

基于光纤 Bragg 光栅的油气工业实时监测技术研究进展

孙艳坤¹, 李琦¹, 李霞颖¹, 杨多兴²

1. 中国科学院武汉岩土力学研究所, 所岩土力学与工程国家重点实验室, 武汉 430071

2. 中国地震局地壳应力研究所, 北京 100085

摘要 光纤 Bragg 光栅 (FBG) 是近年发展起来的一种实时高精度监测技术, 具有耐高温高压、抗电磁干扰、易于复用与可组网等独特优点, 成为油气领域最具前景的监测手段。介绍了 FBG 传感技术的发展历程、工作原理, 重点分析了全球油气工程中管道完整性监测、油气测井、地震勘探方面的最新应用现状; 探讨了目前 FBG 传感器在油气田复杂环境条件下实时监测存在的问题, 并就未来发展趋势进行展望。

关键词 光纤 Bragg 光栅; FBG 传感器; 油气工业; 监测技术

中图分类号 TE934, TN253

文献标志码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2015.13.014

Progress on real-time monitoring technology in oil and gas industry based with fiber Bragg grating sensing

SUN Yankun¹, LI Qi¹, LI Xiaying¹, YANG Duoxing²

1. State Key Laboratory of Geomechanics and Geotechnical Engineering; Institute of Rock and Soil Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Wuhan 430071, China

2. Institute of Crustal Dynamics, China Earthquake Administration, Beijing 100085, China

Abstract FBG (fiber Bragg grating) has been used to develop a kind of high precision and real-time monitoring technology, which possesses some unique advantages of high temperature and high pressure endurance, resistance to electromagnetic interference, ease of reuse and networking, etc. Obviously, it is bound to become the most promising monitoring method in oil and gas field, including carbon geological utilization and storage, acid gas injection, and earthquake net-working. In this paper, a development history and working principle of FBG are presented firstly, and the latest application status of FBG sensors in pipeline integrity monitoring, logging, seismic exploration is analyzed. Then, some key issues on real-time monitoring under complex environment conditions are discussed, and finally, development and application trends are put forward.

Keywords fiber Bragg grating; FBG sensor; oil and gas industry; monitoring technology

随着世界油气资源逐渐匮乏及需求量的急剧增加, 油气田开采竞争日趋激烈, 为了最大限度地提高油气采收率, 必须准确、及时地获得油气田勘探与开发数据, 而这很大程度上依赖于油气领域的先进监测手段与监测仪器。传统的油

气监测技术本身具有诸多缺陷, 不能满足当前日益精细化的油气田开发方案。数据采集、传输和处理的实时性、精确性与经济性, 一直是油气工程师们亟待努力研究与实践的课题。

收稿日期: 2014-12-19; 修回日期: 2015-02-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目 (41274111)

作者简介: 孙艳坤, 博士研究生, 研究方向为岩石物理与渗流监测, 电子信箱: sunyank@163.com; 李琦 (通信作者), 研究员, 研究方向为酸气回注、CO₂ 地质利用与封存, 电子信箱: qli@whrsm.ac.cn

引用格式: 孙艳坤, 李琦, 李霞颖, 等. 基于光纤 Bragg 光栅的油气工业实时监测技术研究进展[J]. 科技导报, 2015, 33(13): 84-91.

FBG 传感器具有灵敏度和分辨率高、抗电磁干扰、耐高温、抗腐蚀、重量轻、尺寸小、便于复用且可组网^[1]、能在易燃易爆环境下可靠运行、能实现在线实时分布式监测等诸多优点,受到广泛关注,是近年来的研究热点。目前 FBG 传感器已被应用于土木工程、航空船舶、生物化学、核工业等诸多领域^[2-27],取得了一系列的研究成果。鉴于现代油气工业信息的特点和 FBG 传感技术的优势,把 FBG 传感器应用于油气田工程实时长期监测领域将提高油气田监测水平和监测效率,同时具有巨大的市场潜力,如图 1 所示(数据源自 <http://www.bccresearch.com>),基于此将逐渐受到油气田开发和管理者的重视和关注。

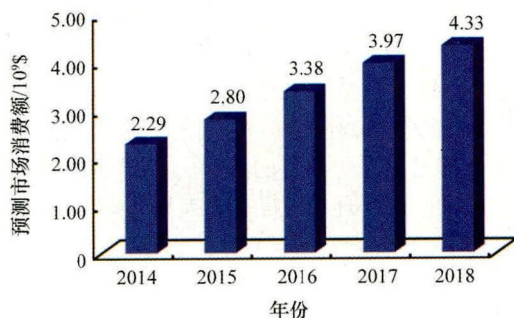


图 1 光纤传感器全球消费市场预测

Fig. 1 Forecast diagram of market fiber optic sensor global consumption market

至今 FBG 传感技术已取得较大进展,但仍存在一系列关键问题亟待突破与研究,例如 FBG 感测技术在油气工业上多局限于现场应用,而将其与油气藏物性室内实验、正反演数值模拟相结合,系统地研究油气工程监测尚处于空白。本文在已有研究基础上,通过大量的国内外调研,总结国内外油气工程领域 FBG 感测技术的应用现状和最新成果(最近 5 年),详细阐述 FBG 在油气工程监测领域最为主要的 3 个应用,进而预测未来的技术发展趋势,为 FBG 感测技术前沿研究提供参考,以推动光纤 Bragg 光栅传感监测技术在油气工业领域中的研究与发展。

1 光纤 Bragg 光栅传感技术发展历程

在所有光纤传感器中,目前应用最为广泛的是基于 FBG 的准分布式光纤传感器。光纤光栅为反射性光学器件,能够在同一根光纤中连续制作多个不同中心波长的光栅,与时分复用和波分复用技术相结合组成传感器阵列,适于埋入材料和结构内部或贴装在其表面,对温度、压力、应变和位移等参数实现实时测量。

光纤光栅的出现是光纤通信领域中掺铒光纤放大器(erbium-doped optical fiber amplifier, EDFA)之后的又一重大技术突破,光纤光栅的研究主要集中在光纤布拉格(Bragg)光栅,简称 FBG。该技术始于 1978 年,加拿大渥太华通信研究

