

室温下 CO 的近红外波段宽光谱吸收测量*

王亚民¹⁾ 吴昊龙¹⁾ 陶蒙蒙^{1)2)†} 李国华¹⁾ 王晟¹⁾ 叶景峰^{1)‡}

1) (西北核技术研究所, 激光与物质相互作用国家重点实验室, 西安 710024)

2) (中国科学院上海光学与精密机械研究所, 王之江激光创新中心, 上海 201800)

(2023 年 4 月 8 日收到; 2023 年 7 月 31 日收到修改稿)

CO 是含碳化合物在燃烧过程中产生的一种重要中间物质, 通过对 CO 的吸收光谱测量可以实现对燃烧过程的诊断. 针对 CO 的测量多使用传统的单吸收线和双吸收线技术, 在基于吸收光谱技术的燃烧场二维参数分布测量中, 需设置大量的光束投影以满足空间分辨要求. 宽光谱吸收技术可以在单次扫描内获得整个宽带扫描波段的吸收信息, 与传统的分立谱线窄带吸收技术相比, 具有非常明显的技术优势. 使用宽光谱吸收技术可以大大减少光束投影数量要求, 有效降低系统复杂度, 改善参数反演鲁棒性, 提高测量系统适用性. 但是, 目前针对 CO 的宽光谱吸收测量则鲜有报道, 亟需开展相关的基础研究工作. 本文利用 1.5 μm 波段宽带可调谐光源对室温中的 CO 开展了宽光谱吸收测量实验, 并对不同压强下 CO 的吸收特性进行了对比, 实验测量结果与 HITRAN2016 数据库相吻合. 利用 1565—1570 nm 范围内的实测宽光谱吸收数据, 通过一阶导数法对 CO 温度和摩尔分数进行了反演; 虽然宽带吸收光谱各吸收峰强度测量值存在一定畸变, 但依然得到了准确的反演结果, 温度和摩尔分数反演误差均在 5% 以内, 验证了宽光谱吸收测量的可靠性, 为后续基于 CO 宽光谱吸收测量的燃烧流场二维层析诊断提供了技术支撑.

关键词: 吸收光谱, 可调谐二极管激光吸收光谱技术, 宽光谱吸收, 二维层析诊断, 燃烧流场**PACS:** 42.62.Fi, 33.20.Ea, 68.37.Uv, 74.25.nd**DOI:** 10.7498/aps.72.20230557

1 引言

CO 是含碳化合物在不完全燃烧过程中产生的一种气体物质, 在燃烧中扮演着非常重要的角色. 在含氧量低的燃烧环境中, 碳氢燃料不充分燃烧会产生大量的 CO, 造成环境污染, 并降低燃烧效率; 同时, 作为充分燃烧时必经的中间产物, CO 存在于碳氢燃料燃烧的全过程, 通过测量 CO 可以实现对燃烧反应过程的测量诊断, 从而实现对燃烧过程的控制, 以提高燃烧效率^[1-4].

作为一种非接触式光学精密测量手段, 可调谐

激光二极管吸收光谱技术 (tunable diode laser absorption spectroscopy, TDLAS) 在各种不同的复杂物理场诊断测量中都获得了广泛的应用^[5-10]. 基于 TDLAS 的 CO 吸收光谱测量可通过对 CO 分子特定吸收谱线特性的测量, 实现对浓度、温度等物理参数的反演, 从而为燃烧流场诊断提供重要参数. CO 浓度测量方面, 2012 年, Wagner 等^[11] 利用发射波长在 2.31 μm 的分布反馈式激光器实现了对甲烷/空气预混火焰距炉面不同高度处的 CO 浓度测量. 2014 年, Sur 等^[12] 利用 CO 在 2.33 μm 附近的吸收, 实现了对气流床煤气化炉输出混合气体中 CO 的在线浓度测量. 2018 年, 彭于权等^[13]

* 国家自然科学基金 (批准号: 62105268, 91841303, 52106222) 和激光与物质相互作用国家重点实验室基金 (批准号: SKLLIM2009, SKLLIM2110) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: taomengmeng@nint.ac.cn

‡ 通信作者. E-mail: yejingfeng@nint.ac.cn

使用 $4.85\ \mu\text{m}$ 的带间级联激光器实现了对甲烷/空气预混火焰 CO 浓度的测量. 在 CO 浓度、温度同时测量方面, 2014 年, Sane 等^[14] 利用 CO 在 $2.33\ \mu\text{m}$ 附近的两条相邻吸收谱线, 实现了对乙烯/空气预混火焰中 CO 浓度和温度的同时测量. 2021 年, 胡尚炜等^[15] 使用 $4.85\ \mu\text{m}$ 量子级联激光器, 利用该波长附近两条吸收谱线的吸收光谱信息, 实现了对某型超燃冲压发动机出口位置 CO 浓度和温度的同时测量.

