

# 颗粒物环境下用于气体吸收光谱测量的气固两相高温样品池系统

周晴, 高振威, 高光珍\*, 张铭珂, 刘庆辉, 陈艺鹏, 蔡廷栋\*\*

江苏师范大学物理与电子工程学院, 江苏 徐州 221116

**摘要** 设计了一种气固两相高温光学样品池, 模拟同时存在颗粒物的气体探测环境, 并通过搭建可调谐二极管激光吸收光谱测量系统, 对颗粒物环境下的温度与乙炔体积分数测量技术进行研究。使用质量流量计配置体积分数为 0.1%~1% 的乙炔气体, 并设计颗粒物播撒装置, 将直径为 125  $\mu\text{m}$  的石英砂颗粒与不同体积分数的乙炔气体混合通入样品池, 在样品池外侧设置纤维加热腔进行温度控制, 产生不同温度的样品环境。使用中心波长为 1540 nm 的 DFB 激光器, 通过对 6489.07  $\text{cm}^{-1}$  与 6490.02  $\text{cm}^{-1}$  位置处的一对乙炔吸收谱线进行同时探测, 实现了对温度与乙炔体积分数的同时测量。分析发现, 500~1000 K 温度范围内的温度测量一致性  $R^2 \approx 0.998$ , 相对平均标准偏差为 3.05%, 乙炔体积分数测量一致性  $R^2 \approx 0.995$ , 相对平均标准偏差为 2.65%。此系统满足颗粒物环境下气体光谱探测研究的需求, 可为气固两相环境下的光谱探测技术研究提供参考。

**关键词** 光谱学; 吸收光谱; 消光光谱; 样品池; 气固两相; 气体探测

中图分类号 O433.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/AOS221299

## 1 引言

随着光电子技术的发展, 半导体激光器及相关的光电子器件越来越多地在商业上得到应用, 可调谐二极管激光吸收光谱(TDLAS)技术因具有选择性强、响应速度快、波长可调、价格低廉等优势<sup>[1]</sup>, 逐渐成为化学动力学研究<sup>[2-3]</sup>、工业过程监控<sup>[4]</sup>、大气痕量气体监测<sup>[5-6]</sup>等领域的主流探测技术之一。直接吸收法是 TDLAS 技术中最简便的探测方法<sup>[7]</sup>, 其结构简单、结构紧凑、抗干扰能力强, 被广泛用于在线监测领域<sup>[8]</sup>。直接吸收法利用波长连续变化的激光在气体分子共振频率下受到介质的吸收作用引起光强衰减的原理, 通过探测透射激光强度获得气体介质的吸收光谱, 通过分析吸收光谱信号的线宽、积分吸光度等特征<sup>[9]</sup>, 可以实现气体分子的温度<sup>[10]</sup>、压强<sup>[11]</sup>、浓度<sup>[12]</sup>等参数的反演。

实际探测工况往往难以提供洁净的气体环境, 当探测环境中同时存在气体与气溶胶或者其他颗粒物时, 固体颗粒对激光信号同样具有消光作用<sup>[13]</sup>, 在较小的波长范围内, 颗粒物吸收随波长的变化可以忽略不计, 但此时探测器接收到的信号会同时包含气体吸收

和颗粒物消光的信息<sup>[14]</sup>, 从而对气体分子吸收光谱信号的提取造成影响, 比如大气中高浓度的细颗粒物( $\text{PM}_{2.5}$ )会对光谱探测结果产生干扰<sup>[15]</sup>, TDLAS 技术对于大气中痕量气体的探测大多依赖于增加有效吸收光程, 而此方法在提高灵敏度的同时也会放大颗粒物对探测信号的影响, 导致探测结果的准确性下降。可吸入颗粒物( $\text{PM}_{10}$ )同样是光谱探测结果的重要影响因素之一<sup>[16]</sup>, 工业过程直接排放和大气二次反应是其主要来源, 不同来源的  $\text{PM}_{10}$  在种类和数量上变化大, 空气中受重力、浮力和拖曳力的作用不同, 且不同的颗粒物粒径大小导致其在空中停留和转移的时间不同, 因此难以对其浓度、粒径等参数进行预先标定。燃烧产物探测是工业过程监测的重要环节, 碳烟(soot)是气体光谱探测的重要影响因素<sup>[17]</sup>, 在高当量比的火焰中, 未被氧化的大分子碳氢化合物在高温下裂解, 经过凝结、生长以及团聚过程产生大分子的碳烟颗粒<sup>[18]</sup>。气体对激光信号的吸收选择性强, 仅会在相应的共振频率位置对激光造成衰减<sup>[19]</sup>, 而颗粒物对激光的消光在较窄的范围内波长选择性弱<sup>[20]</sup>, 因此在气固两相环境得到的光谱信号是气体吸收与颗粒物消光的混合信号; 若在分子目标谱线附近不存在或者仅存在较少干

