

# 基于 TDLAS 技术测量高温环境中 CO<sub>2</sub> 的温度和浓度

崔海滨, 王飞, 李玫仪

浙江大学能源工程学院能源清洁利用国家重点实验室, 浙江 杭州 310027

**摘要** 基于可调谐半导体激光吸收光谱(TDLAS)技术,研究了高温环境中 CO<sub>2</sub> 温度和浓度的测量方法。选取位于 4996 cm<sup>-1</sup>附近的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线作为高温环境中对 CO<sub>2</sub> 温度和浓度进行测量的目标谱线对。对气体吸收池内不同温度(873~1273 K)、不同 CO<sub>2</sub> 体积分数(4%~10%)的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的温度以及 CO<sub>2</sub> 的浓度进行了在线测量。结果表明:测量温度与设定温度的平均偏差为 2.07%,峰值偏差为 3.49%;测量得到的 CO<sub>2</sub> 浓度与配比浓度的平均偏差为 2.25%,峰值偏差为 4.75%。该测量方法精确可靠,为高温环境中 CO<sub>2</sub> 的测量提供了一种新的技术手段。

**关键词** 光谱学; 可调谐激光吸收光谱; 高温环境; CO<sub>2</sub>; 温度测量; 浓度测量

中图分类号 O433.1

文献标识码 A

doi: 10.3788/LOP55.053003

## Measurements of CO<sub>2</sub> Temperature and Concentration in High Temperature Environment Based on Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy

Cui Haibin, Wang Fei, Li Meiyi

College of Energy Engineering, State Key Laboratory of Clean Energy Utilization, Zhejiang University, Hangzhou, Zhejiang 310027, China

**Abstract** Based on tunable diode laser absorption spectroscopy technique, the measurement method of CO<sub>2</sub> temperature and concentration in high temperature environment is studied. The CO<sub>2</sub> absorption line near 4996 cm<sup>-1</sup> is selected as the target detection line to measure CO<sub>2</sub> temperature and concentration in high temperature environment. The CO<sub>2</sub> concentration and temperature of CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> mixed gas in the gas absorption cell at different temperatures (873-1273 K) and different CO<sub>2</sub> volume fraction (4%-10%) are measured. The results show that, compared with the setting values, the average deviation and peak deviation of the measured temperature are 2.07% and 3.49%, respectively. The average deviation and peak deviation of the measured concentration are 2.25% and 4.75%, respectively. The results indicate that the proposed method is accurate, and it provides references for CO<sub>2</sub> detection in the high temperature environment.

**Key words** spectroscopy; tunable diode laser absorption spectroscopy; high temperature environment; carbon dioxide; temperature measurement; concentration measurement

**OCIS codes** 300.6260; 200.4560; 280.4788

## 1 引言

CO<sub>2</sub> 是一种常见的温室气体,对全球变暖和地

区气候变化有着非常重要的影响<sup>[1-3]</sup>。同时,CO<sub>2</sub> 也是燃烧过程中最基本的产物,CO<sub>2</sub> 的浓度可以作为燃烧效率的重要评估指标之一<sup>[4]</sup>。对燃烧场温度

收稿日期: 2017-10-13; 收到修改稿日期: 2017-11-24

基金项目: 浙江省科技计划项目(2016C33005)

作者简介: 崔海滨(1991—),男,博士研究生,主要从事气体监测与光谱测量方面的研究。

E-mail: cuihaibin1991@zju.edu.cn

导师简介: 王飞(1972—),男,博士,教授,博士生导师,主要从事基于可调谐半导体激光吸收光谱的气体测量技术方面的研究。E-mail: wangfei@zju.edu.cn

以及生成的  $\text{CO}_2$  的浓度进行准确测量,不仅有助于了解燃烧系统的性能,而且对燃烧系统的改进、燃烧效率的提高以及污染物的控制也具有非常重要的意义。

