



用弱相干白光双干涉系统测量光纤的蠕变

徐志洪^{①*}, ANSARI Farhad^②

① 南京理工大学理学院, 南京 210014;

② Department of Civil & Material Engineering, University of Illinois, Chicago 60607, USA

* E-mail: xuzh@mail.njust.edu.cn

收稿日期: 2008-08-09; 接受日期: 2008-12-27

摘要 通过实验的方法研究了用于光纤传感器的光纤的蠕变特性. 设计了一个弱相干的白光干涉测量系统, 用该系统测量了光纤在静力拉伸和交变拉伸载荷作用下的蠕变. 研究结果表明, 对采用聚酯涂敷的光纤, 在静载和动载荷的作用下, 开始时均具有较大的蠕变, 但是随着静载作用时间的推移或交变载荷的循环次数的增加, 蠕变将停止. 为了保证压力光纤传感器中光纤的预应力, 建议光纤在装入传感装置以前预先加载一段时间或进行一定次数的拉-松循环加载消除光纤工作时可能产生的蠕变.

关键词

光纤传感器
光纤
蠕变
干涉仪
弱相干

油田上采油井中的压力是表明储油状况的一个重要的基本参数, 为了保证采油生产过程的安全, 必须对井中的压力实行永久的在线监测^[1]. 由于光纤具有不受电磁干扰、质量轻、体积小、在恶劣的环境中耐久性和稳定性好的特点, 光纤技术在井下得到了广泛的应用^[1~3]. 刻有 Bragg 光栅的光纤在机械式的传感器中常备用作传感元件, 其传感方向沿着光纤的长度方向. 由于光纤很细, 只能承受轴向拉力, 因此在压力传感器中光纤传感元件在装入前张紧, 工作时始终处在一个张紧状态. 对于井下的永久型监测系统而言, 一旦传感系统安装好以后, 其中的光纤传感器不可能再重新标定, 因此, 如何长期保证光纤传感器始终处于张紧状态是保证传感系统的可靠性的关键问题. 在 2005 年, Xu 和 Ansari 提出了光纤传感器的可靠性问题^[2], 从传感器的结构出发, 指出了光纤的蠕变是影响压力型光纤传感器可靠性的重要因素. 由于光纤是一种复合材料, 典型的光纤由石英纤芯外包一到两层的聚合物涂敷层构成, 石英是脆

性材料而聚合物涂敷层可以看作是粘弹性材料^[4~8]. 本文通过实验的方法研究了光纤蠕变特性. 在实验研究中, 光纤分别承受静载荷交变动载荷作用, 采用一种弱相干白光双干涉系统测量光纤由于蠕变发生的长度的微小变化.

1 实验装置原理

图 1 是弱相干白光双干涉系统测量系统的原理图. 由激光二极管(LED) 发出的波长为 1300 nm, 波宽为 100 nm 的白光射入光纤并通过一个 2×1 的光纤耦合器导入试样中. 试样的两端磨光, 两端反射回来的光返回该耦合器重新合成, 反射光的一半通过一个 2×2 的耦合器进入第二个干涉系统, 这个干涉系统是一个 Michelson 干涉系统, 它具有两个干涉臂, 一个干涉臂的一端是一个装载移动平台上的反射镜, 平台的移动行程为 50 mm, 定位精度为 1 μm, 另一个干涉参考臂为固定长度 L_f .

