

激光与光电子学进展

高精度光纤温度压力传感器及其在生产井的应用

杨斌¹, 赵庆超^{2*}, 车传睿¹, 安百新¹, 张发祥², 孙伟¹, 王昕¹, 姜邵栋², 徐子文²¹中国石油化工集团公司胜利油田分公司, 山东 东营 257000;²齐鲁工业大学(山东省科学院)激光研究所, 山东 济南 250014

摘要 研制了一种基于光纤布拉格光栅(FBG)和非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)的高精度井下长期在线温度压力监测系统。该系统通过 EFPI 的腔长变化监测压力,通过 FBG 的波长变化监测温度,同时实现对压力的温度补偿。标定结果表明,该系统的压力测量范围为 0.1~42 MPa,压力灵敏度为 203.8 nm/MPa,精度为 $\pm 0.05\%$ F.S(F.S 表示满量程),压力分辨率达到 0.0007 MPa。将该系统在胜利油田桩西某生产井进行了工程示范,实时监测井下温度和压力 5 个月。结果表明,该系统能反映油井生产状态,实现重要参数的在线监测,对提高油气采收率具有重要指导意义。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 非本征法布里-珀罗干涉仪; 压力; 温度; 在线监测

中图分类号 TP212.1

文献标志码 A

DOI: 10.3788/LOP202259.1706006

High-Precision Optical Fiber Temperature and Pressure Sensor and Its Application in Production Wells

Yang Bin¹, Zhao Qingchao^{2*}, Che Chuanrui¹, An Baixin¹, Zhang Faxiang², Sun Wei¹, Wang Xin¹, Jiang Shaodong², Xu Ziwen²¹Sinopec Shengli Oilfield Company, Dongying 257000, Shandong, China;²Laser Institute, Qilu University of Technology (Shandong Academy of Sciences), Jinan 250014, Shandong, China

Abstract A high-precision long-term online downhole temperature and pressure monitoring system based on optical fiber Bragg grating (FBG) and extrinsic Fabry-Pérot interferometer (EFPI) is developed in this paper. The system monitored the pressure through the change in the EFPI cavity length and the temperature through the change in the FBG wavelength, and simultaneously realized the temperature compensation of the pressure. Calibration results showed that the system has the pressure measurement range of 0.1–42 MPa, the pressure sensitivity of 203.8 nm/MPa, the precision of $\pm 0.05\%$ F.S (F.S means full scale), and pressure resolution of 0.0007 MPa. The system is demonstrated in a production well in Zhuangxi, Shengli Oilfield, and the downhole temperature and pressure are recorded in real time for 5 months. The results show that the system can reflect the production status of oil wells and realize the online monitoring of important parameters, which has important guiding significance for improving oil and gas recovery.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; extrinsic Fabry-Pérot interferometer; pressure; temperature; online monitoring

1 引言

获取井下持续、可靠和实时的压力、温度信息,有助于优化生产和提高油气采收率^[1-3]。监测时,需将传感器部署在油井中,面临井下高温、高压、腐蚀等恶劣环境。传统井下监测多采用电子传感器,传感数据容易受到电磁干扰,且电子传感器在井下高温环境的故

障率较高、可复用性差^[4-9]。

光纤传感器具有不带电、耐高温高压、分辨率高、可复用和抗电磁干扰能力强的优点^[10-13],近年来,光纤井下压力传感器得到了人们的广泛研究。以美国威德福、哈里伯顿石油公司为代表的光纤压力传感器处于领先地位,而国内光纤压力传感器主要基于光纤布拉格光栅(FBG)和非本征法布里-珀罗干涉仪(EFPI)。

收稿日期: 2022-02-14; 修回日期: 2022-04-20; 录用日期: 2022-06-13

基金项目: 国家自然科学基金联合基金(U2006216)、山东省重点研发计划(2019GGX104054)