近年来,采用激光吸收光谱技术对  $\text{CO}_2$  气体进行测量与研究受到了国内外学者的广泛关注。Larcher 等<sup>[5]</sup>采用可调谐半导体激光吸收光谱技术,选取位于  $1.6 \mu\text{m}$  处的 4 条  $\text{CO}_2$  吸收谱线,在不同压力下对室温下  $\text{CO}_2$  气体吸收谱线的参数进行了测量与研究;李宁等<sup>[6]</sup>采用工作波长位于  $1.58 \mu\text{m}$  处的垂直腔面发射(VCSEL)激光器,利用该波长附近的两条  $\text{CO}_2$  吸收谱线对  $293\sim 573 \text{ K}$  温度范围内气体吸收池中  $\text{CO}_2$  气体的温度进行了测量,该工作虽然实现了对  $\text{CO}_2$  气体温度的测量,但测量的温度范围较窄;Webber 等<sup>[7]</sup>采用工作波长位于  $2.0 \mu\text{m}$  附近的可调谐半导体激光器,对火焰中的  $\text{CO}_2$  温度和浓度进行了测量,该测量工作选取的谱线对虽然避免了水分子吸收谱线的干扰,但谱线强度比值对温度的敏感性较弱,导致高温测量时灵敏度较小;Farooq 等<sup>[8-9]</sup>选取中红外波段  $2.7 \mu\text{m}$  附近的两条  $\text{CO}_2$  吸收谱线,同时对高温环境下气体吸收池和激波管中  $\text{CO}_2$  的温度以及浓度进行了测量,该项研究虽然对高温环境中  $\text{CO}_2$  气体的温度和浓度的测量结果具有较高的灵敏性,但在实际测量过程中需要使用两台工作波长分别位于  $2743 \text{ nm}$  和  $2752 \text{ nm}$  的量子级联激光器,装置复杂且价格十分昂贵;Wu 等<sup>[10]</sup>利用单个工作波长位于  $4.2 \mu\text{m}$  附近的量子级联激光器对  $700\sim 1200 \text{ K}$  温度范围内  $\text{CO}_2$  的温度和浓度同时进行了高灵敏度测量,但装置成本相对较高。因此,高温环境中  $\text{CO}_2$  温度和浓度的测量仍具有十分重要的研究意义和应用价值。

在  $1\sim 3 \mu\text{m}$  的波长范围内,本文通过比较  $1.55, 2.0, 2.7 \mu\text{m}$  处的  $\text{CO}_2$  吸收谱线带,选取位于  $2.0 \mu\text{m}$  处的  $\text{CO}_2$  吸收谱线带作为测量高温环境中  $\text{CO}_2$  气体的目标谱线带。通过查询 HITRAN 数据库<sup>[11]</sup>,选取适合高温环境中  $\text{CO}_2$  测量的目标谱线对,并基于波长扫描直接吸收光谱技术,利用单个工作波长位于  $2001.6 \text{ nm}$  附近的可调谐半导体激光器对高温环境中  $\text{CO}_2$  的温度和浓度进行测量。通过实验室中搭建的高温气体吸收池测量系统,在不同温度和浓度下对  $\text{CO}_2$  的温度和浓度进行测量,验证了该测量方法的准确性和可靠性。

## 2 基本原理

### 2.1 测量原理

波长扫描直接吸收光谱技术是一种常见的直接吸收光谱测量技术<sup>[12-13]</sup>。在测量过程中,激光器输出的激光波长可在一定范围内进行连续调谐。基于 Beer-Lambert 定律和测量得到的吸收光谱对气体的温度、浓度等参数进行定量计算。采用波长扫描直接吸收光谱技术得到气体的两条吸收谱线的积分吸收率  $A_1$  和  $A_2$ ,通过吸收率之比  $R_A$  得到两条谱线线强的比值:

$$R_A = \frac{A_1}{A_2} = \frac{S_1(T)XpL}{S_2(T)XpL} = \frac{S_1(T)}{S_2(T)}, \quad (1)$$

式中: $S_1$  和  $S_2$  分别为两条吸收谱线的强度; $T$  为温度; $X$  为浓度; $p$  为压强; $L$  为光程。由于线强比值仅与温度有关,因此两条吸收谱线线强的比值  $R_A$  可表示为一个仅与温度  $T$  有关的函数关系式,通过该函数关系式可求解出待测气体的温度。在已知积分吸收率  $A$ 、温度  $T$ 、压强  $p$ 、光程  $L$  以及谱线强度  $S(T)$  的情况下,可计算得到待测气体的浓度  $X$ :

