

# 光纤光栅传感器在爆炸冲击测量中的应用

由泽伟,王 源,孙阳阳,黄肖迪,章征林

(解放军理工大学 爆炸冲击防灾减灾国家重点实验室,江苏 南京 210007)

**摘 要:** 光纤光栅传感器(FBG)在侵彻及爆炸冲击测试技术中拥有广泛的应用前景。介绍了光纤光栅传感器的检测原理与关键技术,分析了光纤光栅传感器的动态响应时间及对于高频振动时的可测频率。与传统的爆炸冲击测量方法相比,光纤光栅传感器精度高,抗电磁干扰能力强,体积小,可实现分布式测量,在爆炸冲击领域拥有广泛的应用前景。限于光纤光栅解调技术即采样率发展的限制,光纤光栅传感器在爆炸冲击领域的应用处于起步阶段。介绍了光纤光栅传感器在霍普金森压杆上的应用。提出了当前急需解决的技术问题。

**关键词:** 光纤光栅传感器;爆炸冲击;实验技术;动态响应;频响特性

**中图分类号:** TN384; TP212.9; TH741 **文献标识码:** A

## Application of Fiber Bragg Grating Sensor to the Explosion and Impact Measurement

YOU Zewei, WANG Yuan, SUN Yangyang, HUANG Xiaodi, ZHANG Zhenglin

(State Key Lab. of Disaster Prevention and Mitigation of Explosion and Impact, PLA University of Science and Technology, Nanjing 210007, China)

**Abstract:** The fiber Bragg grating (FBG) sensor has a wide range of applications in the penetration and explosion impact testing technology. The measurement principle and key technology of FBG sensor are introduced in this paper. Compared with the conventional measurement method of the explosion shock, the FBG sensor has the features of high accuracy, strong anti-electromagnetic interference, small size and distributed measurement. Limited to the development of fiber grating demodulation technology, i. e. the sampling rate, the application of FBG sensors in the field of explosion impact is in its initial stage. The application of FBG sensors to Hopkinson bar is described. The technical problems which need to be solved urgently are proposed.

**Key words:** fiber Bragg grating sensor; explosion and impact; experimental technology; dynamic response; frequency response characteristic

### 0 引言

爆炸冲击问题本质上属于高应变率、高压力的强冲击问题,同时伴随强电磁干扰。试验中的参数测量是在多破片,强振动冲击,瞬态高温,强光和强电磁恶劣环境下进行的,传感器信号易受到各种干扰,实际测试中难以获得理想的测试效果,因此对传感器提出了更高的要求。如何实现爆炸及侵彻过程中各参数的量测已成为爆炸冲击领域的关键性问题。

光纤光栅传感技术在爆炸冲击领域拥有巨大的潜在优势,与传统传感器相比,光纤光栅传感器(FBG)具有灵敏度高,可实现分布式检测,可用于抗强电磁干扰、强腐蚀性的恶劣环境等优点<sup>[1]</sup>。目前,

FBG在静态和准静态测量上的发展已非常成熟,被广泛应用于土木工程、生物技术、石油化工等领域。近年来,随着光纤高速解调技术的发展,光纤光栅逐步应用于动态检测方面,在桥梁振动检测、航空航天领域上取得了一定进展,而在爆炸冲击领域还处于初步的探索阶段。对光纤动态检测技术在爆炸冲击领域的应用也成为了未来研究的热点和发展趋势。

### 1 国内外光纤传感技术的应用发展

自美国的Morey<sup>[2]</sup>首次进行光纤光栅的应变和温度传感研究以来,其应用和发展迅速,尤其是在土木工程方面取得了巨大成功。在静态方面,Antonio Quintela<sup>[3]</sup>设计了在混凝土内部同时测量应变与温

收稿日期:2016-09-05

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51608528);江苏省基础研究计划基金资助项目(BK2016021801)

作者简介:由泽伟(1993-),男,辽宁人,硕士生,主要从事光纤光栅动态测量等方面的研究。E-mail:1960680704@qq.com。通信作者:王源(1970-),男,湖北人,教授,主要从事国防工程检测方面的研究。E-mail:13260731276@163.com。

