

光纤光栅传感技术在工程中的应用

徐国权^{1,2}, 熊代余^{2*}

(1. 东北大学 资源与土木工程学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 北京矿冶研究总院, 北京 100070)

摘要:综述了光纤光栅传感器近年来在工程结构健康监测、石油产业、电力行业、岩土工程、航空航天、采矿、爆破、交通及医学等各个领域的应用情况。文章认为,限制光纤光栅传感器产业化和大规模应用的主要因素是缺乏统一的设计理论和制作方法,这使得不同厂家生产的传感器规格存在差异。另外,由于复杂的生产技术和精细的生产过程使传感器生产成本较高,而且能实际应用的光纤光栅传感器的解调产品并不多,且价格很高。根据上述分析,文中对该项技术未来的发展方向提出了展望。

关键词:光纤光栅;光纤传感器;工程应用

中图分类号:TN253; TP212.9 **文献标识码:**A **doi:**10.3788/CO.20130603.0306

Applications of fiber Bragg grating sensing technology in engineering

XU Guo-quan^{1,2}, XIONG Dai-yu^{2*}

(1. *College of Resources and Civil Engineering, Northeast University, Shenyang 110819, China;*

2. *Beijing General Research Institute of Mining & Metallurgy, Beijing 100070, China)*

* *Corresponding author, E-mail: dyxiong38@yahoo.com.cn*

Abstract: This article introduces a systematic review of recent progress in applications of Fiber Bragg Grating (FBG) sensors to Structural Health Monitoring (SHM), oil industry, electrical power industry, geotechnical engineering, aerospace, mine, blasting, traffic, medicine, etc. It points out that the lacks of unified theories and standard technologies lead to different product specifications for the Bragg grating sensors from different manufacturers, which limits the industrialization and large scale application of the sensing technology. Furthermore, because of their complex and fine manufacturing technologies, the Bragg grating sensors have a higher production cost. Most importantly, the demodulation products are far from enough although many demodulation methods have already been published. On the analysis above, the paper presents its future work.

Key words: fiber Bragg grating; optical fiber sensor; engineering application

收稿日期:2013-02-15;修订日期:2013-04-13

基金项目:国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(No. 2007AA06Z131);国家自然科学基金资助项目(No. 51104018);北京矿冶研究总院科研基金资助项目(No. 02-811)

1 引言

自20世纪70年代以来,光纤传感技术在世界范围内引起了广泛的关注,并得到了快速的发展,其中以光纤光栅传感技术的发展最为迅速。光纤光栅可以分为短周期光纤光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPG)两种。1978年加拿大渥太华通信研究中心K. O. Hill等人^[1]首次在掺锗石英光纤中发现光纤的光敏效应,并采用驻波写入法制成了世界上第一块光纤光栅;1996年AT&T贝尔实验室的A. M. Vengsarkar等人^[2-3]用紫外光通过振幅掩模板照射氢载硅锗研制了长周期光纤光栅;1989年联合技术研究中心的Morey^[4]首次报道将光纤光栅用于传感领域,从而使光纤光栅从单纯光通信领域拓展到光纤传感领域。与传统的机械、电子传感器相比,光纤光栅传感器具有以下优点:(1)尺寸小、质量轻;(2)传输损耗低、带宽高;(3)免疫电磁干扰;(4)耐腐蚀;(5)使用寿命长;(6)可以进行分布式测量。光纤光栅传感器除了具有光纤传感器的全部特性以外,还有着其独特的优势:(1)能绝对测量,信号不受光源波动的影响;(2)能直接写入光纤,而不用改变光纤的直径;(3)可以使用多路复用技术。布喇格光纤光栅(FBG)和长周期光纤光栅(LPG)在制作方法和制作理论上虽然有很多类似,但在传感性能方面却各具特色和优势。与FBG相比,LPG出现较晚且多处于研究理论和实验研究阶段,实用化程度不高。

随着人们逐渐认识到光纤光栅传感技术有着极大的潜力,越来越多的高等院校和科研机构投入到光纤光栅传感技术的研究和应用^[5-7]中。1997年在美国召开的第12届光纤传感器会议(The 12th Optical Fiber Sensors Conference, OFS-12)^[9]上发表与光纤光栅有关的论文接近25%,到2002年在美国波特兰举行的OFS-15上该类论文已经达到44.2%^[8]。光纤光栅传感技术已经成为光纤传感领域最热门的主题,国际上光纤光栅传感技术的研究重点就是大力推进光纤光栅传感器的实用化。

经过20年的发展,一部分光纤光栅传感技术

成果已从实验室推出,步入商用阶段,如温度传感器、位移传感器、应变传感器、应力传感器、加速度传感器等^[10-11],这些传感器已成功用于大型结构工程、电力工程、岩土工程、交通工程、采矿工程、爆破工程、石油化工、航空航天、生物医学、船舶、石油勘探以及军事武器装备等领域^[12-15]。随着应用成果的日益增多,光纤光栅已成为目前最具发展前途、最具代表性的光纤无源器件之一。本文主要介绍近年来光纤光栅传感技术在国内外工程中的应用情况。

2 结构工程中的应用

大型工程结构服役期间的结构健康监测(Structural Health Monitoring, SHM)对评估结构安全性和完整性有着重大的意义。通常意义上结构安全检测主要是依靠制定维修计划、人工检查和使用一些传统的传感器来进行监测,这使得SHM的成本大大提高。而光纤光栅传感器的多功能特性相比其它传感器有着无可比拟的优势,并可以对结构进行长期的无损监测、诊断和控制。光纤光栅传感器既可以粘贴在结构表面进行监测,也可以从基建期间就嵌入结构内部对建设期间的结构完整性进行监测,并根据监测信息对结构进行预警,对防止恶性和灾难事故的发生具有重要意义。因此,在过去十几年中光纤光栅传感技术已经广泛应用于高层建筑物、桥梁、隧道和大坝等结构检测。

目前,在桥梁的安全监测领域中光纤光栅传感器的应用最为广泛。图1为桥梁结构健康监测示意图。2001年5月至10月,欧进萍等人^[16]分别将15个光纤光栅传感器埋入正在施工的黑龙江呼兰河大桥预应力箱形梁上,用来监测施工阶段箱形梁的受力与安全情况以及大桥服役阶段监测通车流量和桥梁的疲劳损伤状态,在传感器的埋设和保护方面积累了宝贵的经验,为光纤光栅传感器的进一步应用打下坚实的基础。

