



## 光纤传感技术在油田开发中的应用进展\*

庄须叶<sup>1</sup>, 黄涛<sup>2</sup>, 邓勇刚<sup>3</sup>, 王浚璞<sup>3</sup>, 姚军<sup>1</sup>

1. “微细加工光学技术”国家重点实验室·中国科学院光电技术研究所, 四川 成都 610209

2. 中国石化西南石油局油田工程服务公司, 四川 绵阳 621000

3. 中国石油川庆钻探公司安全环保质量监督检测研究院, 四川 广汉 618300

**摘要:** 相对于传统电学传感器, 光纤传感器具有体积小、灵敏度高、耐酸碱腐蚀、抗电磁干扰能力强、不产生电火花以及可实现分布式、实时在线、永久性监测等特点, 得到了众多科研工作者的广泛关注, 并在油田开发中获得了广泛应用。对应用于油田开发中的光纤传感技术的原理和发展现状进行了介绍, 主要包括用于温度、压力、流场、声波、应力等方面检测的光纤传感技术。阐述了各种光纤传感技术在油田开发中的具体应用, 通过对各传感技术的优缺点进行分析, 并与现有的传统传感技术比较, 指出了光纤传感技术在油田开发应用中的巨大优势和广阔前景, 并对光纤传感技术在油田勘探和开发中的进一步的应用和发展进行了展望。

**关键词:** 光纤; 传感器; 光纤传感器; 光纤传感技术; 油田勘探开发

网络出版地址: <http://www.cnki.net/kcms/detail/51.1718.TE.20120314.0934.011.html>

庄须叶, 黄涛, 邓勇刚, 等. 光纤传感技术在油田开发中的应用进展[J]. 西南石油大学学报: 自然科学版, 2012, 34(2): 161-172.

Zhuang Xuyue, Huang Tao, Deng Yonggang, et al. Developments on Optical Fiber Sensing Technologies Applied in Oilfield[J]. Journal of Southwest Petroleum University: Science & Technology Edition, 2012, 34(2): 161-172.

### 引言

能源已经成为全球经济和社会发展的一个重要瓶颈, 石油作为主要的能源资源在国民经济和社会发展中具有重要的战略地位。石油工业的健康发展不仅是国民经济体制健康发展的前提条件, 也是国家整个社会体制健康发展和综合国力在国际竞争中取胜的重要保障。石油工业由于其自身的特殊性, 成为高科技技术相对集中的行业, 特别是其严厉苛刻的生产条件, 像高温、高压、高电磁干扰、高腐蚀性、毒性强以及易燃易爆等, 对该行业所采用的设备、技术有着严格的要求。

随着石油工业的进一步发展, 各种新概念油田相继被提出, 像数字油田(Digital Oilfield)<sup>[1]</sup>、智能油田(Smart Oilfield)<sup>[2]</sup>、光学油田(Optical Oilfield)<sup>[3, 4]</sup>等, 伴随这些新概念提出的是油田进一步

发展的新需求, 像输油管道的实时在线监控, 钻井及井下温度、压力等参数的实时在线反馈, 毒性物质泄露的分布式监控, 井下永久性传感以及油田智能网络化监控管理等。传统的技术手段已满足不了石油工业的发展要求, 要促进石油工业的进一步发展, 必须开发和应用新的技术手段, 其中光纤传感技术就是这些新技术中的一个重要分支, 已成为促进石油工业健康发展的重要武器。

光纤传感器技术是随着光纤实用化和光通信技术的发展而形成的, 在 20 世纪 90 年代得到了飞速发展。光纤传感器可分为两大类: 一是功能型传感器, 利用光纤本身的某种敏感特性或功能制成的传感器; 另一类是传光型传感器, 光纤仅起到传输光的作用, 必须在光纤断面或中间加装其他敏感元件才能构成传感器。光纤传感器与传统的电学传感器相比有着许多优点, 如结构简单、体

\* 收稿日期: 2011-04-17 网络出版时间: 2012-03-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(60978051); 中国科学院西部之光博士资助基金(A11K011)。

积小、灵敏度高、电绝缘、耐酸碱腐蚀、抗电磁干扰能力强、可实现分布式、实时在线检测以及对被测物质干扰小等<sup>[5]</sup>。光纤传感器的这些优点特别符合油田发展的需求,得到了石油行业科技工作者的广泛重视,在油田上得到了广泛的开发和应用,用于各种参数测量的光纤传感器相继被研究和推广。本文就光纤传感器在油田勘探开发中的应用进行简单介绍。

## 1 应用于各参数测量的光纤传感技术

### 1.1 温度测量

井温是测井作业中的重要测量参数之一,准确的井温测量对于地质资料解释和油井生产情况监测都具有十分重要的意义。稠油开采是中国油田开发后期的重要增油措施,通过向地层注入高温蒸汽进行蒸汽吞吐、蒸汽驱油是稠油开采的主要方法之一,实时在线监测井内温度的变化对提高稠油开采效率和作业安全保障具有重要的意义。常规的电学测温传感器主要基于电阻发热、PN结以及热电偶技术进行测温,热平衡时间长,温漂大,无法在高温、高压、强腐蚀环境下实现对井下温度的永久性、分布式、实时在线的监测。特别是在稠油开采中,300℃的井下高温严重制约了传统电学温度传感器的性能发挥。光纤温度传感器体积小、寿命长、柔韧性好、对被测温度场干扰小、方便在空间结构复杂的井内安置,得到了广大油田科研工作者的广泛重视。

基于拉曼散射和光时域反射技术(OTDR, Optical time domain reflectometer)的光纤温度传感器是目前应用最广泛的井下温度实时监测设施和研究热点。拉曼散射光分为斯托克斯(Stokes)光和反斯托克斯(Anti-Stokes)光两种。其中 Stokes 光与温度无关,而 Anti-Stokes 光的强度随温度变化明显,因此利用两者与温度的特殊关系即可推测出被测点的温度,温度计算公式如下式所示。

$$T = \frac{hcv}{k[\ln a - \ln(l_{as}/l_s)]} \quad (1)$$

式中

$l_{as}/l_s$ —反斯托克光与斯托克光的强度之比,无因次;

$h$ —普郎克常数, J·s;

$c$ —真空中的光速, m/s;

$v$ —拉曼平移量,  $m^{-1}$ ;

$a$ —温度相关系数, 无因次;

$k$ —波尔次曼常数, J/K;

$T$ —绝对温度值, K。

光时域反射技术于1997年由 Barnoski 提出,可对测量点进行精确定位,是分布式光纤传感的关键技术。光脉冲在沿光纤向前传输的过程中还会产生后向散射,光强在向后传输的过程中随着距离的增长按一定规律衰减,在光速不变的情况下,距离与时间有以下关系成立<sup>[6]</sup>

$$L = \frac{ct}{2n} \quad (2)$$

式中

$L$ —光纤长度, m;

$n$ —光纤纤芯的折射率, 无因次;

