

文章编号: 0258-7025(2010)12-3070-05

# 光纤甲烷温度双参数检测系统的研究

赵燕杰<sup>1,2</sup> 常 军<sup>2</sup> 王 昌<sup>1</sup> 刘统玉<sup>1</sup> 魏玉宾<sup>1</sup> 李艳芳<sup>1</sup> 尚 盈<sup>1</sup> 王 黔<sup>1</sup>

(<sup>1</sup> 山东省科学院激光研究所山东省光纤传感技术重点实验室, 山东 济南 250014)

<sup>2</sup> 山东大学信息科学与工程学院, 山东 济南 250100

**摘要** 温度影响可调谐半导体激光器吸收光谱(TDLAS)式气体监测的准确性,研究了一种甲烷、温度同时检测的系统,两种参数互相校正,提高了气体监测的准确性,同时也提高了温度的检测精度。系统采用 1653.7 nm 中心波长的分布反馈(DFB)半导体激光器,采用锯齿波调制激光器使其波长扫描,同时扫描出光纤布拉格光栅(FBG)波长以及气体吸收强度,从而可以测出温度和甲烷两个检测量。温度检测可以校正由于温度变化引起的气体检测误差,同时,气体吸收线位置又可以为 FBG 进行准确的波长定位,使得温度检测精度更高。这种温度、甲烷双参数检测系统更加稳定可靠,更适合应用于煤矿开采和瓦斯抽采等领域。

**关键词** 光纤传感器; 瓦斯检测; 温度监测; 双参数检测; 光纤光栅

中图分类号 O433.1; TP212.9 文献标识码 A doi: 10.3788/CJL20103712.3070

## Research of Fiber Couple Parameters Monitoring System of Methane and Temperature

Zhao Yanjie<sup>1,2</sup> Chang Jun<sup>2</sup> Wang Chang<sup>1</sup> Liu Tongyu<sup>1</sup> Wei Yubin<sup>1</sup>  
Li Yanfang<sup>1</sup> Shang Ying<sup>1</sup> Wang Qian<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Key Laboratory of Optical Fiber Sensing Technology of Shandong Province,  
Laser Institute of Shandong Academy of Sciences, Jinan, Shandong 250014, China

<sup>2</sup> School of Information Science and Engineering, Shandong University, Jinan, Shandong 250100, China

**Abstract** Temperature can affect the accuracy of tunable diode laser absorption spectroscopy (TDLAS) system. A system that can monitor temperature and methane in the same time is introduced. Two parameters are regulated by each other in order to increase accuracy not only in gas monitoring but also in temperature monitoring. The system uses 1653.7 nm as center wavelength of distributed feedback (DFB) laser, by taking the sawtooth signal to modulate the light frequency of the DFB laser. The scanning can obtain wavelength of fiber Bragg grating (FBG) and methane absorbing strength simultaneously. By wavelength scanning, the system can calculate temperature value and methane concentration. Temperature monitoring can regulate the deviation of methane detection caused by temperature changing, meanwhile, methane's absorption line can locate the wavelength of FBG in order to make temperature monitoring more accurate. This temperature and methane monitoring system is more stable and reliable. It possesses wide applications in coal mine and methane extraction.

**Key words** optic fiber sensor; methane monitor; temperature monitoring; couple parameters monitoring; fiber grating

## 1 引 言

要保证瓦斯发电的安全,减少爆炸等事故的发生,就必须对煤层气瓦斯浓度和温度进行实时快速

检测。目前对煤矿瓦斯的检测技术大多都是传统的电子式传感器或者红外检测技术,由于用于发电的煤层气具有高粉尘、高湿度、浓度和温度变化波动较

收稿日期: 2010-03-22; 收到修改稿日期: 2010-04-27

基金项目: 国家科技支撑计划项目(2009BAK54B01)、山东省科技发展计划项目(2007GG20006007)和山东省重大专项(2006ZZ13)资助课题。