香港青马大桥长1377m,是世界上最长的悬索桥,大桥采用双层设计,分别用于公路和铁路交通。该桥建成于1998年,其使用的健康监测系统是Wind and Structural Health Monitoring System

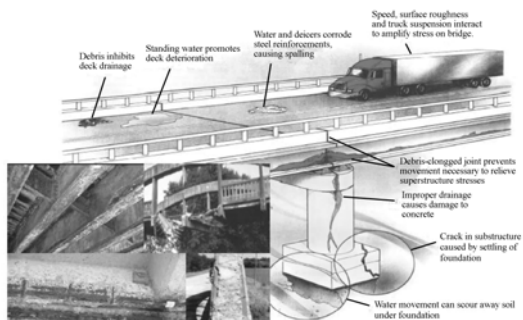


图1 桥梁结构健康监测

Fig. 1 Health monitoring of bridge structure

(WASHMS)。香港理工大学 T. H. T. Chan^[17] 将 40 个光纤光栅传感器分成 3 个传感器阵列安装于吊桥缆线、摇轴支座和桁梁,监测高峰期铁路和公路荷载作用下的应变,其监测结果与原有 WASHMS 的监测结果有很好的相似性。英国 T. Venugopalan^[18] 基于长周期光纤光栅设计了一种湿度传感器,并计划把这种传感器埋入到混凝土材料中用来测量水分渗入情况。与 FBG 湿度传感器相比,LPG 湿度传感器具有更高的测量灵敏度、更加自由的涂层厚度和均一性。

北京地铁 10 号线一期工程项目是北京奥运建设项目之一,在三环和四环之间形成一条贯通城市东西、南北的公共交通骨干线。地铁 10 号线国贸站位于国贸桥下,地处北京 CBD 核心地带,是地铁 1 号线与 10 号线的换乘站,在北京地铁系统中具有重要的地位。为了保障结构的安全,王元丰等人^[19] 在地铁国贸站建立了结构健康监测系统,共埋入了 64 个光纤光栅传感器,对结构的应变、温度、裂纹和徐变等参数进行了监测。

3 电力工程中的应用

电力工业中的设备大都处于强电磁场环境,一般传感器无法使用。由于测点经常位于高压条件下,这就要求传感器需要具有很好的电绝缘性能,并能免疫电磁干扰,而光纤光栅传感器是在这种环境下工作的理想器件。图 2 为光纤光栅温度传感器监测高压输电线路示意图。

印度中央玻璃陶瓷研究所 (CGCRI)^[20] 利用光纤光栅传感技术开发了一套完整的温度监测系

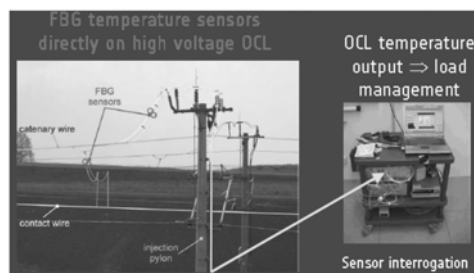


图2 光纤光栅温度传感器监测高压输电线路

Fig. 2 Monitoring of high voltage transmission lines by fiber Bragg grating temperature sensor

统,并对 Powergrid 公司 Subhaashgram 变电站的 400 kV 输电线路进行了现场实验。该系统能很好地监测电线的耐热性和抗机械荷载性能,并可以根据监测结果及时调整输电线路传输的电量,为提高输电线路的可靠性和使用寿命提供保障。

山东省科学院激光研究所^[21-22] 研制的基于光纤光栅传感器的温度在线监测系统和监测仪已在许昌、张家口、延安等供电公司和发电厂推广和应用。这些系统特别适用于对电力设备的接头和易发生故障部位进行温度实时监测,可测温度为在 $-20 \sim +130$ °C,精度为 ± 0.5 °C,分辨率为 0.1 °C,能极大地保障电力系统的安全运营。

4 岩土工程中的应用

随着世界经济的发展,岩土工程的规模越来越大,其安全问题亦引起人们的密切关注。岩土工程的安全监测、风险评估、及时正确的预测预报,已经成为岩土工程领域的重要研究课题。岩土工程的施工环境比较复杂,服役的年限比较长,许多工程距离城市较远,对监测工作带来了极大的困难。而采用光纤光栅传感技术则可以实现对工程项目的远距离实时在线监测。图 3 为基于光纤光栅的钻孔变形监测系统示意图。

台湾交通大学 Ho Yen-Te 等人^[23] 开发了一种光纤光栅地面移动监测系统。该系统共安装了 60 个光纤光栅传感器,对台湾 Yuin-Lin 的一个工业生产基地的位移分布进行了监测。香港理工大学裴富华等人^[24] 采用自行设计的光纤光栅原位测斜仪,对攀田高速公路路堑边坡进行了监测,根

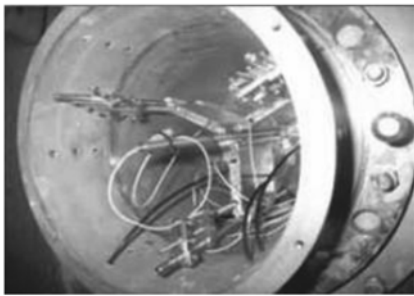


图3 基于光纤光栅的钻孔变形监测系统

Fig. 3 Drilling deformation monitoring system based on fiber Bragg grating

据监测结果建立了最优化数学模型从而获取了潜在滑裂面的具体位置,并根据经典 Bishop 条分法计算得到了该潜在滑裂面对应的边坡安全系数,以评估该边坡的稳定性。朱鸿鹄等人^[25]采用光纤光栅传感技术开发了混凝土应力计、温度计、水平测斜仪、沉降仪等岩土监测仪器,并对位于香港九龙塘的中国神学院施工期间的安全进行了健康监测,在筏式基础内沿东西向安装了两排光纤光栅混凝土应变计,每排串联 6 组应变计(共 24 个光纤光栅应变计),用来检测混凝土在荷载作用下的拉应力和应变。在筏式基础下埋设了 2 组光纤光栅水平测斜仪,每组由 4 m 长的 3 个光纤光栅水平测斜仪串联而成。测斜仪上共布置了 36 个光纤光栅传感器,以监测地基沉降分布。