$t$ —信号从发射到返回(双程)的时间, s。

根据公式(2)即可对被测点定位。因此利用公式(1)和公式(2)即可以对温度进行分布式、实时在线的监控。

1992年 Hurtig 等人第一次将基于散射机理的分布式光纤温度传感器 DTS(Distributed Temperature Sensor)应用于井下,用一根光纤测量得到了井中的温度分布曲线<sup>[7]</sup>。1994年瑞士 NAGRA 的 Grimsel 岩石实验室,利用 DTS 系统研究了在井中注入热流体或冷流体时井温的变化影响<sup>[7]</sup>。至今, DTS 系统已经商业化 30 多年,根据壳牌公司的报告已有超过 1 200 套的该系统在各大油田中获得了实用<sup>[8]</sup>。欧美石油公司(Occidental Petroleum Corporation)先后在阿曼 Safah 油田的 179 井、203 井和 217 井安装了 DTS 光纤传感器并取得了良好的成果<sup>[9]</sup>。Kaura 在 2008 年报道了安装在 JACOS 油田 20 多口油井中的 DTS 系统的工作情况,该系统采用纯石英光纤芯,具有良好的耐高温和抗氢性,在安装后的 12 个月内运行良好<sup>[10, 11]</sup>。Fryer 介绍了 DTS 系统在某中国海上油田上的应用情况,用该系统成功地对油井内各产油层的情况进行了实时监控,获得了巨大的经济利益<sup>[12]</sup>。

中国的科研单位也对 DTS 测温系统进行了相关研究,并取得了可喜的成果。史晓峰等介绍了 DTS2000 分布式光纤测温系统在石油测井中的应用,该系统的测温精度达到  $\pm 1^\circ\text{C}$ , 空间分辨率达

到1 m。在对草桥油田某注蒸汽热采井进行的实际测量中,得到了该井段在0~1 400 m的温度信息,系统安全可靠<sup>[13]</sup>。此外,杜双庆等对DTS分布式光纤测温系统在稠油开采中的应用进行了研究,实践证明,分布式光纤测温系统的测温精度和空间分辨率完全能够满足温度测井的需要,并且能在高温等复杂的环境下工作<sup>[14]</sup>。辽河油田的科研工作者通过利用光纤测温技术提高了稠油开采的效益,锦45块Ⅱ类稠油蒸汽驱先导试验区自2008年5月底实现全面转驱,至今已经开发17个月,较转驱前日产液量和产油量均实现了翻番,瞬时采注比突破1.1,瞬时油气比达到1.5(含外围受效井产量),获得了良好的效益<sup>[15]</sup>。此外,石油大学(北京)刘立成等人也对分布式光纤油井测温传感器在井间热连通研究中的应用进行了研究<sup>[16]</sup>。

当光纤直接布置于油井内时,在高温、高压的环境下,油井内的氢会与光纤二氧化硅中的氧结合,形成氢氧根离子,造成光纤损耗的增大,特别是在1 250 nm和1 385 nm两个常用波段区的损耗增大,不仅会影响传感器的测量精度,还会缩短传感长度、影响信息通讯。一般采用在光纤表面加聚酰亚胺涂覆层或碳膜涂覆层,再外加不锈钢管等措施进行保护<sup>[17]</sup>。此外,采用纯石英作为传感光纤的纤芯材料,可有效防止氢气的影响,耐高温达300℃<sup>[8]</sup>。

光纤光栅(FBG)的反射波长与温度有公式(3)的关系成立。因此当光纤光栅周围的温度发生变化时,通过观察反射光谱或透射光谱的谱线变化即可推测出被测温度的大小,光纤光栅是油田上常用的测温传感光纤器件之一。

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = k_\varepsilon\Delta\varepsilon + k_T\Delta T \quad (3)$$

式中

$k_\varepsilon = \partial\lambda_B/\partial\varepsilon$ —光纤光栅的应力系数,是光纤材料泊松比、弹光系数和有效折射率的函数, nm;

$k_T = \partial\lambda_B/\partial T$ —光纤光栅的温度系数,是光纤材料热光系数和热膨胀系数的函数, nm/K;

$\Delta\varepsilon$ —光栅轴向的应变变化, 无因次;

$\Delta T$ —光栅温度的变化, K。

公式(3)表明,压力产生的应变也可以引起光栅反射波长的变化,因此,需要防止压力变化对温度测量结果的干扰。在实际应用中,通过预留一定长度的富余光纤即可消除压力应变对光纤测量温度

结果的影响。相反,温度变化对光纤光栅测压力的影响,需要进行特别的传感器设计来消除。基于光纤光栅技术的光纤传感器多用于同时检测井下温度和压力两个物理量。

1999年,美国CiDRA公司成功地在加利福尼亚的Bakerfield安装了第一套光纤布拉格光栅温度压力计,传感器的测量范围0~170℃,测量精度 $\pm 1^\circ\text{C}$ ;分辨率达到 $0.1^\circ\text{C}$ ,在 $150^\circ\text{C}$ 下可连续使用,稳定性达到 $\pm 1^\circ\text{C/a}$ <sup>[18]</sup>。利用光纤布拉格光栅阵列(FBGA, Fiber Bragg Grating Arrays)可以实现对井内温度的多点测量,2007年第一套FBGA试验系统在Nexen's Long Lake Facility的某蒸汽驱动重油开采井中安装,该系统集成了40个传感点,耐高温可达 $375^\circ\text{C}$ ,采用纯石英纤芯抗氢化,在应用中获得了巨大成功。2008年3月在加拿大卡尔加里召开的PTAC(Petroleum Technology Alliance Canada)大会对该系统的工作情况进行了专门介绍<sup>[8]</sup>。中国的华中科技大学、长江大学、西安石油大学、南开大学也对应用于井下温度、压力检测的光纤光栅传感器进行了相关研究<sup>[19-21]</sup>。

瑞士Omnisens公司开发了可同时进行应力和温度测量的SMARTprofile的传感光纤,结构尺寸如图1所示。4根光纤包被在聚乙烯材料中,其中两根固定的光纤用于检测应力(蓝色、粗),两根自由的光纤用于检测温度(红色、细),该传感光纤已在长输油气管道测漏监测中获得了大量的实际应用<sup>[22]</sup>。

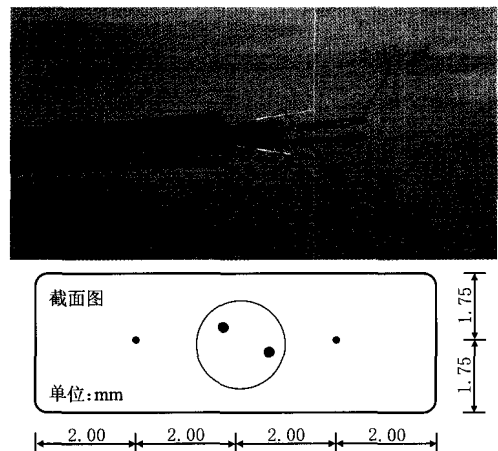


图1 SMARTprofile的结构示意图

Fig. 1 Sketch diagram of SMARTprofile's structure

## 1.2 多相流参数测量

油井的不同层段或同一层段的不同部位,可能

产出不同性质的流体。准确判断井下任意深度流体的性质和流场参数,对于预测储层产能、评价产层的性质都具有非常重要的意义。传统的井下多相流参数测量主要采用基于机械方式和电子方式的流场传感器。这两类传感器的精度度较低,且在井下复杂的物理化学环境下容易失效,传感器的长期可靠性难以保障。基于光纤的流场传感器因其本身的特殊优越性,如耐高温高压、抗电磁干扰、抗腐蚀能力强、不会产生电火花等,使其在井下流场参数的测量中发挥着越来越重要的作用<sup>[23]</sup>。

