

基于光纤光栅的应力波检测技术研究

孙诗惠¹ 余有龙¹ 李慧¹ 钱牧云¹ 赵曾² 殷参² 赖小明²

¹合肥工业大学仪器科学与光电工程学院, 安徽 合肥 230009

²北京卫星制造厂, 北京 100094

摘要 提出了一种利用光纤布拉格光栅实现对分离式霍普金森压杆产生的应力波的检测方法, 简述了其工作原理, 并且探讨了杆中产生的应变与光纤光栅中心波长漂移量间的关系。将光纤光栅及应变片均沿轴向对称粘贴于被测圆柱杆同一截面的外侧, 对两杆直接撞击及通过波形整形器撞击后杆中产生的应变脉冲进行了检测。在上述两种情况下, 将光纤光栅及应变片的检测结果分别进行对比分析, 发现两者时域波形吻合; 对其进行频谱分析, 两者频域成分一致。当撞击速度为 11.33 m/s 时, 光纤光栅测得的最大应变为 $-1087.04 \mu\epsilon$, 其相对误差为 2.26%; 粘贴波形整形器后, 撞击速度为 9.8 m/s, 光纤光栅测得的波速为 5236.4 m/s, 其相对误差为 2.84%, 误差范围基本能满足工程测试的要求。

关键词 光纤光学; 光纤布拉格光栅; 霍普金森压杆; 应力波

中图分类号 O438 **文献标识码** A

doi: 10.3788/CJL201643.0505002

Detection Technique of Stress Waves Based on Fiber Bragg Grating

Sun Shihui¹ Yu Youlong¹ Li Hui¹ Qian Muyun¹ Zhao Zeng² Yin Shen² Lai Xiaoming²

¹School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering, Hefei University of Technology, Hefei, Anhui 230009, China

²Beijing Satellite Manufacturing Factory, Beijing 100094, China

Abstract The detecting method of stress wave generated by split Hopkinson pressure bar based on fiber Bragg grating (FBG) is proposed; the principle is outlined and the relationship between strain and center wavelength shift of FBG is discussed. The strain pulses generated by direct impact and impacting with the pulse shaper are measured using the FBG and strain gauges which are axially symmetrically pasted to the same section of the cylindrical rod. It can be concluded that the time domain signal and the frequency spectrum of the results with FBG and strain gauges are consistent by contrast and analysis. The maximum strain reaches $-1087.04 \mu\epsilon$ with error of 2.26% for a given impacting velocity of 11.33 m/s. When FBG and the pulse shaper are adopted, the impacting velocity is 9.8 m/s, and the longitudinal wave speed is measured to be 5236.4 m/s with the error of 2.84%. The error range can meet the basic requirements of engineering tests.

Key words fiber optics; fiber Bragg grating; Hopkinson pressure bar; stress wave

OCIS codes 060.2370; 060.2310; 050.2770

1 引言

冲击是一种常见的运动形式。在冲击载荷作用下结构的力学响应不同于静态载荷作用下的力学响应, 前者的作用过程短, 须计及材料微元体的惯性, 需要通过捕获应力波来研究其运动规律。应力波传播特性的研究可应用于材料动态性能研究^[1]、工程爆破^[2]以及无损检测^[3]等领域。传统的应力波检测的途径是利用应变片捕获应变的时间变化信息, 检测结果易受潮湿气候和电磁场的干扰, 检测精度有限^[4]。波长编码的光纤布拉格光栅(FBG)传感器, 不仅可克服应变片的缺点, 且具有灵敏度高、响应速度快和动态范围大等优点^[5], 已经应用于对加速度^[6]、振动^[7]、温度^[8]和位移^[9]等物理量的检测。

收稿日期: 2015-12-07; **收到修改稿日期:** 2016-01-07

基金项目: 登月三期预研项目、合肥工业大学博士专项科研基金(GDBJ2009-010)

作者简介: 孙诗惠(1991-), 女, 硕士研究生, 主要从事光纤光栅传感方面的研究。E-mail: hssjtd@163.com

导师简介: 余有龙(1965-), 男, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事光纤光栅传感器及网络化技术、光纤激光器以及光无源器件等方面的研究。E-mail: youlongyu@163.com(通信联系人)

