

文章编号 1004-924X(2011)03-0545-07

# 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器

王宏亮, 宋娟, 冯德全, 邬华春

(西安石油大学 光电油气测井与检测教育部重点实验室, 陕西 西安 710065)

**摘要:**针对现有高温高压井下对温度和压力的实时长期监测要求,设计了温度补偿式光纤光栅温度压力双参量传感系统。根据传感器的使用环境,优选了恒弹性合金。采用优选后的恒弹性合金作为基底材料设计了圆筒与圆形膜片组合式传感器结构,圆形膜片是整体加工成型的。最后,对传感器进行相关实验测试。实验测试与误差分析结果显示,传感器实现了温度和压力的大量程测量,传感特性呈单值线性,温度补偿可一体化封装;温度线性检测区为 $0\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,温度灵敏度为 $0.020\ 1\ \text{nm}/^{\circ}\text{C}$ ,温度测量静态误差为 $0.029\%$ ;压力线性检测区为 $0\sim 60\ \text{MPa}$ ,压力灵敏度为 $0.013\ 6\ \text{nm}/\text{MPa}$ ,压力测量静态误差为 $0.046\%$ ,这些指标能够满足实际工程的要求。

**关键词:**光纤光学;光纤光栅;封装;高温高压;温度压力传感器

中图分类号:TN253 文献标识码:A doi:10.3788/OPE.20111903.0545

## High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments

WANG Hong-liang, SONG Juan, FENG De-quan, WU Hua-chun

(*Key Laboratory of Photoelectricity Gas-oil Logging and Detecting, Ministry of Education, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China*)

**Abstract:** With the aim to serve in bad environments and to meet the requirements of real-time and long-term service, a new kind of double parameters and high temperature-pressure fiber Bragg grating (FBG) sensor with a temperature-compensator was put forward. Firstly, the constant elasticity alloy was selected based on the special environments for the sensor. Then, a new kind of structure combined with a circular cylinder and a circular diaphragm was designed by taking the optimized constant elasticity alloy as the substrates. Finally, three experiments of temperature, pressure and temperature-pressure were performed. Experimental results indicate that the sensor not only has great temperature and pressure detection ranges, but also can realize the linear measurement within the ranges of  $0\sim 60\ \text{MPa}$  and  $0\sim 350\text{ }^{\circ}\text{C}$ . The experiments offer the pressure sensitivities in  $0.013\ 6\ \text{nm}/\text{MPa}$ , temperature sensitivity in  $0.020\ 1\ \text{nm}/^{\circ}\text{C}$ , and the static errors in  $0.046\%$  and  $0.029\%$ , respectively. These indicators can meet the requirements of practical engineering applications.

**Key words:** fiber optics; optical fiber grating; encapsulation; high-temperature and high-pressure; temperature-pressure sensor

收稿日期:2010-06-30;修订日期:2010-08-21.

基金项目:国家自然科学基金资助项目(No. 60727004);国家 863 高技术研究发展计划资助项目(No. 2007AA03Z413)

## 1 引言

光纤光栅传感技术已成为目前国内外最具有发展前景和影响力的检测技术,广泛应用于应力应变、温度、速度等物理量的检测与控制,在石油化工、交通运输、建筑、工矿等领域中已有诸多报道<sup>[1-11]</sup>,不过其仅限于温度低于 200 ℃、压力低于 20 MPa 环境中使用。

目前,在高温(>200 ℃)、高压(>20 MPa)、且有易腐蚀、易氧化液体和气体这一特殊环境中应用的光纤光栅传感器报道较少,其原因是设计与制作存在以下技术难题:(1)在保证一定传感灵敏度的基础上难以同时实现压力和温度大范围线性检测;(2)很难完全分离光纤光栅对温度与应力的交叉敏感;(3)必须消除加载和卸载过程中传感器输入输出出现的迟滞;(4)必须抗腐蚀、钝氧化,以增强传感器的整体使用寿命。目前,单独测量压力的传感器的量程可达 60 MPa<sup>[12]</sup>,单独测量温度的传感器量程可达到 500 ℃<sup>[13]</sup>,但能够同时在 0~60 MPa 和 0~350 ℃ 这样大检测范围内实现线性测量的温度压力传感器尚无文献报道。

