

耐高压光纤 Bragg 光栅压力传感技术研究*

孙安 乔学光 贾振安 郭团 陈长勇

(西安石油大学光纤传感实验室,西安 710065)

摘要 分析了聚合物封装光纤光栅的压力响应特性,通过采用特殊聚合物材料将光纤光栅封装于金属套管中,并通过在金属套管预涂覆一层软弹性材料,以消除封装过程中由于聚合物固化收缩以及聚合物与套管壁粘接与摩擦产生的光纤光栅啁啾化,改善了光纤光栅压力响应特性.封装后的光纤光栅压力响应灵敏度为 0.036 nm/MP,具有良好的线性,压力测量范围可达 40 MP 以上.

关键词 光纤光栅;聚合物封装;压力传感器;耐高压

中图分类号 TN253 **文献标识码** A

0 引言

自 1989 年 Morey 首次报道可将光纤光栅用作传感后,光纤光栅压力和温度传感器的理论以及实际研究一直在进行着.但是由于裸光栅本身的易损坏以及响应灵敏度低等缺点,光纤光栅一般不能直接用于各种工程测量环境中.人们通过建立不同封装光纤光栅传感模型,使其能够测量压力、温度、及其它一些物理参量.对于压力的测量,最常用的是采用聚合物封装来实现对光纤光栅的保护以及增敏.很多方案主要强调对光纤光栅的增敏,然而实际上缩小了传感器的测量范围.裸光纤光栅的压力响应灵敏度约为 0.003 nm/MP,当采用有机弹性体对光纤光栅封装后,光纤光栅的压力响应灵敏度可以提高很多^[1-3],能够用于一些测量精度要求较高的现场,但其测量范围一般较小,因此,当光纤光栅用于高温、高压如油气井下等动态变化范围较大的环境中,此类方案远不能满足实际需要.本文采用特殊聚合物材料,通过特殊的封装工艺对光纤光栅灌封,消除了由于聚合物固化收缩以及聚合物与套管壁粘接与摩擦产生的光纤光栅啁啾化,并改善了封装光纤光栅的压力响应特性.实验结果表明,此聚合物与光纤光栅的粘接较好,可用于测量大范围压力变化.通过改进封装工艺后,光纤光栅的压力响应特性稳定,反射波形较理想,由于实验条件限制,实验中传感器所测量的压力范围达到了 40 MP.按照原理推断,此类光纤光栅传感器可测量 60 MP 以上压力,因此可满足很多诸如油气井下等高温高

压环境的要求.

1 原理

当对聚合物封装光纤 Bragg 光栅施加压力时,光纤光栅反射峰中心波长漂移为^[4]

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)\epsilon \quad (1)$$

式中, ϵ 为光纤光栅轴向应变变化, P_e 为光纤光栅弹光系数.对于掺锗石英光纤来说^[3], P_e 取 0.22.

用聚合物材料灌封光纤光栅于金属套管中,结构如图 1.

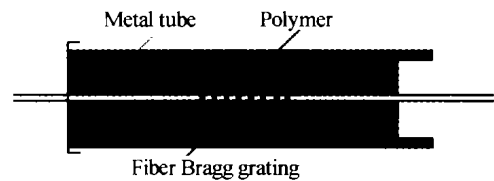


图 1 聚合物封装光纤光栅结构

Fig. 1 Schematic diagram of polymer packaged FBG

设轴向为 Z 方向,径向为 X、Y 方向,根据广义虎克定律可知^[5]

$$\begin{aligned} \epsilon_x &= [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \\ \epsilon_y &= [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]/E \\ \epsilon_z &= [\sigma_z - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \end{aligned} \quad (2)$$

在这种结构下,由于金属管壁的屏蔽使径向无应变产生,聚合物材料只能产生轴向应变,所以当所施加压力为 P 时,径向应变 ϵ_x 与 ϵ_y 为 0,不考虑聚合物材料与筒壁间摩擦,轴向应力 σ_z 为 P/A , A 为金属套管的面积, μ 为聚合物材料的泊松比系数, E 为聚合物材料的弹性模量.式(2)可写为

$$\begin{aligned} 0 &= [\sigma_x - \mu(\sigma_y + \sigma_z)]/E \\ 0 &= [\sigma_y - \mu(\sigma_x + \sigma_z)]/E \\ \epsilon_z &= [P/A - \mu(\sigma_x + \sigma_y)]/E \end{aligned} \quad (3)$$

