

## 利用 TDLAS 技术的多点甲烷气体全量程监测

李 哲<sup>1,2</sup>, 张志荣<sup>1,3</sup>, 孙鹏帅<sup>1,2</sup>, 夏 滑<sup>1</sup>, 罗渊敏<sup>4</sup>, 庞 涛<sup>1</sup>, 董凤忠<sup>1,2,3</sup>

- (1. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 安徽省光子器件与材料重点实验室, 安徽 合肥 230031;
2. 中国科学技术大学 环境科学与光电技术学院, 安徽 合肥 230026;
3. 中国科学院安徽光学精密机械研究所 中国科学院环境光学与技术重点实验室, 安徽 合肥 230031;
4. 安徽中科智泰光电测控科技有限公司, 安徽 合肥 230031)

**摘要:** 甲烷气体是一种对人体和环境有严重危害的气体, 特别在煤矿、天然气罐、气站和石油化工等安全生产领域, 对甲烷气体的泄漏监测至关重要。利用可调谐半导体激光吸收光谱技术(TDLAS), 选择 1 653.72 nm 波长作为甲烷气体直接吸收检测的中心波长, 使用微透镜设计了 14 cm 光程吸收池建立了一套浓度范围为 0~100% 全量程甲烷在线监测系统, 利用分束器分成多路对不同位置进行监测, 通过小波变换对吸收信号进行降噪处理, 提高信噪比, 使系统的最低测量极限达到 335 ppm (1 ppm=10<sup>-6</sup>), 并将自行研制的多点全量程激光甲烷传感器与商用红外甲烷气体探测器进行对比实验, 结果表明: 该系统具有测量稳定性好、测量范围大、响应速度快、免调校、测量探头本征安全、低成本等优点, 完全有能力满足各行业的使用需求。

**关键词:** 甲烷(瓦斯)浓度; 可调谐半导体激光吸收光谱技术; 全量程; 微型吸收池; 在线监测预警

中图分类号: O443.4 文献标志码: A DOI: 10.3788/IRLA201746.0917009

## Multi-point full range monitoring of methane based on TDLAS technology

Li Zhe<sup>1,2</sup>, Zhang Zhirong<sup>1,3</sup>, Sun Pengshuai<sup>1,2</sup>, Xia Hua<sup>1</sup>, Luo Yuanmin<sup>4</sup>, Pang Tao<sup>1</sup>, Dong Fengzhong<sup>1,2,3</sup>

- (1. Anhui Provincial Key Laboratory of Photonic Devices and Materials, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
2. School of Environment Science and Optoelectronic Technology, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;
3. Key Lab of Environmental Optics & Technology, Anhui Institute of Optics and Fine Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China;
4. Anhui ZhongkeZhitai Photoelectric Measurement and Control Technology Co., Ltd, Hefei 230031, China)

**Abstract:** Methane is a dangerous gas for humans and ambience, and methane gas leak detection is especially significant in colliery, petrochemical, gas tank zone, gas station as well as any other safe

收稿日期: 2017-01-10; 修订日期: 2017-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(11204320, 11204319, 41405034); 国家科技支撑计划项目(2014BAC17B03); 中国科学院科研装备研制专项(YZ201315); 中国石油管道公司技术开发项目(20150206)

作者简介: 李哲(1991-), 女, 硕士生, 主要从事工业气体实时在线监测方面的研究。Email: 1525160580@qq.com

导师简介: 董凤忠(1966-), 男, 研究员, 博士, 主要从事工业过程控制、激光诱导击穿光谱技术、新型光纤传感器以及有毒有害气体的快速在线监测等方面的研究。Email: fzdong@aiofm.ac.cn

fields. The fundamental of Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy (TDLAS) was introduced, the center wavelength at 1 653.72 nm was selected for the absorption of methane detection. Also, a 14 cm optical path reflection cell with micro-lenses was designed. The on-line detection system was tested with the 0-100% methane. And also, it can be used to monitor different positions with a beam splitter. In order to improve the signal-noise ratio (SNR), wavelet transform was used to reduce noise of absorption signals. The detection limit was 335 ppm ( $1 \text{ ppm}=10^{-6}$ ). A comparison results between the homemade multi-point full-range laser methane sensor and the commercial infrared gas detector were proved that the system has many advantages to meet the requirements of the majority of industry monitoring, such as: the good stability, full range, fast response, calibration free, safe latent, anti-electric magnetic interference, low cost etc.