通信作者: *15205416780@163.com

光纤 FBG 压力传感器无法直接感知压力,需要借助复杂的增敏结构通过环氧树脂胶进行封装,封装过程复杂,且高温下环氧树脂胶易发生蠕变,精度小于 $\pm 0.5\%$ F.S (F.S 表示满量程, %F.S 指传感器的指标相对于传感器满量程误差的百分数)^[14-17]。光纤 EFPI 压力传感器的压力探头一般与被测液体直接接触,会导致 EFPI 探头被腐蚀,测量稳定性较差,且无法兼顾大量程与高分辨率^[10,18-19]。

本文设计了一种基于光纤 FBG 和 EFPI 的温度压力监测系统,EFPI 探头采用电弧高温热熔方式制作且外表面进行了镀碳处理,以实现大量程测量和极高的压力分辨率。采用 FBG 对 EFPI 进行温度补偿,使其具有低温度压力交叉敏感特性。将该系统应用于生产井在线监测,可获取高分辨率的井下动态压力数据和长期监测数据。

2 传感器的研制

井下油藏状态监测光纤压力和温度传感器基于 EFPI 和级联 FBG 的设计。EFPI 用于压力传感,FBG 用于温度传感的同时还需补偿压力传感中温度对 EFPI 的影响。传感器的结构如图 1 所示。FBG 和 EFPI 在传感器中通过一根光纤连接。FBG 保持无应力,构成 EFPI 的毛细管材质为石英,通过电弧高温热熔方式实现毛细管与管内裸光纤的无胶化、无附加材料封装,避免高温下的胶蠕变、耦合点热失配等问题,且 EFPI 外表面镀碳处理后与待测试压力的液体保持接触,大大提高了传感器的重复性、长期稳定性等。压力 P 指向的外部窗口为金属保护套管,内部沿轴线开有台阶孔,EFPI 引出的裸光纤与套管小孔通过钎焊封接,外部通过螺纹联接和金属变形密封与其他金属件进行连接。

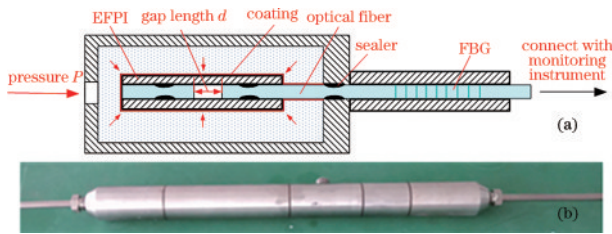


图 1 压力和温度传感器的结构 (a) 示意图; (b) 实物图

Fig. 1 Structure of pressure and temperature sensors.

(a) Schematic diagram; (b) physical map

温度和 FBG 的波长大致成正比,但随着温度的升高,其比例会略有变化。为了获得更好的温度精度,用二次多项式拟合预先标定传感器,温度 T ^[20-22] 可表示为

$$\lambda_{B,T} = bT^2 + cT + \lambda_{B,0}, \quad (1)$$

式中: $\lambda_{B,T}$ 为温度 T 时的光纤布拉格波长; $\lambda_{B,0}$ 为 0°C 时的光纤布拉格波长; b 和 c 为器件常数。可通过校准 b 、 c 和 λ 确定 $T_{B,0}$ 和测量 $\lambda_{B,T}$ 。

对传感器施加压力 P 时, EFPI 腔长 d 会减小。EFPI 腔长 d 与压力 P 成反比, 腔长变化量 Δd 与压力 P 的比为传感器的压力灵敏度^[23], 可表示为

$$\Delta d/P = \frac{L_0 r_0^2}{E(r_0^2 - r_i^2)}(1 - 2\mu), \quad (2)$$

式中: L_0 为 EFPI 的标距; r_i 、 r_0 分别为构成 EFPI 毛细管的内径和外径; E 为毛细管材料的弹性模量; μ 为毛细管材料的泊松比。

研制的传感器直径为 30 mm, 长为 380 mm, 适用于油井管套环内。采用 316 不锈钢封装, 可在高压和高腐蚀条件下工作。传感器是电子无源的, 没有电子设备, 这提高了系统在高温下的可靠性和稳定性。FBG 温度传感器的测试曲线如图 2 所示。其中, R^2 为相关性系数。EFPI 空腔的参数: $r_i = 0.14$ mm; $r_0 = 0.065$ mm; $L = 20$ mm; $E = 72$ GPa; $\mu = 0.17$, 由式 (2) 计算的灵敏度为 234 nm/MPa。

