

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi.J2209751

多光束干涉光纤 FP 探针脉动微压传感研究*

张 雯^{1,2}, 熊 洁^{1,2}, 李昊业^{1,2}, 韩 静³, 祝连庆^{1,2}

(1. 北京信息科技大学光纤传感与系统北京实验室 北京 100192; 2. 北京信息科技大学光电测试技术与仪器教育部重点实验室 北京 100016; 3. 首都医科大学附属北京天坛医院 北京 100070)

摘要:本文提出一种面向脉动微压传感的多光束干涉光纤法布里-珀罗(FP)探针。建立探针多光束干涉波长漂移与微压传感模型,分析其在气、液相环境中微压灵敏度差异。采用化学腐蚀、放电熔接、精密切割技术制备光纤探针器件。利用医用注射器、透明柔性软管、石英插芯构建微压测试环境,通过有限元仿真分析测试环境内部压强分布情况,在气相环境压强范围14.41~85.22 kPa、液相环境压强范围4.50~26.02 kPa的测试条件下,对3支光纤探针微压传感特性进行分析。实验结果表明,气、液相环境中,探针波长均随压强增大发生红移现象,反之,发生蓝移现象;气相环境探针平均微压灵敏度可达 $8.210 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$,液相环境探针平均微压灵敏度可达 $66.720 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$,高于气相环境,与理论模型相符。选取气、液相环境中微压灵敏度最高的光纤探针进行液相脉动微压传感特性研究。实验结果表明,5个脉动周期内探针波长响应良好,且重复性误差较小。本文提出的光纤探针结构紧凑,易于制备,灵敏度高,可实现1 Hz频率范围内的脉动微压传感,为液相环境脉动微压传感提供了重要的参考价值。

关键词: 光纤传感;多光束干涉;法布里-珀罗探针;脉动微压传感

中图分类号: TH744 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

Research on the multi-beam interference optical fiber Fabry-Perot probe for pulsating micro-pressure sensing

Zhang Wen^{1,2}, Xiong Jie^{1,2}, Li Haoye^{1,2}, Han Jing³, Zhu Lianqing^{1,2}

(1. Beijing Laboratory of Optical Fiber Sensing and System, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100192, China; 2. Key Laboratory of the Ministry of Education for Optoelectronic Measurement Technology and Instrument, Beijing Information Science & Technology University, Beijing 100016, China; 3. Beijing Tiantan Hospital, Capital Medical University, Beijing 100070, China)

Abstract: A multi-beam interference optical fiber Fabry-Perot probe for pulsating micro-pressure sensing is proposed in this article. The probe's multi-beam interference wavelength drift and micro-pressure sensing models are formulated, and the micro-pressure sensitivity difference between gas and liquid environments is analyzed. The optical fiber probes are fabricated by chemical corrosion, electric discharge welding and precision cutting technology. The micro-pressure sensing environment is set up using medical syringe, transparent flexible hose, and quartz ferrules. The internal pressure distributions are analyzed by finite element simulation. Three optical fiber FP probes are measured under the gas pressure from 14.41 to 85.22 kPa and the liquid pressure from 4.50 to 26.02 kPa. Experimental results show that in both gas and liquid environments, the probe wavelength has a red-shift with the pressure increase, and a blue-shift with the pressure decrease. The probe's average micro-pressure sensitivity in gas environment can reach $8.210 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$. In liquid environment, it can reach $66.720 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$, which is higher and is consistent with the theoretical prediction. The optical fiber FP probe featuring the highest micro-pressure sensitivity in both gas and liquid environments is selected for the liquid pulsating micro-pressure sensing measurement. Experimental results show that the probe has good wavelength response and the repeatability error is small within five pulsating cycles. The optical fiber FP probe proposed in this article has the advantages of compact structure, easy fabrication,

收稿日期:2022-05-09 Received Date: 2022-05-09

* 基金项目:北京市自然科学基金(4202027)、国家自然科学基金(61801030,62003346)、高等学校学科创新引智计划(D17021)项目资助

and high micro-pressure sensitivity. It can realize pulsating micro-pressure sensing in the frequency range of 1 Hz, which provides an important reference value for micro-pressure sensing applications in liquid environment.

Keywords: optical fiber sensing; multi-beam interference; Fabry-Perot probe; pulsating micro-pressure sensing

0 引言

光纤法布里-珀罗 (Fabry-Perot, FP) 传感技术作为光纤传感的一个重要分支,因其独特的体积优势、多变的传感结构、强大的抗电磁干扰能力,被广泛应用于生物化学分析、医疗检测诊断、工业过程监测等领域^[1-5],涵盖温度、应变、折射率、压力等参数的测量^[6-9]。其中,压力作为重要的监测对象,成为研究热点之一。

随着近些年测量需求的不断加深,单腔光纤 FP 传感器已无法满足高灵敏度传感技术的要求^[10-12]。因此,研究人员提出用于测量压力的双腔甚至多腔光纤 FP 传感结构,基于多光束干涉原理^[13-14],通过调节各腔体材质、长度、间距来实现多参数的测量并提高传感器性能^[15-17]。2016年, Llera 等^[18]提出一种基于液-气 FP 腔的光纤探针结构,实现了温度、压强、压力的多参数测量。2018年,刘申等^[19]利用电弧放电熔接技术制备了薄膜厚度亚微米级别的三光束光纤 FP 探针,其气压灵敏度为 1 036 pm/MPa。2019年, Li 等^[20]利用 CO₂ 激光打孔法、电弧放电熔接法制备高灵敏度光纤气压探针,气压灵敏度达到 80.3 pm/kPa。2020年, Cui 等^[21]利用单模光纤、空芯光纤、光子晶体光纤拼接制备高温高压同时测量的光纤双腔 FP 传感器, 0~10 MPa 压力范围内灵敏度为 1 460 nm/MPa。2021年,胡白燕等^[22]将单模光纤、空芯光纤、双孔光纤依次熔接制备了气压、温度双参数测量的级联双腔 FP 结构,其中,气压灵敏度为 0.5 nm/MPa。然而,上述多腔光纤 FP 结构多基于拼接方式制备,过程复杂,不可避免地会增加光传输损耗,且长期稳定性有待商榷。此外,在压力传感领域,动态微小压力测量的分辨力和灵敏度有待进一步提高,而液相压力环境由于液体的粘滞阻尼效应,传感过程能量衰减快,测量更为复杂,目前相关报道较少,仍有待深入研究。

针对以上问题,本文提出一种面向脉动微压传感的多光束干涉光纤 FP 探针结构。基于多光束干涉理论,对比分析探针在不同环境中的微压传感模型,通过化学腐蚀、放电熔接、精密切割技术实现器件制备,搭建测试系统,对探针在气/液相环境内的脉动微压传感特性进行研究。

1 微压传感模型

多光束干涉光纤 FP 探针结构示意图如图 1 所示。 M_1 、 M_2 、 M_3 3 个反射面构成 3 个 FP 腔:第 1 个腔由 M_1 、

M_2 反射面构成,空气为传播介质,腔长为 L_1 ,可记为“空气 FP 腔”;第 2 个腔由 M_2 、 M_3 反射面构成,光纤纤芯即二氧化硅为光传输介质,腔长 L_2 ,记为“二氧化硅 FP 腔”;第 3 个腔则是由 M_1 、 M_3 反射面构成,是由空气和二氧化硅组成光传播介质,腔长为 L_3 ,称为“混合 FP 腔”。入射光先后经 3 个反射面,形成多光束干涉现象。