**Key words:** methane concentration; TDLAS; full-scale; micro absorption cell; online monitoring and early warning

## 0 引言

甲烷是一种无色、无味、无臭、可以燃烧或爆炸的气体,难溶于水,扩散性较空气高。其无毒,但浓度很高时,会引起窒息。如果空气中的甲烷含量达5%~16%就极易发生爆炸。如经常测量巷道空气中的甲烷含量,测量甲烷涌出量,并采取有效措施,便可以预防瓦斯突出和爆炸,可以保障煤矿的安全生产;天然气储罐区设置气体泄漏检测监控预警系统,对气体浓度参数的测量进行远传和连续记录,防止重大泄漏事故的发生;检测天然气、石化传输等管线是否爆裂或遭到有意无意破坏,需要记录气体浓度,流量,压力等参数,发挥防范报警作用。同时,2016年10月份即将实施的最新《煤矿安全规程》要求井下瓦斯气体的监测必须具备全量程、实时在线等功能。因此,测量精度高、响应速度快、抗干扰能力强、稳定性高、全量程的瓦斯气体在线监测仪器便是非常亟需的。

迄今为止,常见的甲烷检测方法有:催化燃烧法<sup>[1]</sup>、气相色谱法<sup>[2-3]</sup>、光干涉法<sup>[4]</sup>、光谱法<sup>[5]</sup>等,上述传统检测方法大多数不能满足全量程在线监测的要求,且检测极限有待进一步提高。可调谐半导体激光吸收光谱技术(Tunable Diode Laser Absorption Spectroscopy, TDLAS)最早于20世纪70年代提出,近十几年来在国内迅速发展,成为痕量气体监测的重要手段。TDLAS技术与其他技术相比具有明显的优势:(1)它是一种高分辨率的光谱技术;(2)响应速度快,灵敏度高;(3)可以实现非接触测量,适用于高温、强腐蚀等恶劣工业环境;(4)是一种对红外“指

纹区”多种分子都适用的技术。该技术已广泛应用于环境监测<sup>[6-7]</sup>、汽车尾气监测<sup>[8]</sup>、工业气体检测<sup>[9]</sup>、流场诊断<sup>[10]</sup>、燃烧诊断<sup>[11]</sup>等众多领域。直接吸收光谱检测相比谐波检测具有结构简单,易于使用,成本较低等优点,成为气体检测的主要手段之一。

采用波长调制方法监测甲烷浓度可以有效的提高检测灵敏度和检测极限,但是对于全量程甲烷测量来说,其谐波幅值在全量程过程中呈现非线性比例影响,会造成在低浓度或高浓度测量的极大不准确,而产生“鱼和熊掌不可兼得”的情况。文中针对煤矿安全开采、天然气泄漏中甲烷气体的实时监测问题,设计研发了短光程微透镜型小容积吸收池,利用直接吸收检测手段,选取1 653.72 nm处的中心吸收谱线,完成了浓度范围在0~100%的全量程甲烷气体监测系统,实现了高低量程的兼顾,探头无源本征安全,成本低廉。并通过与商用成熟产品的比对证明,该系统具有性能优越、响应速度快、检测精度高、探头本质安全等优点,完全可以满足煤矿<sup>[12]</sup>、石油化工、天然气罐区、气站、矸石山等众多场合的检测要求。

## 1 原理与装置

### 1.1 朗伯-比尔定律

TDLAS测量痕量气体浓度是基于分子“指纹区”特定吸收线的探测,它是利用二极管激光器的波长调谐特性,获得被选定的待测气体特征吸收线的吸收光谱,从而对待测气体进行定性或定量分析。假定在总光程为 $L$ 的吸收池中,冲入浓度为 $C$ 的待测

气体, 气体的中心吸收波长为  $\nu$ ,  $I_0$  和  $I$  分别表示初始光强和探测器接收到的激光光强, 两者关系可以通过 Lambert-Beer 吸收定律表示:

$$\frac{I}{I_0} = \exp[-S(T)CPL\phi(\nu)] \quad (1)$$

式中:  $S$  为频率  $\nu$  时所测量气体的吸收线强;  $P$  为总的气体压强;  $\phi(\nu)$  为吸收线型。由于吸收线型函数在  $\int_{-\infty}^{+\infty} \phi(\nu)d\nu=1$  整个频域内积分, 所以对公式(1)两边取对数, 令积分后的值用吸光度  $A$  表示, 则在整个频域内积分得到:

$$A = \int_{-\infty}^{+\infty} \left( \ln \frac{I_0}{I} \right) d\nu = S(T)CPL \quad (2)$$