中心的 Hill 等^[28,29]首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏性,并采用驻波写入法制成世界上第一只内写入的可实现反向模式间耦合的光纤 Bragg 光栅,即 Hill 光栅。但由于该写法效率低,实用性受到了限制。

1989 年,美国联合技术研究中心的 Meltz 等^[30]用 244 nm 波长的紫外激光干涉条纹侧面照射纤芯掺锗的光纤,将任意工作波长的位相光栅写进纤芯,成功制出第一只外写入的 FBG,使得光纤光栅的制作技术实现了突破性进展。

之后, Hill 等^[31]于 1993 年提出了相位掩膜成栅技术,该技术的最大优点是写入光栅的周期仅仅取决于相位掩模板周期而与照射激光的波长无关,使得采用低相干光源写入 FBG 成为可能。同年, Lemaire 等^[32]发现低温高压载氢敏化处理技术,打破了 FBG 制作过程中对光纤中锗含量的依赖,即在普通光纤上就可制作出高质量的 FBG,从而光纤光栅器件逐步走向实用化。

2004 年, Okabe 等^[33]利用啁啾光纤 Bragg 光栅进行复合材料中裂纹的探测;2006 年,陈建军等^[34]报道了一种高灵敏度光纤光栅流速传感器,该流速传感器至少可感测到 0.3 mm/s 的流速变化。

2007 年, Bernier 等采用飞秒激光脉冲制作了 FBG,进一步提高了光栅的折射率调制深度并增强了光栅的稳定性^[35]。

由于光纤光栅制作技术的日臻成熟,各种基于光纤光栅技术的不同性能、不同用途的有源和无源器件被不断开发出来。光纤光栅的出现至今仅 30 余年的时间,但针对光纤光栅的理论研究和应用设计却迅猛发展。随着研究的逐渐深入和工艺技术的逐步提高,FBG 传感技术必将在光纤通信、光纤传感以及光信息处理等各个领域获得更大的发展。

2 FBG 传感技术工作原理

光纤 Bragg 光栅传感器(FBG)是一种使用频率最高,应用范围最广的光纤传感器,能根据环境温度、应变的变化来改变反射光波的波长^[36,37]。光纤传感技术的核心是光纤(一条纤细的玻璃丝),光波能够在其中心进行传播。光纤主要由 3 个部分组成:纤芯(core),包层(cladding)和保护层(buffer coating),如图 2(a)~(c)所示。其中包层能够将纤芯发出的杂散光波反射回纤芯中,以保证光波在纤芯中具有最低的传输损耗。功能的实现原理是纤芯的光折射率比包层的折射率高,光波从纤芯传播到包层的时候会发生全内反射。最外面的保护层提供保护作用,避免外界环境或外力对光纤造成损坏。而且可以根据需要强度和保护程序的不同,使用多层保护层。

FBG 是利用掺杂光纤的光敏性,通过某种工艺方法(通常是向掺磁芯光纤照射 244 nm 的紫外光)使外界入射的光子和纤芯内的掺杂粒子相互作用,造成纤芯折射率沿纤轴方向产生周期性的永久变化,并产生 Bragg 光栅效应的光学器件,这就是紫外光刻录光栅的原理。

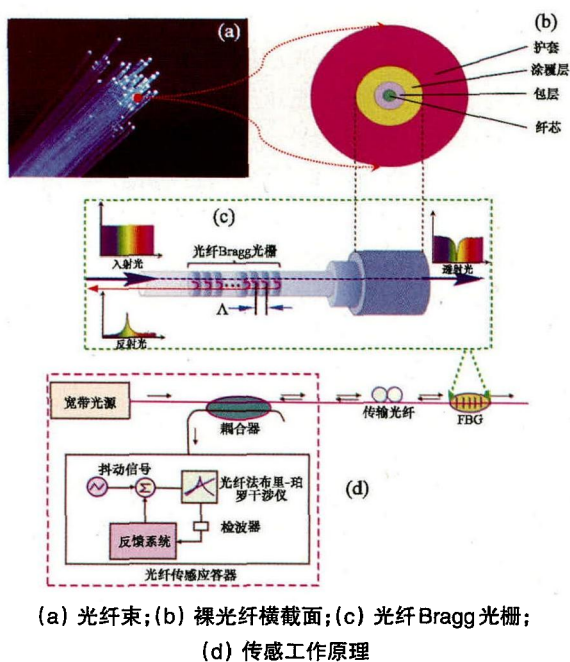


图2 FBG传感器结构组成与传感工作原理
Fig. 2 Sketch map of components and sensing principle of FBG

当某种宽带光源入射FBG时,除了满足Bragg条件的特定波长会在光栅处反射外,其余大部分光波发生透射而沿原来方向继续向前传导,在透射波频谱图上会有一部分以反射波长为中心的窄带频谱缺失,如图2(d)所示。反射波波长满足光学方程^[28]:

$$\lambda_B = 2n_{eff}A \quad (1)$$

式中, λ_B 为Bragg波长,通常为1510~1590 nm; n_{eff} 为光纤纤芯的有效折射率,取1.33~1.55; A 为相邻光栅之间的间距,称为光栅周期。当光纤光栅所处环境的温度、应力、应变或其他物理量发生变化时,由于光弹和热弹效应,光栅的周期或纤芯的有效折射率将发生变化,从而使反射波波长也随之呈

线性关系变化,通过测量波长变化就可获得环境参数的变化信息。即

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{eff}A + 2n_{eff}\Delta A \quad (2)$$

式中, ΔA 为应力作用下光纤栅距的改变量; Δn_{eff} 为纤芯的弹光效应引起的有效折射率的变化量。不同应力应变状态会使 ΔA 和 Δn_{eff} 发生改变。Kersey等^[29]对温度/应变变化下的单模光纤Bragg反射波长进行研究,得到了波长与温度、应变之间的关系表达式。

定义有效弹光系数 P_e 为

$$P_e = \frac{n_{eff}^2}{2} [P_{12} - \mu(P_{11} + P_{12})] \quad (3)$$

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon + (\alpha + \xi)\Delta T \quad (4)$$

