据库的 HITRAN on the Web 在线仿真,分别得到了纯净的 SO<sub>2</sub>、CO、CO<sub>2</sub>、HF、H<sub>2</sub>S 及 H<sub>2</sub>O 气体在温度为 296 K、压强为 0.1 MPa 下,波数在 4 000~8 000 cm<sup>-1</sup> 内的主要吸收光谱谱图,如图 1 所示。由图 1 可知,在 6 300~6 350 cm<sup>-1</sup> 波段中, H<sub>2</sub>S 气体分子的吸收较其他组分强烈很多, HF 和 SO<sub>2</sub> 气体在该区域无吸收峰,因此可能对 H<sub>2</sub>S 造成微弱交叉干扰影响的气体只有 CO、CO<sub>2</sub>。H<sub>2</sub>S、CO<sub>2</sub>、CO 在 6 330~6 350 cm<sup>-1</sup> 的吸收系数谱图如图 2 所示。由图 2 可知, 6 336.6 cm<sup>-1</sup> 处, H<sub>2</sub>S 分子的峰值吸收系数远大于 CO 和 CO<sub>2</sub>, 在该波数处, CO 和 CO<sub>2</sub> 分子的吸收系数均处于波谷位置,对 H<sub>2</sub>S 分子造成的干扰极小,可忽略不计。因此最终确定 H<sub>2</sub>S 特征吸收谱线为 6 336.6 cm<sup>-1</sup>。

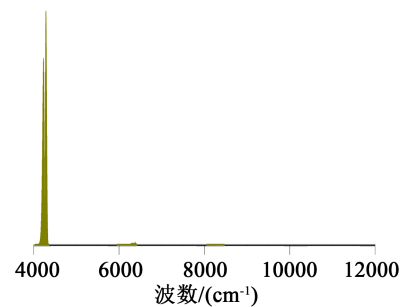
由图 1 还可知,对于 CO 气体分子,在 6 370~6 390 cm<sup>-1</sup> 波段内,组分中对 CO 可能造成交叉干扰影响的气体有 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>。H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO 在 6 370~6 390 cm<sup>-1</sup> 的吸收谱图如图 3 所示。对 H<sub>2</sub>O、CO<sub>2</sub>、CO 的吸收谱图进行对比分析,最终确定 CO 气体所选取的研究波段为 6 380.3 cm<sup>-1</sup>,该谱线同样具有很强的抗其他组分气体交叉干扰的能力。

### 2.2 试验平台搭建与测量步骤

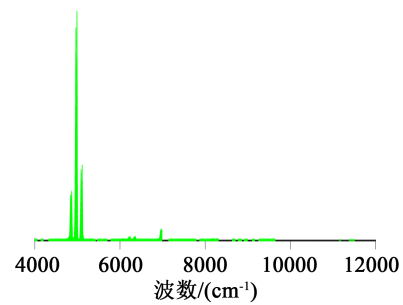
光声光谱的实验平台如图 4 所示,主要分为三部分:光源、光声池与信号检测系统。得益于性能优异的激光光源和传声器,基于光声光谱技术的气体浓度检测具有较高的灵敏度。本研究所用激光器为上海飞秒光电科技公司的分布反馈式激光



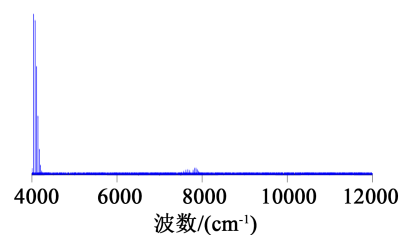
(a)SO<sub>2</sub>



(b)CO<sub>2</sub>



(c)CO



(d)HF

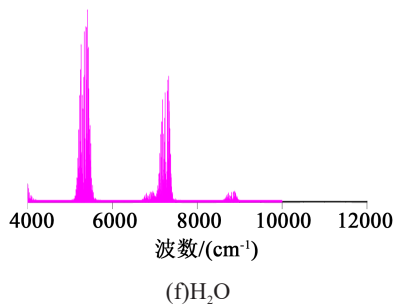
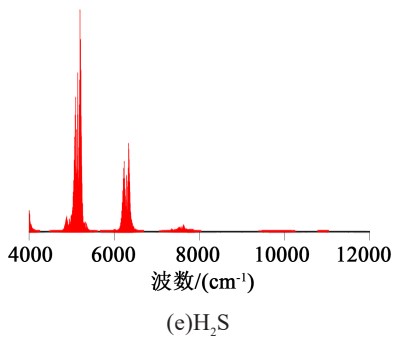


