

文章编号: 0253-2239(2007)06-0993-6

光纤光栅边孔封装技术*

李智忠^{1,2} 朱海¹ 汤志宏¹ 胡永明²

(¹ 海军潜艇学院, 青岛 266071
² 国防科技大学光电学院, 长沙 410073)

摘要: 提出了一种新型的光纤光栅压力增敏封装技术——边孔封装技术, 它通过改变封装体的几何结构实现了高倍数的压力增敏效果, 较大程度减小了压力增敏倍数对聚合物材料参量的依赖性。采用有限元理论建立了边孔封装结构的压力传感模型, 分析了封装体几何结构变化对封装后压力灵敏度的影响。采用聚合物材料进行了封装制作实验, 测量结果表明封装后光纤光栅的压力灵敏度为 5251 pm/MPa, 是封装前压力灵敏度的 1750 倍, 并将交叉敏感问题改善了近三个数量级, 可满足高精度水下压力测量的应用要求。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅; 压力传感; 边孔封装

中图分类号: TN253 文献标识码: A

Research on Fiber Bragg Grating Side-Hole Package Technology

Li Zhizhong^{1,2} Zhu Hai¹ Tang Zhihong¹ Hu Yongming²

(¹ Navy Submarine Academy, Qingdao 266071
² College of Optoelectronics, National University of Defense Technology, Changsha 410073)

Abstract: The side-hole package technology, a novel fiber grating pressure sensitivity enhancing scheme, is presented. The pressure sensitivity is improved several orders using side-hole package technology, which has reduced the dependence of pressure sensitivity on polymer material parameters through changing package structure. The pressure-sensing model of side-hole package is built using the finite element method and the influence of package geometric configuration on pressure sensitivity is analyzed. The experimentally measured results show that the pressure sensitivity of fiber grating with side-hole package is 5251 pm/MPa, which is 1750 times that of without package. The cross-sensing problem is suppressed by three orders and the sensor can satisfy underwater pressure measurement with high accuracy.

Key words: fiber optics; fiber Bragg grating; pressure sensing; side-hole package

1 引 言

光纤光栅传感技术是近年来传感器领域备受关注的研究方向, 它可实现对温度、应变、压力等物理量的测量, 在国防军事、现代工业和石油化工等领域具有广泛应用前景^[1~3]。但目前光纤光栅压力传感器发展较为缓慢, 限制其发展的主要原因在于: 一是光纤光栅的压力灵敏度非常低^[4], 无法满足高分辨力的压力传感要求; 另外则是光纤光栅传感存在较为严重的交叉敏感问题^[5], 即光纤光栅对温度和压力都敏感, 无法将两者区分, 压力测量过程中的温度

变化会对压力测量结果带来较大误差; 这两个问题都非常突出, 已经限制了光纤光栅压力传感技术的发展。

虽然目前国内外学者提出了众多光纤光栅压力增敏封装方案^[6~11], 如玻璃球放大法^[6]、聚合物封装法^[7~9]、增敏罐封装法^[10]、梯形梁-波纹管法^[11]等; 同时也提出了很多交叉敏感解决方案, 如双波长叠加法、长周期光栅/光纤光栅混合法、温度补偿法、不同光纤对接法、双周期法、超结构光纤光栅法等^[5]。但是大多数方案或者由于压力增敏倍数有

* 国家自然科学基金(60507010)资助课题。

作者简介: 李智忠(1979—), 男, 山东潍坊人, 讲师, 博士, 主要从事光纤传感技术和水下信号处理方面的研究。

E-mail: jirmy@163.com

收稿日期: 2006-08-10; 收到修改稿日期: 2006-11-07

限,或者由于不能同时兼顾二者而不利于实用。针对光纤光栅压力传感中所存在的以上问题,本文提出了一种新型的光纤光栅压力增敏封装方案——边孔封装技术,不仅达到了高倍数的压力增敏效果,还有效改善了光纤光栅的交叉敏感问题,实现了高灵敏度的光纤光栅压力传感。