收稿日期: 2022-06-10; 修回日期: 2022-07-29; 录用日期: 2022-08-09; 网络首发日期: 2022-08-19

基金项目: 国家自然科学基金(62275110, 42275136, 61875079, 61805110, 61475068, 11104237)、江苏省重点研发计划(社会发展)专项(BE2021634)、江苏省碳达峰碳中和科技创新专项(BE2022314)、徐州市推动科技创新项目重点研发计划(KC19202)、江苏师范大学大学生实践创新训练计划(202010320122Y, 202110320012Z)

通信作者: \*ggz@jsnu.edu.cn; \*\*caitingdong@126.com

扰吸收谱线的情况下,可以通过屏蔽掉吸收峰后拟合获得基线,颗粒物的消光信息可被去除掉,但在燃烧诊断或者机动车尾气测量等领域,所测流场成分复杂,且较多分子的谱线相互混合,此时较难为目标分子选出具有足够独立性的谱线进行测量,这种情况下谱线的混合以及温度和压力的升高均使得基线难以从吸收信号中拟合得到,目前采用的方法主要是以提前测得的激光信号为基线,此时无法去除测量信号中由颗粒物消光带来的影响。若要消除颗粒物消光对气体吸收的影响,需要将两种信号分离才能实现颗粒物环境中的气体吸收光谱探测,因此进行颗粒物环境下的气体光谱探测技术研究对于提升 TDALS 的应用能力具有重要的意义。

为开展颗粒物环境中气体光谱探测技术研究的实验,本文将在所设计的气固两相高温样品池的基础上,搭建 TDLAS 测量系统,选择乙炔气体为探测目标,使用 1540 nm 的 DFB 激光器作为光源,通过进行石英砂颗粒物环境下的乙炔吸收光谱信号的探测以及气体吸收信号的分离处理,对颗粒物环境下的气体光谱探测技术进行研究。

## 2 气固两相样品池装置

样品池设计如图 1 所示,样品池整体材料选用 310s 不锈钢,可以长时间承受 1450 K 的高温,熔点为 1698~1754 K,为安全考虑,实验温度范围选择在 500~1000 K。由于两侧用于密封光学窗口的高温硅橡胶与氟橡胶密封圈的使用温度范围为 300~580 K,因此在焊接法兰内侧安装由紫铜管制成的水冷装置,保证高温下样品池的气密性。样品池主体高 290 mm、直径为 120 mm,柱体的上下两端设计为锥形,以在维持腔内高度不变的同时减少样品池材料的损耗以及缩小加热器的尺寸。颗粒物样品池用于固体样品存放,通过蝶形阀门控制物料进入下方的样品管道,为确保测量过程中颗粒物的均匀性,实验前首先设定流量计流速,待流速稳定后打开气体管路与颗粒池间的阀门,让颗粒物在高压气瓶内的标准气体的载带下通过样品池底部处孔径为 0.2 mm 的冲孔网进入气体管道,并从上侧垂直的入口进入样品池,冲孔网的使用可保证气流中所载带的颗粒物的均匀性。此外,为了防止阀门刚打开及颗粒物即将用尽时出现的不均匀性,测量仅在颗粒物下落稳定的中间时间段进行,探测后沉积的颗粒物样品从下侧取出,气体样品从锥面出口排出。样品池两侧开设光学窗口,窗口为长 90 mm、直径为 52 mm 的 JGS3 材质玻璃柱,两侧端面有 1.5° 倾角,以防止光信号的干涉效应。样品池外侧包围加热腔,加热腔外壳选用玻璃纤维材质,内胆设置加热电阻丝。在加热炉使用过程中将两片炉体扣合并使用不锈钢卡箍固定,电阻丝外包陶瓷绝缘柱,并使用绝缘接线端子接入电压控制器,通过配置外接温度控制继电器自动

控制加热温度,样品池温度由 3 个均匀分布在炉体上的测量准确度为  $\pm 1\%$ 、读数精度为 0.1 K 的热电偶实时监测。Flange 1、2、3、4 分别为光学窗口外侧、内侧、样品池底部以及上侧气体出口法兰,其中光学窗口外侧法兰通过不锈钢螺丝固定于光学窗口两侧的内侧法兰,外侧法兰一侧连接中空的通光管,探测时可向管内充入氮气,以将光路中的空气排出,减少空气中部分成分对探测结果造成的影响。

