

· 光电器件与材料 ·

降低迟滞误差的光纤光栅传感器的研究

王宏亮, 宋娟, 李明, 冯德全, 樊伟, 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:主要针对传感器的迟滞问题, 研制了一种适合做光纤光栅传感器基底材料的恒弹性镍基合金, 该合金的弹性后效、弹性滞后作用很低。设计一种新的传感器结构, 分别用弹簧钢和新研制的恒弹性镍基合金作基底材料, 通过压力实验比较两个传感器的压力迟滞误差。实验结果表明, 在 0~50 MPa 的压力检测范围内, 弹簧钢制成的传感器在加压、减压过程中产生了较大迟滞误差, 迟滞误差为 0.54%; 利用新合金制成的传感器迟滞误差非常小, 仅为 0.099%, 在 0~50 MPa 的范围内实现线性传感。传感器具有温度补偿的功能, 能够同时对温度和压力进行测量, 很好地解决温度交叉敏感问题, 可应用于油气井、大型储油罐等的温度和压力测量。

关键词: 光纤光学; 光纤光栅; 恒弹性合金; 迟滞误差; 温度补偿

中图分类号: TN256

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2010)04-0050-04

Research on Reducing Hysteresis Error of New FBG Sensors

WANG Hong-liang, SONG Juan, LI Ming, FENG De-quan, FAN Wei, WU Hua-chun

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

Abstract: On account of the hysteresis error of the sensor, a new kind of elasticity alloy suitable for a substrate material of the FBG sensor was studied. The elastic after effect and the elastic hysteresis effects of this alloy are very low. A new sensor structure was designed, using elastic steel and newly developed constant elasticity alloy as substrate materials and the two sensors' pressure hysteresis errors were compared through pressure experiment. Experimental results show that the sensor in non-ferrous, made the process of pressure, and by using the new hysteresis error of pressure sensor material retardation is very small, for 0.099% error and can be neglected. Sensor has function of temperature compensation, can also measure of temperature and pressure. The sensor can be applied in oil tank, the temperature and pressure etc.

Key words: fiber optics; optical fiber grating; constant elasticity alloy; hysteresis error; temperature compensation

光纤光栅传感器具有灵敏度高、体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀等优点, 已被广泛的应用到传感系统中, 在石油化工、土木工程、公共交通等领域已有诸多报道^[1-4]。但光纤光栅自身较脆, 在承受较大应变时很容易断裂, 故不能让其直接承受大的应变。通

常的解决方法是将光纤光栅粘贴到基底材料上, 让基底材料承受大的应变并将小的应变传递给光纤光栅, 以达到扩展线性测量范围、保护光纤光栅的目的。然而采用这样的封装方法又会产生新的问题, 即在较大的测量范围进行加压、减压时, 因基底材料的

收稿日期: 2010-06-08

基金项目: 国家 863 计划资助项目(2007AA03Z413); 国家自然科学基金项目(60727004); 陕西省教育厅项目(09JK704)

作者简介: 王宏亮(1951-), 男, 陕西横山人, 教授, 主要从事光纤传感、光功能材料等方面的研究; 宋娟(1984-), 女, 山东胶州人, 硕士研究生, 主要从事光纤传感与光电检测方面的研究。

弹性滞后和弹性后效而产生弹性迟滞误差,造成传感器的单值输入多值输出,降低测量的准确性和稳定性.目前,减小迟滞误差的方法主要有两个:一是从结构设计上进行修正,这方面已有报道^[5];另一个是研制新的基底材料,采用这种方法进行研究的报道不多.文中采用第二个方法进行研究.通过分析合金材料产生弹性滞后和弹性后效的原因,研制了一种新的恒弹性铌基合金.用新合金做传感器的基底材料,设计一种新的传感器结构.压力实验结果表明,传感器的迟滞误差非常小,可忽略不计,能够满足实际工程对传感器迟滞误差这一指标的要求.同时,针对交叉敏感问题,采用被动补偿的方法消除了温度对压力检测的影响,实现温度压力的同时区分测量.

1 迟滞效应

1.1 迟滞现象

在材料学和应用力学领域,理想的弹性(完整弹性)是完全符合胡克定律的^[6].当给金属材料加载(压力)时,材料模型会立即变形,卸载时立即恢复原状,加载线和卸载线完全重合一致,变形与时间没有关系.事实上,对于多晶体材料,其内部的成分组织、结构组织、变形条件关系复杂,不可能均一,当受到外力作用后,微小晶粒之间产生的微应变必然存在着变形的不均匀性和起始塑性形变的不一致;卸载时,外力消失,微应变随之消失,但是否完全消失恢复到原始状态,不同的材料则有完全不一样的表现.此外,在弹性形变的范围内还会产生应变落后于应力的现象,应变和应力之间呈现非严格的线性关系,这也是加载线(或卸载线)呈现非严格线性关系的根本原因.在图1中,可以看到加载过程中的应变曲线 ϵ_1 与卸载过程中的应变曲线 ϵ_2 不重合,其差值 $\Delta = \epsilon_1 - \epsilon_2$ 称为迟滞性,影响差值的原因很多,就传感器的基底材料而言,主要是材料本身的组成成分、晶粒的均匀性两方面,并且这两方面对淬火后的金相组织的影响至关重要.