则气体浓度可以表示为:

$$C = \frac{A}{S(T)PL} \quad (3)$$

从原理中可以看出, 光源为单色光, 要求线宽尽量窄, 完全小于气体的吸收线宽, 文中采用分布式反馈激光器(Distributed Feedback Laser, DFB), 该激光器的线宽远小于被测气体吸收谱的线宽, 有效避免了气体谱线的交叉干扰。其中公式(3)中的  $S(T)PL$  均为已知量, 只要测量得到吸光度值  $A$  便可以求得甲烷气体的浓度。

### 1.2 谱线选择

HITRAN 数据库是由美国空军地球物理实验室于 20 世纪 60 年代晚期, 为了军事目的研究将大气红外特性需要开发, 并于 1973 年对外开放该项成果, 成为吸收光谱气体检测领域所必备的基础研究工具。为了选择一条合适的吸收谱线一般遵循以下原则<sup>[13]</sup>: (1)较强的吸收线强; (2)避免其他气体的干扰; (3)很好的 Lorentz 线型。根据上述条件及硬件条件, 在 1.6  $\mu\text{m}$  附近查找到 1653.72 nm 附近相邻的三条如表 1 所示的吸收谱线<sup>[14]</sup>, 1atm=1.013 Pa。这三条谱线左右相距各 0.002 46 nm 和 0.003 28 nm, 小于各自吸收谱线的展宽宽度, 且吸收量级相差不多, 应用中一般将这三条吸收谱线当作一条谱线使用, 其吸收强度相当于三条谱线之和, 恰恰增大了其吸收强度有利于低浓度甲烷的测量。同时在 1650~1657 nm 波段附近的水气和二氧化碳吸收谱线如图 1 所示。可以看出, 在此波段  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  的吸收强度比  $\text{CH}_4$  小 3 个量级以上, 在测量环境中可以忽略  $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  对  $\text{CH}_4$  吸收干扰的影响。

表 1 HITRAN 数据库中 1 653.72 nm 处的三条吸收谱线参数

Tab.1 Parameters of three absorption lines at 1 653.72 nm in HITRAN database

Name	Nu /cm <sup>-1</sup>	Nl/nm	sw/cm <sup>-1</sup> / (molecule·cm <sup>-2</sup> )	Gamma_air / $\gamma$ /cm <sup>-1</sup> ·atm <sup>-1</sup>	Gamma_self / $\gamma$ /cm <sup>-1</sup> ·atm <sup>-1</sup>
$\lambda_1$	6 046.943	1 653.728 17	8.33E-22	0.641	0.78
$\lambda_2$	6 046.952	1 653.725 71	8.33E-22	0.641	0.78
$\lambda_3$	6 046.964	1 653.722 43	1.49E-21	0.641	0.78

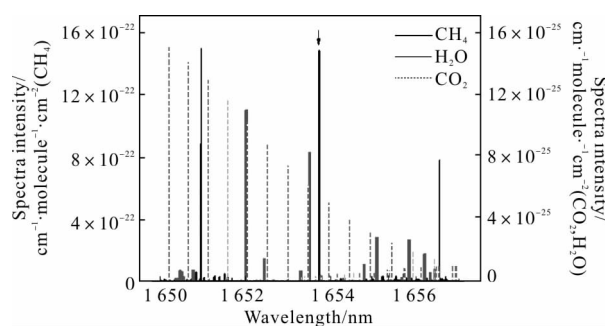


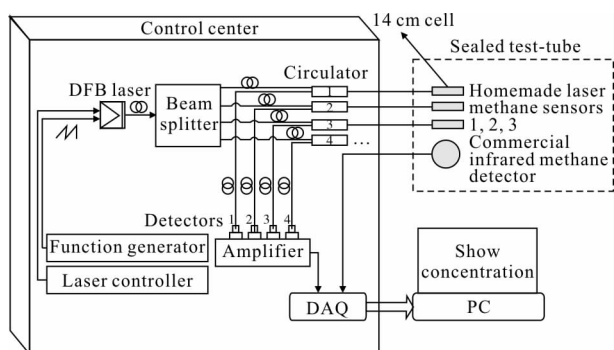
图 1 HITRAN2012 数据库中 1 650~1 657 nm 波段  $\text{CH}_4$ 、 $\text{H}_2\text{O}$ 、 $\text{CO}_2$  的吸收谱线

