

# 基于光纤光栅滤波的新型光纤瓦斯传感系统

王书涛

(燕山大学河北省测试计量技术及仪器重点实验室, 河北 秦皇岛 066004)

**摘要** 根据比尔-朗伯定律,设计了一种用于检测瓦斯气体浓度的新型光纤瓦斯传感系统。该系统利用光纤布拉格光栅优良的窄带滤波特性来产生差分吸收测量所需的窄谱光信号,具有光路全光纤化、结构简单的特点。采用非球面光纤准直器构成光纤瓦斯传感探头,提高了探头的光学稳定性,进一步提高了测量灵敏度和测量稳定性。实验数据及结果表明,系统具有良好的稳定性,其测量灵敏度可达 0.01% 的体积分数,测量范围大于 5% 的体积分数。

**关键词** 光纤光栅;窄带滤波;瓦斯传感;非球面光纤准直器

**中图分类号** TP744.11 **文献标识码** A **doi**: 10.3788/AOS200828s2.0353

## Novel Optical Fiber Gas Sensing System Based on Fiber Bragg Grating Filtering

Wang Shutao

(Measuring Technology & Instruments Key Lab of Hebei Province, Yanshan University,  
Qinhuangdao, Hebei 066004, China)

**Abstract** Based on law of Beer-Lambert, a novel optical fiber gas sensing system is designed to determine the concentration of gas. The narrow-band filtering characteristic of optical fiber Bragg grating is used by this system to produce the narrow spectrum light signal which is wanted in difference absorption measuring. This system has characteristics such as full optical fiber light way and simple structure. The aspheric objective optical fiber collimator is adopted by this system to compose optical fiber gas sensing detector, which enhances the optic stability of the detector. The measuring sensitivity and stability are also further enhanced. Experimental data and results show that there is a high measuring sensitivity at 0.01%, and the measuring range goes beyond 5%.

**Key words** optical fiber grating; narrow-band filtering; gas sensing; aspheric objective optical fiber collimator

### 1 引 言

长期以来我国载体催化元件一直存在使用寿命短、工作稳定性差和零点漂移严重、调校期频繁的缺点,严重制约着矿井瓦斯的正常检测,而目前国产安全检测用瓦斯传感器几乎全部采用载体催化元件<sup>[1~4]</sup>。为了确保矿工的生命安全,在最大可能性上减少安全事故的发生,并且杜绝群死群伤的重大事故,亟需研制一套准确、快速、可靠的瓦斯监测监控系统来实时监测、预警矿井和坑道中的瓦斯含量<sup>[5,6]</sup>。

为有效地解决目前瓦斯传感器和监控系统存在的诸多问题<sup>[7]</sup>,本文研究了新型瓦斯检测系统及其传感器,以非球面光纤准直器构成光纤探头,具有较高的测量精度和灵敏度。

### 2 测试原理

根据气体的吸收特性可知,当光波通过介质时光有一部分被吸收,部分被散射(主要是瑞利散射和米氏散射),余下的光直接传播。由比尔定理可知,透射过气体的光强  $I$  满足关系为

$$I = KI_0 \exp[-(\alpha c l + \beta l + \gamma l + \delta)] \quad (1)$$

式中  $I_0$  为入射光强,  $K$  为光纤传感系统光功率传输效率,  $\alpha$  为一定波长下的单位浓度,单位长度介质的吸收系数,  $\beta$  为瑞利散射系数,  $\gamma$  为米氏散射系数,  $\delta$  为气体密度波动造成的吸收系数,  $l$  为待测气体与光作用的长度,  $c$  为待测气体的浓度。

由(1)式可知:当两个不同吸收系数的单色光同时通过气体时,由于选择的两种单色光波长较接近,

通过气体时的散射基本相同,所以气体的浓度可表示为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \frac{K(\lambda_1)I_0(\lambda_1)I(\lambda_2)}{K(\lambda_2)I_0(\lambda_2)I(\lambda_1)}, \quad (2)$$

当调节光学系统使得  $K(\lambda_1)I_0(\lambda_1) = K(\lambda_2)I_0(\lambda_2)$ , (2)式简化为

$$c = \frac{1}{[\alpha(\lambda_1) - \alpha(\lambda_2)]l} \ln \frac{I(\lambda_2)}{I(\lambda_1)} \quad (3)$$