本文结合我国辽河油田高温高压油气井和深海油气井的实际情况,优选恒弹性基底材料,设计了新的传感器结构,并对该传感器进行了相关实验测试。实验结果表明,所设计传感器能够满足实际工程要求。

## 2 基底材料的优选

对弹性基底元件的选材应着重从以下几个方面考虑:(1)耐高温、高压。由于注气井的温度和压力很高,而裸光纤光栅承受的应变有限,仅 8000 个微应变左右,因此必须让基底元件承受大应变。(2)迟滞效应小。材料存在分子内摩擦力,在外力作用下易产生弹性滞后、弹性后效以及蠕变等现象,导致光纤光栅传感器的输入与输出出现回线特征,产生迟滞误差,这就要求基底材料具有较小的迟滞效应,以降低传感器的迟滞误差,实现光纤光栅传感特性的单值线性封装。(3)热膨胀系数较小,且在宽温度范围内热膨胀系数恒定。

(4)具有良好的钝氧化和抗腐蚀性能。

从以上 4 个要求出发,本文优选了一种恒弹性镍基合金,其所需性能指标如下:(1)具有高弹性极限强度和抗疲劳强度,抗拉强度为 1 200 MPa,屈服强度为 1 170 MPa;(2)弹性模量小,在很宽的温度范围内弹模温度系数小且稳定,弹性模量为  $1.9 \times 10^5$  MPa;(3)迟滞效应小;(4)热膨胀系数为  $8.51 \times 10^{-6}/\text{℃}$ ,且在 0~500 ℃ 恒定,泊松比为 0.32。

## 3 传感器结构设计

传感器的结构如图 1 所示,圆柱筒与圆形膜片的材料相同。

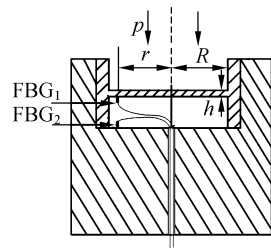


图 1 传感器结构

Fig. 1 Structure of sensor

由于膜片是整体加工成型的,所以当给膜片施加压力载荷时,可以避免其周边出现过紧或过松甚至扭斜导致膜片受局部初始应力不能自如释放的问题,从而减小膜片在工作过程中出现的迟滞误差。

膜片的厚度  $h$  为 1.5 mm,半径  $R$  为 10.0 mm,将  $\text{FBG}_1$  沿环向粘贴到圆形膜片下表面半径  $r$  为 7.5 mm 的环上。粘贴过程中,为了减小  $\text{FBG}_1$  的弯曲半径与选定的圆环半径的误差,尽可能实现与基底材料刚性耦联,在半径为  $r$  的圆环刻上凹槽,使光栅嵌入凹槽中,然后再用粘接剂进行粘接。 $\text{FBG}_2$  粘贴到膜片与圆柱筒所形成的腔体底面上,粘贴方法与  $\text{FBG}_1$  相同。

$\text{FBG}_1$  用来测量压力,但是,由于其波长既受温度的调谐又受压力的调谐,所以需要进行温度补偿。 $\text{FBG}_2$  只对温度敏感,其作用是检测温度并进行温度补偿。由于两只光纤光栅完全被密封在腔体中,不与油气井中的化学物质接触,因而提