最后解得

$$\epsilon_z = [1 - 2\mu^2/(1 - \mu)]P/AE \quad (4)$$

将式(4)代入(1)中,则式(1)变为

$$\Delta\lambda_B/\lambda_B = (1 - P_e)[1 - 2\mu^2/(1 - \mu)]P/AE \quad (5)$$

*国家高科技 863 计划(2002AA313150)、国家自然科学基金(69877025)、国家教育部科学技术重点项目(02190)、陕西省教育厅项目(02JK158)和西安市工业科技攻关计划项目(GG200126)资助

Tel: 029-88382746 Email: sunan_1978@163.com

收稿日期: 2003-12-15

令

$(1 - P_c) [1 - 2\mu^2 / (1 - \mu)] / AE = K$
式(5)变为

$$\Delta\lambda_B / \lambda_B = KP \quad (6)$$

从推导式中可以看出,此类结构的封装可保证聚合物材料的应变与压力呈线性关系. 由于聚合物材料热固化过程中会发生收缩,导致光纤光栅反射波形啁啾化,而且由于封装材料与金属套管会产生粘接与摩擦,造成封装光纤光栅对压力的非线性响应. 为了减小封装材料与金属筒壁的粘接及摩擦,可采用某种导热型有机硅胶,在灌封光纤光栅前,先对金属内筒壁进行涂覆并固化,结构如图2. 由于这种导热胶属于软弹性体,与金属粘接性较差,且导热性好,与封装材料无任何化学反应,所以对封装光栅的温度响应特性以及其它性能影响不大. 这样可以有效的克服封装材料与金属筒壁的粘接以及摩擦,改善光纤光栅的压力响应特性.

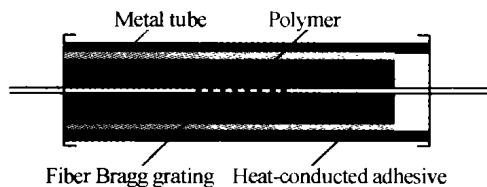


图2 改进后的封装光纤光栅压力传感器结构
Fig. 2 Improved structure of polymer packaged FBG pressure sensor

观察改善后的封装光纤光栅反射谱,带宽基本不变,保持在0.2 nm左右,但是由于聚合物材料本身的固化收缩,光纤光栅反射峰中心波长减小了约5 nm,因此,通过预涂覆材料,可以有效克服聚合物固化收缩带来的光纤光栅反射峰啁啾化,使其仅发生波长漂移而无啁啾现象.

2 实验及结果分析

封装光纤光栅的压力响应测试实验装置如图3.

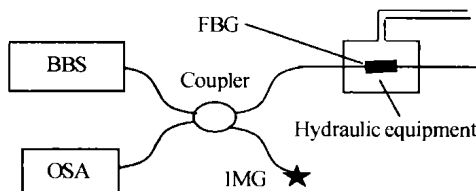


图3 封装光纤光栅压力测量结构
Fig. 3 Experimental setup for the proposed pressure measurement of coated FBG

将封装光纤光栅放入油压罐中,宽带光源(BBS)发出的光经3 dB耦合器入射到光纤光栅中,被反射后又经3dB耦合器送到光谱分析仪(OSA),通过光谱分析仪观察光纤光栅反射峰中心波长的变化.

掺铒光纤激光器的工作电流为15 mA,峰值波

长为 $\lambda = 1532$ nm,带宽40 nm. 与-3 dB耦合器连接的光谱仪OSA分辨率为0.05 nm,用以监测光纤光栅反射峰值中心波长 λ_c 和带宽 $\Delta\lambda_{3dB}$.

实验采用逐步加压,由0 MP开始,每次加压幅度为1 MP,然后逐步降至0 MP. 由于油压罐本身限制,最大压力只能加至40 MP.

封装后光纤光栅的压力响应趋势如图4.

