

结构简单的熔接式全石英光纤 EFPI 高静压传感器

张 杰 荆振国 李 昂 彭 伟

大连理工大学物理与光电工程学院, 辽宁 大连 116024

摘要 介绍了一种结构简单的熔接式全石英光纤非本征型法布里-珀罗干涉仪(EFPI)高静压传感器,对传感器的压力效应进行了理论分析,给出了传感器的设计结构和制作过程。和传统 EFPI 传感器相比,该传感器具有长腔长、结构简单、制作工艺简易、应用灵活方便等优点,可以用于较高静态压力的测量。建立了传感解调系统,对压力进行了测试,测量精确度高,稳定性好。同时进行了温度敏感度测量实验,温度敏感系数约为 0.72 nm/°C,传感器的腔长温度线性度好,结果显示传感器温度交叉敏感度低。在 0~20 MPa 压力测量范围内,该传感器的压力腔长灵敏度可以达到 21 nm/MPa,连续 10 h 动态测量条件下,测量偏差为 0.2%FS。

关键词 传感器; 压力; 非本征型法布里-珀罗干涉仪; 石英毛细管

中图分类号 TP212.14

文献标识码 A

doi: 10.3788/CJL201643.1010004

All-Silica Fiber EFPI High Static Pressure Sensor in Fusion with Simple Structure

Zhang Jie Jing Zhenguo Li Ang Peng Wei

School of Physics and Optoelectronic Engineering, Dalian University of Technology, Dalian, Liaoning 116024, China

Abstract All-silica fiber extrinsic Fabry-Perot interferometer (EFPI) high static pressure sensor in fusion with simple structure is introduced. The pressure effect of the sensor is theoretically analyzed, and the design structure and manufacturing process of the sensor are given. The sensor has some advantages such as long cavity length, simple structure, simple manufacturing process, convenience and flexibility in application comparing with traditional EFPI sensor, while it can be used in the measurement of higher static pressure. Sensing demodulation system is set up to conduct a pressure test. The results show that the system has high measuring precision and good stability. Meanwhile, the temperature sensitivity measuring experiment is conducted. Temperature sensibility coefficient is about 0.72 nm/°C and the cavity length-temperature has good linearity. The results show that the sensor has a low temperature crossing sensitivity. In specific pressure of 0~20 MPa, pressure cavity length sensitivity of the sensor can reach 21 nm/MPa. Measuring deviation is 0.2%FS with continuous dynamic measurement of 10 h.

Key words sensors; pressure; extrinsic Fabry-Perot interferometer; quartz capillary

OCIS codes 280.3420;060.2310;

1 引 言

由于其自身的结构特点,非本征型法布里-珀罗干涉仪(EFPI)传感器^[1]成为一种适合进行静态压力测量^[2]的光纤传感器。EFPI 传感器有以下 4 种常用的制作方法:1) 在传感器两端的单模光纤(SMF)上镀高反射膜,然后再进行光纤之间的熔接,此法操作难度极高,难以精确控制膜片厚度;2) 利用化学刻蚀法将光纤腐蚀出一个空气腔作为法布里-珀罗(F-P)腔,但是由于化学药品不易精确控制,因此难以制成理想的腔长

收稿日期: 2016-05-24; 收到修改稿日期: 2016-07-14

基金项目: 国家自然科学基金(61137005,11474043)、中央高校基本科研业务费专项资金(DUT16TD17)

作者简介: 张 杰(1991—),男,硕士研究生,主要从事非本征型法布里-珀罗干涉传感器方面的研究。

E-mail: zhangj2061@mail.dlut.edu.cn

导师简介: 荆振国(1978—),男,博士,副教授,主要从事光纤传感器及光电测量技术等方面的研究。

E-mail: jingzg@dlut.edu.cn

结构;3)用激光熔接法^[3]将光纤和毛细管熔接在一起,这种方法得到的传感器结构简单,但制作成本大大增加;4)化学刻蚀和光纤熔接^[4]手段可实现全石英结构的微型膜片式^[5]EFPI传感器的制作,这种传感器结构靠膜片来感受压力,压力测量灵敏度高,但是膜片的厚度难以精确控制,而且需要化学腐蚀和激光熔接技术,制作工艺比较复杂。