在利用光纤光栅对静态应变的检测方面已有大量研究。岳音等^[10]利用光纤光栅监测碳纤维复合材料混凝土复合拱初始开裂,验证了光纤光栅测量应变的准确性和稳定性。随着对光纤光栅解调系统的研究不断深入^[11-12],利用光纤光栅对动态应变的检测研究成为近年来的研究热点。路士增等^[13]利用光纤光栅构建的传感器网络对低速冲击区域进行定位识别,研究表明:光纤光栅为定位检测的一种有效的方法。王为等^[14]利用FBG对分离式霍普金森弹性压杆(SHPB)的应变进行了监测,认为其在低阻抗材料性能测试方面将代替应变片,成为一种更加有效的测试方法。余尚江等^[15-17]利用FBG对高速冲击进行了实验研究,但是其解调系统的分辨率不高,且滤波曲线的线性近似具有一定误差^[18]。本文基于光源波长扫描查询的方法,结合SHPB装置,利用FBG对输入杆表面的应力波进行检测,并通过实验对比分析了FBG与应变片的测试结果。

2 理论分析

2.1 SHPB系统测试原理

典型的SHPB系统如图1所示,子弹、输入杆和输出杆均为弹性材料,且具有相同的截面尺寸及材料属性。通过在输入杆上布设传感器可以获得杆上任一点的应变,且满足

$$\frac{\partial^2 \epsilon(x, t)}{\partial t^2} = c_0^2 \frac{\partial^2 \epsilon(x, t)}{\partial x^2}, \quad (1)$$

式中 c_0 为杆中纵波波速, $\epsilon(x, t)$ 为通过该点的沿 x 轴正向应变脉冲 $\epsilon_1(x, t)$ 和负向应变脉冲 $\epsilon_2(x, t)$ 的叠加^[19]。

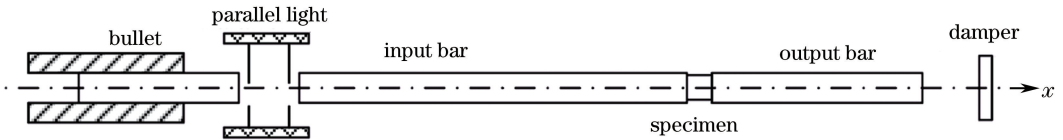


图1 分离式霍普金森压杆系统示意图

Fig. 1 Diagram of split Hopkinson pressure bar system

根据弹性杆中一维应力波传播不产生横向效应的条件^[20],输入应力脉冲的宽度 α ,子弹的长度 L_0 及子弹的直径 d 应满足

$$d \ll \alpha = 2L_0, \quad (2)$$

应力脉冲的持续时间 τ 满足

$$\tau = 2L_0/c_0, \quad (3)$$

式中 c_0 由材料属性决定,表达式为

$$c_0 = \sqrt{E/\rho_0}, \quad (4)$$

其中 E 为弹性模量, ρ_0 为材料密度。

两截面相同的弹性杆撞击后,撞击面处的质点速度和应力都相同,如图2所示。考虑连续条件以及牛顿第三定律,由强间断面上动量守恒条件^[21]得

$$\sigma = -(\rho_0 c_0)_1 (v - v_1) = (\rho_0 c_0)_2 (v - v_2), \quad (5)$$

式中 $(\rho_0 c_0)_1$ 和 $(\rho_0 c_0)_2$ 分别为两弹性杆的波阻抗, v_1 和 v_2 ($v_1 < v_2$)为撞击前两杆的质点速度。

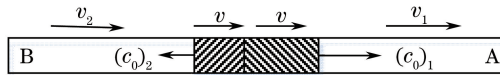


图2 等截面弹性杆共轴撞击

Fig. 2 Coaxial impact on two elastic rods with same cross-sectional area

由(5)式求得撞击后杆中质点速度 v 和应力 σ 分别为

$$v = \frac{(\rho_0 c_0)_1 v_1 + (\rho_0 c_0)_2 v_2}{(\rho_0 c_0)_1 + (\rho_0 c_0)_2} \quad (6)$$

$$\sigma = -\frac{(v_2 - v_1) (\rho_0 c_0)_1 (\rho_0 c_0)_2}{(\rho_0 c_0)_1 + (\rho_0 c_0)_2}$$