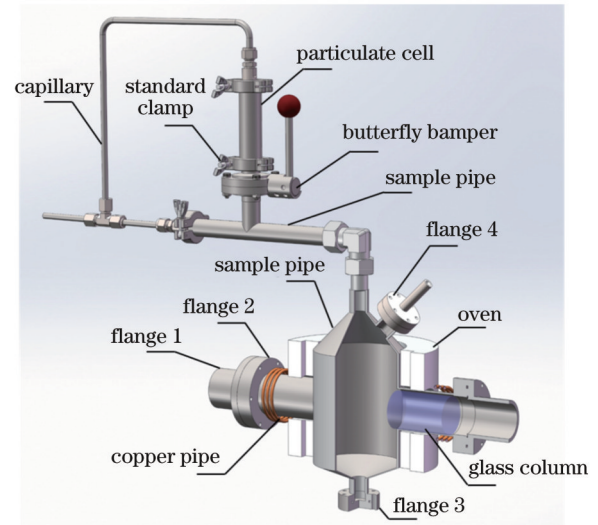


图 1 气固两相样品池示意图

Fig. 1 Schematic of gas-solid two-phase optical sample cell

为了提升气体探测灵敏度,采用多通结构使得光束多次经过测量区域,样品池两侧 JGS3 玻璃柱对近红外波长激光的透过率约为 0.9,由于光束多次通过样品池后光强衰减明显,因此通过 TracePro 光学软件进行辐照度模拟,图 2 为后腔镜的辐照度图,中间光斑为单次经过两光学窗口的激光光强,而右、左两侧的光斑分别为第二次与第三次回到后腔镜的光斑辐照度,而它们的中心强度分别为单次经过两光学窗口光斑的 35.3% 与 15.5%,为保证探测信号强度,实验选择第二次回到后腔镜的光斑作为最终的探测信号,其有效光程为 0.36 m。

## 3 实验系统

实验系统如图 3 所示。实验中使用中心波长为 1540 nm 的 DFB 连续可调谐半导体激光器,输出功率为 2 mW,其电流与温度由低噪声激光控制器(Thorlabs, CLD-1015)精确控制;利用函数发生器(RIGOL, DG1000Z)产生频率为 100 Hz、振幅为 0.5 V 的三角波信号,并对激光器的电流进行连续调谐。激光器输出光束通过准直透镜准直,经过两片镀银镜片在高温样品池内多次反射后经过光阑和凸透镜,最终由探测器接收,有效光程为 0.36 m,探测器信号由多通道采集卡(National Instruments, NI-USB-6361)以 32 MHz 频率对信号进行采样。通过质量流

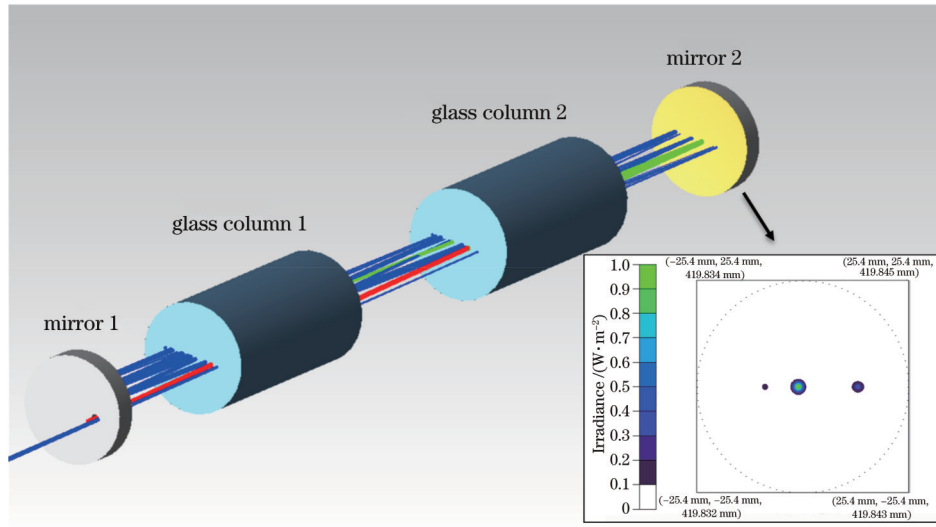


图 2 多通系统结构及后腔镜归一化辐照度模拟

Fig. 2 Simulation of the multi-pass construction and the irradiance on the cavity mirror

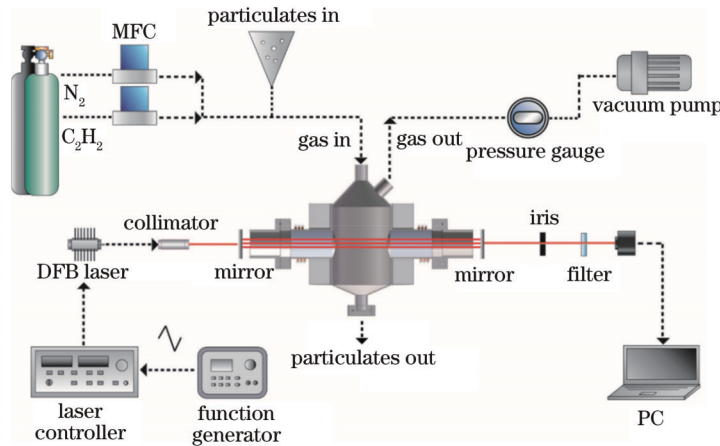


图 3 实验系统示意图

Fig. 3 Schematic of the experimental setup

量计(Sevenstar, D07-7)混合  $N_2$  与  $C_2H_2$  来控制  $C_2H_2$  的体积分数,其中  $N_2$  流量计的最大流速为 20 L/min,  $C_2H_2$  流量计的最大流速为 5 L/min,流量计的精度为 2%,因此在调节流量进行配比时需要保证  $N_2$  的流速大于 0.4 L/min,  $C_2H_2$  的流速大于 0.1 L/min。此外,实验中使用的是体积分数为 1% 的  $C_2H_2-N_2$  标准气体,在使用  $C_2H_2$  流量计时需计算  $C_2H_2-N_2$  混合系数,以保证流量控制的准确性。