图1 5种分解组分及微水近红外吸收光谱  
Fig.1 Near infrared absorption spectra of five decomposition components and moisture

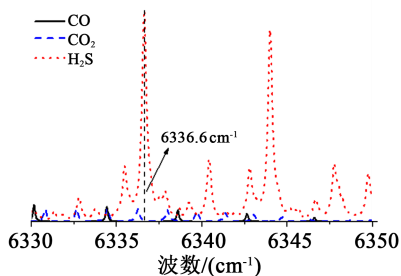


图2 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>S的吸收系数谱图  
Fig.2 Absorption coefficient spectra of CO, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>S

器(DFBLD),信号探测器为高灵敏度的悬臂梁传声器。

光声池具有对称结构,相同体积下的圆柱体表面积比长方体小,为了减小光声池壁的光吸收带来的噪声,选择圆柱形光声池能达到更好的检测性能。光声池池壁会吸收入射光,产生的固体光声效应会向测量结果引入噪声,同时,气体池内壁采用的材料应能避免被测气体腐蚀,故而气体池内壁需要进行抛光镀膜处理。为了提高入射光的透过率,入射端窗口需要选择高透过率的镜片,同时,为了抑制材料吸收光而产生噪声,在出射端也需要选取

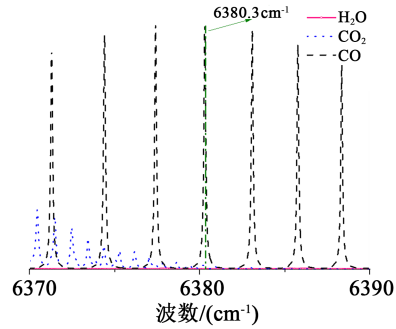


图3 CO、CO<sub>2</sub>、H<sub>2</sub>O的吸收系数谱图  
Fig.3 Absorption coefficient spectra of CO, CO<sub>2</sub> and H<sub>2</sub>O

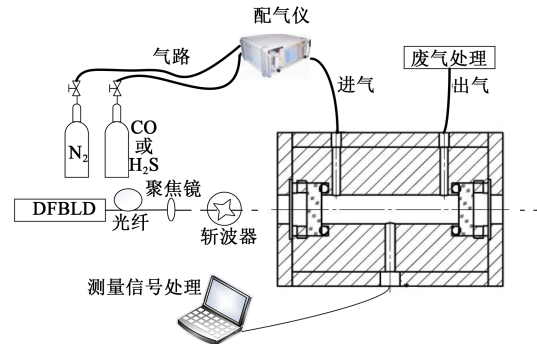


图4 实验平台示意图  
Fig.4 Schematic diagram of experimental platform

透过率高的材料<sup>[23]</sup>。因此,本研究光声池窗口采用氟化钡(BaF<sub>2</sub>)镜片,该材料具有很高的光透过率,且几乎不吸水,能保证窗片长时间的使用。

测量步骤如下:①样气配制。使用高精度的配气仪配置不同浓度的待测气体,使用配气仪时,先打开配气仪进行预热处理 20 min,所用稀释气体为 SF<sub>6</sub>。②光声池的冲洗。利用高纯 SF<sub>6</sub> 气体对气体池进行 5 次冲洗。③系统参数设定。依据所要观测的吸收谱线值计算出所需红外激光波长,进而选取合适的光源进行检测(H<sub>2</sub>S 气体选取的研究波段为 6 336.6 cm<sup>-1</sup>,故光源波长选择为 1 578 nm;CO 气体选取的研究波段为 6 380.3 cm<sup>-1</sup>,故光源波长选择为 1 567 nm),具体参数如表 1 所示。④系统噪声信号采集。向气体池中充入 SF<sub>6</sub> 时,光声池温度设置为 25℃,压强设置为 0.1 MPa。在不打开光源时,打开测量电路测得此时的电信号,重复采集多次并取其均方根值作为系统噪声。打开光源,测得此时的电信号,将该信号作为背景气体信号。⑤充入不同浓度待测样气并采集对应电信号。将配置好的不同浓度的待测量样气充入气体池,并记录测量系统输出电信号。在每次充入待测样气之前要重复步骤

②,对光声池进行反复清洗。

表1 检测系统参数与噪声

**Tab.1 Detect system parameters and noise**

对象	特征谱线 /(cm <sup>-1</sup> )	激光波长 /nm	调制频率 /Hz	系统噪声 /mV
H <sub>2</sub> S	6 336.6	1 578	20	0.060
CO	6 380.3	1 567	40	0.037