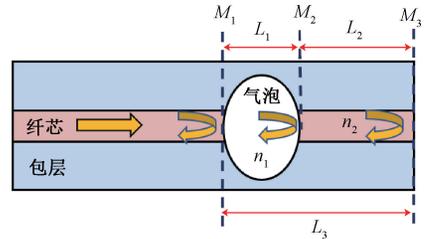


图 1 光纤 FP 探针结构示意图

Fig. 1 Schematic of the optical fiber FP probe

设 M_1 、 M_2 、 M_3 3 个反射面的反射率分别为 R_1 、 R_2 、 R_3 ; k_1 、 k_2 为空气 FP 腔和二氧化硅 FP 腔的传输损耗; $\Delta\varphi_1$ 、 $\Delta\varphi_2$ 为空气 FP 腔和二氧化硅 FP 腔的传播相位差,表示为:

$$\begin{cases} \Delta\varphi_1 = \frac{4\pi}{\lambda} n_1 L_1 \\ \Delta\varphi_2 = \frac{4\pi}{\lambda} n_2 L_2 \end{cases} \quad (1)$$

其中, λ 为光波长。设入射电场为 E_0 ,则整个反射电场可表示为:

$$E_r = AE_0 + BE_0 \exp^{-i\Delta\varphi_1} + CE_0 \exp^{-i(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2)} \quad (2)$$

式中: AE_0 、 BE_0 、 CE_0 是 M_1 、 M_2 、 M_3 反射面的反射电场。3 个电场系数可表示为:

$$\begin{cases} A = \sqrt{R_1} \\ B = \sqrt{(1 - k_1)(1 - R_1)R_2} \\ C = \sqrt{(1 - k_1)(1 - k_2)(1 - R_1)(1 - R_2)R_3} \end{cases} \quad (3)$$

因此,三光束干涉总反射光强可表示为:

$$I_r = |E_r| |E_r|^* = E_0^2 [A^2 + B^2 + C^2 + 2AB \cdot \cos(\Delta\varphi_1)] + 2BC \cdot \cos(\Delta\varphi_2) + 2AC \cdot \cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \quad (4)$$

由式(4)可知,探针反射光强是 3 个频率不同的余弦信号对应于不同 FP 腔长的线性叠加,光谱则是在双光束干涉基础上进行叠加;这表明多光束干涉结构中,反射强度(即反射谱)由反射率、腔长、及腔内介质折射率所决定。

用3个反射面的反射率 R_1 、 R_2 、 R_3 表示反射光总强度,则式(4)可改写为:

$$R(\lambda) = \frac{I(\lambda)}{I_0} = R_1 + R_2 + R_3 - 2\sqrt{R_1 R_2} \cdot \cos\Delta\varphi_1 - 2\sqrt{R_2 R_3} \cdot \cos\Delta\varphi_2 + 2\sqrt{R_1 R_3} \cdot \cos(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \quad (5)$$

记 n_1 、 n_2 分别为空气 FP 腔中介质折射率及纤芯折射率, n_3 为探针周围介质折射率,则:

$$\begin{cases} R_1 = \left(\frac{n_2 - n_1}{n_2 + n_1}\right)^2 = \left(\frac{n_1 - n_2}{n_1 + n_2}\right)^2 = R_2 \\ R_3 = \left(\frac{n_2 - n_3}{n_2 + n_3}\right)^2 \end{cases} \quad (6)$$

探针受外界压力 P 时,其灵敏度由式(5)表示为:

$$S_p = \frac{\partial R(\lambda)}{\partial P} = 2R_1 \cdot \frac{d\Delta\varphi_1}{dP} \cdot \sin\Delta\varphi_1 + 2\sqrt{R_1 R_3} \cdot \frac{d\Delta\varphi_2}{dP} \cdot \sin\Delta\varphi_2 - 2\sqrt{R_1 R_3} \cdot \left(\frac{d\Delta\varphi_1}{dP} + \frac{d\Delta\varphi_2}{dP}\right) \cdot \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \quad (7)$$

由式(1)可知:

$$\begin{cases} \frac{d\Delta\varphi_1}{dP} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n_1 \frac{dL_1}{dP} + L_1 \frac{dn_1}{dP} \right) \\ \frac{d\Delta\varphi_2}{dP} = \frac{4\pi}{\lambda} \left(n_2 \frac{dL_2}{dP} + L_2 \frac{dn_2}{dP} \right) \end{cases} \quad (8)$$

分析式(8),外界压力可导致空气 FP 腔与二氧化硅 FP 腔的介质折射率或腔长被影响,两个腔各自光程差发生变化,进而致使干涉光谱发生漂移。注意到本实验针对的是 100 kPa 以内的微压条件,而二氧化硅材料杨氏模量较大,受压时二氧化硅 FP 腔长改变导致的光程差变化,远小于空气 FP 腔受压引起的光程差变化,因此,二氧化硅 FP 腔长及折射率变化可忽略不计,即 $dL_2/dP = 0$ 、 $dn_2/dP = 0$; 同时,空气 FP 腔为密闭状态,且空气含量较小,外部压强变化引起的内部气体折射率变化可忽略不计,即 $dn_1/dP = 0$, 则探针的微压灵敏度可表示为:

$$S_p = 2R_1 \frac{4n_1\pi}{\lambda} \frac{dL_1}{dP} \cdot \sin\Delta\varphi_1 - 2\sqrt{R_1 R_3} \frac{4n_1\pi}{\lambda} \frac{dL_1}{dP} \cdot \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) = \frac{dL_1}{dP} \cdot \frac{8n_1\pi\sqrt{R_1}}{\lambda} \cdot \begin{bmatrix} \sqrt{R_1} \cdot \sin\Delta\varphi_1 \\ -\sqrt{R_3} \cdot \sin(\Delta\varphi_1 + \Delta\varphi_2) \end{bmatrix} \quad (9)$$



图3 光纤 FP 探针显微图

Fig. 3 Microscopic images of the optical fiber FP probes

由式(9)可知,在微压测量过程中,多光束干涉光纤 FP 探针的灵敏度主要取决于空气 FP 腔,单位压强导致腔长变化越大、干涉光谱波长变化越大,灵敏度越高。此外,当探针处于液相环境中, n_3 变大,由式(6)可知 R_3 将减小。于是,当其他条件不变时,结合式(9)可知,多光束干涉光纤 FP 探针的液相微压灵敏度高于其气相微压灵敏度。

2 光纤探针制备

多光束干涉光纤 FP 探针制备过程如图 2 所示,具体步骤如下:

首先,利用 40% 浓度的氢氟酸溶液将端面切平的单模光纤 (SMF) 腐蚀,利用纤芯与包层在氢氟酸溶液中腐蚀速率不同的特性,在光纤端面处形成凹槽。

其次,将两段腐蚀过的单模光纤 (etched-SMF, eSMF) 纤芯对齐,利用光纤熔接机 (Fujikura 80 S, 放电功率 +30 bit, 放电时间 1 000 ms) 进行放电熔接,得到如图 2(b) 所示的小气泡形貌。

再者,通过多次放电 (功率 +20 bit, 时间 800 ms), 得到如图 2(c) 所示的气泡饱满圆润的光纤 FP 传感器。

最后,通过二维移动平台与显微镜配合,确定空气腔相对位置,利用可编程光纤切割刀 (Vytran LDC-400) 对 FP 传感器尾端进行切割,得到如图 2(d) 所示的多光束干涉光纤 FP 探针。