Fig.1 Absorption lines of  $\text{CH}_4$ ,  $\text{H}_2\text{O}$ ,  $\text{CO}_2$  at 1 650~1 657 nm in HITRAN2012 database

### 1.3 系统装置

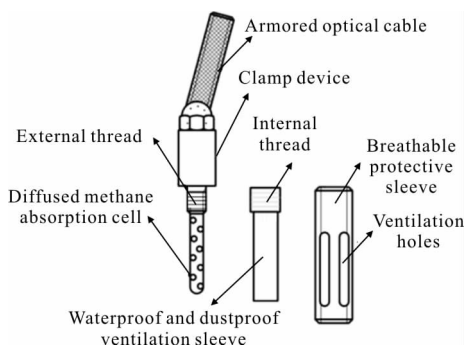
全量程甲烷测量系统示意图如图 2(a)所示, 系统检测探头示意图如图 2(b)所示。DFB 激光器由控制电源板驱动, 信号发生板产生的 10 Hz 低频锯齿波调制信号输出扫描中心波长为 1 653.72 nm 的激光光束, 然后经过分束器分为四路径对应的环形器后经光纤远距离传输到不同监测位置处的微型吸收池(可依据测量点数量进行扩展, 这里选用三路进行甲烷监测), 经 14 cm 光程微型吸收池内气体吸收后沿原路返回环形器, 然后送入与之对应的探测器进行电信号转换。转换后的电信号送入前置放大器, 最后进行数据的采集和处理。为了检验仪器性能, 把微型吸收池封装在壁挂式防尘防水透气壳内, 建立如图 2(a)所示的全量程激光甲烷传感器与商用甲烷探测器的对比实验系统。将两者探头均封装在同一密封试管内, 测试条件完全一致。商用红外甲烷探测器显示整数型浓度测量结果, 实验中通过实时读取 4~20 mA 的输出电流值换算成浓度

值作比较。在实验过程中,分别通入不同浓度的甲烷气体,采集直接吸收信号和浓度测量值进行后续的处理和比较。图 2(b)为微型吸收池示意图,其外径 0.6 cm,外长 7.5 cm,主要部件包括:铠装光缆、紧固装置、防水防尘透气套筒和保护套筒等构成。光经铠装光缆进入吸收池后由底端微反射透镜后反射一次光程达到 14 cm,监测激光经过监测探头内部的气体吸收以后再次经过光纤返回监测系统。微型吸收池外部装有防水防尘透气套筒和金属质的透气保护套筒,环境中的瓦斯气体可通过通气微孔进入内部。该监测探头可悬挂于不同的监测地点,其悬挂位置周边无阻挡,因该检测探头自身不带电,因此是绝对本征安全的。



(a) 实验示意图

(a) Diagram of experiment



(b) 全量程激光甲烷传感器监测探头

(b) Monitoring probe of full range laser methane sensor

图 2 系统装置示意图

Fig.2 Diagram of system device

## 2 结果及分析

在实验中采用激光甲烷传感器完成全量程 0~100%浓度甲烷的测量,在对低浓度甲烷进行直接吸收监测中,如 800 ppm(1 ppm=10<sup>-6</sup>)中出现由于干涉条纹引起的周期性正弦函数形式的背景噪声,严重影