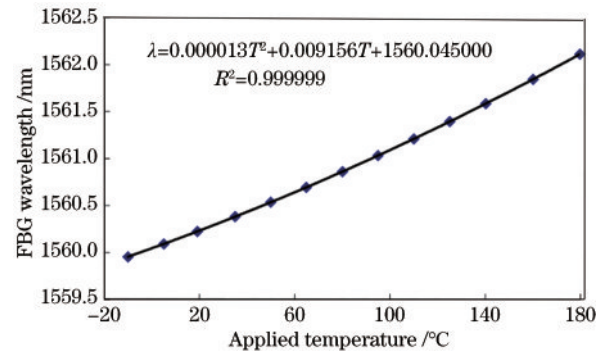


图 2 FBG 波长与温度的关系

Fig. 2 Relationship between FBG wavelength and temperature

将标定传感器置于高温烘箱中, 通过光纤与 MOI SM125 FBG 解调仪 (波长精度为 1 pm, 波长重复性在 1 Hz 采样频率下为 0.5 pm) 连接。高精度活塞式压力计 GE P3100 (量程为 0.1~110 MPa, 精度为 0.008%) 置于烘箱外, 活塞式压力计与标定传感器通过与高压管连接实现压力传递, 烘箱温度分别设置为 80、100、120、150 $^\circ\text{C}$ 。通过活塞式压力计 GE P3100 进行压力标定 (包括升压和降压), 每个温度点压力标定 3 次, 然后进行数据处理。图 3 为 150 $^\circ\text{C}$ 温度下的传感器压力标定结果, 传感器的压力测试灵敏度为 203.8 nm/MPa, 与理论值接近。由于 EFPI 弹性模量的变化, 这种灵敏度在不同的温度下存在差异。因此, 测量了 80、100、120、150 $^\circ\text{C}$ 温度下传感器的压力灵敏度, 然后将压力灵敏度和温度进行线性拟合, 在任意温度下获得准确的灵敏度 K_T , 结果如图 4 所示。此外, 温度变化也会导致腔长的变化。EFPI 腔长 d_{0T} 在常压 (压力为 0.1 MPa) 下与温度 T 的关系如图 5 所示。设置常压下 EFPI 腔长 d_{0T} 与温度的比为 EFPI 的温度灵敏度, 且温度灵敏度远低于压力灵敏度。压力 P 可表示为