#### 4 实验原理

一束频率为  $\nu$  的激光穿过气体与颗粒物介质时,入射激光强度因介质的消光作用出现衰减,当介质的体积分数、温度以及压力均匀分布时,激光强度的变化可以由 Beer-Lambert 定律<sup>[20]</sup>表示,即

$$I_t = I_0 \cdot \exp(-\tau L) \cdot \exp[-PX_{\text{abs}}S(T)\phi_\nu L], \quad (1)$$

式中:  $I_t$  与  $I_0$  分别为入射和透射激光的强度;  $\tau$  为介质浊度;  $P$  为总气体压强;  $X_{\text{abs}}$  为吸收介质的体积分数;

$S(T)$  为谱线强度;  $\phi_\nu$  为线型函数;  $L$  为光程长度;  $T$  为气体温度。在没有气体分子吸收的位置,近似地认为只有颗粒物对入射激光产生消光作用,则式(1)可以简化为

$$I_{\text{op}} = I_0 \cdot \exp(-\tau L), \quad (2)$$

式中:  $I_{\text{op}}$  为仅受颗粒物消光时的出射激光强度。根据 Mie 理论<sup>[20]</sup>,直径为  $D$  的颗粒物的浊度  $\tau$  可以表示为

$$\tau = Nak_{\text{ext}} = \frac{\pi}{4} N(D) D^2 k_{\text{ext}} = \omega \cdot \frac{3}{2D\rho} \cdot k_{\text{ext}}, \quad (3)$$

式中:  $N(D)$  为颗粒物数密度;  $a$  为粒子迎光面积;  $\rho$  为颗粒密度;  $\omega$  为颗粒物的质量浓度;  $k_{\text{ext}}$  为颗粒消光系数。  $k_{\text{ext}}$  可以表示为

$$k_{\text{ext}} = \frac{2}{\alpha^2} \sum_{n=1}^{\infty} (2n+1) \text{Re}(a_n + b_n). \quad (4)$$

在获得仅受颗粒物消光的激光强度后,气体分子吸收效应对激光强度的影响可表示为

$$I_t = I_{\text{op}} \cdot \exp[-PX_{\text{abs}}S(T)\phi_\nu L]. \quad (5)$$

由于线型函数  $\phi$  是归一化函数, 即  $\int_{-\infty}^{\infty} \phi_\nu d\nu = 1$ , 故对式(3)进行积分可得整个光谱的积分吸光度  $A$ :

$$A = - \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left( \frac{I_t}{I_0} \right) d\nu = PX_{\text{abs}} S(T) L. \quad (6)$$

根据两条相邻谱线积分吸光度  $A_1$  与  $A_2$  的比值, 可得到温度的表达式:

$$T = \left( \frac{hc}{k} \right) (E_2'' - E_1'') / \left\{ \ln \left( \frac{A_1}{A_2} \right) + \ln \left[ \frac{S_2(T_0)}{S_1(T_0)} \right] + \left( \frac{hc}{k} \right) \left( \frac{E_2'' - E_1''}{T_0} \right) \right\}. \quad (7)$$

## 5 测量结果

实验通过对颗粒物环境下乙炔气体的探测, 验证了样品池及系统的性能, 选用中心波长为 1540 nm 的可调谐 DFB 激光器对  $6489.07 \text{ cm}^{-1}$  与  $6490.02 \text{ cm}^{-1}$  位置处乙炔吸收谱线进行探测, 在  $500 \sim 1000 \text{ K}$  温度范围内以  $100 \text{ K}$  为步长进行实验, 并在每个温度设定点上对不同体积分数的  $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2$  混合气体进行测量。

在颗粒物环境下直接利用吸收光谱反演气体浓度时, 需将颗粒物影响分离, 图 4 所示为实际的实验数据处理结果, 图 4(a) 中  $I_0$  通过  $I_t$  屏蔽吸收峰后利用多项式拟合得到, 表示去除气体吸收后的颗粒物消光信号。但是, 在高温且充有颗粒物的环境下, 通过上述方法获得的结果并不理想: 一方面, 实验选择的吸收线强度随温度上升而下降, 导致在高温下难以精确选择吸收峰

的位置; 另一方面, 充入的颗粒物非绝对稳定, 浓度波动增大了多项式拟合的误差。为了尽可能地降低上述影响, 本实验中采用差分方法获得气体分子的吸收信号。由于信号中同时包含吸收项和消光项, 此时积分吸光度可表示为

$$A = PX_{\text{abs}} S(T) L = - \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \ln \left( \frac{I_t}{I_0} \right) + K_{\text{LF}} \right] d\nu, \quad (8)$$