度的FBG,并提出了混凝土中传感器的设计准则。Chan<sup>[4]</sup>将FBG应用于玻璃纤维与混凝土混合物的应变测量,较好地反应了这种新型复合材料的本构关系。随着光纤高速解调技术的发展,FBG逐渐应用于动态检测方面。在动态测量方面,FBG主要是高频振动的测量<sup>[5]</sup>与地震波信号的检测等<sup>[6]</sup>。WU等<sup>[7]</sup>在实验室内模拟地球内部的岩石撞击,运用FBG检测产生的冲击信号,并与地震检波器的测量结果进行比较,实验结果表明,当震动信号在100~2500 Hz的范围内,检测系统得到的结果与实际吻合较好。A. Cusano等<sup>[8]</sup>研究了一种能同时测量动态应变与静态应变的光纤光栅传感系统。其检测原理是宽带光源通过耦合器进入传感光栅,光纤光栅反射光进入非对称的光学滤波器,并用光电探测器检测滤波器的透射和反射光信号,然后通过电路运算解调出传感信号。

但在爆炸冲击领域,目前的应用还处于探索阶段。近几年,高速解调技术迅速发展,限制FBG应用于爆炸冲击领域的问题逐步得到解决。申雅峰等<sup>[9]</sup>提出了一种基于现场可编程门阵列(FPGA)的光纤光栅解调算法及实现方法,采样率可达2 kHz。李红等<sup>[10]</sup>提出了一种基于改进型用户数据报协议UDP和数据封装协议CIGI的光纤光栅解调系统方案,采样率可达16 kHz。同时,国内、外学者进行了一系列实验,验证了FBG应用于爆炸冲击领域的可行性。李丽等<sup>[11]</sup>基于相位载波解调技术设计了光纤光栅解调系统,并进行在分离式Hopkinson压杆(SHPB)上的实验,实验结果表明系统在10 kHz范围内有良好的频率响应。朱萍玉<sup>[12]</sup>对光纤Bragg光栅用于Hopkinson压杆应力波测试的情况进行了研究实验,获得了与应变片结果类似的时域波形。

## 2 FBG的原理及关键技术

### 2.1 FBG的基本原理

FBG是利用光纤光栅对环境变化的敏感性原理设计的波长调制型光纤传感器。基于光纤光栅的传感过程是通过外界参量对Bragg光纤光栅中心波长 $\lambda_B$ 的调制来获取信息的传感技术,其数学表达式为

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

式中: $n_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率; $\Lambda$ 为光栅周期。

FBG由激光器发出光信号,图1为光纤光栅的原



图1 光纤光栅的原理

理图。由图可知,当传感区域即光栅处环境的温度、应变发生变化时, $\Lambda$ 也发生变化,且光纤本身所具有的弹光效应使 $n_{\text{eff}}$ 也随外界应力状态发生变化。

应力和温度引起的光栅Bragg波长漂移可由下式表达:

$$\Delta\lambda_B = \lambda_B(1 - p_e)\epsilon + \lambda_B(\alpha + \xi)\Delta T \quad (2)$$

式中: $\Delta\lambda_B$ 为温度和应变引起的波长漂移; $\lambda_B$ 为Bragg波长; $\epsilon$ 为轴向应变; $\Delta T$ 为温差; $p_e \approx 0.22$ 为弹光系数; $\alpha$ 为光纤的热膨胀系数; $\xi$ 为热光系数。因此,在温度不变的情况下,光纤光栅 $\epsilon$ 与 $\lambda_B$ 的应变漂移 $\Delta\lambda_B$ 满足:

$$\epsilon = \frac{1}{0.78} \frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} \quad (3)$$

### 2.2 光纤光栅解调技术

光纤光栅解调技术是对光纤光栅编码信号进行解调,是影响FBG在动态响应测量方面应用的主要因素。常用的解调方法有:匹配光纤光栅滤波器法<sup>[13]</sup>、非平衡马赫-曾德干涉仪法<sup>[14]</sup>、边缘滤波器法、可调谐光纤法布里-珀罗(F-P)滤波器法<sup>[15]</sup>。根据这些方法研制了不同类型的解调仪,在静态或准静态实验中取得了很好的效果,但在解调速度方面还无法满足爆炸与冲击方面的实验需要。目前,对高速解调的研究在不断取得突破,国外已可生产采样率达1 MHz的解调仪,国内也能达100 kHz。