在西气东输工程中,许多管道不可避免地要穿过地质灾害严重的地区。由于选线不充分、管道建设会诱发滑坡或地震诱发滑坡,使管道的安全运营受到严重的威胁。陈朋超等人^[26]基于光纤光栅传感技术,建立了一套可同时监测管体应变、管土界面压力、滑坡体表面位移以及深部位移的埋地管道滑坡远程监测预警系统。在四川某特大滑坡区建立了监测预警示范站,并成功监测到汶川地震对滑坡及管道的影响。

林传年^[27]对位于湖北境内白氏坪至恩施高速公路上的龙潭隧道支护锚杆进行了监测。他将 4 片光纤光栅应变片等间距分布在锚杆上,用来监测锚杆轴力随测点埋深和开挖过程的变化情况。姜德生^[28]在世界最高的面板堆石坝工程水布垭水力枢纽工程中,对支护锚杆的状态进行了监测。

在岩土工程监测中,传统的传感器有着很大的缺陷,而光纤光栅传感器却有着明显的优越性,可以相信光纤光栅传感器可以完全取代传统的传感器对岩土工程进行测量和监测。

5 交通工程中的应用

过去几十年中,铁路运输已经成为最有效的运输手段。我国铁路每年完成的旅客周转量在全社会旅客周转量的 1/3 以上,完成货物周转量占全社会货物周转量的 55%,并且随着科技的进步,列车的速度也越来越快,如何确保列车运行过程中的安全,成为重要的课题。采用光纤光栅传感系统对列车和轨道进行监测,能及时发现安全隐患,从而保障列车的安全。图 4 为智能光纤光栅传感器网络在铁路上的应用示意图。

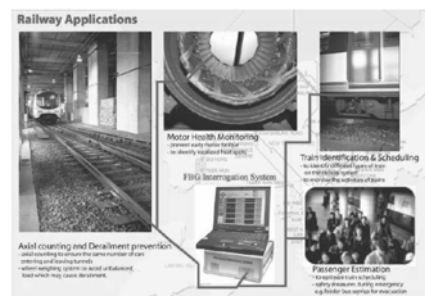


图4 智能光纤光栅传感器网络在铁路上的应用

Fig. 4 Application of intelligent fiber Bragg grating sensor network in the railway

西班牙阿尔卡拉大学 M. L. Filograno^[29]在马德里—巴塞罗那高速铁路距离马德里 70 km 处的一段轨道上安装了 20 个光纤光栅传感器,用来监测列车的运行速度和加速度,识别经过列车的类型并作为轮轴计数器,对时速为 200 ~ 300 km/h 列车的动态荷载和车轮进行了监测。该系统可实时在线监测列车的运行情况,并对出现的问题进行及时的预警。该监测系统经过一年的运行,光纤光栅传感器没有损耗,表明该系统可以长期对列车及轨道安全进行监测。在磁悬浮列车结构监测方面,电磁干扰是一个重要的问题。Donghoon Kang and Wonseok Chung^[30]设计了基于光纤光栅传感器波分复用技术的磁悬浮轨道综合监测系统,对韩国磁悬浮列车轨道的应变、弯曲和垂直挠

度进行了现场监测。

郑州到西安的客运专线主要修建在湿陷性黄土地区,针对在这种地区修建高铁的沉降控制和监测,郝晋豫、朱少捷^[31]建立了光纤光栅沉降监测系统,实现了对郑西客运专线的路基的长期远程监测。陈凤晨^[32]将光纤光栅传感器埋入高速公路的沥青路面中,通过改变车辆的加载重量和运行速度,监测相应的应变变化趋势和规律,为路面的维护提供了新的途径。

汽车在有水膜覆盖的路面上行驶时,轮胎与路面之间将产生一个动态、瞬时的动水压力,为了研究动水压力对路面和行车造成的危害,高俊启^[33]设计了光纤光栅压力传感器来测量动水压力,传感器的压力灵敏度是裸光栅的2 000倍,能非常精确地测量出压力的大小。Hongyue Liu^[34]设计了小型长周期光纤光栅压力传感器来监测沥青路面,监测结果显示传感器的响应具有良好的规律性。

6 采矿工程中的应用

近年来,我国关于矿山安全事故的报道越来越多,矿山安全成为备受瞩目的焦点。因此,人们更加重视矿山测试技术,并在采矿工程中开展了地应力测量、岩层位移监测、爆破振动监测、微震监测等多种监测手段,为矿山的安全生产提供了必要的支持。但由于传统测试技术的局限性,采矿工程测试中也存在一些难题:复杂的环境因素,如潮湿、腐蚀性环境、易燃易爆巷道,电铲的电磁干扰、露天矿山的雷击等,给采矿工程现场的长期稳定监测带来一定的困难。而光纤光栅传感器则不受这方面的影响,因此在采矿工程领域有着广泛的应用前景。

在 The European BRITE/EURAM STABILIOS^[35]项目中,为了建立准确、稳定的采矿作业控制系统,研究人员设计了一种基于宽带掺铒光纤光源和可调 F-P 滤波器的光纤光栅传感系统,用于监测井下巷道。德国 GFZ Potsdam 公司开发了一种测量围岩变形的纤维光栅传感器 FBX-测量锚杆^[36],这种新型传感器是在一根玻璃纤维增强聚合物岩石测量锚杆杆体中埋入光纤光栅,然

后将测量锚杆埋设在围岩体中,用于监测隧道硐室或者深埋地基等工程中的岩体变形和结构变化。

爱尔兰 Monitor Optics Systems (MOS) 公司^[37]为了监测采矿引起的路面沉降,在澳大利亚一条公路的沥青混凝土路面内埋入若干传感电缆。2008 年安装了由 120 个光纤光栅组成的 18 条传感电缆,2009 年安装了由 460 个光纤光栅组成的 70 条传感电缆,2010 年安装了由 240 个光纤光栅组成的 88 条传感电缆,监测总长度约为 2 500 m。在过去 3 年中该系统成功地对路面沉降进行了连续的监测,并且这种传感电缆已经用于路堤的稳定性监测。图 5 为安装光纤光栅应变传感光缆示意图。



图 5 安装光纤光栅应变传感光缆

Fig. 5 Strain sensing cable installation of fiber Bragg grating

苏小杰^[38]采用光纤光栅传感器对某金矿巷道进行了静态试验研究。他将光纤光栅粘贴在锚杆上,并根据锚杆的变形来反映岩石发生的应变。实验在 36 min 内采集了 3 个传感器的监测数据,其中包含了爆破过程中 20 s 内的数据,并根据监测数据分析岩石裂缝的产生。为研究突水前兆信息演化规律,冯现大^[39]建立了一个含有大型隐伏水体的三维物理模型,为准确捕捉相应的位移、应变和渗压等信息,模型中共埋设了 10 个光纤光栅温度传感器、10 个光纤应变传感器、7 个光纤渗压传感器和 4 个光纤位移传感器,成功监测到了突水过程中各个参数的变化情况。为了准确预测深厚松散层深部层位因失水而产生的压缩变形,柴敬^[40]对济三矿风井处第四系松散地层 104 ~