其中,式(3)中 P_{11} 、 P_{12} 为弹光系数。式(4)中 $\Delta\lambda_B$ 是反射波长的变化量,而 λ_B 为初始的反射波长, $(1 - P_e)\Delta\varepsilon$ 是应变变化对反射波长的影响, $\Delta\varepsilon$ 是外界引起的光栅应变变化量, $(\alpha + \xi)\Delta T$ 是温度变化对波长的影响, α 为热膨胀系数, ξ 为温度热光系数。 α 体现了温度变化对纤芯折射率的影响,而 ξ 体现了同等温度变化对光栅周期的影响。在仅有应变变化影响时

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = (1 - P_e)\Delta\varepsilon = S_e\Delta\varepsilon \quad (5)$$

式中, S_e 为FBG相对波长偏移灵敏度系数。由式(5)可知,FBG的波长偏移量与应变变化量成线性关系,对温度影响分析同上。

FBG传感器独有的优点是利用多分复用技术,可实现多参数、高空间分辨率的实时准分布式测量(如波长为1550 nm裸FBG传感器的应变和温度精度分别为1.2 $\mu\text{m}/\mu\text{e}$, 10.3 $\mu\text{m}/^\circ\text{C}$,其中 μe 为微应变的单位)。典型FBG传感器的测量参数如表1,可以看出FBG传感器的采样速度快、测量范围大、测量精度高,而这很好地满足了油气工业监测环境的恶劣复杂性的需要,FBG传感器与常规传感器特征对比见表2。

表1 常用FBG传感器测量参数

Table 1 Measuring parameters of common FBG sensors

波长范围/nm	波长重复率/nm	扫描频率/Hz	测量范围		测量精度	
			应变/ μe	温度/ $^\circ\text{C}$	应变/ μe	温度/ $^\circ\text{C}$
1510~1590	0.001	1000	-3000~3000	-30~150	0.8	0.1

表2 FBG传感器与常规传感器特征对比

Table 2 Characteristic comparison of FBG sensor with conventional sensor

内容	常规传感器	FBG
类型	单点	准分布式
防潮要求	是	否
数据传输距离	≤ 100 m	≤ 10 km
长期稳定性	差	好
性价比	差	好

由FBG感测原理可知,温度和应变会同时影响传感器的反射波长,因此在测试的时候,必须针对温度对FBG造成的影响进行补偿^[40]。通常做法是同时使用一个与FBG应变传感器(测量传感器)和有良好的热接触的FBG温度传感器(参考传感器)来完成。得到测试结果以后,可利用式(3)得到温度补偿后的应变变化

$$\varepsilon = \frac{\Delta\lambda_B - \Delta\lambda_B^T}{(1 - P_e)\lambda_B} \quad (6)$$

其中, $\Delta\lambda_B$ 和 $\Delta\lambda_B^T$ 分别是测量传感器和参考传感器的波长变

化值。因此,通过对光栅反射波长漂移量的测定,可以间接获得被测结构的应变、温度、应力、位移、流量、压力、电流、电压以及生物信息等物理量的大小,进而实现对被测对象的实时高精度多参数的监测^[41]。

3 光纤 Bragg 光栅在油气工业监测的应用现状

随着科学技术的快速发展和油气工业的迫切需要,涌现了大量的现场监测手段和方法^[42]。而FBG由于具有适合油气工程动态、实时、在线、分布式监测等优点,日益成为最新油气领域主要的监测手段,也越来越得到油气工业界人士的重视和认可。图3给出了全球光纤传感技术的三大主要应用领域,其中在2014年油气工业的三大应用领域约占55%,而且预测该比例会逐年增大(2018年可达到65%)。通过大量调研发现,虽然国外油气田工业已经大量安装FBG传感监测系统,但中国在这方面还处于探索阶段,基本理论和试验(现场或实验室)知识积累很少。因此对FBG传感技术在管道健康监测、生产测井和地震勘探这3个油气领域进行综述性研究与分析更有意义。

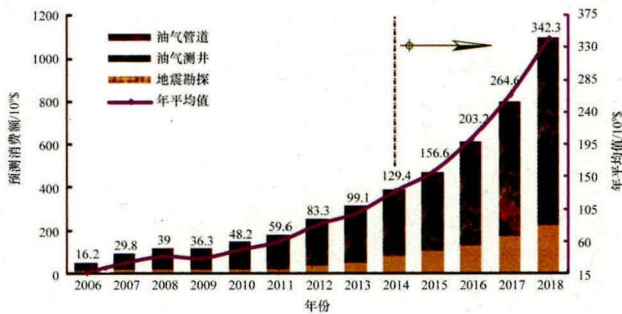


图3 全球光纤监测技术的应用领域趋势

Fig. 3 Prediction trend of fiber-optic sensing applications

3.1 管道完整性监测

2014年11月24日,中国国家安全总局指出,中国陆上油气输送管道总里程约 12×10^4 km,相当于绕地球3圈,现有1.7万多处管道隐患,千公里泄漏事故率年均4次,一些重大隐患时刻威胁着管道的运输安全;而一旦泄漏发生会造成极为严重的财产、人员伤亡、巨大的经济损失与环境污染等后果。所以,对管道完整性进行实时全方位动态在线监测成为国内外油气领域的重大挑战和科研热点。

管道泄漏可能由不同的原因引起,如腐蚀、疲劳、材料缺陷、振动、温度异常、高压或地面运动引起的过度变形等。而传统监测手段与方法存在很多缺陷:1) 泄漏量足够大时,才能监测到泄漏,但明显的环境破坏已经发生了;2) 即使探测到泄漏,却无法确定泄漏点,导致仪器损坏而造成工作延时和更高的成本;3) 嗅探器和热成像摄像机具有更高的维护成本,并需要安装大量的设备,却只能监测小范围的泄漏;4) 一些泄漏监测系统是间歇性使用的。当泄漏发生在监测空