2 基本原理

目前一种较为可行的光纤光栅压力增敏方案就是采用聚合物材料对光纤光栅进行增敏封装^[7~9],不仅可实现压力增敏,还有效地保护了裸光纤光栅,提高了实用性,因此该方案备受青睐。但是目前人们多采用轴对称封装结构^[7,8]对光纤光栅进行封装,受到聚合物封装材料性能参量的限制,该种封装方案的增敏效果十分有限,不能满足高精度水下压力测量的要求。受到新型边孔光纤压力传感机理^[12]的启发,采用一种新型的非轴对称封装结构——边孔封装结构(如图1所示)对光纤光栅进行了增敏封装,并实现了高倍数的压力增敏效果。

边孔封装结构是在原先轴对称封装体内制作两个空穴(半径为 r ,与光纤中心的距离为 d),这样就形成了边孔结构,在外界各向同性压力作用下,空穴的存在将会在 x 和 y 两个方向上(如图1所示,以光纤中心为坐标原点,两空穴连线方向为 x 轴,其垂直方向为 y 轴)产生截然不同的内部应力,可较大幅度地改变光纤光栅的有效折射率^[8],并产生较大的轴向应变,从而使得光纤光栅中心波长对外界的压力变化变得非常敏感。可见边孔封装结构的实质在于通过非对称的边孔封装结构将各向同性的外界压力转化为各向异性的内部应力,实现了高倍数的应力放大。在轴对称封装技术中要求采用低泊松比、低杨氏模量的封装材料来实现高倍数的压力增

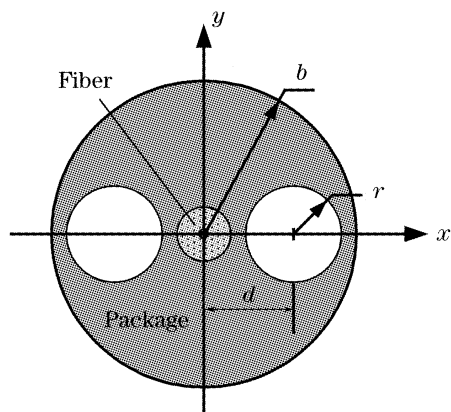


图1 边孔封装结构示意图

Fig. 1 Schematic structure of side-hole package

敏^[8],但是实际的材料很难同时满足这两个条件,从而使得轴对称封装技术的增敏效果十分有限。但是如果采用边孔封装技术,通过非对称结构的合理设计,即使采用同样的封装材料也完全可以实现高倍数的压力增敏,已在实验中得到了证实,这就是边孔封装技术与轴对称封装技术相比的优势所在。

边孔封装技术通过非对称的几何结构实现了高倍数的压力增敏效果,边孔封装结构的复杂性使得无法直接给出光纤光栅中心波长变化与外界压力变化的解析表达式,因此采用有限元理论建立了边孔封装结构的压力传感模型分析封装之后的光纤光栅压力灵敏度。

在采用有限元法^[13]进行计算之前一般都要进行方法验证,首先对阶跃折射率变化的单模光纤的应力分布进行了计算。图2(a)是采用有限元法计算出的阶跃单模光纤的应力分布。其中所用计算参量为^[14]:纤芯半径 $a=7.8\ \mu\text{m}$,包层半径 $b=62.5\ \mu\text{m}$,杨氏模量 $E=7830\ \text{kg}/\text{mm}^2$,泊松比 $\nu=0.186$,纤芯热膨胀系数 $\alpha_1=14.85\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,包层热膨胀系数 $\alpha_2=5.4\times 10^{-7}/^\circ\text{C}$,温度差 $\Delta T=-1000\ ^\circ\text{C}$ 。将图2(a)中的结果与已知的理论结果^[14]进行比较,