180 m段埋设了18个光纤光栅传感器,用来监测松散层各层位的应变压缩量。

煤矿经常由于瓦斯爆炸及煤炭自燃发生火灾事故,魏世明^[41]采用特殊合金材料封装制作了光纤光栅火灾探测器,并与光纤光栅解调仪、数据传输和控制总线、数据控制中心等组成煤矿用光纤光栅火灾探测系统。通过监测井下温度变化率来预警是否发生火灾,并且该系统可以进行实时在线监测,这大大缩短了火灾报警时间。温度变化能够直接反映煤的自热程度,于之江^[42]采用光纤光栅温度传感器监测煤温随时间的变化规律,对采空区的自然发火进行预测。西南石油大学 Tang Dong-Lin 等人^[43]研制了基于马赫-曾德微型光纤干涉仪加速度计的集成光学芯片,并计划将其用于地震波探测。

7 爆破工程中的应用

工程爆破在经济建设中用途广泛,尤其是在矿山开采中,爆破是破碎岩石的主要手段。在公路、铁路、水力工程及城市建筑物拆除中,也经常使用爆破方法。爆破作业时炸药爆炸释放出巨大的能量,并以地震波的形式向四周传播,对附近建筑物造成损伤。

柏林南部的一家采石场在爆破作业时,产生爆破振动效应引起了附近居民的注意,他们认为爆破作业对他们所居住的建筑造成了损伤。为了证明爆破作业对附近的建筑物的影响,C. derbenstedt^[44]将光纤光栅传感器粘贴在距离爆区800 m的一个幼儿园天花板上的裂缝处,用来监测爆破作用下的裂缝变化情况。经过长达8个月的监测,发现爆破作用对裂缝的影响很小,基本可以忽略不计。

2000年,荷兰应用科学研究组织(TNO) Prins Maurits Laboratoy^[45]采用光纤光栅传感器对爆炸和冲击波进行了测量。2007年TNO^[46-47]又使用光纤光栅传感器对爆轰压力进行了动态测量。

2006年美国能源部 Lawrence Livermore 国家实验室^[48]报道了嵌入式光纤探针直接测量高能炸药 PBX-9502 和 LX-17 的爆破速度。在此基础

上2007年又与 Columbia Gorge Research^[49]合作采用直径为125 μm 光纤光栅传感器作为新型的探测器,对硝基甲烷和 PBX-9502 的爆轰速度进行了连续记录。2009年加拿大 Communication 研究中心^[50]也加入到该研究中,并取得了很大的进展。

8 石油化工中的应用

由于石油开采的特殊性,对井下的温度、压力动态监测是十分必要的。井下安装的传感器需要长时间对井下情况进行实时监测,为油气田开发提供实时的地层信息,而传统的传感器无法适应井下的高温环境。光纤光栅传感器具有耐腐蚀、使用寿命长等特点,非常适合在石油化工行业的应用。图6为光纤光栅传感器对输油管道监测示意图。

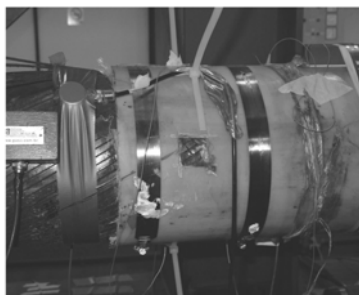


图6 光纤光栅传感器对输油管道进行监测

Fig. 6 Oil pipeline monitoring by fiber Bragg grating sensors

陆宁^[51]采用光纤光栅传感技术、F-P腔传感技术、光纤分布测温技术对辽河油田的某井下进行了3点温度、压力的现场监测。袁伟^[52]设计了一种新型光纤光栅油井温度压力传感器,并将该传感器应用于胜利油田,实现了井下温度压力同时监测。

随着能源需求的增大,从海洋中提取油气资源的力度也不断增强。在油气开采和运输过程中,柔性管道得到了广泛的应用。巴西石油研究中心^[53]采用光纤光栅应变传感器对柔性管道进行了监测。Allsop 等人^[54]采用长周期光纤光栅监测炼油过程中的芳香族化合物。

9 航空航天中的应用

航空航天是传感器应用的热门领域,现代航空航天正朝着高性能、长寿命、舒适性以及降低成本的方向发展。复合材料由于具有比强度高、比刚度高、耐腐蚀、重量轻以及可设计性强等优良性能,在国内外航空工业中得到广泛的应用,而光纤光栅传感器可以嵌入到被测构件机体和材料中形成智能结构,在构件或材料工作的同时对其安全运行、故障等进行实时监控,极大地降低了航空航天产业的维护成本。图7为光纤光栅传感技术在飞机上的应用示意图。

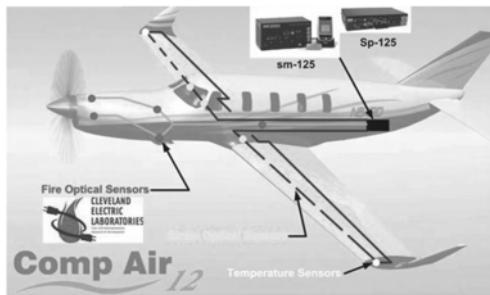


图7 光纤光栅传感技术在飞机上的应用

Fig.7 Application of fiber Bragg grating sensing technology in the plane

Nobuo Takeda 和 Hitachi Cable, Ltd^[55] 联合研制了一种小直径光纤光栅传感器。这种传感器可以嵌入到厚度为 125 μm 的碳纤维复合材料 (CFRP) 中,用来检测航空复合材料结构的微观损伤。为实现可变体机翼翼表温度的高精度实时检测,李全等人^[56]设计了一种基于长周期光纤光栅的温度测试系统。系统采用长周期光纤光栅作为温度传感元件,高双折射光纤环镜作为边缘滤波器件。测试结果显示:温度灵敏度为 0.053 $\text{nm}/^\circ\text{C}$,温度分辨率达到 0.05 $^\circ\text{C}$ 。