高了光栅的使用寿命和工作稳定性,间接提高了传感器的使用寿命。

当给膜片表面施加压力载荷时,膜片在  $r$  处的环向应变与压力关系为<sup>[14]</sup>:

$$\varepsilon_{\theta} = \frac{3(1-\mu^2)(R^2-r^2)}{8Eh^2} p, \quad (1)$$

式中  $E, \mu$  分别表示基底材料的弹性模量和泊松比,将相关数据代入(1)式,得到应变与压力的具体关系是:  $\varepsilon_{\theta} = 1.74 \times 10^{-4} p$ , 其中,膜片的变形刚度为  $1.74 \times 10^{-4} Pa$ 。由于该材料的弹性模量  $E$  在  $0 \sim 350 \text{ }^{\circ}\text{C}$  恒定,且  $\mu, R, r, h$  也为定值,因此,其刚度在  $0 \sim 400 \text{ MPa}$  为一定值,理论上说明该材料加工成形的恒弹性敏感元件在压力场中发生的应变和压力具有良好的线性特性。

温度、压力同时存在时,假设光栅的粘贴为刚性的,即耦合系数  $\eta = 1$ ,则粘贴在基底材料上的光纤光栅的中心波长与温度、压力的关系是:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1-P_e)\varepsilon + [(\alpha + \xi) + (1-P_e)(\alpha_s - \alpha)]\Delta t, \quad (2)$$

式中  $P_e, \xi, \alpha$  分别表示光纤的有效弹光系数、热光系数、热膨胀系数,  $\alpha_s$  为基底材料的热膨胀系数。因为  $\alpha_s \gg \alpha$  所以  $\alpha_s - \alpha \approx \alpha_s$ , 则式(2)变为:

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = (1-P_e)\varepsilon + [(\alpha + \xi) + (1-P_e)\alpha_s]\Delta t, \quad (3)$$

将式(1)带入式(3)可得温度、压力与  $\text{FBG}_1$  中心波长的漂移量的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = (1-P_e) \frac{3(1-\mu^2)(R^2-r^2)}{8Eh^2} p + [(\alpha + \xi) + (1-P_e)\alpha_s]\Delta t. \quad (4)$$

因为  $\text{FBG}_2$  只对温度敏感,  $\text{FBG}_2$  中心波长变化量  $\Delta\lambda_2$  与温度的关系为:

$$\frac{\Delta\lambda_2}{\lambda_2} = [(\alpha + \xi) + (1-P_e)\alpha_s]\Delta t, \quad (5)$$

则  $\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2$  即为压力对  $\text{FBG}_1$  中心波长的调谐量。压力对  $\text{FBG}_1$  的波长调谐量为:

$$\frac{\Delta\lambda_1 - \Delta\lambda_2}{\lambda_1} = (1-P_e) \frac{3(1-\mu^2)(R^2-r^2)}{8Eh^2} p, \quad (6)$$

根据式(6)可算出压力的大小。

## 4 实验及分析

### 4.1 实验原理

实验系统如图2所示,将传感器放入高温高

压反应釜(TFCF,南通华兴石油仪器有限公司GY-I型)中。带宽为  $40 \text{ nm}$ 、功率为  $10 \text{ mW}$  的宽带光源(BBS)发出的光经  $3 \text{ dB}$  耦合器入射到两支光纤光栅(II型),经过温度、压力调谐后被反射回来,再经过  $3 \text{ dB}$  耦合器入射到解调仪(MS125型),最后将解调后的信号传送到计算机中,通过配套软件将波形、波长等信息显示出来。

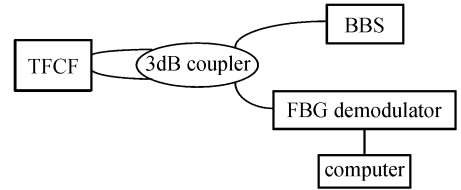


图2 实验系统图

Fig. 2 Experimental system

### 4.2 压力实验

实验过程如下:室温下,从  $0 \text{ MPa}$  开始逐渐升压,每隔  $3 \text{ MPa}$  记录一次光栅的中心波长,达到最大压力值  $60 \text{ MPa}$  后,逐渐减压,减压过程中,每隔  $3 \text{ MPa}$  记录一次光栅的中心波长,降至  $0 \text{ MPa}$  结束。