(3)式为光纤气体浓度传感数学模型。选择两个适当波长的光,确定两个光的气体吸收系数  $\alpha(\lambda_1)$  和  $\alpha(\lambda_2)$ ,通过测量两个波长的光经过长为  $l$  的气室后的光强比值可得到气体的浓度。

瓦斯对光的吸收谱线如图 1 所示,在 1331.5 nm 附近瓦斯谱线有一较强的吸收峰,峰值的吸收为 5.72 dBm,短波方向还有一系列较弱的吸收峰。而在 1318.26~1320.18 nm 之间瓦斯对光几乎不吸收,因此选用 1319.145 nm 和 1331.500 nm 两个波长用于瓦斯测量。

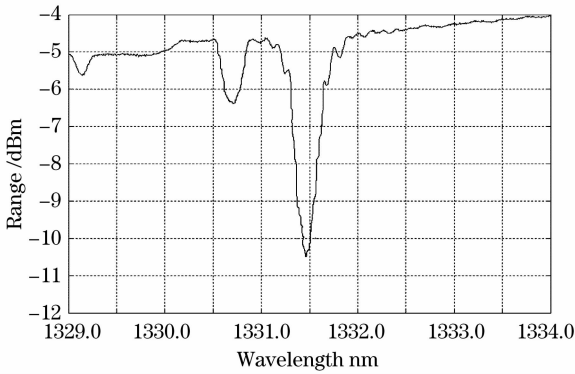


图 1 瓦斯在 1300 nm 波段的吸收谱

Fig. 1 Absorption spectrum of gas in the waveband of 1300 nm

### 3 测试系统设计

瓦斯气体浓度测试系统如图 2 所示。系统为全

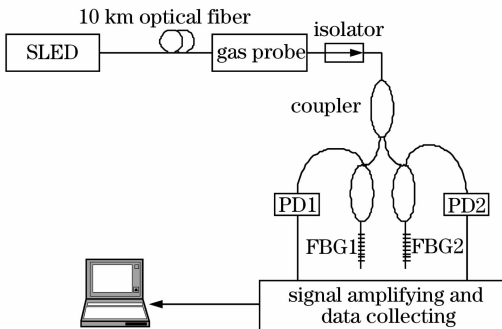


图 2 瓦斯气体浓度测试系统

Fig. 2 Testing system of gas concentration

光纤结构,主要由超辐射光源(SLED)、10 km 光纤、光纤瓦斯探头、光纤隔离器、光纤耦合器网络、检测光纤布拉格光栅(FBG)1,2、光电探测器(PD)1,2 和数据处理单元构成。

系统选用输出功率为 1 mW,中心波长为 1320 nm 的 SLED 作为系统光源。该光源具有较好的长期稳定性,能够满足测量瓦斯气体的实际需要。系统同时选用中心波长为 1310 nm 的偏振无关光隔离器和 1×2 光纤耦合器,以达到对光源发出的光进行分光和耦合的作用。

两个光栅 FBG1 和 FBG2 的中心波长分别为 1331.145 nm 和 1319.203 nm。典型光谱输出分别见图 3 和图 4。

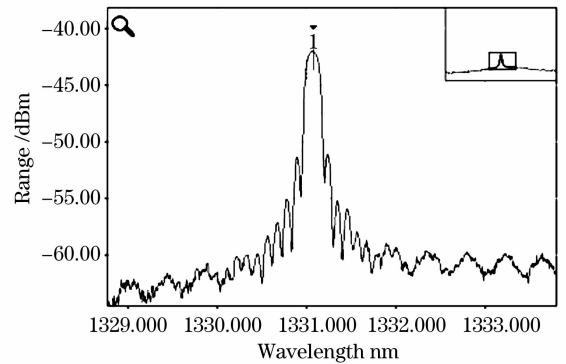


图 3 FBG1 典型反射谱

Fig. 3 Typical reflection spectrum of FBG1

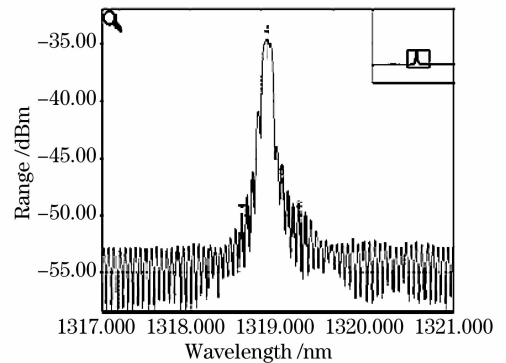


图 4 FBG2 典型反射谱

Fig. 4 Typical reflection spectrum of FBG2

光纤瓦斯探头主要由气室和光纤准直器构成,其基本结构如图 5 所示。

光纤瓦斯探头的主要部件是光纤准直器,它是光纤通信系统的最基本光学器件,其作用是把光纤中发散的光束变成准直光,使其以非常小的损耗耦合到光纤中。

常规的准直器结构为两件套式,即由光纤头和一个起准直作用的透镜组成,目前准直透镜主要有两种:

