

基于离轴刻写的 FBG 包层模式的光纤弯曲传感器

张立松

(西安石油大学 光纤油气测井教育部重点实验室,陕西 西安 710065)

摘要:基于光纤光栅(FBG)包层模式,制作了一种弯曲在线监测的全光纤传感器。传感器使用 193 nm ArF 准分子激光器,通过离轴刻栅的方式在 15 mm 单模光纤上刻写的光栅。对该传感器的弯曲和温度变化的响应特性进行了理论分析,并在 $0 \sim 1.2 \text{ m}^{-1}$ 曲率变化范围内,对传感器的弯曲响应特性进行了实验研究,结果表明,随着弯曲曲率的增大,包层模式的强度下降。其对弯曲的响应灵敏度为 0.11 dB/m^{-1} ,线性度为 0.996,表现出了它较高的灵敏度和线性度。随着环境温度从 25°C 变化到 60°C ,该传感器峰值波长响应灵敏度为 $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。结果表明,该型传感器对温度干扰不敏感。由于其结构简单,制作方便,精度高,在油气田管道健康监测领域有较好的应用前景。

关键词:离轴刻写;紫外光刻;光纤光栅刻写;光栅弯曲传感;光栅包层模式

中图分类号:TN247

文献标识码:A

DOI:10.11977/j.issn.1004-2474.2018.02.018

Fiber Bending Sensor Based on FBG Cladding Modes With Off-axis Inscription

ZHANG Lisong

(Key Lab. on Photoelectric Oil-Gas Logging and Detecting (Ministry of Education), School of Science, Xi'an Shiyou University, Xi'an 710065, China)

Abstract:Based on the fiber Bragg cladding mode, an all fiber sensor for on-line bending monitoring was fabricated. The 193 nm ArF excimer laser was used to inscribe the grating on the 15 mm single-mode fiber through the off-axis inscription. The response characteristics of the sensor's bending and temperature variation were theoretically analyzed. The bending response characteristics of the sensor were experimentally investigated in the range of $0 \sim 1.2 \text{ m}^{-1}$. The result showed that the response sensitivity to the bending was 0.11 dB/m^{-1} and the linearity was 0.996 with the increase of bending curvature and the decrease of cladding mode, and higher sensitivity and linearity were presented. As the ambient temperature changed from 25°C to 60°C , the sensitivity of the peak wavelength response of the sensor was $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$. It was demonstrated that the proposed sensor was insensitive to temperature disturbance. Because of its simple structure, convenient production and high precision, it has a good application prospect in the field of structural health monitoring of the oil and gas pipelines.

Key words:off-axis inscription;ultraviolet-written inscription;fiber Bragg grating(FBG) inscription;grating bending sensor;FBG cladding modes

0 引言

光纤光栅(FBG)型传感器因其稳定性好,耐高温,灵敏度高,测量对象广等优点,近年来被广泛用于弯曲^[1-2]、温度^[3-5]、曲率和温度同时测量^[6]等油田多种物理量的测量。机械弯曲的实时检测广泛用于井中套管健康监测、输油气管线弯管处健康评估等领域,是国内、外众多科研工作者研究的热点之一。

文献[7]通过 CO_2 激光器在细芯光纤上刻写长周期光栅,实现了弯曲和温度的双参量测量,该传感器是全光纤结构,制作方便,且具有较高的稳定性和灵敏度。文献[8]利用飞秒激光器在色散补偿光纤上刻写了包层光栅,并制作了光纤弯曲传感器,实现了弯曲和温度的测量。文献[9]提出采用离轴刻写光纤光栅的方式,在标准单模光纤上刻写离轴栅,设计并

收稿日期:2017-06-23

基金项目:光纤分布式油气管线检测技术研究基金资助项目(2010JS037);长输油气光纤光栅温度压力与应变传感监测系统基金资助项目(2009ZDKG-42);井间地震光纤光栅检波关键技术研究基金资助项目(2016JYM6055);西安石油大学创新与实践项目基金资助项目(YCS16211032)

