

文章编号: 1002-1582(2015)05-0442-03

## 煤层气井液面的光纤测量技术<sup>\*</sup>

黎凌浩<sup>1</sup>, 江毅<sup>1</sup>, 刘曰武<sup>2</sup>

(1. 北京理工大学 光电学院, 北京 100081)

(2. 中国科学院力学研究所, 北京 100190)

**摘 要:** 分析了煤层气井液面在测量中使用的传统方法可能遇到的问题, 提出了光纤非本征型法珀干涉仪(EFPI)用于测量煤层气井液面的发展方向。针对煤层气井设计了光纤 EFPI 传感系统, 并模拟煤层气井液面给出测量方案, 准确地测出液面位置, 解决了煤层气井液面的测量难题, 测量系统中传感器光学腔长变化的相对误差为 1.48%, 测量精度 1 $\mu$ m, 相比传统的电学测量方法, 更加安全有效。

**关 键 词:** 光学测量; 煤层气井液面; EFPI

中图分类号: TP212 文献标识码: A

DOI:10.13741/j.cnki.11-1879/o4.2015.05.013

### The fiber-optic technique for the measurement of the liquid surface in coal bed methane well

LI Linghao<sup>1</sup>, JIANG Yi<sup>1</sup>, LIU Yuewu<sup>2</sup>

(1. School of Optoelectronics, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

(2. Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

**Abstract:** The problems possibly occurred in the coal bed methane(CBM) well measurement are analyzed. An extrinsic Fabry Perot(F-P) interferometer(EFPI) is used as a new direction of liquid surface measurement in coal bed methane well. A liquid surface measuring system on the EFPI is developed to fundamentally solve the difficult problems of the accurate level in the coal bed methane well. The relative error of optical cavity length is 1.48% and resolution is 1 $\mu$ m in the measuring system, which is obviously more effective than the traditional measuring technologies.

**Key words:** optical measurement; liquid surface; EFPI

## 0 引 言

煤层气主要以吸附形式吸附在煤基质的表面上, 当地层压力下降至煤层的解析压力, 煤层中甲烷才解析出来<sup>[1]</sup>。煤层气的开采是一个排水降压的过程, 煤层的压降是通过排采来实现的, 即利用排采设备, 油管排水, 套管产气。随着排液的进行, 环空液面在下降, 煤层压力也在下降。控制煤层压降速率, 采用合理的生产压差进行排采对煤层气的产出尤为重要, 而环空液面测定是煤层气排采工作中一项重

要又频繁的工作。

目前测量煤层气井液面的方法有很多种<sup>[2,3]</sup>, 包括液面自动检测仪、回声仪检测液面等, 但这些电学测量方法在实际生产中面临高温、高压、易燃性气体等危险, 在很大程度上限制了电学方法的使用, 然而光纤传感器以其独特的优势能在这些特殊环境中使用。光纤传感器具有体积小、重量轻、可靠性好、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高压、电绝缘性能好、可绕曲、防爆等特点, 能在恶劣环境下进行接触式、非破坏性以及远距离测量。光纤传感器的这些性能使其

\* 收稿日期: 2014-11-13; 收到修改稿日期: 2015-01-15 E-mail: 812015397@163.com

基金项目: 国家重大专项课题“煤层气井生产测试技术”项目(2011ZX05038-003)

作者简介: 黎凌浩(1990—), 男, 硕士生, 从事光纤传感器及渗流力学实验方面的研究。

通讯作者: 刘曰武(1965—), 男, 研究员, 博士生导师, 从事渗流力学及油气藏工程方面的研究。E-mail: lywu@imech.ac.cn

导师简介: 江毅(1967—), 男, 教授, 博士生导师, 从事光纤传感及光电子技术等方面的研究。E-mail: bitjy@bit.edu.cn

非常适用于石油工业中各个参量的测量,因此开展利用光纤测量技术进行煤层气井液面的测量很有现实意义。

本文利用光纤外腔 F-P 干涉仪作为液面传感器,是一种直接测量煤层气井液面的方法,具有时效性、连续性、精密性,在工程中具有重要的应用作用。

### 1 测量原理

本实验采用光纤 EFPI 液面传感器,根据空气与水的折射率不同,导致光在固定腔长的腔中传输的光程差不同,将所测量的光程差的变化转化为光学腔长直观的在解调仪中显示出来,即可分辨出液面位置。