通过在一根光纤上集成多个 FBG 传感单元,可以测量出光纤附近的压强扰动信息。再运用声纳处理技术就可得到声音在油井进液和出液中的传播速度和对流压强扰动的速度。根据声速可推断出流体的密度,再结合测得的温度、压强等信息就可以推断出被测处油水混合物的组分比例和速度等信息,如图 2 左图所示<sup>[24]</sup>。

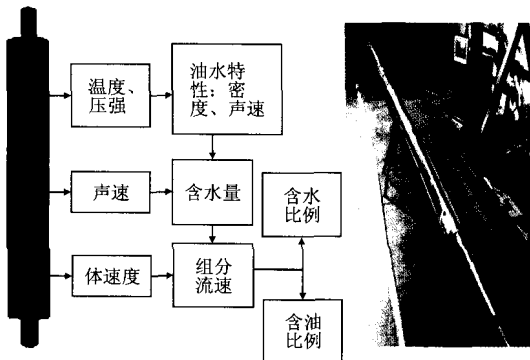


图 2 光纤流场传感器工作原理示意与实物图

Fig. 2 Operational principle of the optical fiber flowmeter and its photo

基于光纤光栅流量计的设计理念是由 Texaco Humble Flow Loop 于 1998 年提出的,也是光纤流量计发展的主线。美国 CiDRA 公司是光纤流量计研究的龙头公司,其研制的光纤多相流传感器可进行多相流组分(包括持水率、持气率)和流速的测量,持水率、流速测量误差都小于  $\pm 5\%$ 。两相流传感器的工作温度  $0\sim 150\text{ }^{\circ}\text{C}$ ;工作压力  $0\sim 103\text{ MPa}$ <sup>[23]</sup>。2002 年该公司在壳牌位于墨西哥湾的某深水油井内安装了基于布拉格光栅原理的流量传感器。传感器的下放深度最大超过 21 000 英尺,环境压强达 9 000 psi<sup>[24]</sup>。在此环境下,传感器可以实时向地面传送高精度的井内流速、持水率、压力和温度等信息。图 2 的右图是该传感器的实物图。2001 年夏天 PDO 研制了井下两相流的光纤传感器<sup>[25]</sup>,此后 BP、Norsk Hydro 和

TotalFinaElf 又联合开发了三相流光纤流量传感器,并成功地用于 BP 某油井的井下流场检测<sup>[26]</sup>。

此外,美国斯伦贝谢公司也开发了用于检测持气率的光纤流量计,并成功地在现场进行了试验,获得了良好的试验结果<sup>[27]</sup>。中国科学院西安光机所研究了基于折射率调制的光纤传感器在持水率检测方面的应用<sup>[28]</sup>。

### 1.3 压力测量

油藏压力监测是测井中的一项重要内容,及时准确地获得油井内的压力信息对提高开采效率、预防可能发生的灾难事故、维护油井作业安全等具有重要的意义。传统的井下压力监测传感器主要是应变压力计和石英晶体压力计。由于井下复杂的工作环境,严重影响了这两类传感器的测量精度和长期可靠性。基于光纤的压力传感器因其本身的优越性特别适合在油井测温中使用。

由公式(3)可知光纤光栅周围的压力变化可以调制光栅反射波长的大小,这是光纤光栅压力传感器的作用原理。美国 CiDRA 公司研制的光纤光栅压力传感器的量程  $0\sim 103\text{ MPa}$ ;过压极限  $129\text{ MPa}$ ;精度  $\pm 41\text{ kPa}$ ;分辨率  $2\text{ kPa}$ ;长期稳定性  $\pm 34\text{ kPa/a}$ (连续保持  $150\text{ }^{\circ}\text{C}$ );工作温度范围  $25\sim 175\text{ }^{\circ}\text{C}$ 。1999 年该公司将该系统用于加利福尼亚 Baker 油田的某生产井进行了压力监测试验,取得了良好的成果,传感系统已经商业化<sup>[23]</sup>。2001 年英国 BP 公司在几口油井下安装了光纤压力传感器,监测井内压力的变化,结果表明光纤压力传感器具有足够高的可靠性<sup>[29]</sup>。斯伦贝谢 Doll 研究中心研制出了侧孔布拉格光纤光栅传感器,最高工作温度  $300\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最高测量压力  $82\text{ MPa}$ ,在最高测量压力环境下,传感器对温度的灵敏度极小,非常适用于井下的压力监测<sup>[30]</sup>。瑞士的 Nellen 等学者开发了可同时进行压力和温度监测的光纤光栅传感器。传感器探头结构如图 3 所示,FBG 2 与被测流体隔离,单独测量温度的变化,流体的压力通过传递套管传递到 FBG 1 上,引起 FBG 1 产生应变,FBG 1 同时测量温度和压力的变化,二者解耦合即可算出被测压力和温度。传感器的测温范围是室温至  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,最大可测压力  $100\text{ MPa}$ ,在  $230\text{ }^{\circ}\text{C}$  的环境下传感器可稳定工作 5 a,当测量的压强小于  $1.0\text{ GPa}$  时,使用寿命更长。传感器可抗  $100.0\text{ g}$  的瞬时冲击和  $7.5\text{ g}$  的震动冲击<sup>[31]</sup>。



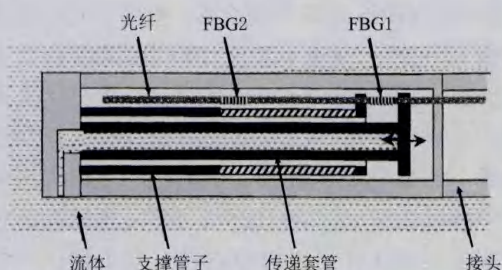


图3 FBG 光纤传感器探头示意图

Fig. 3 Schematic diagram of the sensor FBG

基于法布里-玻罗干涉仪原理的光纤压力传感器属于传光型光纤传感器,传感器的探头结构如图4所示。

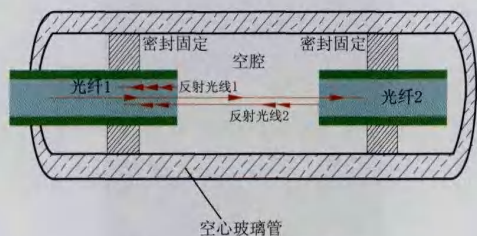


图4 传感器探头示意图

Fig. 4 Schematic diagram of the sensing detector

光纤1传输过来的光在光纤1的端口处产生反射光线1,沿光纤1向后传播,其他光经过传感器探头的空腔后在光纤2的端口处产生反射光线2,两条反射光线在光纤1中传播并在检测器上产生干涉。当传感器探头受到压力作用时,空心玻璃管产生伸缩变形,引起空腔长度的改变,进而调制光线2与光线1的相位差,输出结果为干涉条纹的改变,反推出被测压力的大小。传感器有良好的线性范围,温度对测量结果的影响小于0.009%/℃。若在传感器探头空心玻璃管的外围再加一个不同材质的密封管子,用来隔离压力的影响时,传感器可用来检测温度的变化<sup>[32-34]</sup>。

