

doi: 10.3788/gzxb20174606.0606002

## 基于光纤光栅的冲击能检测

李慧<sup>1</sup>, 余有龙<sup>1</sup>, 耿淑伟<sup>1</sup>, 赵曾<sup>2</sup>, 赖小明<sup>2</sup>, 王国欣<sup>2</sup>, 殷参<sup>2</sup>

(1 合肥工业大学 仪器科学与光电工程学院, 合肥 230009)

(2 北京卫星制造厂, 北京 100080)

**摘 要:**提出一种利用光纤光栅作为传感元构成传感阵列对冲击能进行检测的方法. 通过搭建简易冲击系统装置, 将光纤光栅应变传感器沿轴向对称粘贴于圆杆表面, 对入射应力波能量进行检测. 实验结果表明, 两杆对心正冲击时入射应力波幅值最大, 能量传递效率最高. 通过分析频率域内的应力波信号可知, 其能量主要集中在 0~5 000 Hz 频率范围内. 将入射应力波能量与冲杆动能进行对比, 结果表明冲杆与圆杆传递能比在 93% 以上, 基本满足冲击机械性能测试的需求.

**关键词:**光纤光栅; 冲击性能; 应力波法; 入射脉冲; 传递能比

中图分类号: TN247

文献标识码: A

文章编号: 1004-4213(2017)06-0606002-6

## Detection for Impact Energy Based on Fiber Bragg Grating

LI Hui<sup>1</sup>, YU You-long<sup>1</sup>, GENG Shu-wei, ZHAO Zeng<sup>2</sup>, LAI Xiao-ming<sup>2</sup>,  
WANG Guo-xin<sup>2</sup>, YIN Shen<sup>2</sup>

(1 School of Instrument Science and Opto-electronics Engineering,  
Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

(2 Beijing Spacecrafts, Beijing 100080, China)

**Abstract:** A method to detect the impact energy using the fiber Bragg grating as the sensing element was presented. A simple impact system was built to detect the incident stress wave energy while fiber Bragg grating were axially symmetrically pasted to the round rod. The experiment result shows that both the amplitude of incident stress wave and energy transfer efficiency reach the biggest with two rod positive impacts. The energy of incident stress wave is mainly concentrated in the range of 0~5 000 Hz based on the analysis of signal in frequency domain. The energy transfer ratio of impact bar to round rod is more than 93% while comparing the incident stress wave energy and the kinetic energy of the impact bar, which meets the basic requirements of the testing for the impact mechanical properties.

**Key words:** Fiber Bragg grating; Impact properties; Stress wave technique; Incident pulse; Energy transfer ratio

**OCIS Codes:** 060.3735; 060.2370; 060.2300

## 0 引言

冲击机械是一种高效碎岩装置, 广泛应用于钻进、勘察等工农业建设中<sup>[1-2]</sup>, 其冲击能量的大小、传递效率的高低直接关系到冲击作用的效果. 目前, 冲击能的测试方法主要有末速度法<sup>[3]</sup>、示功图法<sup>[4]</sup>、气压法<sup>[5]</sup>、应力波法<sup>[6]</sup>等. 其中末速度法是通过测量活塞冲击末速度, 利用动能公式得到冲击能, 原理简单, 但测试装置复杂; 示功图法利用活塞力-位移曲线包围面积表示冲击能, 该方法不易捕获位移信息; 气压法通过置于冲击

**基金项目:** 登月三期预研项目(No. TY3Q-20110005)、合肥工业大学博士专项科研基金(No. GDBJ2009-010)资助

**第一作者:** 李慧(1991—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向为光纤传感. Email: lihui\_8382@163.com

**导师(通讯作者):** 余有龙(1965—), 男, 教授, 博士, 主要研究方向为光纤光栅传感及网络化技术、光纤激光器以及光无源器件等. Email: youlongyu@163.com

**收稿日期:** 2017-01-22; **录用日期:** 2017-03-03

<http://www.photon.ac.cn>

气腔内的压力传感器间接实现对冲击能的测量,该方法针对性较强,但误差较大;应力波法通过获得活塞输入到钎杆上的入射应力波能量作为活塞冲击能,其装置简单、重复性好.应变片是捕获应力波信号的常用传感器,其检测结果易受电磁场和潮湿空气的影响.