近年来,随着社会需求的不断增加,EFPI技术得到迅速发展。有研究者将两段光纤和毛细管熔接起来以制成传感器,但得到的传感器腔长很短,制作难度较大,且多用于温度等量的测量。本文介绍了一种结构简单的全石英光纤EFPI高静压传感器^[6],原料只需单模光纤和石英毛细管,用光纤熔接机把两段单模光纤熔接到石英毛细管上即可得到传感器;此传感器具有结构简单、易于制作、成本较低等优点,可大规模工业化生产。很多EFPI传感器腔长均为数十微米量级,制作时难以精确控制其长度;本设计的传感器腔长为毫米量级,通过显微镜就可以准确地控制其长度,在显微镜下可控制腔长约为1 mm。当高静压加载在EFPI光纤传感器上时,石英毛细管产生相对形变,进而引起传感器腔长发生变化,通过腔长解调可以得到压力数值。很多传统小腔长传感器^[7]需要激光熔接和环氧胶固化等手段,多用于温度、应力、应变等物理量的测量,压力测量灵敏度低。本文制作的大腔长传感器只需熔接机熔接和切割,而且腔长是传统小腔长传感器的数十倍,可用于较高静压力的测量。

2 EFPI传感器结构和制作过程

2.1 传感器的结构和制作过程

全石英光纤EFPI高静压传感器的结构如图1所示,传感器由熔融石英毛细管和单模光纤构成,将两段单模光纤和一段熔融石英毛细管在横向上切割平整后,用光纤熔接机把两段单模光纤焊接在石英毛细管上,石英毛细管长度即为初始腔长。利用“单模光纤—毛细管—单模光纤”的两个端面构成双光束干涉结构,图1中使用的是外径为125 μm 的熔融石英毛细管,其外径和单模光纤的外径大小相同;而石英毛细管的内部是中空的,空气层内径约为50~65 μm ,这层空气腔就是F-P腔,腔长为1~1.5 mm。

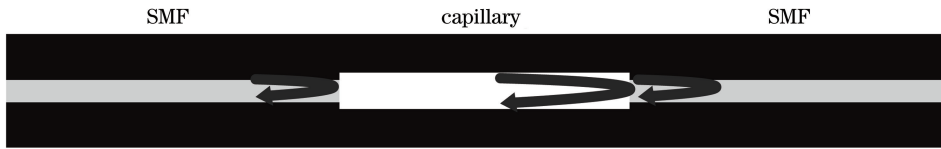


图1 EFPI传感器示意图

Fig. 1 Schematic diagram of EFPI sensor

光纤熔接机一般只用于光纤之间的熔接,若将其用于单模光纤和石英毛细管的熔接,需要设置、调整熔接参数,利用逐次逼近法找到端面平整、皱缩小、干涉效果良好的熔接参数。经过不断尝试与改进,最终得到熔接效果良好的完整参数,将其定义为自定义熔接模式,并运用此熔接模式制作传感器。制作过程分为4步:1)将切割平整的毛细管和单模光纤放在熔接机上,纤芯对准后的图样(左端为单模光纤,右端为毛细管)如图2(a)所示。2)放电熔接过程如图2(b)所示,毛细管和单模光纤接合在一起,两接触端面平齐,没有突起和皱缩。3)在显微镜下切割毛细管,此步需要把前一步已经熔接好的部分从熔接机上拿到显微镜下。由于毛细管极易断裂,操作时尽量拿住光纤一端,用手托住毛细管部分。比照光纤外径,找到毛细管长度约为1.3 mm的地方作为切口,用切割刀缓缓切下,如图2(c)所示。图2(d)为切割完成的传感器的一部分。4)进行另一端单模光纤和毛细管的熔接,如图2(e)所示。至此两段单模光纤已经熔接到一段1.3 mm左右的毛细管两端,传感器制作完成,如图2(f)所示。实际切割过程照片如图3所示。图4为两端面平齐、皱缩极小的EFPI传感器实物。

