

基于二极管激光消光光谱的高温气体与颗粒物同时探测研究*

张铭珂 高振威 高光珍[†] 江宇豪 蔡廷栋[‡]

(江苏师范大学物理与电子工程学院, 徐州 221116)

(2022 年 5 月 2 日收到; 2022 年 5 月 25 日收到修改稿)

化石燃料燃烧过程中产生的碳烟颗粒物是大气细粒子 (PM_{2.5}) 的主要来源, 这些大量产生的碳烟颗粒物也是影响燃烧效率的重要因素; 乙炔 (C₂H₂) 作为碳烟生成的重要前驱体, 在碳烟生成过程中起到关键作用; 因此, 发展能够同时对碳烟颗粒物及 C₂H₂ 浓度进行在线测量的方法, 对于碳烟生成机理的研究具有重要意义. 本文选择中心波长 1540 nm 的可调谐二极管激光器作为光源, 利用多通吸收方式搭建探测系统, 在自行设计的气固两相高温静态池中使用 C₂H₂-N₂ 混合气体载带石英砂颗粒模拟颗粒物环境, 通过获取 6490.02 cm⁻¹ 处 C₂H₂ 目标谱线附近的一段消光光谱信号, 并从中分别提取出与颗粒物有关的消光信号和与 C₂H₂ 有关的吸收信号, 从而实现了颗粒物质量浓度和气体体积浓度的同时测量. 测量结果表明, 在 500—1000 K 温度范围内颗粒物质量浓度和气体体积浓度的测量值与参考值之间的平均偏差分别为 2.73% 和 5.17%, 说明了本技术对于气体与颗粒物同时测量的良好性能.

关键词: 可调谐二极管激光吸收光谱, 消光光谱, 气体浓度, 颗粒质量浓度

PACS: 33.20.Ea, 47.11.Kb, 47.70.Pq, 47.80.Fg

DOI: 10.7498/aps.71.20220866

1 引言

近年来, 随着工业化、城镇化的快速推进, 我国大气污染形势严峻, 高浓度大气细粒子 (PM_{2.5}) 导致雾霾频发, 大气能见度下降, 严重影响了大多数城市空气质量和人体健康. 经源解析发现在城市 PM_{2.5} 的源头中, 汽车尾气的排放、燃煤和工业生产在各来源中占比最大, 这就意味着作为世界上主要能量来源的化石燃料燃烧过程中产生的碳烟 (soot), 是 PM_{2.5} 等可吸入颗粒物的最重要的源头^[1]. 此外, 燃烧中碳烟的大量产生会严重影响燃料的利用效率, 造成能源浪费. 并且碳烟颗粒悬浮在大气

中的能力很强, 一般在 1 个月左右, 其表面的漫反射特性会使冰川吸收更多太阳光而加速融化, 其光学特性还会造成温室效应影响天气甚至气候^[2]. 在碳烟的形成过程中, 乙炔 (C₂H₂) 是其主要的先驱体之一^[3], 在与碳烟成核有重要关联的第一芳香环的形成及多环芳香烃 (PAH) 的生长过程中起到关键作用, 并且与碳烟表面生长的脱氢加乙炔 (HACA) 机理密切相关^[4]. 因此, 发展能够同时对化石燃料燃烧过程中碳烟颗粒物及 C₂H₂ 浓度进行在线测量的方法, 对于碳烟生成机理的研究具有重要意义.

激光吸收光谱技术 (laser absorption spectroscopy, LAS) 以其所具有的高灵敏度、高选择性、非接触式及可实时、在线检测等优点, 被广泛用于检

* 国家自然科学基金 (批准号: 61875079, 61805110, 61475068, 11104237)、江苏省重点研发计划 (批准号: BE2021634)、徐州市推动科技创新项目重点研发计划 (批准号: KC19202) 和江苏省碳达峰碳中和科技创新专项 (批准号: BE2022314) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: ggz@jsnu.edu.cn

[‡] 通信作者. E-mail: caitingdong@126.com

测领域^[5-8]. 作为半导体激光器的一种, 可调谐二极管激光器 (tunable diode laser, TDL) 具有波长可调、单色性好、坚固紧凑、体积微小、价格低廉、使用方便、用途广泛等特点, 其发展也推动了可调谐二极管激光吸收光谱技术 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 的进步^[9-11], 使 TDLAS 成为近年来重要污染指标和污染源排放常规在线检测技术的发展方向和技术主流之一, 可实现对流场温度^[12]、浓度^[13]、流速^[14]、压力^[15]等的测量, 其主要的应用领域有分子光谱研究^[16]、工业过程监测控制^[17]、大气痕量气体检测^[18]、医疗诊断^[19]、大气气溶胶测量^[20]等. 当 TDLAS 应用于包含颗粒物的流场测量时, 除了目标气体分子对激光具有吸收作用之外, 测量路径上的颗粒物同样会对激光造成吸收和散射, 此时探测器所接收到的信号同时携带了目标气体分子和颗粒物的相关信息, 相对于 TDLAS 中的信号被称作“吸收信号”而言, 把该信号称作“消光信号”更为恰当, 若能从中分离出由气体分子吸收引起的吸收信号和由颗粒物消光引起的消光信号, 则可实现对目标分子和颗粒物的同时探测^[21,22].

本文将利用中心波长位于 1540 nm 的二极管激光器作为激发光源, 搭建消光光谱测量系统, 在自行设计的气固两相高温样品池中通过 $C_2H_2-N_2$ 混合气体载带直径 0.125 mm 的石英砂颗粒以模拟不同的高温颗粒物环境, 通过测量包含颗粒物及 C_2H_2 气体信息的消光信号, 实现对颗粒物质量分数及 C_2H_2 气体浓度在高温环境下的同时测量, 为燃烧中的碳烟及其前驱体 C_2H_2 的测量研究提供技术支持.

2 测量原理

一束频率为 ν 的激光穿过气体与颗粒物共存的介质时, 入射激光因介质的消光作用产生强度上的衰减, 当介质的浓度、温度以及压力均匀分布时, 激光强度的变化可以由 Beer-Lambert 定律表示:

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

其中 I_t 与 I_0 是入射和透射的激光强度, τ 是介质浊度, P 是总气体压强, X_{abs} 是吸收介质的浓度, $S(T)$ 是谱线强度, ϕ_{ν} 是线型函数, L 是光程长度, T 是气体温度.

在可调谐二极管激光器的单次扫描输出范围

($< 2 \text{ cm}^{-1}$) 内, 对于仅由颗粒物消光引起的光强变化可认为在各频率处均相同, 若由 I_{0p} 来表示仅受到颗粒物消光作用后的出射激光强度, 则:

$$I_{0p} = I_0 \cdot \exp(-\tau L). \quad (2)$$

根据 Mie 理论^[22] 定义, 颗粒物浊度 τ 可以表示为

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

其中 D 为颗粒物直径, $N(D)$ 为颗粒物数密度, a 为粒子迎光面积, ρ 为颗粒密度, ω 为颗粒物的质量浓度, k_{ext} 为颗粒消光系数, k_{ext} 可以通过 (4) 式计算得到:

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

其中 a_n, b_n 为 Mie 散射系数, x 为颗粒物粒径的无量纲参数, 其值为 $\pi D/\lambda$, λ 为入射激光波长.

在得到仅受颗粒物消光的激光强度 I_{0p} 后, 即可获得气体分子吸收效应对激光强度的影响:

$$I_t = I_{0p} \cdot \exp[-PX_{\text{abs}}S(T)\phi_{\nu}L]. \quad (5)$$

目标气体分子的光谱吸收可表示为

$$\alpha_{\nu} = -\ln(I_t/I_{0p})_{\nu} = PX_{\text{abs}}S(T)\phi_{\nu}L. \quad (6)$$

由于线型函数 ϕ_{ν} 是归一化函数, 即 $\int_{-\infty}^{\infty} \phi_{\nu} d\nu = 1$, 故在整个频率范围内对 (6) 式积分可得整个吸收光谱的积分吸收 A :

$$A = - \int_{-\infty}^{\infty} \ln \left(\frac{I_t}{I_{0p}} \right)_{\nu} d\nu = PX_{\text{abs}}S(T)L. \quad (7)$$

3 实验部分

3.1 谱线选择

合适的目标传感谱线对于测量准确性及系统探测成本有着决定性作用, 为了实现对颗粒物和 C_2H_2 浓度的同时探测, 在此制定利用以下 4 条选择标准, 结合 HITRAN 数据库中的相关数据, 对可用于本研究的目标谱线进行了精细选择:

1) 所选 C_2H_2 吸收谱线应位于 1540 nm 附近的近红外振转组合吸收带区域, 该区域 C_2H_2 具有较强的吸收, 且近红外区域的激光光源、光学元件及探测器件价格较低, 有助于降低探测成本;

2) 目标传感谱线在所测温度范围内具有足够高的吸收线强, 以确保在好的信噪比下进行

探测; 根据本研究中涉及到的压力 (1 atm, 1 atm = 101.325 kPa)、温度 (500—1000 K) 和光程长度 (72 cm) 等条件, 所选 C_2H_2 谱线的线强应高于 $1 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-1}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}$;

3) 目标 C_2H_2 谱线附近不能存在其他 C_2H_2 强吸收谱线和主要大气及化石燃料燃烧成分 (H_2O , CO_2 , CO 等) 的强吸收谱线的干扰;

4) 在目标 C_2H_2 谱线吸收峰两侧有足够长的无吸收翼, 以便能够利用其反演出与颗粒物有关的消光信号。

根据以上选择标准, 最终选择出了 6490.19 cm^{-1} 处的一条 C_2H_2 吸收谱线用于本研究, 该谱线在 1000 K 温度下的吸收线强约为 $8.8591 \times 10^{-22} \text{ cm}^{-1}/\text{mol}\cdot\text{cm}^{-2}$, 从而可保证良好的探测灵敏度. 图 1 中使用 HITRAN 数据库模拟了 1000 K 温度、1 atm 压强下 $6489.3\text{--}6490.5 \text{ cm}^{-1}$ 范围 C_2H_2 , H_2O , CO_2 , CO 的吸收光谱, 可见该区域内不存在 CO_2 和 CO 的强吸收谱线, 且所选 C_2H_2 目标谱线较为独立, 附近虽存在 H_2O 的吸收谱线, 但其吸收峰与目标谱线吸收峰有足够的间隔, 通过多峰拟合可精确得到各自的积分吸收, 因此不会对 C_2H_2 浓度反演造成影响. 图中斜线框 $6489.3\text{--}6489.6 \text{ cm}^{-1}$ 范围内的无吸收翼部分具有足够的波长范围, 可用于反演出与颗粒物消光相关的信号; 因此, 通过在 6490.19 cm^{-1} 两侧 1 cm^{-1} 范围内采集得到的二极管激光消光信号可实现对颗粒物和 C_2H_2 浓度的同时探测。

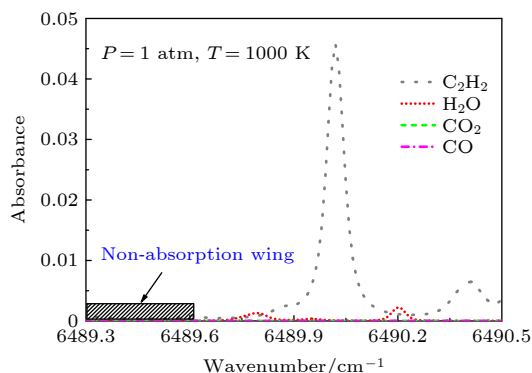


图 1 在 $P = 1 \text{ atm}$, $T = 1000 \text{ K}$ 条件下, C_2H_2 目标谱线及其附近的 C_2H_2 , H_2O , CO_2 , CO 吸收光谱分布模拟图

Fig. 1. The simulated direct absorption spectrum of C_2H_2 , CO_2 and H_2O in the region of $6489.3\text{--}6490.5 \text{ cm}^{-1}$ with the condition of $P = 1 \text{ atm}$, $T = 1000 \text{ K}$.

3.2 实验装置

实验装置如图 2 所示, 激发光源使用中心波长为 1540 nm 的 DFB 型可调谐二极管激光器, 其典型输出功率 12 mW , 线宽约 2 MHz . 激光器的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) 产生的频率为 100 Hz 、振幅为 4 V 的三角波信号对激光器的电流进行连续调制. 为提高探测灵敏度, 在样品池窗口两侧放置了直径两英寸曲率半径 1000 mm 的镀银球面反射镜, 准直后的激光束经过两片反射镜在高温样品池内形成多次反射,

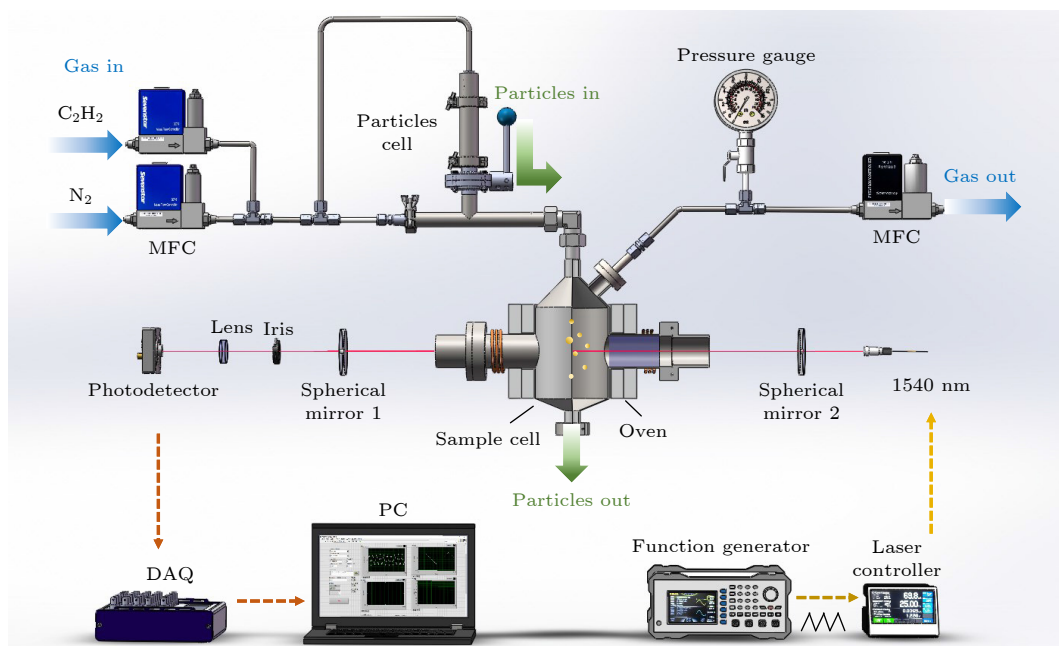


图 2 实验系统示意图

Fig. 2. Schematic diagram of experimental system.

有效光程约为 72 cm, 最终的出射光束通过小孔光阑和会聚透镜后由 1 MHz 探测器接收, 其中光路上探测器一侧的凹面反射镜和小孔光阑能够有效阻挡来自高温样品池的热辐射信号进入探测器, 从而减小背景信号对测量信号的影响. 探测器信号由 16 位多通道数据采集卡 (National Instruments, NI-USB-6361) 高速采集卡采集后送入计算机中, 最终由基于 Labview 编制的相关程序进行处理后得到所需光谱信号, 为了有效去除噪声, 提高系统的灵敏度和稳定性, 在数据处理中引入了基于小波去噪的滤波算法对信号进行了降噪处理.

实验所用气固两相高温静态池为实验室自行设计, 高温池腔内高度 290 mm, 直径 120 mm, 整个腔体放入纤维炉膛中获得高温环境; 光学窗口为长度 90 mm、直径 52 mm 的 JGS3 石英柱, 从而可避免法兰处用于密封的 O 形圈在高温下发生泄露, 同时窗口两侧端面有 1.5° 倾角以防止光束的干涉效应. 通过质量流量计 (Sevenstar, D07-9F) 混合 N_2 与 C_2H_2 以产生不同浓度的样品气体, 混合后的气体把由颗粒池内落下的石英砂颗粒由样品池入口载带进入高温池中, 形成实验所需的气固两相环境. 为了确保实验在颗粒物均匀的环境下进行, 测量前首先通过流量计设定 N_2 与 C_2H_2 的流速, 等稳定后打开颗粒池与气体管路间的阀门, 让颗粒物在气体的载带下通过池底部处孔径为 0.2 mm 的冲孔网进入气体管道, 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造成的不均匀性给测量准确性的验证带来偏差, 测量将在颗粒物质量浓度稳定的中间时间段进行. 样品池内的压力由出口处的质量流量计 (Sevenstar, D07-7B) 控制并由压力计监测, 池内温度由均匀分布在腔体上的 3 台 K 型热电偶进行测量, 所有实验均须在样品池内压力和温度稳定的情况下进行.

4 结果与讨论

为了验证系统对于颗粒物和 C_2H_2 浓度测量的准确性, 以 100 K 步长在 500—1100 K 温度范围内的不同温度设定点上进行了实验, 其中每个温度设定点上对 6 个不同浓度 C_2H_2 - N_2 样品气体进行了测量, 样气浓度通过调节其中的 C_2H_2 流速改变, 不同的流速同样使得颗粒物的质量浓度发生变化.

4.1 气体吸收信号与颗粒物消光信号的提取

如前所述, 在颗粒物环境下测量得到的光谱信号同时包含了目标气体分子的吸收信号和颗粒物的消光信号, 即为图 3(a) 中信号 I_t . 为从 I_t 中提取出仅与吸收有关的信号, 在通入样品气体和颗粒物之前, 将采集此时的透射信号作为初始光强 I_0 , 对比 I_t 和 I_0 可见, 在无 C_2H_2 吸收处初始光强仍有衰减, 此即由颗粒物的消光效应所致. 在此使用提前测量初始光强 I_0 的方式, 还可消除窗口污染引起消光现象. 根据 (1) 式, 由 I 和 I_0 可得到同时含有气体吸收和颗粒物消光的光谱信号, 即图 3(b) 中的信号 1, 把该信号中峰值吸收处的信号掩盖掉后, 对剩余数据点进行拟合, 得到的即为与颗粒物散射有关的信号, 即图 3(b) 中的信号 2, 然后从同时含有吸收和散射信息的光谱信号 1 中减掉拟合得到的与颗粒物散射有关的信号 2, 最后所剩信号即为仅与气体吸收有关的光谱信号, 即图 3(b) 中的信号 3.

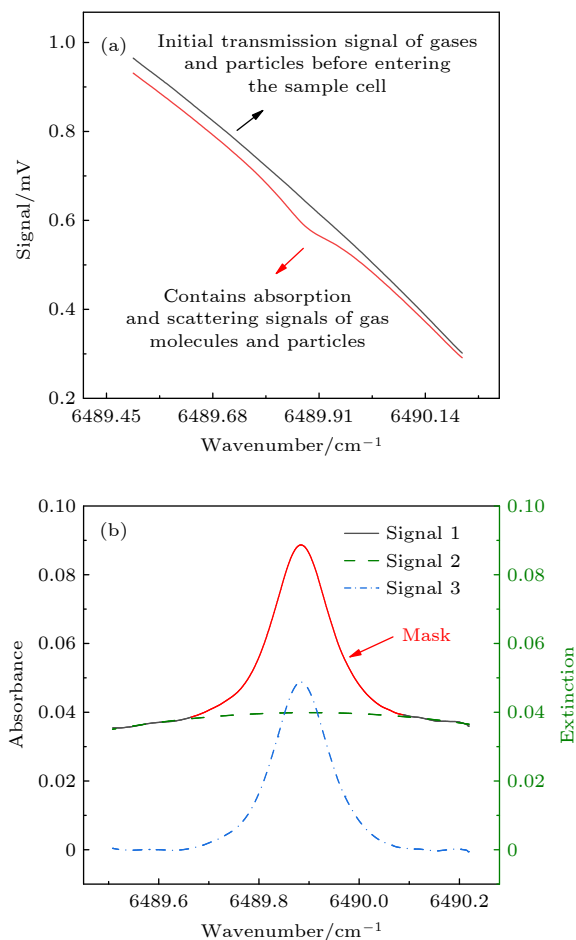


图 3 (a) 气体吸收和颗粒物消光信号; (b) 信号处理

Fig. 3. (a) Signal of gas absorption and particle extinction; (b) signal processing.

得到仅与目标 C_2H_2 气体吸收有关的光谱信号 3 之后, 在已知环境压力、温度及吸收光程长度的前提下, 拟合得到目标谱线的积分吸收面积, 通过 (7) 式即可得到 C_2H_2 气体浓度的相关信息; 与颗粒物散射有关的信号 2 代表了颗粒物浊度 τ 与吸收光程长度 L 之积:

$$\begin{aligned}\tau L &= -\ln(I_{0p}/I_0) \\ &= \omega \cdot \frac{3}{2D\rho} \cdot k_{\text{ext}} \cdot L,\end{aligned}\quad (8)$$

可见在得到颗粒物直径 D 、颗粒密度 ρ 及颗粒消光系数 k_{ext} 后, 即可得到颗粒物的质量浓度 ω .

4.2 测量能力分析

图 4 中给出了 1000 K 温度下从混合信号中提取出的不同浓度 C_2H_2 的直接吸收光谱, 从图 4 可见所提取出的谱线变化规律与浓度的变化关系一致. 各温度下由提取出的吸收光谱所反演出的 C_2H_2 浓度与配气时所记录的浓度对比如图 5(a) 所示. 从图 5 可见: 在各个温度设定点上浓度测量值, 与参考值之间具有较高的吻合度; 对各数据点进行线性拟合显示, 浓度测量值与参考值间的一致性约为 $R^2 = 0.996$, 两者间平均标准偏差约为 2.42%. 图 5(b) 中给出的为各相同浓度的 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2$ 样品气体在颗粒物环境下通过 TDLAS 方法测得的浓度值与测量值间的对比情况, 浓度测量值与参考值间的一致性约为 $R^2 = 0.995$, 两者间平均标准偏差约为 2.73%. 可见颗粒物环境下的测量准确性低于纯气体环境下的测量, 主要是由于从混合消光信号中提取目标 C_2H_2 吸收光谱信号过程中存在误差所导致.

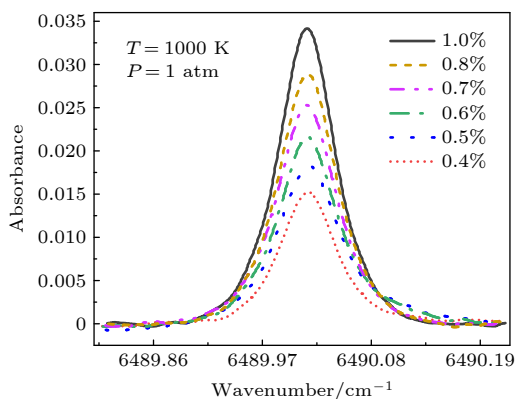


图 4 1000 K 温度下测得的不同浓度的 C_2H_2 直接吸收光谱信号

Fig. 4. Different concentrations of C_2H_2 measured at 1000 K directly absorb spectral signals.

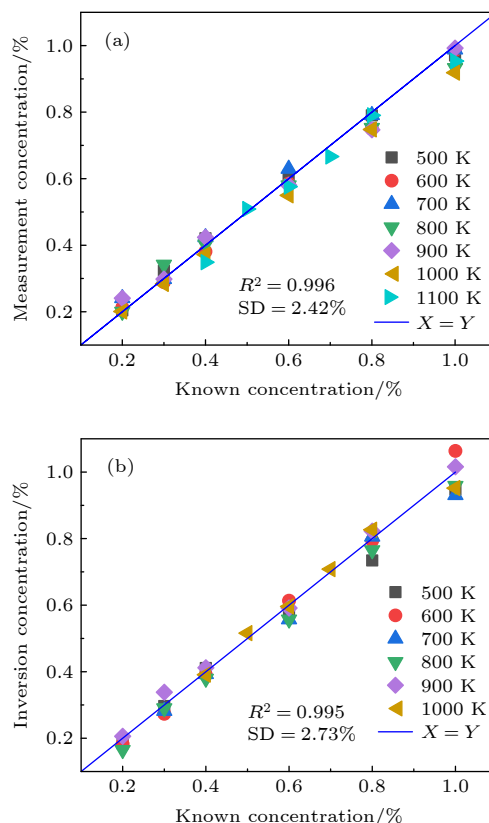


图 5 各温度下光谱探测的 C_2H_2 浓度与配气时所记录的浓度对比 (a)(b) 分别为有无颗粒物的测量环境

Fig. 5. Comparison of the measured and known C_2H_2 concentration detected in the environment with (a) and without (b) particles.

图 6 给出了在 1000 K 颗粒物环境下浓度为 4000 ppm ($1 \text{ ppm} = 10^{-6}$) 的 $\text{C}_2\text{H}_2\text{-N}_2$ 样品中测得的目标谱线的透过率光谱信号, 在此利用本信号根据文献 [23] 中的方法对本系统的探测极限进行了分析. 由于系统的探测极限与所测光谱信号的噪声水平直接相关, 可认为信噪比为 1 时所能探测到的气体浓度即为系统的探测极限, 由图中可得信号峰值高度约为 0.01467, 测量信号的噪声选取为无吸收处基线中的一倍标准偏差值 0.000202, 两者相除得到该信号的信噪比约为 72, 从而可推算出在 1000 K 温度下该系统对于 C_2H_2 气体的探测极限约为 55.6 ppm, 本研究中的探测极限主要受限于吸收光程, 后续可通过设计更为合理的多通结构, 使系统实现更高的有效吸收程长, 从而达到更低的探测极限.

为了验证利用本方法测量颗粒物质量浓度的准确性, 在此把通过由混合光谱信号中提取出的颗粒物消光信号所反演出的颗粒物质量浓度与根据

所加入的石英砂质量和载气流速计算得到的参考值进行了对比。图 7 所示为 1000 K 温度下两者间的对比情况, 可见测量值与参考值之间的吻合度较好, 对各个质量分数下的数据进行线性拟合, 所得相关度 R^2 值约为 0.992, 两者间相对平均标准偏差约为 5.17%, 说明了本方法对颗粒物测量具有良好的准确性。

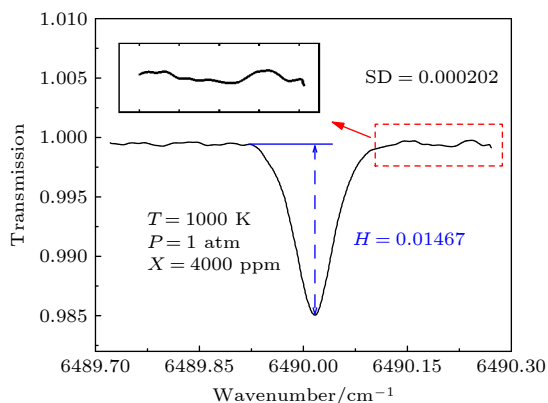


图 6 1000 K 温度下 4000 ppm 浓度样品中 C_2H_2 目标谱线的透过率谱

Fig. 6. Transmission spectra of the selected C_2H_2 line at 1000 K.

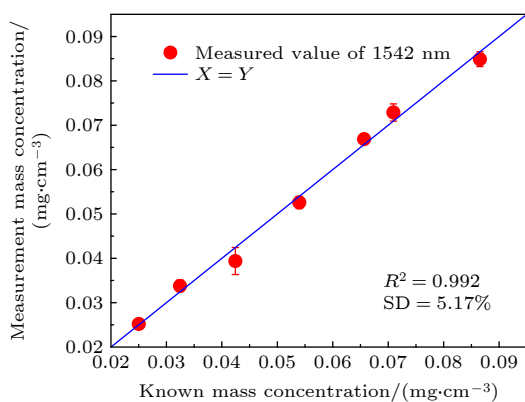


图 7 1000 K 温度下颗粒物质量浓度与参考值对比

Fig. 7. Comparison of measured and known particle mass concentration at 1000 K.

5 结 论

本文通过选择中心波长位于 1540 nm 的 DFB 型可调谐二极管激光器作为光源, 利用消光技术对高温气固两相环境下的颗粒物质量分数及 C_2H_2 浓度进行了同时探测。通过在自行设计的气固两相静态样品池进行的 500—1000 K 温度下的一系列实验发现, 利用从混合信号中分别提取出的代表目标

气体分子吸收的光谱信号及代表颗粒物消光的消光信号能够准确的反演出 C_2H_2 的体积浓度和颗粒物的质量浓度, C_2H_2 浓度测量值与参考值间的一致性约为 0.995, 两者间平均标准偏差约为 2.73%, 颗粒物的质量浓度测量值与参考值间的一致性约为 0.992, 两者间平均标准偏差约为 5.17%, 说明了本技术对于气体与颗粒物的同时测量具有良好的准确性。根据 1000 K 颗粒物环境下 C_2H_2 目标谱线的透过率光谱信号分析得到该系统对于 C_2H_2 气体的探测极限约为 55.6 ppm, 在将来的工作中将通过增加有效吸收程长的方式进一步提高系统的探测灵敏度, 并将其应用于真实燃烧中碳烟颗粒物与 C_2H_2 气体的同时探测研究。

参考文献

- [1] Fawole O G, Cai X M, MacKenzie A R 2016 *Environ. Pollut.* **216** 182
- [2] Bergstrom R W, Russell P B, Hignett P 2002 *J. Atmos. Sci.* **59** 567
- [3] Hai W, Frenklach M A 1997 *Combust. Flame* **110** 173
- [4] Richter H, Howard J B 2000 *Prog. Energy Combust. Sci.* **26** 565
- [5] Liu W Q, Chen Z Y, Liu J G 2019 *J. Environ. Sci.* **10** 1645 (in Chinese) [刘文清, 陈臻懿, 刘建国 2019 环境科学研究 **10** 1645]
- [6] Hanson R K, Spearrin R M, Goldenstein C S 2016 *Spectroscopy and Optical Diagnostics for Gases* (Switzerland: Springer International Publishing) pp1–107
- [7] Patimisco P, Sampaolo A, Dong L, Tittel F K, Spagnolo V 2018 *Appl. Phys. Rev.* **5** 011106
- [8] Jia M Y, Zhao G, Hou J J, Tan W, Qiu X D, Ma W G, Zhang L, Dong L, Yin W B, Xiao L T, Jia S T 2016 *Acta. Phys. Sin.* **65** 128701 (in Chinese) [贾梦源, 赵刚, 侯佳佳, 谭巍, 邱晓东, 马维光, 张雷, 董磊, 尹王保, 肖连团, 贾锁堂 2016 物理学报 **65** 128701]
- [9] Liu K, Wang L, Tan T, Wang G S, Zhang W J, Chen W D, Gao X M 2015 *Sens. Actuators B Chem.* **220** 1000
- [10] Liu Z W, Zheng C T, Zhang T Y, Li Y F, Ren Q, Chen C, Ye W L, Zhang Y, Wang Y D, Tittel F K 2020 *Anal. Chem.* **92** 8178
- [11] Deng B T, Sima C, Xiao Y F, Wang X F, Ai Y, Li T L, Lu P, Liu D M 2022 *Opt. Lasers. Eng.* **151** 106906
- [12] Bürkle S, Biondo L, Ding C P, Honza R, Wagner S 2018 *Flow. Turbul. Combust.* **101** 139
- [13] He D, Peng Z, Ding Y 2021 *Fuel* **284** 118980
- [14] Zhang L, Liu J G, Kan R G, Liu W Q, Zhang Y J, Xu Z Y, Chen J 2012 *Acta. Phys. Sin.* **63** 034214 (in Chinese) [张亮, 刘建国, 阙瑞峰, 刘文清, 张玉钧, 许振宇, 陈军 2012 物理学报 **63** 034214]
- [15] Klingbeil A E, Jeffries J B, Hanson R K 2006 *Meas. Sci. Technol.* **17** 1950
- [16] Liu N W, Xu L G, Zhou S, He T B, Zhang L, Wu D M, Li J S 2019 *J. Quant. Spectrosc. Ra* **236** 106587
- [17] Nasim H, Jamil Y 2014 *Opt. Laser Technol.* **56** 211
- [18] Qiao S D, Ma Y F, Patimisco P, Sampaolo A, He Y, Lang Z

- T, Tittel F K, Spagnolo V 2021 *Opt. Lett* **46** 977
 [19] Giubileo G 2002 *Proceedings of SPIE-The International Society for Optical Engineering* **4762** 318
 [20] Skrotzki J, Habig J C, Ebert V 2014 *Appl. Phys. B* **116** 393
 [21] Wang F, Cen K F, Li N, Huang Q X, Chao X, Yan J H, Chi Y 2010 *Flow Meas. Instrum* **21** 382
 [22] Wang F, Wu Q, Huang Q, Zhang H, Yan J, Cen K 2015 *Opt. Commun* **346** 53
 [23] Lancaster D G, Richter D, Curl R F, Tittel F K, Goldberg I, Koplow J 1999 *Opt. Lett* **24** 1744

Simultaneous detection of particle and C₂H₂ at high temperature using tunable diode laser extinction spectroscopy*

Zhang Ming-Ke Gao Zhen-Wei Gao Guang-Zhen[†]

Jiang Yu-Hao Cai Ting-Dong[‡]

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

(Received 2 May 2022; revised manuscript received 25 May 2022)

Abstract

Soot particles from the combustion of hydrocarbon fuels are the main source of the air fine particles and they are also an important factor of reducing the combustion efficiency. As one of their major precursor, acetylene (C₂H₂) plays an important role in forming soot. So the simultaneous detecting of soot particle and C₂H₂ is significant in studying the mechanism of the soot formation. In this work, a sensor for the simultaneous detecting of soot particle and C₂H₂ is developed by using a single DFB diode laser with a wavelength near 1540 nm. The extinction spectrum near the proper C₂H₂ line at 6490.02 cm⁻¹ is used to infer the mass concentration of particles and the C₂H₂ concentration. The performance of the sensor is confirmed in a home-made heated static cell which can provide well controlled gaseous environment and particulate environment. The measured mass concentration of particles and the C₂H₂ concentration are within 2.73% and 5.17% of the expected values over the full temperature range of 500–1000 K, respectively. All the measurements show the potential application of the sensor in the simultaneous detecting of soot particle and C₂H₂ at elevated temperature.

Keywords: tunable diode laser absorption spectrum, extinction spectrum, gas concentration, particle mass concentration

PACS: 33.20.Ea, 47.11.Kb, 47.70.Pq, 47.80.Fg

DOI: 10.7498/aps.71.20220866

* Project supported by National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 61875079, 61805110, 61475068, 11104237), the Science and Technology Support Program of Jiangsu Province (Grant No. BE2021634), the Science and Technology Program of Xuzhou City (Grant No. KC19202) and Jiangsu Province Carbon Peak Carbon Neutralization Technology Innovation Special (Grant No. BE2022314).

[†] Corresponding author. E-mail: ggz@jsnu.edu.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: caitingdong@126.com

基于二极管激光消光光谱的高温气体与颗粒物同时探测研究

张铭珂 高振威 高光珍 江宇豪 蔡廷栋

Simultaneous detection of particle and C_2H_2 at high temperature using tunable diode laser extinction spectroscopy

Zhang Ming-Ke Gao Zhen-Wei Gao Guang-Zhen Jiang Yu-Hao Cai Ting-Dong

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 193301 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20220866

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20220866>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于可调谐激光吸收光谱技术的二硫化碳中红外光谱参数测量

Measurement of middle infrared spectroscopic parameters of carbon disulfide based on tunable diode laser absorption spectroscopy

物理学报. 2019, 68(8): 084204 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182140>

可调谐掺铥光纤激光器线宽压缩及其超光谱吸收应用

Linewidth compression of tunable Tm-doped fiber laser and its hyperspectral absorption application

物理学报. 2020, 69(3): 034205 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191515>

基于宽带可调谐、窄线宽掺铥光纤激光器的2 μm 波段水的超光谱吸收测量

Hyperspectral absorption of water around 2 μm based on a broadband tunable, narrow linewidth Tm-doped fiber laser

物理学报. 2022, 71(11): 114203 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212127>

混合气体测量中重叠吸收谱线交叉干扰的分离解析方法

Separation and analysis method of overlapping absorption spectra with cross interference in gas mixture measurement

物理学报. 2021, 70(14): 144203 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210286>

基于多角度投影激光吸收光谱技术的两段式速度分布流场测试方法

Two-stage velocity distribution measurement from multiple projections by tunable diode laser absorption spectrum

物理学报. 2019, 68(24): 247801 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20191223>

适用于ppb量级 NO_2 检测的低功率蓝光二极管光声技术研究

Photo-acoustic technology applied to ppb level NO_2 detection by using low power blue diode laser

物理学报. 2019, 68(7): 070703 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182262>