## 3 光纤光栅动力特性分析

### 3.1 动态响应时间

应变波通过被测物表面的粘结层、封装材料,然后传递到裸光纤光栅上,由于此传递过程的存在,响应时间有一定的滞后<sup>[16]</sup>,这个滞后时间就是FBG的响应时间,即

$$t_{\text{响应}} = t_{\text{粘结层}} + t_{\text{封装层}} \quad (4)$$

一般 $t_{\text{粘结层}} < 10^{-7}$  s,在实际应用中可忽略。因此,动态响应时间 $t_{\text{响应}}$ 一般取决于封装层的响应时间 $t_{\text{封装层}}$ 。

### 3.2 可测频率

当应力波为正弦波时,光纤光栅反映的波形是其封装长度内的应变平均值,测量结果比实际值偏小。

应变波幅测量误差 $e$ 为

$$e = \left| \frac{\lambda}{\pi l_0} \sin \frac{\pi l_0}{\lambda} - 1 \right| \quad (5)$$

式中: $\lambda$ 为应变波长; $l_0$ 为胶结长度

由式(5)可知,测量误差与相对比值 $n = \lambda/l_0$ 有关, $n$ 越大,误差越小。一般可取 $\lambda/l_0 = 10 \sim 20$ ,此时 $e < 1\%$ 。

对被测材料

$$\lambda = \frac{v}{f} \quad (6)$$

其中

$$f = \frac{v}{nl_0} \quad (7)$$

式中： $f$ 为可测频率； $v$ 为应力波波速。对光纤光栅传感器而言， $f$ 与封装长度有关，而与封装方式及封装材料无关。

当应力波为阶跃波时，由于应变波通过光纤光栅应变传感器全部封装长度需要时间，所以，传感器反映波形需经过一定时间的延迟才能达到最大值。为表征动态特性，常用上升时间 $t$ <sup>[17]</sup>来描述。

$$t = \frac{0.8l_0}{v} \quad (8)$$

式中 $t$ 是指输出值从最终稳定值的10%~90%所需时间。

对阶跃波输入的可测频率为

$$f = \frac{0.35}{t} \quad (9)$$

即

$$f = 0.44 \frac{v}{l_0} \quad (10)$$

对于其他波形的应力波，可测频率范围可取式(9)、(10)计算得到的最小值。

由式(10)可知， $l_0$ 越小，可测频率越大。实际试验中，需根据实际情况确定封装长度。

对混凝土而言，在混凝土材料中应力波的传播速度为2 800~4 100 m/s，当封装长度为2 cm时，可测频率可达100 kHz，此时由光栅本身带来的系统误差小于1%。

## 4 光纤光栅传感器在爆炸冲击领域的优势

### 4.1 抗电磁干扰能力强

在爆炸过程中会产生电磁脉冲，造成复杂的电磁场环境<sup>[18]</sup>。传统的爆炸测量采用电阻式或电压式传感器，以电流的形式传递信号。在爆炸场中，强电磁噪声会通过各种途径形成干扰。通过采用无线式冲击波参数测试法及优化传感器探头屏蔽设计可在一定程度上降低电磁噪声，但存在布置电缆引线费时、费力及操作复杂的弊端<sup>[19-20]</sup>。光纤光栅通过光信号传递信息，电磁环境基本不会对光纤光栅的量测造成影响。申昊文<sup>[21]</sup>在磁场环境中，采用电阻应变片与光纤光栅进行悬臂梁的应变测量，试验中，电阻应变片的时域波形产生周期性脉冲(见图2)，而FBG的测量结果基本无变化，验证了光纤光栅的抗电磁干扰能力。