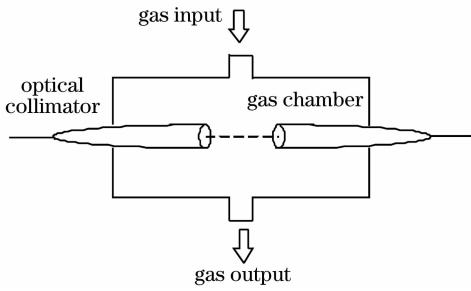


图 5 光纤瓦斯探头

Fig. 5 Optical fiber gas probe

自聚焦透镜(GRIN 透镜)和 C 透镜(非球面透镜)。

常规 0.23 p 的自聚焦透镜准直器,其最大工作距离仅 70 mm 左右,理论上可将节长缩短来增加工作距离,如将节长缩短为 0.05 p,其最大工作距离也仅约 400 mm,且此时透镜太短难以加工,插损等指标也较差。所以采用 C 透镜光纤准直器。常规 C 透镜准直器的最大工作距离约 300 mm 左右,如果要达到大工作距离、大光斑的要求,如工作距离 500 mm、光斑 0.5 mm,理论上一个长度约 9.7 mm、曲率半径约 4.2 mm 的 C 透镜可以满足此要求。而且 C 透镜作为非球面元件可消除单色像差(例如球差),并且提高聚焦、准直的精度,因此减少了后表面反射数量,达到更高的透过率。

SLED 发出的宽谱光,经过 10 km 传输光纤,损耗约 4 dBm,进入到光纤瓦斯探头,探头输出的光谱如图 6 所示。由于探头设计采用光纤准直系统,能量损失约 20 dBm,但在波长 1331.500 nm 处峰值吸收基本不变。

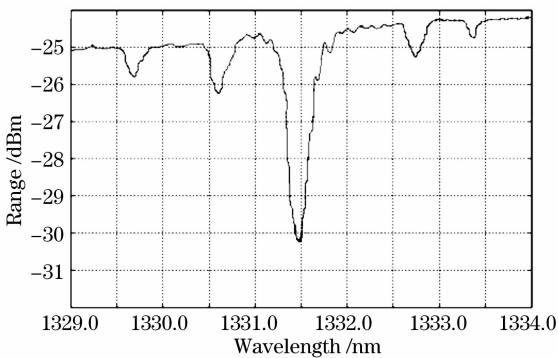


图 6 光纤瓦斯探头输出谱

Fig. 6 Output spectrum of optical fiber gas probe

探头输出的光经过隔离器和耦合器后分别输入到两个光纤光栅,光纤光栅的带宽很窄,约为 0.2 nm,主要用于瓦斯吸收光谱的波长选择。光纤光栅的中心波长满足关系式

$$\lambda_B = 2n\Lambda \tag{4}$$

式中,  $n$  为折射率,  $\Lambda$  为光纤光栅的栅距。当给光纤光栅施加轴向应力时,光纤光栅的栅距和折射率发生变化,导致光栅的反射谱发生移动,波长移动量  $\Delta\lambda_B$  与轴向应变  $\epsilon_z$  的关系为

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B k \epsilon_z \tag{5}$$

因此可以通过施加在光纤光栅轴向的应变来控制光栅的输出波长。系统中 FBG1 的反射波长为 1331.145 nm,用于寻找瓦斯吸收光谱的吸收峰值 1331.500 nm;FBG2 的反射波长为 1319.203 nm,用于参考光的选择。由于光纤光栅易受到温度干扰,所以两个光纤光栅一般要采取温度补偿措施。通常利用铝和硅两种不同热膨胀系数的材料进行补偿,补偿后的光栅温度灵敏度为 0.07 nm/100 °C,但这种温度补偿结构较复杂。本文设计的光纤光栅温度补偿结构如图 7 所示。由两个铜片和两个 T 型有机玻璃胶接在一起构成,铜片长度  $L_1 = 32.2$  mm,有机玻璃长度  $L_2 = 13.4$  mm,光纤光栅粘贴在正中央,有机玻璃两顶端距离为  $L_3 = 18.8$  mm。在室温下将光纤光栅以一定的预应力用环氧胶固定在两个 T 型有机玻璃的顶端,当外界温度减小时,由于有机玻璃的膨胀系数大于铜片的,因此将减小光栅的收缩,达到温度补偿的目的。经过实验验证,该系统的温度补偿达到了 0.028 nm/100 °C,是未补偿光纤光栅的 23 倍,而且系统的结构简单,造价低,温度稳定性好。