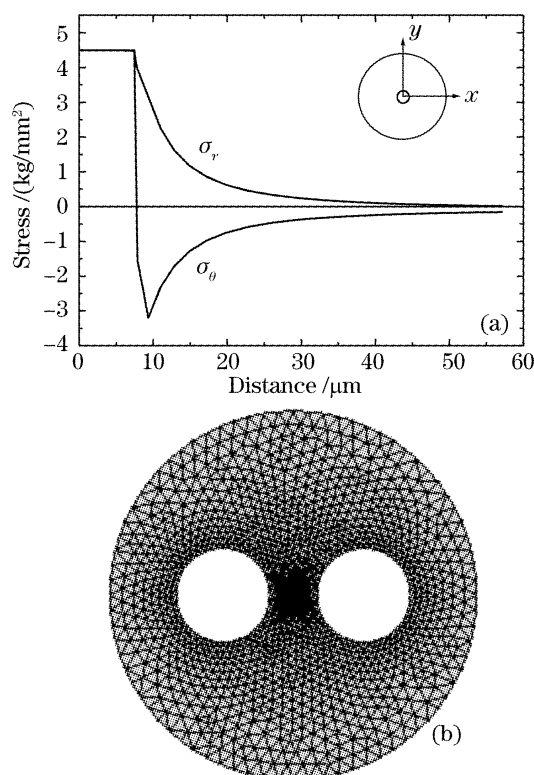


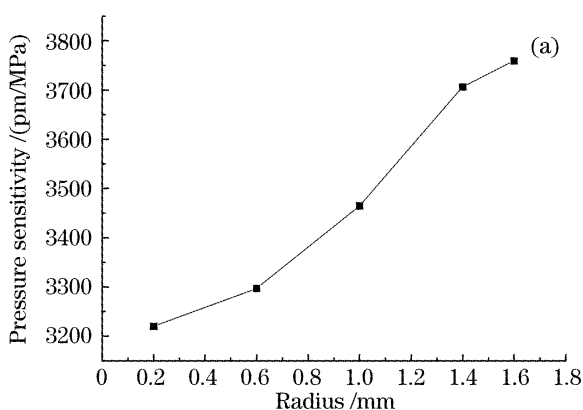
图2 (a)阶跃单模光纤的应力分布,(b)边孔封装横截面的网格划分

Fig. 2 (a) Stress distribution in the step-index single-mode fiber, (b) element division of side-hole package cross section

无论数值还是变化趋势两者基本吻合,误差小于 0.02%。

同时采用有限元法计算了某种结构参量($E=7830 \text{ kg/mm}^2$, $\nu=0.186$, $\alpha_1=10.5 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\alpha_2=5.4 \times 10^{-7}/^\circ\text{C}$, $\Delta T=-1000^\circ\text{C}$, $a=4 \mu\text{m}$, $b=62.5 \mu\text{m}$, $r=10 \mu\text{m}$, $d=20 \mu\text{m}$)的熊猫光纤的双折射。根据文献[15]得到的计算结果为 7.9824×10^{-5} , 采用有限元法的计算结果为 7.9807×10^{-5} , 两者相差 0.021%。通过以上两种光纤计算结果的验证,表明所采用有限元的计算误差小于 0.1%,可基本满足要求,因而方法是可行的。

边孔封装技术的增敏机理主要来自于它的非对



称封装结构,因此封装体几何结构的变化必然会导致压力增敏倍数的变化。考虑到轴向物理量的影响,建立了边孔封装结构的三维压力传感模型,主要分析封装体结构尺寸变化对封装后光纤光栅压力灵敏度的影响,这也是边孔封装结构与其他结构的不同之处。图 2(b)为光纤光栅边孔封装横截面的有限元网格划分。保持空穴距离 $d=2 \text{ mm}$ 不变,令空穴半径的变化范围为 $0.2 \sim 1.6 \text{ mm}$,图 3(a)为光纤光栅压力灵敏度随空穴半径的变化关系;保持空穴半径 $r=1 \text{ mm}$ 不变,令空穴距离的变化范围为 $1.4 \sim 2.8 \text{ mm}$,图 3(b)为光纤光栅压力灵敏度随空穴距离的变化关系。