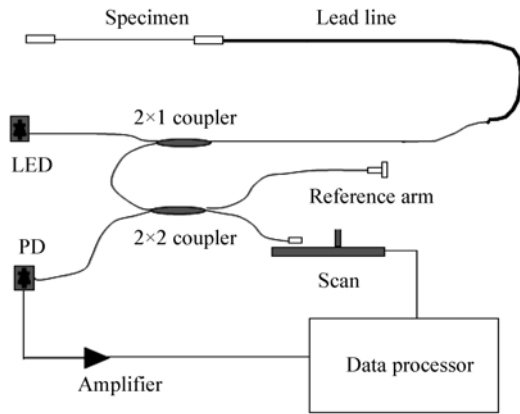


图1 弱相干白光双干涉系统测量原理图

用一个光电管将从干涉系统中出来的光的强度转化成电流强度, 电流强度可以表示为

$$I(\lambda) = A\{1 + b \cos[\varphi(\lambda) + \phi]\}, \quad (1)$$

其中

$$\varphi(\lambda) = 2\pi n \cdot \delta L / \lambda. \quad (2)$$

在(1)和(2)式中, λ 是波长, A 是一个与光源和耦合损耗相关的常数. ϕ 是两个参考臂的相位差, φ 是引起的相位的偏移, n 是干涉系统中的反射常数, δL 是相干光的光程差. 考虑到公共光程, 当

$$|l_f - l_m - l_s| \leq l_c \quad (3)$$

时, 出现干涉条纹并且输出的光强度到达其最大值 $I_{\max}(\lambda)$, 其中 l_f , l_m 和 l_s 是对应于光路中几何长度 L_s , L_m 和 L_f 的光程, l_c 光源的相干长度. 在该系统中, 光源的波长为 1300 nm, 带宽为 100 nm, 则相干长度约为 30 nm.

测量系统中光程差 ΔL 和几何长度之差 Δl 之间的关系可以由下式给出^[9],

$$\Delta l = \left\{ n - \frac{1}{2} n^3 [(P_{12} + P_{11})\nu + P_{11}] \right\} \Delta L, \quad (4)$$

其中 p_{11} 和 p_{12} 是 Pokels 常数, ν 为 Possion 比.

记光纤中的有效折射系数为

$$n_{\text{eff}} = n - \frac{1}{2} n^3 [(p_{12} + p_{11})\nu + p_{11}], \quad (5)$$

则(2)式可写为

$$\Delta l = n_{\text{eff}} \Delta L. \quad (6)$$

在光的波长为 $\lambda=1300$ nm 条件下, 石英光纤中的各项系数为 $n=1.46$, 光弹常数 $p_{11}=0.121$, $p_{12}=0.27$ 和 Possion 比 $\nu=0.25$, 则有效折射系数 $n_{\text{eff}} \approx 1.19$.

2 测量系统的标定

为了标定该干涉测量系统, 设计了一个装置来定量拉伸光纤. 如图 2 所示, 光纤的一端固定, 另一端固定在一个移动平台上, 采用一个高精度的螺旋测微仪来控制平台的移动, 通过平台的移动来张拉光纤. 光纤试样用市场上普通的通讯光纤, 通常传感用的光纤也是用这些光纤制作的. 这类光纤中石英纤芯外面涂敷了一层塑料保护层. 光纤材料参数如表 1 所示.

试样的长度为 500 mm, 光纤的端部去掉外敷层, 用专用胶将其埋在光纤专用的接头中. 养护 24 h 后将光纤的端部仔细打磨, 使其能反射光. 在端部还套个塑料管, 防止光纤在端部断裂. 图 3 为试样端部的照片. 首先将试样轻轻拉直, 通过调节干涉系统中反

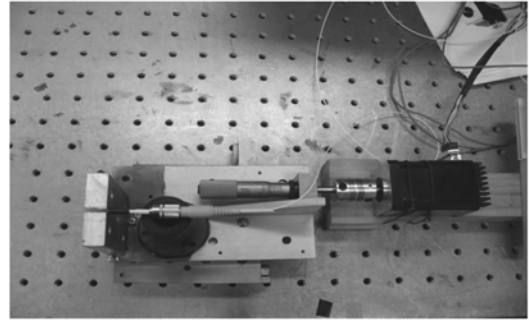


图2 光纤可控拉伸装置

表1 光纤的材料参数

Material parameters	Value	Unit
Young's modulus of the fiber glass	72	GPa
Young's modulus of the fiber plastic coating	2.55×10^{-3}	GPa
Possion's ratio of the fiber glass	0.25	
Possion's ratio of the plastic coating	0.499	
Radius of the out boundary of the fiber	102.5	μm
Radius of the fiber glass	62.5	μm