响测量信号,这里使用信噪比的值判断测量信号的优劣。常见的干涉条纹处理方法还包括:FFT 低通滤波<sup>[15]</sup>、小波变换等。在文中使用小波变换的方法对甲烷的直接吸收信号进行降噪处理。利用 MATLAB Script 工具实现信号的低频部分(近似部分)和高频部分(细节部分)的完全重构。多尺度分析时只对高频部分作进一步分解,而低频部分则不予考虑,分解具有关系: $f(x)=A_n+D_n+D_{n-1}+\dots+D_1$ ,其中, $(x)$ 代表信号, $A$ 代表低频近似部分, $D$ 代表高频细节部分, $n$ 代表分解层数。经过比较计算选择 5 阶 Demy 小波基对原始信号进行分解和重建。信号在小波域内的能量主要集中在几个有限的系数中,而噪声能量却分布在整个小波域内。根据已知信号的频率和采样频率确定分解尺度,这里选用小波分解尺度为 5。分析过程如图 3 和 4 所示。用小波变换方法对原始信号 800 ppm 进行降噪处理,信噪比由原来的 1.5 提高到 3,再对小波变换后的信号进行 Voigt 拟合,拟合后相关系数为 0.921 0,如图 5 所示。

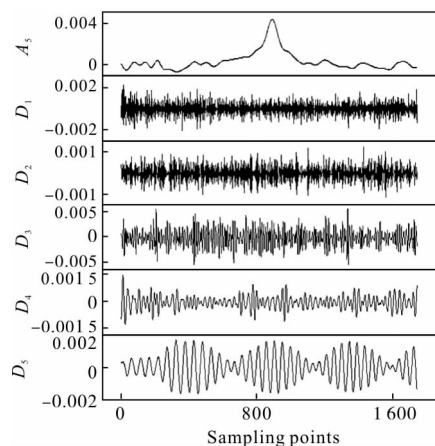


图 3 不同分解尺度上的小波信号

Fig.3 Wavelet signals at different decomposition scales

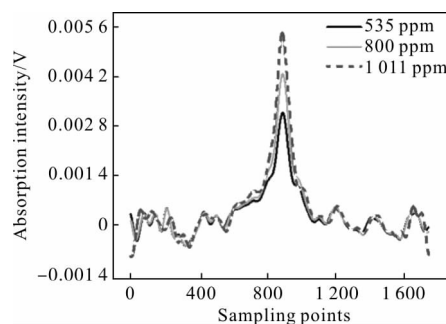


图 4 小波变换后的直接吸收信号

Fig.4 Direct absorption signal after wavelet transform

假设原始信号为  $S(x)$ , 用 Mallat 算法实现原始信号的多分辨率分析和噪声去除, 信号的分解和重建如下:

$$S(x) = D_1(x) + D_2(x) + D_3(x) + D_4(x) + D_5(x) + A_5(x) \quad (4)$$

从图 3 可以看出,  $D_1(x)$ 、 $D_2(x)$ 、 $D_3(x)$  为白噪声, 影响信号的光滑度;  $D_4(x)$ 、 $D_5(x)$  为测量系统光路产生的干涉条纹噪声, 在低浓度的测量中影响信号的稳定性, 降低信噪比。保留原始信号的低频部分  $A_5(x)$  和 5 层高频细节, 得到图 5 所示的结果, 低浓度的信噪比得到明显改善。

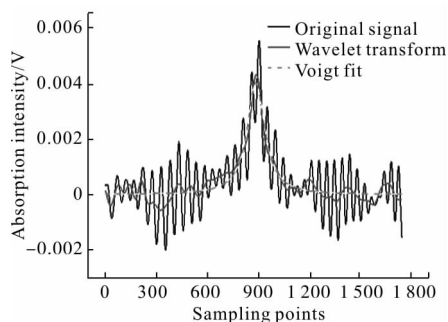


图 5 小波变换处理及 Voigt 线型拟合甲烷的直接吸收信号  
Fig.5 Direct absorption signal of methane with wavelet transform and Voigt linear fitting

按上述方法, 测量不同浓度甲烷气体: 535 ppm, 800 ppm, 1 000 ppm, 1 064 ppm, 进行降噪处理后, 得到各对应浓度的信噪比, 如图 6 所示, 对信噪比进行线性拟合, 得到拟合公式  $y = 0.44476 + 0.00463x$ 。当信噪比值最小为 2 时依然可以测得甲烷的吸收信号, 此时计算得到该微型吸收池最小测量极限为 335 ppm。

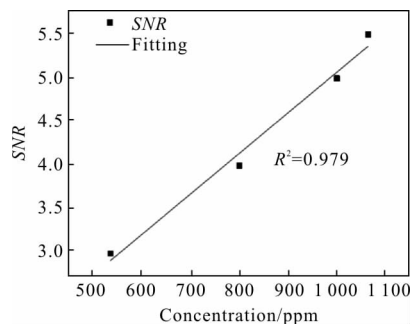


图 6 535 ppm、800 ppm、1 000 ppm、1 064 ppm 浓度值与小波变换后的信噪比拟合关系,  $R^2 = 0.979$

Fig.6 Linear fit of the measured concentration value and SNR after wavelet transform,  $R^2 = 0.979$