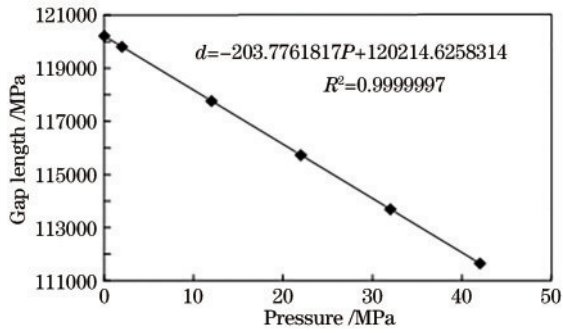


图 3 传感器的压力标定结果
Fig. 3 Pressure calibration results of the sensor

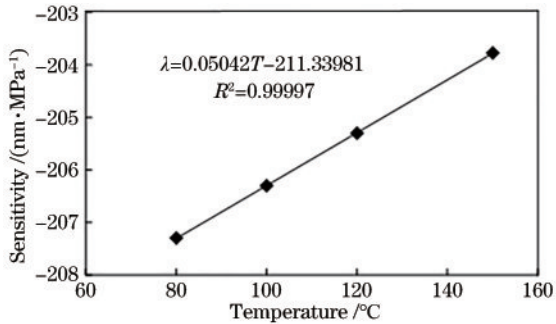


图 4 压力灵敏度与温度的关系
Fig. 4 Relationship between pressure sensitivity and temperature

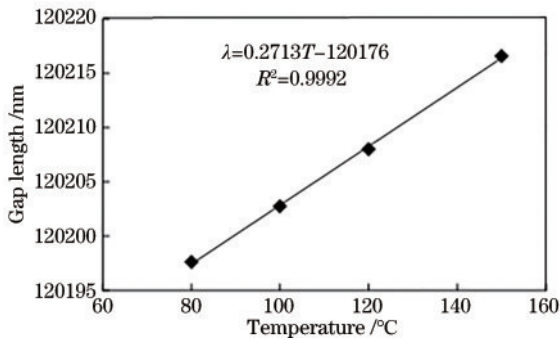


图 5 常压下 EFPI 腔长与温度的关系
Fig. 5 Relationship between EFPI cavity length and temperature under normal pressure

$$P = \frac{d - d_{0T}}{K_T} \quad (3)$$

将高精度活塞式压力计 GE P3100(量程为 0.1~110 MPa,精度为 0.008%)用于检验 150 °C和 23 °C温度下传感器的压力精度。表 1 为实验设计的传感器测得的压力数据。其中,箭头方向向上或向下分别表示加载过程中压力增加或减少,最大误差为不同温度和加载过程中实验值与标准值之间的最大压力差,最大为 0.023 MPa。这表明在 0.1~42 MPa 压力范围内传感器的精度约为 ±0.05%F.S。

表 1 传感器测得的压力数据

Table 1 Pressure data measured by sensor unit: MPa

P	Measurements (150 °C)		Measurements (23 °C)		Maximum error
	↓	↑	↓	↑	
0.1	-0.103	0.110	-0.109	0.103	0.010
2	1.995	1.998	1.986	2.003	0.014
12	12.002	12.003	11.990	12.017	0.017
22	22.008	22.014	22.013	22.023	0.023
32	32.005	32.014	31.987	32.023	0.023
42	41.992	41.994	42.003	42.006	0.008

3 传感系统的设计

为了实现井下油藏状态长期在线监测,开发了一套包括传感器、载体、连接器、光纤电缆、监控仪器的监测系统,如图 6 所示。该系统的井下设备均采用高温耐腐蚀材料,无电子设备,以保证系统在 150 °C高温下的可靠性和稳定性,满足大多数油井环境。用系统全天监测井下压力和温度,不中断油井生产。完井作业时,该系统可与生产管道一起安装在井中。传感器通常安装在管套环空中并测量管内的压力。托架用于安装传感器和连接器,防止刮伤。连接器可保护光

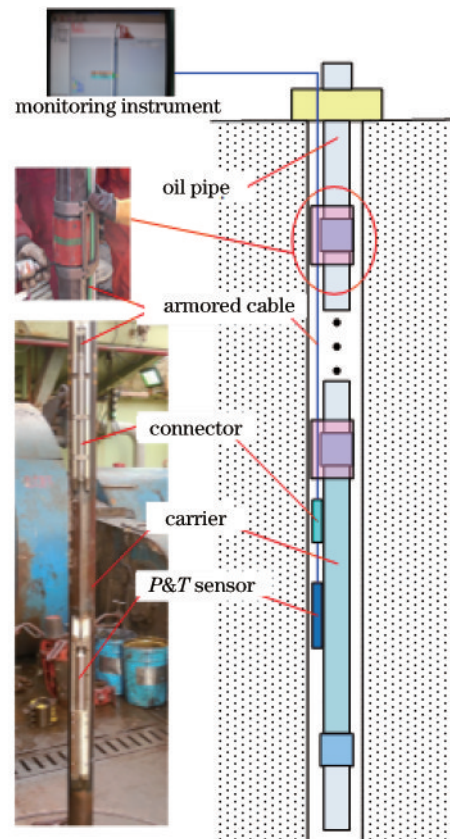


图 6 井下监测系统的原理
Fig. 6 Principle of the downhole monitoring system

纤熔点防止断裂和液压入侵。电缆夹在管弦的外部，沿着管固定到地面的监测仪器。用监测仪器采集传感器信号，连续计算压力和温度，其结构如图 7 所示。当宽带光被注入传感器时，来自传感器的反射光包括 EFPI 和 FBG 的光谱。将光谱分为两部分，分别计算 FBG 波长和 EFPI 腔长。其中，EFPI 腔长计算采用多