钱德勒监测有限公司^[57]设计和开发了一种基于光纤光栅传感技术的在线结构监测和火警探测系统。他们将 17 个光纤光栅传感器粘贴在康普艾-12 小型飞机的机翼、机身、机舱等关键部位,用来监测应变、温度、高温的变化情况。

最近的研究成果显示:在航空航天复合材料结构领域,基于光纤光栅传感技术的结构健康监

测是可行的。研究人员提出了 ACS-SIDE^[58] (Structural Integrity Diagnosis and Evaluation of Advanced Composite Structures) 计划,该计划将会推动光纤光栅传感技术在航空航天领域的进一步应用。

10 生物医学中的应用

由于光纤光栅传感器具有尺寸小、生物相容性好、无毒、化学惰性和电磁免疫等特性,并且本质安全,可以植入患者体内对一些重要参数进行连续监测,故对生物医学的发展有着重要的意义。

新加坡的一个研究团队^[59]提出了基于光纤光栅传感技术的监测系统,将标定好的传感器安装于病床的褥子下面,并与病人身体需要监测的关键部位相匹配,通过连续监测病人在睡觉和坐着情况下的应力分布情况来预防褥疮。根据监测结构提出警报,护理人员可及时帮助病人移动受压部位以避免病人身体产生褥疮。

Fresvig^[60]等人的实验验证了使用光纤光栅传感器代替电阻应变片监测外荷载条件下人类尸体大腿骨样本的变形情况。实验中,采用 4 个光纤光栅传感器和 4 个电阻应变片同时监测机械试验机对试件施加变动荷载下的变形情况,结果显示:测量值具有良好的线性度和可变性,并且光纤光栅传感器和电阻应变片的监测数据互相吻合。V. Mishra^[61]课题组采用光纤光栅传感技术对山羊胫骨脱钙作用下的应变响应效果进行了研究。从同一只山羊中取两个胫骨试样,光纤光栅传感器直接粘贴在胫骨表面的中点位置。对一个试样脱钙,同时将另一个试样放入盐水溶液中,同步监测脱钙的试样和未经过处理的试样钙损失和退化随时间的变化规律。

在欧洲生物力学学会第 16 届代表大会 (The 16th Congress of the European Society of Biomechanics) 上,捷克科技大学 Miloslav Vilimek^[62]报道了使用光纤光栅传感器监测在 MTS 伺服机拉伸作用下猪肌腱生物力学性能。2006 年,欧盟成立了一个来自德国、法国、丹麦、比利时、瑞典的 11 个专家团队共同合作研究的项目 Optical Fiber Sensors Embedded into technical Textile for Health-

care (OFSETH)^[63],该项目预计耗资 350 万欧元。主要研究将光纤光栅传感器植入到医疗纺织品当中,实现对人体心脏、呼吸频率和脉搏血氧等重要参数的测定。图 8 为光纤光栅传感器应用在 OFSETH 项目中对病人监护示意图。T. M. Libish 等人^[64]采用长周期光纤光栅传感器来检测椰子油中的石蜡油是否参假。Akash Deep^[65]使用长周期光纤光栅检测葡萄糖氧化酶的特性和固定化灵敏度。Saurabh Mani Tripathi^[66]报道了超敏感长周期光纤光栅检测大肠杆菌(*E. coli*)噬菌体。

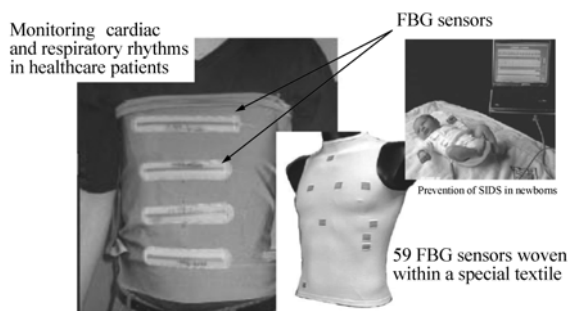


图 8 光纤光栅传感器应用在 OFSETH 项目中对病人监护

Fig. 8 Fiber Bragg grating sensor used in OFSETH project for patient monitoring

11 结束语

本文对光纤光栅传感技术近年的一些应用情况做了简单的回顾。虽然光纤光栅传感器每年全球市场规模约为 $1.5 \times 10^7 \sim 3.5 \times 10^7$ 美元,并以每年 15% ~ 25% 的速度增长,但是大体上光纤光栅传感技术的应用仍处于早期的发展阶段,主要以科学研究和大型工程项目为主。由于整个行业没有统一的设计理论和制作标准,使得各个公司的光纤光栅传感器在设计和规格上存在较大的差异,从而导致光纤光栅传感器性能不同。此外复杂的生产技术和精细的生产过程使得光纤光栅传感器只能小规模生产,无法进行大规模标准化生

产,大大提高了光纤光栅传感器的成本。目前,光纤光栅的解调方法有许多种,但是能够实际应用的解调产品很少,而且价格都在几万美元左右。这些因素都制约了光纤光栅传感技术的产业化和大规模应用。

我国对光纤光栅传感技术的研究相对较晚,研究和应用方面与国外仍存在较大差距。但是随着国家的重视,各大高校和科研院所都加大了对光纤光栅传感技术的研究工作,取得了很大的进展。但是这些研究大多处于实验室研究阶段,只有一少部分达到了商用的要求。这就使得我国光纤光栅传感设备大多都依赖进口,由于这些设备的价格昂贵,光纤光栅传感技术在我国的应用受到了很大的限制。相信随着国产技术的进步,价格问题将不会成为光纤光栅传感技术在国内应用的障碍。

可以预见,随着光纤光栅传感技术研究的深入,将会使其在应用方面有新的突破。未来光纤光栅传感器技术的发展方向可能在以下几个方面:(1)开发新的应用领域;(2)建立光纤光栅传感技术的标准;(3)能同时测量两个或两个以上参数传感器的研究;(4)传感信号解调的研究,开发低成本、便携式光纤光栅解调系统;(5)对采集的数据进行处理分析软件的开发;(6)根据实际应用的需要,对传感器的埋设工艺、封装技术、温度补偿技术、传感器网络技术的研究;(7)针对各个应用领域的需求不同,开发合适监测系统;(8)应用过程中的配套服务,如传感器的安装、网络的布置、数据的采集、软件的开发、人员的培训等。

随着科技的不断进步,可以相信光纤光栅传感技术在世界范围内有着极为广阔的应用前景。特别是伴随我国经济的快速发展,一批重大项目陆续启动,光纤光栅传感技术为这些项目的长期稳定、实时在线的安全监测提供了有效的途径。这将极大地推动我光纤光栅传感器的产业化和大规模推广应用。

参考文献:

- [1] HILL K O, FUJII Y, *et al.*. Photosensitivity in optical fiber waveguides: application to reflection filter fabrication[J]. *Appl. Phys. Lett.*, 1978, 32: 647-649.
- [2] VENGSARKAR A M, LEMAIRE P J, JUDKINS J B, *et al.*. Long-period fiber grating as band-rejection filters[J]. *J.*

- Lightwave Technol.*, 1996, 14(1): 58-65.
- [3] BHATIA V, VENSAKAR A M. Optical fiber long-period grating sensors[J]. *Opt. Lett.*, 1996, 21: 692-694.
- [4] MOREY W W, MELTZ G, GLENN W H. Fibre optic Bragg grating sensors[J]. *SPIE*, 1989, 1169: 98-107.
- [5] RAO Y J. In-fibre Bragg grating sensors[J]. *Measurement Sci. Technol.*, 1997, 8(4): 355-375.
- [6] 姜德生, 何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. *光电子·激光*, 2002, 12(4): 420-430.
- JIANG D SH, HE W. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. *J. Optoelectronics · Laser*, 2002, 12(4): 420-430. (in Chinese)
- [7] RAO Y J. Recent progress in applications of in-fibre Bragg grating sensors[J]. *Opt. Lasers Eng.*, 1999, 31(4): 297-324. (in Chinese)
- [8] 廖延彪. 光纤传感发展近况[J]. *光电子技术与信息*, 2000, 13(3): 27-29.
- LIAO Y B. Development of optical fiber sensors[J]. *Optoelectronic Technology & Information*, 2000, 13(3): 27-29. (in Chinese)
- [9] LEE B. Review of the present status of optical fiber sensors[J]. *Optical Fiber Technology*, 2004, 2(9): 57-79.
- [10] 王宏亮, 宋娟, 冯德全, 等. 应用于特殊环境的光纤光栅温度压力传感器[J]. *光学精密工程*, 2011, 19(3): 545-551.
- WANG H L, SONG J, FENG D Q, *et al.*. High temperature-pressure FBG sensor applied to special environments[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(3): 545-551. (in Chinese)
- [11] 翟玉锋, 张龙, 朱灵, 等. 光纤光栅称重传感器研究[J]. *发光学报*, 2007, 28(3): 412-416.
- ZHAI Y F, ZHANG L, ZHU L, *et al.*. Novel weigh sensors based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese J. Lumin.*, 2007, 28(3): 412-416. (in Chinese)
- [12] 曹新, 徐刚, 戴玉堂, 等. 基于光纤传感器的压缩机状态监测[J]. *光学与光电技术*, 2013, 11(1): 29-32.
- CAO J, XU G, DAI Y T, *et al.*. Compressor status detection based on optical fiber sensors[J]. *Opt. Optoelectronic Technology*, 2013, 11(1): 29-32. (in Chinese)
- [13] 赵印明, 刘春红, 陈爽. 金属基底光纤光栅应变传感器的传感特性研究[J]. *光学与光电技术*, 2011, 9(1): 24-26.
- ZHAO Y M, LIU CH H, CHEN SH. Strain sensing property of fiber Bragg grating sensor packaged by metal materials [J]. *Opt. Optoelectronic Technology*, 2011, 9(1): 24-26. (in Chinese)
- [14] 王为, 林玉池, 赵美蓉, 等. 运用统计小波的光纤光栅结构健康监测技术[J]. *光学精密工程*, 2010, 18(4): 836-841.
- WANG W, LIN Y CH, ZHAO M R, *et al.*. Structural health monitoring technology with fiber Bragg grating using statistical wavelet-based method[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2010, 18(4): 836-841. (in Chinese)
- [15] CHENG CH H, CHANG M CH, LIU W F. Electrical power sensor based on fiber Bragg grating and piezo-electric transducer[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2011, 19(9): 2255-2262.
- [16] 欧进萍, 周智, 武湛君, 等. 黑龙江呼兰河大桥的光纤光栅智能监测技术[J]. *土木工程学报*, 2004, 37(1): 45-49.
- OU J P, ZHOU ZH, WU ZH J, *et al.*. Intelligent monitoring of Heilongjiang hulan river bridge based on fbgs[J]. *China Civil Eng. J.*, 2004, 37(1): 45-49. (in Chinese)
- [17] CHAN T H T, YU L, TAM H Y, *et al.*. Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of TsingMa bridge: background and experimental observation[J]. *Eng. Struct.*, 2006, 28: 648-659.
- [18] VENUGOPALAN T, SUN T, GRATAN K T V. Long period grating-based humidity sensor for potential structural health monitoring[J]. *Sensors and Actuators A: Physical*, 2008, 148: 57-62.
- [19] 王元丰, 韩冰, 周耀, 等. 地铁车站结构健康监测研究[J]. *都市轨道交通*, 2008, 21(5): 34-38.
- WANG Y F, HAN B, ZH Y, *et al.*. Study on structural health monitoring for subway stations[J]. *Urban Rapid Rail Transit*, 2008, 21(5): 34-38. (in Chinese)
- [20] GANGOPADHYAY, TARUN K, PAUL M C, BJERKAN L, *et al.*. Fiber-optic sensor for real-time monitoring of temperature on high voltage(400 kV) power transmission lines[J]. *SPIE*, 2009, 7503: 75034M.
- [21] 石智栋, 张永庆, 侯培虎, 等. 光纤光栅温度在线监测系统在电力安全监测中的应用[J]. *山东科学*, 2008, 21(6): 45-49.
- SHI ZH D, ZHANG Y Q, HOU P H, *et al.*. The application of online fiber Bragg grating temperature surveillance system