1.2 低弹性滞后基底材料的研制

铌基弹性材料具有无磁、高温恒弹性、弹性模量小、弹性极限高、弹性滞后小及耐腐蚀等优良的综合性能,很适合作为光纤光栅应变弹性基底的多功能型恒弹性机敏材料.研制了一种新的铌基合金,作为

图1 迟滞效应示意图

可消除迟滞误差的传感器的基底材料.

首先,选用高纯度 Nb、Ti、Al、V 粉末原料,为提高材料的性能、降低材料的密度而降低成本,添加 V 或 C 等其他微量元素合金化,其中添加 Ti 和 V 元素实现对 Nb 的固溶强化,以减小弹性滞后性,提高弹性极限和抗氧化性能,添加 Al、V 和 C 元素生成 (Nb, Al)₃Al、(Nb, V)C 和 (Nb, Ti)C 沉淀强化,实现弥散强化进一步提高其力学性能.

晶粒的均匀性对材料性能有很大的影响.若晶粒不均匀,施加载荷时,在大小晶粒交界处会出现应力集中,造成模型过早的断裂,缩短传感器的使用寿命^[7].解决晶粒均匀性的措施是采用高能球磨机系统对混合粉末进行研磨.研磨时,添加过程控制剂以促成晶粒破裂-组团-破裂过程快速进行,加速粉末细化,并防止粉末的组团粗化与粘罐粘球.用电镜监测球磨过程中颗粒尺寸变化情况,控制球磨过程发生重新组团粗化而导致细化速度变慢.

2 敏感元件的结构

传感器的结构如图2所示,图2a是侧面图,图2b是俯视图.该结构是一个对称的双孔筒状结构,两侧的悬臂梁是等强度悬臂梁,尺寸完全相同;光栅粘贴到悬臂梁的上表面,粘贴位置完全一样.结构左侧顶面是一个圆形膜片,通过刚性连杆将膜片产生的应变传递给粘贴在等强度悬臂梁的 FBG1.将 FBG2 封装到右侧孔中,这样设计有两个优点,一是可以将 FBG2 完全封装起来,使其感受不到任何的应变和外界干扰,二是可以模拟与 FBG1 完全一样的温度场,提高温度补偿的精度.两只光栅的中心波长相同($\lambda = \lambda_1 = \lambda_2$)

整个传感系统的结构图如图3所示,宽带光源

(BBS)发出的光经过 3 dB 耦合器入射到两支光栅中,经过温度或压力调谐后的光被反射回来,又经过 3 dB 耦合器入射到解调仪器中,经过解调后的数据传递到计算机中.

图 2 传感器结构图

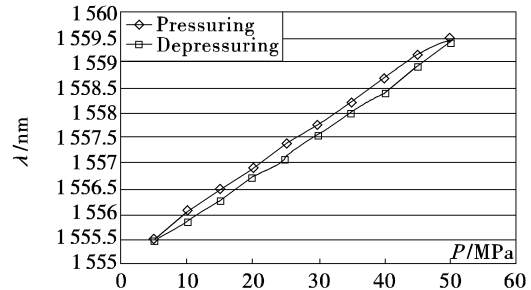
图 3 实验装置图

3 实验及结果分析

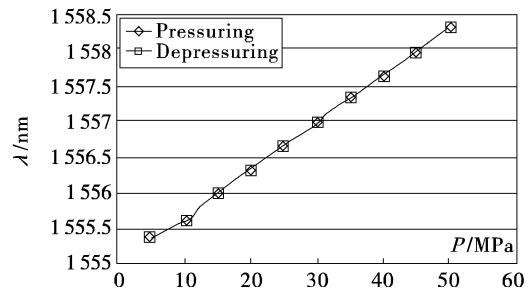
3.1 压力实验

分别用弹簧钢和新合金材料作为基底材料制成光纤光栅传感器(分别称 1 号传感器和 2 号传感器).并对 1、2 号传感器进行压力实验.同时给传感器施加压力载荷,比较两者的迟滞误差.图 4a 为 1 号传感器 FBG1 的加压减压曲线,图 4b 为 2 号传感器 FBG2 的加压减压曲线.由图 4a 看出 1 号传感器在进行大范围压力检测时有较大的迟滞误差,实验数据显示,在 20 MPa 时,正反行程的差值 $|\Delta\lambda_H|_{\max}$ 最大,此时为 0.27 nm.图 4b 中的加载线和卸载线几乎完全重合,在 35 MPa 时, $|\Delta\lambda_H|_{\max}$ 最大,值为 0.059 4 nm.根据误差计算公式(1)^[8]

$$\zeta_H = \frac{|\Delta\lambda_H|_{\max}}{|P_{\max} - P_{\min}|} \times 100\% \quad (1)$$



(a) 弹簧钢基底



(b) 新研制的基底材料

图 4 迟滞误差对比

算得 1 号传感器在 0~50 MPa 的检测范围内迟滞误差为 0.54%;2 号传感器在 0~50 MPa 的检测范围内迟滞误差为 0.099%,迟滞误差很小,约是 1 号传感器的五分之一,可忽略不计.压力试验结果说明使用新合金材料做基底材料能够明显地减小传感器的迟滞误差,提高测量的准确度.