特别地,当两弹性杆材料相同时,即 $(\rho_0 c_0)_1 = (\rho_0 c_0)_2 = \rho_0 c_0$, 代入(6)式得

$$\sigma = -\frac{1}{2}\rho_0 c_0 (v_2 - v_1), \quad (7)$$

若输入杆在撞击前为静止状态($v_1=0$),根据胡克定律 $\sigma=E\varepsilon$,由(7)式得到杆中的应变为

$$\varepsilon = -\frac{\rho_0 c_0 v_2}{2E}. \quad (8)$$

2.2 光纤光栅传感器原理

宽带光源发出的光传输到光栅位置时,由于光栅的带阻滤波作用,波长满足布拉格反射条件的光沿原路返回,其余波长的光穿过光栅透射出去。布拉格反射条件为

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda, \quad (9)$$

式中 λ_B 为布拉格波长; n_{eff} 为有效折射率; Λ 为光栅常数。通过分析反射谱和透射谱的变化情况可以判断出所测物理量的变化值。

受外界应变的影响,FBG 的光栅常数和折射率均会发生变化,从而使 FBG 的布拉格波长发生漂移,且满足

$$\varepsilon = \frac{1}{(1 - P_e)\lambda_B} \Delta\lambda_B, \quad (10)$$

式中 P_e 为有效弹光系数。若将 FBG 刚性粘贴于图 1 所示输入杆的待测点上,由(10)式可见,布拉格波长 λ_B 远大于波长漂移量 $\Delta\lambda_B$,杆上观测点处的应变与波长漂移量间呈线性变化关系。

3 测试结果及分析

3.1 测试系统

SHPB 应变测试系统如图 3 所示,FBG 传感器与解调仪连接,应变片与超动态应变仪连接。前者基于波长扫描技术,其波长扫描的范围为 1528~1568 nm,分辨率可达 1 pm。设子弹与输入杆的撞击接触面处 $x=0$,在输入杆上选取与输入端分别相距 300 mm 和 900 mm 的两测点 x_1 和 x_2 。

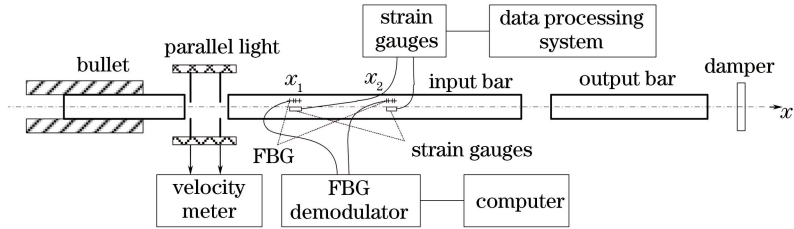


图 3 SHPB 应变测试系统示意图

Fig. 3 Diagram of SHPB strain testing system

为消除弯矩对测量结果的影响,在各测点处杆的外表面沿轴向对称粘贴两个 FBG 传感器和两个应变片,FBG 与应变片位置错开且在同一横截面内(图 4 所示), x_1 和 x_2 两测点使用的 FBG 传感器的波长分别为 1554.02、1554.14、1554.07、1554.05 nm,长度均为 5 mm。

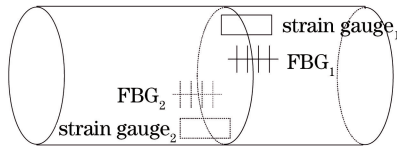


图 4 同一测点处传感器的分布图

Fig. 4 Distribution of sensors at the same position

超动态应变仪的采样频率为 1 MHz,解调仪的采样频率为 20 kHz。由子弹和输入杆高速共轴撞击产生应变脉冲信号,应变片与 FBG 捕获的应变时间 τ 变化信号分别示于图 5 和图 6。