作者简介:张立松(1989-),男,陕西西安人,硕士生,主要从事光纤光栅制备和油田应用的研究。E-mail:386601369@qq.com。

制作了一种光纤弯曲传感器,该传感器在 $0 \sim 1.1 \text{ m}^{-1}$ 曲率范围内实现了高精度的测量,且在 $23.8 \sim 60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 上进行了温度干扰测量。文献[7-9]均是应用各种激光器在光纤上刻写不同结构,刻意激发出包层模式。通过监测这些包层模式峰-峰值光强度的变化,进行弯曲参量的测量。通过监测布喇格主谐振峰的漂移量,进行温度干扰的矫正。然而上述这几种传感器,不仅制作工艺复杂,且包层模式的能量相对较弱,一般变化量为 $3 \sim 5 \text{ dB}$,制约了此类传感器的弯曲灵敏度。因此,有必要研制一种制作方便、包层模式能量较高的全光纤型弯曲传感器。这些基于光纤光栅包层模式的弯曲传感器,其反射光谱图一般是由布喇格主谐振峰和一簇包层谐振模式组成,这些包层谐振模式位于主谐振峰的短波方向,其形成主要是因为激光曝光刻写时激光单侧照射,使得本应该只在纤芯的折射率扰动扩展到了包层,包层的材料折射率和内部应力也随之发生变化,这就破坏了光纤原本的波导结构,纤芯的 LP_{01} 模式耦合出纤芯变成包层模式。这种现象在无切趾刻栅系统中表现很明显。因为这些被激发出来的包层模式位于光纤横截面一侧,这种结构对弯曲异常灵敏,未封装的裸栅可表现出较强的弯曲响应^[10]。与此同时,纤芯模式对应的布喇格主峰却未发生明显漂移,即主峰对弯曲不响应。这也为解决温漂问题提供了方便。本文提出了一种新颖的光纤光栅弯曲测量传感器。该传感器采用离轴刻栅方式,在单模光纤(SMF)上刻写离轴光纤光栅,利用它所激发的包层模式,进行了高灵敏度的弯曲测量。该传感器包层模式能量可达 10 dB ,较文献[7-9]大幅提高。其弯曲响应在每个曲率降低 0.11 dB/m ,同时保持了较好的线性度。对温度的响应在每个单位温度红移 0.02 nm 。鉴于该传感器较高的弯曲响应和较低的温度串扰,可应用在工业监测领域。

1 传感器制作与实验原理

标准光栅制备工艺是利用激光光源(如 193 nm 或 248 nm 准分子激光光源、飞秒激光器、 CO_2 激光器)通过照射相位掩模版,形成激光刻写光束。再将刻栅光束照射在光纤纤芯,制备出成标准光纤光栅。其刻栅位置如图 1 虚线所示。离轴刻写技术是一种可和倾斜刻栅相比拟的刻栅方法,其主要目的是主动激发大量包层模式,研究这些包层模式的传感特性。通过下移(上移)纤芯的位置使刻写光束发生偏

移(见图 1 实线)。偏移的刻写光束偏移到包层,使其折射率产生周期性调制,破坏了光纤的波导结构,增强了 LP_{01} 导模向包层模的耦合。因此,在布喇格共振峰的短波方向激发出了一系列包层谐振峰。这些包层模式的振幅与倾斜光纤光栅(TFBG)的谐振模式的振幅相差不大,但采用离轴刻写的方式却无需改变写栅系统的光路,且具备简单高效可控的特性。