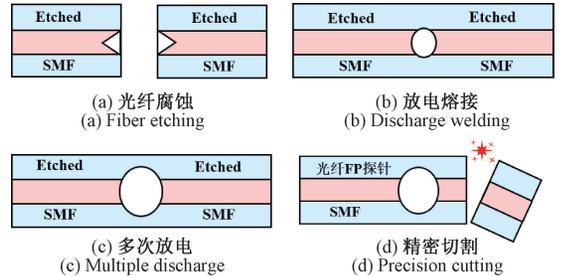


图 2 多光束干涉光纤 FP 探针制备过程

Fig. 2 Fabrication process of multi-beam interference optical fiber FP probe

选取 3 支光纤探针,显微形貌 (M Plan Apo, 10x) 如图 3 所示,记录探针精密切割前后干涉光谱如图 4 所示。将 3 支探针的几何尺寸、自由光谱范围等信息列于表 1 内,其中, L_1 为空气 FP 腔长, L_2 为二氧化硅 FP 腔长, d 为空气 FP 腔侧壁厚度。

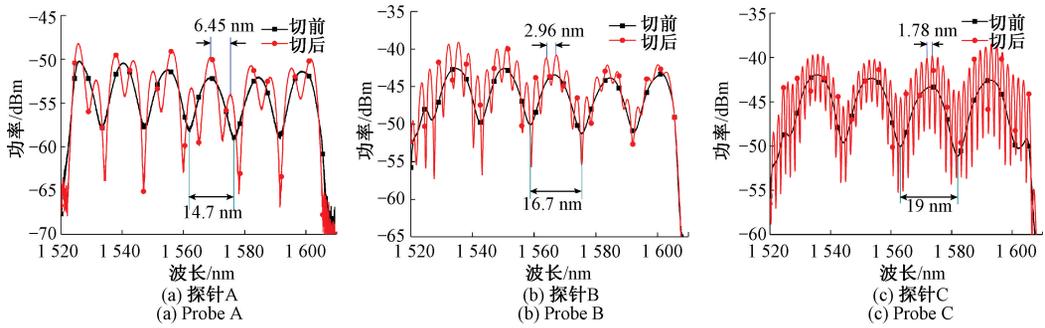


图 4 精密切割前后探针干涉光谱图

Fig. 4 Probe interference spectra before and after precision cutting

由图 3 与 4 可知,切割前后探针光谱由大包络变为大包络叠加小包络的形式,这是由于切割后形成第三反射面所导致。观测切割前干涉光谱图可知,大包络 FSR 与 L_1 相关, L_1 越大,对应光谱 FSR 越小;反之,则越大。切割后,光谱大包络 FSR 无明显变化,但小包络 FSR 随着切割长度,即 L_2 长度的变化而发生改变,表现为 L_2 越长,FSR 越小;反之,则越大。

表 1 3 支光纤探针尺寸及光谱数据

Table 1 Dimension and spectral data of three fiber probes

探针	L_1 / μm	L_2 / μm	FSR/nm		d / μm
			切割前	切割后	
A	52.10	42.35	14.70	6.45	1.51
B	45.90	121.36	16.70	2.96	4.62
C	39.85	261.12	19.00	1.78	4.12

3 微压传感特性实验

3.1 测试系统搭建

微压传感特性测试系统由宽带光源、光谱分析仪、微压测试环境、微量注射泵、上位机构成,如图 5 所示。通过石英插芯将光纤探针进行封装,并与医用注射器、透明柔性软管粘合固定,共同构成微压测试环境,分别对气、液环境中光纤探针微压传感特性进行研究分析。将医用注射器与内径 2 mm 的透明柔性软管一端通过 502 胶水粘合,软管另一端插入石英插芯,使用 502 胶水固定;光纤探针通过石英插芯尾部旋转插入,控制其端面进深,使其露在柔性软管内部的长度保持在 1~2 mm,光纤尾部周向旋涂 AB 胶,保证探针与石英插芯的稳固结合,静置 48 h,待 AB 胶完全固化后进行后续微压测试。通过上位机控制微量注射泵,挤压医用注射器管内介质实现压力变化,进而软管端面压强发生变化并作用于光纤探针,使

其微结构发生变化,光谱发生漂移,实现微压检测。

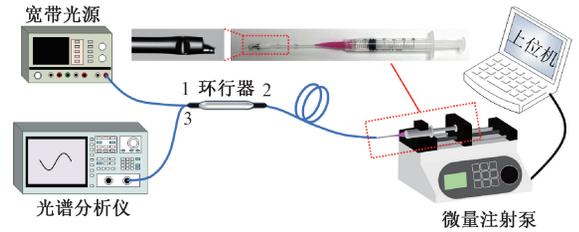


图 5 微压传感测试系统

Fig. 5 Micro-pressure sensing system

使用有限元仿真软件对活塞运动时软管前端面压强变化情况进行分析。构建如图 6 所示的与实物尺寸一致的结构模型,定义模型前端为柔性软管,后端为注射器,并在数据库中添加材料。求解采用 Fluent 与 Transient Structural 结合的双向流固耦合模块,流体模型选择“湍流 $k-\epsilon$ 模型”。实际挤压过程中,流体形状由于边界运动而随时间改变,因此网格划分方面选择多体动网格划分方式,如图 7 所示。其中注射器部位为六面体网格,便于使用 Fluent 铺层功能,网格尺寸 0.5 mm,网格数量 27 360;柔性软管部位使用四面体网格,便于使用 Fluent 系统耦合功能,网格尺寸 0.2 mm,网格数量 136 319。模型尺寸、材料如表 2 所示。

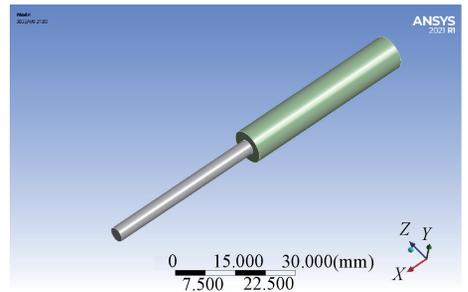


图 6 模型结构图

Fig. 6 Schematic of the model structure

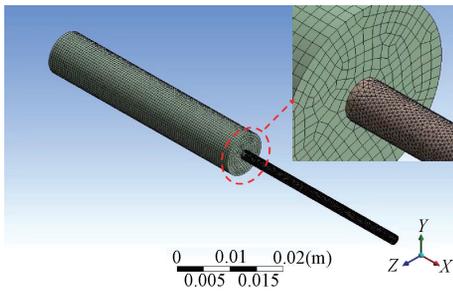


图7 有限元网格划分

Fig. 7 Finite element meshing result

令注射器、柔性软管内流体为空气,注射器尾端为运动面,控制其挤压进深,使空气以 0.3 ml 的步进压缩

表2 模型参数

Table 2 Model parameters				mm
模拟对象	材料	内径	外径	长度
柔性软管	硅胶	2	2.5	40.0
注射器	塑料	9	10.0	47.5

1.5 ml,每次压缩过程用时 1 s,压缩后停留 1 s 使其状态稳定,观察柔性软管外端面压强变化情况。表 3 中所列为活塞推进到步进位置时软管端面压强分布云图及压强值,分析表可知,推进深度增加,压强增加,且软管端面压强分布均匀。

表3 气相压强分布

Table 3 Pressure distribution in gas

推进深度/ml	0.3	0.6	0.9	1.2	1.5
压强分布云图					
压强值/kPa	14.41	31.98	52.30	71.68	85.22

对液相环境中压强分布进行分析,注射器、柔性软管内部材料均设为水,模型尺寸、网格划分方式、流体模型、求解状态均与气相环境完全一致,考虑到水的不可压缩性,在液相环境中控制注射器尾端挤压进深小于气相环