式中:  $-\ln(I_t/I_0)$  为存在颗粒物影响的气体吸收信号;  $K_{\text{LF}}$  为  $-\ln(I_t/I_0)$  屏蔽吸收峰后的多项式拟合值。 $-\ln(I_t/I_0)$  中的峰值部分为屏蔽区域, 处理结果如图 4 所示。可以看到, 取对数后的  $-\ln(I_t/I_0)$  信号可以更加精确地选择吸收峰, 并通过  $-\ln(I_t/I_0)$  与  $K_{\text{LF}}$  差分得到只有气体吸收的信号, 消除颗粒物下落过程中其质量浓度波动给气体吸收信号计算结果带来的误差。

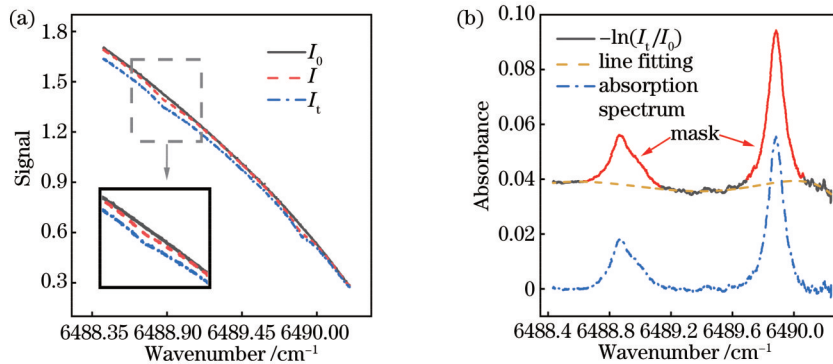


图 4 颗粒物环境下气体吸收光谱的处理结果。(a) 实际探测的光谱信号; (b) 分离的颗粒物消光信号与气体吸收信号  
Fig. 4 Processing results of gas absorption spectra in particulate environment. (a) Detected spectrum signal; (b) particle extinction signal and gas absorption signal

利用上述方法所得乙炔吸收光谱信号如图 5 所示, 其中图 5(a) 所示为  $900 \text{ K}$  温度下乙炔体积分数为  $0.2\% \sim 1.0\%$  时的吸收光谱信号, 图 5(b) 所示为乙炔体积分数为  $0.4\%$  时  $500 \sim 1000 \text{ K}$  温度下获得的吸收光谱信号。可以看到, 探测得到的光谱吸收信号随体积分数及温度的变化规律与实际情况一致, 表明了探测信号的正确性。由光谱信号反演得到的  $\text{C}_2\text{H}_2$  体积分数和流场温度值与参考值之间对比如图 6 所示。图 6(a) 所示为  $500 \sim 1000 \text{ K}$  温度下  $\text{C}_2\text{H}_2$  体积分数与参考值的对比, 在不同温度下的探测数据与参考值均有较高的一致性, 高温时线强减弱, 导致测量的误差有所增

加。体积分数测量值的一致性  $R^2 \approx 0.995$ , 相对平均标准偏差 ( $E_{\text{SD}}$ ) 为  $2.65\%$ 。图 6(b) 所示为在颗粒物环境下  $\text{C}_2\text{H}_2$  气体温度测量与参考值的对比, 测量结果的一致性  $R^2 \approx 0.998$ , 相对平均标准偏差为  $3.05\%$ , 在各个温度设定点上的温度测量值与参考值之间的平均差值约为  $23.1 \text{ K}$ 。上述结果表明, 通过所提方法测得的体积分数和温度值与实际值较为一致, 说明了所设计的气固两相高温样品池在应用于气体光谱探测研究时具有良好的性能, 同时也证实了所提系统及方法在高温颗粒物环境下同时进行流场温度及气体体积分数的可靠性。

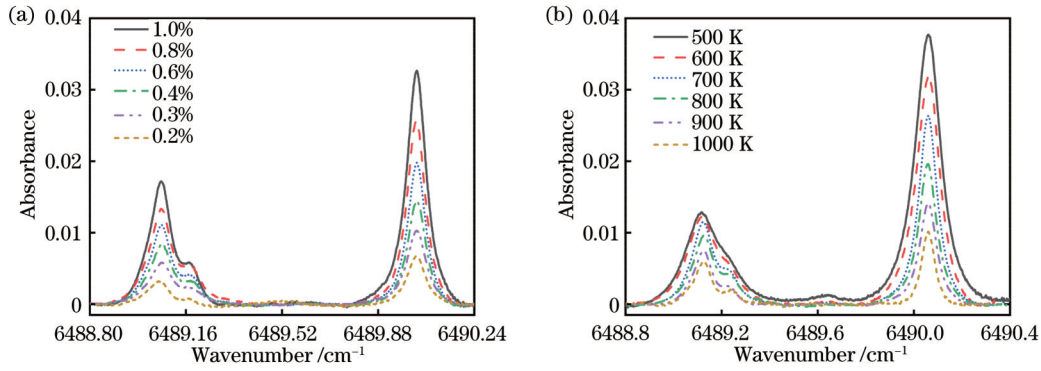


图 5 不同温度和体积分数下的乙炔气体吸收光谱信号。(a) 900 K 温度下 0.2%~1.0% 体积分数气体的光谱信号;(b) 0.4% 体积分数下 500~1000 K 温度气体的光谱信号