2.2 对传感器进行退火

在传感器的制作过程中,需要进行单模光纤和毛细管的熔接,熔接端面时不同区域间有比较大的温差,这会造成传感器内部存在一定的残余应力,残余应力的缓慢释放会引起传感器腔长漂移,进而造成测量结果的偏差^[8]。因此在传感器标定和使用前,应该增加去应力退火的步骤来释放传感器内部的残余应力,使传感器的结构稳定,进而才能在实际测量中使用。

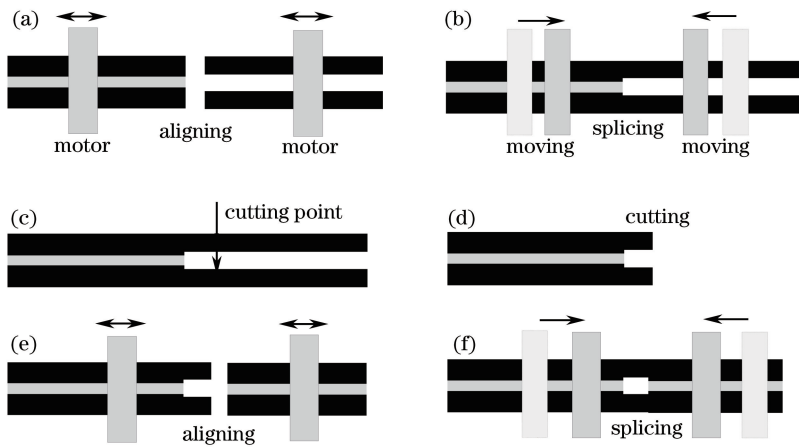


图 2 EFPI 传感器的制作过程示意图。(a)对齐;(b)熔接;(c)切割;(d)切割完成;(e)再对齐;(f)再熔接
Fig. 2 Diagram of the EFPI sensor manufacturing process. (a) Aligning; (b) splicing; (c) cutting; (d)cutting completed; (e) aligning again; (f) splicing again

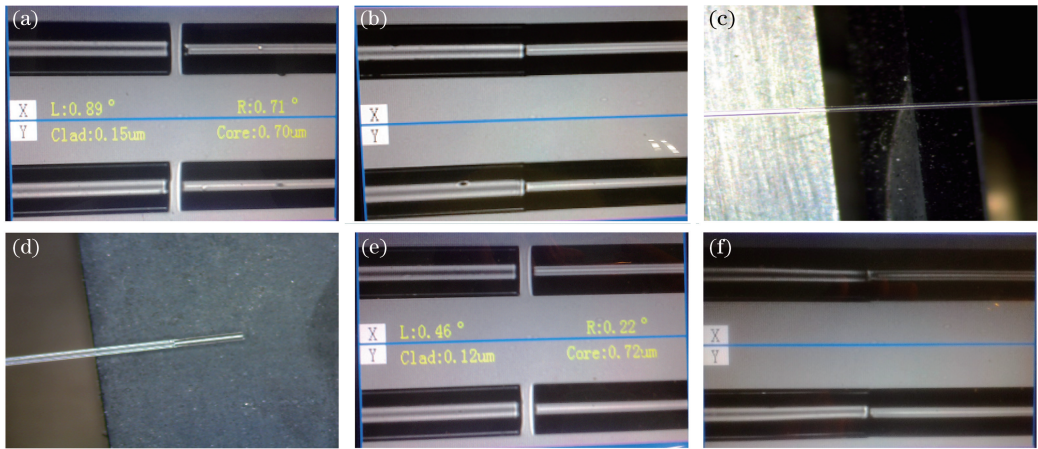


图 3 EFPI 传感器的制作过程照片。(a)对齐;(b)熔接;(c)切割;(d)切割完成;(e)再对齐;(f)再熔接
Fig. 3 Photos of the EFPI sensor manufacturing process. (a) Aligning; (b) splicing; (c) cutting; (d)cutting completed; (e) aligning again; (f) splicing again