#### 1.4 声波检测

地震波检测技术是对产油区域进行测量和监控的主要方法。传统的声波检测传感器多基于压电技术,受环境因素影响大、抗电磁干扰能力弱,产生的图像不全面、分辨率较低,无法实现对油藏区域的实时在线动态检测,且在井下的恶劣环境下易损坏,可靠性差<sup>[23]</sup>。基于光纤技术的声波传感器具有频带宽、灵敏度高、耐高温、不受电磁场干扰等优点,在油田声波检测中具有巨大的应用潜力。

光纤声波传感器主要基于光纤光栅技术。光

纤光栅声波传感系统的突出优点是灵敏度高,理论上光纤光栅检波器可以探测振幅为 $3.5 \times 10^{-15}$  m、频率为1 kHz的地面震动(检波器埋于地表面),且检波器的动态范围可达120 dB<sup>[35]</sup>。光纤传感器系统可在油井的整个寿命期间运行,耐高温高压(温度200℃,压强1 GPa),由于传感器以光为载体进行信号的采集和传输,可有效抵抗电磁波的干扰,因此得到了广大科研工作者的广泛重视。国际上的知名油企Norway's Demo 2000、BP、Norsk Hydro、Statoil和TotalFinaElf联合发起资助了井下永久式的多态多通道光纤地震波传感系统(multi-station, multi-channel in-well seismic system)的研制工作<sup>[36]</sup>。2002年5月BP公司在美国怀俄明州的Rocky Mountain Oilfield Testing Center测试安装了世界上第一套3-C声波传感系统。在当年的11月份, Demo 2000在法国南部Izaute油田的TotalFinaElf油井中成功地安装了世界上第一套多态三维阵列式(multi-station, three-component array)的光纤声波检测系统<sup>[37]</sup>。此外,美国Littong公司研究了光纤声波传感器在蒸汽驱井中的应用, CiDRA公司也进行了用于井内垂直地震剖面、井间和无源地震监测的光纤地震监测系统的研究。井间地震、VSP(vertical seismic profiling)光纤传感器系统在井下良好的稳定表现为井间地震和VSP的进一步发展提供了技术保证,文献[35]中详细介绍传感了光纤技术在这方面的巨大应用前景。

水听器在海底石油勘探中起着重要的作用,传统的水听器基于压电陶瓷材料,输出阻抗高,需要进行阻抗变换后才能与信号采集设备的输入端匹配;且压电陶瓷感应的地震信号非常微弱,无法远距离传输,必须每隔几个传感器就设置一个采集站,或者采用对每个压电传感器进行原位数据转换的方案。此外,仪器的供电、密封、防海水的腐蚀都是一系列棘手的问题。基于光纤技术的水听器采用光做信号的载体,线路损耗低、耐海水腐蚀且不需考虑短路的问题,非常适合在海洋石油勘探开发中应用。2004年BP公司发起了Valhall LoFS工程,进行基于光纤传感技术的永久式海底地震检测器的研究。2007年在北海的Valhall海上油田成功地安装了井下永久式的光纤地震检测系统<sup>[3]</sup>。光纤4C海底地震检测系统包括一个光纤3C加速度计单元和一个光纤水听器,如图5所示。



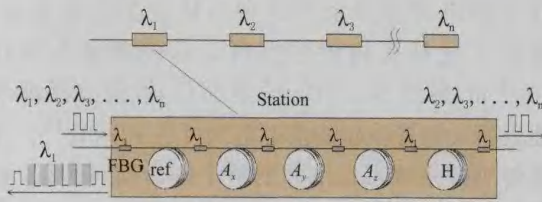


图5 光纤4-C海底声波传感系统原理图  
Fig. 5 4-C Fiber optic seismic sensor configuration

图5中 $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ 分别是 $x$ ,  $y$ ,  $z$ 三个方向上的加速度计, Ref用于参考除噪, H是水听器。图6中 $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ 和H组下的数据分别是由图5中的 $A_x$ ,  $A_y$ ,  $A_z$ 和H相对应的传感单元测量得到。利用每个光纤光栅的反射波长不同,可实现波分复用,且系统的水下部分没有电学元件,避免了水下供电、密封以及短路等问题,可靠性高。分析得知在4000个传感单元中有99.9%的单元在长达25a的使用中,可靠性都达到了99.9%。

2006年在挪威特隆赫姆(Trondheim)的某港湾内进行了第一次试验,传感系统安置在水下35m的地方,一条电学4C检测系统和其并行排布用做参考。2007年在挪威的某海湾内进行了第二次试验,传感系统安放在海底淤泥下1m的地方,海水深270m。两次试验都进行了周期几个月的反复测试,并获得了高质量的测量数据,图6是某试验中得到的测量结果。2008年夏季两套传感系统正式在北海某生产油田中使用。2010年在北海可以实现覆盖面积达60 km<sup>2</sup>的光纤地震传感器系统的铺设,用于对感兴趣的海底油层的变化情况进行实时在线监测,铺设效果如图7所示。

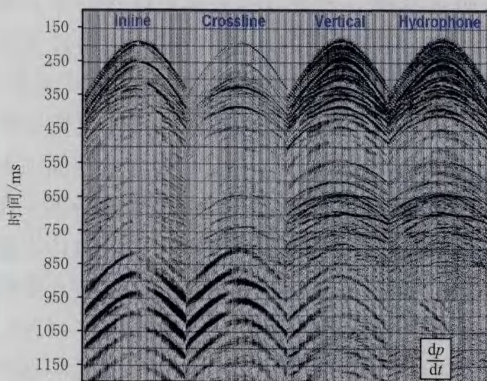


图6 传感器试验数据结果图  
Fig. 6 Testing results obtained by using the sensor

中国对光纤地震传感系统的研究起步较晚,2002年,胜利石油管理局科技处和胜利物探公司

与美国 STEVENS 理工学院合作,进行了光纤检波器的研究开发。2004年4月,FBG检波器首次走出实验室,进行地震勘探的野外实验,取得了令人鼓舞的成果。2006年二者开发的光纤水听器在浅层地表下的响应带宽为10~100 Hz,在中层和深层地表中可以达到10~140 Hz<sup>[38]</sup>。此外,国家高新技术研究发展863计划也对建立具有自主知识产权的基于光纤传感器的新型地震资料采集系统进行了大力支持<sup>[23]</sup>。