实验重复进行5次,整个过程用标准压力表进行压力监测。对  $\text{FBG}_1, \text{FBG}_2$  的5次加压和减压波长分别取平均值。图3给出取平均值后,  $\text{FBG}_1$  和  $\text{FBG}_2$  的中心波长随压力变化的特性曲线。

从图3(a)中直接看出,在  $0 \sim 60 \text{ MPa}$   $\text{FBG}_1$  的加压减压曲线基本重合;加压、减压过程中,同一载荷下光栅的中心波长值相同,且线性度很好。这一结果表明优选的镍基合金迟滞效应很小,能够有效降低传感器的压力迟滞误差,实现压力的单值输入、单值输出封装。传感器的压力灵敏度系数是  $0.0136 \text{ nm/MPa}$ , 压力特性曲线的拟合方程为:  $\lambda_2 = 0.0136 p + 1548.092$ 。

对于  $\text{FBG}_2$ , 从图3(b)中可知,其升压、降压特性曲线是一条水平的直线,说明压力改变时,  $\text{FBG}_2$  的中心波长没有改变,即  $\text{FBG}_2$  不受压力的调谐,这为温度补偿提供良好的前提条件。

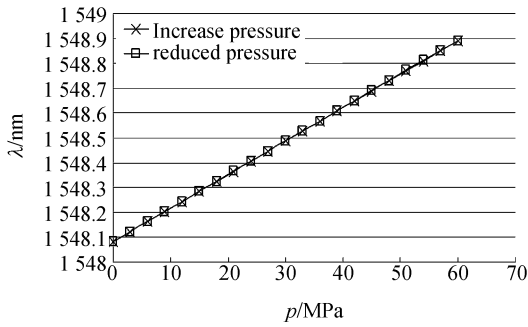
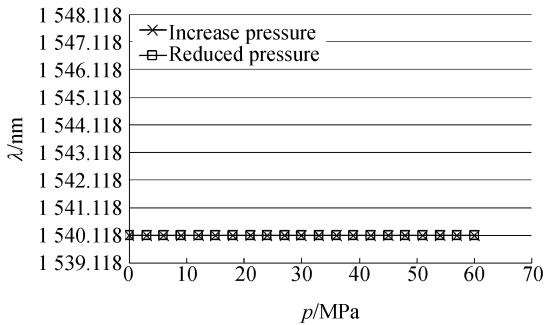
(a) FBG<sub>1</sub> 的中心波长与压力的关系(a) Relations between pressure and wavelength shift of FBG<sub>1</sub>(b) FBG<sub>2</sub> 的中心波长与压力的关系(b) Relations between pressures and wavelength shifts of FBG<sub>2</sub>图 3 室温下 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的反射波中心波长随压强变化的特性曲线

Fig. 3 Relations between pressure and wavelength shift of two FBGs

### 4.3 温度实验

实验过程如下:常压下,保持压强不变,从室温开始逐渐升温,每升高 20 °C 记录一次 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的中心波长,待温度达到 350 °C 后,开始降温,每降低 20 °C 记录 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的中心波长,降至室温结束。实验重复进行 5 次。分别对 FBG<sub>1</sub> 与 FBG<sub>2</sub> 5 次升温中心波长、降温中心波长取平均值,得到如图 4 所示的波长与温度的关系。

由图 4 可得到如下信息:第一,传感器可在 0 ~ 350 °C 实现温度的线性测量,升温降温曲线几乎完全重合,说明温度迟滞误差、非线性误差非常小。第二,随着温度的升高,FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的反射波长不断向长波方向漂移,拟合方程分别是:  $\lambda_1 = 0.020 1t + 1548.1$  和  $\lambda_2 = 0.020 1t + 1540.1$ ,