目前针对 CO 的测量多使用传统的单吸收线和双吸收线技术^[11–17], 而宽光谱吸收技术可以在单次扫描内获得整个宽带扫描波段的吸收信息, 与传统的分立谱线窄带吸收技术相比, 具有非常明显的技术优势^[18–21]. 一方面, 宽光谱数据中包含更多的无吸收光谱信息, 可以为吸收基线提取提供更为丰富的数据, 提高基线拟合的准确度^[22–24]. 另一方面, 利用宽光谱数据中的多个吸收峰进行物理场温度反演可以有效降低意外干扰的影响, 提高系统稳定性^[24,25]. 同时, 更为重要的是, 在二维层析测量中, 使用宽光谱测量技术可以有效降低诊断系统对光束投影数量的要求, 降低系统成本和复杂度^[26–29]. Cai 等^[26] 以及 Ma 和 Cai^[27,28] 通过理论模拟指出, 在相同的空间分辨率和误差水平下, 利用宽光谱吸收技术来增加单路光束的吸收光谱信息可以有效降低投影光束数量, 并大幅提高系统测量稳定性. 在噪声水平高于 0.2% 时, 基于宽光谱吸收的二维层析诊断仅需 1/5 的投影数量即可实现与传统的 TDLAS 层析测量技术^[30–36] 相当的空间分辨率.

但是, 目前针对 CO 的宽光谱吸收测量鲜有报道, 亟需开展相关的应用基础研究工作. 在前期的工作中, 开展了 H_2O 分子的宽光谱吸收特性研究, 在实验室测量得到了 H_2O 分子在 $2\ \mu\text{m}$ 波段的宽光谱吸收数据, 并实现了对常温常压空气、酒精火焰的多参数测量^[19,22,37]. 本文针对室温下 CO 在近红外波段的宽光谱吸收特性进行了实验研究, 测量

了不同压强下 CO 的宽光谱吸收特性, 通过对测量信号降噪滤波, 并与理论数据库比对反演, 得到了 CO 的摩尔分数及温度信息, 验证了宽光谱吸收技术在 CO 浓度和温度测量中的可行性, 为燃烧流场 CO 参数的二维层析诊断提供了技术基础.

2 宽光谱吸收实验

2.1 实验设计

近红外波段 CO 的吸收谱线主要分布在 $1.56\text{--}1.61\ \mu\text{m}$, 如图 1 所示, 该吸收谱带包含 R 和 P 两个分支, R 分支谱线更密集, 且常温下吸收线强度更高; P 分支谱线较稀疏, 且常温下吸收线强度略低. 该波段处于通信波段, 相关的光源、探测器以及信号传输系统等较为成熟; 更重要的是, 常温下水分子在该波段吸收线较少, 且吸收强度远远低于 CO, 不会对 CO 的测量产生干扰. 这就使得该波段成为 CO 吸收测量的一个理想选择.

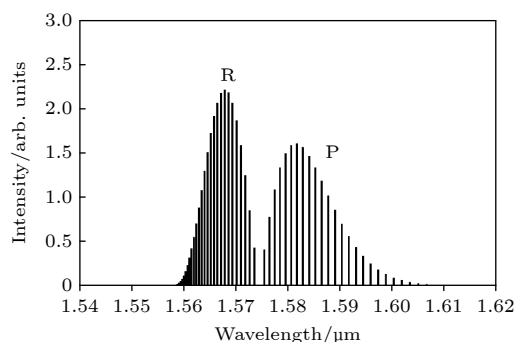


图 1 HITRAN2016 光谱数据库计算得到的室温下 CO 在 $1.6\ \mu\text{m}$ 附近的吸收谱线

Fig. 1. Absorption lines of CO around $1.6\ \mu\text{m}$ at room temperature in HITRAN2016 database.

图 2 为实验光路示意图. 宽带调谐光源 (wideband tunable laser diode, WTLD) 为一台输出波长在 $1.5\ \mu\text{m}$ 波段宽带可调半导体激光器 (Santec,

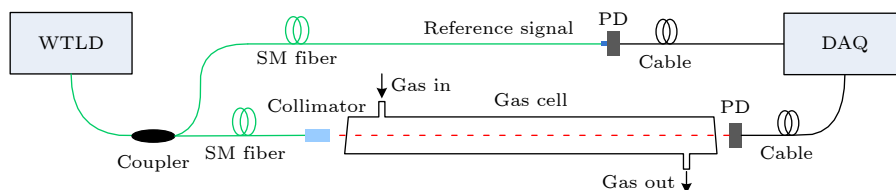


图 2 CO 宽光谱吸收测量实验光路图. WTLD, 宽带调谐光源; PD, 探测器; DAQ, 数采系统

Fig. 2. Schematic diagram of the hyperspectral absorption experiment. WTLD, wideband tunable laser diode; PD, photo-detector; DAQ, data acquisition.