Fig. 5 Measured  $C_2H_2$  direct absorption spectra at different volume fractions and different temperatures. (a) Direct absorption spectra for different  $C_2H_2$  volume fractions (0.2%–1.0%) at the temperature of 900 K; (b) direct absorption spectra for 0.4%  $C_2H_2$  volume fraction in the temperature range of 500–1000 K

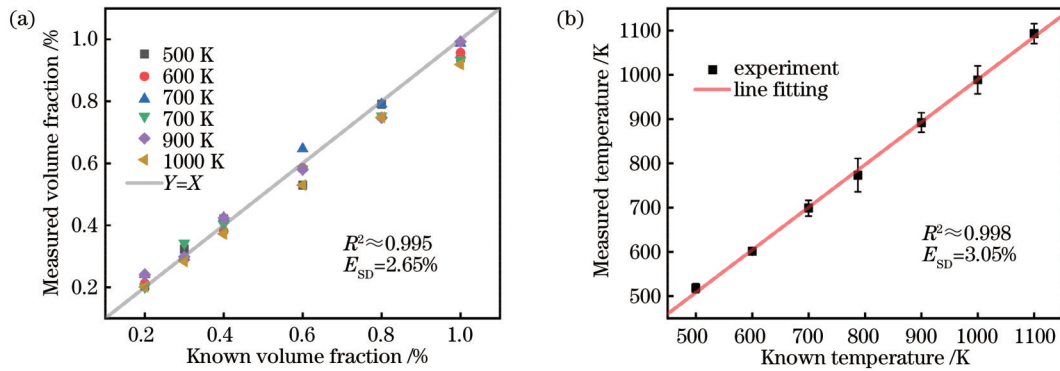


图 6 测得的  $C_2H_2$  体积分数和流场温度值与参考值的对比。(a) 不同温度下测量的  $C_2H_2$  体积分数与参考值对比;(b) 测量温度与参考值对比

Fig. 6 Comparison of the measured and nominal values of  $C_2H_2$  volume fraction and temperature. (a) Comparison of the measured and nominal  $C_2H_2$  volume fractions at different temperatures; (b) comparison of the measured and nominal temperatures

## 6 结 论

在所设计的新型气固两相光学样品池系统的基础上搭建 TDLAS 测量系统,对颗粒物环境下的气体光谱探测技术进行研究,并以乙炔气体为例对该技术的探测能力进行分析。使用中心波长为 1540 nm 的可调谐 DFB 激光器,通过测量  $6489.07\text{ cm}^{-1}$  与  $6490.02\text{ cm}^{-1}$  位置处的一对乙炔吸收谱线对温度与乙炔体积分数的关系进行测量。通过从气体与颗粒物混合信号中提取气体吸收部分的吸收峰,可以对气体的温度与体积分数参数进行准确反演,其中温度测量一致性  $R^2 \approx 0.998$ , 相对平均标准偏差为 3.05%, 体积分数测量一致性  $R^2 \approx 0.995$ , 相对平均标准偏差为 2.65%。本样品池及系统可满足颗粒物环境下气体光谱探测的研究需求,为颗粒物消光对气体吸收的影响的相关工作提供支持,后续可通过结合波长调制吸收光谱技术来进一步提高系统的探测灵敏度。另外,本样品池中产生的分布均匀的颗粒物环境同样可用于固体颗粒物质量浓度和体积分数等参数的测量技术研

究,未来将利用其开展固体颗粒物与气体组分同时探测的相关工作。

## 参 考 文 献

- [1] Wang Z H, Fu P F, Chao X. Laser absorption sensing systems: challenges, modeling, and design optimization[J]. Applied Sciences, 2019, 9(13): 2723.
- [2] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, et al. Infrared laser-absorption sensing for combustion gases[J]. Progress in Energy and Combustion Science, 2017, 60: 132-176.
- [3] 周王峥, 王珍珍, 严俊杰, 等. CT-TDLAS 测量燃烧火焰二维温度分布[J]. 光子学报, 2019, 48(12): 1214001. Zhou W Z, Wang Z Z, Yan J J, et al. Measurement of 2D temperature distribution of flame using CT-TDLAS[J]. Acta Photonica Sinica, 2019, 48(12): 1214001.
- [4] 李金义, 李连辉, 赵烁, 等. 可调谐半导体激光吸收光谱技术在石油工业中的应用研究[J]. 激光与光电子学进展, 2022, 59(13): 1300006. Li J Y, Li L H, Zhao S, et al. Application research of tunable diode laser absorption spectroscopy in petroleum industry[J]. Laser & Optoelectronics Progress, 2022, 59(13): 1300006.
- [5] 刘文清. “双碳”目标下大气环境光学监测技术发展机遇[J]. 光学学报, 2022, 42(6): 0600001. Liu W Q. Opportunities and challenges for development of