境,使水以 0.1 ml 的步进压缩 0.5 ml,压缩到步进位置时停留 1 s 使其状态稳定,观察硅胶软管外端面压强变化情况。表 4 中所列为在活塞推进到步进位置时软管端面压强分布云图及压强值。

表4 液相压强分布

Table 4 Pressure distribution in liquid

推进深度/ml	0.1	0.2	0.3	0.4	0.5
压强分布云图					
压强值/kPa	4.50	9.32	14.50	20.05	26.02

根据以上仿真结果指导实验,在气相环境中,以 0.3 ml 为步进,上位机控制微量注射泵挤压医用注射器,使其内气体体积由 3 ml 减少至 1.5 ml,软管端面压强由 14.41 kPa 变化至 85.22 kPa;液相环境中,以 0.1 ml 为步进,上位机控制微量注射泵挤压医用注射器,使其内液体体积由 3 ml 减少至 2.5 ml,软管端面压强由 4.50 kPa 变

化至 26.02 kPa。可知两种环境中压强值均小于 100 kPa,属于微压量级。

3.2 气压传感特性测试

采用图 5 所示的微压传感测试系统,将医用注射器管内充满 3 ml 空气,通过上位机控制微量注射泵挤压,使软管内部产生压强。以 0.3 ml 为步进,施压使注射器内

气体体积由 3 ml 减少至 1.5 ml,由仿真可知,软管端面所产生压强分别为 14.41、31.98、52.30、71.68、85.22 kPa,施压到测量位置后,静置 3~5 min,待管内气体稳定采集光谱数据。

采集气压传感特性测试初始光谱如图 8 所示,选取 3 支光纤探针在 1 570 nm 波段附近的特征波谷 A、B、C 作为观测点,研究气相环境中压强对光纤探针干涉光谱的影响。

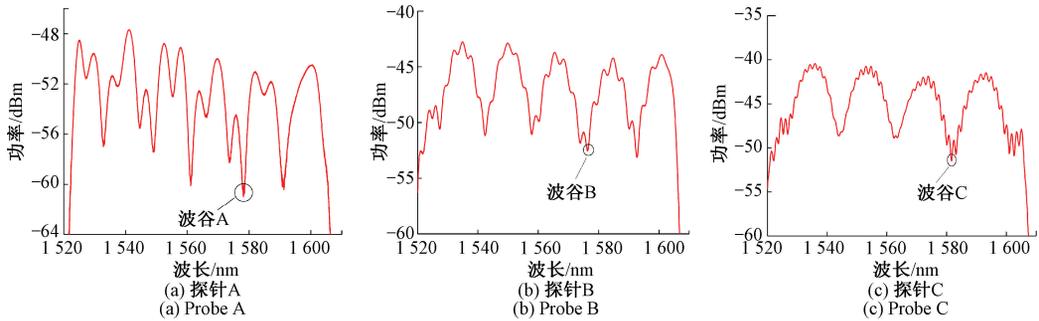


图 8 气相环境探针初始干涉光谱图

Fig. 8 Initial interference spectra of the optical fiber FP probes in gas environment

对 3 支光纤探针在气相环境施压过程中光谱数据进行采集,如图 9 所示。压强增大时 3 支探针光谱均向长波方向发生红移,线性拟合结果表明,3 支探针灵敏度分别为 8.65、5.12、3.90 pm/kPa,线性度分别为 0.946 7、0.989 9、0.982 5,三者相比探针 A 灵敏度较高。

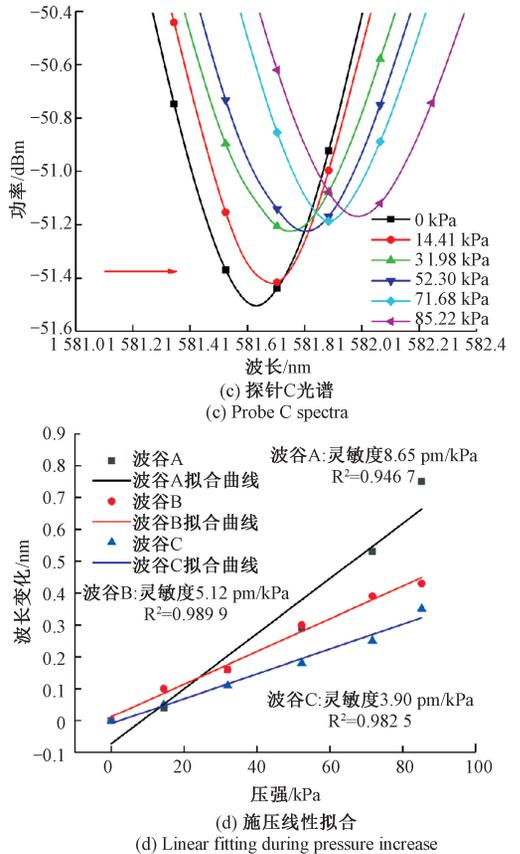
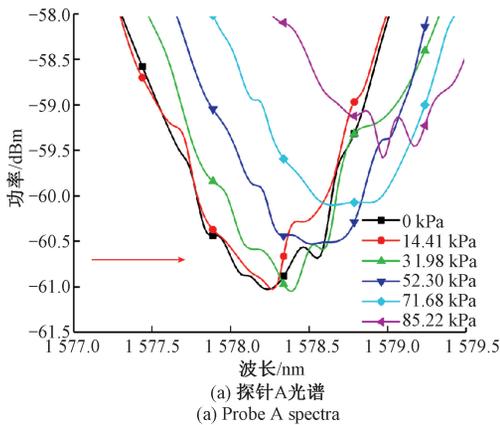
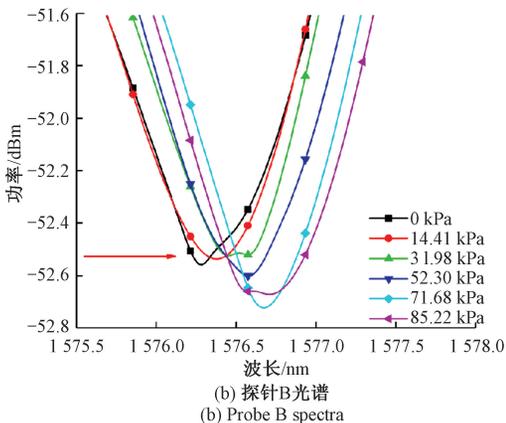


图 9 气相环境探针施压光谱漂移图及线性拟合

Fig. 9 Optical spectra and linear fitting of the optical fiber FP probe during pressure increase in gas environment



(a) 探针 A 光谱
(a) Probe A spectra



(b) 探针 B 光谱
(b) Probe B spectra

释放注射器活塞至原处,释压过程与施压过程一致,以 0.3 ml 为步长,使气体体积由 1.5 ml 恢复至 3 ml,在测量位置使其静置采并集光谱数据,如图 10 为释压过程中