为了进一步的检验系统测量能力, 测试过程中在独立封装的 3 个激光甲烷传感器内分别冲入不同

浓度的标准甲烷气体 (0.1%, 0.5%, 1.02%, 5.03%, 9.97%, 19.98%, 50.11%, 70.3%, 100%)。测试过程中, 按照低浓度到高浓度的顺序通入甲烷气体, 待测量信号稳定后保存其直接吸收信号, 并对低浓度的直接吸收信号进行上述小波变换处理, 随着浓度的升高, 吸收信号强度随之增强, 可以有效提取各浓度的吸收线型, 从而实现对甲烷的全量程测量, 采样信号如图 7 所示。通过计算直接吸收面积反演浓度的方法得到 0~100% 各浓度的测量值。由于随着冲入甲烷气体浓度的增大, 吸收出现了非线性情况, 因此

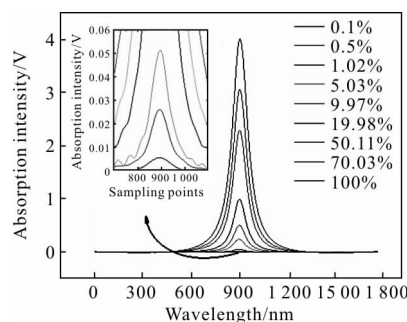


图 7 激光甲烷传感器对甲烷气体全量程 0~100% 浓度测量吸收强度

Fig.7 Measured absorption intensity of full range 0 to 100% using laser methane sensor for methane gas detection

导致了测量值和标准值之间存在的误差增大, 在测量高浓度时 (大于 50%) 出现偏差较大, 测量结果中最小误差为 0.010 03%, 最大为 5.546%, 各浓度相对误差如图 8 所示, 在后续的研究中将进一步考虑

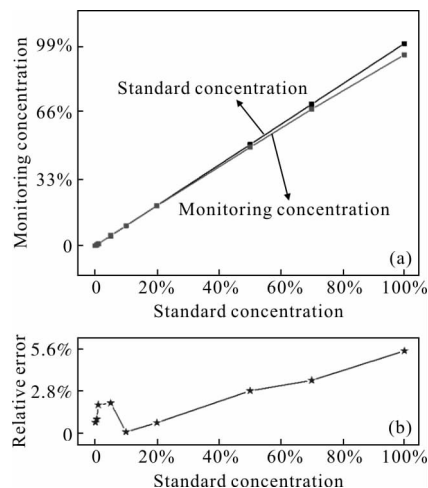


图 8 全量程激光甲烷传感器测量浓度与标准浓度相对误差  
Fig.8 Relative deviation of the standard concentration and measured concentration with full-range laser methane sensor

阶段修正方法的引入,更加有效的实现全量程的准确测量。

为了对比系统性能,采用商用红外甲烷探测器与该系统进行对比试验,商用产品测量范围为 0~5%,其性能为:当监测浓度小于等于 2.5%,精度为 $\pm 0.1\%$ ;当监测浓度大于 2.5%,精度为 $\pm 0.25\%$ 。将商用红外甲烷探测器与全量程激光甲烷传感器放置在密封测试管内进行单独封装,注意保证两种探测器的吸收池在测试管内同一高度,避免因位置高低不同而引入误差。向测试管内冲入 2%标准浓度的甲烷气体,利用小型气泵,调节合适抽取速度帮助甲烷在测试管内的扩散,实时长时间监测商用红外甲烷探测器和全量程激光甲烷传感器对甲烷气体的响应和数据结果。冲入气体后直至测试管内空气完全置换成 2%浓度的甲烷气体,封住测试管的进气孔,出气孔有导管连接大气环境,使其自由扩散,实时记录商用红外甲烷探测器和全量程激光甲烷传感器在长时间内(约 9 h)的浓度测量,如图 9 所示,因出气孔打开,甲烷气体会发生溢出实际浓度会缓慢下降,通过测量发现两者浓度变化趋势一致。