图7 光纤声波检测器的海底铺设效果图  
Fig. 7 Fiber optic permanent seismic monitoring installation, covering the reservoir area of interest

### 1.5 应力检测

应力测试是保证油田各设备安全运行的必要措施之一,通过判断设备是否发生应力集中,以及应力是否过载可及时对潜在的危险进行预警,保证设备和人员的安全。

图8是瑞士 Omnisens 公司研发的用于应力检测的 SMARTape,传感光纤外面包被一层聚酰亚胺,并埋设在用 PPS(polyphenylene sulfide)加强的热塑材质中,用于防止传感光纤在安装和应用时的损坏。封装后的传感光纤厚0.2 mm,宽13.0 mm,该传感光纤已经广泛地应用到输油气管道、基建等设备的应力检测中<sup>[22]</sup>。

为实时监控深水立管的应力情况,ENI、E & P、SMARTEC 和 Tecnomare 研制了基于光纤传感器的深水立管应力实时检测系统。该系统由水下部分、连接部分和水上部分组成。水下部分,在立管的圆周每隔90度排列的4个光纤传感器用于监控立管的轴向和弯曲应力情况。传感器采集到的信息通过中间的连接部分传输到水上部分进行分析,系统可对立管的静态以及动态应力情况进行实时监控<sup>[39]</sup>。此外,光纤光栅应力传感器在基建像桥梁、高速公



路、堤坝以及楼房安检等方面得到了大量的应用,为安全生产和民生安全提供了保障<sup>[40, 41]</sup>。

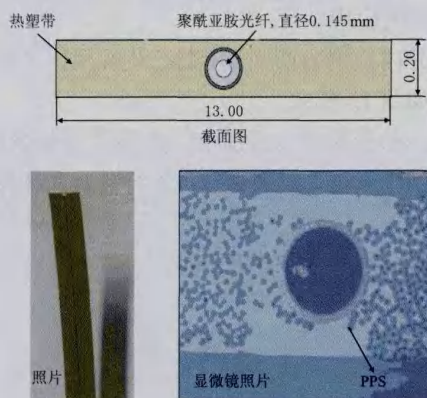


图8 SMARTape的结构示意图  
Fig. 8 Sketch diagram of SMARTape's structure

### 1.6 其他方面的检测和应用

除了在以上几个方面的应用外,光纤传感器在油田勘探开发的其他方面也得到了大量的应用,比如各种易燃易爆有毒危险性气体的检测、pH值、湿度、核测试等<sup>[5]</sup>。核测试技术能够快速分析和确定岩石及其孔隙流体中各种化学元素的含量,在油田勘探与开发中发挥了巨大的作用。传统的核传感器主要采用NaI晶体,需配置价格昂贵的光电倍增管,在井下严酷的环境下其使用寿命较短,且光电倍增管对外界电磁场的干扰非常敏感,测量结果易受到影响<sup>[42]</sup>。光纤核传感器的研究得到了国内外科研机构的广泛关注。1987年,北大西洋组织(NATO)之中的15个成员国就制订了对光纤核探测用的光纤、有源、无源器件进行系统的研制和开发的规划。此外,俄罗斯也开展了相关的基础研究工作。中国自1993年开始,中科院声学所、清华大学开展了激光光纤核探测器的预研工作<sup>[43]</sup>。

用于各种易燃易爆有毒危险性气体,如甲烷、乙烯、丙烷、丁烷、氨气、氧气、氢气、硫化氢以及臭氧等检测的光纤传感器得到了广泛的研究,并获得了良好的成果<sup>[5, 44]</sup>。2009年西南石油大学开发了基于光谱吸收的光纤H<sub>2</sub>S气体传感器,传感器光源波长1.578 μm,是硫化氢的光谱吸收峰值,传感器可在强电磁干扰环境下使用<sup>[45]</sup>。此外,用于腐蚀检测的光纤传感器也得到了大量的研究。氯元素是造成钢铁腐蚀的重要因素之一,利用光纤传感器检测氯元素的浓度,可实时监测地下埋设的钢管以及混凝土中钢筋的工作环境变化,及时判断腐蚀情

况<sup>[46]</sup>。北京理工大学研究了光纤光栅腐蚀传感器,用于实时检测钢筋的腐蚀情况,可对钢筋的早期腐蚀进行预警<sup>[47]</sup>。

基于光纤传感器的良好特性,许多公司都开发了集成光纤传感器的工业产品。2000年European Commission发起了一项意在开发一套耐高温、抗腐蚀、抗疲劳的热塑型PDT-COIL(Power & Data Transmission Composite Coiled Tubing)用于海洋电动钻井过程的监控。该线圈集成了供电电缆和传感光纤两部分。供电电缆为深水电泵和电钻马达供电,光纤用于检测油井参数和PDT-COIL的健康状态,并传输数据,传感器可以实时检测的COIL的应力、温度和变形情况。图9是该COIL的截面图,图中A、B表示供电电缆,Kevlar yarn是凯夫拉尔纤维丝,起到增强COIL强度的作用,SP是测量应力和温度的光纤传感器<sup>[39]</sup>。