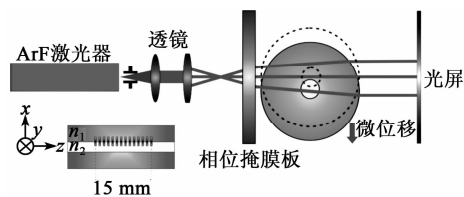


图 1 离轴光纤光栅的制备装置图

本次实验采用 193 nm ArF 紫外准分子激光器(ALEX),每脉冲能量 27 J 、 500 次/s 脉冲照射,曝光时间持续约 2 min 。刻栅所用相位掩模板的成栅长度为 15 mm 。实验所用刻栅系统如图 1 所示,刻栅光束经过透镜滤波整形为平行光束后,再经过柱面镜聚焦到相位掩模版的写栅区域,紧贴相位掩模版后方放置载氢单模光纤,光纤在写栅前需要一定预应力,使光纤保持平直状态,保证刻写栅区分布均匀。实验所用单模光纤是长飞(YOFC)全贝+低损耗光纤,纤芯直径 $\varnothing 10 \text{ }\mu\text{m}$,包层直径 $\varnothing 125 \text{ }\mu\text{m}$, 1550 nm 波段相对折射率为 1.467 。在离轴刻栅过程中,通过光纤夹持平台,控制离芯距离约 $5 \text{ }\mu\text{m}$,确保写栅光束的焦点偏离纤芯中点,以保证包层模式的成功激发。写栅所用单模光纤需进行载氢处理,载氢条件是 10 MPa 压力、恒温 $60 \text{ }^{\circ}\text{C}$ 下保持 15 天 ^[11]。

图 2 为基于 SMF 离轴刻写光纤光栅的反射光谱。由图可看出,在布喇格主峰的短波方向激发出了很多包层模式。这些包层模式的波长间隔基本相同,而且分布均匀。这些模式产生的原因是离轴刻写的偏芯光束破坏了单模光纤的圆对称性,使得在偏移的方向上包层的折射率也随着纤芯折射率周期性调制而变化。破坏了光纤原本的弱导结构和麦克斯韦边界条件。从而使纤芯模式 LP_{01} 模被激发到包层,又复耦合回纤芯,激发出一系列的包层模式。这些包层模式的产生和光纤纤芯折射率和包层的折射率相关。标准光栅应该满足的布喇格谐振条件,即

$$\lambda_{\text{Bragg}} = (n_{\text{eff,core}} + n_{\text{eff,cladding}}) \Lambda_g \quad (1)$$

式中: $n_{\text{eff,core}}$ 为光纤纤芯的有效折射率; Λ_g 为光栅周期。光栅形成需满足的布喇格谐振条件为: 光栅中前向传输的纤芯模式和后向传输的纤芯模式进行模式耦合, 形成稳定的类似驻波的状态。

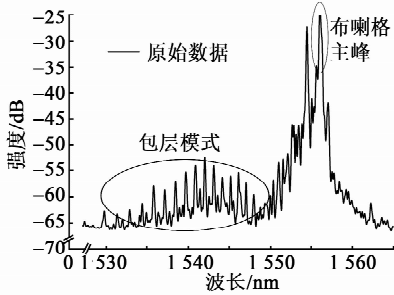


图2 离轴光纤光栅的反射光谱图

对离轴光栅而言, 由于刻栅光束的焦点偏离了纤芯, 使得纤芯的折射率调制变得不对称。这种不对称的折射率调制函数可表示为 $f(\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}, r_{\text{radial}}, z_{\text{axis}})$, 其中, $\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}$ 为刻栅光束对光纤材料折射率的调制量; r_{radial} 为径向距离; z_{axis} 为光纤轴向距离。光栅表面与纤芯轴之间的夹角可表示为

$$\xi = \frac{\partial f(\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}, r_{\text{radial}}, z_{\text{axis}})}{\partial z_{\text{axis}}} \quad (2)$$

则有效的光栅周期可表示为

$$\Lambda_g = \frac{\Lambda}{\cos \left[\arctan \frac{\partial f(\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}, r_{\text{radial}}, z_{\text{axis}})}{\partial z_{\text{axis}}} \right]} \quad (3)$$

将式(3)代入式(1), 可得离轴光纤光栅的布喇格谐振条件为

$$\lambda_{\text{Bragg}} = 2n_{\text{eff}}^{\text{core}} \cdot \frac{\Lambda}{\cos \left[\arctan \frac{\partial f(\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}, r_{\text{radial}}, z_{\text{axis}})}{\partial z_{\text{axis}}} \right]} \quad (4)$$

式中: $(n_{\text{eff}}^{\text{core}} + n_{\text{eff}}^{\text{cladding}})$ 为前向传输的纤芯模式与后向反射的纤芯模式之间的谐振形式; $2(n_{\text{eff}}^{\text{core}})$ 为光纤光栅公式的一般形式。因此, 离轴光栅一部分前向传播纤芯模式会被耦合到包层, 变成后向传播模式。这些包层模式可表示为

$$\lambda_{\text{cladding},i} = (n_{\text{eff}}^{\text{core}} + n_{\text{eff},i}^{\text{cladding}}) \cdot \frac{\Lambda}{\cos \left[\arctan \frac{\partial f(\Delta n_{\text{eff,Inscribe}}, r_{\text{radial}}, z_{\text{axis}})}{\partial z_{\text{axis}}} \right]} \quad (5)$$

