

文章编号: 0258-7025(2006)09-1243-04

# 光纤光栅原油压力传感器实验 及其可靠性研究

刘海涛<sup>1</sup>, 陈建平<sup>1</sup>, HSU Luke<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> 上海交通大学区域光纤通信网与新型光通信系统国家重点实验室, 上海 200030)  
<sup>2</sup> 路科锐威科技有限公司, 北京 100085)

**摘要** 介绍并制作了一种光纤光栅高温高压传感器,它由三种金属管组成,中央的弹性金属管将液体的压力转换为管子的机械伸长,周围金属管的长度只随温度变化。光纤光栅的两端分别固定在中央管及周围管的末端,随着压力管内液体压力的增加,光栅的中心波长随之增加,实现了对液压的传感。对该传感器的温度补偿进行了分析,设计了具有相同温度系数的压力传感光栅与温度传感光栅。并对传感器进行了高压实验和高温、高湿存储实验。结果表明,这种压力传感器在0~50 MPa之间灵敏度为31.7 pm/MPa。经过200 °C高温存储16 h,及100 °C沸水浸泡6 h,波长没有观察到明显衰退现象。

**关键词** 测量;光纤光栅;高压传感器;压力灵敏度;融变

**中图分类号** TN 247;TP 212.14 **文献标识码** A

## Study on Fiber Grating Petroleum Pressure Sensor and Its Reliability

LIU Hai-tao<sup>1</sup>, CHEN Jian-ping<sup>1</sup>, HSU Luke<sup>2</sup>

(<sup>1</sup> *State Key Laboratory on Fiber-Optic Local Area Communication Networks and Advanced Optical Communication Systems, Shanghai Jiaotong University, Shanghai 200030, China*  
<sup>2</sup> *Tricombj Company, Beijing 100085, China*)

**Abstract** A high pressure and temperature fiber grating sensor was presented. The sensor was implemented by using three metal tubes. The central elastic metal tube was used to convert pressure into longitudinal strain. The outer tube was only affected by temperature. Fiber grating was fixed on both end of central and outer tube, so as to sense the wavelength increment introduced by the pressure. Temperature compensation scheme was studied, and two fiber Bragg gratings (FBGs) (pressure sensing grating and temperature sensing grating) with similar temperature coefficient were designed. High pressure and high temperature/humidity storage tests were carried out. Results showed that the sensor during the condition of 0~50 MPa had a pressure sensitivity up to 31.7 pm/MPa. After storage of 16 hours under 200 °C and immersion into 100 °C water for 6 hours, the fiber grating wavelength showed no obviously decay.

**Key words** measurement; fiber grating; high pressure sensor; pressure sensitivity; creep

## 1 引言

原油压力是油气工业一个很重要的物理量,传统测量压力方法中,压力响应速度慢、滞后较大、灵敏度低、测量范围较窄。而光纤光栅(FBG)传感信号的传输和感应都在光纤中完成,并且是波长编码

信号,测量结果不受光强波动影响,可以在高温环境下使用,耐腐蚀,可实现分布式测量,同时电磁绝缘,不需要井下电子设备。因此近年来成为研究的一个热点<sup>[1~5]</sup>。

基于以上优点,1993年 M. G. Xu 等用它进行高压实验,将裸光栅放入高压容器中测量,在0~

收稿日期:2005-11-08;收到修改稿日期:2006-02-21

作者简介:刘海涛(1971—),男,山东烟台人,上海交通大学博士研究生,主要从事光纤光栅传感器与光纤通信技术的研究。E-mail:Liuhaitao@sjtu.edu.cn.

导师简介:陈建平(1962—),男,上海交通大学教授,博士生导师,主要从事光纤通信方面的研究。E-mail:jpchen@sh163.net

70 MPa的范围内灵敏度只有 $-3.04 \text{ pm/MPa}$ <sup>[1]</sup>, 1996 他们又将光栅封装在中空玻璃球中进行压力增敏, 在 $0 \sim 14 \text{ MPa}$ 的范围内灵敏度大约为 $-27 \text{ pm/MPa}$ , 灵敏度提高了约 10 倍<sup>[2]</sup>。国内也有研究者通过特殊封装提高光栅的压力敏感程度, 以增加压力的分辨率<sup>[6~8]</sup>。CiDra 公司改进了光纤光栅高压传感器, 并在油田成功应用, 在 $0 \sim 5000 \text{ psi}$ 的环境中, 光纤光栅高压传感器同石英传感器相比较, 达到了 $\pm 1 \text{ psi}$ 的精度<sup>[4]</sup>。这种传感器的设计思路是将液体压力转换为压力管的纵向伸长, 应变变量被放大且被光纤光栅感知<sup>[3,5]</sup>。本文对这种高压传感器进行了改进, 并对它的可靠性进行了重点研究, 给出了实验结果。