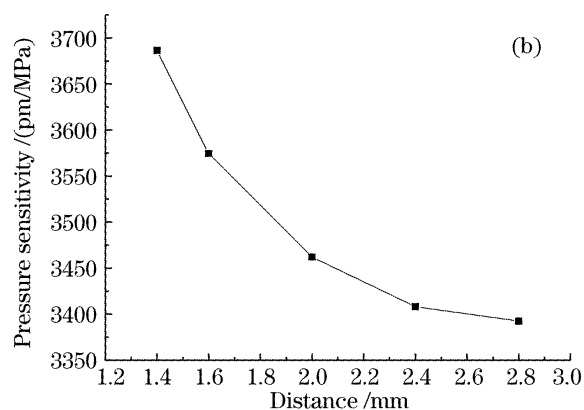


图 3 (a) 压力灵敏度随空穴半径的变化曲线,(b) 压力灵敏度随空穴距离的变化曲线

Fig. 3 (a) Dependence of pressure sensitivity on hole radius, (b) dependence of pressure sensitivity on hole distance

通过图 3 可以看出,光纤光栅压力灵敏度随空穴半径的增加而变大,随空穴距离的增加而减小。因此边孔封装结构要想实现高倍数的压力增敏效果,必须要尽可能地增大空穴半径 r 和空穴距离 d ,这为制作高灵敏度的光纤光栅压力传感器提供了参考依据。

但根据实际应用情况,在边孔封装体的结构设计时还应该考虑以下三个问题:1)考虑到实际压力传感应用环境的需要,封装体的外径尺寸不可能无限制的增大;2)不能片面追求大的空穴尺寸增大压力增敏效果而忽略聚合物在传感过程中所能承受的(最大)应力强度;3)必须要考虑聚合物制作模具加工尺寸和形状的可行性。如果两空穴半径较小,两者之间的间隙过大,压力增敏效果必然不好;如果间隙过小,模具加工无法满足精度要求,且过小的间隙容易导致在浇灌聚合物的过程中产生气泡。因此这种边孔封装技术的尺寸设计非常重要,要综合考虑压力灵敏度、应力强度和模具加工的可行性等多方面的因素。

3 实验结果及分析

根据实际应用需求,所设计的边孔封装的几何

尺寸为: $r=3.5 \text{ mm}$, $d=4.5 \text{ mm}$,整个封装体的几何尺寸为 $\phi 20 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$,图 4 为采用聚合物边孔封装后的光纤光栅实物图。光纤光栅聚合物封装的主要流程是:1)根据封装尺寸设计和加工封装模具;2)将聚和物和固化剂按照一定比例配胶并加热,搅拌均匀排除气泡的影响;3)将光纤光栅固定于模具中并浇灌聚合物;4)将聚合物浇灌后的光纤光栅及其模具放入温箱中进行高温固化;5)开模取出封装好的光纤光栅并再次放入温箱进行低温老化。值得

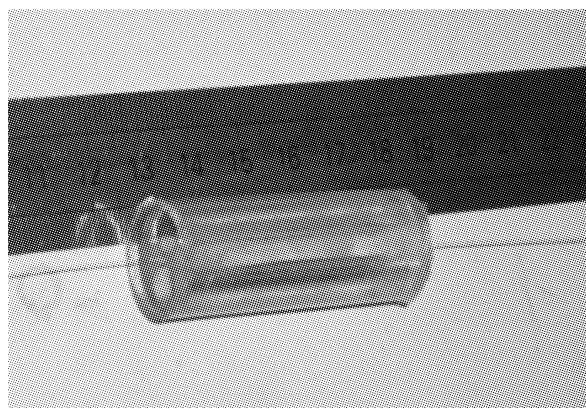


图 4 边孔封装光纤光栅传感器

Fig. 4 Fiber Bragg grating sensor with side-hole package

注意的是,在制作过程中边孔封装方法要求结构体内的两个空穴均匀、对称,否则会影响封装质量,进而影响传感器的传感灵敏度。

实验中采用可调谐窄带光源波长扫描技术^[16]进行光纤光栅中心波长的检测,图 5 为系统结构示意图。整个系统以 Labview 为软件工作平台,通过 RS232 串口通信协议远程控制可调谐窄带光源的输出波长实现扫描。光源是可调谐光源扫描法检测系统的核心部分,它的波长设定分辨力和波长稳定性直接决定了本系统的解调分辨力和精度。实验采用的是 NetTest 公司生产的型号为 TUNICS-plus10 的可调谐窄带激光器,其波长调谐范围为 1530~1570 nm,输出光功率为 0~10 mW 可调,最小可设波长分辨力为 2 pm。系统采用了 NI 公司的 NI6014 采集卡进行信号采集,将数据读入计算机再