峰值解调方法^[24]，可实现大范围高分辨率的腔长解调。在 EFPI 上施加一微小压力，测试腔长的变化情况，2021 年 10 月 25 日的测试结果如图 8 所示，可以发现，该系统的腔长分辨率能达到 0.1 nm，根据传感器的压力灵敏度 (203.8 nm/MPa) 推算得到传感器的压力分辨率约为 0.0005 MPa。

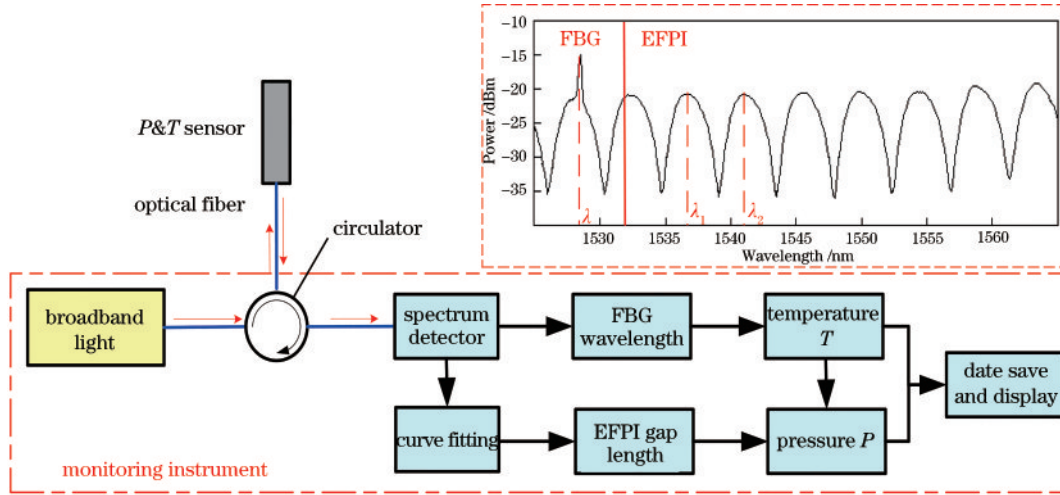


图 7 监测仪器的原理及传感器的光谱

Fig. 7 Principle of monitoring instrument and spectrum of sensor

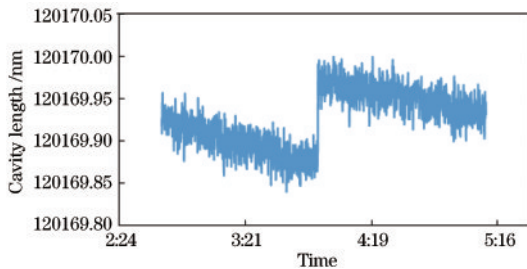


图 8 腔长分辨率的测试结果

Fig. 8 Test results of cavity length resolution

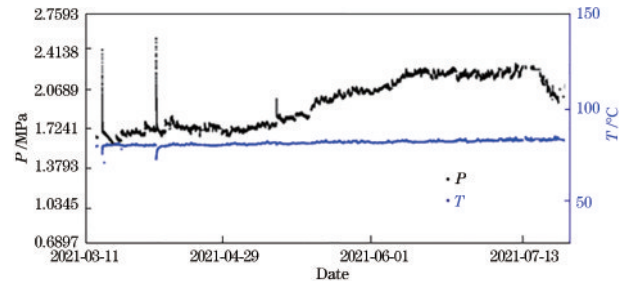


图 9 井下的长期在线测试结果

Fig. 9 Long-term online test results in downhole

4 油井中的应用

为检验系统的性能，在胜利油田桩西某生产井安装了该系统，以监测井下压力和温度。传感器安装至井下 1070 m 处，地面解调仪采用美国 MOI 公司的 SM125 光纤光栅解调仪。前期测量结果表明，井下液面深度在 800 m 左右，井口电子温度计读数为 57.74 °C，生产参数为 4.2 m×4.5 times/min (泵冲程×冲次)。