时,将监测不到,而造成严重的安全隐患。

针对这些问题,FBG监测系统由于具有许多独特的优点,非常适合对油气管道各种参数信息的高精度监测,如温度、压力、应力、流量、流速等。技术人员根据监测信息变化实时判断油气管道是否发生泄漏,泄漏地点信息并及时提供预警,从而实现对油气管道在线和无损检测,最优化油气输送方案,减少泄漏损失。Zhou等^[43]将FBG和应变仪同时用于监测动态加载下的海底管道模型实验,得出FBG传感技术更适用于动态应变测量;Zhou等^[44]把布里渊光时域干涉仪(Brillouin optical time domain reflectometer)与FBG相结合内嵌于井下套管中,用于动态实时监测套管破损状况,取得很好的效果;Lee等^[45,46]提出一种宏观纤维材料与FBG复合的管道监测系统,对存在的管壁变薄和纵向裂缝等缺陷识别能力强,通过室内实验已证实其可行性;Ren等^[47]设计了间接监测管道腐蚀的方法——环向应变FBG传感器,该设备针对管道环向变形和损伤极为灵敏,其性能满足实际应用;Shivananju等^[48]利用蚀刻的FBG对空气与石油或外部流体进行实验监测对比发现,Bragg波长漂移量很明显,很适合油气管道泄漏的液位监测。

3.2 油气测井

油气生产的实时监测是一项高度自动化的管理过程,永久性井下传感监测网络是一种有效的油气藏动态监测方法,也是当前石油行业发展最快的油气资源监测技术之一。而油气井属于高损耗、强腐蚀、易燃易爆的领域,测量环境极其恶劣,鉴于以上问题,在油气井下高温、高压、腐蚀、尺寸有限的这种特殊环境下,光纤传感技术无疑获得了最具前景的应用平台^[42]。

Zhong等^[49]利用FBG传感器测量井下温压,研制出一套井下永久实时监测系统,是油气技术人员进行及时可靠决策的依据;Zhou等^[50]基于FBG技术设计出一种井下监测的准分布式温度传感器系统,并用高斯拟合算法对FBG反射波谱进行解调,最后建议用3层金属护套方案用于油井监测;Liu等^[51]利用FBG传感器的多分复用功能,将油液压转换为光纤应变,从而大幅度提高了传感器对井下压力的敏感性;Fusiek等^[52]针对陆地和海上油井常用的井下电潜泵(downhole electrical submersible pumps)研发了三相光学电压传感器,通过利用PZT(piezoelectric transducer)将电压转为应变,再用FBG传感器测量应变,大大改善了测量精度和分辨率;Pan等^[53,54]设计了一套用于模拟油气井下高温高压环境的装置,先将一个FBG传感器耦合到该装置中,然后逐渐增大温压再恢复至原态,最终可获得输入值与测量值令人满意的匹配度。该系统能实时全天候测量不同深度地层的温压,且不受天气情况影响,对偏远地区和海上采油更具有实际应用意义,有效地降低人为误差和劳力,更便于大数据的统计分析;Ficocelli等^[55]引入基于高密度的FBG阵列技术的高温热监测系统,成功地用于蒸汽辅助重力泄油(steam assisted gravity drainage, SAGD)监测,该系统可提供绝对精度、分辨率的实测

数据,便于SAGD井筒热成像模拟。

目前世界各大石油公司、测井服务公司、光纤光栅传感器的研发机构都在致力于光纤光栅传感技术在油气井下的应用研究。2002年Bakersfield公司开发出了在生产测井领域应用很广的光纤Bragg光栅多相流量计,并在墨西哥湾油田首次安装。2014年3月Smart Fibres公司生产的Smart Scope调制解调仪成功通过合格测试,显示出了其独特的高性能,在-15~+55℃温度下具有极好的监测稳定性,且具有0.2 pm的测量分辨率,适合油气井下温压高精度监测。

3.3 地震勘探

地震勘探是石油勘探的主要方法,基本原理是在地表附近用炸药等震源激发产生地震波,通过探测仪器记录不同岩层反射或折射回来的地震波再进行分析。地震检波器作为地震波记录仪器,是应用于石油地震勘探领域的传感器。

地震检波器是一种能将震动信号转换为电信号的传感装置,是地震勘探记录系统重要组成部分,也是近年来石油勘探领域向前发展的一项瓶颈技术^[56]。它的灵敏度、动态范围、频率特性等都直接影响着地震反射波记录、地震数据采集的质量等^[57,58]。

同样地,由于FBG传感器的诸多优点很好地弥补了地震勘探中的很多缺陷,如信号电缆等器材体积大、过于沉重,易受外界环境(如电磁、噪声等)干扰等,因此FBG型地震检波器是近年来地震勘探领域研究的热点^[59]。

2008年,Nakstad^[60]报道了挪威Optoplan公司基于F-P干涉的光纤Bragg光栅传感原理,将在海底建成至少2000个传感测试基站用以油气资源的开发,并在2009年初完成海底电缆(ocean bottom seismic cables)安装;Weng等^[61]研制出一种筒缩式FBG震动传感器,由1个平面膜片和2个L型刚性悬臂梁构成,具有较宽响应频带、极高敏感度,成为油气勘探中现场地震波测量的首选者;Liu等^[62]设计了基于双膜片的FBG加速计,实验结果表明该仪器可提供50~800 Hz宽平频率范围,横向灵敏度小于2.1%,满足井间地震勘探的使用要求;Zhang等^[63,64]对FBG型地震检波器的实验设计进行研究,重新改进已有检波器探头,包括基于碳纤维复合材料的悬臂设计、辅助梁机械设计、动圈式电磁阻尼设计等,提高了油气田地地震勘探采集数据的敏感性和精度;Tao等^[65]也设计了一种新式的基于FBG感测技术的地震检波器,在10~200 Hz内具有94 dB的高动态范围,并对其重要参数(如响应函数)进行了理论计算,该检波器已在地震勘探中得到广泛的应用;De Freitas等^[66]总结了基于光纤传感网络的海底地震油藏监测技术最新发展,并重点论述光纤水听器、速度计用于地震勘探的现状研究。

研发用于油藏工程深部微震实时监测的新式FBG型地震检波器也成为了近几年研究焦点^[67,68],如基于L型刚性悬臂梁的FBG型隔膜加速计^[69]、由平面弹簧片、质量块和FBG构成传感头的地震检波器^[70]、双膜片式FBG型地震检波器^[71]、铰

链连接式FBG微地震检波器^[72]、基于窄带分布反馈激光源的FBG微地震检波器^[73]等,通过利用室内实验、有限元仿真、现场应用等对检波器的传感特性进行了验证,都较好地满足油气藏地震勘探的工程需要,对驱动和激励FBG传感监测技术在地震勘测领域更广泛的应用具有指导性意义。