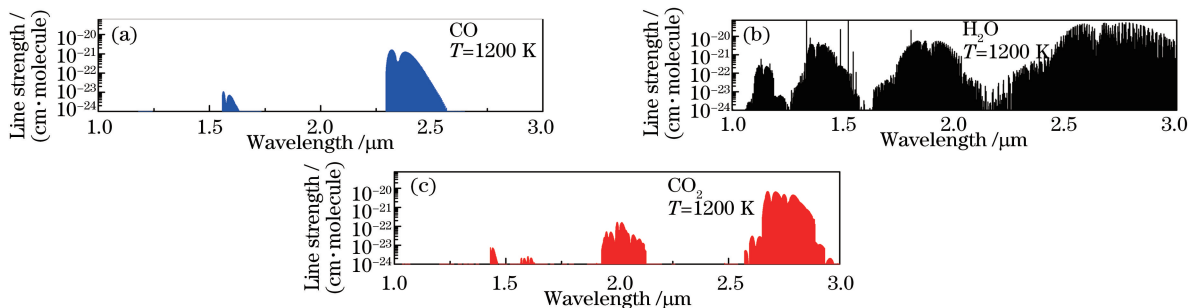
$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \alpha_v dv = \int_{-\infty}^{+\infty} k_v L dv = \int_{-\infty}^{+\infty} S(T)\varphi(v)X_i p L dv = S(T)X_i p L, \quad (2)$$

式中: $\alpha_v$  为光谱吸收率,可看作光谱吸收系数  $k_v$  与光程  $L$  的乘积; $\varphi(v)$  为吸收谱线的线性函数,并且满足  $\int_{-\infty}^{+\infty} \varphi(v) dv = 1$ 。

### 2.2 测量谱线的选取

采用波长扫描直接吸收光谱技术测量气体的温度和浓度时,对所选取用于测量的吸收谱线有很高的要求。吸收谱线的选取原则如下:1) 谱线强度足够大,保证测量得到的光谱信号具有较高的信噪比;2) 在波长扫描范围内没有其他气体吸收谱线的干扰;3) 两条吸收谱线之间的低态跃迁能差值足够大,才能保证测量系统具有较高的温度敏感性;4) 目标谱线的线强比随温度的变化是单调的。

在  $1\sim 3 \mu\text{m}$  的波长范围内,主要存在 3 个  $\text{CO}_2$  的吸收谱线带,分别位于  $1.55, 2.0, 2.7 \mu\text{m}$  处<sup>[4]</sup>;同时,还存在其他气体(如  $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}$  等)的吸收谱线。在高温条件下( $T=1200 \text{ K}$ ),  $\text{CO}$ 、 $\text{H}_2\text{O}$  和  $\text{CO}_2$  的吸收谱线线强分布如图 1 所示。

图1 (a) CO, (b) H<sub>2</sub>O 和 (c) CO<sub>2</sub> 在 1~3 μm 波长范围内的吸收谱线线强Fig. 1 Absorption line strength of (a) CO, (b) H<sub>2</sub>O and (c) CO<sub>2</sub> in the wavelength range of 1-3 μm

综合比较 1.55, 2.0, 2.7 μm 处的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线带,并结合上述测量谱线的选取原则,选取位于 2.0 μm 处的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线带作为测量高温环境下 CO<sub>2</sub> 气体的目标谱线带。此谱线带的吸收谱线在高温下测量时能够保证足够大的谱线强度,易于工业化应用。通过查询 HITRAN 数据库可知,在这个吸收谱线带内,存在 H<sub>2</sub>O 分子吸收谱线的干扰。通过模拟计算可知,在温度  $T=1000$  K、压强  $p=101325$  Pa、光程  $L=40$  cm、CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 体积分数均为 10% 的情况下,该范围内的吸收谱线如图 2 所示。

由图 2 可知,在 4985~5005 cm<sup>-1</sup> 波数范围内,CO<sub>2</sub> 吸收谱线之间存在着大量的谱线强度较高的 H<sub>2</sub>O 的吸收谱线。这些谱线的存在对 CO<sub>2</sub> 的测量

具有很强的干扰。可采用波长扫描直接吸收光谱法对 CO<sub>2</sub> 的温度和浓度进行同时测量的波长窗口共有 3 处,分别位于 4990, 4996, 5001 cm<sup>-1</sup> 附近。谱线的具体参数如表 1 所示。

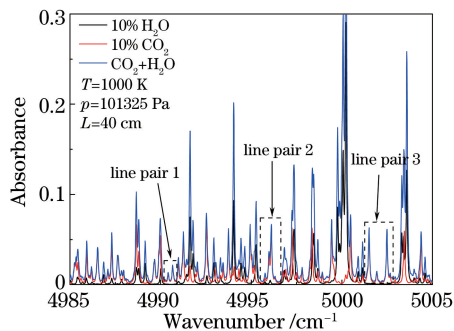


图2 模拟得到的吸收光谱

Fig. 2 Simulated absorption spectra

表1 CO<sub>2</sub> 吸收谱线的谱线参数Table 1 CO<sub>2</sub> spectral absorption-line parameters