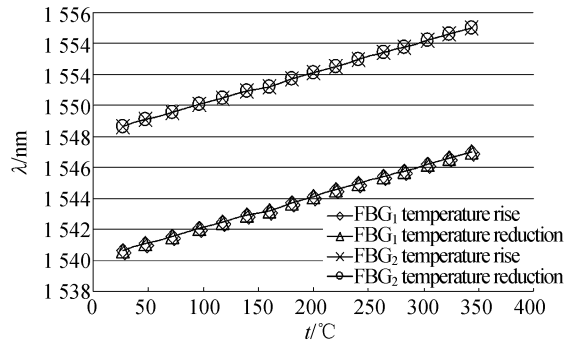
图 4 同压下 FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的反射波长随温度变化的特性曲线

Fig. 4 Relations between temperatures and wavelength shifts of two FBGs under the same pressure

二者对温度响应灵敏度相同,均为 0.020 1 nm/°C,线性拟合度分别为 0.999 8 和 0.999 8。实验结果说明:在同一温度场中,温度变化量相同时,FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的波长变化量也相同,这为温度补偿提供了良好的条件。

### 4.4 温度压力试验

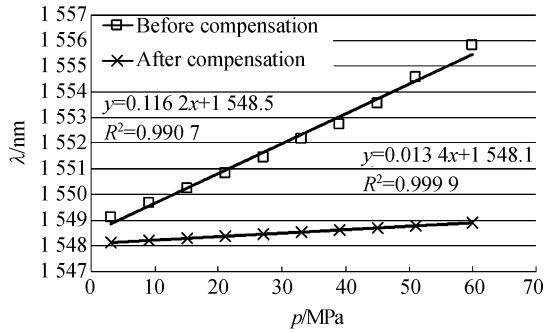
温度压力实验过程如下:将传感器放入高温高压反应釜中,常温、常压状态下,同时升温(每次升高 10 °C)、升压(每次升高 1.5 MPa),达到最高温度值和最大压力值后逐渐卸载,卸载步长同加载步长相同。选取加载过程中 FBG<sub>1</sub> 部分实验点,如表 1 所示。

表 1 实验点

Tab. 1 Experiment points

实验点	温度 / °C	压强 / MPa	温度补偿前 波长/nm	温度补偿后 波长/nm
1	47.7	3	1 549.094 8	1 548.121 3
2	72.1	9	1 549.666 3	1 548.212 7
3	96.6	15	1 550.239 7	1 548.283 8
4	117.9	21	1 550.848 8	1 548.364 6
5	139.2	27	1 551.458 0	1 548.445 5
6	160.2	33	1 552.199 7	1 548.526 7
7	199.8	39	1 552.738 0	1 548.607 9
8	247.0	45	1 553.541 9	1 548.688 8
9	303.3	51	1 554.580 4	1 548.769 7
10	351.8	60	1 555.815 9	1 548.891 5

根据表 1 中的数据绘得图 5。由图可知,温度补偿前,FBG<sub>1</sub> 的压力灵敏度为 0.116 2 nm/

图5 FBG<sub>1</sub> 温度补偿前后的特性曲线Fig.5 Curves of FBG<sub>1</sub> before and after temperature compensations

MPa,温度补偿后其压力灵敏度系数是 0.013 6 nm/MPa,二者相差 8.5 倍,并且随着温度和压力的升高,二者的波长差越来越大,即测量误差也越来越大,故必须实施温度补偿,否则无法实现对压力的准确检测。

上述 3 个实验结果表明,所设计的传感器实现了大量程、单值线性和温度补偿一体化的封装。

## 5 误差分析

实验结果分析中只给出传感器温度和压力的迟滞误差、非线性误差的定性分析,下面将给出各项误差的定量分析。

### 5.1 传感器的灵敏度误差

经过理论计算,传感器的压力灵敏度的理论值为 0.013 8 nm/MPa,而实验值为 0.013 6 nm/MPa,二者不一致。主要原因有两个:一是 FBG<sub>1</sub> 与膜片没有实现刚性耦联,即耦联系数  $\eta < 1$ ;二是实验过程中温度场达不到理想的稳态,总是存在温漂。传感器的温度灵敏度的理论值为 0.020 7 nm/°C,实验值为 0.020 1 nm/°C,两者相对误差为 2.89%。原因是光纤光栅与机敏材料的热膨胀系数不同,当温度变化使得机敏材料发生膨胀形变时,并没有将全部形变传递给光纤光栅,引起光栅同等程度的形变。