4 存在问题与发展趋势

光纤Bragg光栅具有无法比拟的优点,适于油气田复杂环境条件下的实时监测,成为了国内外研究的热点和学科前沿课题,是一门方兴未艾的研究领域,但不可避免会存在一些难题尚需进一步攻克^[74~78]。

1) FBG传感信号的波长解调技术是制约着光纤传感技术发展的关键因素。目前油气技术人员使用的解调仪均无法直接获得所感知的物理量,更无法将波长变化直接转化为电信号,供其他设备如控制设备的使用,并且设备生产成本低、造价昂贵、工程实用性低。

2) 光纤Bragg光栅的敏化技术、封装工艺以及多参数交叉敏感性研究有一定难度。由于光纤光栅本身的机械强度有限、力敏和温敏灵敏度较低以及交叉敏感效应的存在,难以将其直接应用于油藏工程监测,要求针对特定油藏条件研制特定的新式FBG传感器。

3) 光纤光栅有效信号的提取方法研究。油气工程所处环境复杂多变,极易导致光栅啁啾现象,引起光栅光谱展宽及变形,严重影响了波长解调测量结果的精确性和可靠性,甚至引起测量结果失效,因此亟待研究光纤光栅多参数重构理论及啁啾谱图理论分析方法,以便提高室内信号解译精度。

4) 如何将FBG传感器与油气工程实验室尺度(岩芯尺度)的精细监测相耦合的研究。迄今为止,国内外基于FBG感测的油气工业监测研究大部分集中在FBG仪器研制、封装与现场应用方面,而将其应用于储/盖层岩样的室内精细化相关的监测研究基本上是一片空白,这可能是今后油气工程实验研究的一个重要方向。

为了解决以上问题,未来基于FBG的油气工程实时监测技术的发展趋势主要有4个方面^[79~83]:

1) 对光纤光栅反射信号解调技术研究,目标是开发低成本、小型化、可靠、高分辨率及高灵敏度的探测技术,比如微纳米FBG传感器、超声波FBG传感器。

2) 光纤光栅传感器实用技术的研究,包括封装技术、温度补偿技术和传感网络技术。多参数、实时、在线、动态、分布式传感网络系统是未来油气工程监测发展的必要趋势。

3) 多种光纤光栅有效信号提取方法研究,比如波形的源解析(反演)、有限元仿真模拟、物理模型试验、现场实测等进行相互对比,最终形成一套高精度的FBG-油气工程监测数据解译系统。

4) 油气工程监测领域更广、更精细化,且多学科交叉渗

透研究,例如利用井下地震矢量FBG传感器用于高精度的二氧化碳捕集、利用与封存(carbon capture, utilization and storage, CCUS)项目^[84-89]的场地特征描述与监测。

5 结论

虽然中国基于FBG感测的油气工业实时监测技术起步较晚,但随着光纤Bragg光栅传感技术的日益发展和应用的不扩大,该技术必将成为油气监测领域的首选方法之一。

参考文献(References)