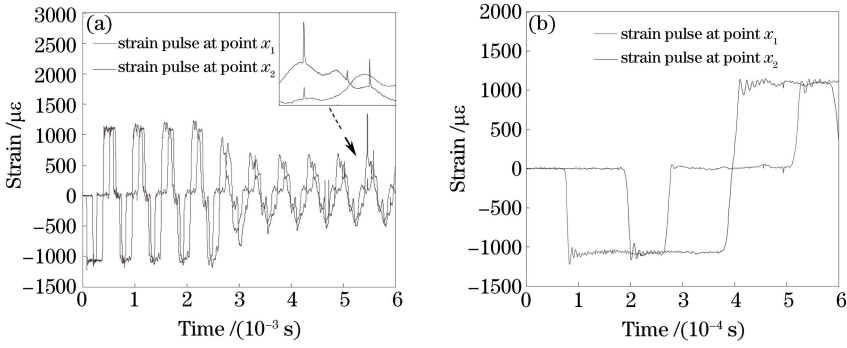


图 5 应变片检测的应变脉冲信号。(a) 应变脉冲；(b) 将图(a)中 $0 < \tau < 0.0006$ 范围内局部放大

Fig. 5 Strain pulse detected by strain gauge. (a) Strain pulse; (b) amplified part of figure (a) in the range $0 < \tau < 0.0006$

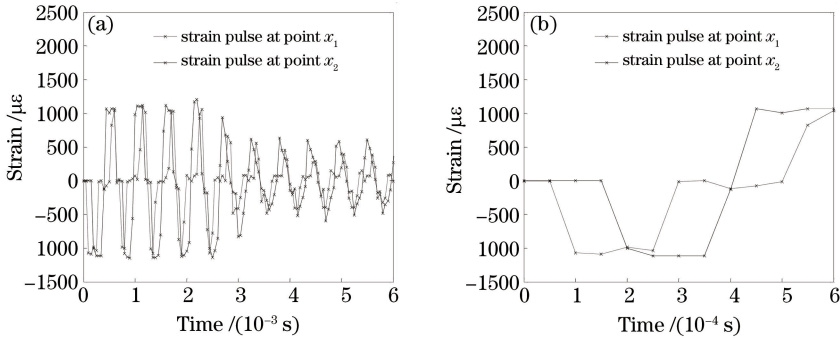


图 6 FBG 检测的应变脉冲信号。(a) 应变脉冲；(b) 将图(a)中 $0 < \tau < 0.0004$ 范围内局部图放大

Fig. 6 Strain pulse detected by FBG. (a) Strain pulse; (b) amplified part of figure (a) in the range $0 < \tau < 0.0004$

3.2 测试结果与分析

子弹和输入杆的材料均为铝 ($E = 70 \text{ GPa}$, $\rho_0 = 2700 \text{ kg/m}^3$), 直径均为 14.5 mm , 长度分别为 500 mm 和 1440 mm 。子弹以 11.33 m/s 的速度直接撞击输入杆, 实验中观察到并记录的应变脉冲[如图 5(b)所示]为方波, 其持续时间为 $197 \text{ }\mu\text{s}$, 幅值为 $-1071.6 \text{ }\mu\epsilon$ 。根据(4)式计算出杆中纵波波速为 5091.7 m/s , 考虑子弹长度为 500 mm , 由(8)式可知最大应变为 $-1112.2 \text{ }\mu\epsilon$, (3)式给出应变脉冲的持续时间为 $196.4 \text{ }\mu\text{s}$, 两者与理论值间的相对误差分别为 3.65% 和 0.31% 。

测点 x_2 与输入杆末端相距 540 mm , 应变脉冲在该距离内往返传播一次所用的时间为 $212.1 \text{ }\mu\text{s}$, 大于其持续时间, 因此该测点处的入射应变脉冲未受到反射脉冲的影响。图 5(b)中可观察到测点 x_2 处的入射与反射应变脉冲, 两者的幅值和持续时间均相同。图中叠加于方波上的震荡是应力脉冲中高频波和低频波的传播速度不同而引起的波形弥散现象, 图 6(b)中未观察到此种现象, 是由于 FBG 解调系统的较低采样频率, 未能捕获到该弥散现象。实验观察到 FBG 测得最大应变为 $-1087.04 \text{ }\mu\epsilon$, 与理论值间的相对误差为 2.26% 。