实验中,FBG<sub>1</sub> 和 FBG<sub>2</sub> 的最大波长漂移量分别为 7.116 5 nm 和 7.107 3 nm。若使用 40 nm 的宽带光源,可串接 5 个同样的传感器,同时对一口高温高压油井 5 个点的温度和压力进行检测。

### 5.2 传感器的静态误差

根据对传感器温度静态误差贡献的大小,只考虑温度测量的非线性误差、迟滞误差、重复性误差。

如式(4)<sup>[15]</sup>

$$\xi_L = \frac{|(\Delta\lambda_L)_{\max}|}{|B(t_{\max} - t_{\min})|} \times 100\%, \quad (4)$$

式中  $\xi_L$  为传感器的温度非线性误差,  $(\Delta\lambda_L)_{\max}$  为波长平均输出值与参考值的最大偏差值,  $B$  为选定的参考直线的斜率。在 273.5 °C 时,  $(\Delta\lambda_L)_{\max}$  值最大。实验测得 FBG<sub>1</sub> 的波长为 1 543.004 5 nm,而理论值为 1 543.104 9 nm,代入式(4)算得传感器的温度非线性误差为 0.028%。

根据式(5)计算传感器的温度迟滞误差:

$$\xi_H = \frac{|(\Delta\lambda_H)_{\max}|}{2|B(t_{\max} - t_{\min})|} \times 100\%, \quad (5)$$

其中  $\xi_H$  为传感器的温度迟滞误差,  $(\Delta\lambda_H)_{\max}$  为升温、降温的最大差值,在 239.2 °C 时,  $(\Delta\lambda_H)_{\max}$  的值为 0.014 5 nm,参考直线的斜率为 0.9998,代入式(5)求得传感器的温度迟滞误差为 0.003%。

根据式(6)计算传感器的温度重复性误差,

$$\xi_R = \frac{3s}{|B(t_{\max} - t_{\min})|} \times 100\%, \quad (6)$$

式中  $\xi_R$  表示温度的重复性误差,其中  $s = \sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (s_{ui}^2 + s_{di}^2)}$ ,  $s_{ui} = \frac{W_{ui}}{d_m}$ ,  $s_{di} = \frac{W_{di}}{d_m}$ ,  $W_{ui}$ 、 $W_{di}$  分别表示升温、降温行程的第  $i$  个测点的  $m$  个标值中的最大值与最小值之差,  $s_{ui}$ 、 $s_{di}$  分别表示升温、降温的第  $i$  个测点子样标准偏差,  $d_m$ 、 $s$  分别表示极差系数和整个测试过程的标准偏差。重复进行 5 次实验即  $n=5$ ,  $d_5=2.48$ ,  $s=0.006 8$ ,求得重复性误差为 0.006%。

根据式(7),

$$\xi = \sqrt{\xi_L^2 + \xi_H^2 + \xi_R^2}, \quad (7)$$

算得传感器的温度静态误差为 0.029%。

同理,按照对传感器压力静态误差贡献的大小,也只考虑传感器的压力非线性误差、迟滞误差和重复性误差。

此时,  $\xi_L$  表示传感器的压力非线性误差,在 36 MPa 时输出的波长值与选定的参考值之差最大,最大差值  $(\Delta\lambda_L)_{\max}$  为 0.022 2 nm,代入式(8)有

$$\xi_L = \frac{|\Delta\lambda_L|_{\max}}{|B(p_{\max} - p_{\min})|} \times 100\% , \quad (8)$$