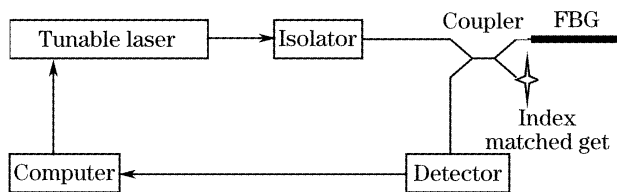


图 5 可调谐光源法系统原理示意图

Fig. 5 The schematic diagram of the tunable laser method

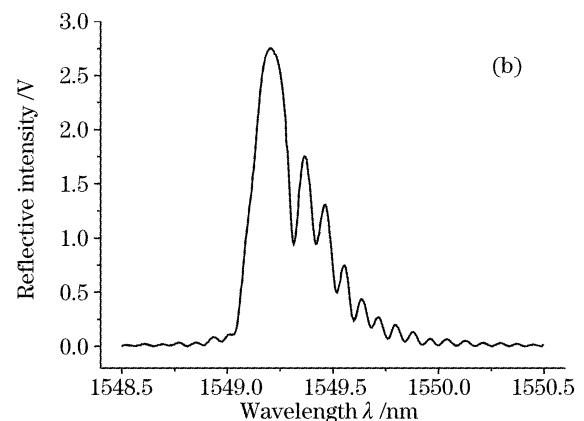
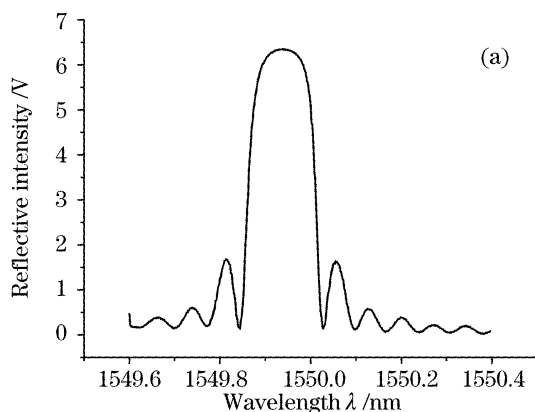


图 6 封装前(a),封装后(b)的光纤光栅反射谱线

Fig. 6 Reflective spectrum of fiber Bragg grating without package (a) and with package (b)

图 7(a)和图 7(b)分别为封装后不同温度和不同压力时的光纤光栅反射谱线,图 8(a)和图 8(b)为光纤光栅中心反射波长随温度和压力变化的响应曲线。由于封装后光纤光栅的压力灵敏度较高,实验过程中压力特性是将光纤光栅放入水池中通过控制水深进行测量的,冬天实验水池温度约为 6 °C。温度特性曲线是将光纤光栅放入温箱内测量的,所用温箱为银河系列 YINHE NDM2-63 型号高低温控制温箱,其温度变化范围为 -20 °C~150 °C,最小温度设定分辨力为

利用 Labview 进行数据处理。

实验所用光纤光栅是采用普通相位掩模法刻写的,反射谱线形状如图 6(a)所示,其中心波长为 1549.536 nm,3 dB 带宽为 0.148 nm,反射率为 96.1%。实验测得封装前光纤光栅的温度灵敏度为 9.58 pm/°C,压力灵敏度为 3 pm/MPa。图 6(b)为边孔封装后光纤光栅的反射谱线(实验测量温度约为 30 °C)。比较图 6(a)和图 6(b)可见,图 6(b)的反射谱线总体向短波方向发生漂移,其原因在于聚合物在高温固化冷却的过程中,由于其热膨胀系数大于石英玻璃,使得封装后的光纤光栅中心波长向短波方向移动。另外由图 6(b)还可看出,封装之后光纤光栅的谱线形状出现了啁啾现象,采用传输矩阵法对以上现象进行仿真分析,结果表明该啁啾现象的主要原因在于聚合物在高温固化然后冷却到室温的过程中发生收缩,使得光纤光栅产生了非均匀轴向应变。啁啾现象的存在对聚合物的封装工艺提出了新的要求,参考文献[7]提出可通过对光纤光栅施加预应力的方法来消除啁啾现象,我们在后续的改进封装实验中采用该方案成功地消除了啁啾现象,得到了如图 6(a)相似的反射谱线形状,不同的是总体向短波方向发生了漂移。