图 5(a)中曲线上的毛刺源于环境电磁场的干扰, 而图 6(a)中并未见到该毛刺, 可见 FBG 传感系统捕获的信号抗电磁场干扰。

图 5 中具有陡峭上升沿和下降沿的应力脉冲会使试样在未达到应力平衡时受损, 若引入波形整形器, 利用其塑性变形可滤除应变脉冲中由于直接撞击引起的高频分量, 有效消除由于波形在传输中的弥散失真引起的实验误差^[22]。在输入杆的撞击端面上粘贴软布作为波形整形器, 子弹以 9.8 m/s 的速度撞击输入杆, 应变片和 FBG 记录的应变脉冲如图 7 所示。

图 7(a)为时域信号, 分析在测点 x_1 处测得的数据, 可知应变片测试系统测得最大应变为 $-904.8 \text{ }\mu\epsilon$, 应力脉冲的持续时间为 $348 \text{ }\mu\text{s}$; FBG 测试系统测得最大应变为 $-898.78 \text{ }\mu\epsilon$, 应力脉冲的持续时间为 $350 \text{ }\mu\text{s}$, 根据相邻峰值之间的时间差计算出应力波的波速为 5236.4 m/s , 与(4)式计算得到的理论值 5091.7 m/s 相比, 其相对误差为 2.84% 。将图 7(a)中在测点 x_1 处应变片与 FBG 的测试结果经傅里叶变换及归一化处理后的频谱图分别示于图 7(b)和(c), 分析可知两者包含的频率成分相同。

上述结果表明, FBG 测试系统的测量值与理论值基本符合, 应力脉冲的幅值及杆中波速实测值与理论

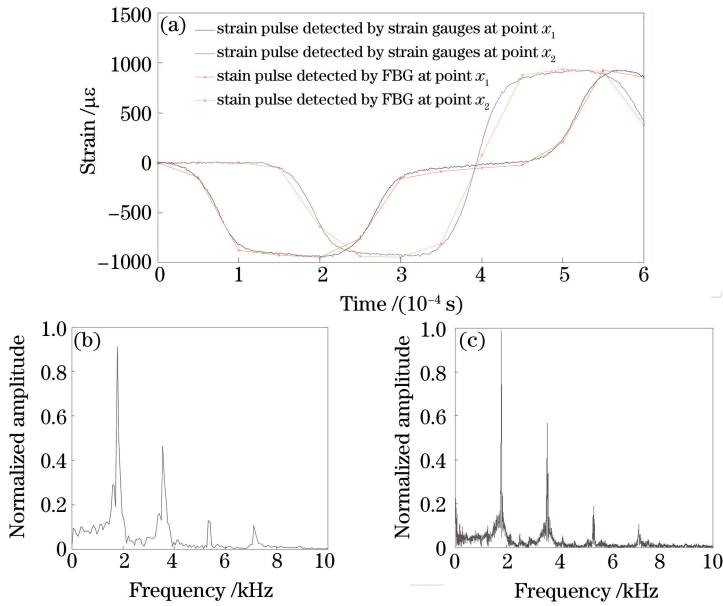


图 7 应变片与 FBG 检测的应变脉冲信号及其频域信号。

(a) 应变脉冲; (b) 应变片检测应变脉冲的频域信号; (c) FBG 检测应变脉冲的频域信号

Fig. 7 Strain pulse and frequency spectrum detected by strain gauges and FBG. (a) Strain pulse;

(b) frequency spectrum of strain pulse detected by strain gauges; (c) frequency spectrum of strain pulse detected by FBG

值对比的相对误差分别为 2.26% 和 2.84%。误差产生的主要原因有: 1) 材料属性和位置参数引起的误差; 2) 所用 FBG 传感器具有一定的尺寸, 其捕获的应变脉冲是该尺寸内应变量的平均值^[23]; 3) 传感器粘贴所用胶黏剂与弹性杆的波阻抗不匹配, 使得所捕获的应力脉冲与弹性杆中传播的应力脉冲存在偏差。