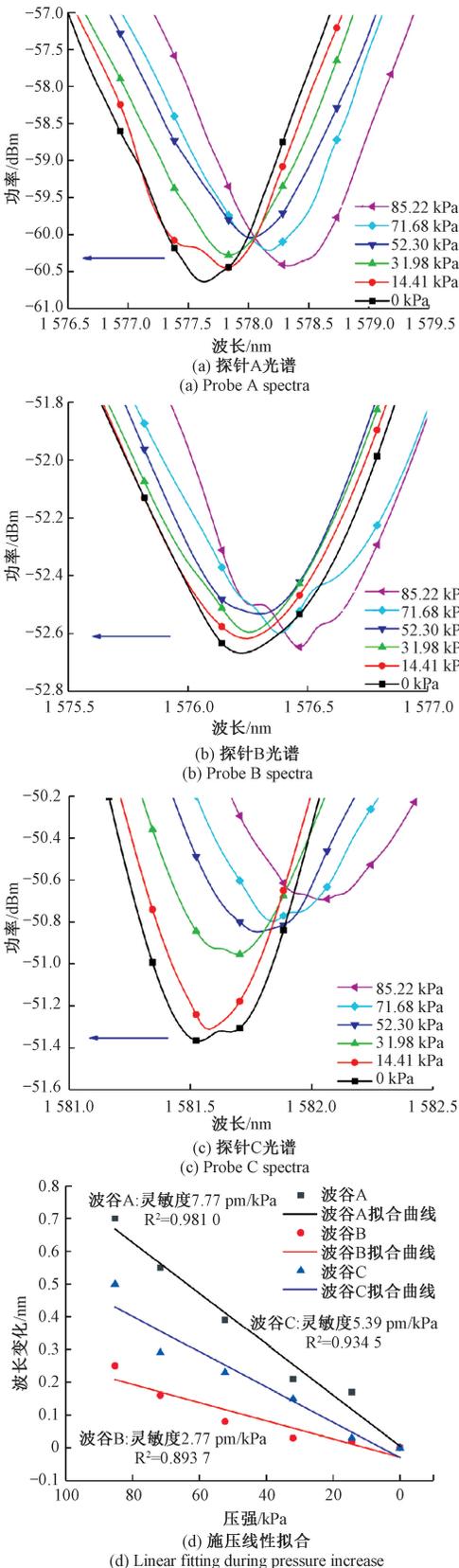


图10 气相环境探针释压光谱漂移图及线性拟合

Fig. 10 Optical spectra and linear fitting of the optical fiber FP probe during pressure decrease in gas environment

光谱漂移图及波谷数据拟合图。压强减小时3支探针光谱均向短波方向发生蓝移,线性拟合结果表明,灵敏度分别为 7.77 、 2.77 和 $5.39 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$,线性度分别为 0.9810 、 0.8937 和 0.9345 。注意到释压过程前两支光纤探针灵敏度降低,但第3支有所提高,这是由于压强变化过程中探针被压缩或拉伸后产生形变未能及时恢复,后续测试过程需待气体稳定更长时间再进行光谱采集。

3支光纤探针的气相压力测试结果列入表5,平均灵敏度分别为 8.210 、 3.945 和 $4.645 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$ 。可见探针A较其他两支探针具有更高的灵敏度,其原因是该探针空气FP腔长较长、侧壁较薄、二氧化硅FP腔较短,使其更容易被压缩、拉伸。

表5 气相环境探针微压灵敏度及线性度

Table 5 Micro-pressure sensitivity and linearity of the optical fiber FP probe in gas environment

探针	施压过程		释压过程		平均灵敏度 $/(\text{pm} \cdot \text{kPa}^{-1})$
	灵敏度 $/(\text{pm} \cdot \text{kPa}^{-1})$	线性度	灵敏度 $/(\text{pm} \cdot \text{kPa}^{-1})$	线性度	
A	8.65	0.9467	7.77	0.9810	8.210
B	5.12	0.9899	2.77	0.8937	3.945
C	3.90	0.9825	5.39	0.9345	4.645

3.3 液相传感特性测试

采用图5所示的微压传感测试系统,注射器与软管内部介质均为水,通过微量注射泵控制活塞运动挤压管内水使光纤探针受力发生形变,光谱发生漂移,完成液压测试。以 0.1 ml 为步进,施压使注射器内液体体积由 3 ml 减少至 2.5 ml ,由仿真可知,软管端面所产生压强分别为 4.50 、 9.32 、 14.50 、 20.05 和 26.02 kPa ,活塞到达测试位置时静置 $2 \sim 3 \text{ min}$,待管内液体稳定后对探针光谱采集分析。

测试之前需记录3支探针在液相环境中的初始光谱样貌,如图11所示。同样选取处于 1570 nm 波段的波谷特征点 A_1 、 B_1 、 C_1 作为观测点探究液相环境中光纤探针微压传感特性。

施压过程保持外界因素恒定,待管内液体稳定、光谱分析仪数据稳定后记录液相环境中施压光谱漂移图,如图12所示。压强增大时3支探针光谱均向长波方向发生红移,线性拟合结果表明,3支光纤探针液相施压灵敏度分别为 54.85 、 21.88 、 $5.60 \text{ pm} \cdot \text{kPa}^{-1}$,线性度分别为 0.9379 、 0.9874 、 0.9716 ,三者相比探针A灵敏度较高。

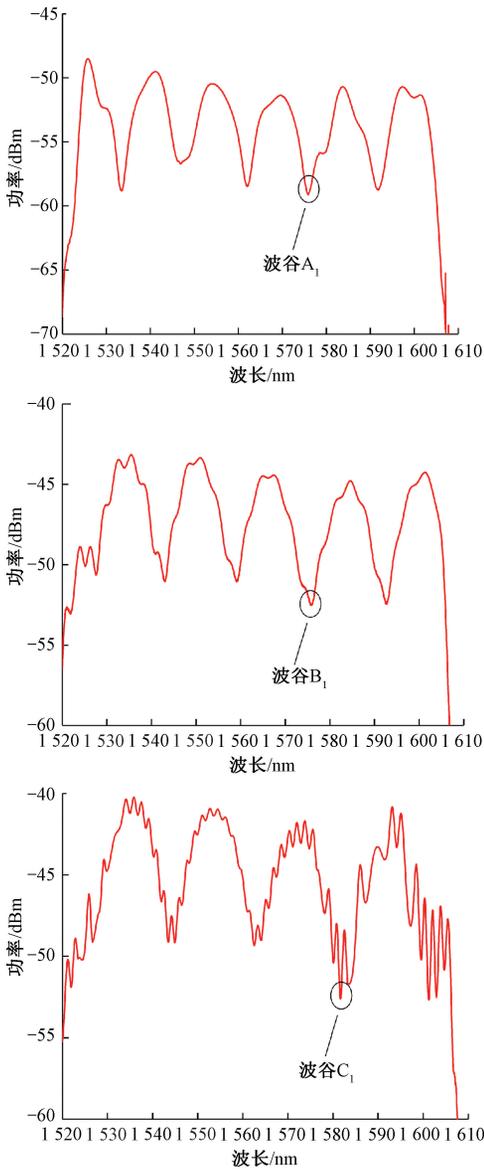


图 11 液相环境探针初始干涉光谱图

Fig. 11 Initial interference spectra of the optical fiber FP probes in liquid environment