光纤光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)为介电型传感器,具有体积小、抗电磁干扰、耐腐蚀的优点,已被广泛应用于对各种物理量的传感<sup>[7-10]</sup>.陆观等<sup>[11]</sup>用光纤光栅应变传感器记录了复合材料智能结构的低速冲击信号;余尚江等<sup>[12]</sup>利用其对冲击载荷作用下混凝土内动态应变进行了监测.本文基于应力波法,提出利用光纤光栅传感阵列检测冲击能的方法,通过对不同冲击界面下测点处入射应力波的捕获,确定能量传递效率最大的冲击方式,对该冲击方式下的冲击动能与相应入射应力波能量进行比较与分析.

## 1 理论分析

### 1.1 冲击能的理论分析

冲击活塞作用于钎杆时,冲击能量以应力波的形式由钎杆向钎头至工作介质传递<sup>[13]</sup>.建立如图1所示的坐标系,以钎杆的左端面为 $x=0$ ,沿钎杆方向为正方向.

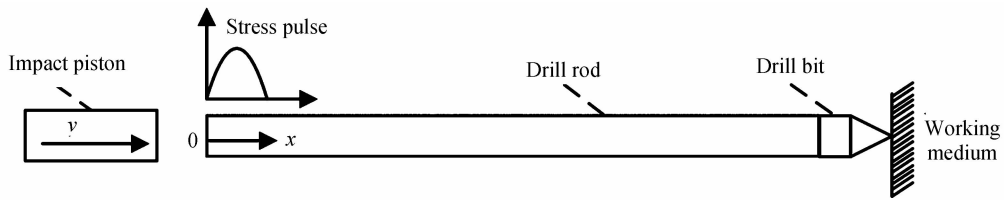


图1 冲击能量传递示意图

Fig. 1 Diagram of impact energy transfer

冲击能量的传递过程可归结为一维波动问题,由波动方程来描述<sup>[14]</sup>,即

$$\frac{\partial^2 u}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} \quad (1)$$

式中, $u$ 为质点位移, $t$ 为时间, $c$ 为应力波波速, $c = \sqrt{E/\rho}$ , $E$ 和 $\rho$ 分别为钎杆弹性模量和密度.

当钎杆左端产生的应力脉冲波全部沿 $x$ 轴正方向传播时,式(1)的解为

$$u = f(x - ct) \quad (2)$$

则速度 $v$ 与应变 $\epsilon$ 分别为

$$v = \frac{\partial u}{\partial t} = -c f'(x - ct) \quad (3)$$

$$\epsilon = \frac{\partial u}{\partial x} = f'(x - ct) \quad (4)$$

得 $v = -c\epsilon$ ,钎杆上任一点 $x$ 处的应力 $\sigma$ 满足胡克定律 $\sigma = E\epsilon$ , $dt$ 时间内该点位能与动能分别为

$$dE_e = \frac{1}{2} \sigma \epsilon A dx = \frac{1}{2} \frac{Ac}{E} \sigma^2 dt \quad (5)$$

$$dE_d = \frac{1}{2} \rho A v^2 dx = \frac{1}{2} \frac{Ac}{E} \sigma^2 dt \quad (6)$$

式中 $A$ 为钎杆横截面面积,应力波在 $dt$ 时间内通过钎杆任一截面之总能量为

$$dE_z = dE_e + dE_d = \frac{Ac}{E} \sigma^2 dt \quad (7)$$

已知钎杆中入射应力波脉冲持续时间为 $\tau$ ,其能量可表示为

$$E_z = \frac{Ac}{E} \int_0^\tau \sigma^2 dt \quad (8)$$

应力波法利用监测得到的入射应力波能量间接表示冲击活塞的冲击能,用于式(8)积分计算的应力波形必须是冲锤冲击钎杆时产生的第一个入射纵波,在实际测量时,为避免反射波的影响,可增加吸能装置或采用长钎杆,以保证检测结果的准确可靠.