算出压力传感器的非线性误差是 0.037%。

式中  $\xi_H$  表示传感器的压力迟滞误差,在 34 MPa 时  $|\Delta\lambda_L|_{\max} = 0.0234 \text{ nm}$ , 带入式(9),有

$$\xi_H = \frac{|\Delta\lambda_H|_{\max}}{2|B(p_{\max} - p_{\min})|} \times 100\% , \quad (9)$$

得出压力传感器的迟滞误差 0.02%。

$\xi_R$  表示压力传感器的重复性误差,其中  $s =$

$\sqrt{\frac{1}{2n} \sum_{i=1}^n (s_{ui}^2 + s_{di}^2)}$ ,  $s_{ui} = \frac{W_{ui}}{d_m}$ ,  $s_{di} = \frac{W_{di}}{d_m}$ ,  $W_{ui}$ 、 $W_{di}$  分别表示加压、减压行程的第  $i$  个测点的  $m$  个标值中的最大值与最小值之差,  $s_{ui}$ 、 $s_{di}$  分别表示正、反行程的第  $i$  个测点子样标准偏差,  $d_m$ 、 $s$  分别表示极差系数和整个测试过程的标准偏差。实验测试过程进行了 5 个循环,即  $n = 5$ ,  $d_s = 2.48$ 、 $s = 0.0068$ , 代入(10)中,

$$\xi_R = \frac{3s}{|B(p_{\max} - p_{\min})|} \times 100\% . \quad (10)$$

## 参考文献:

- [1] MICHAEL N T, KARSTEK W, DANIELD. Smart sensing of aviation structures with fiber-optic Bragg grating sensors[C]. *SPIE*, 2000, 3986: 134-143.
- [2] 郭团, 乔学光, 贾振安, 等. 光纤光栅传感技术及其在石油工业中的应用[J]. *测试技术学报*, 2004, 18(3): 208-213.
- GUO T, QIAO X G, JIA ZH AN, *et al.*. The application of FBG sensor in oil [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18(3): 208-213. (in Chinese)
- [3] 赵勇, 廖延彪. 激光光纤压力检测技术在海洋石油勘探中的应用研究[J]. *中国激光*, 2002, A29(10): 955-958.
- ZHAO Y, LIAO Y B. Research on the laser fiber-optic pressure measurement technique for offshore oil exploration [J]. *Chinese Lasers*, 2002, A29(10): 955-958. (in Chinese)
- [4] 吴永红, 邵长江, 屈文俊, 等. 大型工程长期健康监测用 FBG 应变传感器的研究[J]. *光电子·激光*, 2010, 21(4): 481-484.
- WU Y H, SHAO CH J, QU W J, *et al.*. Study on FBG strain sensor for application to large engineering long term health monitoring[J]. *Optoelectronics · Laser*, 2010, 21(4): 481-484. (in Chinese)

得到压力传感器的重复性误差为 0.02%。将传感器的压力非线性误差、迟滞误差和重复性误差带入式(7)得传感器的压力静态误差为 0.046%。

## 6 结 论

本文设计了温度补偿式光纤光栅温度压力双参量传感系统。选用某种恒弹性镍基合金作为光纤光栅传感器封装的基底材料,增强了传感器在高温、高压、有腐蚀性气体和液体、易氧化的恶劣环境中长期服役的能力。该传感器的结构简单,能够同时在压力 0~60 MPa, 温度 0~350 °C 下实现线性区分测量。压力灵敏度系数为 0.0136 nm/MPa, 温度灵敏度系数为 0.0201 nm/°C; 对应的静态误差分别为 0.046% 和 0.029%, 可推广应用于高温高压油气井和深海油气井的温度压力检测与监测。