图 9 为 2021 年 3 月 9 日至 2021 年 8 月 5 日的监测结果。可以发现，油藏温度稳定在 86.2 °C。这表明生产过程中井下油藏温度基本稳定。甲方提供井筒参数中该地区的地层每 100 m 的温度梯度约为 3 °C，根据井口电子温度计及温度梯度推算井下 1070 m (垂直深度约为 960 m) 处的温度约为 86.54 °C，与该系统的测量结果基本吻合。根据井下液面深度推算，井下 1070 m

位置的压强约为 2.069 MPa，系统测试压力的初始结果约为 1.779 MPa，略低于估计结果。原因是在抽油生产过程中，油管内液位上升，环空液位相对下降。此外，随着油藏生产开发，井下压力呈现动态变化。

图 10 为 2021 年 4 月 11 日停井维护的井下温度压

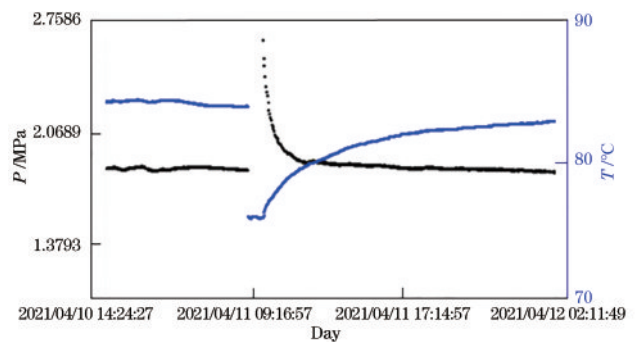


图 10 停井作业的测试结果

Fig. 10 Test results of shut-in operation

力监测数据。可以发现,停井后,井下压力上升至 2.621 MPa,温度下降到约 76 °C。原因主要是停机后油管内液面下降,环空液面相对上升。重新开机后,随着油井抽油生产,油管内液面逐渐升高,环空液面逐渐下降,因此,监测结果表现为压力逐渐下降,温度逐渐上升,直至恢复停井前的数值。这表明监测系统能客观反映油井的生产状态。

图 11 为油井生产过程中井下压力的短期在线监测数据。可以清楚地观察到,采油过程中井下压力以每分钟 4.5 的频率、0.007 MPa 左右的幅度变化,最小压力变化为 0.0007 MPa,小于传感器的分辨率 0.0005 MPa。这表明该传感系统具有极高的压力分辨率,其频率与生产参数吻合,监测结果可靠。根据生产参数估算的井口压力变化幅度约为 0.041 MPa,井下监测结果表明,经过 1070 m 的传递衰减,抽油产生的井口压力变化传递到传感器监测位置后会减小为原始压力变化的 1/6 左右。这对分析油井生产的压力传递,特别是油井产量变化时是否有泵漏、泄漏等问题具有指导意义。