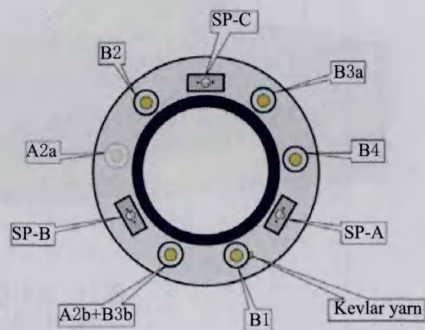


图9 PDT-COIL截面示意图  
Fig. 9 Cross section of PDT-COIL

为实时监控管子内流体中的流动情况,科研工作者又开发了智能管子,是一种高强度、轻量化、可实时监控的热塑型管材,管子结构如图10所示。

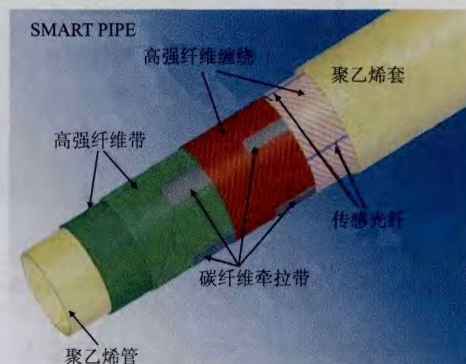


图10 智能管子示意图  
Fig. 10 Schematic diagram of the smart pipe



管子上的传感光纤可以实时检测作用在管子上的应力大小和温度,通过对温度的监控可以判断管子是否发生泄露,并可及时对泄露点精确定位<sup>[39]</sup>。

## 2 展 望

从前面的介绍以及图 11 可见光纤传感器在石

油工业的各个环节,从陆上油田的勘探开采到海上油田的勘探开采、冶炼化工、储存运输等方面都得到了大量的应用。

油井内检测方面,国际上已经实用化了的光纤传感器如图 12 所示。

光纤传感器的大量应用,造就了蓬勃的市场,根据 QOREX LLC 的调研,石油行业对光纤传感器

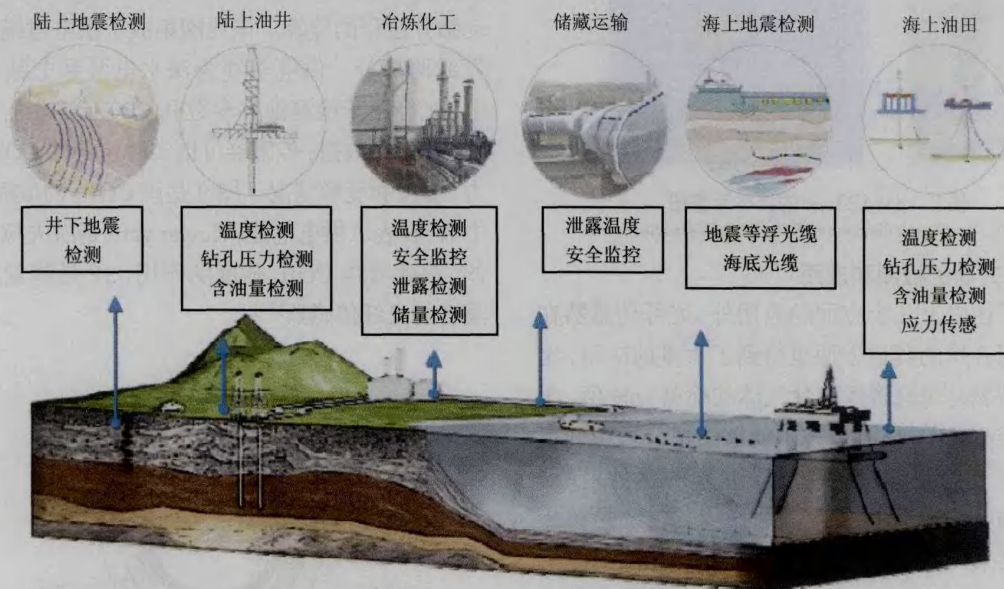


图 11 光纤传感器在石油工业中的应用示意图

Fig. 11 Optical fiber sensors used in oil industry

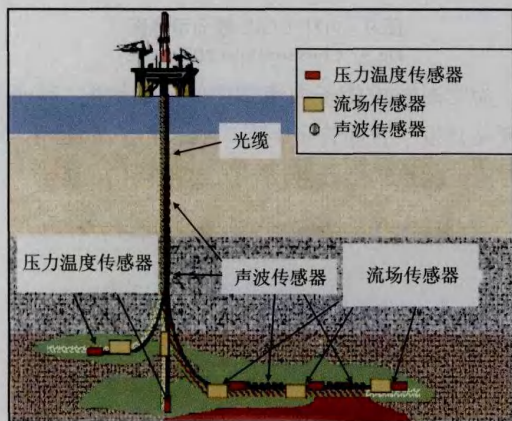


图 12 井下实用化的光纤传感器示意图

Fig. 12 Schematic diagram of the optical fiber sensors practically used in well

的需求市场增长迅速。2008 年,该公司在用于石油行业的光纤传感器的产品中获得了高达 1.25 亿美元的利润,其中仅光纤地震波检测器一项的收

益就达 2 500 万美元,且这部分市场的需求增长迅速,5 年的增长率为 70%<sup>[48]</sup>。光纤传感器在油田工业中的巨大市场前景和优良特性,使相关科研工作者意识到光纤传感器的应用将会对石油工业产生革命性的推进,并提出了光学油田的概念<sup>[3, 4]</sup>。随着光纤传感器在石油工业中的大量应用,对实现整个油田的智能化网络管理奠定了基础<sup>[30]</sup>。如图 13 所示,在智能网络化油田中光纤传感器可以实现对石油勘探、开采、冶炼、运输、基建以及后勤设施的实时、在线监控,并把信号通过光纤传输到中央控制室中,在控制室内管理人员根据采集到的信息就可以实时对整个工业区进行高效的统一管理。

光纤传感器具有的优点、蓬勃发展的市场和美好的应用前景,引起了国际著名石油公司的密切关注,像欧美石油公司、斯伦贝谢、BP、Shell、Norway's Demo 2000、Norsk Hydro、Statoil 和 TotalFinaElf 等。



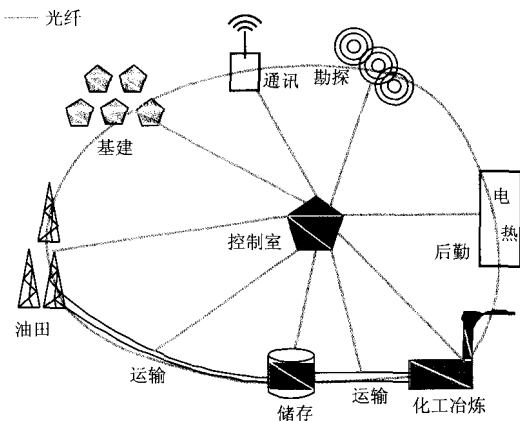


图 13 网络化油田示意图

Fig. 13 Schematic diagram of optical fiber networks used in oilfield

它们投入了巨大的人力、物力进行油田用光纤传感器的开发,促进了石油生产的进步和发展,也拓宽了其市场份额,巩固了市场地位。在 2009 年的 International Expositonal and Annual Meeting 会议上 Morten Eriksrud 称未来科技的发展将会把油田中所有传统的基于电学的传感器转换为光学传感器,并称光纤传感器技术是改变石油产业游戏规则的关键技术,光学油田将是未来油田发展的必然趋势<sup>[3]</sup>。同样,光纤传感器的优良特性也引起了中国广大科研工作者的关注,许多科研单位和油田企业也着手进行了大量的研究,并取得了令人鼓舞的成果,但由于中国的研究起步较晚,相关研究多处于试验阶段,还没有形成产品。但这些相关的研究已经引起了人们对光纤传感器在石油行业中应用的极大兴趣和广泛重视,在广大科研工作者的共同努力下,中国对应用于石油行业的光纤传感器的研究正在蓬勃迅速的发展,光纤传感器在石油工业得到了大量的实际应用和推广,为中国能源安全建设提供了有力保障。