- [5] 桑新柱, 余重秀, 颜纷纷, 等. 基于光纤布拉格光栅的化学传感器[J]. *光学精密工程*, 2006, 14(5): 771-774.
- SANG X ZH, YU CH X, YAN F F, *et al.*. Chemical sensor based on a fiber Bragg grating[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3): 327-330. (in Chinese)
- [6] 李俊, 吴瑾, 高俊启. 一种检测钢筋腐蚀的光纤光栅传感器的研究[J]. *光谱学与光谱分析*, 2010, 30(1): 283-286.
- LI J, WU J GAO J Q. Study of an Optical Fiber Sensor for Monitoring Corrosion of Reinforcing Steel [J]. *Spectroscopy and Spectral Analysis*, 2010, 30(1): 283-286. (in Chinese)
- [7] 王静, 刘斌, 隋青美, 等. 新型 FBG 渗压传感器在隧道涌水模型中的应用[J]. *光电子·激光* 2009, 20(10): 1286-1289.
- WANG J, LIU BIN, SUI Q M, *et al.*. Application of a novel fiber-optic grating seepage pressure sensor in tunnel water gushing model[J]. *Optoelectronics · Laser*, 2009, 20(10): 1286-1289. (in Chinese)
- [8] DANIE B, LOTHAR S, MICHAEL N T, *et al.*. Test of a fiber Bragg grating sensor network for commercial aircraft structures[C]. *OFS-16*, 2002: 55-58.

- [9] SEAN C, JASON M. BRIDGE structural health monitoring system using fiber grating sensors: development and preparation for a permanent installation[J]. *SPIE*, 2004,391:61-71.
- [10] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(4): 473-477.  
LI L, LIN, Y C, FU L H, *et al.*. Research on spatial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)
- [11] 郭明金,姜德生,袁宏才. 两种封装的光纤光栅温度传感器的低温特性[J]. *光学精密工程*, 2007, 15(3):327-330.  
GUO M J, JIANG D SH. Low temperature properties of fiber Bragg grating temperature sensors with two package methods [J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(3):327-330. (in Chinese)
- [12] 彭保进,赵勇,孟庆尧,等. 具有温度补偿的光纤光栅压力传感器 [J]. *清华大学学报(自然科学版)* 2006,46(4):484-487.  
PENG B J, ZHAO Y, MEN Q R, *et al.*. Fiber Bragg grating high-pressure sensor with temperature compensation [J]. *Tsinghua Univ (Sci & Tech)*. 2006,46(4):484-487. (in Chinese)
- [13] 詹亚歌,向世清,何红,等. 光纤光栅高温传感器的研究[J]. *中国激光*, 2005,32(9):1235-1238.  
ZHN Y G, XIANG SH Q, SH Q, *et al.*. Study on High Temperature Optic Fiber Grating Sensor [J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2005, 32(9): 1235-1238. (in Chinese)
- [14] 樊尚春. 传感器技术及应用[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2004:16-26.  
FAN SH CH. *Sensor Technology and Application*[M]. BeiJing: Bei Hang University Pressure, 2004:16-26. (in Chinese)
- [15] 孙建民,杨清梅. 传感器技术[M]. 北京:清华大学出版社,2005,7-11.  
SUN J M, YANG Q M. *Sensor Technogy*[M]. Bei Jing: TSINGHUA UNIVERSITY PRESS, 2005,7-11. (in Chinese)

#### 作者简介:



宋娟(1984—),女,山东青岛人,硕士研究生,2008年于青岛大学获得学士学位,主要从事光纤传感与检测方面的研究。E-mail:a19840308@126.com



邬华春(1985—)湖北松滋人,2007年、2010年于西安石油大学分别获得学士、硕士学位,主要从事光纤传感与检测方面的研究。E-mail:wu\_huachun@126.com



冯德全(1978—),男,甘肃人,讲师,2001年于陕西师范大学获得学士学位,2007年于西北大学获得硕士学位,主要从事光纤传感与通讯方面的研究。E-mail:dequanfeng@xsyu.edu.cn



王宏亮(1951—),男,陕西横山人,教授,硕士生导师,1976年于西北大学物理专业毕业,主要从事光纤传感与光功能材料方面的研究。E-mail: whl@xsyu.edu.cn

#### 导师简介: