

光纤布拉格光栅压力传感器的研究

陈代英 莫德举

(北京化工大学信息科学与技术学院, 北京 100029)

摘要: 简要介绍了光纤布拉格光栅的传感原理, 理论分析了弹性元件平膜片的受压变形规则, 并将光纤布拉格光栅粘贴在自行设计的不锈钢平膜片上, 构成了基于膜片的光纤布拉格光栅压力传感器, 给出了光纤布拉格光栅的布拉格波长偏移量与压力的关系表达式。实验结果表明, 光纤布拉格光栅压力灵敏度系数达到 2.9 pm/kPa , 与理论分析值基本相符。另外, 传感器在所测压力范围内呈现出很好的线性特性、重复性, 适合于易燃易爆场合的压力测量。

关键词: 光纤布拉格光栅; 压力传感器; 平膜片

中图分类号: TP212.1

压力是工业生产过程中需要检测的基本参数之一。传统的压力测量方法主要有液柱式、负载平衡式和弹性元件式。其中, 弹性元件式测压方法得到了最广泛的应用, 主要原理是弹性元件在压力的作用下变形产生位移或应变, 通过精确检测这个位移或应变达到测量压力的目的。现在市场上的压力仪表、传感器基本都属于弹性元件式测压原理, 具体有指针式、应变式、电容式、压电式等^[1]。光纤布拉格光栅(FBG)传感技术继承了光纤传感的各种优点, 又具有波长编码、波分复用(WDM)等优点^[2]。因此, 自1989年Morey首次提出将其用作传感以来, FBG传感技术得到了迅速发展^[3]。

本文将FBG与常用的弹性元件膜片相结合, 构成FBG式压力传感器, 将FBG应用扩展到压力测量领域。这种传感器非常适用于石油化工生产中易燃易爆场合的压力测量, 具有很好的应用前景。

1 FBG原理与传感器结构设计

1.1 FBG工作原理

FBG是利用光纤纤芯材料的光敏性在紫外线下形成的折射率呈周期性变化的一段光纤。当一束光进入光纤光栅后, 由于光纤纤芯折射率呈周期性变化, 波长满足一定条件的光会产生干涉叠加反射, 这一波长称为布拉格波长。FBG的布拉格波长由

下式确定^[4]

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

式中, λ_B 为FBG的反射波长, 即布拉格波长, n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率, Λ 为FBG的周期。

由(1)可看出, 布拉格波长与光纤纤芯的有效折射率 n_{eff} 或布拉格光栅的周期 Λ 成正比关系。温度和应力的变化都将引起这两个参数发生变化, 布拉格波长 λ_B 随之发生偏移, 这是FBG传感的基本原理。温度和应变引起的布拉格波长的偏移 $\Delta\lambda_B$ 可由下式表示^[5]

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = (1 - P_e) \epsilon + (\alpha + \beta) \cdot T \quad (2)$$

式中, ϵ 为FBG轴向应变, P_e 为光纤的光弹系数, α 为光纤的热膨胀系数, β 为光纤的热光系数, T 为温度变化量。

1.2 平膜片应变规则

圆形平膜片两侧存在压差 p 时, 在低压侧表面每一点都会受到一个径向应力 s_r 和切向应力 s_t ^[6]

$$s_r = \frac{3pR^2}{8t^2} \left[\left(\frac{1}{r} + 1 \right) - \left(\frac{3}{r} \right) + 1 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (3a)$$

$$s_t = \frac{3pR^2}{8t^2} \left[\left(\frac{1}{r} + 1 \right) - \left(\frac{1}{r} \right) + 3 \left(\frac{r}{R} \right)^2 \right] \quad (3b)$$