- [1] Laffont G, Cotillard R, Ferdinand P. Multiplexed regenerated fiber Bragg gratings for high-temperature measurement[J]. *Measurement Science and Technology*, 2013, 24(9): 1-5.
- [2] Ye X W, Su Y H, Han J P. Structural health monitoring of civil infrastructure using optical fiber sensing technology: A comprehensive review[J]. *Scientific World Journal*, 2014, 2014(8): 1-11.
- [3] Rodriguez G, Sandberg R L, Jackson S I, et al. Fiber Bragg sensing of high explosive detonation experiments at Los Alamos national laboratory [J]. *Journal of Physics: Conference Series*, 2014, 500(6): 1-6.
- [4] Pal B P. Optical fiber sensors: A versatile technology platform for sensing [J]. *Journal of the Indian Institute of Science*, 2014, 94(3): 283-309.
- [5] Kinet D, Megret P, Goossen K W, et al. Fiber Bragg grating sensors toward structural health monitoring in composite materials: Challenges and solutions[J]. *Sensors*, 2014, 14(4): 7394-7419.
- [6] Kazunori T S. Fiber-optic-based life-cycle monitoring of through-thickness strain in thick CFRP pipes[J]. *Advanced Composite Materials*, 2014, 23(3): 195-209.
- [7] 王静, 李术才, 施斌, 等. 三向FBG应变传感器及在隧道开挖模型试验中的应用研究[J]. *工程地质学报*, 2013, 21(2): 182-189.
Wang Jing, Li Shucai, Shi Bin, et al. Trifarious FBG sensor strain transfer characteristics and its application to tunnel excavation model test[J]. *Journal of Engineering Geology*, 2013, 21(2): 182-189.
- [8] Hua F, Pei J T, Jian H Y, et al. A review of studies on the application of fiber optic sensors in geotechnical health monitoring[J]. *Measurement*, 2013, 58(14): 207-214.
- [9] Lin B, Giurgiutiu V. Exploration of ultrasonic guided wave detection with optical fiber sensors and piezoelectric transducers[C]. 9th International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, September 10-12, 2013.
- [10] Lai M, Karalekas D, Botsis J. On the effects of the lateral strains on the fiber Bragg grating response[J]. *Sensors*, 2013, 13(2): 2631-2644.
- [11] Hu J, Zhu Q P, Zhao M L, et al. Fiber Bragg grating sensor for the research of water level measurement[J]. *Advanced Materials Research*, 2013, 823(10): 349-353.
- [12] Castro C A, Torres P, Lain R. Packaging and testing of fiber Bragg gratings for use as strain sensor in rock specimens[C]. 8th Iberoamerican Optics Meeting and 11th Latin American Meeting on Optics, Lasers, and Applications, Porto, Portugal, July 22, 2013.
- [13] Pereira G, Frias C, Faria H, et al. Study of strain-transfer of FBG sensors embedded in unidirectional composites[J]. *Polymer Testing*, 2013, 32(6): 1006-1010.
- [14] 张丹, 徐洪钟, 施斌, 等. 基于FBG技术的饱和膨胀土失水致裂过程试验研究[J]. *工程地质学报*, 2012, 20(1): 103-108.
Zhang Dan, Xu Hongzhong, Shi Bin, et al. FBG technology based experimental studies on cracking of expansive soil due to dehydration [J]. *Journal of Engineering Geology*, 2012, 20(1): 103-108.
- [15] Reinsch T, Blöcher G, Milsch H, et al. A fibre optic sensor for the in situ determination of rock physical properties[J]. *International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences*, 2012, 55: 55-62.
- [16] Mihailov S J. Fiber Bragg grating sensors for harsh environments[J]. *Sensors*, 2012, 12(2): 1898-1918.
- [17] Kou J L, Ding M, Feng J, et al. Microfiber-based Bragg gratings for sensing applications: A review[J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8861-8876.
- [18] Cheng L K, Vliegenhart W, Habisreuther T. Optical fiber grating based technologies and their applications: From nuclear fusion to medical[C]. 2012 Photonics Global Conference (PGC), Singapore, December 13-16, 2012.
- [19] Bao X Y, Chen L. Recent progress in distributed fiber optic sensors [J]. *Sensors*, 2012, 12(7): 8601-8639.
- [20] Pereira G, Frias C, Faria H, et al. On the improvement of strain measurements with FBG sensors embedded in unidirectional composites[J]. *Polymer Testing*, 2012, 32(1): 99-105.
- [21] Willsch R, Ecke W, Bartelt H. Optical fiber sensor research and industry in Germany—review and outlook[C]. 21st International Conference on Optical Fiber Sensors, Ottawa, Canada, May 15-19, 2011.
- [22] Lee J T, Tien K C, Ho Y T, et al. A fiber optic sensed triaxial testing device[J]. *Geotechnical Testing Journal*, 2011, 34(2): 103-111.
- [23] 朱鸿鹤, 施斌, 严珺凡, 等. 基于分布式光纤应变感测的边坡模型试验研究[J]. *岩石力学与工程学报*, 2013, 32(4): 821-828.
Zhu Honghu, Shi Bin, Yan Junfan, et al. Physical model testing of slope stability based on distributed fiber-optic strain sensing technology [J]. *Journal of Rock Mechanics and Geotechnical Engineering*, 2013, 32(4): 821-828.
- [24] Baldwin C S. Brief history of fiber optic sensing in the oil field industry [C]. *Fiber Optic Sensors and Applications XI*, Maryland, USA, June 18, 2014.
- [25] Dong X, Zhang H, Liu B, et al. Tilted fiber Bragg gratings: Principle and sensing applications[J]. *Photonic Sensors*, 2011, 1(1): 6-30.
- [26] Davis C, Tejedor S, Grabovac I, et al. High-strain fiberBragg gratings for structural fatigue testing of military aircraft[J]. *Photonic Sensors*, 2012, 2(3): 215-224.
- [27] Wei S M, Chai J. Strain transfer analysis of rock deformation based on FBG sensing[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2010, 25(4): 445-450.
- [28] Hill K O, Fujii Y, Johnson D C, et al. Photosensitivity in optical fiber waveguides application to reflection filter fabrication[J]. *Applied Physics Letters*, 1978, 32(10): 647-649.
- [29] Kawasaki B S, Hill K O, Johnson D C, et al. Narrow-band Bragg reflectors in optical fibers[J]. *Optics Letters*, 1978, 3(2): 66-68.
- [30] Meltz G, Morey W W, Glenn W H. Formation of Bragg gratings in optical fibers by a transverse holographic method[J]. *Optics Letters*, 1989, 14(15): 823-825.
- [31] Hill K O, Malo B, Bilodeau F, et al. Bragg gratings fabricated in monomode photosensitive optical fiber by UV exposure through a phase mask[J]. *Applied Physics Letters*, 1993, 62(10): 1035-1037.
- [32] Lemaire P J, Atkins R M, Mizrahi V, et al. High pressure H₂ loading as a technique for achieving ultrahigh UV photosensitivity and thermal sensitivity in GeO₂ doped optical fibres[J]. *Electronics Letters*, 1993, 29 (13): 1191-1193.
- [33] Okabe Y, Tsuji R, Takeda N. Application of chirped fiber Bragg