## 参考文献

- [1] Mahdavi M, Darukhanavala P P, Paul D. Bringing the digital oilfield to production operations[J]. JPT, 2009, 11: 18-20.
- [2] Chelmis C, Bakshi A, Seren B, et al. Intelligent model management and visualization for smart oilfields[C]. SPE 132629, 2010.
- [3] Eriksrud M, Langhammer J, Nakstad H. Towards the optical oilfield[C]. Houston: SEG Houston International Exposition and Annual Meeting, 2009.
- [4] Kragas T K, Williams B A, Myers G A. The optic oilfield: deployment and application of permanent in-well fiber optic sensing systems for production and reservoir monitoring[C]. SPE 71529, 2001.
- [5] 庄须叶. 高灵敏度光纤消逝场传感器制作方法的研究[D]. 北京: 中国科学院研究生院, 2009.  
Zhuang Xuye. Study on the art of fiber-optic evanescent field sensors with high sensitivity[D]. Beijing: Graduate School of Chinese Academy of Sciences, 2009.
- [6] 张艺, 张在宣, 金仁洙. 远程分布式光纤温度传感系统的设计和制造[J]. 光电工程, 2005, 32(4): 45-48.  
Zhang Yi, Zhang Zaixuan, Insoo S KIM. Design and implementation of long range distributed optical fiber temperature sensor system[J]. Opto-Electronic Engineering, 2005, 32(4): 45-48.
- [7] Firster A, Schritter J, Merriam D F, et al. Application of optical-fiber temperature logging——an example in a sedimentary environment[J]. Geophysics, 1997, 62(4): 1107-1113.
- [8] Sanders P E, MacDougall T W. Recent development in fiber optic sensors technology for high temperature monitoring[ED]. www.qorexllc.com/Technical%20Paper-%20Proceedings%202009%20GRC%20Annual%20Meeting.
- [9] 付建伟, 肖立志, 张元中. 油气井永久性光纤传感器的应用及其进展[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(3): 515-523.  
Fu Jianwei, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong. Progress of permanent fiber-optic sensor applications to oil and gas well[J]. Progress in Ggophysics, 2004, 19(3): 515-523.
- [10] Kaura J, Sierra J. Successful field application in continuous DTS monitoring under harsh environment of SAGD wells using improved optical fiber technology[C]. SPE 117206, 2008.
- [11] Kaura J, Sierra J. High temperature fibers provide continuous DTS data in harsh SAGD environment[J]. World Oil, 2008, 229(6).
- [12] Fryer V, Shuxing D, Otsubo Y, et al. Monitoring of real-time temperature profiles across multizone reservoirs during production and shut-in periods using permanent fiber-optic distributed temperature systems[C]. SPE 92962, 2005.
- [13] 史晓峰, 蔡志权, 李铮. 分布式光纤测温系统及其在石油测井中的应用[J]. 石油仪器, 2002, 16(2): 20-23.  
Shi Xiaofeng, Cai Zhiquan, Li Zheng. Applications of FODTS in oilfield logging[J]. Petroleum Instruments, 2002, 16(2): 20-23.

- [14] 杜双庆, 肖华平. 分布式光纤测温技术及其在稠油开采中的应用[J]. 内蒙古石油化工, 2009(4): 113-115.  
Du Shuangqing, Xiao Huapin. The optical fiber distributed temperature measurement technique and its application in heavy oil recovery[J]. Inner Mongolia Petrochemical Industry, 2009(4): 113-115.
- [15] 廖洪波. 光纤测温技术在稠油蒸汽驱开发中的应用[J]. 石油化工应用, 2010, 29(1): 21-24.  
Liao Hongbo. The optical fiber temperature measurement and its application[J]. Petrochemical Industry Application, 2010, 29(1): 21-24.
- [16] 刘立成, 姜汉桥, 赵业卫. 应用分布式光纤温度测试技术评价井间热连通[J]. 西南石油大学学报, 2007, 29(5): 18-20.  
Liu Licheng, Jiang Hanqiao, Zhao Yewei. FODTS used in well temperature monitoring[J]. Journal of Southwest Petroleum University, 2007, 29(5): 18-20.
- [17] 王昌, 刘统玉, 刘小会, 等. 基于光纤传感系统的石油测井技术进展[J]. 山东科学, 2008, 21(6): 27-32.  
Wang Chang, Liu Tongyu, Liu Xiaohui, et al. A survey of FBG system based oil logging technology[J]. Shandong Science, 2008, 21(6): 27-32.
- [18] Kersey A D, Gysling F L, Bostick F X. Fiber-optic systems for reservoir monitoring[J]. World Oil, 1999, 220(10): 91-97.
- [19] 杨三青. 井下光纤式压力温度复合传感器设计[J]. 仪表技术与传感器, 2000(3): 6-7.  
Yang Sanqing. Design of optical fiber pressure temperature complex sensor below well[J]. Instrument Technique and Sensor, 2000(3): 6-7.
- [20] 乔学光, 李育林, 张培坤, 等. 光纤布拉格光栅和长周期光栅传感器对油气井下压力和温度的同时测量[J]. 光电子·激光, 1999, 9(1): 42-45.  
Qiao Xueguang, Li Yulin, Zhang Peikun, et al. Hybrid FBG/LPEG sensors for simultaneous measuring strain and temperature of oil/gas bottomhole[J]. Journal of Optoelectronics · Laser, 1999, 9(1): 42-45.
- [21] Li Shaomin, Liu Xiaoying, Li You, et al. FBG sensing temperature characteristic and application in oil/gas down-hole measurement[J]. Front. Optoelectron China 2009, 2(2): 233-238.
- [22] Daniele Inaudi, Branko Glisic. Long-range pipeline monitoring by distributed fiber optic sensing[J]. Journal of Pressure Vessel Technology, 2010, 132(1): 011701.
- [23] 童茂松, 彭会忠, 杜国同. 油田测试中的光纤传感技术[J]. 光纤与电缆及其应用技术, 2004(1): 14-18.  
Tong Maosong, Peng Huizhong, Du Guotong. Fiber optic sensors in oil field measurement[J]. Optical Fiber & Electric Cable, 2004(1): 14-18.
- [24] Bostick III F X. Commercialization of fiber optic sensors for reservoir monitoring[C]. OTC 15320, 2003.
- [25] Tor K Kragas, Alex van der Spek, Khalid M. Field trial of a downhole, fiber optic, two-phase flowmeter at PDO's nimir field[C]. SPE 78306, 2002.
- [26] 赵广峰. 用光纤探头改进持气率的确定方法[J]. 国外测井技术, 2001, 16(2): 25-29.  
Zhao Guangfeng. Methods using optical fiber sensors to improve the accuracy of gas holdup meter[J]. Foreign Well Logging Technology, 2001, 16(2): 25-29.
- [27] Kragas T K, Johansen E S, Hassanali H, et al. Installation and data analysis of a downhole, fiber optic flowmeter at BP's mahogany field, offshore trinidad[J]. SPE 81018, 2003.
- [28] 阮航, 陈尧生, 陈少武, 等. 基于折射率调制的持水率测定方法研究[J]. 测井技术, 1995, 19(5): 329-333.  
Yuan Hang, Chen Raosheng, Chen Shaowu, et al. On water holdup meter based on refractive index modulation[J]. Well Logging Technology, 1995, 19(5): 329-333.
- [29] 李海金. 用于油藏监测的光纤系统[J]. 测井技术信息, 2000, 13(2): 90-93.  
Li Haijin. Optical fiber systems used in oil reservoir monitoring[J]. Well Logging Technology Information, 2000, 13(2): 90-93.
- [30] 赵晓亮, 肖立志, 张元中, 等. 网络化油气藏动态实时监测系统研究[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(2): 787-790.  
Zhao Xiaoliang, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong, et al. The study of network reservoir dynamic real-time monitoring technology[J]. Progress in Geophysics, 2009, 24(2): 787-790.
- [31] Nellen Ph M, Mauron P, Frank A, et al. Reliability of fiber bragg grating based sensors for downhole applications[J]. Sensors and Actuators A, 2003, 103: 364-376.
- [32] Wang Anbo, Xiao Hai, Wang Zhiyong, et al. Self-calibrated interferometric-intensity-based optical fiber sensors[J]. Journal of lightwave technology, 2001, 19(10): 1495-1501.
- [33] Pan Y, Chen Z, Xiao L, et al. Application of fiber Bragg grating sensor networks in oil wells[C]. SPE 136978, 2010.
- [34] Qi Bing, Pickrell G, Zhang Po, et al. Fiber optic pressure and temperature sensors for oil down hole application[J]. SPIE, 2002, 4578: 182-190.
- [35] 宁靖, 王文争, 刘世海, 等. 光纤布拉格光栅传感器在