### 2.3 光源调制频率确定

为了确定光源的最优调制频率,首先通过仿真研究了不同调制频率下光声池内部的声压分布情况,在有限元仿真软件声学模块中计算直径为5 mm、长度为40 mm的圆柱形光声池的声压分布情况(长度主要由微音器尺寸与光声池上的开孔需求确定)。

研究中取光声池的轴向截面作为仿真对象模型。仿真中在光声池轴向中心位置创建热源代替光源,该热源代表气体分子因吸收光而产生的热辐射。在仿真中,相比光声池几何尺寸,声的边界层厚度非常小,所以可以将仿真条件设置为滑移速度场条件与绝热条件。气体池腔体示意图如图5所示,在光声池轴心处设置半径为4倍高斯扩散系数σ<sub>0</sub>的长条热源代表辐射光束,并为方便下面部分的叙述,在图中规定了轴向正方向,仿真对象腔体为二维轴对称模型,宽度为2.5 mm,长度为40 mm。

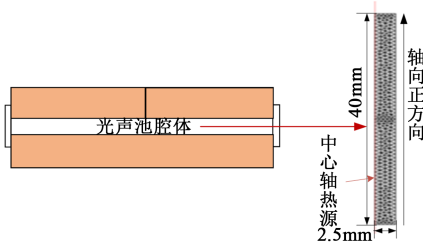


图5 气体池腔体示意图

Fig.5 Schematic diagram of chamber

对于工作在非谐振状态下的光声池,其内部各处的气压是近似相等的,池壁上沿轴向分布的声压如图6所示(非谐振状态对应的频率低,一般在几十赫兹以内),可以看出固定调制频率下的光声池内部各处声压相等,且随着调制频率的增大,激发声压越小。图6中所表现出的规律与式(3)吻合,即光声池的结构参数(长度、半径)中,非共振光声池的长度并不会影响其光声信号的大小,只有半径会影

响到信号幅值,非共振光声池的光声信号随着光声池半径的增大而减小。

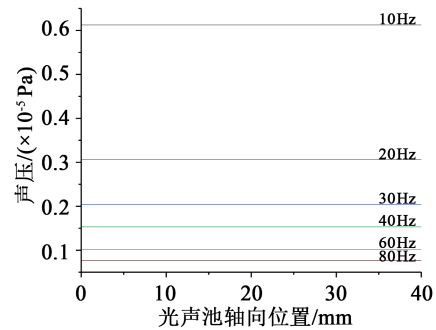


图6 不同调制频率下的池内声压分布

Fig.6 The sound pressure distribution in the pool at different modulation frequencies

在理想情况下,光源调制频率越低,激发的光声信号越小,但在实际中,噪声是无法避免的一部分,不同的调制频率下,实验检测系统所产生的噪声是不一样的。为使检测信号的信噪比达到最优,在尽可能低的调制频率(10~80 Hz)下,按照2.2中的光声光谱检测技术测量步骤进行实验,计算出不同情况下的信噪比,从而选取最优信噪比对应的调制频率来调制光源。