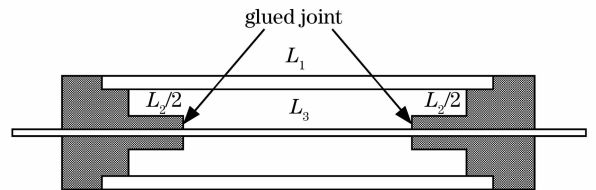


图 7 光纤光栅温度补偿结构

Fig. 7 Temperature compensation structure of optical fiber grating

光纤光栅的波长选择结构把光纤光栅粘贴在压电陶瓷(PZT 上),通过给 PZT 施加不同的电压,改变 PZT 的伸缩量,实现光栅反射谱的波长选择,波长选择的灵敏度为 0.03 nm/V。

两个光栅的反射光分别输入到光电探测器,由于 FBG2 反射光为系统参考光,所以 PD2 的输出基本无变化;而 FBG1 反射光用以反映瓦斯的吸收峰,当 FBG1 的中心波长与瓦斯吸收峰值波长完全相同时,PD1 接收到光强最小,输出也相应为最小,所以可通过控制 PZT 的电压来控制 FBG1 输出波长,进而提高系统的测量准确度。光信号经 PD1 和 PD2

转换输出电信号,由数据采集卡进行采集,最后由计算机处理。

传统光学反射镜构成的光纤瓦斯探头虽然具有气体吸收长度长的优点,但是插入损耗大,而且装校复杂,光学稳定性较差,难于实现小型化,成本高。基于渐变折射率透镜的光纤准直器型瓦斯探头具有结构简单、光学性能稳定、小型化的优点,而且成本低,但存在较大的回波,制约了测量灵敏度和测量稳定性的提高。

本系统采用非球面光纤准直器构成光纤瓦斯传感探头,如图 8 所示。该探头既提高了探头的光学稳定性,减小了探头的插入损耗,实现了探头的小型化,又降低了探头成本,提高了探头寿命,同时与基于渐变折射率透镜的光学准直器技术相比,探头的回波大大减小,进一步提高了测量灵敏度和测量稳定性。

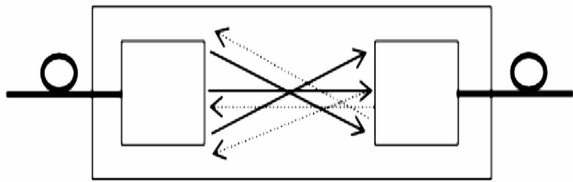


图 8 基于非球面光纤准直器的光纤瓦斯探头

Fig. 8 Optical fiber gas probe based on aspheric objective optical fiber collimator

## 4 实验结果

首先在没有瓦斯气体时调节光路使两束光的光强基本相等,然后往探头中输入不同比例的氮气和瓦斯的混合气体。混和气体按照瓦斯的体积分数从 0% 开始,瓦斯体积分数每增加 1% 测试一次,每次测试时间为 100 s,一直增加到 6% 测试完毕。数据采集频率为 40 kHz,用同步累计平均的方法进行数据处理。测试结果如图 9 所示。