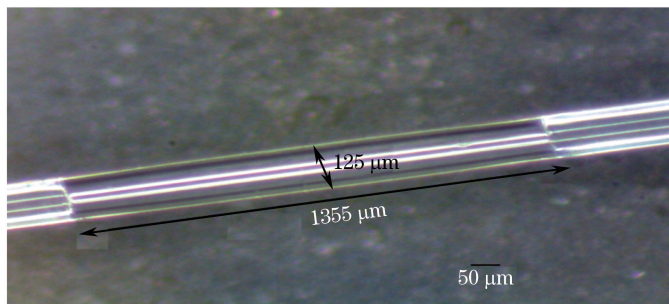


图 4 EFPI 传感器实物
Fig. 4 Photo of the EFPI sensor

应力释放过程主要发生在传感器处于较高温度时,所以要对传感器进行几次升降温的测试。升降温过程中传感器腔长数据的变化如图 5 所示,通过升降温曲线可以发现腔长的非线性变化现象,这就是应力释放过程。在高温下保持 5 h 以上,使传感器内部的应力充分释放,当腔长温度曲线为严格直线时,传感器结构达到稳定。应力充分释放后,结构稳定的传感器的腔长温度变化曲线如图 6 所示。

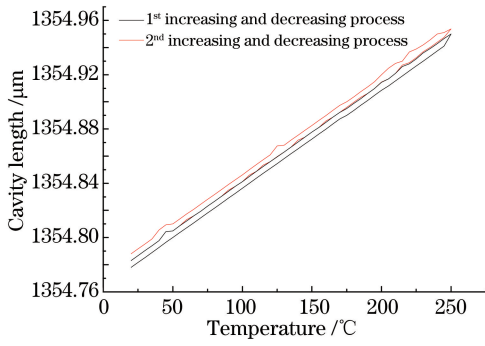


图 5 传感器退火时腔长随温度的变化曲线
Fig. 5 Cavity length-temperature curves when the sensor is annealing

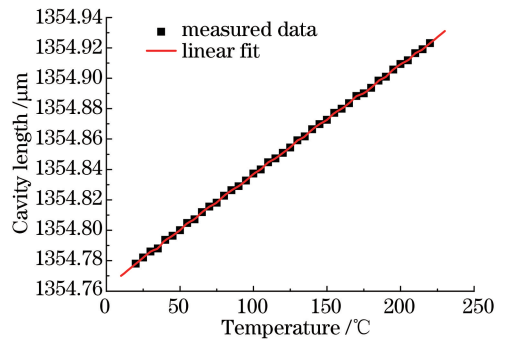


图 6 传感器退火后的腔长-温度曲线
Fig. 6 Cavity length-temperature curves of the sensor after annealing

3 压力温度效应理论分析

3.1 压力效应理论分析

当静压加载到 EFPI 光纤压力传感器^[9]上,石英毛细管产生形变,进而引起传感器腔长发生变化。通过 EFPI 光纤传感器信号解调^[10]系统监测传感器腔长的变化,就可以得到待测量的压力信息。

由外界施加压强 P 引起的传感器腔长变化 ΔC 可以表示为^[11]

$$\Delta C = \frac{Cr_o^2}{E(r_o^2 - r_i^2)}(1 - 2\mu)P, \quad (1)$$

式中 C 为传感器的原始腔长, r_i 和 r_o 分别为石英毛细管的内径和外径, E 为毛细管材料的杨氏模量, μ 为毛细管材料的泊松比。

从(1)式可以看出腔长变化 ΔC 与所施加压强 P 成正比,因此,通过对传感器进行压力标定,对腔长值进行测量就可以得到外界的绝对压强。(1)式表明,原始腔长 C 直接关系到压力测量的灵敏度,通过调整原始腔长可以有效地调整 EFPI 光纤传感器压力测量的灵敏度和测量范围。静压力一定时,腔长 C 越大,腔长变化越大,压力测量灵敏度越高,传感器就能比较准确地测量外界压力。所以本实验制作的大腔长 EFPI 传感器(腔长约为 1 mm)是一种能够准确测量较高静态压力的传感器,该传感器所用毛细管的内径、外径分别为 $65 \mu\text{m}$ 和 $125 \mu\text{m}$,所用熔融石英材料的杨氏模量 $E = 74 \text{ GPa}$,泊松比 $\mu = 0.17$ 。将以上数据代入(1)式,得到腔长变化与压力的关系为 $\Delta C = 0.02 P$,即当压力为 20 MPa 时,EFPI 传感器的腔长变化约为 400 nm,压力测量灵敏度为 20 nm/MPa,灵敏度比较高,说明 EFPI 传感器可以准确测量较高的静态压力。