## 3 结果与讨论

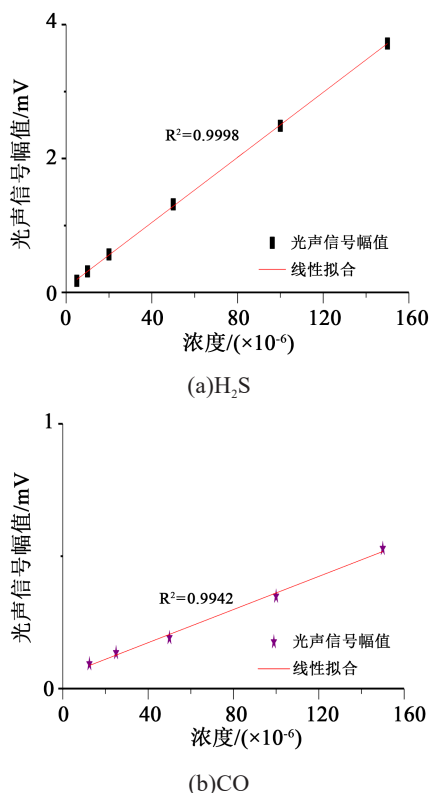
### 3.1 不同浓度样气的光声信号

检测痕量H<sub>2</sub>S气体,采用GC-600型多功能配气仪配制H<sub>2</sub>S/SF<sub>6</sub>气体,浓度从低到高分别为5×10<sup>-6</sup>、10×10<sup>-6</sup>、20×10<sup>-6</sup>、50×10<sup>-6</sup>、100×10<sup>-6</sup>、150×10<sup>-6</sup>;检测痕量CO气体,CO/SF<sub>6</sub>气体浓度分别为25×10<sup>-6</sup>、50×10<sup>-6</sup>、100×10<sup>-6</sup>、200×10<sup>-6</sup>、300×10<sup>-6</sup>。因为两种气体在各自吸收谱线上的吸收系数不同,故而所测样气浓度设置不同,且测量的光声信号幅值亦不同。不同浓度的样气净光声信号(净光声信号为样气光声信号扣除了背景气体光声信号后的值)如图7所示,其中每个值通过采集的200个数据取平均值得到。H<sub>2</sub>S、CO样气光声信号幅值与样气浓度的拟合曲线线性度分别高达0.999 8、0.994 2,说明通过所测光声信号线性反演计算出气体浓度是可行的,其反演公式如式(4)~(5)所示。

$$X_{H_2S/SF_6} = 41.14y_{H_2S/SF_6} - 2.94 \quad (4)$$

$$X_{CO/SF_6} = 0.6389y_{CO/SF_6} - 30.83 \quad (5)$$

式(4)~(5)中:X<sub>H<sub>2</sub>S/SF<sub>6</sub></sub>为H<sub>2</sub>S浓度,单位为10<sup>-6</sup>;X<sub>CO/SF<sub>6</sub></sub>

图7 SF<sub>6</sub>中样气浓度和净光声信号幅值的关系Fig.7 The relation between the concentration of sample gas and the amplitude of clean photoacoustic signal in SF<sub>6</sub>

为CO浓度,单位为 $10^{-6}$ ;  $y_{\text{H}_2\text{S}/\text{SF}_6}$ 为H<sub>2</sub>S气体对应的净光声信号幅值,单位为mV;  $y_{\text{CO}/\text{SF}_6}$ 为CO气体对应的净光声信号幅值,单位为 $10^{-3}$  mV。

### 3.2 气体检测灵敏度

气体检测灵敏度,即理论检测下限,是衡量光声光谱检测性能的重要参数,灵敏度主要受到系统噪声的影响。气体检测灵敏度可依据已知的样气浓度及其对应光声信号的信噪比来计算<sup>[17]</sup>,如式(6)所示,计算数据如表2所示。

$$C_{\min} = \frac{C}{S_{\text{NR}}} \quad (6)$$

式(6)中:  $C_{\min}$ 表示气体检测灵敏度;  $C$ 为已知的气体浓度;  $S_{\text{NR}}$ 为信噪比。

表2 检测下限计算

Tab.2 The calculation of lower limit of detection

对象	光声信号幅值/mV	信噪比	检测下限/( $\times 10^{-6}$ )
H <sub>2</sub> S	0.171 7( $5 \times 10^{-6}$ )	2.86	1.75
CO	0.09 348 6( $25 \times 10^{-6}$ )	2.52	9.88

通过计算得到所搭建的检测系统CO检测下限为 $9.88 \times 10^{-6}$ , H<sub>2</sub>S检测下限为 $1.75 \times 10^{-6}$ 。两种气体的检测下限都达到了较小级别,其中H<sub>2</sub>S的检测下限更低,这是所选特征谱线上H<sub>2</sub>S气体的吸收系数大于CO导致的。

## 4 结论

(1)光声信号幅值受光声池半径、所检测气体类别与浓度、光源功率等因素的影响,在光源、光声池结构一定的情况下,光声信号幅值只与待测气体的浓度有关,且为成正比关系。

(2)选定H<sub>2</sub>S和CO气体特征谱线分别为 $6\ 336.6\ \text{cm}^{-1}$ 和 $6\ 380.3\ \text{cm}^{-1}$ ,该特征谱线可有效避免其他分解组分气体的干扰,对应的光源波长分别为 $1\ 578\ \text{nm}$ 和 $1\ 567\ \text{nm}$ 。

(3)在SF<sub>6</sub>为背景气体的条件下,所测样气CO、H<sub>2</sub>S的气体浓度与净光声信号幅值具有良好的线性关系,可以通过光声信号幅值反演出待测气体的浓度以实现定量检测。CO的检测下限为 $9.88 \times 10^{-6}$ , H<sub>2</sub>S的检测下限为 $1.75 \times 10^{-6}$ 。