TSL-570), 输出光谱在 1500—1600 nm 内连续可调, 激光线宽小于 50 MHz, 最大波长调谐速率约为 200 nm/s. 光源发出的信号光经光纤耦合器一分为二, 其中一路作为参考信号直接由探测器(photoelectric detector, PD) 进行探测; 另一路则通过一段单模光纤后经准直透镜进入气室, 然后由探测器接收; 气室长度约 1.2 m, 两端由石英窗口密封, 窗口呈一定角度以防止产生干涉干扰; 气室内充有一定量的 CO/N₂ 混合气体, 周期性扫描的信号光经过气室后会被 CO 吸收, 在时序上会出现周期性的光强变化, 从而得到 CO 的吸收光谱信息. 气室内压强可通过充入混合气体的量来进行调节.

2.2 实验结果及分析

首先将气室抽成真空, 然后在气室内充入 0.5 atm (1 atm = 1.01×10^5 Pa) 的 CO/N₂ 混合气体, 设置激光器波长扫描范围为 1562—1572 nm, 实验测得的典型吸收光谱信号如图 3 所示.

由图 3(a) 可见, 测得的信号光强度在特定的采样点呈现出明显的周期性降低, 表明其中包含吸收信息. 图 3(b) 给出了去除本底后一个扫描周期内的吸收信号, 两者呈对称关系, 其中左侧的吸收信号是波长向长波方向扫描过程中产生的吸收信号, 而右侧的吸收信号则是波长向短波方向扫描过程中产生的吸收信号.

图 4 给出了在 1562—1572 nm 波段实验测得的吸收光谱. 同时, 基于 HITRAN2016 数据库计算给出了该波段的理论吸收谱. 由于理论计算中使用的吸收路径长度和 CO 浓度与实测数据并未一一对应, 因此两者的吸收强度不具备可比性. 通过对比吸收强度可以发现, 实测信号在各个吸收谱线的峰值强度上与理论值相差较大; 且实验中发现, 同一吸收谱线在不同周期测得的峰值也有一定差异. 通过实验分析发现, 这主要是由背景噪声抖动所导致的. 这种情况下, 若采用双线吸收法, 由于吸收谱线峰值会出现较大的变化, 给测量系统引入很大的误差; 但使用宽光谱吸收测量技术, 则依然可以得到较准确的反演信息.

通过对比图 4 横坐标, 发现实测数据在波长位置上能够与理论模拟数据实现一一对应, 正如图 5 所示, 展示了宽带调谐光源扫描过程中采样点与输出波长的对应关系. 可以看出, 在实验过程中

激光器输出波长与采样点呈线性关系, 斜率约为 0.0019 nm/Sa, 表明激光器具有良好的线性扫描特性. 实验中数据采样率为 50 kSa/s, 则对应的波长调谐速率约为 95 nm/s.

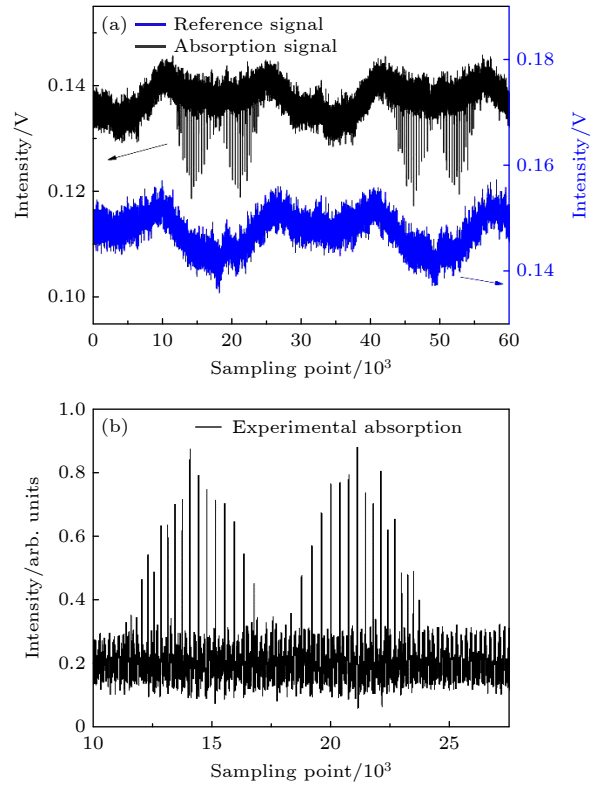


图 3 实验测得的吸收信号 (a) 原始探测信号; (b) 吸收光谱信号

Fig. 3. Recorded absorption signal: (a) Detected original signal; (b) absorption signal.

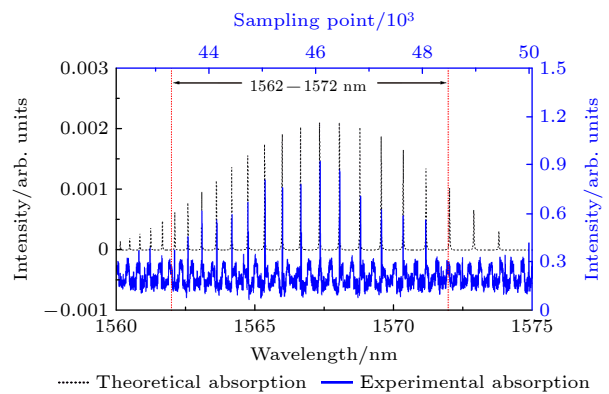


图 4 实测信号与理论模拟的对比

Fig. 4. Comparison between theoretical absorption signal and experimental results.