3.2 温度效应理论分析

EFPI 光纤传感器由单模光纤与毛细管构成,当温度发生变化时,毛细管纵向长度的变化将导致腔长的变化。设传感器所选择的石英毛细管的热膨胀系数为 α_c ,温度变化 ΔT 导致的腔长变化 ΔC 可表示为

$$\Delta C = C\alpha_c \Delta T. \quad (2)$$

传感器所用毛细管的热膨胀系数约为 $5.5 \times 10^{-7} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$,单模光纤与毛细管的热膨胀系数数值基本相当。由(2)式可以看出,腔长变化与温度变化成正比。将 C 、 α_c 的数值代入(2)式,可得传感器的温度敏感系数约为 $0.743 \text{ nm}/^\circ\text{C}$ 。温度敏感系数主要由腔长 C 、毛细管热膨胀系数 α_c 决定,可以通过调节腔长大小来改变传感器的温度敏感系数,大腔长结构保证温度交叉敏感度低^[12]。

4 压力测试实验

EFPI 光纤传感器的压力测试实验示意图如图 7 所示,搭建好的实验系统如图 8 所示。实验中使用 GY-7511 压力发生校验台,其造压范围为 $0 \sim 60 \text{ MPa}$,工作介质为油,调节范围为 1 kPa ,可满足实验要求。用环氧树脂把传感器封装进压力校验台中。首先拧紧截止阀,然后缓慢按下杠杆进行加压,利用微调装置微调,拧紧稳压阀,就可保持压力稳定在这个数值上不变,然后记录对应的腔长数据。依次进行测量,每隔 0.5 MPa

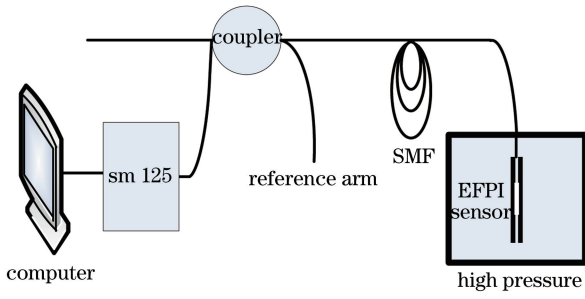


图 7 EFPI 传感系统示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the EFPI sensor system

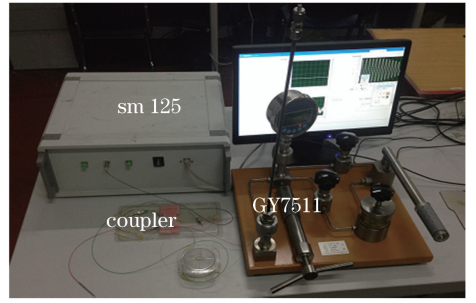


图 8 EFPI 传感系统实物图

Fig. 8 Photo of the EFPI sensor system

测量一次,升到 20 MPa 后进行降压测试。造压的同时,记录对应的解调出的传感器的腔长信息,以实现 EFPI 光纤传感器的标定。

实验中使用光纤光栅传感解调仪 sm125 采集反射光强信号,根据采集到的光谱信号,利用交叉相关算法进行腔长解调,可以实时精确地得到在高静压下传感器的实际腔长,可以精确到 1 nm。根据双光束干涉原理,反射光强 I 的表达式^[13]为

$$I = 2RI_0 \left[1 - \cos \left(\frac{4\pi}{\lambda} C + \theta \right) \right], \quad (3)$$