Line pair	Center wavenumber $\nu_0$ / cm <sup>-1</sup>	Center wavelength $\lambda$ / nm	Line-intensity $S_0(T=900\text{ K}) / (10^{-7} \text{ cm}^{-2} \cdot \text{Pa}^{-1})$	Low transition energy $E''$ / cm <sup>-1</sup>
1	4990.418	2003.8402	2.81	2462.6758
	4990.665	2003.7410	6.55	1276.4475
2	4995.9702	2001.6132	4.33	1702.4031
	4995.9798	2001.6094	0.151	4059.1287
	4995.9844	2001.6075	4.9	1586.8582
	4996.1085	2001.5578	24.2	273.868
3	5001.4987	1999.4007	22.7	519.535
	5001.9159	1999.2339	2.38	2193.5452
	5001.9468	1999.2216	1.48	2551.011
	5002.4869	1999.0057	21.8	578.0115

图 3 所示为计算得到的 3 个测量窗口内各条 CO<sub>2</sub> 谱线和 H<sub>2</sub>O 谱线的吸收情况。模拟计算时的工况设定为  $T=1000$  K,  $p=101325$  Pa,  $L=40$  cm, CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的体积分数均为 10%。图 3(a) 所示为计算得到的 4990 cm<sup>-1</sup> 附近 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的吸收情况,可以发现,4990.418 cm<sup>-1</sup> 和 4990.665 cm<sup>-1</sup> 处

CO<sub>2</sub> 谱线对的吸收峰虽然完整,而且无气体吸收部分的基线也完整,但吸收强度较弱。图 3(b) 所示为计算得到的 4996 cm<sup>-1</sup> 附近 CO<sub>2</sub> 和 H<sub>2</sub>O 的吸收情况,可以发现,位于 4995.9702, 4995.9798, 4995.9844 cm<sup>-1</sup> 处的 3 条 CO<sub>2</sub> 吸收谱线的距离十分接近,因此这 3 条谱线共同形成了一个吸收峰,而

位于  $4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处的  $\text{CO}_2$  吸收谱线单独形成一个吸收峰,两个吸收峰相互独立且完整,并且吸收强度明显大于  $4990\text{ cm}^{-1}$  附近的  $\text{CO}_2$  吸收峰。此外,位于  $4996\text{ cm}^{-1}$  附近的 2 个  $\text{CO}_2$  吸收峰之间还存在一个较小的  $\text{H}_2\text{O}$  的吸收峰,但由于该峰的中心与  $\text{CO}_2$  吸收峰的中心并未重叠,仍可将各个吸收峰单独分离计算,因此对测量结果影响较小。图 3(c) 所示为计算得到的  $5001\text{ cm}^{-1}$  附近  $\text{CO}_2$  和  $\text{H}_2\text{O}$  的吸收情

况,可以发现,位于  $5001.4987\text{ cm}^{-1}$  和  $5002.4869\text{ cm}^{-1}$  处的  $\text{CO}_2$  谱线吸收较强,而位于  $5001.9159\text{ cm}^{-1}$  和  $5001.9468\text{ cm}^{-1}$  处的 2 条  $\text{CO}_2$  吸收谱线由于谱线间距太小而重叠为一个吸收峰,但吸收强度很弱。此外,  $5001\text{ cm}^{-1}$  附近由于  $\text{CO}_2$  吸收谱线众多,因此吸收峰边缘交叠情况严重,当采用扫描波长直接吸收光谱法测量时,将会出现基线无法拟合的情况,从而无法准确计算出吸收峰的面积,影响了测量的准确性。

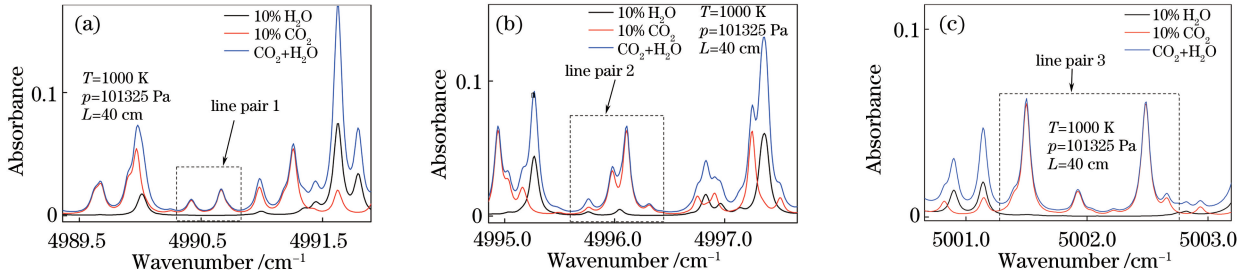


图 3 谱线对的计算结果。(a)谱线对 1;(b)谱线对 2;(c)谱线对 3

Fig. 3 Simulated results of line pairs. (a) Line pair 1; (b) line pair 2; (c) line pair 3