- grating sensors for identification of crack locations in composites[J]. Composites Part a—Applied Science and Manufacturing, 2004, 35(1): 59–65.
- [34] 陈建军, 张伟刚, 涂勤昌, 等. 基于光纤光栅的高灵敏度流速传感器[J]. 光学学报, 2006, 26(8): 1136–1139.
Chen Jianjun, Zhang Weigang, Tu Qinchang, et al. High-sensitivity flow velocity sensor based on fiber grating[J]. Acta Optica Sinica, 2006, 26(8): 1136–1139.
- [35] Bernier M, Faucher D, Vallee R, et al. Bragg gratings photoinduced in ZBLAN fibers by femtosecond pulses at 800 nm[J]. Optics Letters, 2007, 32(5): 454–456.
- [36] Lee B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. Optical Fiber Technology, 2003, 9(2): 57–79.
- [37] Kenneth O. H, Gerald M. Fiber Bragg grating technology fundamentals and overview[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1263–1276.
- [38] Morey W W, Meltz G, Glenn W H. Fiber optic Bragg grating sensors [C]//Fiber Optic and Laser Sensors VII. Boston, USA: SPIE, 1990: 98–107.
- [39] Kersey A, Davis M A, Patrick H J, et al. Fiber grating sensors[J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1442–1463.
- [40] Guo Z S. Strain and temperature monitoring of asymmetric composite laminate using FBG hybrid sensors[J]. Structural Health Monitoring an International Journal, 2007, 6(3): 191–197.
- [41] 庞丹丹. 新型光纤光栅传感技术研究[D]. 济南: 山东大学, 2014.
Pang Dandan. Investigation on the novel fiber Bragg grating sensing technology[D]. Jinan: Shandong University, 2014.
- [42] Skinner N G, Maida J L. Downhole fiber optic sensing: The oilfield service provider's perspective[C]. Fiber Optic Sensor Technology and Applications III, Philadelphia, USA, June 18, 2004.
- [43] Zhou J, Sun L, Li H. Study on dynamic response measurement of the submarine pipeline by full-term FBG sensors[J]. The Scientific World Journal, 2014, 2014(4): 1–9.
- [44] Zhou Z, He J P, Huang M H, et al. Casing pipe damage detection with optical fiber sensors: A case study in oil well constructions[J]. Advances in Civil Engineering, 2010, 2010(12): 1–9.
- [45] Lee H, Sohn H, Park H W. Pipeline monitoring using an integrated MFC/FBG system[C]. Sensors and Smart Structures Technologies for Civil, Mechanical, and Aerospace Systems. California, USA, March 24, 2011.
- [46] Lee H, Sohn H. Damage detection for pipeline structures using optic-based active sensing[J]. Smart Structures and Systems, 2012, 9(5): 461–472.
- [47] Ren L, Jia Z G, Li H N, et al. Design and experimental study on FBG hoop-strain sensor in pipeline monitoring[J]. Optical Fiber Technology, 2014, 20(1): 15–23.
- [48] Shivananju B N, Kiran M, Nithin S P, et al. Real time monitoring of petroleum leakage detection using etched fiber Bragg grating[C]. International Conference on Optics in Precision Engineering and Nanotechnology, Singapore, June 22, 2013.
- [49] Zhong Z Y, Zhi X L, Yi W J. Oil well real-time monitoring with downhole permanent FBG sensor network[C]//2007 IEEE International Conference on Control and Automation. New York, IEEE: 2007: 2591–2594.
- [50] Zhou X L, Li L Z, Yu Q X. Fiber Bragg grating-based quasi-distributed temperature sensor for down-hole monitoring[J]. Sensor Letters, 2012, 10(7): 1486–1490.
- [51] Liu L N, Long P, Liu T G. Research of pressure sensor based on the fiber Bragg grating for permanent downwell monitoring application[C]. International Conference on Applications of Photonics Technology, Ottawa, Canada, November 16, 2004.
- [52] Fusiek G, Niewczas P, Judd M D. Towards the development of a downhole optical voltage sensor for monitoring electrical submersible pumps[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2012, 184(9):173–181.
- [53] Pan Y, Chen Z, Xiao L, et al. Application of fiber Bragg grating sensor networks in oil wells[C]. Nigeria Annual International Conference, Calabar, Nigeria, July 31–August 7, 2010.
- [54] Pan Y, Xiao L Z, Zhao Y Z. Design of a remote real-time monitoring system for oil and gas wells based on fiber Bragg grating[C]. Canadian International Petroleum Conference, Alberta, Canada, June 16–18, 2009.
- [55] Ficocelli P, Gonzalez L E, Vincelette A, et al. Towards enhanced steam management of SAGD wells using reliable and permanent real-time FBG-based thermal monitoring[C]. SPE Russian Oil and Gas Exploration & Production Technical Conference, Moscow, Russia, October 14–16, 2014.
- [56] 周雪芳, 梁磊. 光纤光栅地震检波器结构设计及性能仿真研究[J]. 地震工程与工程振动, 2005, 25(3): 177–180.
Zhou Xuefang, Liang Lei. The structure design and emulation of characteristics of fiber Bragg grating geophone[J]. Earthquake Engineering and Engineering Dynamic, 2005, 25(3): 177–180.
- [57] 陈梓艺. 光纤光栅于地震检波器方向的应用[J]. 科技创新导报, 2014, 10(29): P68.
Chen Ziyi. The application of fiber Bragg in geophone[J]. Science and Technology Innovation Herald, 2014, 10(29): P68.
- [58] Wang J Y, Qi H F, Song G D, et al. A high sensitive fiber Bragg grating (FBG) geophone detecting system[C]. 3rd Asia Pacific Optical Sensors Conference, Sydney, Australia, January 31–February 2, 2012.
- [59] Shao M, Qiao X G, Fu H W, et al. Applications of fiber optical sensing in seismic exploration[J]. Progress in Geophysics, 2011, 26(1): 342–348.
- [60] Nakstad H, Kringlebotn J T. Realisation of a full-scale fibre optic ocean bottom seismic system[C]. 19th International Conference on Optical Fibre Sensors, Perth, Australia, April 14, 2008.
- [61] Weng Y Y, Qiao X G, Guo T, et al. A robust and compact fiber Bragg grating vibration sensor for seismic measurement[J]. Sensors Journal, IEEE, 2012, 12(4): 800–804.
- [62] Liu Q P, Qiao X G, Jia Z A, et al. Large frequency range and high sensitivity fiber Bragg grating accelerometer based on double diaphragms[J]. Sensors Journal, IEEE, 2014, 14(5): 1499–1504.
- [63] Zhang Y, Yin Z F, Chen B Q, et al. A novel fiber Bragg grating based seismic geophone for oil/gas prospecting[C]. Smart Structures and Materials 2005 Conference, San Diego, CA, May 17, 2005.
- [64] Zhang Y, Li S G, Yin Z F, et al. Fiber Bragg-grating-based seismic geophone for oil/gas prospecting[J]. Optical Engineering, 2006, 45(8): 1–4.
- [65] Tao G, Zhang X L, Liu X R, et al. A new type of fiber Bragg grating based seismic geophone[J]. Applied Geophysics, 2009, 6(1): 84–92.
- [66] De F J. Recent developments in seismic seabed oil reservoir monitoring applications using fibre-optic sensing networks[J]. Measurement Science & Technology, 2011, 22(5): 52001–52030.
- [67] 张大椿, 刘晓. 微地震监测技术及其在油田中的应用[J]. 新疆石油科