式中, p 是膜片两侧所受到的压力差, R 为膜片的半径, ν 为膜片材料的波松比, t 为膜片的厚度, r 为点距膜片圆心的距离。

径向应力和切向应力使得膜片在每一点产生一个径向应变 ϵ_r 和切向应变 ϵ_t ^[6]

$$\epsilon_r = \frac{3p}{8t^2 E} (1 - \nu^2) (R^2 - 3r^2) \quad (4a)$$

收稿日期: 2006-09-11

第一作者: 男, 1983年生, 硕士生

E-mail: chendaiying@sina.com

$$\epsilon_t = \frac{3p}{8t^2 E} (1 - \nu^2) (R^2 - r^2) \quad (4b)$$

式中, E 为膜片材料的弹性模量。

应变分布如图 1 所示。

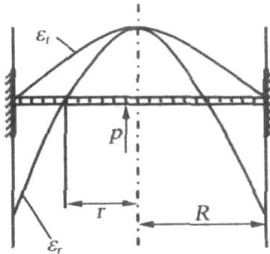


图 1 膜片表面应变分布图

Fig. 1 Strain on the diaphragm surface

由式(3a)、(3b)可知,膜片边缘处的径向应力最大,如式(5)所示。设计膜片时,此处的应力不应超过材料的最大允许应力

$$s_r = - \frac{3p}{4t^2} R^2 \quad (5)$$

由应变分布图及式(4a)、(4b)可知,膜片中心径向应变和切向应变相等,为正最大值,可由下式表示

$$r = \epsilon_t = \frac{3p}{8t^2 E} (1 - \nu^2) R^2 \quad (6)$$

1.3 传感器结构设计

光纤光栅压力传感器结构如图 2 所示。根据应变分布规律,将 FBG 沿直径方向粘贴在膜片中心附近,粘贴示意图如图 3 所示。

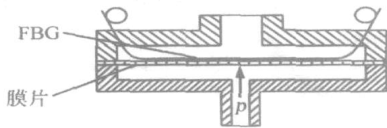


图 2 FBG 传感器结构图

Fig. 2 Configuration of the FBG sensor

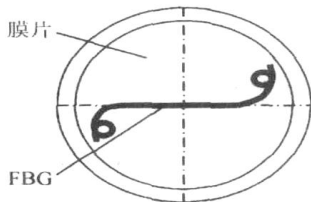


图 3 光纤光栅粘贴示意图

Fig. 3 Diaphragm with the fiber Bragg grating (FBG)

膜片在压力的作用下表面产生应变,FBG 粘贴在膜片的受拉面,主要受径向应变作用,布拉格波长发生偏移,压力值转化为 FBG 的布拉格波长偏移量,这就是 FBG 压力传感器的工作原理。由于敏感

元件 FBG 有一定长度,通常不到 1 cm,由式(4a)、(6)可知,FBG 各点应变不同,平均应变可由下式等效表示

$$= K \frac{3p}{8t^2 E} (1 - \nu^2) R^2 \quad (7)$$

式中, K 为一系数,其值与膜片尺寸、FBG 粘贴位置有关。

假设环境温度不变时,FBG 只受应变作用时,由(2)知,布拉格波长的偏移量为

$$\Delta \lambda_B = (1 - P_e) \cdot \lambda_B \quad (8)$$

将(7)代入(8)得

$$\Delta \lambda_B = K \frac{3p}{8t^2 E} (1 - \nu^2) R^2 \cdot (1 - P_e) \lambda_B \quad (9)$$

可看到,布拉格波长偏移量 $\Delta \lambda_B$ 与压力 p 成线性关系,式(9)可称为 FBG 压力传感器的理论模型。

2 实验建立与结果分析

2.1 实验建立

实验装置如图 4 所示。膜片材质为 316 不锈钢(0Cr17Ni12Mo2),弹性模量为 196 GPa,厚度为 0.7 mm,直径为 52 mm。FBG 的布拉格波长为 1311 nm。实验中用到的宽带光源为 LED 模块,中心波长为 1310 nm,FWHM 为 90 nm,输出功率 30μW(驱动电流 100 mA)。光谱仪(OSA)采用 Agilent 公司的 86142B。压力产生装置使用活塞式压力计(型号 YU-6)。压力传感器通过 M20X1.5 螺纹接口安装到活塞式压力计上。

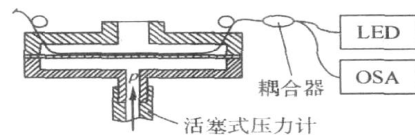


图 4 FBG 实验装置图

Fig. 4 The experimental configuration of FBG

LED 发出覆盖 FBG 布拉格波长的宽带光,通过 1X2 的耦合器照射进入 FBG,FBG 反射回一束中心波长为布拉格波长的窄带光,这束发射光通过耦合器进入光谱仪(OSA)中,由光谱仪可读出布拉格波长。活塞式压力计通过压缩内部工作介质(蓖麻油)产生压力,膜片在压力的作用下发生变形,FBG 感应膜片变形,布拉格波长发生偏移,新的布拉格波长可由光谱仪读出。