作者简介: 赵燕杰(1981—),女,硕士,助理研究员,主要从事光纤传感器、气体检测等方面的研究。

E-mail: yjzhao1001@163.com

大等特点,使得传统的检测技术应用十分困难。例如:传统电子检测装置在高湿度环境下往往无法工作,并且电子检测仪带电工作更增加了危险性;传统的接触燃烧式和红外甲烷传感器易受其他气体干扰,干涉法易受气体湿度和压强影响,而电化学法甲烷传感器 1 周左右就需要校准,且寿命只有 1~2 年<sup>[1~4]</sup>。随着光纤传感技术的发展,采用近红外激光光谱技术测量气体浓度的方法越来越受到学者们的关注<sup>[3~9]</sup>。在实际应用中,瓦斯发电系统中管道输送的气体温度变化较大,而大多数气体检测手段均是在室温条件下对系统进行标定,没有考虑温度对浓度检测结果的影响,这样势必会给浓度检测带来一定的误差,因此在瓦斯发电过程中不仅要同时对瓦斯浓度信息进行实时监控,同时还要对气体温度信息进行检测,从而对测量得到的浓度值进行修正。本文根据甲烷光谱吸收和光纤光栅特性,设计了一种基于光纤传感技术的甲烷温度双参数检测系统<sup>[10,11]</sup>。该系统不带电,无需校正,长期稳定可靠,不仅可以同时检测气体浓度和环境温度,同时也可以实时校正因气体温度发生变化给浓度检测带来的误差。

## 2 系统原理

### 2.1 光纤光栅温度检测原理

利用光纤布拉格光栅(FBG)检测气体环境温度,同时利用该温度值对检测到的气体浓度进行修正。不受外界应力作用的情况下,FBG 的中心波长  $\lambda_B$  满足

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (1)$$

式中  $n_{\text{eff}}$  为纤芯的有效折射率,  $\Lambda$  为光栅条纹周期。当 FBG 所处的环境温度发生改变时,由于光纤材料的热光效应和热胀冷缩的作用,光栅的折射率和周期将发生变化,因此,布拉格波长也会发生漂移。由(1)式对温度求导,得

$$\frac{d\lambda_B}{dT} = 2\left(n_{\text{eff}} \frac{d\Lambda}{dT} + \Lambda \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}\right) = (\alpha + \zeta)\lambda_B, \quad (2)$$

式中  $\alpha = \frac{1}{\Lambda} \frac{d\Lambda}{dT}$ ,  $\zeta = \frac{1}{n_{\text{eff}}} \frac{dn_{\text{eff}}}{dT}$ 。

由(2)式得:  $\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (\alpha + \zeta)\Delta T = K_T\Delta T$ , 式中

$K_T$  为温度灵敏度。可见,通过检测光栅的波长变化即可得到温度的改变量  $\Delta T$ 。

### 2.2 气体检测原理

根据 Beer-Lambert 吸收定律,一束光强为  $I_0(\lambda)$

的激光穿越气体介质后的光强变化为

$$I_\lambda = I_0(\lambda)\exp[-S(T, \lambda_0)g(\lambda - \lambda_0)Lc], \quad (3)$$

式中  $g(\lambda - \lambda_0)$  为吸收线在波长为  $\lambda$  处的吸收线函数,表示被测吸收谱线的形状,  $S(T, \lambda_0)$  为气体分子温度为  $T$  时在吸收峰  $\lambda_0$  处的吸收线强度,表征该谱线对于光强度吸收的强弱,是分子能级跃迁时吸收与辐射的综合效果,  $L$  为激光在气体中传输的距离。

由(3)式可得,气体浓度为

$$c = \frac{1}{[S(T, \lambda_0)g(\lambda - \lambda_0)L]} \ln\left[\frac{I_0(\lambda)}{I_\lambda}\right]. \quad (4)$$

对于特定的分子吸收谱线,其线强度只与温度有关,在气体压强一定的情况下,线型函数也只与温度有关。可见,当温度变化时,谱线强度和线型函数都将发生变化,从而监测到的气体浓度将会发生改变。气体的吸收谱线线型主要取决于线型加宽原因中的多普勒加宽和分子的碰撞加宽。采用 Voigt 线型函数对测量得到的光谱吸收信号进行分析。

选取一参考温度点  $T_0$ , 计算其线强  $S(T_0)$ , 则温度为  $T$  时的线强可以由公式

$$S(T) = S(T_0)\left(\frac{T_0}{T}\right)^m \exp\left[-1.439E\left(\frac{1}{T} - \frac{1}{T_0}\right)\right] \quad (5)$$

进行修正。式中  $E$  为跃迁的低态能量,  $m$  为与吸收有关的参数,对甲烷分子,  $m=1.5$ ,  $S(T_0)$  和  $E$  均可从谱线汇编资料 HITRAN 数据库中得到。

## 3 系统设计

### 3.1 光纤甲烷温度传感器

图 1 为光纤瓦斯温度传感器结构示意图。气体腔为一对光纤准直器,用来测量气体浓度。在接收端光纤准直器和出射光纤之间的光路上串联一个 FBG,用来测量温度。在 FBG 不受外力作用下使其两端固定,中间处于自由状态,不受外部金属等器件的拉力,从而将应力变化的影响消除,FBG 中心波长位置选择在气体吸收峰附近分布反馈(DFB)激光器能够扫描到的范围内,从而实现温度与气体浓度的同步检测,温度信息能够实时校正因不同温度下