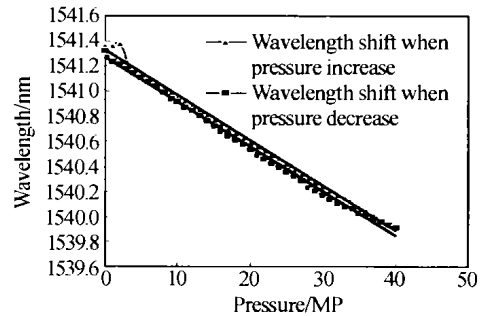


图4 封装光纤光栅压力响应曲线
Fig. 4 Bragg wavelength shift versus pressure for polymer packaged fiber grating

从图4可知,在0~40 MP范围内,光纤光栅压力响应灵敏度达到了0.036 nm/MP,约为裸光纤光栅的10倍,且响应特性较好,线性拟合度达到了0.99,测量误差小于0.5 MP. 重复实验,压力响应趋势基本保持不变. 由于油压罐本身限制,压力只能加至40 MP,但是不难推断出此类传感器压力测量范围可以更大. 通过改进封装工艺,能有效地减小封装材料与金属筒壁的摩擦与粘接,改善了封装光纤光栅的压力响应灵敏度. 这种结构封装的光纤光栅可以很好地实现较大范围内光纤光栅对压力的测量. 在实用中,还需采用温度补偿技术,以消除温度对光纤光栅压力传感器所造成的影响,有关实验正在进行中.

3 结论

聚合物封装作为一种简单、有效的光纤光栅保护以及压力增敏及区分测量方案,可望在光纤光栅传感领域中得到广泛应用. 因此聚合物封装光纤光栅的封装工艺与压力特性研究成为此类传感器研究的关键. 本文采用某种聚合物对光纤光栅进行封装并通过改进封装工艺实现光纤光栅对高压的测量,实验结果表明,光纤光栅的响应灵敏度为0.036 nm/MP,测量范围可达40 MP以上,能使用于某些诸如油气井下等恶劣环境中.

参考文献

- Zhang Ying, Feng Dejun, Liu Zhiguo. High sensitivity pressure sensor using a shielded polymer-coated fiber bragg grating. *Photonics Technology Letter*, 2001, **13**(6): 618 ~ 619

- 2 张颖, 刘治国, 郭转运, 等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性研究. 光学学报, 2002, **22**(1): 89 ~ 91
Zhang Y, Liu Z G, Guo Z Y, *et al.* *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89 ~ 91
- 3 刘云启, 郭转运, 刘治国, 等. 光纤光栅的压力传感特性研究. 光子学报, 1999, **28**(5): 443 ~ 445
Liu Y Q Guo Z Y, Liu Z G, *et al.* *Acta Photonica Sinica*, 1999, **28**(5): 443 ~ 445
- 4 Liu Yunqi, Guo Zhuanyun, Zhang Ying, *et al.* Simultaneous pressure and temperature measurement with polymer-coated fiber Bragg grating. *Electronic Letters*, 2000, **36**(6): 564 ~ 566
- 5 刘鸿文. 材料力学. 北京: 高等教育出版社, 1998. 33 ~ 35
Liu H W. *Mechanics of materials*. Beijing: Higher Education Publisher, 1998. 33 ~ 35

The Study of Fiber Bragg Grating Pressure Sensor with High Pressure-resistance

Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhenan, Guo Tuan, Chen Changyong

Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065

Received date: 2003-12-15

Abstract The pressure responses of polymer packaged fiber Bragg grating (FBG) sensor are analyzed, a special kind of pressure-resistant polymer is used to coat FBG in a metal tube. A kind of soft elastic material is used to reduce the friction between tube and polymer, and to eliminate chirp effect caused by different friction distribution to improve the pressure response of FBG. The pressure response sensitivity is 0.036 nm/MP, the response curve is linear, and the whole measuring range can reach 40 MP at least.

Keywords Fiber Bragg grating; Polymer package; Pressure sensor; Pressure-resistance



Sun An was born on September 21, 1978, in Shihezi City, Xinjiang Province, P. R. China. He earned B. Sc in Electrical automation department from Xi'an Shiyou University in 1997. At present, he is studying toward M. Sc. at Optical Fiber Sensing Laboratory, Xi'an Shiyou University. And his major research fields include optical fiber sensing and optical fiber communication.