4 结 论

利用动态应变和 FBG 测试系统对 SHPB 产生的应力波进行了检测, 结果表明, 如果应力波所含频率成分在 FBG 解调系统的频率范围内, FBG 测试系统能够准确地捕获应力脉冲信号。使用波形整形器对入射的应力波进行整形处理后, 两种测试系统测得的应力脉冲的波形变化趋势吻合, 频谱分析表明两者包含频率成分相同。FBG 测试系统测得最大应变与波速的相对误差分别为 2.26% 和 2.84%, 基本满足应力波测试的要求, 同时 FBG 测试系统不受环境中电磁场的影响。提高光纤光栅传感系统的扫描频率将有利于捕获应力波中的高频信号; 改善传感器的粘贴方法, 减小传感器的尺寸, 将有利于减小测量误差。该方法有望应用于材料性能检测, 有助于了解撞击的物理过程以及其引起的能量传递规律等。

参 考 文 献

- 1 Wu Xutao, Hu Shisheng, Yang Boyuan, *et al.*. An improvement in measuring the dynamic properties of concrete material by the traditional SHPB technique[J]. Journal of Hefei University of Technology (Nature Science), 2004, 27(1): 63-66.
巫绪涛, 胡时胜, 杨伯源, 等. SHPB 技术研究混凝土动态力学性能存在的问题和改进[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2004, 27(1): 63-66.
- 2 Zhou Jie, Tao Gang, Pan Baoqing, *et al.*. Mechanism of blast trauma to human thorax: A finite element study[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(3): 315-320.
周杰, 陶钢, 潘保青, 等. 爆炸冲击波对人体胸部创伤机理的有限元方法研究[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(3): 315-320.
- 3 Wang Bangfeng, Chen Renwen. Leakage location system for oil pipeline based on stress wave detection[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2007, 28(6): 1012-1017.
王帮峰, 陈仁文. 基于应力波检测的输油管道泄漏定位监测系统[J]. 仪器仪表学报, 2007, 28(6): 1012-1017.
- 4 Deng Yangchun, Chen Gang, Yang Xiaofeng. Algorithm study of eliminating calculation errors in large strain measurement with strain gauges[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2008, 23(3): 227-233.
邓阳春, 陈钢, 杨笑峰. 消除电阻应变片大应变测量计算误差的算法研究[J]. 实验力学, 2008, 23(3): 227-233.