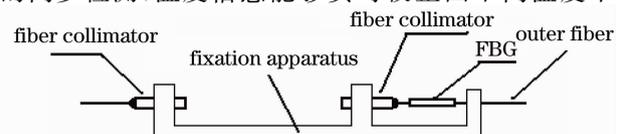


图 1 光纤瓦斯温度传感器结构示意图

Fig. 1 Structure profile of fiber couple parameters sensor of methane and temperature

气体吸收系数不同导致的测量误差。同时气体吸收峰的位置可以准确定位对光栅波长的扫描。

### 3.2 光源的选择

半导体激光器具有优良选频特性和稳定特性,谱线窄。其光谱宽度  $\Delta\lambda < 1 \text{ nm}$ , 输出功率大于  $1 \text{ mW}$ 。选取甲烷的  $2\nu_3$  带的 R(3) 线, 即波长为  $1653.7 \text{ nm}$  附近的 3 条吸收线, 根据 HITRAN 数据库可知, 它们分布在小于  $0.01 \text{ nm}$  范围内, 因此可以看作一条线强为 3 条吸收线之和的吸收线, 其总线强  $S$  为  $5.274 \times 10^{-21} \text{ cm} \cdot \text{mol}^{-1}$ , 在该吸收线左右  $0.5 \text{ nm}$  范围内没有气体的强吸收线, 因此可以有效避免其他气体的干扰, 并且可以实现气体较低的检测下限。光源中心波长对准甲烷吸收峰  $1653.7 \text{ nm}$ , 当光源的中心波长精确对准甲烷气体的吸收峰时, 通过甲烷气体的光就会被吸收, 其吸收强度与该气体浓度有关, 通过对输出光强分析就可以检测到气体的浓度。光栅的中心波长位于激光器扫描范围内并且不与气体吸收线重合的位置。

### 3.3 系统设计

基于光谱吸收的光纤甲烷温度监测系统的框图如图 2 所示。参考气室可以对激光波长漂移进行自适应调整, 实现甲烷吸收线的锁定。由单片机(核心处理芯片为 C8051F410)产生的锯齿波信号加在激光器的驱动电流上, 对激光器的输出波长进行扫描。激光器发出的光经过分路器后分成两束, 分别由光纤传输至有一定浓度甲烷气体的参考气室和光纤传感器中, 将光信号从光纤耦合到气体腔中, 被气体吸收后的光信号再由准直器耦合到光纤中, 经过气体吸收后的光信号再进入 FBG, 由此得到温度的信息。经过参考气室和传感器的参考光和信号光分别被传输至光电探测器(PIN), 将光信号转换成电信号, 经前置放大和滤波后的电信号进行 A/D 转换, 将模拟信号转换为数字信号, 转换后的检测信号由单片机进行数值处理即可得到被测气体的浓度和温度信息。

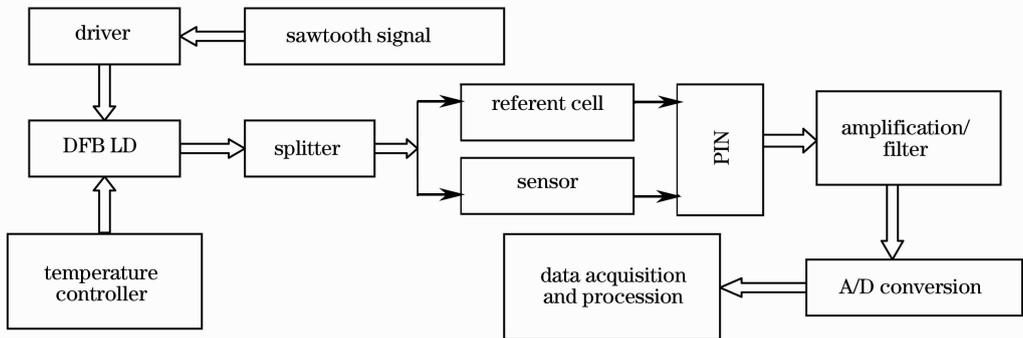


图 2 系统框图

Fig. 2 System construction

## 4 实验结果

将光纤甲烷温度传感器置于温度控制箱中, 温度控制箱和传感器间导热性良好, 可以保证被测气体的温度与设定温度一致。

### 4.1 气体温度测量结果

首先对传感器进行温度标定。由温度控制箱设定不同的温度点, 得到在不同温度下的 FBG 波长, 利用最小二乘法将波长和温度进行拟合, 得到拟合公式。温度变化时, 光栅波长将发生变化, 通过该拟合公式即可反演待测温度。标定后的测试结果如图 3 所示。可见, 测量值与标准温度值吻合得很好, 本系统具有非常好的线性度。