0.5 °C,温度稳定性为+0.3 °C。实验结果表明,封装后光纤光栅中心波长随温度线性变化,线性度 R 为 0.9991,温度灵敏度系数为 36.48 pm/°C,是封装前温度灵敏度系数的 3.8 倍;封装后的压力灵敏度系数为 5251 pm/MPa,是封装前压力灵敏度系数的 1750 倍,其线性度 R 达到 0.9996。可见温度增敏效果比较有限,压力增敏效果非常明显。另外,根据以上封装结构参量,有限元模型压力灵敏度的理论计算结果为 5039 pm/MPa,与实验结果相差 4%,存

在偏差的原因主要在于聚合物的材料参量存在偏差。

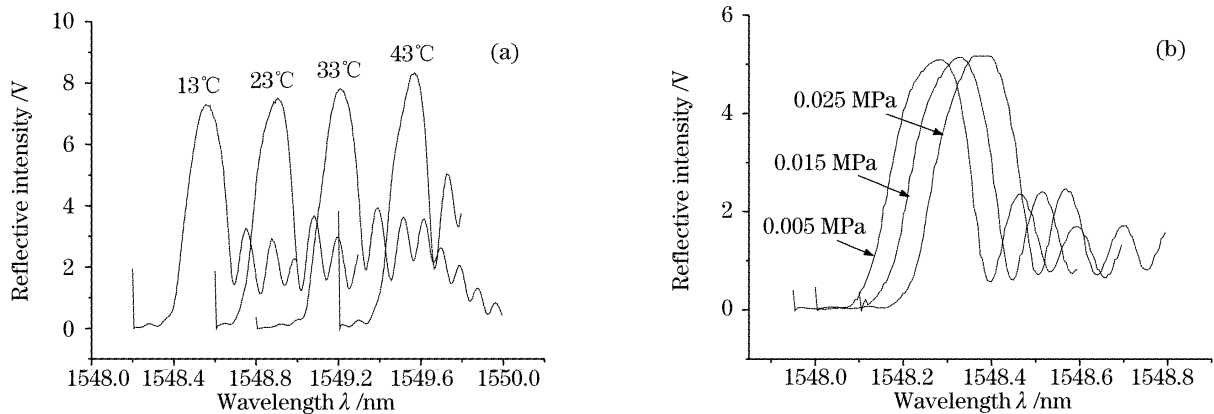


图 7 反射谱线随温度变化(a)和随压力变化(b)的演化

Fig. 7 Reflective spectrum at different temperature (a) and at different pressure (b)