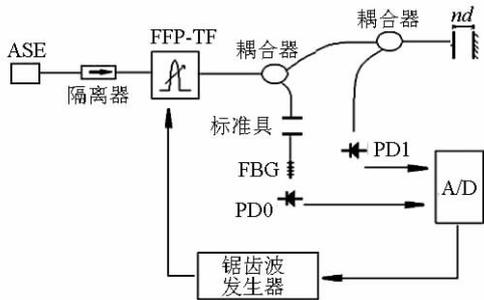


图 1 波长扫描白光干涉测量系统

水气界面的测量应用了光纤白光干涉测量原理<sup>[4]</sup>,其测量系统如图 1 所示。由计算机触发生成的锯齿波电压驱动 FFP-TF。其中由我们实验室自己研制的 FFP-TF 的自由光谱区宽度为 65nm,精细度为 450,带宽为 0.14nm。波长扫描光被耦合器分为两束。一束注入 EFPI,反射回来白光光谱信号。另外一束光被注入一个波长为梳状的光纤 F-P 标准具中。标准具的自由光谱区宽度为 0.8nm,精细度为 14。标准具的波长热稳定性从 0°C 到 70°C 的变化小于 0.7GHz。一只线宽为 0.7nm 的光纤光栅串接在标准具后面,用以抹掉一个从标准具输出光波的峰,以便识别标准具中其他所有的峰。

一个白光干涉仪(WLI)EFPI 的光谱条纹可表示为

$$g(\lambda) = a(\lambda) + b(\lambda)\cos\left(\frac{4\pi d}{\lambda} + \pi\right) \quad (1)$$

式中  $d$  是腔长, $2d$  即为光程差(空气中); $a(\lambda)$  是光源轮廓引入的背景光; $b(\lambda)$  是腔长和光纤端面反射引入的对比;常量由 EFPI 中第二个反射镜反射引入。当扫描波长  $\lambda$  时,式(1)是一个周期函数。周期函数的主频率  $f_0$  为

$$f_0 = \frac{2d}{\lambda^2} \quad (2)$$

应用傅里叶变换白光干涉测量术得到干涉条纹

的相位为<sup>[5]</sup>

$$\varphi(\lambda) = 2\pi f_0 \lambda = \frac{4\pi d}{\lambda} \quad (3)$$

腔长  $d$  就能通过相位  $\varphi(\lambda)$  计算出来。当将波长从  $\lambda_1$  扫描至  $\lambda_2$  时,能够得到相位变化  $\Delta\varphi(\lambda)$ ,因此腔长  $d$  为

$$d = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{4\pi(\lambda_1 - \lambda_2)} \Delta\varphi(\lambda) \quad (4)$$

通过上述方法可以解调出在空气环境下的光学腔长,光学腔长  $D = nd$ ,由于折射率  $n$  不同,在水中的光学腔长与空气中差异很大进而得到液面位置。

### 2 实验及分析

传感器设计原理<sup>[6,7]</sup>如图 2 所示。

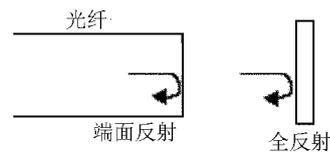
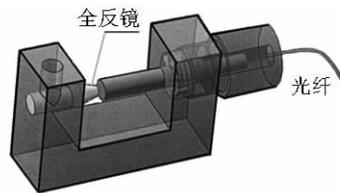
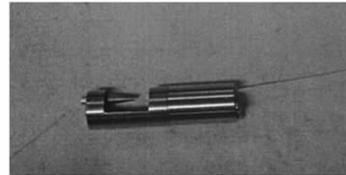


图 2 EFPI 液面传感器原理图

光纤中传出的光经过有金属外壳保护的光纤传感头进入测量环境中,再由全反镜反射后回到传感头中,最终由光纤白光干涉解调系统解调出信号。EFPI 液面传感器的腔长设计为 1mm 左右,这是为了尽量缩小传感器体积,增加了传感器在井下空间的适应性。传感器的传感头的设计如图 3(a)示,实物照片如图 3(b)示。



(a) 金属外壳传感头的机械设计图



(b) 金属外壳传感头的实物照片

图 3 金属外壳传感头

实验设备及性能: 光纤白光干涉测量仪 FS-3000D、煤层气井模拟系统、水管、光纤液面传感器。其中光纤白光干涉测量仪 FS-3000D 由我们实验室自主研制,技术参数如下:腔长测量分辨率:0.1 $\mu$ m;测量频率:1Hz;EFPI 测量最大范围:100 $\mu$ m~5000 $\mu$ m。煤层气模拟系统采用透明塑料套管,底部开一孔接入水管。实验装置如图 4 所示,在模拟煤

层气井套管底部向井中泵进一定量的水,模拟井顶端另放置一个出水口,将光纤液面传感器垂直吊入,传感器另一端接光纤白光干涉测量仪,垂直升降液面传感器高度,测量液面位置。

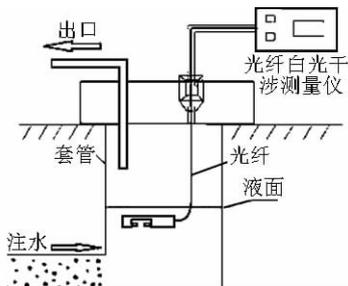


图 4 煤层气井液面测量示意图

当光纤传感器分别置于空气和水中时,白光干涉测量系统所测得腔长数据经 EXCEL 绘图后如图 5、图 6 所示,将测得腔长求算数平均数,得数据如下:位于空气中时,测得腔长在  $947.1\mu\text{m}$  波动(图 5);位于水中时,测得光学腔长在  $1278.6\mu\text{m}$  波动(图 6)。

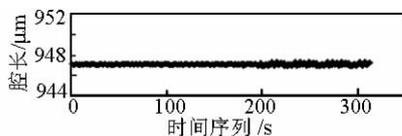


图 5 光纤传感器在空气中时腔长数据图

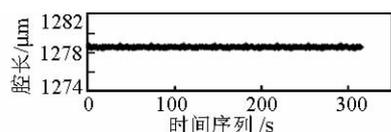


图 6 光纤传感器在水中时腔长数据图

将液面传感器垂直升降,测得完全置于水中与完全置于空气中结果如图 7。

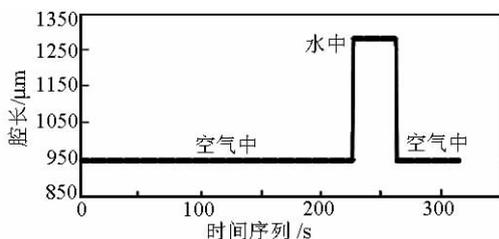


图 7 液面实验测得数据

由于光在传播过程中经过外腔式 F-P 干涉仪,当 F-P 腔处于不同的折射率环境中,最终测得的光学腔长不同。由图 5 可知,液面传感器位于空气中时,测得绝对腔长为  $947.1\mu\text{m}$ 。由图 6 可知,光纤液面传感器位于水中时,测得光学腔长平均值为  $1278.6\mu\text{m}$ ,波动范围  $1278.472\sim 1278.787\mu\text{m}$ ,准确性稳定性良好。结合在空气中测得的液面传感器绝对腔长  $947.1\mu\text{m}$  和水的折射率 1.33,可得在水中的

光学腔长理论值  $nd = 1.33 \times 947.1\mu\text{m} = 1259.643\mu\text{m}$ ,光学腔长的绝对误差为  $18.957\mu\text{m}$ ,相对误差为 1.48%。由图 7 可知,当传感器由空气中进入水中时,腔长数据有明显突变且反应迅速,而当传感器由水中再次进入空气中时,腔长数据再次发生突变,因此可以根据是否有突变来判断液面位置,在本实验中突变明显,很好地完成了测试任务。导致白光干涉测量系统测得腔长误差的可能原因是:当 F-P 腔放入水中,由于水中温度与空气中温度不同,温度变化引起的腔长变化,导致腔长测量误差。

### 3 结论

提出了一种用光纤传感器来测量煤层气井液面的新方法,实验结果表明:在空气中与在水中测得的光强变化非常明显,同时可以通过观察得到在液面上下传感器光学腔长的变化也十分明显,相对误差仅为 1.48%,测量精度  $1\mu\text{m}$ ,根据光学腔长的变化即可判断液面位置,结合下井光纤的长度即可测得液面距离井口深度;相比之前的测试方法,本设计的优点在于利用光纤设计传感器,光纤传感器体积小、重量轻、可靠性好,抗电磁干扰,抗腐蚀、耐高压、电绝缘性能好、可绕曲、防爆等特点,特别适合在油气井开发中进行长期的测量工作。

### 参考文献:

- [1] 任源峰,等. 煤层气井液面测试仪的研制与应用[J]. 油气井测试, 2008, 17(3): 70—71.  
Ren Y F, et al. Application of the level tester in CBM well[J]. Oil and Gas Well Testing, 2008, 17(3): 70—71.
- [2] 郭平,等. 超声波在凝析油临界流动饱和度测试中的应用[J]. 天然气工业, 2001, 21(3): 22—25.  
Guo P, et al. Application of ultrasound in the critical flow of condensate oil saturation tests[J]. Gas Industry, 2001, 21(3): 22—25.
- [3] 闫飞. 应用于石油勘探温度和含水率测量的光纤传感器原理及方法研究[J]. 科技资讯, 2009 (30): 109—109.  
Yan F. Research of the application of temperature and moisture content fiber sensor in oil exploration measurement[J]. Technology Information, 2009 (30): 109—109.
- [4] Jiang Y. High-resolution interrogation technique for fiber optic extrinsic Fabry-Perot interferometric sensors by the peak-to-peak method[J]. Applied Optics, 2008, 47(7): 925—932.
- [5] Jiang Y. Fourier transform white-light interferometry for the measurement of fiber-optic extrinsic Fabry - Perot interferometric sensors[J]. Photonics Technology Letters, IEEE, 2008, 20(2): 75—77.
- [6] 江毅. 高级光纤传感技术[M]. 北京: 科学出版社, 2009: 162—163.  
Jiang Y. Advanced fiber optic sensing technology[M]. Beijing: Science Press, 2009: 162—163.
- [7] 郑宏军,等. 两种典型的光纤传感器研究现状与发展趋势[J]. 传感技术学报, 2001, 14(4): 281—284.  
Zhen H J, et al. The status and development trend of two typical fiber sensors[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2001, 14(4): 281—284.