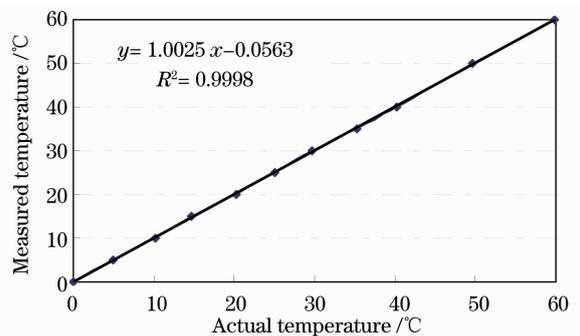


图 3 温度测量值与真实值的对比

Fig. 3 Comparison of the temperature between measured value and actual value

在此系统中,温度的精确值是通过 FBG 中心波长反演得到的,因此系统检测温度时决定其检测精度的关键部分是对光栅中心波长的解调。但通过 DFB 激光波长扫描法获得的光栅中心波长值并不是一个绝对值,而是相对扫描激光起始波长的相对值,环境温度、温度控制以及器件的老化等都会对激光器的电流-波长特性造成影响,这就会造成解调出的光栅波长值发生偏移。气体吸收峰的波长值是气体本身的固有属性,外界环境的变化对其影响非常

小,所以可以认为气体吸收峰的波长为绝对波长值,本系统中引入这个绝对波长值来作为 FBG 的校正参考,修正了激光器本身引入的检测偏移问题,从而提高了温度检测的精度和稳定性。

表 1 为温度检测校正前后的误差对比。从表 1 可以看到,采用气体吸收峰的波长作为基准波长对温度进行校正后的测量精度明显高于对其校正前的精度。

表 1 温度修正表

Table 1 Revisal of temperature

Actual temperature/ ℃	Temperature measured before revisal /℃	Temperature measured after revisal /℃	Measurement error before revisal /℃	Measurement error after revisal /℃
8	8.10	8.10	0.1(1.25%)	0.1(1.25%)
25	25.30	25.00	0.3 (1.2%)	0(0%)
31	31.20	31.05	0.2 (0.65%)	0.05 (0.16%)
40	40.40	40.10	0.4 (1%)	0.1 (0.25%)

### 4.2 气体浓度测量结果

实验中,首先设定温度为 25 ℃,对传感器用几种不同浓度的标准甲烷气体进行定标,并把标定参数写入仪器中。然后对其通入不同浓度的甲烷气体进行测试,待浓度显示值稳定后开始记录数据,测试结果如图 4 所示。可见,浓度测量显示值与标准气体浓度值吻合得很好,系统具有非常好的线性度,因此保证了现场测试数据的准确性。

低,根据 FBG 中心波长的变化量可得到气体温度值,进而根据测量温度对浓度测量值进行修正,修正后测量精确度明显提高。

### 4.3 浓度修正前后的对比结果

由于气体的吸收系数随温度线性改变,当温度变化时,气体浓度的测试结果将出现偏差,根据实测的温度值,可以对气体浓度的测量结果进行修正。如表 2 所示,分别设定温度为 5 ℃,10 ℃,15 ℃,25 ℃,35 ℃,40 ℃,通入体积分数为 50.1% 的标准气体,可见,随着温度升高,气体浓度测量值随之降

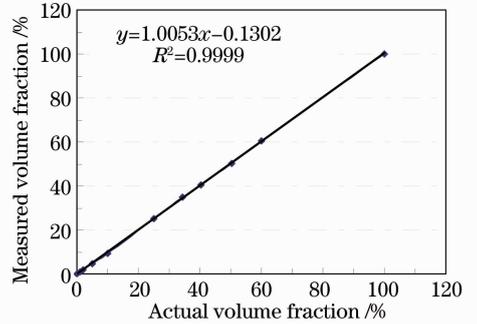


图 4 气体体积分数测量值与真实值的对比  
Fig. 4 Comparison of the concentration between measured value and actual value

表 2 浓度修正表

Table 2 Revisal of concentration

Volume fraction of calibration gas/ %	Set temperature/ ℃	Measured temperature/ ℃	Center wavelength of FBG /nm	Center wavelength of gas absorption /nm	Measured volume fraction before revisal/ %	Measured volume fraction after revisal/ %
50.1	5	4.9	1652.86	1653.72	54.90	50.54
50.1	10	10.2	1652.89	1653.72	53.61	49.89
50.1	15	14.7	1652.95	1653.72	52.52	49.40
50.1	25	25.1	1653.05	1653.72	50.03	50.03
50.1	35	35.3	1653.13	1653.72	47.51	50.59
50.1	40	40.2	1653.18	1653.72	46.32	49.85

## 5 结 论

设计了一种基于光纤传感技术的甲烷温度双参数远程实时在线监测系统,该系统以1653.7 nm波长半导体激光器为光源,采用锯齿波信号实现了气体激光吸收光谱和FBG的波长调制。利用内置参考气室对激光波长漂移进行自适应调整,可以实现甲烷吸收线的锁定。从而实现温度与气体浓度的实时同步精确检测,温度信息能够实时校正不同温度下气体吸收系数变化导致的测量误差,同时气体吸收峰的位置可以准确定位对光栅波长的扫描。该系统不带电,无需校正,长期稳定可靠,不仅可以检测环境温度,同时也可以实时校正因气体温度发生变化给浓度检测带来的误差,在煤矿井下和瓦斯抽采领域均有一定的应用前景。

### 参 考 文 献

- Zheng Longjiang, Li Peng, Qin Ruifeng *et al.*. Research situation and developing tendency for optical measurement technology of gas density[J]. *Laser & Optoelectronics Progress*, 2008, **45**(8): 24~32  
郑龙江, 李 鹏, 秦润峰等. 气体浓度检测光学技术的研究现状和发展趋势[J]. *激光与光电子学进展*, 2008, **45**(8): 24~32
- Liu Zhicun. Variable current detection of mine methane using catalytic sensor[J]. *J. Transducer Technology*, 2003, **22**(11): 24~26  
刘志存. 催化元件变流检测矿井瓦斯[J]. *传感器技术*, 2003, **22**(11): 24~26
- Wang Wencui, Luan Meisheng, Yu Tongyan. Instrumentation for methane concentration detecting based on NDIR and the analysis of disturbances[J]. *Infrared Technology*, 2009, **31**(8): 458~460  
王文萃, 栾美生, 于彤彦. 红外甲烷气体监测仪的设计及干扰分析[J]. *红外技术*, 2009, **31**(8): 458~460
- Zhao Jianhua, Zhao Chongwen, Wei Zhoujun *et al.*. Study on monitoring multi-component toxic gases based on near-infrared spectroscopic method[J]. *Acta Optica Sinica*, 2010, **30**(2): 567~573  
赵建华, 赵崇文, 魏周君等. 基于近红外光谱技术的多组分毒性气体检测研究[J]. *光学学报*, 2010, **30**(2): 567~573
- Xia Hui, Liu Wenqing, Zhang Yujun *et al.*. On-line monitoring and analysis of long open-path methane based on laser absorption spectroscopy[J]. *Acta Optica Sinica*, 2009, **29**(6): 1454~1458  
夏 慧, 刘文清, 张玉钧等. 基于激光吸收光谱开放式光程的空气中甲烷在线监测及分析[J]. *光学学报*, 2009, **29**(6): 1454~1458
- J. Ni, J. Chang, T. Liu *et al.*. A low cost multiplexed 1.331  $\mu\text{m}$  spectroscopic remote methane sensor system[C]. *SPIE*, 2007, **6595**: 65952Z
- Shuai Zhang, Wenqing Liu, Yujun Zhang *et al.*. Gas leakage monitoring with scanned-wavelength direct absorption spectroscopy[J]. *Chin. Opt. Lett.*, 2010, **8**(5): 443~446
- Ni Jiasheng, Chang Jun, Liu Tongyu *et al.*. Spontaneous combustion prediction in coal mine goaf based on fiber sensing of gas[J]. *J. Applied Optics*, 2009, **30**(6): 996~1002  
倪家升, 常 军, 刘统玉等. 基于光纤气体检测技术的煤矿自然发火预测预报系统[J]. *应用光学*, 2009, **30**(6): 996~1002
- Wang Jian, Huang Wei, Gu Haitao *et al.*. Gas temperature measurement based on TDLAS[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2006, **17**(10): 1233~1237  
王 健, 黄 伟, 顾海涛等. 基于TDLAS的气体温度测量[J]. *光电子·激光*, 2006, **17**(10): 1233~1237
- Y. Wei, Y. Li, Y. Zhao *et al.*. Fiber optic methane monitor based TDLAS and its application in VAM oxidiser system[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75034N
- T. Liu, Y. Wei, Y. Zhao *et al.*. Hazard monitoring in mines using fibre optic sensors[C]. *SPIE*, 2009, **7503**: 75030H