实验中通过改变气室内的充气量, 得到了不同压强下的 CO 宽带吸收光谱. 图 6 给出了不同压强下 1566.5—1568.5 nm 之间的理论和实测吸收光

谱信号. 为了方便对比, 对各吸收数据在纵坐标方向上进行了平移. 在该波段范围内对各个吸收谱分析结果表明, 随着压强的升高, 吸收谱线逐渐展宽; 在不同压强下, 实测光谱线宽与理论线宽基本

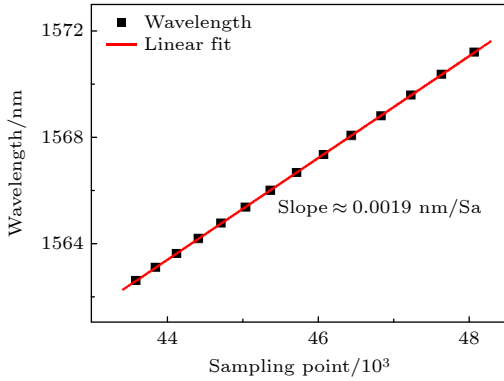


图 5 激光器扫描过程中采样点与波长之间的对应关系
Fig. 5. Relationship between the sampling point and the output wavelength.

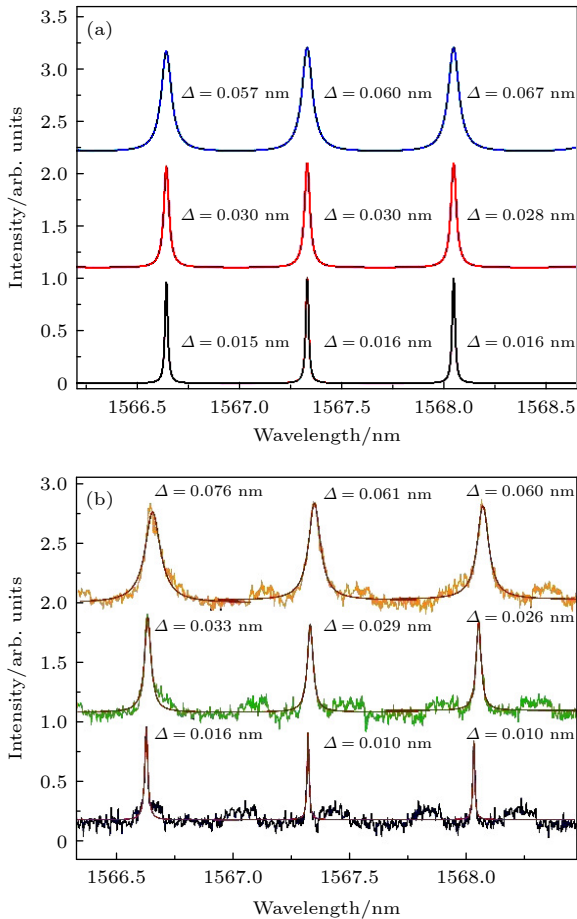


图 6 不同压强下 CO 在 1567 nm 附近的吸收谱 (a) 理论模拟光谱; (b) 实测吸收光谱及其洛伦兹拟合
Fig. 6. Detailed absorption spectra of CO around 1567 nm at different pressures: (a) Theoretical absorption spectra; (b) measured absorption spectra and corresponding Lorentz fit.

保持一致. 以 1567.3 nm 吸收谱线为例, 在 0.5, 1.0 和 2.0 atm 下, 理论模拟的线宽与压强呈比例线性增加, 分别约为 0.016, 0.030 和 0.060 nm; 而实测光谱线宽分别为 0.010, 0.029 和 0.061 nm, 与理论线宽非常接近, 验证了测量结果的可信性和准确性.

3 基于宽光谱吸收数据的参数反演

从实测吸收信号中截取一段宽光谱吸收数据即可实现对 CO 气体温度和摩尔分数的参数反演. 以 1565—1570 nm 范围内的宽带吸收光谱数据为例, 进行参数反演计算. 通过图 4 可以看出, 由于 CO 吸收较弱, 实测数据存在较大的本底噪声, 而本底噪声的抖动又会对吸收峰的强弱产生较大的影响. 因此, 首先需对实测数据进行滤波去噪预处理. 预处理后的实测 CO 吸收数据如图 7 所示, 经过滤波去噪后, 实测数据信噪比得到了明显改善; 但与理论模拟数据相比, 实测数据中的各吸收峰强度分布依然存在一定的不规则性, 这是由测量中的意外扰动所导致的.