- in the surveillance of electrical equipment safety[J]. *Shandong Science*,2008,21(6):45-49. (in Chinese)
- [22] 魏玉宾,王哲,刘统玉,等. 光纤光栅温度监测仪在变压器热点远程监测中的应用[J]. *山东科学*,2008,21(6):55-57.
- WEI Y B,WANG ZH,LIU T Y,*et al.*. The application of a fiber Bragg grating temperature detector in the Long2Distance surveillance of transformer hotspots[J]. *Shandong Science*,2008,21(6):55-57. (in Chinese)
- [23] HO Y T,HUANG A B,MA J M,*et al.*. Ground movement monitoring using an optic fiber Bragg grating sensed system [J]. *SPIE*,2005,5855:1020-1023.
- [24] 裴华富,殷建华,朱鸿鹄,等. 基于光纤光栅传感技术的边坡原位测斜及稳定性评估方法[J]. *岩石力学与工程学报*,2010,29(8):1570-1576.
- PEI H F,YIN J H,ZHU H H,*et al.*. In-situ monitoring of displacements and stability evaluation of slope based on fiber Bragg grating sensing technology[J]. *Chinese J. Rock Mechanics and Eng.*,2010,29(8):1570-1576. (in Chinese)
- [25] 朱鸿鹄,殷建华,靳伟,等. 基于光纤光栅传感技术的地基基础健康监测研究[J]. *土木工程学报*,2010,43(6):109-115.
- ZHU H H,YIN J H,JIN W,*et al.*. Health monitoring of foundations using fiber Bragg grating sensing technology[J]. *China Civil Eng. J.*,2010,43(6):109-115. (in Chinese)
- [26] 陈朋超,李俊,刘建平,等. 光纤光栅埋地管道滑坡区监测技术及应用[J]. *岩土工程学报*,2010,32(6):897-912.
- CHEN P CH,LI J,LIU J P,*et al.*. Monitoring technology of pipelines using fiber Bragg grating and its application in landslide areas[J]. *Chinese J. Geotechnical Eng.*,2010,32(6):897-912. (in Chinese)
- [27] 林传年,刘泉声,高玮,等. 光纤传感技术在锚杆轴力监测中的应用[J]. *岩土力学*,2008,29(11):3161-3164.
- LIN CN,LIU Q SH,GAO W,*et al.*. Application of fiber optical sensing technology to monitoring axial forces of anchor bolts[J]. *Rock and Soil Mechanics*,2008,29(11):3161-3164. (in Chinese)
- [28] 姜德生,左军,信思金,等. 光纤 Bragg 光栅传感器在水布垭工程锚杆上的应用[J]. *传感器技术*,2005,24(1):72-74.
- JIANG D SH,ZUO J,XIN S J,*et al.*. Application of FBG sensors on anchor rod in Project Shuibuya[J]. *J. Transducer Technology*,2005,24(1):72-74. (in Chinese)
- [29] FILOGRANO M L,RODRIGUEZ-BARRIOS A,GONZALEZ-HERRAEZ M,*et al.* Real time monitoring of railway traffic using fiber bragg gratings[J]. *SPIE*,2010,7653:76533M.
- [30] KANG D,CHUNG W. Integrated monitoring scheme for a maglev guideway using multiplexed FBG sensor arrays[J]. *NDT & E International*,2009,4(42):260-266.
- [31] 郝晋豫,朱少捷. 郑西客运专线路基工后沉降监测方案的探讨[J]. *铁道工程学报*,2010,3:33-36.
- HAO J Y,ZHU SH J. Discussion on schemes for monitoring post-construction subsidence of subgrade of Zhengzhou-Xi'an passenger dedicated line[J]. *J. Railway Eng. Society*,2010,3:33-36. (in Chinese)
- [32] 陈凤晨,谭忆秋,董泽蛟,等. 基于光纤光栅技术的沥青路面结构应变场分析[J]. *公路交通科技*,2008,25(10):9-12.
- CHEN F CH,TAN Y Q,DONG Z J,*et al.*. Research on strain field of asphalt pavement based on FBG sensor technique [J]. *J. Highway and Transportation Research and Development*,2008,25(10):9-12. (in Chinese)
- [33] 高俊启,陈昊,季天剑,等. 沥青路面动水压力光纤传感测量研究[J]. *传感器与微系统*,2009,28(9):59-61.
- GAO J Q,CHEN H,JI T J,*et al.*. Study of dynamic hydraulic pressure measurement on asphalt pavement using fiber optic sensing[J]. *Transducer and Microsystem Technologies*,2009,28(9):59-61. (in Chinese)
- [34] LIU H Y,LIANG D K,ZENG J. Long period fiber grating transverse load effect-based sensor for asphalt pavement pressure field measurements[J]. *Sensors and Actuators A:Physical*,2011,168:262-266.
- [35] FERDINAND P,FERRAGU O,LECHIEN J L,*et al.*. Mine operating accurate stability control with optical fiber sensing and Bragg grating technology[J]. *J. Lightwave Technol.*,1995,13(7):1303-1313.
- [36] SCHROECK M,ECKE W,GRAUPNER A,*et al.*. Strain monitoring in steel rock bolts using FBG sensor arrays[J]. *SPIE*,2000,4074:298-304.