- atmospheric environmental optics monitoring technique under “double carbon” goal[J]. *Acta Optica Sinica*, 2022, 42(6): 0600001.
- [6] 闫格, 张磊, 于玲, 等. 面向天然气泄漏检测的中红外甲烷传感系统与应用[J]. *中国激光*, 2022, 49(18): 1810001.  
Yan G, Zhang L, Yu L, et al. Mid-infrared methane sensor system for natural gas leakage detection and application[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2022, 49(18): 1810001.
- [7] Witzel O, Klein A, Meffert C, et al. VCSEL-based, high-speed, *in situ* TDLAS for in-cylinder water vapor measurements in IC engines[J]. *Optics Express*, 2013, 21(17): 19951-19965.
- [8] Chao X, Jeffries J B, Hanson R K. Real-time, *in situ*, continuous monitoring of CO in a pulverized-coal-fired power plant with a 2.3  $\mu\text{m}$  laser absorption sensor[J]. *Applied Physics B*, 2013, 110(3): 359-365.
- [9] Larcher G, Landsheere X, Schwell M, et al. Spectral shape parameters of pure CO<sub>2</sub> transitions near 1.6  $\mu\text{m}$  by tunable diode laser spectroscopy[J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative Transfer*, 2015, 164: 82-88.
- [10] Spearrin R M, Goldenstein C S, Schultz I A, et al. Simultaneous sensing of temperature, CO, and CO<sub>2</sub> in a scramjet combustor using quantum cascade laser absorption spectroscopy[J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 689-698.
- [11] 陈祥, 阚瑞峰, 杨晨光, 等. 基于 TDLAS 技术的空气气压精确测量[J]. *光电子·激光*, 2015, 26(4): 719-723.  
Chen X, Kan R F, Yang C G, et al. Precise measurement of air pressure using tunable diode laser absorption spectroscopy technology[J]. *Journal of Optoelectronics·Laser*, 2015, 26(4): 719-723.
- [12] Gao G Z, Zhang T, Zhang G, et al. Simultaneous and interference-free measurements of temperature and C<sub>2</sub>H<sub>4</sub> concentration using a single tunable diode laser at 1.62  $\mu\text{m}$ [J]. *Optics Express*, 2019, 27(13): 17887-17904.
- [13] Adrian R J. Scattering particle characteristics and their effect on pulsed laser measurements of fluid flow: speckle velocimetry vs particle image velocimetry[J]. *Applied Optics*, 1984, 23(11): 1690-1691.
- [14] Wang F, Cen K F, Li N, et al. Simultaneous measurement on gas concentration and particle mass concentration by tunable diode laser[J]. *Flow Measurement and Instrumentation*, 2010, 21(3): 382-387.
- [15] Liu X W, Xu Y S, Fan B, et al. Field measurements on the emission and removal of PM<sub>2.5</sub> from coal-fired power stations: studies on two 135 MW circulating fluidized bed boilers respectively equipped with an electrostatic precipitator and a hybrid electrostatic filter precipitator[J]. *Energy & Fuels*, 2016, 30(7): 5922-5929.
- [16] 郝吉明, 段雷, 易红宏. 燃烧源可吸入颗粒物的物理化学特征[M]. 北京: 科学出版社, 2008: 6-11.  
Hao J M, Duan L, Yi H H. Physical and chemical characteristics of source inhalable particles[M]. Beijing: Science Press, 2008: 6-11.
- [17] Ma L H, Ning H B, Wu J J, et al. Characterization of temperature and soot volume fraction in laminar premixed flames: laser absorption/extinction measurement and two-dimensional computational fluid dynamics modeling[J]. *Energy & Fuels*, 2018, 32(12): 12962-12970.
- [18] Yon J, Cruz J J, Escudero F, et al. Revealing soot maturity based on multi-wavelength absorption/emission measurements in laminar axisymmetric coflow ethylene diffusion flames[J]. *Combustion and Flame*, 2021, 227: 147-161.
- [19] Cai T D, Gao G Z, Liu Y. Simultaneous measurements of multiple parameters at elevated temperature using a frequency-division multiplexing scheme with tunable diode lasers[J]. *Applied Spectroscopy*, 2012, 66(10): 1210-1215.
- [20] 郑玉霞, 帕尔哈提江·吐尔孙, 热米莱·阿卜来提, 等. 基于消光法反演单分散 Au-Ag 合金纳米球的粒径和浓度[J]. *激光与光电子学进展*, 2022, 59(7): 0729001.  
Zheng Y X, Tuersun P, Abulaiti R, et al. Particle size and concentration of monodisperse Au-Ag alloy nanospheres retrieved by light extinction method[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2022, 59(7): 0729001.