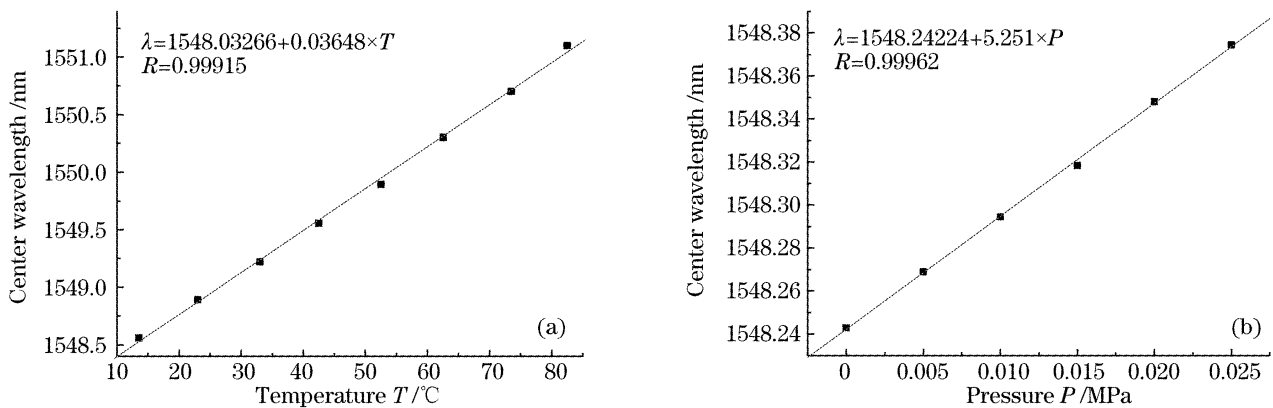


图 8 封装后的温度响应曲线(a)和压力响应曲线(b)

Fig. 8 Temperature response (a) and pressure response (b) of fiber Bragg grating with package

边孔封装与普通轴对称封装技术相比的最大优势在于,它通过改变封装体的几何对结构实现了高倍数的压力增敏效果,较大程度地减小了对材料参量的依赖性。为说明以上问题,两者进行了对比实验,实验中也对光纤光栅进行了轴对称封装,测量了其温度和压力传感特性。表 1 列出了裸单模光栅、轴对称封装和边孔封装三种情况下光纤光栅传感特性的对比数据。通过表 1 可以看出,由于聚合物自身材料特性参量的不够理想,采用同样的聚合物封装材料,轴对称封装技术的压力增敏效果只有 12.3 倍;边孔封装技术的压力增敏效果为 1750 倍,充分体现了边孔封装技术的优势所在,验证了边孔封装方案的可行性。需要说明的是,边孔和轴对称封装体的外观尺寸完全一致。

由于光纤光栅对压力和温度都敏感,因此压力测量过程中的温度变化会对压力测量结果带来影响,这就是光纤光栅传感过程中的交叉敏感问题。一个表征交叉敏感程度大小的重要参量就是温度灵敏度与压力灵敏度数值的比值,它反映了温度变化 1 °C 的给压力测量所带来的测量误差。该比值越小,表明温度变化对压力测量结果的影响越小,测量精度则越高。由表 1 可以看出,裸光纤光栅温度变化 1 °C 所对应的压力测量误差为 3.2 MPa,交叉敏感现象非常严重;轴对称封装时温度变化 1 °C 所对应的压力测量误差为 1.8 MPa,虽然有所改善,但是效果不够明显,交叉敏感现象依然比较严重;边孔封装时温度变化 1 °C 所对应的压力测量误差为 0.0069 MPa,得到了近三个数量级的改善,较大程

表 1 不同封装下的光纤光栅传感特性数据

Table 1 The sensing characteristics data of fiber Bragg grating with different package

Fiber gratings	Bared	Axial-symmetric package	side-hole package
Temperature sensitivity K_T /(pm/°C)	9.58	65.73	36.48
Pressure sensitivity K_p /(pm/MPa)	3.00	36.79	5251.0
Ratio of K_T/K_p /(MPa/°C)	3.2	1.8	0.0069

度削弱了交叉敏感问题。

4 结 论

在轴对称封装中,受到封装材料固有物理性能参量的影响,很难实现高倍数的增敏效果;而边孔封装技术通过改变封装体的几何结构实现了高倍数的压力增敏效果,较大程度地减小了对材料参量的依赖性,不仅达到了三个数量级的压力增敏效果,而且将交叉敏感问题实现了近三个数量级的改善。这种高灵敏度的光纤光栅压力传感器有望在水下舰艇的结构安全检测以及水下定位等领域得到应用。

边孔封装技术的实质是利用了封装体各向异性的特点实现了高倍数压力增敏,因此封装体的外形可以是椭圆形、方形以及其它形状,空穴的数目也可以改变。总之,只要满足封装体的各向异性条件,通过合理的几何尺寸设计,完全可以实现高倍数的压力增敏。