- [37] NOSENZO G. Innovative use of embedded FBG sensors in civil engineering and other applications[J]. *SPIE*,2011, 8028:80280E.
- [38] 苏小杰,高艳磊. 光纤传感技术在黄金矿山中的应用研究[J]. *矿业研究与开发*,2009,29(6):66-68.
SU X J,GAO Y L. Application research of optical fiber sensing technology in gold mine[J]. *Mining R & D*,2009,29(6):66-68. (in Chinese)
- [39] 冯现大,李树忱,李术才,等. 矿井突水模型试验中光纤传感器的研制及其应用[J]. *煤炭学报*,2010,35(2):283-287.
FENG X D,LI SH CH,LI SH C,*et al.*. The development of fiber optic Bragg grating sensors and their applications to the mine water-inrush model test[J]. *J. China Coal Society*,2010,35(2):283-287. (in Chinese)
- [40] 柴敬,董梁,李毅,等. 济三矿风井厚松散层沉降变形光纤光栅监测方法[J]. *煤炭科学技术*,2010,38(5):13-16.
CHAI J,DONG L,LI Y,*et al.*. Monitoring and measuring method with optical fiber and optical grating for thick loose strata subsidence and deformation in mine ventilation shaft of Jisan mine[J]. *Coal Science and Technology*,2010,38(5):13-16. (in Chinese)
- [41] 魏世明,柴敬,许力. 煤矿用光纤 Bragg 光栅火灾探测系统研究[J]. *工矿自动化*,2010(5):40-42.
WEI SH M,CHAI J,XU L. Research of mine used fire detection system by use of fiber Bragg grating[J]. *Industry and Mine Automation*,2010(5):40-42. (in Chinese)
- [42] 于之江,姬战锁. 采空区自然发火预测的研究[J]. *水力采煤与管道运输*,2009(4):13-15.
YU Z J,JI ZH S. Prediction of spontaneous combustion in worked-out area[J]. *Hydraulic Coal Mining & Pipeling Transportation*,2009(4):13-15. (in Chinese)
- [43] TANG D L,DAI B,HE SH,*et al.*. Research and fabrication of integrated optical chip of Mach-Zehnder microinterference accelerometer[J]. *Optica Appl.*,2012,42(1):121-128.
- [44] DREBENSTEDT C,PAESSLER S. Measuring the effects of blast-induced vibrations on buildings with fibre Bragg gratings [J]. *International J. Mining,Reclamation and Environment*,2008,22(2):90-104.
- [45] PRINSE W C. Development of fiber optic sensors at TNO for explosion and shock wave measurements[J]. *SPIE*,2000, 4183:748-758.
- [46] VAN'T HOF P G,SCHOLTES J H G,PRINSE W C,*et al.*. Dynamic pressure measurement of shock waves in explosives by means of a fiber Bragg grating sensor[J]. *SPIE*,2007,6279:62791Y.
- [47] CHENG N. Fiber-optic sensors in explosions and detonation experiments[EB/OL]. (2007-06-12)[2013-03-11]. <http://spie.org/X14337.xmp?highlight=X2412>.
- [48] HARE D E,GOOSMAN D R,LORENZ K T,*et al.*. Application of the embedded fiber optic probe in high explosive detonation studies;PBX-9502 and LX-17[C]//In 13th International Symposium on Detonation, July 23-28,2006, Norfolk, VA. USA,2006:1081-1091.
- [49] BENTEROU J,UDD E,WILKINS P,*et al.*. In-situ continuous detonation velocity measurements using fiber-optic Bragg grating sensors[C]//34th International Pyrotechnics Seminar, July 27,2007,Beaune,France,2007.
- [50] BENTEROU J,BENNETT C V,COLE G,*et al.*. Embedded fiber-optic Bragg grating(FBG) detonation velocity sensor [J]. *SPIE*,2009,7316:73160E.
- [51] 陆宁. 光纤传感技术在稠油热采中的应用[J]. *内蒙古石油化工*,2009(17):99-101.
LU N. Application of optical fiber sensing technology in thermal recovery of the heavy crude oil[J]. *Inner Mongolia Petrochemical Industry*,2009,17:99-101. (in Chinese)
- [52] 袁伟,姜明顺,杨柳,等. 光纤光栅传感器在石油测井中的应用[J]. *大气与环境光学学报*,2008,3(3):234-240.
YUAN W,JIANG M SH,YANG L,*et al.*. Application of fiber Bragg grating sensor in well logging[J]. *J. Atmospheric and Environmental Optics*,2008,3(3):234-240. (in Chinese)
- [53] MORIKAWA S R K,CAMERINI C S,PIPA D R,*et al.*. Monitoring of flexible oil lines using FBG sensors[J]. *SPIE*, 2008,7004:70046F.
- [54] ALLSOP T,ZHANG L,BENNION I. Detection of organic aromatic compounds in paraffin by a long-period fiber grating

- optical sensor with optimized sensitivity[J]. *Opt. Commun.*, 2001, 191:181-190.
- [55] SATORI K, FUKUCHI K, KUROSAWA, *et al.*. Polyimide-coated small-diameter optical fiber sensors for embedding in composite laminate structures[J]. *SPIE*, 2001, 4328:285-294.
- [56] 李全, 梁大开, 曾捷, 等. 基于长周期光纤光栅的可变体机翼翼表温度测试系统研究[J]. *光学技术*, 2011, 37(1):7-10.
- LI K, LIANG D K, ZENG J, *et al.*. Research of morphing wings surface temperature measurement system based on long-period fiber grating[J]. *Opt. Technique*, 2011, 37(1):7-10. (in Chinese)
- [57] FERGUSON K C S, GRAVER T, *et al.*. On-line structural health and fire monitoring of a composite personal aircraft using an FBG sensing system[J]. *SPIE*, 2008, 6933:69330H.
- [58] TAKEDA N. Fiber optic sensor-based SHM technologies for aerospace applications in Japan[J]. *SPIE*, 2008, 6933:693302.
- [59] JIANZHONG H A O, MANIYERI J, KING P L, *et al.*. FBG based smart bed system for healthcare applications[J]. *Front. Optoelectron. China*, 2010, 3(1):78-83.
- [60] FRESVIG T, LUDVIGSEN P, STEEN H, *et al.*. Fiber optic Bragg grating sensors; an alternative method to strain gages for measuring deformation in bone[J]. *Med. Eng. Phys.*, 2008, 30:104-108.
- [61] MISHRA V, SINGH N, RAI D V, *et al.*. Fiber Bragg grating sensor for monitoring bone decalcification[J]. *Orthop. Traumatol. Surg. Res.*, 2010, 96:646-651.
- [62] VILIMEK M. Using a fiber Bragg grating sensor for tendon force measurements[J]. *J. Biomech.*, 2008, 41(S1).
- [63] Optical Fibre Sensors Embedded into technical Textile for Healthcare[EB/OL]. [2013-02-15]. http://www.ofseth.org/IMG/pdf/ofseth_print-mars-2008.pdf.
- [64] LIBISH T M, LINESH J, BOBBY M C, *et al.*. Detection and analysis of paraffin oil adulteration in coconut oil using fiber optic long period grating sensor[J]. *Optik*, 2011, 122:1939-1942.
- [65] DEEP A, TIWARI U, KUMAR P, *et al.*. Immobilization of enzyme on long period grating fibers for sensitive glucose detection[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 33:190-195.
- [66] TRIPATHIA S M, BOCK W J, MIKULIC P, *et al.*. Long period grating based biosensor for the detection of Escherichia coli bacteria[J]. *Biosensors and Bioelectronics*, 2012, 35:308-312.

作者简介:



徐国权(1983—),男,辽宁鞍山人,博士研究生,2007年于辽宁工程技术大学获得学士学位,2010年于辽宁科技大学获得硕士学位,主要从事光纤光栅传感技术在爆破工程中的应用研究。E-mail: ogogo831228@yahoo.com.cn



熊代余(1964—),男,重庆开县人,博士,研究员,博士生导师,1984年于东北大学获得学士学位,1987年于东北大学获得硕士学位,2003年北京科技大学获得博士学位,主要从事炸药与爆破(炸)技术、智能化爆破设计等方面的研究。E-mail: dyxiong38@yahoo.com.cn