## A Gas-Solid Two-Phase Optical Sample Cell System for Detecting Gas Absorption Spectra at High Temperature in Particulate Environment

Zhou Qing, Gao Zhenwei, Gao Guangzhen\*, Zhang Mingke, Liu Qinghui, Chen Yipeng, Cai Tingdong\*\*

*School of Physics and Electronic Engineering, Jiangsu Normal University, Xuzhou 221116, Jiangsu, China*

### Abstract

**Objective** In the past 40 years, tunable diode laser absorption spectroscopy has developed into a remarkable optical diagnostic technique because it can provide a reliable, fast, time-resolved, sensitive, non-intrusive *in situ* measurement for various gas parameters, such as concentration, temperature, pressure, velocity, mass flux, and density. Hence, it has been widely used in many fields including environmental monitoring, combustion diagnosis, industrial process control, and biomedical sensing. In some special applications, there is not only gas but also some particles and liquid droplets in the measurement area, such as the soot in the flow field of combustion and fine particles (PM<sub>2.5</sub> and PM<sub>10</sub>) in the atmospheric air. Then the variation in the intensity of the tunable diode laser is induced by both the absorption of the target gas molecule and the extinction/scattering caused by particles and liquid droplets. Thus, how to extract the absorption spectrum of the target absorption line of the measured gas molecule from the mixed signal is significant for the development of gas sensors based on tunable diode laser absorption spectroscopy. Here we design a gas-solid two-phase optical sample cell and apply it to simulate a gas detection environment in the presence of both particulate matter and gas. Temperature

and acetylene content are measured in the gas-solid two-phase optical sample cell, which can demonstrate how to detect gas in a particulate environment.

**Methods** The gas-solid two-phase optical sample cell used in the experiment is made of stainless steel and located in a ceramic fiber furnace whose temperature is controlled by a custom-made temperature control system. The heated static cell has a height of 290 mm and a diameter of 120 mm. The JGS3 quartz rods with a length of 90 mm and a diameter of 52 mm are inserted into the cell, and each quartz rod has an inclination of  $1.5^\circ$  against the vertical direction to further reduce interference fringe noise. The temperature in the sample cell is measured by three K-type thermocouples with accuracies of  $\pm 1\%$  and precision of 0.1 K. In the experiment, the  $C_2H_2-N_2$  mixtures which are controlled by a mass flowmeter carry the quartz sand particles with a diameter of  $125\ \mu\text{m}$  into the gas-solid two-phase optical sample cell. A distributed feedback (DFB) laser with a central wavelength of 1540 nm is used to detect the absorption spectra of the target acetylene lines at  $6489.07\ \text{cm}^{-1}$  and  $6490.02\ \text{cm}^{-1}$ . A multi-pass absorption technique is combined in the system to enhance performance. The temperature is inferred from the integrated absorption ratio of the two lines, and the acetylene content is determined from the integrated absorption of the line at  $6490.02\ \text{cm}^{-1}$  due to its high absorption intensity.

**Results and Discussions** The measured absorption spectra of the used target acetylene line pair at different content and different temperatures are shown in the paper (Fig. 5). The average bias between the measured temperatures and thermocouple readings is about 23.1 K. The measured acetylene content for each level is averaged and plotted against the known content [Fig. 6(a)]. The measured values from the tunable diode laser absorption spectroscopy sensor agree well with the known values. The linear relationship between the counterparts is about 0.995, and the average relative standard deviation of the acetylene measurement is 2.65%. Additionally, we compare the temperatures obtained depending on the thermometry of the sensor and the averages of the three thermocouple readings [Fig. 6(b)]. The temperatures determined by the sensor agree well with the thermocouple readings in the tested temperature range of 500–1000 K. The correlation of those measured points  $R^2$  is about 0.998, and the average relative standard deviation is 3.05%.

**Conclusions** In this work, temperature and acetylene content are simultaneously measured by means of a DFB laser with a central wavelength of 1540 nm in a particulate environment which is simulated by a gas-solid two-phase optical sample cell. Two target acetylene lines at  $6489.07\ \text{cm}^{-1}$  and  $6490.02\ \text{cm}^{-1}$  are chosen as the optimum line pair for the tunable diode laser absorption spectroscopy sensor to detect temperatures in the target range of 500–1000 K at atmospheric pressure. The comparison of the values measured by the sensor with the well-controlled gas temperature and acetylene content confirm the accuracy and reliability of the sensor. At present, the optical path length is only 0.36 m. The short path length limits the detection sensitivity of the sensor. In the future, the detection sensitivity will be decreased due to the increase in the reflection time of multi-pass absorption. Then the system can be used to detect the gas volume fraction and temperature in the flow fields of real flames or internal combustion engines, where both gas and particles coexist.

**Key words** spectroscopy; absorption spectroscopy; extinction spectroscopy; sample cell; gas-solid two-phase; gas detection