## 参考文献:

- [1] LI X, WANG X H, XIE D L, et al. Time-frequency analysis of PD-induced UHF signal in GIS and feature extraction using invariant moments[J]. IET Science, Measurement & Technology, 2018,12(2):169-175.
- [2] CAO Z Q, TANG J, MIAO Y L, et al. Influence and mechanism of pressure on SF<sub>6</sub> decomposition components of gas-insulated switchgear under positive DC partial discharge[J]. IEEE Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2018, 13(8): 1136-1141.
- [3] CHRISTOPHOROU L, OLTHOFF J. Electron interactions with SF<sub>6</sub>[J]. Journal of Physical and Chemical Reference Data, 2000, 29(3): 267-330.
- [4] 张晓星,杨紫来,文豪,等. 环氧树脂在SF<sub>6</sub>/N<sub>2</sub>混合气体下的热分解[J]. 高电压技术, 2020, 46(7): 2453-2459.
- [5] 唐炬,任晓龙,张晓星,等. 气隙缺陷下不同局部放电强度的SF<sub>6</sub>分解特性[J]. 电网技术, 2012, 36(3): 40-45.
- [6] 张晓星,周磊,裘吟君,等. 针-板缺陷开关柜局部放电与空气分解组分的关联特性[J]. 高电压技术, 2016, 42(12): 3948-3954.
- [7] 廖建平,楚金伟,王奇,等. SF<sub>6</sub>分解产物测试在高压直流套管状态诊断与分析中的应用[J]. 高压电器, 2017, 53(6): 186-190.
- [8] 张施令. 高压SF<sub>6</sub>气体绝缘组合电器放电故障模式智能识别[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 432-440.
- [9] CHEN Z W, ZHANG X X, XIONG H, et al. Dissolved gas analysis in transformer oil using Pt-doped MoSe<sub>2</sub> monolayer based on first principles method[J]. IEEE Access, 2019, 20: 72012-72019.
- [10] 张晓星,张引,傅明利,等. 基于紫外光谱的C<sub>2</sub>F<sub>4</sub>/N<sub>2</sub>/CO<sub>2</sub>混合气体

- 混合比检测[J]. 高电压技术,2019,45(4):1034-1039.
- [11] 张晓星,李健,云玉新,等. 用于变压器油中乙炔含量检测的红外激光气体传感器的研制[J]. 高电压技术,2013,39(11):2597-2602.
- [12] MODUGNO G, CORSI C, GABRYSCH M, et al. Detection of H<sub>2</sub>S at the ppm level using a telecommunication diode laser[J]. 1998,145(1):76-80.
- [13] YIN X K, WU H P, DONG L, et al. Ppb-level photoacoustic sensor system for saturation-free CO detection of SF<sub>6</sub> decomposition by use of a 10 W fiber-amplified near-infrared diode laser [J]. Sensors and Actuators B: Chemical,2019,282:567-573.
- [14] CHEN K, ZHANG B, LIU S, et al. Parts-per-billion-level detection of hydrogen sulfide based on near-infrared all-optical photoacoustic spectroscopy[J]. Sensors and Actuators B: Chemical, 2019,283:1-5.
- [15] 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.
- [16] 马凤翔,田宇,陈珂,等. 基于微型光声传感器的油中溶解气体检测技术[J]. 光学学报,2020,40(7):730003.
- [17] 张英,张晓星,李军卫,等. 基于光声光谱法的SF<sub>6</sub>气体分解组分在线监测技术[J]. 高电压技术,2016,42(9):2995-3002.
- [18] 张川,王辅. 光声光谱技术在变压器油气分析中的应用[J]. 高电压技术,2005,31(2):84-86.
- [19] 云玉新. 基于共振光声光谱的变压器油中溶解气体在线监测原理及方法[D]. 重庆:重庆大学,2008.
- [20] PUSHKARSKY M, WEBBER M, BAGHDASSARIAN O, et al. Laser-based photoacoustic ammonia sensors for industrial applications[J]. Applied Physics B: Lasers and Optics,2002,75(2-3):391-396.
- [21] SCHFER S, ANDRA S, HESS P. Quantitative signal analysis in pulsed resonant photoacoustics[J]. Applied Optics,1997,36(15):3202-3211.
- [22] REPOND P, SIGRIST M. Photoacoustic spectroscopy on trace gases with continuously tunable CO<sub>2</sub> laser[J]. Applied Optics, 1996,35(21):4065-4085.
- [23] 陈新岗,马志鹏,黄会贤,等. 变压器油中溶解气体光声光谱检测一维光声池信号传输模型研究与设计[J]. 高压电器,2014,50(4):35-41.