式中 $n_{\text{eff},i}^{\text{cladding}}$ 为第 i 个包层模式的有效折射率。所以当光纤发生弯曲时, 弯曲造成包层折射率变化必然会降低后向传播包层模式与前向传播模式的耦合效率, 从而减弱这些包层模式的强度。

2 实验结果与讨论

图3为本次弯曲测量的实验装置。在装置中有两个微位移平台。在实验过程中, 位移平台1固定不动, 推动位移平台2向前平移, 使栅区发生弯曲。位移平台之间起始距离为20 cm, 弯曲的曲率 C 可表示为

$$\sin \left(\frac{LC}{2} \right) = \frac{(L - \Delta L)C}{2} \quad (6)$$

式中: L 为起始距离; ΔL 为距离起始位置的位移量。实验希望通过监测光栅的反射光谱得到弯曲测量的数据。所以选用 MOI 的光纤光栅动态解调仪 (SM125-500. v1.0) 来记录信息。

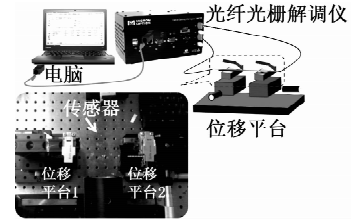


图3 离轴光纤光栅的弯曲测量装置图

实验测定传感器弯曲响应时, 通过 MATLAB 计算曲率在 $0 \sim 1.2 \text{ m}^{-1}$ 内每增加 0.2 m^{-1} 时所对应的位移量, 再将测量数据记录下来。图4为不同曲率传感器的反射输出光谱。由图可见, 当弯曲曲率增大时, 选取 1534.3 nm 处激发的包层共振模式的振幅强度在不断减小。这也说明包层模式在光纤材料受到弯曲而造成的折射率减小时, 其模式耦合效率下降了, 且其中心波长不发生明显的漂移, 说明弯曲实验中未引入横向位移。图5为其振幅变化的线性拟合。由图可看出, 其灵敏度为 0.11 dB/m^{-1} , 拟合度为 0.996 , 结果表明其具有较高的振幅强度变化率和线性度。

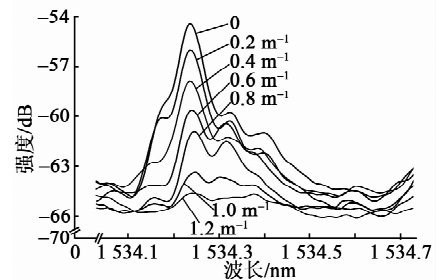


图4 不同曲率传感器的反射输出光谱

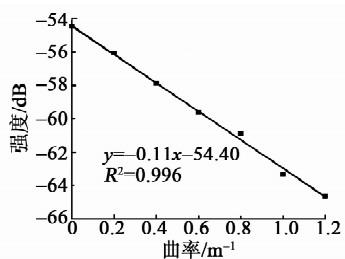


图5 1534.3 nm处包层共振峰功率和弯曲曲率的变化关系

光纤光栅类传感器易受温漂的影响,所以本次实验测定该传感器对温度的响应。如图6所示,1534.3 nm处温度和波长漂移的基本呈现处线性关系。其温度灵敏度 $\kappa_T = 0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,和一般的标准光栅的温漂系数相差不大。说明该型传感器具有良好的温度适应性。离轴刻写的方式基本没有引入温度干扰。