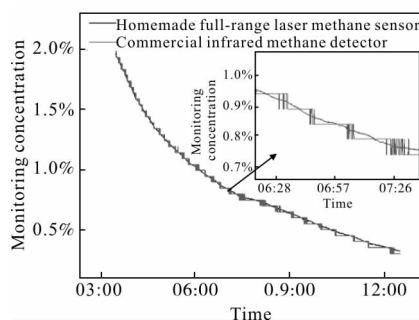


图 9 9 h 内全量程激光甲烷传感器和商用红外甲烷探测器对 2%标准浓度的测量

Fig.9 Measurement of 2% standard concentration used full-range laser methane sensor and commercial infrared methane detector within 9 hours

在上述监测时间内选取一小段时间的数据,对两种探测器进行绝对测量误差和稳定性比较分析,这里选择的是浓度在 2 000 ppm 以下的变化部分,如图 10 所示,商用产品测量精度是整数位,浓度变化成阶梯型,从图中可以看出商用红外甲烷探测器测量浓度值均低于标准浓度,测量值偏小。对于浓度变化小于 500 ppm 无法识别,对 500 ppm 以下甲烷

气体更是很难测出。相较之下,研制的全量程激光甲烷传感器对低浓度测量依然有很好的稳定性,波动范围小,且在标准浓度附近波动,可以长时间稳定准确测量。

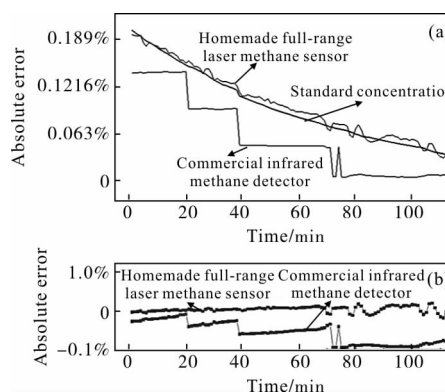


图 10 全量程激光甲烷传感器和商用红外甲烷探测器对 2 000 ppm 以下甲烷气体检测比较

Fig.10 Comparison of full-range laser methane sensor and commercial infrared methane detectors for detection of methane gas below 2 000 ppm

### 3 结 论

利用 TDLAS 检测技术,选择 DFB 激光器输出的 1 653.72 nm 作为甲烷气体直接吸收检测中心波长,设计了 14cm 光程微透镜吸收池,将微型吸收池经特殊工艺防尘防水透气封装以后悬挂在不同的测量地点进行实时监控,且测量探头无源,建立了一套甲烷气体监测系统,适合多种场合监测。通过小波变换对低浓度吸收信号进行降噪处理,使系统的最低测量极限达到 335 ppm,完全实现了 0~100%全量程甲烷气体浓度的实时在线监测,并与商用红外甲烷气体探测器进行了对比实验。结果表明:该系统检测甲烷浓度小于 50%时,相对误差小于 2%;浓度大于等于 50%时,相对误差小于 5%。对低浓度(小于 2%)检测时,测量误差仅为 20 ppm。该检测系统采用直接吸收的检测方法,系统结构简单,大大降低了成本,具有检测稳定性好、实现多点全量程测量、测量探头无源且本征安全等优点,完全可以满足各行业的使用需求。