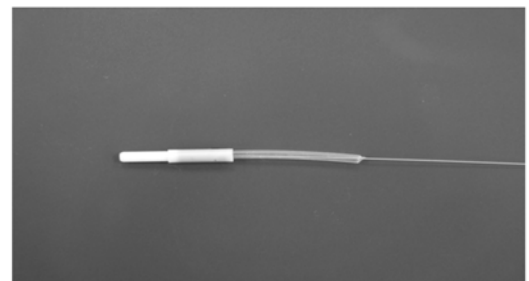


图3 光纤端部锚固结构

射镜的位置,使其满足(3)式,可以找到第一个干涉点A,将A点作为试样长度的起始点;然后通过一步一步移动拉伸装置中的移动平台来拉伸试样。

在螺旋测微仪上可以直接读出每一步的试样的几何变形.考虑到(6)式,对应的干涉位置可以通过调整反射镜的位置找到.通过这样的方式,建立了试样的几何变形和干涉位置之间的关系.反射镜的位置和在干涉仪中的信号用一个计算机控制的数据采集系统来记录下来,如图4,其中的脉冲信号便是对应的干涉位置.图5为标定结果。

3 静力作用下的光纤的蠕变测量

当在静力作用下的测试中,试样分两组,这两组试样的长度均为500 mm.两组试样分别悬挂3 N和5 N的重物.每过24 h测量一次两组试样和温度参考试样的长度变化.光纤试样长度和时间的变化关系如图6所示。

4 动力交变载荷作用下的光纤的蠕变测量

在该试验中,用一个高速的步进马达驱动拉伸

装置的移动平台往复运动使光纤试样循环受到拉伸,如图2所示.平台的位置精度为1 μm ,加载频率2 Hz.试样分为两组,每组三根试样.第一组的平均应变为0.5%,第二组平均应变为0.75%,应变幅值均为0.25%.每隔1000次循环将试样取下,在无载荷作用下测量试样的长度的变化.该实验在室温和室内湿度下进行.图7为两组试样在循环拉伸后的试样长度的变化的实验结果。

5 实验结果分析

从实验结果中可以看到,光纤无论是受到单向的静力载荷还是交变的动力载荷,其蠕变均有一个规律,开始时蠕变较大.从图6中看到,对于受静力载荷的光纤,200 h后,其蠕变值达到0.05%,但是再随着时间的推移,光纤不再发生进一步的蠕变变形.对于光纤承受交变动力载荷的情况也有相类似的规律,从图7中看到,当交变载荷的循环次数较少时,蠕变相对比较厉害,当循环次数在8万次左右达到最大,其相对蠕变值也0.05%左右,但当循环