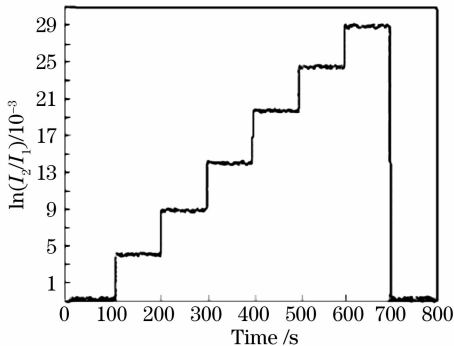


图 9 瓦斯传感系统的响应曲线

Fig. 9 Response curve of gas sensing system

在甲烷体积分数为 1.0% 时进行了系统重复性的测试。系统每隔 20 s 取一次读数,共测试 50 次,

结果如表 1 所示。由表 1 可见,在甲烷体积分数为 1.0% 时,系统 50 次的测试结果平均值为

$$\bar{D} = \sum_{i=1}^n D_i / n = 0.0105.$$

测量的标准差为

$$S = \sqrt{\sum_{i=1}^{n=50} (D_i - \bar{D})^2 / (n - 1)} = 0.00005.$$

均值的标准差为

$$S_D = S / \sqrt{n} = 0.000007.$$

测量的标准差表征了平均值的分散性,系统进行的是对一固定值的连续测试,即每隔 20 s 取一次读数,因此测量结果的标准差亦可表示多个测试值的重复性。

表 1 重复性实验数据

Table 1 Experimental data of repeatability

<i>i</i>	$D_i [\ln(I_2/I_1)]$	<i>i</i>	$D_i [\ln(I_2/I_1)]$	<i>i</i>	$D_i [\ln(I_2/I_1)]$
1	0.0107	18	0.0106	35	0.0106
2	0.0106	19	0.0102	36	0.0103
3	0.0106	20	0.0103	37	0.0105
4	0.0102	21	0.0105	38	0.0106
5	0.0105	22	0.0106	39	0.0106
6	0.0105	23	0.0104	40	0.0103
7	0.0108	24	0.0105	41	0.0106
8	0.0102	25	0.0103	42	0.0105
9	0.0105	26	0.0104	43	0.0106
10	0.0104	27	0.0108	44	0.0103
11	0.0104	28	0.0105	45	0.0105
12	0.0107	29	0.0106	46	0.0106
13	0.0106	30	0.0105	47	0.0106
14	0.0104	31	0.0104	48	0.0103
15	0.0105	32	0.0105	49	0.0105
16	0.0105	33	0.0107	50	0.0105
17	0.0109	34	0.0105		

从上述测试结果可见,系统具有良好的稳定性,灵敏度达到体积分数的 0.01%,测量范围大于体积分数的 5.0%。

## 5 结 论

利用光纤布拉格光栅优良的窄带滤波特性来产生差分吸收测量所需的窄谱光信号,具有光路全光纤化、结构简单的特点,提高了探测灵敏度。系统采

用基于非球面光纤准直器构成的光纤瓦斯探头,探头的回波大大减小,进一步提高了测量灵敏度和测量稳定性。由于窄谱光信号是同时从同一宽带光源中提取的,系统消除了背景吸收干扰和光源强度的不稳定性,只需改变光纤光栅滤波器系统中光纤光栅的组合,就可方便地扩展到实现不同气体或多组份气体的传感测量。

### 参 考 文 献

- [1] Andreas Othonos, Kyriacis Kalli. Fiber Bragg Gratings Fundamentals and Applications in Telecommunications and Sensing[M]. Norwood: Artech House Press, 1999
- R. S. Weis, A. D. Kersey, T. A. Berkoff. A Four-element Fiber Grating Sensor Array with Phase-sensitive Detection[J]. *IEEE Photo. Technol. Lett.*, 1994, **6**(12): 1469~1472
- D. A. Jackson, A. B. L Ribeiro, L. Reekie *et al.*. Simple multi-plexing scheme for a fiber-optic grating sensor network [J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(14): 1192~1194
- G. A. Ball, W. W. Morey, P. K. Cheo. Fiber laser source/analyzer for Bragg grating sensor array interrogation [J]. *Journal of Lightwave Technology*, 1994, **12**(4): 700~703
- A. D. Kersey, T. A. Berkoff, W. W. Morey. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber Fabry-Perot wavelength Filter[J]. *Opt. Lett.*, 1993, **18**(16): 1370~1372
- Qian Xiangzhong. Study of CH<sub>4</sub> optical-fiber sensor [J]. *J. Appl. Opt.*, 2005, **26**(6): 38~40  
钱详忠. 光纤瓦斯传感系统的研制[J]. *应用光学*, 2005, **26**(6): 38~40
- Zhou Mengran. Research on distributed optical fiber sensing gas system [J]. *China Safety Science Journal*, 2007, **17**(8): 167~170  
周孟然. 分布式光纤传感瓦斯气体系统的研究[J]. *中国安全科学学报*, 2007, **17**(8): 167~170