根据上述目标气体的吸收谱线选取原则,选择位于  $4996\text{ cm}^{-1}$  附近的  $\text{CO}_2$  吸收谱线作为本实验

测量的目标谱线对。图 4 所示为所选谱线线强随温度的变化以及温度敏感性。

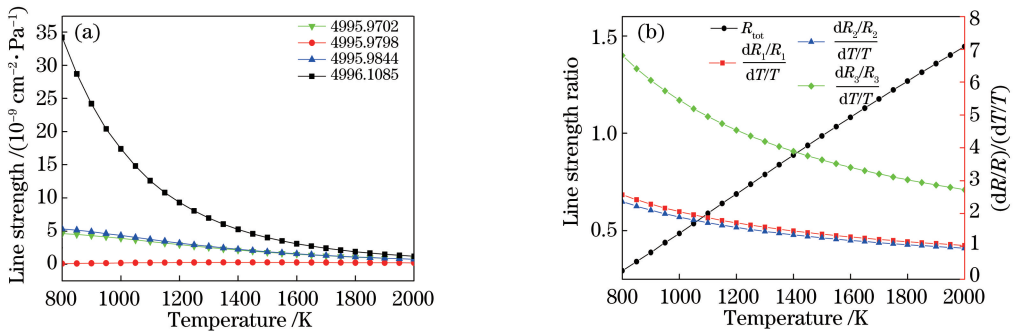


图 4 (a) 谱线线强与温度的关系;(b)吸收谱线线强比值随温度变化以及谱线线强比值的温度敏感性

Fig. 4 (a) Variations of line strength with temperature; (b) line strength ratio and their sensitivity with temperature

图 4(a) 所示为在  $800\sim 2000\text{ K}$  温度范围内目标谱线对中各条  $\text{CO}_2$  吸收谱线的强度随温度的变化,可以发现,在  $800\sim 2000\text{ K}$  的温度范围内,  $4995.9702, 4995.9844, 4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处的 3 条  $\text{CO}_2$  吸收谱线线强较大。图 4(b) 中  $R_{\text{tot}}$  所示为  $4995.9702, 4995.9798, 4995.9844\text{ cm}^{-1}$  处的 3 条  $\text{CO}_2$  吸收谱线线强之和与  $4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处  $\text{CO}_2$  吸收谱线强度的比值。 $\frac{dR_1/R_1}{dT/T}$ 、 $\frac{dR_2/R_2}{dT/T}$  以及  $\frac{dR_3/R_3}{dT/T}$  分别为  $4995.9702, 4995.9798, 4995.9844\text{ cm}^{-1}$  与  $4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处  $\text{CO}_2$  谱线强度的比值随温度变化的敏感性。由图 4(b) 可知,在  $800\sim 2000\text{ K}$  温度范围内,  $R_{\text{tot}}$  随温度变化的敏感性较强。实验过程

中,利用 Origin 软件的多峰拟合功能对这 4 个吸收峰进行拟合以用于各自积分吸收率的计算。将  $4995.9702, 4995.9798, 4995.9844\text{ cm}^{-1}$  这三条谱线作为一条谱线,并且将这三条  $\text{CO}_2$  吸收谱线线强之和与  $4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处  $\text{CO}_2$  吸收谱线强度的比值作为温度的函数用于  $\text{CO}_2$  气体温度的计算。得到  $\text{CO}_2$  气体的温度后,通过查询该温度下  $4996.1085\text{ cm}^{-1}$  处的谱线线强,再结合测量光谱得到的积分吸收率,就可以计算得到  $\text{CO}_2$  气体的浓度。

### 3 实验装置

搭建的高温测量系统如图 5 所示。其中,气体吸收池为自制的三段式石英玻璃管气体吸收池。位

于气体吸收池中部的是长为 400 mm 的探测段,两端分别是长度为 450 mm 的隔离段。

实验过程中采用高温管式炉对气体吸收池进行加热和保温。高温管式炉内的加热段长度为 600 mm,大于气体吸收池探测段的长度,从而保证

了整个探测段受热均匀。实验前,通过真空泵将两端的隔离段抽成真空,以防止外部的低温环境及气体对探测段温度的影响。在气路方面,采用两台气体质量流量计控制不同流量的  $\text{CO}_2$  和  $\text{N}_2$  进入预混瓶,进而配制不同浓度的  $\text{CO}_2$  混合气体。