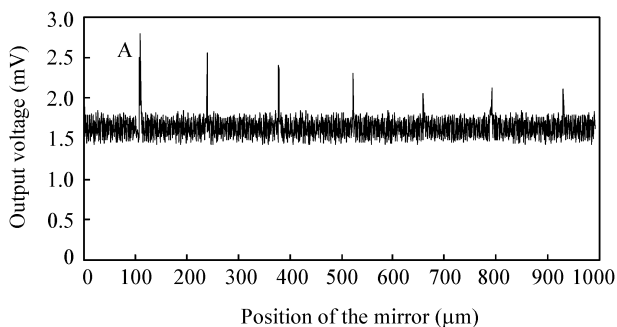


图4 发生干涉时的反射镜的相对位置

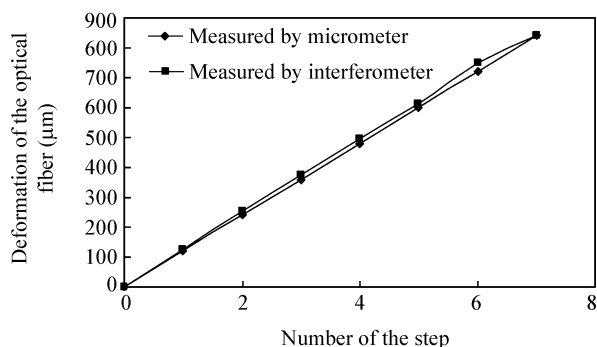


图5 采用测微计和干涉测量系统测量的光纤的变形

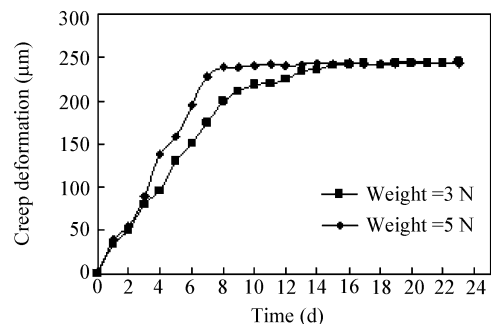


图6 光纤在静力载荷作用下的蠕变

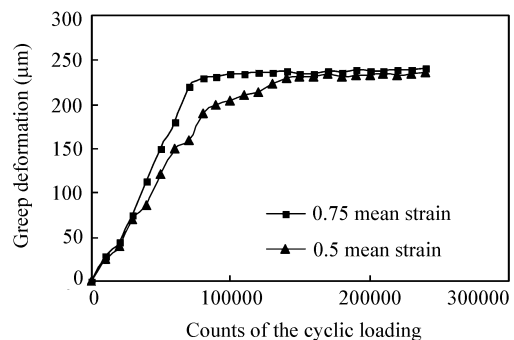


图7 光纤在循环载荷作用下的蠕变

次数进一步增加时, 光纤不再发生进一步的蠕变变形.

以上实验结果可以如下解释, 由于光纤的涂敷层和光纤纤芯变形的不一致性, 在光纤中存在残余应力和残余应变. 当光纤一定时期的静力载荷或循环的动力载荷以后, 涂层发生蠕变, 纤芯中的残余变形将渐渐释放. 继续持续施加静力或循环载荷, 残余应力和涂层的蠕变将越来越小, 涂层对光纤的作用将越来越小, 光纤中的石英纤芯决定光纤的力学性能, 而石英纤芯是一种典型的脆性材料, 不会发生蠕变现象.

6 结论

本文研究了用于光纤传感器的光纤的蠕变特性. 采用弱相干白光干涉测量系统测量了光纤在受一定时期内和承受一定次数的循环载荷作用下的光纤的蠕变规律. 实验结果表明, 对于聚合物涂层保护的光纤, 在承受静力或动力载荷的作用下在开始时会产生蠕变. 但是当光纤经过了一定时间的静力拉伸或一定次数的循环拉伸以后, 蠕变将会停止. 依据本文的研究结果, 建议在制作光纤传感器测量压力时, 应该先对光纤进行循环一定次数的循环拉伸, 然后再张紧装入传感器内以防止应力松弛.

参考文献

- 1 Nellen P M, Mauron P, Frank A, et al. Reliability of fiber Bragg grating based sensors for downhole applications. *Sensor Actuat A-Phys*, 2003, A103: 364—376
- 2 Xu Z H, Ansari F. Fiber optic sensor reliability issues in structural health monitoring. In: *Smart Structure and Materials 2005: Smart Sensor Technology and Measurement Systems*, Bellingham, WA, 2005. 390—404
- 3 Ansari F. State of art of fiber optical sensor. *Cement Concrete Comp*, 1997, 19(1): 1—10
- 4 Hall C. *Polymer Materials: An Introduction for Technologists and Scientist*. Englewood Cliffs, New York: Wiley, 1981
- 5 Shiue S T, Tu Y K. Relaxation of thermal stresses in double-coated optical fibers. *J Appl Phys*, 1999, 86(8): 4085—4090
- 6 Shiue S T, Ouyang H. Effect of polymeric coatings on the static fatigue of double-coated optical fibers. *J Appl Phys*, 2001, 90(11): 5759—5762
- 7 Shames I H, Cozzarelli F A. *Elastic and Inelastic Stress Analysis*. New Jersey: Prentice-Hall, 1992
- 8 Wang L T, Murphy A K, Calus R. White-light scanning fiber Michelson interferometer for absolute position-distance measurement. *Opt Lett*, 1995, 20(7): 785—787
- 9 Zhao Y, Ansari F. Quasi-distributed fiber optic strain sensor: principle and experiment. *Appl Opt*, 2001, 40: 3176—3181