3.2 温度补偿

光纤光栅既对压力敏感又对温度敏感,故在给传感器加载的过程中,不仅有压力对光纤光栅的中心波长进行调谐,还有温度对其进行调谐,如此会对压力的检测产生影响,所以必须对其进行温度补偿,关于这方面的研究亦有报道^[9].FBG1 的中心波长与温度和压力的关系式为^[10]

$$\frac{\Delta\lambda_1}{\lambda_1} = \frac{6hDK^2}{EL^3(K^2-1)}(1-P_e)(L-a)(2-\mu) \Delta P + [\zeta + (1-P_e)a_s] \Delta T \quad (2)$$

式(2)中, H 为悬臂梁厚度, L 为悬臂梁全长, D 为圆柱筒的内径, K 是圆筒外径与内径之比, E 是基底材料的杨氏弹性模量, μ 是基底材料的泊松比, a_s 是基底材料的热膨胀系数, a 为悬臂梁上力的作用点到悬臂梁固定端的距离, P_e 为光纤的有效弹光系

数, ζ 是光纤的热光系数. FBG2 的中心波长与温度的关系式为

$$\frac{\Delta \lambda_2}{\lambda_2} = [\zeta + (1 - P_e) a_s] \Delta T \quad (3)$$

通过式(3)可计算出环境中的温度. 式(2) - 式(3)得

$$\Delta \lambda_1 - \Delta \lambda_2 = \frac{6hDK^2}{EL^3(K^2 - 1)}(1 - P_e)(L - a) \quad (4)$$

$$(2 - \mu)\lambda \Delta P$$

$\Delta \lambda_1 - \Delta \lambda_2$ 即为压力对光纤光栅波长的调谐量, 通过这一差值即可算出压力值.

根据实验 1 的结论, 选用使用新研制镍基合金做基底材料的 2 号传感器进行温度补偿实验. 将 2 号传感器放到高温高压反应釜中, 同时施加温度和压力载荷, 压力范围为 5~50 MPa, 温度范围为 30~120℃.

表 1 温度压力同时施加量

实验点	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
温度/(℃)	30	40	50	60	70	80	90	100	110	120
压力/(MPa)	5	10	15	20	25	30	35	40	45	50

整理实验数据, 绘出 FBG1 在温度补偿前后光栅中心波长 - 压力的特性曲线如图 5 所示, 系列 1 表示温度补偿前 FBG1 的中心波长随压力变化的曲线, 系列 2 表示经过温度补偿后 FBG1 中心波长与压力的特性曲线. 图 5 中直观显示出, 温度补偿前后波长漂移量相差很大, 随着温度和压力的增大, 二者波长的漂移量差也不断的增大, 若不进行温度补偿, 传感器的压力灵敏度是 0.096 nm/MPa, 温度补偿后的压力灵敏度是 0.065 nm/Mpa, 两者的相对误差为 47.7%, 若不进行温度补偿, 计算得到的压力

值误差很大. 经过温度补偿后, 传感器测量的准确度大幅上升.

4 结 束 语

针对光纤光栅压力传感器的迟滞问题, 分析了材料产生迟滞现象的原因. 研制新的恒弹性镍基合金基底材料, 主要从材料的组成成分、晶粒均匀性两个方面进行分析. 新材料的弹性滞后效应很低, 用其做基底材料能够降低传感器的迟滞误差, 提高传感器的测量准确度和可重复性. 用弹簧钢材料制作结构完全相同的传感器与之进行比较, 压力试验测得采用弹簧钢的传感器的迟滞误差为 0.54%, 新材料制成的传感器迟滞误差为 0.099%. 用该传感器可以能够更加准确地测量压力和温度, 适合应用于测井、储油罐等领域的温度压力检测.

参考文献

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 胡志新, 朱军, 张陵, 等. 光纤光栅压力传感器中应力迟滞的消除方法[J]. 光子学报, 2006, 35(9): 1329 - 1332.
- [6] 陈复民, 李国俊, 苏德达. 弹性合金[M]. 上海: 上海科学技术出版社, 1986: 31 - 45.
- [7] 凤仪. 金属材料学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009: 136 - 139.
- [8] 孙建民, 杨清梅. 传感器技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 7 - 12.
- [9] 黄勇林, 李杰, 开桂云, 等. 光纤光栅的温度补偿[J]. 光子学报, 2003, 23(6): 677 - 678.
- [10] 赵勇. 光纤传感原理与应用技术[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007: 145 - 179.

图 5 温度补偿前后 FBG1 的特性曲线图