### 参考文献:

[1] Zi Xuehong. Basic research for methane catalytic combustion

- technology [D]. Beijing: Beijing Industry University, 2012. (in Chinese)
- 瞿学红. 甲烷催化燃烧技术基础研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2012.
- [2] Wan Tingting, Peng Tao, Jing Lixin. Study on the determination of methane and non methane hydrocarbons by gas chromatography[J]. *Environmental Monitoring in China*, 2016, 32(3): 120-125. (in Chinese)
- 万婷婷, 彭涛, 景立新. 气相色谱法检测废气中甲烷、非甲烷总烃的问题研究[J]. 中国环境监测, 2016, 32(3): 120-125.
- [3] Wang Xinghua, Tian Ying, Ren Minhong, et al. Determination of total hydrocarbons and non methane hydrocarbons by improved gas chromatography [J]. *Environmental Protection of Chemical Industry*, 2015, 35(6): 662-666. (in Chinese)
- 王兴华, 田英, 任敏红, 等. 改进气相色谱法测定总烃与非甲烷总烃[J]. 化工环保, 2015, 35(6): 662-666.
- [4] Li Hao, Li En, Liang Zize, et al. Configuration improvement and zero-drift error compensation of light interference methane detector [J]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40(1): 218-225. (in Chinese)
- 林浩, 李恩, 梁自泽, 等. 光干涉甲烷检测器的光路改进与零点补偿[J]. 煤炭学报, 2015, 40(1): 218-225.
- [5] Li Bin, Liu Huifang, He Qixin, et al. A methane detection system using distributed feedback laser at 1 654 nm [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 20-26. (in Chinese)
- 李彬, 刘慧芳, 何启欣, 等. 基于 1 654 nm 分布反馈激光器的甲烷检测系统 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 20-26.
- [6] Li Yaping, Zhang Guangjun, Li Qingbo. Infrared CO<sub>2</sub> gas sensor based on space double beams and its measurement model[J]. *Opt Precision Eng*, 2009, 17(1): 14-19. (in Chinese)
- 李亚萍, 张广军, 李庆波. 空间双光路红外 CO<sub>2</sub> 气体传感器及其测量模型[J]. 光学精密工程, 2009, 17(1): 14-19.
- [7] Bu Tingting, Wang Xianhua, Ye Hanhan, et al. Errors analysis and correction in atmospheric methane retrieval based on greenhouse gases observing satellite data [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2016, 36(1): 186-190. (in Chinese)
- 卜婷婷, 王先华, 叶函函, 等. 基于 GOSAT 卫星数据的大气甲烷反演误差分析及校正 [J]. 光谱学与光谱分析, 2016, 36(1): 186-190.
- [8] Dong Fengzhong, Liu Wenqing, Liu Jianguo, et al. Online roadside vehicle emissions monitoring(Part 1)[J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2005, 19(2): 119-127.
- 董凤忠, 刘文清, 刘建国, 等. 机动车尾气的道边在线实时监测(上)[J]. 测试技术学报, 2005, 19(2): 119-127.
- [9] Xu Rongrong, Liu Deming, Cao Feng, et al. Design of multipoint optical fiber methane sensing system [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2010, 39(4): 686-689. (in Chinese)
- 许荣荣, 刘德明, 曹锋, 等. 光纤瓦斯多点传感系统的设计 [J]. 红外与激光工程, 2010, 39(4): 686-689.
- [10] Li F, Yu X L, Cai W W, et al. Uncertainty in velocity measurement based on diode-laser absorption in nonuniform flows[J]. *Applied Optics*, 2012, 51(20): 4788-4797.
- [11] Li Guohua, Hu Zhiyun, Wang Sheng, et al. 2D scanning CARS for temperature distribution measurement [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2016, 24(1): 14-19. (in Chinese)
- 李国华, 胡志云, 王晟, 等. 基于相干反斯托克斯拉曼散射的二维温度场扫描测量 [J]. 光学精密工程, 2016, 24(1): 14-19.
- [12] Guo Tiantai, Hong Bo, Pan Zengrong, et al. Application of improved SVM in quantitative analysis of mine gas concentration [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2016, 45(6): 0617011. (in Chinese)
- 郭天太, 洪博, 潘增荣, 等. 改进的 SVM 在矿井气体定量分析中的应用[J]. 红外与激光工程, 2016, 45(6): 0617011.
- [13] Gao Minghui, Zheng Yuquan, Wang Zhihong. Validation method of single-channel optical system design of CO<sub>2</sub> detector[J]. *Chinese Optics*, 2014, 6(6): 949-955. (in Chinese)
- 高明辉, 郑玉权, 王志宏. CO<sub>2</sub> 探测仪单通道光学系统设计验证方法[J]. 中国光学, 2014, 6(6): 949-955.
- [14] Rothman L S, Gordon I E, Barbe A, et al. The HITRAN 2008 molecular spectroscopic database [J]. *Journal of Quantitative Spectroscopy & Radiative Transfer*, 2009, 110: 533-572.
- [15] Wang Hongtao, Huang Yunbiao, Huang Hong. Design of digital filter in laser gas analyzer [J]. *Chinese Optics*, 2013, 6(5): 729-735. (in Chinese)
- 王洪涛, 黄云彪, 黄鸿. 激光气体分析仪中数字滤波器的设计[J]. 中国光学, 2013, 6(5): 729-735.