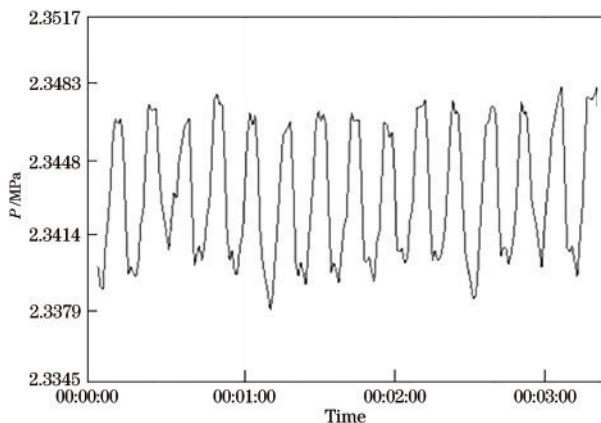


图 11 短期压力高分辨率监测结果

Fig. 11 Short-term pressure monitoring results with high resolution

5 结 论

开发了一种用于高温、高压和腐蚀环境的光纤高温和压力传感器系统。压力精度达到 $\pm 0.05\%$ F.S.,分辨率达到 0.0007 MPa。该系统已成功应用于胜利油田生产井,监测结果与油井的估计参数吻合,在监测过程中能反映油井的生产状态,且能高分辨率监测井下压力变化幅度,为石油生产提供了实时有用、可靠的数据。

参 考 文 献

[1] 周海军, 黄佳. 渤海油气田光纤式井下压力温度监测系统的研发与应用[J]. 机电信息, 2020(24): 54-55.
Zhou H J, Huang J. Development and application of optical fiber downhole pressure and temperature monitoring system in Bohai oil and gas field[J]. Mechanical and

Electrical Information, 2020(24): 54-55.

- [2] 孔冰, 刘爱明, 许晓英, 等. 基于光纤测温的毛细管井下温压一体化监测技术[J]. 仪表技术与传感器, 2019(7): 101-105.
Kong B, Liu A M, Xu X Y, et al. Downhole temperature and pressure integrated monitoring technology with optical fiber temperature sensor in capillary tube[J]. Instrument Technique and Sensor, 2019(7): 101-105.
- [3] Ma S J, Guo J C, Guo Y L, et al. On-line monitoring system for downhole temperature and pressure[J]. Optical Engineering, 2014, 53(8): 087102.
- [4] Chen K, Zhou X L, Yang B K, et al. A hybrid fiber-optic sensing system for down-hole pressure and distributed temperature measurements[J]. Optics & Laser Technology, 2015, 73: 82-87.
- [5] Wu H, Peng Y, Wang L P, et al. Research on downhole pressure and temperature tester for hydraulic fracturing[J]. Applied Mechanics and Materials, 2013, 441: 351-355.
- [6] Fu H Y, Wu C, Tse M L V, et al. High pressure sensor based on photonic crystal fiber for downhole application[J]. Applied Optics, 2010, 49(14): 2639-2643.
- [7] Liang M F, Fang X Q, Ning Y S. Temperature compensation fiber Bragg grating pressure sensor based on plane diaphragm[J]. Photonic Sensors, 2018, 8(2): 157-167.
- [8] Chen P, Dai Y T, Zhang D S, et al. Cascaded-cavity Fabry-Perot interferometric gas pressure sensor based on vernier effect[J]. Sensors, 2018, 18(11): 3677.
- [9] Zhao Q C, Liu X H, Ma L, et al. Optical fiber pressure sensor based on F-P cavity in the oil and gas well[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2017, 64: 012007.
- [10] 赵庆超, 郭士生, 李舜水, 等. 油井下用光纤温度压力传感器[J]. 山东科学, 2014, 27(4): 57-61, 67.
Zhao Q C, Guo S S, Li S S, et al. Optical fiber temperature and pressure sensor in an oil well[J]. Shandong Science, 2014, 27(4): 57-61, 67.
- [11] 楚华杰, 张彬奇, 崔澎涛, 等. 多点式光纤压力、温度监测系统在水平井的成功应用[J]. 石化技术, 2016, 23(2): 69-70.
Chu H J, Zhang B Q, Cui P T, et al. Successful application of multipoint optical fiber pressure and temperature monitoring system in horizontal wells[J]. Petrochemical Industry Technology, 2016, 23(2): 69-70.
- [12] Tian B, Liu H Y, Yang N, et al. Note: high temperature pressure sensor for petroleum well based on silicon over insulator[J]. Review of Scientific Instruments, 2015, 86(12): 126103.
- [13] 江毅, 马维一, 陈淑芬, 等. 微纳光纤高温压力传感器[J]. 光学技术, 2017, 43(1): 12-15.
Jiang Y, Ma W Y, Chen S F, et al. A micro fiber optic high-temperature pressure sensor[J]. Optical Technique, 2017, 43(1): 12-15.
- [14] 杨洋, 杨哲. 光纤检测在石油勘探中的测量优化设计研究[J]. 中国仪器仪表, 2014(10): 64-66.
Yang Y, Yang Z. The research on optimization measures