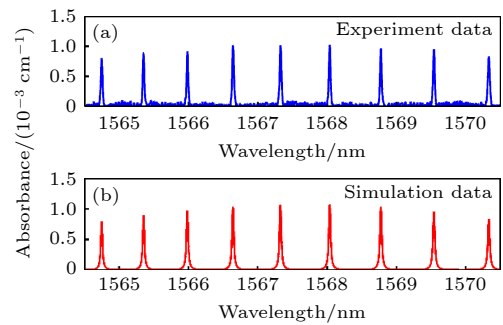


图 7 1565—1570 nm 实测 CO 宽光谱吸收数据 (a) 与理论模拟数据 (b)

Fig. 7. Measured hyperspectral absorption spectrum (a) and simulated hyperspectral absorption spectrum (b) of CO in the 1565—1570 nm range.

3.1 温度反演

温度反演采用一阶导数法 [24,37,38]. 由于实测吸收光谱信号中基线无法完全消除, 因此实测吸收光谱信号 S_e 表示为

$$S_e(P, T, X) = S_t(P, T, X) + b_0, \quad (1)$$

其中, P 为压强, T 为温度, X 为摩尔分数, S_t 为理论吸收光谱信号, b_0 为残余基线. 对 S_e 取一阶导数, 有

$$S_e(P, T, X)' = S_t(P, T, X)' + b'_0. \quad (2)$$

滤波后, 残余基线为慢变信号, 因此有 $b'_0 \approx 0$, 则可得

$$S_e(P, T, X)' \approx S_t(P, T, X)'. \quad (3)$$

(3) 式表明在相同的温度、压强和摩尔分数等物理参数下, 实测数据的一阶导数与理论模拟数据的一阶导数相同. 据此, 在已知压强 P 的情况下, 就可以通过实测数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数之间的对比, 实现对温度参数的反演.

对比过程使用残差最小法, 两者之间的方均根残差 RMSE 可表示为

$$\text{RMSE} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [S_{e,\lambda_i}(P, T, X)' - S_{t,\lambda_i}(P, T, X)']^2}, \quad (4)$$

其中, $S_{e,\lambda_i}(P, T, X)'$ 和 $S_{t,\lambda_i}(P, T, X)'$ 分别为实测数据和理论模拟数据的一阶导数在波长 λ_i 处的值, N 为波长点的总数.

反演中, 先生成一个不同温度下的理论吸收光谱数据库, 取一阶导数后与实测数据的一阶导数进行对比, 当方均根残差 RMSE 最小时, 对应的理论吸收光谱数据库温度即为实测环境温度. 具体反演过程如下: 首先, 利用 HITRAN 数据库在 1 atm, 1% 摩尔分数条件下生成不同温度的 CO 宽光谱吸收数据; 然后, 对理论模拟吸收光谱和实测吸收光谱分别求一阶导数, 典型结果如图 8(a) 所示. 分别计算不同温度下, 实测吸收光谱数据与理论模拟数据之间的 RMSE, 计算结果如图 8(b) 所示. 通过对 RMSE 进行二次函数拟合可得 RMSE 最小值对应的温度为 300 K, 此即为反演得到的 CO 气体温度. 实验中实测环境温度为 298.6 K, 对应的温度反演误差约为 0.5%. 可见, 反演得到的温度数据与实测温度数据较接近.

若使用传统 TDLAS 技术中的双线法对温度进行测量, 则任意选取图 7(a) 中的两条吸收谱线, 以其吸收面积之比与温度之间的单调关系即可反演得到温度信息. 这里利用短波处的 4 条吸收谱线进行温度反演 (从左至右依次命名为 L1, L2, L3 和 L4), 得到的温度信息见表 1. 由表 1 可知, 不同谱线对反演得到的温度差异较大, 分布范围覆盖 [259.62 K, 401.66 K] 区间, 平均温度约为 342.67 K,

与实际环境温度差距较大, 这主要是由吸收谱线的扰动以及基线提取误差所导致的.

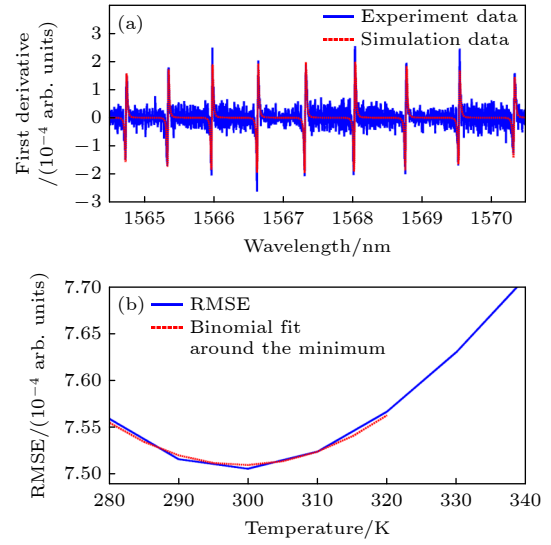


图 8 实测吸收光谱数据与理论模拟数据之间的对比 (a) 实测吸收光谱数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数; (b) 不同温度下实测吸收光谱数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数之间的 RMSE

Fig. 8. Comparison between measured and theoretical spectra: (a) First derivatives of the measured and theoretical spectra; (b) RMSE between measured and theoretical spectra at different temperatures.