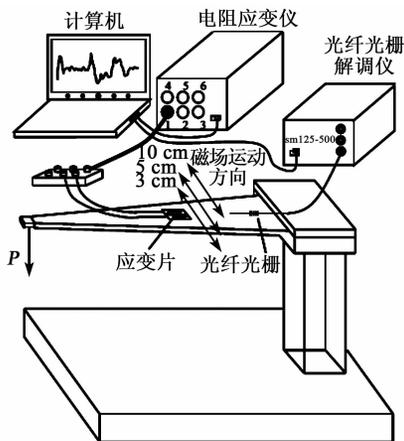


图2 等强度悬臂梁应变测量

### 4.2 可实现分布式测量

当前，在高速撞击问题中，压力传感器均采用点布置的方式埋于介质中<sup>[22-25]</sup>，为适应超高速撞击中对压力量测的全方位连续性要求，只能通过多布设传感器的方法来解决。美国水道试验站的Frew<sup>[26]</sup>在卵形弹侵彻混凝土试验中采用有效的传感器布置方法(见图3)，在弹体飞行路线周围的靶体内1.4~2.6倍的弹体半径范围内，布置6个宽44 mm、厚3 mm、长1.5 m的压力传感器，测量得到了侵彻路径上不同位置处的径向应力时程曲线，但需要传感器的数量随着直径而增长，埋设传感器费时、费力。同时，压力传感器体积较大，埋入传感器的数量过多会对被测材料本身的本构关系造成影响。FBG细如发丝，可以实现大范围、长距离布置，宽压力范围量测，而对靶体本身物理力学性质影响很小，可以突破其他传感器因尺寸过大对靶体抗毁特性和应力波传播特性的影响。

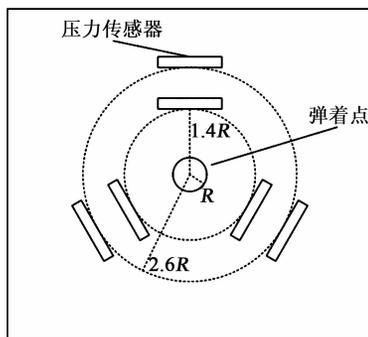


图3 压力传感器分布图

## 5 FBG在Hopkinson压杆上的应用

目前，在爆炸冲击领域，FBG主要应用于Hopkinson杆的应变测试。在这方面，余尚江<sup>[27-29]</sup>做了大量实验。分离式Hopkinson杆广泛应用于材料动力学实验中，用于测试材料在高应变率下的动态

力学性能,实验装置如图 4 所示,子弹以一定速度撞击入射杆后,在入射杆中产生应力波,应力波向前传播通过试样时,试样发生变形,并在入射杆中产生反射波,在透射杆中产生向前的透射波,通过黏贴在入射杆与透射杆上的 FBG,可以得到对应点的应变-时间曲线,根据应力波理论可得到试样的本构关系。

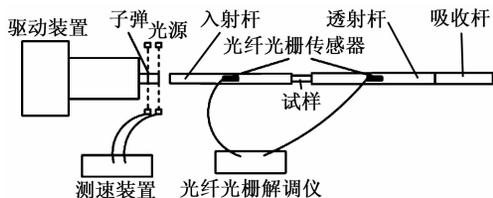


图 4 霍普金森杆示意图

图 5 为由光纤光栅测得的应力-应变曲线与电阻应变片测得曲线的对比。由图可知,光纤光栅与电阻应变片测得的结果基本一致,说明光纤光栅能够实现结构动态响应的精确测量。

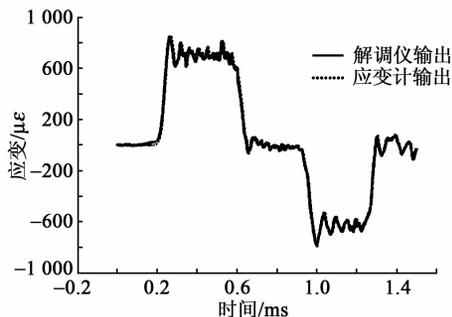


图 5 测量结果<sup>[26]</sup>

## 6 急需解决的问题

1) 光纤光栅的灵敏化和封装技术研究。爆炸冲击过程中荷载作用时间短,强度大,传感器必须具有良好的动态响应特性。光纤的封装技术对传感器的灵敏度及瞬态响应时间有直接的影响,必须采用合适的封装工艺以保证测量精度。

2) 高速解调技术研究。高速解调技术是限制光纤光栅传感器在动态响应方面的主要因素,要精确得出爆炸冲击过程中各参量的时域图,必须要保证解调装置具有足够高的采样率,如何实现高速解调,是现阶段的研究重点。

3) 准分布式光纤光栅传感网络研究。爆炸冲击过程中,目标靶体压力及应力的分布规律是开展侵彻爆炸规律研究的基础,必须深入研究分布式光纤光栅传感网络,实现对不同位置的同步精细检测。