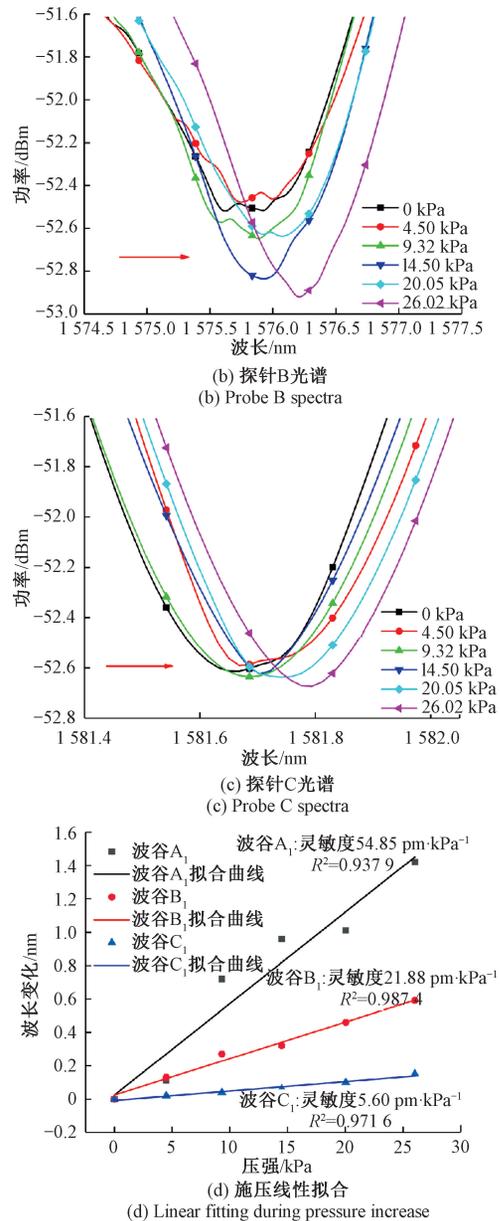
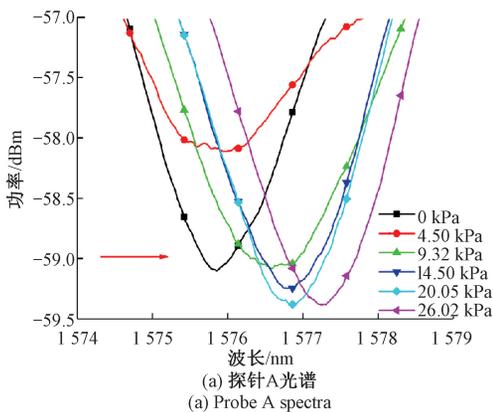


图 12 液相环境探针施压光谱漂移图及线性拟合

Fig. 12 Optical spectra and linear fitting of the optical fiber FP probe during pressure increase in liquid environment



释放活塞使其恢复至挤压前位置,以 0.1 ml 为步进,记录探针光谱释压过程中漂移量,并对特征波谷数据进行拟合,得到光纤探针释压灵敏度与线性度情况,如图 13 所示。压强减小时 3 支探针光谱均向短波方向发生蓝移,线性拟合结果表明,3 支光纤探针液相释压灵敏度分别为 78.59、22.21 和 6.04 $\text{pm}\cdot\text{kPa}^{-1}$,线性度分别为 0.917 2、0.976 3 和 0.943 7。注意到 3 支光纤探针释压灵敏度均略高于施压过程,这是由于液相环境释压过程活塞受阻较大,弹回速度较快,测量位置有所偏差,导致光纤腔体形变量较大,反射光谱漂移量变大。

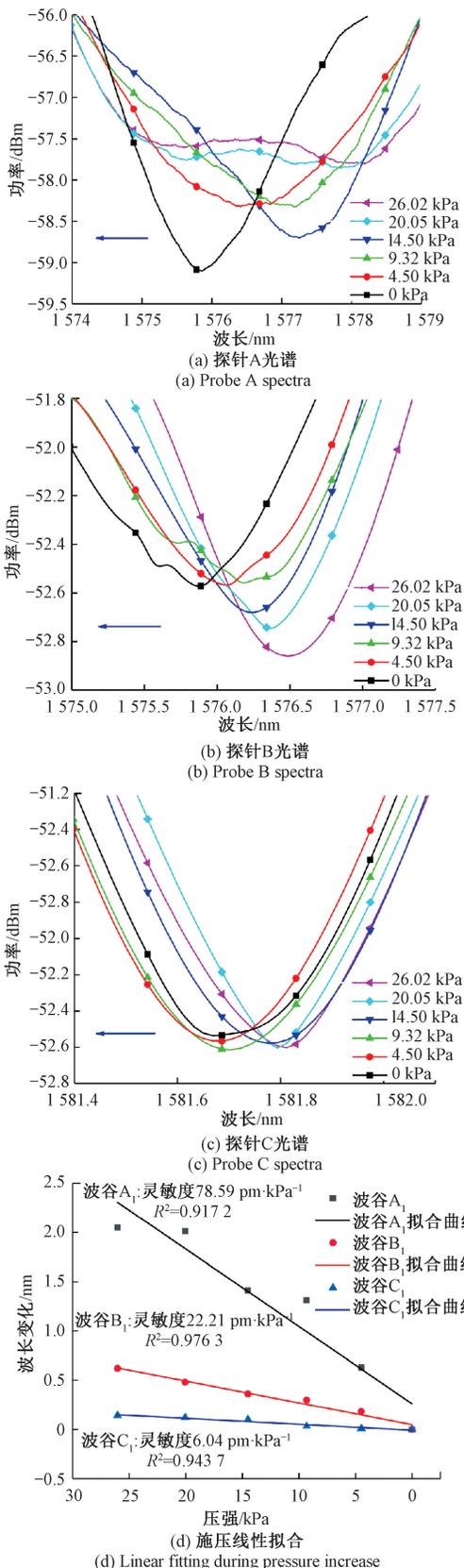


图 13 液相环境探针释压光谱漂移图及线性拟合
Fig. 13 Optical spectra and linear fitting of the optical fiber FP probe during pressure decrease in liquid environment

3支光纤探针的液相压力测试结果列入表6,平均灵敏度分别为66.720、22.045、5.820 $\text{pm}\cdot\text{kPa}^{-1}$ 。结合表5、6数据可知,3支探针液相微压灵敏度均高于气相环境,与理论推导一致,即测试环境折射率变大时,探针微压灵敏度提高,波长漂移现象更加明显。3支探针相比,探针A的气相、液相微压灵敏度均较高,且在液相环境内探针A的微压灵敏度有较大提升,这得益于其空气FP腔长较长、侧壁较薄、二氧化硅FP腔长较短的结构特点,使得周围环境对探针的压力很有效的转化为光纤腔体的形变。探针B、C的二氧化硅FP腔长相对较长,气相、液相微压灵敏度均较低,尤其是探针C,在液相环境内微压灵敏度未出现较大提升。这是由于3根探针中探针C的二氧化硅FP腔长最长,导致其空气腔FP结构相对不敏感,且周边环境出现压力波动时,探针端面进一步发生摇摆,影响器件灵敏度与线性度。

表6 液相环境探针微压灵敏度及线性度

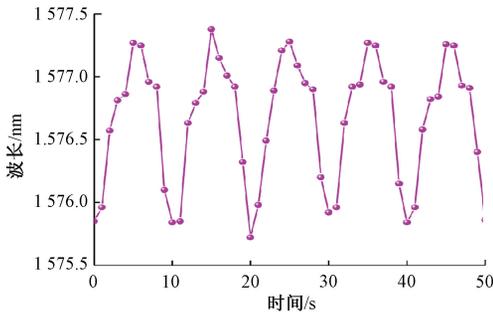
Table 6 Micro-pressure sensitivity and linearity of probe in liquid phase environment