- 5 余有龙. 光纤光栅传感器及其网络化技术[M]. 哈尔滨: 黑龙江科学技术出版社, 2003: 112-115.
- 6 Luo Pei, Tian Jianwei, Wang Lixin. High-frequency accelerator sensor of double fiber Bragg gratings[J]. Opto-Electronic Engineering, 2012, 39(6): 53-56.
罗 裴, 田建伟, 王立新. 光双线光栅高频加速度传感器的研究[J]. 光电工程, 2012, 39(6): 53-56.
- 7 Yu Youlong, Geng Shuwei, Tan Huayao. A novel active fiber Bragg grating sensor system for monitoring mechanical vibration in real-time[J]. Acta Optica Sinica, 2003, 23(3): 293-296.
余有龙, 耿淑伟, 谭华耀. 用于机械振动实时监测的光纤光栅有源传感装置[J]. 光学学报, 2003, 23(3): 293-296.
- 8 Yu Youlong, Li Deming, Zhang Lin. Experimental study on the characteristics of fiber Bragg grating temperature sensor packaged with metal tube[J]. Journal of Natural Science of Heilongjiang University, 2011, 28(5): 737-740.
余有龙, 李德明, 张 林. 金属管封装光纤光栅温度传感器特性的实验研究[J]. 黑龙江大学自然科学学报, 2011, 28(5): 737-740.
- 9 Yu Youlong, Tan Huayao, Liu Xinyi, *et al.*. Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2000, 2(4): 538-542.
余有龙, 谭华耀, 廖信义, 等. 免受温度影响的光纤光栅位移传感器[J]. 光学学报, 2000, 2(4): 538-542.
- 10 Yue Yin, Wang Yuan, Duan Jianli, *et al.*. Experimental study on fiber Bragg grating monitoring the crack of CFRP concrete composite arch[J]. Chinese J Lasers, 2015, 42(8): 0805004.
岳 音, 王 源, 段建立, 等. 光纤光栅 CFRP 混凝土复合拱裂缝监测实验研究[J]. 中国激光, 2015, 42(8): 0805004.
- 11 Li Zhengying, Zhou Dezu, Tong Xinglin, *et al.*. Research of high-speed large-capacity fiber Bragg grating demodulator [J]. Acta Optica Sinica, 2012, 32(3): 0306007.
李政颖, 周祖德, 童杏林, 等. 高速大容量光纤光栅解调仪的研究[J]. 光学学报, 2012, 32(3): 0306007.
- 12 Yu Youlong, Tan Ling, Li Qian, *et al.*. Influence of thermal effect caused by piezoelectric transducer on interferometric demodulation for fiber Bragg grating sensor[J]. Acta Optica Sinica, 2014, 34(5): 0506005.
余有龙, 谭 玲, 李 茜, 等. 压电陶瓷发热对光纤光栅传感信号干涉解调的影响[J]. 光学学报, 2014, 34(5): 0506005.
- 13 Lu Shizeng, Jiang Mingshun, Sui Qingmei, *et al.*. Identification of impact location by using fiber Bragg grating based on wavelet transform and support vector classifiers[J]. Chinese J Lasers, 2014, 41(3): 0305006.
路士增, 姜明顺, 隋青美, 等. 基于小波变换和支持向量多类机的光纤布拉格光栅低速冲击定位系统[J]. 中国激光, 2014, 41(3): 0305006.
- 14 Wang Wei, Lin Yuchi, Zhu Pingyu. Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material[J]. Optics and Precision Engineering, 2009, 17(3): 488-492.
王 为, 林玉池, 朱萍玉. 光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用[J]. 光学精密工程, 2009, 17(3): 488-492.
- 15 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.
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.
- 16 Yu Shangjiang, Chen Xian, Yang Jixiang. Measurement of dynamic strain in concrete based on embedded FBG sensors in SHPB impact test[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(11): 112-116.
余尚江, 陈 显, 杨吉祥. 冲击载荷下基于埋入式光纤光栅传感器的混凝土动态应变测试[J]. 振动与冲击, 2011, 30(11): 112-116.
- 17 Chen Xian, Yu Shangjiang, Yang Jixiang, *et al.*. Measurement efficiency of high-speed-demodulation by linear filtering method[J]. Acta Optica Sinica, 2009, 29(1): 145-150.
陈 显, 余尚江, 杨吉祥, 等. 线性滤波法高速解调技术中的测量有效性研究[J]. 光学学报, 2009, 29(1): 145-150.
- 18 Li Zhiqian, Li Yaping, Zhu Dandan, *et al.* Demodulation scheme for filtering method based fiber Bragg grating sensing [J]. Journal of Applied Optics, 2006, 27(4): 327-331.
李志全, 李亚萍, 朱丹丹, 等. 基于滤波法的光纤光栅传感解调方案[J]. 应用光学, 2006, 27(4): 327-331.
- 19 Zdzislaw K. Elastic bar transfer functions determination using one-point strain measurements[J]. Sensors and Actuators A: Physical, 2008, 147: 121-126.
- 20 Lo Y L, Sirkis S J. Passive signal processing of in-line fiber etalon sensors for high strain-rate loading [J]. Journal of Lightwave Technology, 1997, 15(8): 1578-1586.
- 21 Wang Lili. Foundation of stress waves (2nd edition)[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 39-64.
王礼立. 应力波基础(第2版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 39-64.
- 22 郭伟国, 李玉龙, 索 涛, 等. 应力波基础简明教程[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2007: 128-134.
- 23 孙 丽. 光纤光栅传感应用问题解析[M]. 北京: 科学出版社, 2012: 33-47.