式中 I_0 为入射光光强, R 为石英毛细管和单模光纤间的端面反射率, θ 为初始相位, λ 为入射光波长。

待测量的 EFPI 传感器的初始腔长为 1354.78 μm 。在标定过程中,使液压密封舱中的压力从 0 逐级升高至 20 MPa,进行多次测量(每天两次,连续 5 天),以测试传感器稳定性和往复性。EFPI 光纤传感器在 0~20 MPa 压力范围内的标定结果如图 9 所示,图中横坐标为压力校验仪测量的压力值,纵坐标为 EFPI 传感器的腔长值。从图 9 可以看到,压力从 0 上升至 20 MPa 时,传感器腔长从 1354.780 μm 减小到 1354.362 μm ;压力从 20 MPa 下降到 0 时,传感器腔长从 1354.362 μm 增大到 1354.781 μm 。连续 5 天的测量过程中,EFPI 传感器的绝对腔长最大偏离值为 5 nm。升压过程中腔长变化的最小值为 417 nm,最大值为 424 nm;降压过程中腔长变化的最小值为 416 nm,最大值为 424 nm,可见升降压过程中腔长变化几乎完全一致,说明传感器具有良好的回滞性和稳定性。传感器腔长变化均值约为 420 nm,腔长-压力灵敏度约为 21 nm/MPa。缓慢升降压过程中,腔长走势比较稳定,多次测量时,每次测量约有一次野值出现,说明传感器抗干扰能力强。在腔长为 1354 μm 时,由(1)式可计算出腔长-压力灵敏度的理论值约为 20 nm/MPa,实验值与理论值偏差约为 5%,考虑到制作工艺和外界因素的影响,此偏差完全在合理范围之内。从标定结果可以看出,EFPI 传感器的腔长和所受的压力间具有良好的线性关系。

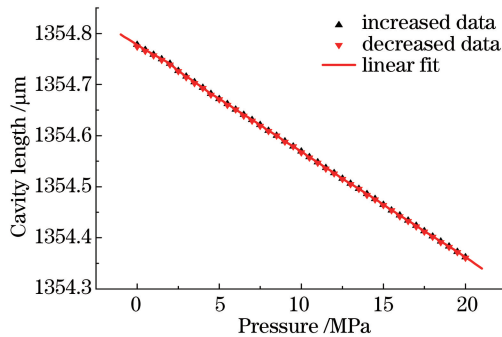


图 9 EFPI 传感器的腔长-压力变化曲线

Fig. 9 Cavity length-pressure curves of the EFPI sensor

通过对测量数据进行线性拟合可以得到如下形式的标定直线:

$$P = C + D \times l_{\text{cavity}}, \quad (4)$$

式中 C 、 D 是 EFPI 压力传感器的标定系数, P 为压力, l_{cavity} 为腔长。实验中对测量数据线性拟合的拟合度 $R=0.99998$ 。对 EFPI 传感器进行标定后,利用得到的标定系数就可以实现压力的测量。对传感器进行连

续 10 h 的升降压测量,测量偏差为 0.2%FS。

5 温度敏感度实验

对 EFPI 光纤传感器进行温度敏感度实验,实验过程中,温度从 20 °C 缓慢升高至 220 °C,然后再缓慢下降。EFPI 传感器在室温到 220 °C 范围内的敏感度测试结果如图 10 所示,图中横坐标为温度,纵坐标为腔长值。温度变化过程中,传感器的腔长变化约为 0.144 μm 。在温度上升和下降过程中,腔长随温度的变化数据几乎完全一致。传感器的温度敏感系数约为 0.72 nm/°C。由(2)式可得腔长为 1354 μm 时,温度敏感系数理论值约为 0.743 nm/°C,理论值与实验值偏差约 3.1%,可忽略不计。从实验结果可以看出,EFPI 传感器的腔长和所感受的温度间具有良好的线性关系,测量数据线性的拟合度 $R=0.9998$,温度交叉敏感度低。