探针	施压过程		释压过程		平均灵敏度 $\text{}/(\text{pm}\cdot\text{kPa}^{-1})$
	灵敏度 $\text{}/(\text{pm}\cdot\text{kPa}^{-1})$	线性度	灵敏度 $\text{}/(\text{pm}\cdot\text{kPa}^{-1})$	线性度	
A	54.85	0.937 9	78.59	0.917 2	66.720
B	21.88	0.987 4	22.21	0.976 3	22.045
C	5.60	0.971 6	6.04	0.943 7	5.820

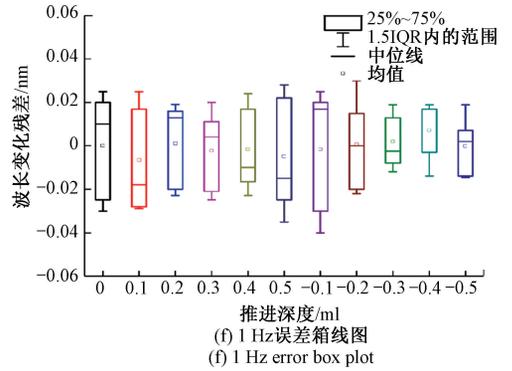
3.4 液压脉动传感特性测试

综合气、液相环境中微压传感特性数据,结合实际脉动微压监测需求,选取光纤探针A作为液压脉动传感特性测试器件。在图5所示的微压传感测试系统中通过上位机控制微量注射泵驱动电机,实现对注射器活塞步进0.1 ml、总量0.5 ml的可控挤压,同时使其内部分别形成0.1、0.5、1 Hz的脉动微压环境,利用光谱分析仪监测光谱实时变化情况。记录活塞到达测试位置时特征波谷A₁的波长数据,绘制五个脉动周期内探针时间-波长响应曲线。同时,分析光纤探针在不同脉动频率微压环境中的重复性情况,绘制各频率下每个测量位置的误差箱线图,如图14所示。

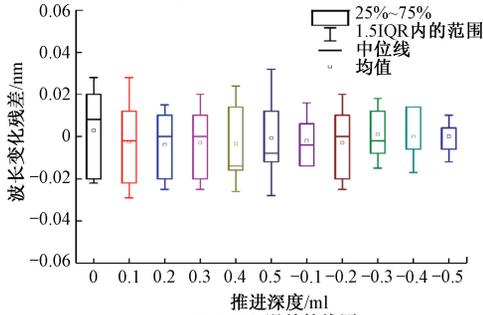
由时间-波长响应曲线可知,3种脉动频率微压环境中,光纤探针波长响应良好,5个频率周期内能够完成液相环境中的脉动微压监测。同时注意到单个周期内去程与回程波长数据略有差异,这是由于在脉动微压监测中均以瞬时方式采集数据,存在压力不能静置稳定的情况。此外,注意到频率1 Hz的脉动环境中,回程释压时波长数据依然有向长波方向红移的趋势,这是由于1 Hz频率



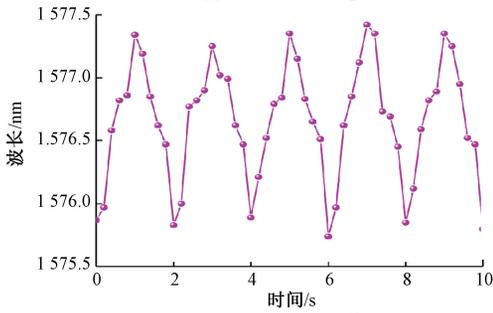
(a) 0.1 Hz 响应曲线
(a) 0.1 Hz response curve



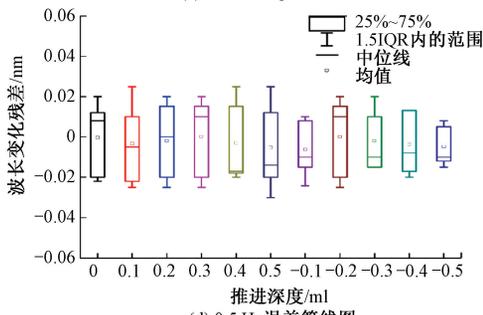
(f) 0.1 Hz 误差箱线图
(f) 0.1 Hz error box plot



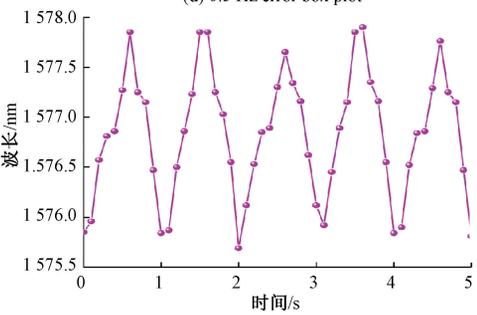
(b) 0.1 Hz 误差箱线图
(b) 0.1 Hz error box plot



(c) 0.5 Hz 响应曲线
(c) 0.5 Hz response curve



(d) 0.5 Hz 误差箱线图
(d) 0.5 Hz error box plot



(e) 1 Hz 响应曲线
(e) 1 Hz response curve

图 14 脉动微压时间-波长响应曲线及重复性误差箱线图
Fig. 14 Time-wavelength response curves and repeatability error box plots of pulsating micro-pressure measurement

中,电机对注射器活塞挤压速度较快,导致在回程过程中探针形变未恢复到之前形变,数据出现误差。

对以上数据使用四分位距统计方法 (interquartile range, IQR) 进行重复性误差分析,绘制 3 种频率下光纤探针脉动微压监测重复性误差箱线图。由图可知,光纤探针在施压释压的脉动微压过程中,各波长点整体变化重复性误差较小,波动范围较窄,但在每种频率施压释压的临界点,波长数据变化误差相比其他时间较大,这是由于在施压-释压的临界时刻,存在挤压速度变化,导致光纤探针出现滞后误差。

4 结 论

本文提出一种面向脉动微压传感的多光束干涉光纤 FP 探针,建立了探针多光束干涉波长漂移与微压传感模型,采用化学腐蚀、放电熔接、精密切割技术制备光纤探针器件,并对探针气、液环境下的脉动微压传感特性进行研究,具体结论如下:

1) 分析探针 3 个反射面的反射能量强度,基于多光束干涉原理,通过理论建模、原理阐述、公式推导,建立探针波长漂移与微压传感模型,并分析其在气、液相环境中微压灵敏度差异。

2) 采用化学腐蚀法进行光纤腐蚀,在其端面形成凹槽,并利用电弧熔接放电技术对两段腐蚀后的光纤进行熔接,形成气泡光纤 FP 结构,通过精密切割技术制备不同腔长的多光束干涉光纤探针。

3) 利用医用注射器、透明柔性软管、石英插芯构建微压测试环境,通过有限元仿真分析测试环境内部压强分布情况。在气相环境压强范围 14.41 ~ 85.22 kPa、液相环境压强范围 4.50 ~ 26.02 kPa 的测试条件下,对 3 支光纤探针微压传感特性进行分析。实验结果表明,气、液相环境中,探针波长均随压强增大发生红移现象,反之,发

生蓝移现象。气相环境探针平均微压灵敏度可达 8.210 pm/kPa,液相环境探针平均微压灵敏度可达 66.720 pm/kPa,高于气相环境,与理论模型相符。

4) 选取气、液相环境中微压灵敏度最高的光纤探针作为监测器件,进行 0.1、0.5、1 Hz 的脉动微压传感特性研究。实验结果表明,5 个频率周期内的液相脉动微压监测过程中,探针波长响应良好,且重复性误差较小。