## 2 原 理

如图 1, 压力传感器内部有三种金属材料 A, B, C 组成, 当液体压力施加到传感器时, 中央的压力管 C 会伸长, 其纵向应变变量

$$\epsilon_t = \frac{PR_1^2}{R_2^2 - R_1^2} \frac{1 - 2\mu}{E}, \quad (1)$$

式中  $P$  为压力管内压力, 压力管的内外径  $R_1$  和  $R_2$  分别为 2.9 mm 和 4 mm, 管长  $L_C$  为 202 mm, 弹性模量  $E = 210 \text{ GPa}$ , 材料的泊松比  $\mu = 0.29$ , 在 50 MPa 管内压力下, 管伸长量为  $\delta L_C = 22.4 \text{ }\mu\text{m}$ 。被封装的光纤光栅 1 两端点间长度为 16 mm, 而管 A, B 在压力下均不发生变形, 这时, 可以计算出光栅的压力灵敏度为  $33.6 \text{ pm/MPa}$ 。

表 1 压力传感器选用材料参数

Table 1 Material of the sensor and its parameters

	Material	TEC / ( $\times 10^{-6} \text{ }^\circ\text{C}$ )	Length / mm
A	410 stainless stell	10.7	112
B	304 stainless steel	16	74
C	Nickel-chromium-molybdenum alloy	11.8	202

采用表 1 的参数, 封装后的光栅端点间距  $L_f$  为 16 mm, 热膨胀系数为

$$\alpha_f = (L_C\alpha_C - L_A\alpha_A - L_B\alpha_B) / L_f = 0.075 \times 10^{-6} / ^\circ\text{C}, \quad (2)$$

式中  $L_A, L_B, L_C$  分别表示管 A, B, C 的长度,  $\alpha_A, \alpha_B, \alpha_C$  分别表示管 A, B, C 的热膨胀系数。计算表明, 光纤随温度变化的膨胀系数  $\alpha_f$  接近于零, 相当于自由状态, 在温度平衡时, FBG1 同自由光栅 FBG2 的温度系数接近。金属管 A, B 通过焊接的方法结合

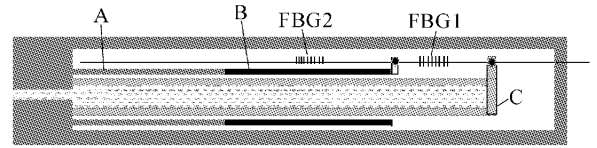


图 1 压力传感器内部原理图

Fig. 1 Scheme of fiber grating pressure sensor

FBG1 同时承受压力和温度的变化, FBG2 只受温度的影响, 为了消除温度对 FBG1 的影响, 文献<sup>[3,5]</sup> 采用了预先拉伸光栅, 合理设计 A, B, C 长度, 温度变化时, FBG1 两端点的相对位置减小, 以抵消 FBG1 的温度效应<sup>[9]</sup>。文献<sup>[5]</sup> 将 A, B 管合成同一根管子, 在实际的设计中, 较难同时满足光栅的温度补偿及压力灵敏度的要求。如果要求压力传感器的使用温度达到  $200 \text{ }^\circ\text{C}$ , 为了达到温度补偿的效果, 光栅的预拉伸量要大于 2 nm, 这对传感器的长期可靠性有一定的影响。因此, 我们在设计的时候, 不使 FBG1 的温度系数为零, 而是希望 FBG1 和 FBG2 有相同的温度系数, 即 FBG1 两端相对位置不受温度影响, 只受压力的影响, 因此, FBG1 的预拉伸量可以很小, 从而提高了传感器的安全系数。

## 3 主要参数确定及制作工艺

原油高压传感器的材料要有较高的防腐蚀性, 压力管要有较高的弹性极限, 在使用压力范围内, 其形变要在材料的弹性范围内。所选材料如表 1 所示。

到一起并焊到保护外壳上。一般用于封装用的环氧树脂在高温下会不同程度地呈现出一定量的融变, 这将导致传感器的零点漂移, 从而使传感器失效。因此本实验中光栅通过机械装置夹在管 B, C 的外端<sup>[3]</sup>, 以求避免光栅的融变效应。