参 考 文 献

- 1 Kenneth O. Hill, Gerald Meltz. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. *J. Lightwave Technol.*, 1997, **15**(8):1263~1276
- 2 Jiang Desheng, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics • Lasers*, 2002, **13**(4): 420~429 (in Chinese)
姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, **13**(4): 420~429
- 3 Robert J. Schroeder, Tsutomu Yamate, Eric Udd. High pressure and temperature sensing for the oil industry using fiber Bragg gratings written onto side hole single mode fiber[C]. *Proc. SPIE*, 1999, **3475**: 42~45
- 4 M. G. Xu, L. Reekie, Y. T. Chow *et al.*. Optical in-fiber grating high pressure sensor[J]. *Electron. Lett.*, 1993, **29**(4): 398~399
- 5 Li Zhizhong, Yang Huayong, Liu Yang *et al.*. Research on solutions of cross-sensitivity of fiber grating sensing[J]. *Opt. Commun. Technol.*, 2004, **28**(6): 20~22 (in Chinese)
李智忠,杨华勇,刘阳等. 光纤光栅交叉敏感解决方案研究[J]. *光通信技术*, 2004, **28**(6): 20~22
- 6 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
- 7 Liu Lihui, Zhang Weigang, Guo Honglei *et al.*. Study on experiment of fiber Bragg grating pressure sensitivity[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(10): 1266~1268 (in Chinese)
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
- 8 B. Budiansky, D. C. Drucker, G. S. Kino *et al.*. Pressure sensitivity of a clad optical fiber[J]. *Appl. Opt.*, 1979, **24**(18): 4085~4088
- 9 Sun An, Qiao Xueguang, Jia Zhen'an *et al.*. Temperature and pressure responsive characteristics of polymer packaged fiber Bragg grating with Large dynamic range[J]. *Chin. J. Lasers*, 2005, **32**(2): 224~227 (in Chinese)
孙安,乔学光,贾振安等. 聚合物封装光纤布拉格光栅传感器温度压力特性研究[J]. *中国激光*, 2005, **32**(2): 224~227
- 10 Zhang Ying, Liu Zhiguo, Guo Zhuanyun *et al.*. A high sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. *Acta Optica Sinica*, 2002, **22**(1): 89~91 (in Chinese)
张颖,刘志国,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的研究[J]. *光学学报*, 2002, **22**(1): 89~91
- 11 Fu Haiwei, Qiao Xueguang, Jia Zhenan *et al.*. Stress sensitivity enhanced in-fiber Bragg grating pressure sensor[J]. *Chin. J. Lasers*, 2004, **31**(4): 473~476 (in Chinese)
傅海威,乔学光,贾振安等. 应力增敏的光纤布拉格光栅压强传感器[J]. *中国激光*, 2004, **31**(4): 473~476
- 12 Li Zhizhong, Luo Hong, Yang Huayong *et al.*. Side-hole fiber grating sensing characteristics[J]. *Chin. J. Lasers*, 2006, **33**(8): 1081~1086 (in Chinese)
李智忠,罗洪,杨华勇等. 边孔光纤光栅的传感特性[J]. *中国激光*, 2006, **33**(8): 1081~1086
- 13 Li Zhizhong, Hu Yongming, Yang Huayong *et al.*. Finite-element analysis of birefringence in circular-core side hole fiber [J]. *Acta Optica Sinica*, 2005, **25**(8): 1013~1018 (in Chinese)
李智忠,胡永明,杨华勇等. 圆芯型边孔光纤双折射的有限元分析[J]. *光学学报*, 2005, **25**(8): 1013~1018
- 14 K. Okamoto, T. Hosaka, T. Eda Hiro. Stress analysis of optical fibers by a finite element method [J]. *IEEE J. Quant. Electron.*, 1981, **QE-17**(10): 2123~2129
- 15 K. H. Tsai, K. S. Kim, T. F. Morse. General solutions for stress-induced polarization in optical fibers [J]. *J. Lightwave Technol.*, 1991, **9**(1): 7~17
- 16 Li Zhizhong, Sun Chongfeng, Yang Huayong *et al.*. Study on optical power fluctuation measurement in FBG center wavelength detecting with tunable laser [J]. *J. Optoelectronics • Laser*, 2005, **16**(4): 413~417 (in Chinese)
李智忠,孙崇峰,杨华勇等. FBG中心波长的可调谐光源法检测中光强起伏研究[J]. *光电子·激光*, 2005, **16**(4): 413~417