316 不锈钢的屈服强度大于 205 MPa,由式(5)可计算出,所用膜片承受的最大压力可达到 0.2

MPa。实验时,通过活塞式压力计加压,从0.04 MPa 开始,每加0.01 MPa 做一次测量,至0.20 MPa 开始减压,同样每减压0.01 MPa 做一次测量。

2.2 结果分析

图5为膜片所受压力与布拉格波长的实验数据图,由图5可以看出FBG压力传感器的重复性、线性特性均很好。

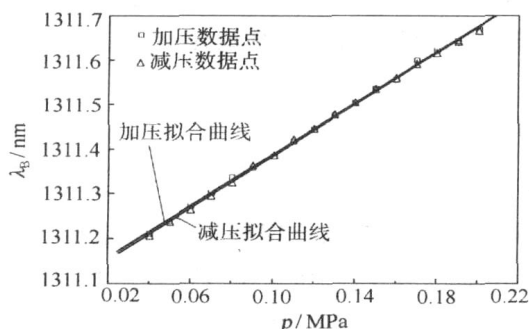


图5 FBG压力响应图

Fig. 5 Response of the FBG under pressure

升压过程中,布拉格波长与压力的线性拟合方程为: $\lambda_B = 2.88971 \times 10^{-6} p + 1311.09806$; 相关系数为0.99957。减压过程中,布拉格波长与压力的线性拟合方程为: $\lambda_B = 2.90882 \times 10^{-6} p + 1311.09212$; 相关系数为0.99948。

由拟合方程可看出,实验中的传感器灵敏度约为 2.9×10^{-12} m/kPa。将膜片参数值代入式(9),得到实验中FBG压力传感器的理论灵敏度应约为 2.4×10^{-12} m/kPa。两者稍有偏差,经分析,原因为实验中所用膜片为夹装式安装,由于密封垫圈的问

题,使得膜片的等效直径变大。经验证,膜片有效直径由52 mm 约变为57 mm,而这个值符合膜片、密封垫圈和夹装外壳的实际尺寸限制。所以,实验与理论是基本相符的。

实验中传感器的测压范围为0~0.2 MPa,现在一般FBG解调仪的精度为 1×10^{-12} m,所以实验所制传感器分辨率可以达到0.15% FS。由于实验中膜片采用夹装式安装,紧密耦合程度、密封垫圈的软硬度等都会对膜片性能有很大影响,因此传感器的可靠性还有待进一步研究。如果采用一体化的膜片设计,则会大大提高传感器的性能。

参考文献:

- [1] WEBSTER J G. The measurement, instrumentation and sensor handbook [M]. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, 1999.
- [2] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57 - 79.
- [3] RAO Yunjiang. Recent progress in applications of fibre Bragg grating sensors[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1999, 31(4): 297 - 324.
- [4] HECHT J. 光纤光学[M]. 4版. 北京:人民邮电出版社, 2004: 123 - 129.
- [5] LIM J, YANG Qingping, JONES B E, et al. DP flow sensor using optical fibre Bragg grating[J]. Sensors and Actuators, 2001, 92(1-3): 102 - 108.
- [6] 德贝林. 测量系统应用与设计[M]. 北京:机械工业出版社, 2005.

Study of fiber bragg grating pressure sensor

CHEN Dai Ying MO DeJu

(College of Information Science and Technology, Beijing University of Chemical Technology, Beijing 100029, China)

Abstract: The principles of a fiber Bragg grating sensor are presented and the theory of deformation of the flat diaphragm under pressure is described in detail. The fiber Bragg grating was bonded to the flat diaphragm, and a fiber Bragg grating pressure sensor based on the diaphragm was thus obtained. The relationship between the shift of the Bragg wavelength of the fiber Bragg grating and the pressure was derived. Very good agreement was found between the experimental linear coefficient and the theoretical value. The experimental fiber Bragg grating sensor shows a high degree of linearity and a low hysteresis effect and is suitable for use in harsh environments.

Key words: fiber bragg grating (FBG); pressure sensor; flat diaphragm