## 4 环境耐受性及温度、压力测试

### 4.1 环境耐受性实验

为了测试传感器对环境的耐受性及可靠性, 将

光栅封装在一小段殷钢片上,并进行了高温存储实验及沸水存放实验,数据如表 2(注:没有标明温度

的波长均是转换为30 ℃下的波长。1 号是用环氧树脂封装的光栅作为对比实验)。

表 2 高温存储及沸水存放实验数据

Table 2 High temperature and boiled water storage experiment

(Unit: nm)

FBG	No. 1	No. 2	No. 3
Original wavelength	1529.310	1566.801	1529.323
Wavelength after packaged	1530.989	1568.465	1531.008
Cooled slowly after storage for 16 hours			
Water bath @ 30 ℃	1530.124	1568.465	1531.003
Cooled slowly after boiled water storage for 6 hours			
Water bath @ 30 ℃	1529.361	1568.464	1531.001

传感器的零漂将导致传感器失效,在高温情况下使用的传感器,融变将是一个非常严重的问题,从表 2 中的数据可以看出,2,3 号光栅经过一段时间的高温、高湿环境后,波长同封装后的波长几乎没有变化,说明固定点有较好的抗融变性,而作为对比的用环氧树脂封装的 1 号光栅在高温及高湿的情况下,波长则漂移较大,最后,光栅的波长(1529.361 nm)几乎接近于封装前的原始波长(1529.310 nm)。

4.2 压力测试

采用液体高压手动计量泵对传感器进行了测试,光栅波长测量采用路科锐威公司生产的 FBG210 解调仪,采用分级加压的办法,每次 2~5 MPa,并进行多次往复实验,校验用的压力表为精度 1.5 级,量程 160 MPa 的机械压力表,压力表的启动压力为 2 MPa。

图 2 显示了传感器多次重复测量的数据曲线,在 0~50 MPa 范围内,传感器的压力灵敏度为 31.7 pm/MPa,同理论值有一定差异,但仍在合理的范围内。存在差异可能的原因有:材料的弹性模量、泊松比、管径以及光栅的准确封装长度等误差。因为机械压力表有一定的启动压力,所以表现在测

试曲线 0~5 MPa 的范围内,曲线的斜率较大,更精确的测量需要用高精度的石英压力传感器来标定。

将施加给传感器的压力固定,并且保持一段时间,以观察传感器的时间响应,如图 3,图 4。从结果来看,在 40 MPa 或 50 MPa 的环境中保持几十分钟,波长的漂移量在 10 pm 之内(50 MPa 的加压过程中

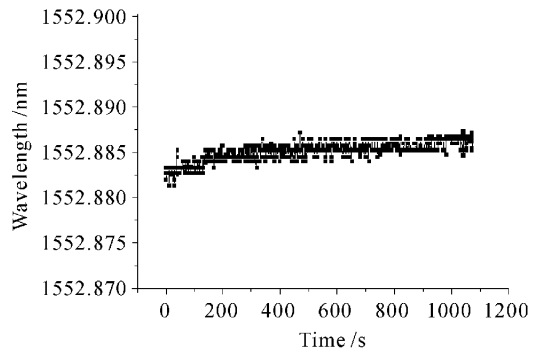


图 3 压力传感器在 40 MPa 情况下保持 20 min 的波长变化情况

Fig. 3 Sensor wavelength response under 40 MPa for 20 minutes

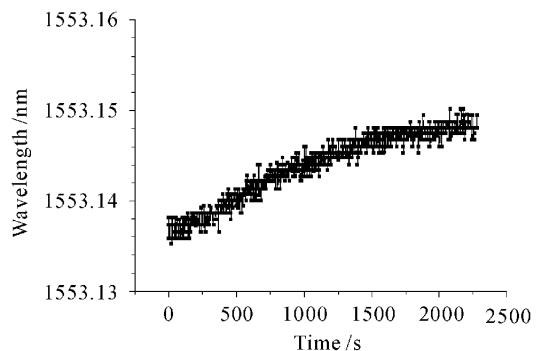


图 4 压力传感器在 50 MPa 情况下保持 40 min 的波长变化情况

Fig. 4 Sensor wavelength response under 50 MPa for 40 minutes

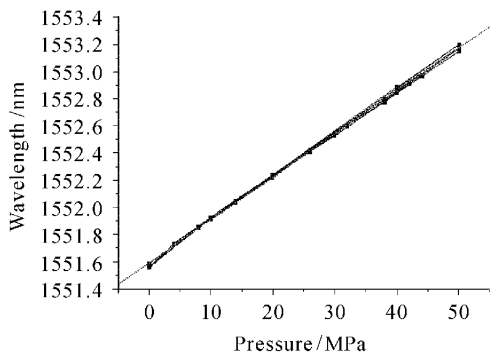


图 2 压力传感器重复加减压实验

Fig. 2 Sensor wavelength shift versus pressure

环境温度升高了约 $0.7\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。

### 4.3 温度系数测试

将传感器放入恒温箱中,测试传感器 FBG1, FBG2 的相对温度效应,结果如图 5 所示,曲线的斜率为 $1.145$ ,拟合度  $R = 99.762\%$ ,FBG1 的温度系数比 FBG2 要大,表明 FBG1 的热膨胀系数大于零,导致温度升高时,受一定的拉应变。原因是对材料 A,B,C 热膨胀系数的估计有误差,这可以通过适当加长材料 B 的长度,减小材料 A 的长度来调整 FBG1 使之接近 FBG2 的温度系数。

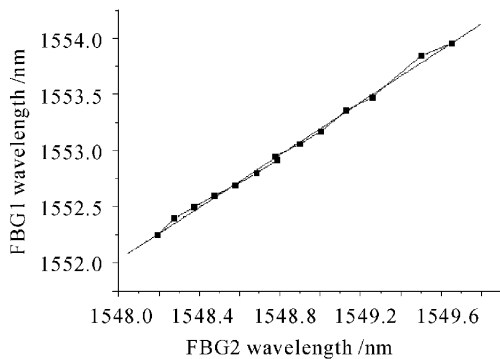


图 5 20~150  $^{\circ}\text{C}$  压力传感器中两只光栅的波长相对变化曲线

Fig. 5 Two FBG wavelength response with temperature between 20~150  $^{\circ}\text{C}$

## 5 结 论

制作了一种高压传感器,并进行了环境耐受性测试及压力测试,结果显示传感器的压力灵敏度为 $31.7\text{ pm/MPa}$ 。数小时的高温、高湿环境实验后,波

长漂移量小于 $10\text{ }\mu\text{m}$ 。

致谢 感谢石油大学测井中心肖立志教授及陈海峰、付建伟对传感器测量的大力支持,以及对本文工作的有益探讨。

### 参 考 文 献

- 1 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fibre grating high pressure sensor [J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~399
- 2 M. G. Xu, H. Geiger, J. P. Dakin. Fibre grating pressure sensor with enhanced sensitivity using a glass-bubble housing [J]. *Electron. Lett.*, 1996, **32**(2):128~129
- 3 P. M. Nellen, P. Mauron, A. Frank *et al.*. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications [J]. *Sensors and Actuators A*, 2003, **103**:364~376
- 4 Alan D. Kersey. Optical fiber sensors for permanent downwell monitoring applications in the oil and gas industry [J]. *IEEE Trans. Electron.*, 2000, **E83-C**(3):400~404
- 5 Xiangdong Zhang, Yulin Li, Weiping Wang *et al.*. Pressure and temperature sensing system based on fiber-optic Bragg gratings for the oil and gas downhole [C]. *SPIE*, 2004, **5279**:636~640
- 6 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. A high sensitivity in fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2004, **24**(2):187~189  
傅海威,乔学光,贾振安等. 高灵敏度的光纤光栅压强传感器 [J]. *光学学报*, 2004, **24**(2):187~189
- 7 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Stress sensitivity enhanced in fiber Bragg grating pressure sensor [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(4):473~476  
傅海威,乔学光,贾振安等. 应力增敏的光栅布拉格压强传感器 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(4):473~476
- 8 Liu Lihui, Zhang Weigang, Guo Honglei *et al.*. Study on experiment of fiber Bragg grating pressure sensitivity [J]. *Chinese J. Lasers*, 2004, **31**(10):1266~1268  
刘丽辉,张伟刚,郭宏雷等. 光纤布拉格光栅压力增敏的实验研究 [J]. *中国激光*, 2004, **31**(10):1266~1268
- 9 G. W. Yoffe, P. A. Krug, F. Ouellette *et al.*. Passive temperature-compensating package for optical fiber gratings [J]. *Appl. Opt.*, 1995, **34**(30):6859~6861