表 1 双线法反演得到的温度信息
Table 1. Temperature derived by dual-line method.

Lines	T/K			
	L1	L2	L3	L4
L1	—	401.66	318.64	342.92
L2	401.66	—	259.62	316.15
L3	318.64	259.61	—	417.04
L4	342.92	316.15	417.03	—

3.2 摩尔分数反演

吸收光谱测量中, 介质的吸收系数 α 可以表示为

$$\alpha = PXS(T)\phi(\nu), \quad (5)$$

其中, S 为吸收线强度, $\phi(\nu)$ 为线型函数. 对吸收系数 α 求导有

$$\alpha' = PXS(T)\phi'(\nu). \quad (6)$$

在压强 P 和温度 T 已知的情況下有

$$\alpha' \propto X. \quad (7)$$

对于理论模拟数据 α'_s 和实测数据 α'_{exp} 有

$$\frac{\alpha'_s}{\alpha'_{\text{exp}}} = \frac{X_s}{X_{\text{exp}}}, \quad (8)$$

由此可求得实测数据的摩尔分数为

$$X_{\text{exp}} = X_s \frac{\alpha'_{\text{exp}}}{\alpha'_s}. \quad (9)$$

不同温度下, 实测数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数的斜率 $\alpha'_{\text{exp}}/\alpha'_s$ 是不同的. 图 9 为 300 K 温度下实测数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数的分布关系. 通过对图中数据点的线性拟合即可得到斜率 $\alpha'_{\text{exp}}/\alpha'_s$, 从而利用 (9) 式计算得到 CO 的摩尔分数. 由图 9 可以看出, 300 K 温度下, $\alpha'_{\text{exp}}/\alpha'_s$ 约为 41.1. 理论模拟中设定的 CO 摩尔分数为 1%, 则实测数据对应的 CO 摩尔分数应为 41.1%. 实验用标气中 CO 占比约为 42.9%, 由此可得摩尔分数反演误差约为 4.2%.

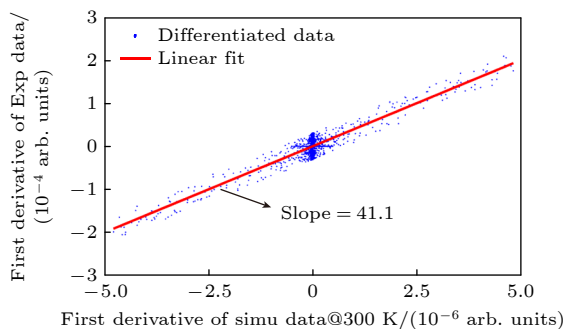


图 9 300 K 温度下, 实测数据一阶导数与理论模拟数据一阶导数的分布关系

Fig. 9. Relationship between the first derivative of the measured spectrum and that of the theoretical spectrum at 300 K.

由上述反演计算可见, 虽然测量的宽带吸收光谱中存在吸收谱线强度畸变的现象, 但是通过宽光谱吸收数据依然可以反演得到较为准确的温度和摩尔分数信息.

4 结 论

实验测量了不同压强下 CO 在 1.5 μm 波段的宽光谱吸收数据, 并与理论计算结果进行了对比分析. 结果表明, 实验所使用的宽带调谐激光器具有良好的线性扫描特性, 实验测量得到的 CO 吸收数据与 HITRAN2016 数据库高度吻合. 利用低采样率宽带吸收光谱数据实现了对温度和 CO 摩尔分数的准确反演, 验证了宽光谱吸收测量技术的高可

靠性和鲁棒性, 为燃烧流场的二维层析诊断提供了技术基础. 后续, 将在该实验的基础上搭建二维宽光谱吸收测量系统, 实现对环境温度和 CO 摩尔分数的二维测量.

参考文献

- [1] Chen J 2019 *M. S. Thesis* (Tianjin: Tianjin University) (in Chinese) [陈健 2019 硕士学位论文 (天津: 天津大学)]
- [2] Wang Z, Du Y J, Ding Y J, Li Z, Peng Z M 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 044205 (in Chinese) [王振, 杜艳君, 丁艳军, 李政, 彭志敏 2022 物理学报 **71** 044205]
- [3] Devolder P, Dusanter S, Lemoine B, Fittschen C 2006 *Chem. Phys. Lett.* **417** 154
- [4] Zhang Y Q 2019 *M. S. Thesis* (Hangzhou: Zhejiang University) (in Chinese) [张雅琪 2019 硕士学位论文 (杭州: 浙江大学)]
- [5] Fu B, Zhang C, Lü W, Sun J, Shang C, Cheng Y, Xu L 2022 *Appl. Spectrosc. Rev.* **57** 112
- [6] Goldenstein C S, Spearrin R M, Jeffries J B, Hanson R K 2017 *Prog. Energy Combust. Sci.* **60** 132
- [7] Bolshov M A, Kuritsyn Y A, Romanovskii Y V 2015 *Spectrochim. Acta, Part B* **106** 45
- [8] Hanson R K, Davidson D F 2014 *Prog. Energy Combust. Sci.* **44** 103
- [9] Liu J R, Hu Z Y, Zhang Z R, Guan X W, Wang S, Tao B, Ye J F, Zhang L R, Huang M S, Zhao X Y, Ye X S 2011 *Opt. Precis. Eng.* **19** 284 (in Chinese) [刘晶儒, 胡志云, 张振荣, 关小伟, 王晟, 陶波, 叶景峰, 张立荣, 黄梅生, 赵新艳, 叶锡生 2011 光学精密工程 **19** 284]
- [10] Li L C, Duo L P, Zhou D J, Wang Z Q, Wang Y H, Tang S K 2019 *Infrared Laser Eng.* **48** 0805011 (in Chinese) [李留成, 多丽萍, 周冬建, 王增强, 王元虎, 唐书凯 2019 红外与激光工程 **48** 0805011]
- [11] Wagner S, Klein M, Kathrotia T, Riedel U, Kissel T, Dreizler A, Ebert V 2012 *Appl. Phys. B* **109** 533
- [12] Sur R, Sun K, Jeffries J B, Hanson R K, Pummill R J, Waind T, Wagner D R, Whitty K J 2014 *Appl. Phys. B* **116** 33
- [13] Peng Y Q, Kan R F, Xu Z Y, Xia H H, Nie W, Zhang B Q 2018 *Chin. J. Lasers* **45** 0911010 (in Chinese) [彭于权, 阚瑞峰, 许振宇, 夏晖晖, 聂伟, 张步强 2018 中国激光 **45** 0911010]
- [14] Sane A, Satijia A, Lucht R P, Gore J P 2014 *Appl. Phys. B* **117** 7
- [15] Hu S W, Yin K W, Tu X B, Yang F R, Chen S 2021 *J. Exp. Fluid Mech.* **35** 60 [胡尚炜, 殷可为, 涂晓波, 杨富荣, 陈爽 2021 实验流体力学 **35** 60]
- [16] Sappey A D, Masterson P, Huelson E, Howell J, Estes M, Hofvander H, Jobson A 2011 *Combust. Sci. Technol.* **183** 1282
- [17] Sepman A, Ogren Y, Gullberg M, Wiinikka H 2016 *Appl. Phys. B* **122** 29
- [18] Ma L, Li X, Sanders S T, Caswell A W, Roy S, Plemmons D H, Gord J R 2013 *Opt. Express* **21** 1152
- [19] Tao M M, Tao B, Hu Z Y, Feng G B, Ye X S, Zhao J 2017 *Opt. Express* **25** 32386
- [20] Sanders S T 2001 *Ph. D. Dissertation* (Stanford, CA: Stanford University)
- [21] Huber R, Wojtkowski M, Fujimoto J G 2006 *Opt. Express* **14** 3225
- [22] Tao M M, Tao B, Ye J F, Shen Y L, Huang K, Ye X S, Zhao J 2020 *Acta Phys. Sin.* **69** 034205 (in Chinese) [陶蒙蒙, 陶波, 叶景峰, 沈炎龙, 黄珂, 叶锡生, 赵军 2020 物理学报 **69** 034205]