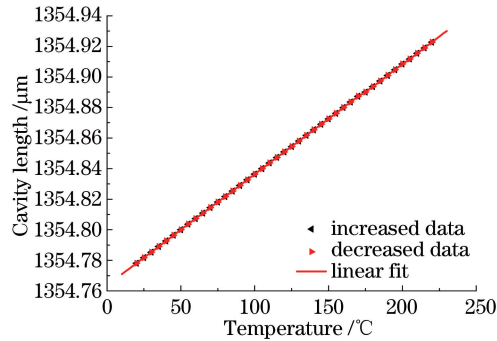


图 10 EFPI 传感器的腔长-温度变化曲线

Fig. 10 Cavity length-temperature curves of the EFPI sensor

6 结 论

设计制作了一种大腔长的全石英光纤 EFPI 传感器,用于较高静压力(兆帕量级)的测量。该传感器的腔长远大于传统 EFPI 传感器,制作过程只需用到光纤熔接机,而且由于腔长较大,结构简单,因此易于对传感器进行熔接、切割操作。这种全石英光纤 EFPI 传感器的制作工艺简易,成本低,便于大规模工业化生产。实验结果表明,该传感器在高静压测量时具有工作稳定、灵敏度高、可靠性好等优点。

参 考 文 献

- 1 Zhao W, Wang J, Wang A B, *et al.* Geometric analysis of optical fiber EFPI sensor performance[J]. *Smart Materials & Structures*, 1998, 7(6): 907-910.
- 2 Furuichi N, Terao Y. Static pressure measurement error at a wall tap of a flow nozzle for a wide range of Reynolds number[J]. *Flow Measurement & Instrumentation*, 2015, 46: 103-111.
- 3 Li Z X, Koziol J. A theoretical analysis of the laser melt-level monitoring system for the Czochralski crystal growing furnaces[J]. *IEEE Transactions on Instrumentation & Measurement*, 1997, 46(3): 722-730.
- 4 Wang B S, Stathis J. Technologies of fiber fusion and fused device fabrication for sensing applications[J]. *SPIE*, 2010: 7677.
- 5 Chaurasia S, Chaurasia B S. Analytical models for low pressure square diaphragm piezoresistive MEMS sensor [C]. *Engineering and Systems*, 2012: 1-6.
- 6 Liu Yu, Wang Meng, Wang Bo, *et al.* Diaphragm-type F-P interferometric optical fiber pressure sensor based on Si chip processed by laser[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*, 2013, 32(1): 112-114.
刘 宇, 王 萌, 王 博, 等. 激光加工硅片的膜片式法-珀干涉型光纤压力传感器[J]. *传感器与微系统*, 2013, 32(1): 112-114.
- 7 Liu Kun. Study on Fabry-Perot based fiber optics strain sensor[J]. *Coal Technology*, 2010, 29(4): 198-200.
刘 琨. 基于法布里-帕罗干涉仪的非本特征光纤传感系统研究[J]. *煤炭技术*, 2010, 29(4): 198-200.
- 8 Gao Yukui, Zhang Zhigang. Measurement and simulation methods of residual stresses [J]. *Failure Analysis and Prevention*, 2009, 4(4): 251-254.

- 高玉魁, 张志刚. 残余应力的测量与模拟分析方法[J]. 失效分析与预防, 2009, 4(4): 251-254.
- 9 Dong Yupei. Study on miniature extrinsic Fabry-Perot interferometric fiber-optic pressure sensor[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
董玉珮. 微型非本征法布里-珀罗干涉光纤压力传感器研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- 10 Li Hao. Research on demodulation mechanism of white light EFPI sensing system[D]. Huainan: Anhui University Of Science & Technology, 2015.
李 昊. 白光 EFPI 传感系统解调机理的研究[D]. 淮南: 安徽理工大学, 2015.
- 11 Jing Zhenguo. Study on white light extrinsic Fabry-Perot interferometric optical fiber sensor and its applications[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2006.
荆振国. 白光非本征法布里-珀罗干涉光纤传感器及其应用研究[D]. 大连: 大连理工大学, 2006.
- 12 Zhang Lizhe, Zhang Li, Duan Yupei, *et al.* The research on fabrication of fiber pressure sensor[C]. National Pressure Testing Technology Communication Annual Meeting, 2012.
张立喆, 张 力, 段玉培, 等. 光纤压力传感器制作研究[C]. 全国压力计量测试技术交流年会, 2012.
- 13 Jiang Ning, Xie Ying. Study on intrinsic Fabry-Perot sensor for temperature measurements[J]. Journal of Wuhan University of Technology, 2013, 35(7): 130-133.
姜 宁, 谢 莹. 新型本征型温度传感器的研制[J]. 武汉理工大学学报, 2013, 35(7): 130-133.