## 7 结束语

光纤光栅传感器经过 20 多年的发展,在土木工程领域的静态测量方面,已逐渐代替了传统的变压式及变阻式传感器。在光纤光栅动态检测研究方

面,现阶段大都属于低压或低频的量测。随着高速解调技术的发展,光纤光栅传感器正逐步应用于爆炸冲击领域,并取得了一定的成果。因其性能方面与传统传感器相比有着巨大优势,未来光纤光栅传感器势必会在爆炸冲击领域得到更广泛的应用。

## 参考文献:

- [1] 王为. 光纤 Bragg 光栅在动态应变信号检测中的应用[D]. 天津:天津大学,2006.
- [2] MELTZ, 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.
- [3] QUINTELA A, JAUREGUI C, ECHEVARRIA J, et al. Embedded fiber Bragg grating transducer for concrete structures[J]. European Workshop on Smart Structures in Engineering & Technology, 2003, 4763: 220-226.
- [4] CHAN P K C, JIN W, LAU K T, et al. Multi-point strain measurement of composite-bonded concrete materials with a RF-band FMCW multiplexed FBG sensor array[J]. Sensors & Actuators A Physical, 2000, 87(1/2): 19-25.
- [5] 龚华平, 杨效, 屠于梦, 等. FBG 传感器和电阻应变仪的振动监测特性[J]. 红外与激光工程, 2013, 42(3): 811-813.  
GONG Huaping, YANG Xiao, TU Yumeng, et al. Vibration detection characteristics of FBG sensor and resistance strain gauge[J]. Infrared and Laser Engineering, 2013, 42(3): 811-813.
- [6] 张小栋, 谢思莹, 牛杭, 等. 光纤动态检测技术的研究与进展[J]. 振动、测试与诊断, 2015, 35(3): 409-416.  
ZHANG Xiaodong, XIE Siying, NIU Hang, et al. Research on dynamic measurement technology of fiber optic sensors and their development[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2015, 35(3): 409-416.
- [7] WU X, SCHMIDT-HATTENBERGER C, KRUGER K, et al. Temperature-controlled fiber Bragg grating dynamic strain detection system[J]. Sensor & Actuators a Physical, 2005, 119(1): 68-74.
- [8] CUSANO A, CUTOLO A, NASSER J, et al. Dynamic strain measurements by fibre Bragg grating sensor[J]. Sensors & Actuators a Physical, 2004, 110(suppl. 1/3): 276-281.
- [9] 申雅峰, 张磊, 胡春艳. 一种基于 FPGA 的光纤光栅高速解调算法[J]. 光通信研究, 2014, 2(20): 39-42.  
SHEN Yafeng, ZHANG Lei, HU Chunyan. A FPGA-based high-speed demodulation algorithm for FBG[J]. Study on Optical Communications, 2014, 2(20): 39-42.
- [10] 李红, 祝连庆, 闫光. 基于改性型 UDP 和 CIGI 的光纤