- 技, 2013, 23(3): 12-15.
- Zhang Dachun, Liu Xiao. Microseismic monitoring technology and its applications in oilfield[J]. Xinjiang Petroleum Science & Technology, 2013, 23(3): 12-15.
- [68] 刘百红, 秦绪英, 郑四连, 等. 微地震监测技术及其在油田中的应用现状[J]. 勘探地球物理进展, 2005, 28(5): 325-329.
- Liu Baihong, Qin Xuying, Zheng Silian, et al. Microseismic monitoring and its applications in oilfield operations[J]. Progress in Exploration Geophysics, 2005, 28(5): 325-329.
- [69] Weng Y Y, Qiao X G, Feng Z Y, et al. Compact FBG diaphragm accelerometer based on L-shaped rigid cantilever beam[J]. Chinese Optics Letters, 2011, 9(10): 1-4.
- [70] 邵敏, 乔学光, 冯德全, 等. 基于光纤Bragg光栅的地震检波器的理论与实验研究[J]. 光电子·激光, 2012, 23(3): 418-424.
- Shao Min, Qiao Xuegang, Feng Dequan, et al. Theoretical and experimental study on seismic sensor based on fiber Bragg grating[J]. Journal of Optoelectronic·Laser, 2012, 23(3): 418-424.
- [71] 李学成, 刘肃, 张文涛, 等. 双膜片结构光纤光栅地震检波器低频特性的研究[J]. 光电子·激光, 2010, 21(4): 529-532.
- Li Xuecheng, Liu Su, Zhang Wentao, et al. Study on low-frequency characteristic of double-diaphragm fiber Bragg grating geophone[J]. Journal of Optoelectronic·Laser, 2010, 21(4): 529-532.
- [72] 张发祥, 张晓磊, 王路杰, 等. 高灵敏度大带宽光纤光栅微地震检波器研究[J]. 光电子·激光, 2014, 25(6): 1086-1091.
- Zhang Faxiang, Zhang Xiaolei, Wang Lujie, et al. Study on FBG micro-seismic geophone with high sensitivity and broad bandwidth[J]. Journal of Optoelectronic·Laser, 2014, 25(6): 1086-1091.
- [73] Wang J Y, Liu T Y, Wang C, et al. A micro-seismic fiber Bragg grating (FBG) sensor system based on a distributed feedback laser[J]. Measurement Science & Technology, 2010, 21(9): 765-771.
- [74] 胡志新, 张陵, 乔学光, 等. 分布式光纤布拉格光栅在油气管道检测中的应用[J]. 管道技术与设备, 2000, 21(4): 35-38.
- Hu Zhixin, Zhang Ling, Qiao Xueguang, et al. Applications of distributed fiber Bragg grating sensors in inspection of oil & gas pipeline[J]. Pipeline Technique and Equipment, 2000, 21(4): 35-38.
- [75] 王静. 光纤光栅多参数传感理论技术研究及在地下工程灾害监测中的应用[D]. 济南: 山东大学, 2011.
- Wang Jing. Study on optical fiber Bragg grating multi-parameter sensing theory and technology and its application in monitoring underground engineering disasters[D]. Jinan: Shandong University, 2011.
- [76] Mescia L, Prudeniano F. Advances on optical fiber sensors[J]. Fibers, 2013, 2(1): 1-23.
- [77] Lin W T, Zhang C X, Li L J, et al. Review on development and applications of fiber-optic sensors[C]. 2012 Symposium on Photonics and Optoelectronics, Shanghai, China, May 21-23, 2012.
- [78] 陈海峰, 肖立志, 张元中, 等. 光纤Bragg光栅在油气工业中的若干应用及进展[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 572-577.
- Chen Haifeng, Xiao Lizhi, Zhang Yuanzhong, et al. Applications and advance of fiber Bragg grating in oil and gas industry[J]. Progress in Geophysics, 2006, 21(2): 572-577.
- [79] Sanada H, Sugita Y, Kashiwai Y. Development of a multi-interval displacement sensor using fiber Bragg grating technology[J]. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences, 2012, 54(2012): 27-36.
- [80] Negri L, Nied A, Kalinowski H, et al. Benchmark for peak detection algorithms in fiber Bragg grating interrogation and a new neural network for its performance improvement[J]. Sensors, 2011, 11(4): 3466-3482.
- [81] Wild G, Hinckley S. Acousto-ultrasonic optical fiber sensors: Overview and state-of-the-art[J]. Sensors Journal, IEEE, 2008, 8(7): 1184-1193.
- [82] Abdi A M, Suzuki S, Schulzgen A, et al. Modeling, design, fabrication, and testing of a fiber Bragg grating strain sensor array[J]. Applied Optics, 2007, 46(14): 2563-2574.
- [83] Zhang A P, Gao S, Yan G, et al. Advances in optical fiber Bragg grating sensor technologies[J]. Photonic Sensors, 2012, 2(1): 1-13.
- [84] 李琦, 陈征澳, 张九天, 等. 中国CCUS技术路线图未来版的(更新)启示——基于对世界CCS路线图透视分析[J]. 低碳世界, 2014(13): 7-8.
- Li Qi, Chen Zheng'ao, Zhang Jiutian, et al. Inspiration to a future update of CCUS technology roadmap in China: Based a synthetic analysis on global CCS roadmaps[J]. Low Carbon World, 2014(13): 7-8.
- [85] 李琦, 刘桂臻, 张建, 等. 二氧化碳地质封存环境监测现状及建议[J]. 地球科学进展, 2013, 28(6): 718-727.
- Li Qi, Liu Guizhen, Zhang Jian, et al. Status and suggestion of environmental monitoring for CO₂ geological storage[J]. Advances in Earth Science, 2013, 28(6): 718-727.
- [86] 李琦, 魏亚妮. 二氧化碳地质封存联合深部咸水开采技术进展[J]. 科技导报, 2013, 31(27): 65-70.
- Li Qi, Wei Yani. Progress in combination of CO₂ geological storage and deep saline water recovery [J]. Science & Technology Review, 2013, 31(27): 65-70.
- [87] Li Q, Wei Y N, Liu G Z, et al. Combination of CO₂ geological storage with deep saline water recovery in western China: Insights from numerical analyses[J]. Applied Energy, 2014, 116: 101-110.
- [88] Li Q, Liu G Z, Liu X, et al. Application of a health, safety, and environmental screening and ranking framework to the Shenhua CCS project[J]. International Journal of Greenhouse Gas Control, 2013, 17: 504-514.
- [89] Wu Z S, Zhang H. A standard test method for evaluating the crack monitoring performance of distributed fiber optic sensors[C]. 3rd International Conference on Structure Health Monitoring & Intelligent Infrastructure, Manitoba, Canada, November 13-16, 2007.

(编辑 陈华坡)

《科技导报》“综述文章”栏目征稿

“综述文章”栏目发表对当前自然科学有关学科领域的研究热点、前沿分支发展现状及动向的评述性文章。要求在所属学科领域从事比较深入研究的一线科研人员在研读相当数量文献资料的基础上,全面、深入、系统地论述该领域的问题,并对所综述的内容进行归纳、分析、评价,以反映作者的观点和见解。在线投稿:www.kjdb.org。