- [23] Grauer S J, Emmert J, Sanders S T, Wagner S, Daun K J 2019 *Meas. Sci. Technol.* **30** 105401
- [24] Kranendonk L A, Caswell A W, Sanders S T 2007 *Appl. Opt.* **46** 4117
- [25] Caswell A W, Roy S, An X, Sanders S T, Schauer F R, Gord J R 2013 *Appl. Opt.* **52** 2893
- [26] Cai W W, Ewing D J, Ma L 2008 *Comput. Phys. Commun.* **179** 250
- [27] Ma L, Cai W W 2008 *Appl. Opt.* **47** 3751
- [28] Ma L, Cai W W 2008 *Appl. Opt.* **47** 4186
- [29] Cai W W, Kaminski C F 2014 *Appl. Phys. Lett.* **104** 034101
- [30] Wright P, Garcia-Stewart C A, Carey S J, Hindle F P, Pegrum S H, Colbourne S M, Turner P J, Hurr W J, Litt T J, Murray S C, Crossley S D, Ozanyan K B, McCann H 2005 *Appl. Opt.* **44** 6578
- [31] Wang F, Cen K F, Li N, Jeffries J B, Huang Q X, Yan J H, Chi Y 2010 *Meas. Sci. Technol.* **21** 045301
- [32] Deguchi Y, Kamimoto T, Kiyota Y 2015 *Flow Meas. Instrum.* **46** 312
- [33] Tsekenis S A, Tait N, McCann H 2015 *Rev. Sci. Instrum.* **86** 035104
- [34] Terzija N, Karagiannopoulos S, Begg S, Wright P, Ozanyan K, McCann H 2015 *Int. J. Engine Res.* **16** 565
- [35] Liu C, Cao Z, Lin Y, Xu L, McCann H 2018 *IEEE Trans Instrum. Meas.* **67** 1338
- [36] Wang Z, Deguchi Y, Kamimoto T, Tainaka K, Tanno K 2020 *Fuel* **268** 117370
- [37] Tao M M, Wang Y M, Wu H L, Li G H, Wang S, Tao B, Ye J F, Feng G B, Ye X S, Chen W B 2022 *Acta Phys. Sin.* **71** 114203 (in Chinese) [陶蒙蒙, 王亚民, 吴昊龙, 李国华, 王晟, 陶波, 叶景峰, 冯国斌, 叶锡生, 陈卫标 2022 *物理学报* **71** 114203]
- [38] Schulze G, Jirasek A, Yu M M L, Lim A, Turner R F B, Blades M W 2005 *Appl. Spectrosc.* **59** 545

Hyperspectral absorption of CO in the near infrared band at room temperature^{*}

Wang Ya-Min¹⁾ Wu Hao-Long¹⁾ Tao Meng-Meng^{1)2)†} Li Guo-Hua¹⁾
 Wang Sheng¹⁾ Ye Jing-Feng^{1)‡}

1) (*State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China*)

2) (*Wang Zhijiang Laser Innovation Center, Shanghai Institute of Optics and Fine Mechanics,
 Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800, China*)

(Received 8 April 2023; revised manuscript received 31 July 2023)

Abstract

As an important medial product in the combustion process of carbon-based compounds, CO serves as one of the preferable candidates for combustion diagnosis in absorption spectrum. So far, most of researches have focused on the conventional one-line or dual-line technique, which requires a number of beam projections for two-dimension (2D) tomography of combustion field. Hyperspectral absorption spectroscopy enables continuous acquisition of absorption information over a whole absorption band, rather than one or two discrete absorption lines, demonstrating remarkable advantage over the traditional one-line and dual-line techniques. Hyperspectral absorption spectroscopy can not only reduce the system complexity with limited projections for high spatial resolution 2D tomography, but also improve the system applicability by refining the measurement robustness. However, up to now, little attention has been paid to hyperspectral absorption of CO. Here, by using a wideband tunable laser source around 1.5 μm , experiments are conducted at room temperature to investigate the hyperspectral absorption characteristics of CO in the near infrared band. Absorptions under different pressure conditions are compared with each other. And, the measured results are consistent with the HITRAN2016 database. With the measured hyperspectral absorption information in the 1565–1570 nm range, temperature and mole fraction of CO are derived by the first derivative method. Despite the distortion of the recorded absorption peaks, accurate results are obtained with measurement errors within 5% for both temperature and mole fraction, thereby validating the reliability of hyperspectral absorption technique for CO. And, this research is instructive for future 2D tomography of combustion fields based on hyperspectral absorption of CO.

Keywords: absorption spectroscopy, tunable diode laser absorption spectroscopy, hyperspectral absorption, two-dimension tomography, combustion field

PACS: 42.62.Fi, 33.20.Ea, 68.37.Uv, 74.25.nd

DOI: [10.7498/aps.72.20230557](https://doi.org/10.7498/aps.72.20230557)

^{*} Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 62105268, 91841303, 52106222) and the Foundation of State Key Laboratory of Laser Interaction with Matter, China (Grant Nos. SKLLIM2009, SKLLIM2110).

[†] Corresponding author. E-mail: taomengmeng@nint.ac.cn

[‡] Corresponding author. E-mail: yejingfeng@nint.ac.cn

室温下CO的近红外波段宽光谱吸收测量

王亚民 吴昊龙 陶蒙蒙 李国华 王晟 叶景峰

Hyperspectral absorption of CO in the near infrared band at room temperature

Wang Ya-Min Wu Hao-Long Tao Meng-Meng Li Guo-Hua Wang Sheng Ye Jing-Feng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 72, 224207 (2023) DOI: 10.7498/aps.72.20230557

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.72.20230557>

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

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>

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>

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>

基于光强与吸收率非线性同步拟合的吸收光谱测量方法

Laser intensity and absorbance measurements by tunable diode laser absorption spectroscopy based on non-line fitting algorithm

物理学报. 2018, 67(5): 057801 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171905>

基于Tikhonov正则化参数矩阵的激光吸收光谱燃烧场二维重建光路设计方法

Development of beam arrangement design for tunable diode laser absorption tomography reconstruction based on Tikhonov regularization parameter matrix

物理学报. 2020, 69(22): 227801 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20201144>