## 1.2 光纤光栅传感原理

光纤光栅传感器采用波长编码,引起其布喇格波长变化的物理量均可被其感知.布喇格公式的数学表达式为

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

式中, $n_{\text{eff}}$ 为纤芯的有效折射率, $\Lambda$ 为光栅常量.恒温条件下,应力作用于FBG光纤介质时,通过机械拉伸改变其光栅常量,同时弹光效应使其折射率发生变化,两者引起波长漂移综合表现为

$$\frac{\Delta\lambda_B}{\lambda_B} = \left\{ 1 - \frac{n_{\text{eff}}^2}{2} [P_{12} - \nu(P_{11} + P_{12})] \right\} \epsilon_x = (1 - P_e) \epsilon_x \quad (10)$$

式中, $\epsilon_x$ 为轴向应变, $P_{11}$ 、 $P_{12}$ 为Pockel系数, $\nu$ 为泊松比, $P_e$ 称为光纤介质有效弹光系数.对掺锗石英光纤,其有效弹光系数 $P_e = 0.22$ ,应力引起的FBG布喇格波长漂移为 $1.15 \text{ pm}/\mu\epsilon^{[10]}$ ,中心波长漂移与轴向应变为线性关系.

## 2 实验结果与分析

### 2.1 光纤光栅冲击能测试系统

光纤光栅冲击能测试系统如图2.试验台采用卧式安装,冲击活塞简化为冲杆 $A_1 A_2$ ,为避免反射波的干扰以准确检测入射应力脉冲波形,采用长度为4 m的实心杆 $B_1 B_2$ 为测量杆,其右端为自由端状态,两杆横截面面积相同,材料均为不锈钢,测速器用于记录冲杆冲击速度.

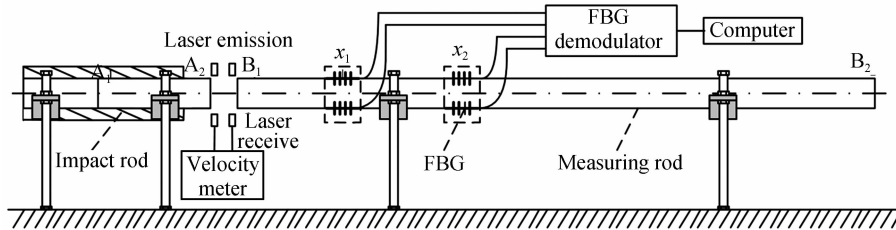


图2 光纤光栅冲击能测试系统示意图

Fig. 2 Diagram of impact energy measuring system with FBG

设测量杆与冲杆的接触面处为其输入端,选取两测点 $x_1$ 、 $x_2$ ,分别距输入端1 000 mm和1 500 mm.为消除弯矩对测量结果的影响,每一测点位置处沿杆轴向对称粘贴两个FBG应变传感器<sup>[15]</sup>.四根传感器中心波长分别为1 532.012 nm、1 531.998 nm、1 532.027 nm、1 532.003 nm.选用可调法布里-珀罗滤波法对光纤光栅传感信号进行解调,解调仪扫描波长范围为1 528~1 568 nm,最小分辨率可达1 pm.当两杆相互作用时,FBG传感器的波长漂移信号经解调后输入到电脑,通过Smart Scan软件实现波长漂移量到应变的直接转化,观察并记录测点处应变时程曲线变化.

### 2.2 测试结果与分析

在相同冲击速度下,记录两杆不同冲击方式下(如图3)的测点 $x_1$ 检测信号,采样频率为20 kHz,其捕获入射应力波形如图4.