- 光栅高速解调技术研究[J]. 仪器仪表学报, 2016, 37(1):129-135.
- LI Hong, ZHU Lianqing, YAN Guang, et al. FBG high speed demodulation technology based on improved UDP and CIGI[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2016, 37(1):129-135.
- [11] 李丽, 林玉池, 沈小燕, 等. 光纤 Bragg 光栅在动态应变测量中的研究[J]. 传感技术学报, 2007, 20(5): 994-997.
- LI Li, LIN Yuchi, SHEN Xiaoyan, et al. Fiber Bragg grating sensor system for dynamic strain measurement [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007, 20(5):994-997.
- [12] 朱萍玉, 林玉池, 廖传军. 光纤 Bragg 光栅用于动态应变测试的研究进展[J]. 中国工程科学, 2007, 9(1): 89-94.
- ZHU Pingyu, LIN Yuchi, LIAO Chuanjun. Development of dynamic strain measurement with fiber Bragg grating[J]. Engineering Science, 2007, 9(1): 89-94.
- [13] JACKSON D A, RIBEIRO A B L, REEKIE L, et al. Simple multiplexing scheme for a fiber-optic grating sensor network[J]. Opt Lett, 1993, 18(14):1192-1194.
- [14] WEIS R S, KERSEY A D, BERKOFF T A. A four-element filter grating sensor array with phase-sensitive detection [J]. IEEE Photonics Tech Lett, 1994, 6(12): 1469-1472.
- [15] 孙丽. 光纤光栅传感器应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012.
- [16] 刘迎春. 传感器设计原理、设计与应用[M]. 北京: 国防大学出版社, 1989.
- [17] KERSEY A D. Multiplexed fiber Bragg grating strain-sensor system with a fiber fabry-perot wavelength filter[J]. Optics Letters, 1993, 18(16):1370.
- [18] 尤文斌, 祖静, 范锦彪, 等. 冲击波存储测试技术[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(suppl. 2):1228-229.
- YOU Wenbin, ZU Jing, FAN Jinbiao, et al. Blast wave stored testing and measuring technology [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2006, 27(suppl. 2): 1228-1229.
- [19] 丁永红, 尤文斌, 张晋业. 舰用动爆振动记录装置的设计与应用[J]. 弹箭与制导学报, 2012, 32(5):147-148.
- DING Yonghong, YOU Wenbin, ZHANG Jinye. Design and application of recorder used to dynamic blasting vibration of warship[J]. Journal of Projectiles Rockets Missiles and Guidance, 2012, 32(5):147-148.
- [20] 王伟, 丁永红, 尤文斌. 爆炸场参数探测头抗电磁干扰性研究[J]. 计算机测量与控制, 2014, 22(2):486-488.
- WANG Wei, DING Yonghong, YOU Wenbin. Research on explosion field parameters detecting head anti-electromagnetic interference [J]. Computer Measurement and Control, 2014, 22(2):486-488.
- [21] 申昊文, 朱萍玉, 施维. 等光纤光栅与电阻应变片磁场环境下应变测量的试验研究[J]. 自动化与信息工程, 2014, 35(4):11-15.
- SHEN Haowen, ZHU Pingyu, SHI Wei, et al. Experimental study on strain measurement under magnetic field of fiber Bragg grating and resistance strain gauge [J]. Automation & Information Engineering, 2014, 35(4):11-15.
- [22] BORG J P, MORRISSEY M P, PERICH C A, et al. In situ velocity and stress characterization of a projectile penetrating a sand target: experimental measurements and continuum simulations[J]. International Journal of Impact Engineering, 2013, 51(51):23-35.
- [23] 郑应民, 顾晓辉, 王树有. 混凝土靶中爆炸测试方法研究[J]. 弹道学报, 2003, 15(4):51-54.
- ZHENG Yingmin, GU Xiaohui, WANG Shuyou. A study on test methods of explosion in concrete targets [J]. Journal of Ballistics, 2003, 15(4): 51-54.
- [24] 马平, 黄训铭, 邓浩, 等. 亚波长二维光栅结构零级透射场的计算方法[J]. 兵器装备工程学报, 2016(8): 155-159.
- [25] 任新见, 陈虎林. PVDF 传感器在爆炸近区超压测量中的应用研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(12):146-149.
- REN Xinjian, CHEN Hulin. Application of PVDF sensors in shock wave measurement of near zone of explosion [J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(12):146-149.
- [26] GRAN J K, FREW D J. In-target radial stress measurements from penetration experiments into concrete by ogive-nose steel projectiles[J]. International Journal of Impact Engineering, 1997, 19(8):715-726.
- [27] 余尚江, 杨吉祥, 陈显, 等. 光纤 Bragg 光栅传感器高速冲击试验研究[J]. 传感技术学报, 2009, 22(1):137-141.
- YU Shangjiang, YANG Jixiang, CHEN Xian, et al. The shock test of fiber Bragg grating sensors in SHPB[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2009, 22(1):137-141.
- [28] 杨吉祥, 余尚江, 陈显. 光纤 Bragg 光栅应变传感器在霍普金森压杆上的冲击试验研究[J]. 振动与冲击, 2012, 31(1):61-63.
- YANG Jixiang, YU Shangjiang, CHEN Xian. Shock test for a fiber Bragg grating strain sensor on a SHPB[J]. Journal of Vibration and Shock, 2012, 31(1): 61-63.
- [29] 杨吉祥, 陈东, 余尚江, 等. 埋入式 FBG 应变传感器的设计及其传感特性研究[J]. 仪表技术与传感器, 2010(11):3-6.
- YANG Jixiang, CHEN Dong, YU Shangjiang, et al. Design and sensing characteristics of embedded fiber Bragg [J]. Instrument Technique and Sensor, 2010(11):3-6.