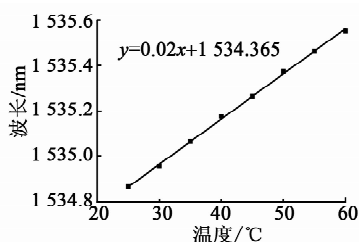


图6 1534.3 nm处包层共振峰波长漂移和温度的变化关系

3 结束语

本文通过采用离轴刻栅的方式在单模光纤上刻写光纤光栅,利用其激发的包层模式用于弯曲传感测量。对这种离轴刻写方式的写栅参数进行了研究,并对离轴光栅激发的这一系列包层模式进行了理论分析,描述了这些包层模式激发机理。最后选取1534.3 nm处激发的包层谐振模式对离轴光栅的弯曲传感特性进行了测量。实验表明,在 $0 \sim 1.2 \text{ m}^{-1}$ 曲率范围内,1534.3 nm处的包层谐振模式对弯曲的灵敏度为 $0.11 \text{ dB}/\text{m}^{-1}$,线性度为0.996,该传感器较高的灵敏度和较好的线性度。布喇格主峰的温度灵敏度为 $0.02 \text{ nm}/^\circ\text{C}$,这也说明该传感器具有较小的温度干扰。

参考文献:

[1] 李丹婷,曾捷,郭晓华,等. 单边固支板结构弯矩光纤光栅监测方法[J]. 压电与声光,2017,39(2):277-280.
LI Danting, ZENG Jie, GUO Xiaohua, et al. Bending moment monitoring method of unilateral clamped plate structure based on optic fiber grating[J]. Piezoelectrics & Acoustoptics, 2017, 39(2): 277-280.

[2] LI Tianliang, SHI Chaoyang, TAN Yuegang, et al. Fi-

ber Bragg grating sensing-based online torque detection on coupled bending and torsional vibration of rotating shaft [J]. IEEE Sensors Journal, 2017, 17 (7): 1999-2007.

[3] 赵霞,刘礼华,吉俊兵,等. 内置光纤光栅传感器的智能索可靠性研究[J]. 压电与声光,2013,35(1):33-37.
ZHAO Xia, LIU Lihua, JI Junbing, et al. Reliability research on smart bridge cable with built-in fiber grating sensors[J]. Piezoelectrics & Acoustoptics, 2013, 35 (1): 33-37.

[4] LIU Hai, TAN Ce, MA Hanlin, et al. Temperature-insensitive strain measurement using in-fiber Bragg gratings inscribed in photonic crystal fiber[J]. Optical and Quantum Electronics, 2016, 48(9): 43.

[5] 尹士玉,张世昌,赵仁涛,等. 全光纤电流互感器温度性能优化与传感环几何参数的确定[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2016(9):95-100.
YIN Shiyu, ZHANG Shichang, ZHAO Rentao, et al. Temperature performance optimization of FOCT and determination of geometric parameters in sensing ring [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2016(9): 95-100.

[6] ZHANG Yunshan, ZHANG Weigang, ZHANG Yanxin, et al. Simultaneous measurement of curvature and temperature based on LP₁₁ mode Bragg grating in seven-core fiber[J]. Measurement Science and Technology, 2017, 28(5): 055101.

[7] NI Wenjun, LU Ping, LUO Chao, et al. Bending direction detective fiber sensor for dual-parameter sensing based on an asymmetrical thin-core long-period fiber grating [J]. IEEE Photonics Journal, 2016, 8 (4): 6803811.

[8] YANG Tingting, QIAO Xueguang, RONG Qiangzhou, et al. Orientation-dependent displacement sensor using an inner cladding fiber bragg grating[J]. Sensors, 2016, 16(9): 1473.

[9] FENG Dingyi, QIAO Xueguang, JACQUES Albert. Off-axis ultraviolet-written fiber Bragg gratings for directional bending measurements[J]. Optics Letters, 2016, 46(6): 1201-1204.

[10] 黄选红,胡炎,张德银. 光时域反射法在民航飞机光纤通信系统中的检测技术与分析[J]. 重庆理工大学学报(自然科学),2014(2):106-110.
HUANG Xuanhong, HU Yan, ZHANG Deyin. Testing Technique and Analysis of PC-OTDR Applied on Optical Fiber Linkage of Civil Aviation Aircraft[J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2014(2): 106-110.

[11] RONG Qiangzhou, QIAO Xueguang, DU Yanying, et al. Reflective refractometer based on a thin-core fiber tailored multimode fiber Bragg grating[J]. IEEE Sensors Journal, 2013, 13(11): 4356-4360.