- 石油勘探领域应用展望[J]. 物探装备, 2004, 14(4): 225-228.
- Ning Jing, Wang Wenzheng, Liu Shihai, et al. FBG sensors used in oilfield[J]. Equipment for Geophysical Prospecting, 2004, 14(4): 225-228.
- [36] Knudsen S. Design and qualification of permanently installed in-well multi-component multistation seismic system. project overview[ED]. www.demo2000.no/files/23315a3.pdf.
- [37] Weatherford International Ltd.. Weatherford installs world's first permanent fiber optic, multi-component, Multi-station in-well 4D seismic array[ED]. http://www.pnewswire.com/news-releases/weatherford-installs-worlds-first-permanent-fiber-optic-multi-component-multi-station-in-well-4d-seismic-array-77052392.html.
- [38] Zhang Yan, Li Sanguo, Yin Zhifan, et al. Fiber-bragg-grating-based seismic geophone for oil/gas prospecting[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 084404.
- [39] Inaudi D, Glisic B. Fiber optic sensing for innovative oil & gas production and transport systems[C]. Cancun, Mexico: The 18th International Conference on Optical Fiber Sensors, 2006.
- [40] Schulz W L, Udd E, Seim J M, et al. Advanced fiber grating strain sensor systems for bridges, structures, and highways[ED].http://www.bluerr.com/22.PDF.
- [41] Inaudi D, Glisic B. Distributed fiber optic strain and temperature sensing for structural health monitoring[C]. Porto, Portugal: The Third Intel Conference on Bridge Maintenance, Safety and Management, 2006.
- [42] 刘敏敏, 周峰, 杜志顺. 光纤传感器在石油测井中的应用[J]. 光学与光电技术, 2008, 6(3): 18-21.
- Liu Minmin, Zhou Feng, Du Zhishun. Applications of optic fiber sensors in oilfield logging[J]. Optics & Optoelectronic Technology, 2008, 6(3): 18-21.
- [43] 夏克文, 宋建平. 激光光纤核测井技术[J]. 石油仪器, 2001, 15(2): 8-10.
- Xia Kewen, Song Jianping. Nuclear logging technologies based on laser and optical fiber[J]. Petroleum Instruments, 2001, 15(2): 8-10.
- [44] Benounis M, Aka-Ngnui T N, Jaffrezic, et al. NIR and optical fiber sensor for gases detection produced by transformation oil degradation[J]. Sensors and Actuators A, 2008, 141: 76-83.
- [45] 张晓东, 李俊. 基于光谱吸收式光纤 H<sub>2</sub>S 气体传感器的研究[J]. 仪表技术与传感器, 2009(6): 14-15, 53.
- Zhang Xiaodong, Li Jun. Optical fiber hydrogen sulfide gas sensor based on ppectrum absorption[J]. Instrument Technique and Sensor, 2009(6): 14-15, 53.
- [46] Agarwala V S, Reed P L, Ahmad S. Corrosion detection and monitoring-a review[C]. NACE 00271, 2000.
- [47] 江毅, 严云, Christopher K Y L. 光纤光栅腐蚀传感器[J]. 光子学报, 2006, 35(1): 96-99.
- Jiang Yi, Yan Yun, Christopher K Y L. Optical fiber grating corrosion sensors[J]. Acta Photonica Sinica, 2006, 35(1): 96-99.
- [48] Sanders Paul E. Overview of fiber optic sensor markets & emerging applications of distributed sensing systems[ED]. www.bluerr.com/images/Overview\_of\_FOS2.pdf.

## 作者简介



庄须叶, 1981年生, 男, 汉族, 山东日照人, 助理研究员, 博士, 2009年毕业于中科院长春光学精密机械与物理研究所, 主要从事光纤传感器、MEMS 技术等方面的研究。E-mail: zxye8888@hotmail.com



黄涛, 1982年生, 男, 汉族, 重庆忠县人, 工程师, 2004年毕业于西南石油大学, 主要从事油田机械设备设计及管理, E-mail: zhanpotian@hotmail.com



邓勇刚, 1980年生, 男, 汉族, 四川眉山人, 工程师, 学士, 2004年毕业于西南石油大学, 主要从事钻井设备及井控装备检测及研究工作。E-mail: 86285296@qq.com



王浚璞, 1983年生, 男, 汉族, 四川南部人, 工程师, 硕士, 2008年毕业于西南石油大学, 主要从事结构安全方面的研究。E-mail: wangjiswpi@126.com



姚军, 1973年生, 男, 汉族, 贵州安顺人, 研究员, 博士, 2001年毕业于四川大学物理系获得博士学位, 主要从事激光技术、自适应光学、MEMS 及其应用等方面的研究。E-mail: junyao@ioe.ac.cn

## Developments on Optical Fiber Sensing Technologies Applied in Oilfield

Zhuang Xuye<sup>1</sup>, Huang Tao<sup>2</sup>, Deng Yonggang<sup>3</sup>, Wang Junpu<sup>3</sup>, Yao Jun<sup>1</sup>

1. State Key Lab of Optical Technologies on Nano-Fabrication and Micro-Engineering, IOE, CAS, Chengdu, Sichuan 610209, China

2. Oilfield Engineering Services Company, SPB, Mianyan, Sichuan 621000, China

3. Technique Inspection Academe, SPA, Guanghan, Sichuan 618300, China

**Abstract:** With respect to those traditional electromechanical sensors the optical fiber sensor system offers small volume, high sensitivity, immunity of corrosion and electromagnetic interference. It is feasible to build permanent distributed sensor systems based on optical fiber sensing technologies, which can monitor the analytes online and in time. Optical fiber sensing technologies are widely developed and used in oilfield today. The optical fiber technologies used to monitor the temperature, pressure, seism, flow field and stress in the oilfield are introduced in this paper. Research achievements of each technology home and abroad are illustrated. The merits of these technologies are described, and the development trends of them are also proposed.

**Key words:** optical fiber; sensor; optical fiber sensor; optical fiber sensing technology; oilfield exploration and exploitation

编辑: 张云云; 编辑部网址: <http://www.swpuxb.com>