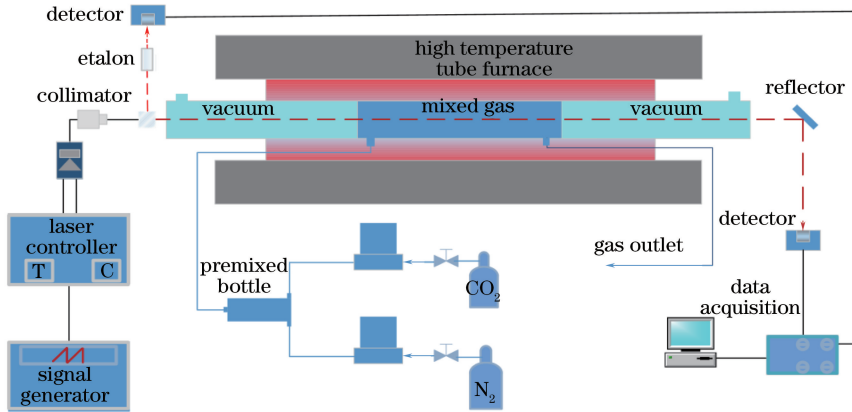


图 5 高温测量系统示意图

Fig. 5 Diagram of the high temperature measurement system

在光路方面,通过蝶形激光器夹具(LDM-4900, ILX Lightwave)将激光控制器(LDC-3900, ILX Lightwave)与激光器相连,用于控制激光器的工作温度和工作电流。采用信号发生器(AFG-3102, Tektronix)给激光控制器加载一个扫描频率为 1 kHz、高低电平分别为  $\pm 500$  mV 的锯齿波扫描电压,对目标谱线进行连续扫描。激光器的出射激光通过光纤准直器准直之后,穿过气体吸收池,经反射镜反射后被光电探测器接收。通过 LabVIEW 联合 Origin 编程对数据采集卡采集得到的光谱数据进行处理和分析,最终实现  $\text{CO}_2$  温度和浓度的测量。

## 4 实验结果与讨论

### 4.1 不同工况下测量 $\text{CO}_2$ 的温度和浓度

利用质量流量计配制  $\text{CO}_2$  体积分数分别为 4%、6%、8% 和 10% 的 4 种  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体。通过温控程序使高温管式炉的炉内温度分别为 873, 973, 1073, 1173, 1273 K。在每个温度下,分别对上述 4 种  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体的温度和  $\text{CO}_2$  浓度进行在线测量。在向气体吸收池中通入  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体之前,先向探测段通入  $\text{N}_2$  气体 5 min 进行吹扫,而后再持续通入  $\text{CO}_2$  气体 5 min,以保证气体吸收池内充满特定浓度的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  待测气体。持续通入特定浓度的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体一段时间后,待高温管式炉的炉内温度稳定在预设温度时,即可开始测

量。测量过程中,为了提高检测系统的信噪比,对数据采集卡连续采集得到的 50 个光谱信号进行累加并求平均值,以用于计算气体的温度和浓度。在扫描频率为 1 kHz 的情况下,测量系统的时间分辨率为 0.05 s。测量时保持气体吸收池内压强  $p = 101325$  Pa,测量光程  $L = 40$  cm。每次测量记录的结果为 10 次测量的平均值,并计算测量值与平均值的偏差。

采用 Voigt 线型函数对实验测量得到的吸收谱线进行拟合。通过目标谱线光谱吸收率的积分值可计算出当前工况下  $\text{CO}_2$  气体的温度和浓度值。图 6

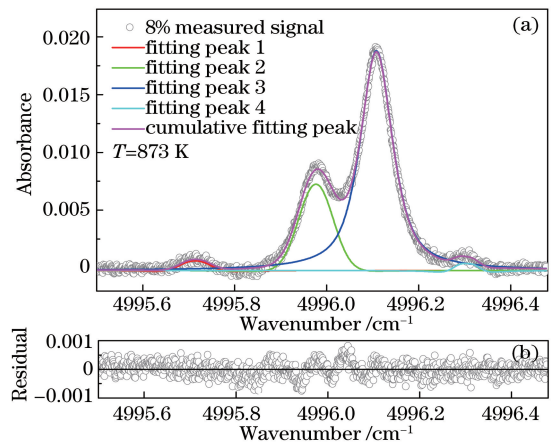


图 6 (a) 光谱吸收信号以及采用 Voigt 线型函数进行多峰拟合的结果及 (b) 拟合残差

Fig. 6 (a) Spectral absorption signal and multi-peak fitting results using Voigt function and (b) fitting residual

所示为温度  $T=873$  K, 混合气体中  $\text{CO}_2$  的体积分数为 8% 时, 测量得到的光谱吸收率原始信号和采用 Voigt 线型函数进行多峰拟合的结果及拟合残差。由多峰拟合结果可知, 采用 Voigt 线型函数对测量得到的光谱吸收率进行拟合, 其拟合度达到 99.8% 以上, 拟合残差平均值小于 0.0005, 峰值小于 0.001。拟合结果表明采用 Voigt 线型函数进行拟合具有较高的准确性。

## 4.2 实验结果分析

在不同浓度下对不同配比的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体的温度进行测量。实验前, 采用高温管式炉对气体吸收池进行加热, 达到设定温度值之后进行保温。在温度恒定的情况下, 利用气体质量流量计配制相应浓度的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体, 并对配制好的气体进行测量。测量得到的温度值如表 2 所示, 测量值与设定值的偏差见表 3。

表 2 不同工况下测量得到的温度

Table 2 Measured temperature under different operating conditions

Volume fraction of $\text{CO}_2/\%$	Measured temperature /K				
	873 K	973 K	1073 K	1173 K	1273 K
10	881.6	994.4	1087.8	1160.0	1260.1
8	868.9	946.8	1055.6	1160.9	1284.6
6	890.7	996.7	1100.3	1205.7	1241.6
4	898.3	950.1	1042.1	1135.3	1228.6

表 3 测量得到的温度值与设定值的偏差

Table 3 Deviation of measured temperatures with given temperature

Volume fraction of $\text{CO}_2/\%$	Deviation /%				
	873 K	973 K	1073 K	1173 K	1273 K
10	0.98	2.20	1.38	-1.11	-1.01
8	-0.47	-2.70	-1.62	-1.03	0.91
6	2.03	2.44	2.55	2.79	-2.47
4	2.90	-2.35	-2.88	-3.21	-3.49

在不同温度下对不同配比的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体中的  $\text{CO}_2$  浓度进行测量。在温度恒定的情况下, 将气体质量流量计配制相应浓度的  $\text{CO}_2/\text{N}_2$  混合气体

通入气体吸收池中进行测量, 然后将测量得到的气体浓度值与设定值进行比较。测量得到的浓度值如表 4 所示, 测量值与设定值的偏差见表 5。

表 4 不同工况下测量得到的  $\text{CO}_2$  的浓度

Table 4 Measured  $\text{CO}_2$  concentration under different operating conditions

Volume fraction of $\text{CO}_2/\%$	Measured volume fraction of $\text{CO}_2$				
	873 K	973 K	1073 K	1173 K	1273 K
10	9.90	9.80	9.86	10.14	10.20
8	8.12	8.15	8.09	8.17	8.14
6	6.12	6.18	6.08	6.11	5.89
4	4.12	3.87	3.89	3.85	3.87

表 5 不同工况下测量得到的  $\text{CO}_2$  浓度值与设定值的偏差

Table 5 Deviation of measured  $\text{CO}_2$  concentration with given value under different operating conditions

Volume fraction of $\text{CO}_2/\%$	Deviation /%				
	873 K	973 K	1073 K	1173 K	1273 K
10	-1.00	-2.00	-1.40	1.40	2.00
8	1.50	1.88	1.13	2.13	1.75
6	2.00	3.00	1.33	1.83	-1.83
4	3.75	-3.25	-4.75	-3.75	-3.25

由表 4 和表 5 可知, 在不同温度下, 随着混合气体中  $\text{CO}_2$  气体的浓度降低, 测量得到的温度和浓度与实验设定值之间的偏差都有所增加。主要原因是

随着  $\text{CO}_2$  气体浓度降低, 实验测量得到的光谱吸收率降低, 导致测量信号的信噪比降低, 测量误差增大。由表 3 和表 5 可知; 在不同工况下测量得到的

温度与设定温度相比,平均偏差为 2.07%,峰值偏差为 3.49%;测量得到的 CO<sub>2</sub> 气体浓度与配比浓度的平均偏差为 2.25%,峰值偏差为 4.75%。测量结果表明,在实验室环境下可以利用位于 4996 cm<sup>-1</sup>附近的 CO<sub>2</sub> 吸收谱线,基于扫描波长直接吸收光谱技术对高温环境中 CO<sub>2</sub> 气体的温度和浓度进行测量,测量结果准确、可靠。

## 5 结 论

通过在近红外波段选取合适的吸收谱线,利用中心波长在 2001.6 nm 处的可调谐半导体激光器,并基于波长扫描直接吸收光谱测量方法,对 4996 cm<sup>-1</sup>附近的多条 CO<sub>2</sub> 吸收谱线进行同时扫描,实现了对 CO<sub>2</sub> 温度与浓度的同时测量。在实验室内搭建三段式气体吸收池高温测量系统,对所选取的 4996 cm<sup>-1</sup>附近的目标 CO<sub>2</sub> 吸收谱线进行扫描,实现了对不同温度(873~1273 K)、不同 CO<sub>2</sub> 体积分数(4%~10%)的 CO<sub>2</sub>/N<sub>2</sub> 混合气体的温度及 CO<sub>2</sub> 浓度的同时测量。实验结果表明,该测试系统具有较高的准确性和可靠性,可为高温环境条件下的 CO<sub>2</sub> 检测提供参考。

## 参 考 文 献

- [1] Doney S C, Fabry V J, Feely R A, *et al.* Ocean acidification: the other CO<sub>2</sub> problem [J]. *Annual Review of Marine Science*, 2009, 1: 169-192.
- [2] Mladenović I, Sokolov-Mladenović S, Milovančević M, *et al.* Management and estimation of thermal comfort, carbon dioxide emission and economic growth by support vector machine [J]. *Renewable & Sustainable Energy Reviews*, 2016, 64: 466-476.
- [3] Hughes T P, Baird A H, Bellwood D R, *et al.* Climate change, human impacts, and the resilience of coral reefs [J]. *Science*, 2003, 301(5635): 929-933.
- [4] Spearrin R M, Goldenstein C S, Jeffries J B, *et al.* Fiber-coupled 2.7 μm laser absorption sensor for CO<sub>2</sub> in harsh combustion environments [J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(5): 055107.
- [5] Larcher G, Landsheere X, Schwell M, *et al.* Spectral shape parameters of pure CO<sub>2</sub>, transitions near 1.6 μm by tunable diode laser spectroscopy [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy and Radiative*

*Transfer*, 2015, 164: 82-88.

- [6] Li N, Yan J H, Wang F, *et al.* Temperature measurement of CO<sub>2</sub> gas VCSEL diode laser at 1.58 μm [J]. *Journal of Combustion Science & Technology*, 2008, 14(5): 458-462.  
李宁, 严建华, 王飞, 等. 利用 VCSEL 激光二极管在 1.58 μm 波段对 CO<sub>2</sub> 气体温度的测量 [J]. *燃烧科学与技术*, 2008, 14(5): 458-462.
- [7] Webber M E, Kim S, Sanders S T, *et al.* *In situ* combustion measurements of CO<sub>2</sub> by use of a distributed-feedback diode-laser sensor near 2.0 μm [J]. *Applied Optics*, 2001, 40(6): 821-828.
- [8] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K. Sensitive detection of temperature behind reflected shock waves using wavelength modulation spectroscopy of CO<sub>2</sub> near 2.7 μm [J]. *Applied Physics B*, 2009, 96(1): 161-173.
- [9] Farooq A, Jeffries J B, Hanson R K. CO<sub>2</sub> concentration and temperature sensor for combustion gases using diode-laser absorption near 2.7 μm [J]. *Applied Physics B*, 2008, 90(3/4): 619-628.
- [10] Wu K, Li F, Cheng X, *et al.* Sensitive detection of CO<sub>2</sub> concentration and temperature for hot gases using quantum-cascade laser absorption spectroscopy near 4.2 μm [J]. *Applied Physics B*, 2014, 117(2): 659-666.
- [11] Gordon I E, Rothman L S, Hill C, *et al.* The HITRAN 2016 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2017, 203: 3-69.
- [12] Shang Y, Wei Y B, Wang C, *et al.* Two gas concentration on-line monitoring based on absorption spectra [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2010, 37(s1): 248-251.  
尚盈, 魏玉宾, 王昌, 等. 基于吸收光谱技术的两种气体浓度的在线检测 [J]. *中国激光*, 2010, 37(s1): 248-251.
- [13] Yuan S, Kan R F, He Y B, *et al.* Tunable diode laser spectroscopy system for carbon dioxide monitoring [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2014, 41(12): 1208003.  
袁松, 阚瑞峰, 何亚柏, 等. 基于可调谐半导体激光光谱大气 CO<sub>2</sub> 监测仪 [J]. *中国激光*, 2014, 41(12): 1208003.