- of fiber detection of oil exploration engineering[J]. China Instrumentation, 2014(10): 64-66.
- [15] 张洪涛, 付威, 王春骞, 等. 光纤温压法实现油井动液面的实时监测[J]. 哈尔滨理工大学学报, 2018, 23(6): 1-6. Zhang H T, Fu W, Wang C Q, et al. Real-time monitoring of oil-well dynamic liquid-level with pressure and temperature based on optical fiber sensor[J]. Journal of Harbin University of Science and Technology, 2018, 23(6): 1-6.
- [16] 王富. 井下光纤光栅温度压力传感器的研制[J]. 西安石油大学学报(自然科学版), 2011, 26(1): 79-81, 86, 121. Wang F. Development of downhole fiber grating temperature-pressure sensor[J]. Journal of Xi'an Shiyou University (Natural Science Edition), 2011, 26(1): 79-81, 86, 121.
- [17] 吕京生, 郭士生, 王昌, 等. 一种新型光纤油井井下压力传感器[J]. 山东科学, 2011, 24(2): 47-50. Lü J S, Guo S S, Wang C, et al. A new optical fiber pressure sensor for oil well application[J]. Shandong Science, 2011, 24(2): 47-50.
- [18] Shao Z Q, Wu Y L, Sun Z Q, et al. Excellent repeatability, all-sapphire Fabry Perot optical Pressure sensor based on wet etching and direct bonding for Harsh Environment Applications[J]. Optics Express, 2021, 29(13): 19831-19838.
- [19] 于清旭, 王晓娜, 宋世德, 等. 光纤 F-P 腔压力传感器在高温油井下的应用研究[J]. 光电子·激光, 2007, 18(3): 299-302. Yu Q X, Wang X N, Song S D, et al. Fiber optic pressure sensor system based on extrinsic Fabry-Perot interferometer for high temperature oil well measurement [J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2007, 18(3): 299-302.
- [20] 陈梓泳, 何俊, 徐锡镇, 等. 飞秒激光逐点法制备光纤布拉格光栅高温传感器阵列[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306002. Chen Z Y, He J, Xu X Z, et al. High-temperature sensor array based on fiber Bragg gratings fabricated by femtosecond laser point-by-point method[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306002.
- [21] 刘福祿, 张钰民, 庄炜, 等. 基于游标效应和基底增敏的复合光纤结构温度传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(15): 1506002. Liu F L, Zhang Y M, Zhuang W, et al. Fiber temperature sensor with composite structure based on vernier effect and substrate sensitization[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(15): 1506002.
- [22] 李嘉丽, 洪婉玲, 赵春柳, 等. 基于阵列波导光栅的光纤法布里-珀罗干涉仪型多点氢气传感器[J]. 光学学报, 2021, 41(13): 1306013. Li J L, Hong W L, Zhao C L, et al. Multi-point optical fiber hydrogen sensor with Fabry-Perot interferometers using arrayed waveguide grating[J]. Acta Optica Sinica, 2021, 41(13): 1306013.
- [23] Zhao Q C, Li H, Lü J S, et al. Adhesive-free bonding fiber optic Fabry-Perot pressure sensor based on oxy-hydrogen flame welding and spiral tube[J]. Optics Communications, 2020, 476(3): 126307.
- [24] Mei J W, Xiao X S, Yang C X. High-resolution and large dynamic range fiber extrinsic Fabry-Perot sensing by multi-extrema-tracing technique[J]. Applied Optics, 2015, 54(12): 3677-3681.