综上,本文提出的光纤探针结构紧凑,易于制备,同时具有较高的微压传感特性,能够实现 1 Hz 频率范围内的脉动微压监测,为液相环境中微压传感提供了重要的参考价值。

参考文献

- [1] YIN M, GU B, AN Q F, et al. Recent development of fiber-optic chemical sensors and biosensors: Mechanisms, materials, micro/nano-fabrications and applications[J]. *Coordination Chemistry Reviews*, 2018, 376: 348-392.
- [2] 张天鹏. 基于冠脉血流储备分数检测的光纤法布里-珀罗传感器研究[D]. 济南: 山东大学, 2019.
ZHANG T P. Research of fiber Fabry-Perot sensor based on coronary fractional flow reserve detection[D]. Jinan: Shandong University, 2019.
- [3] 韩国庆, 刘显明, 雷小华, 等. 光纤传感技术在航空发动机温度测试中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(1): 145-164.
HAN G Q, LIU X M, LEI X H, et al. Application of optical fiber sensing in aero-engine temperature test[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(1): 145-164.
- [4] LI H, BU J, LI W, et al. Fiber optic Fabry-Perot sensor that can amplify ultrasonic wave for an enhanced partial discharge detection [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-6.
- [5] 李昊业, 张雯, 宋言明, 等. 面向航天器微小碰撞的飞秒光纤光栅冲击检测系统[J]. *电子测量与仪器学报*, 2022, 36(2): 153-159.
LI H Y, ZHANG W, SONG Y M, et al. Impact detection system of femtosecond fiber Bragg grating for spacecraft micro-collisions [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2022, 36 (2): 153-159.
- [6] 刘福祿, 张钰民, 孟凡勇, 等. 基于端面镀膜和基底增敏的级联法布里-珀罗光纤温度传感器[J]. *仪器仪表学报*, 2020, 41(11): 105-111.
LIU F L, ZHANG Y M, MENG F Y, et al. Fiber temperature sensor based on the cascaded Fabry-Perot with end face coating and substrate sensitization [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2020, 41(11): 105-111.
- [7] 孙梦, 焦彤, 修林鹏, 等. 基于同轴电缆法布里-珀罗传感器的跨断层管道应变监测[J]. *油气储运*, 2021, 40(10): 1145-1154.
SUN M, JIAO T, XIU L P, et al. Strain monitoring of crossing-fault pipelines with coaxial cable Fabry-Perot interferometer sensors [J]. *Oil & Gas Storage and Transportation*, 2021, 40(10): 1145-1154.
- [8] ZHANG W, LI H, ZHU L, et al. Dual-parameter optical fiber probe based on a three-beam Fabry-Perot interferometer[J]. *IEEE Sensors Journal*, 2021, 21(4): 4635-4643.
- [9] ZHANG W, ZHUANG W, DONG M, et al. Dual-parameter optical fiber sensor for temperature and pressure discrimination featuring cascaded tapered-FBG and ball-EFPI [J]. *IEEE Sensors Journal*, 2019, 19(14): 5645-5652.
- [10] CHEN X, TONG X, ZHANG C, et al. High-precision optical fiber Fabry-Perot composite sensor for pressure and temperature [J]. *Optics Communications*, 2022, 506: 127580.
- [11] YANG D, LIU Y, WANG Y, et al. Integrated optic-fiber sensor based on enclosed EFPI and structural phase-shift for discriminating measurement of temperature, pressure and RI [J]. *Optics and Laser Technology*, 2020, 126: 106112.
- [12] XIA P, TAN Y, YANG C, et al. A composite fabry-perot interferometric sensor with the dual-cavity structure for simultaneous measurement of high temperature and strain[J]. *Sensors*, 2021, 21(15): 4989.
- [13] 王硕. 基于游标效应增敏的光纤 F-P 横向压力传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2021.
WANG SH. Research on optical fiber F-P transverse pressure sensor based on vernier effect sensitization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2021.
- [14] XIONG W, SHU Q, LU P, et al. Sensitivity enhanced fiber optic hydrophone based on an extrinsic Fabry-Perot interferometer for low-frequency underwater acoustic sensing[J]. *Optics Express*, 2022, 30(6): 9307-9320.
- [15] WU G, XIONG L, DONG Z, et al. Development of highly sensitive fiber-optic acoustic sensor and its preliminary application for sound source localization[J]. *Journal of Applied Physics*, 2021, 129(16): 164504.
- [16] LI H, BU J, LI W, et al. Fiber optic Fabry-Perot sensor that can amplify ultrasonic wave for an enhanced partial discharge detection [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 1-6.

- [17] 周文秀, 侯文博, 张海军. 光纤压力传感器在医疗领域的发展及应用[J]. 中国医疗器械杂志, 2018, 42(5): 354-356, 360.
ZHOU W X, HOU W B, ZHANG H J. Development and application of fiber-optic pressure sensor in medical field[J]. Chinese Journal of Medical Instrumentation, 2018, 42(5): 354-356, 360.
- [18] LLERA M, AELLEN T, HERVAS J, et al. Liquid-air based Fabry-Pérot cavity on fiber tip sensor[J]. Optics Express, 2016, 24(8): 8054-8065.
- [19] 刘申, 廖常锐, 王义平. 光纤气泡微腔传感技术[J]. 应用科学学报, 2018, 36(1): 104-147.
LIU SH, LIAO CH R, WANG Y P. Optical fiber sensors based on in-fiber air bubble microcavities[J]. Journal of Applied Sciences, 2018, 36(1): 104-147.
- [20] LI Z, ZHANG Y X, ZHANG W G, et al. High-sensitivity gas pressure Fabry-Perot fiber probe with micro-channel based on Vernier effect [J]. Journal of Lightwave Technology, 2019, 37(14): 3444-3451.
- [21] CUI Y, JIANG Y, LIU T, et al. A dual-cavity Fabry-Pérot interferometric fiber-optic sensor for the simultaneous measurement of high-temperature and high-gas-pressure[J]. IEEE Access, 2020, 8: 80582-80587.
- [22] 胡白燕, 文富荣, 程永山, 等. 基于级联腔法布里-珀罗干涉仪的温度和压力同时测量[J]. 激光与光电子学进展, 2021, 58(19): 1906006.
HU B Y, WEN F R, CHENG Y SH, et al. Simultaneous measurement of temperature and pressure based on cascaded Fabry-Perot interferometer [J]. Laser and Optoelectronics Progress, 2021, 58(19): 1906006.

作者简介



E-mail: wenzhang@bistu.edu.cn

Zhang Wen received her B. Sc. and M. Sc. degrees both from China Jiliang University in 2009 and 2012, respectively, and received her Ph. D. degree from Tianjin University in 2016. She is currently an associate professor at Beijing Information Science and Technology University. Her current research interests include optical fiber sensing and microstructure.



E-mail: zhulianqing@sina.com

Zhu Lianqing (Corresponding author) received his B. Sc. and M. Sc. degrees both from Hefei University of Technology in 1984 and 1989, and received his Ph. D. degree from Harbin Institute of Technology in 2013. He is currently a professor at Beijing Information Science and Technology University. His main research interests include fiber sensing, fiber laser, and optoelectrical precision measurement technology.

张雯, 分别在 2009 年和 2012 年于中国计量大学获得学士学位和硕士学位, 2016 年于天津大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学副教授, 主要研究方向为光纤传感与光纤微结构。

祝连庆 (通信作者), 分别在 1984 年和 1989 年于合肥工业大学获得学士学位和硕士学位, 2013 年于哈尔滨工业大学获得博士学位, 现为北京信息科技大学教授, 主要研究方向为光纤传感、光纤激光器、光电精密测试技术等。