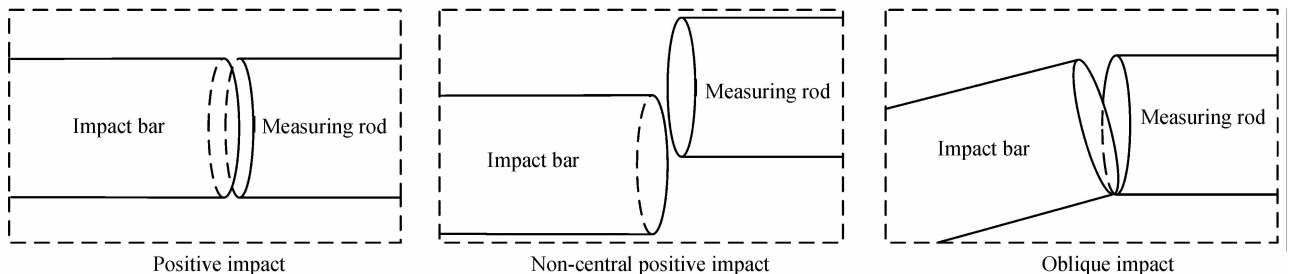


图3 不同冲击方式示意图

Fig. 3 Diagram of different impact modes

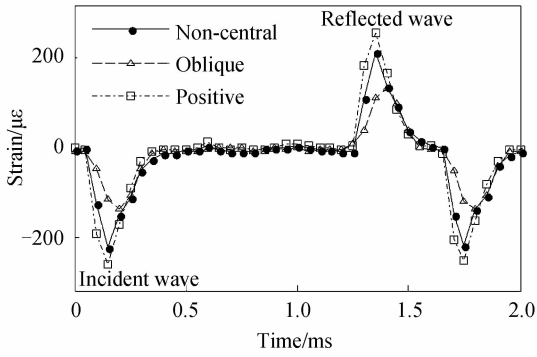


图4 不同冲击方式下测点  $x_1$  捕获入射应力波  
Fig. 4 Incident strain pulse detected at point  $x_1$  with different impact modes

两杆对心与非对心冲击作用可归结为一维应力纵波问题,此时测量杆中仅存在轴向应变.两种冲击方式下,由于冲击接触面积大小不同,冲杆与测量杆能量传递效率不同,其与冲击接触面积大小成正比关系,体现在入射应力波振幅上即为对心正冲击下的应变大于非对心冲击.在受到非轴向作用力时,测量杆中质点除存在轴向运动外,还存在横向惯性作用,杆上入射应力波幅值较前两种冲击方式最小,如图4.分析可得,在相同冲击速度下,对心正冲击方式入射应力波振幅最大,两杆之间能量传递效率最高.

将图3中两杆对心正冲击时  $x_1$ 、 $x_2$  测点传感器捕获应变时程如图5.已知测量杆纵向弹性模量为193 GPa,材料密度为  $7.93 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$ <sup>[16]</sup>,可得杆中应力波波速为  $c=4\,933.35 \text{ m/s}$ .两测点起振时间差为  $T=0.1 \text{ ms}$ ,已知  $x_1$  与  $x_2$  沿杆轴向距离为500 mm,计算得传感器检测应力波波速为5 000 m/s,与理论值的相对误差为1.35%.

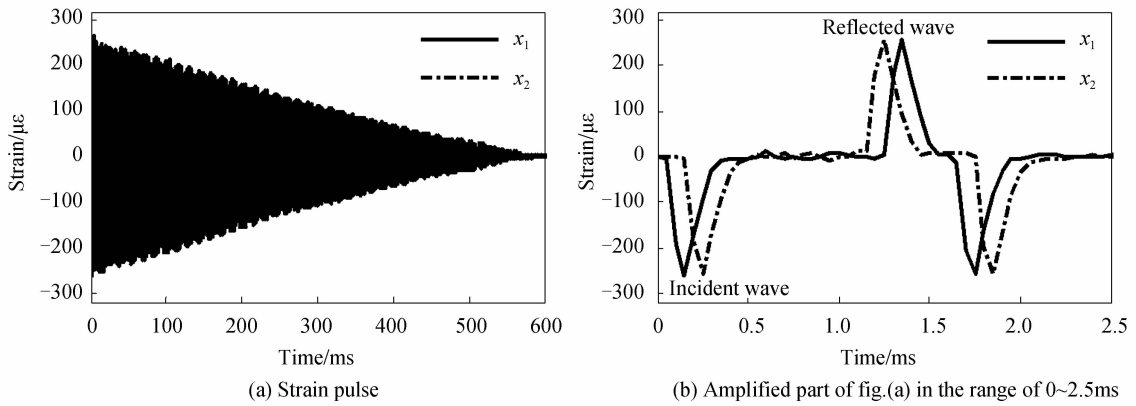


图5 光纤光栅记录的应力波信号

Fig. 5 Incident stress wave detected by FBG

测点  $x_1$ 、 $x_2$  与测量杆自由端相距分别为3 000 mm、2 500 mm,应力波在该距离内往返传播一次所用的时间为1.22 ms、1.01 ms.观察图5(b)可得,两测点捕获的入射应力波形一致,振幅大小基本相同,其持续时间均约为  $\tau=320 \mu\text{s}$ ,远小于入射应力波往返自由端所需时间,两测点处检测入射应力波均未受到反射应力波的影响,入射波与反射波实现波形分离.

不同采样频率下测点  $x_1$  处入射应力波信号经傅里叶变换及归一化后的频谱如图6(a),图6(b)为相应

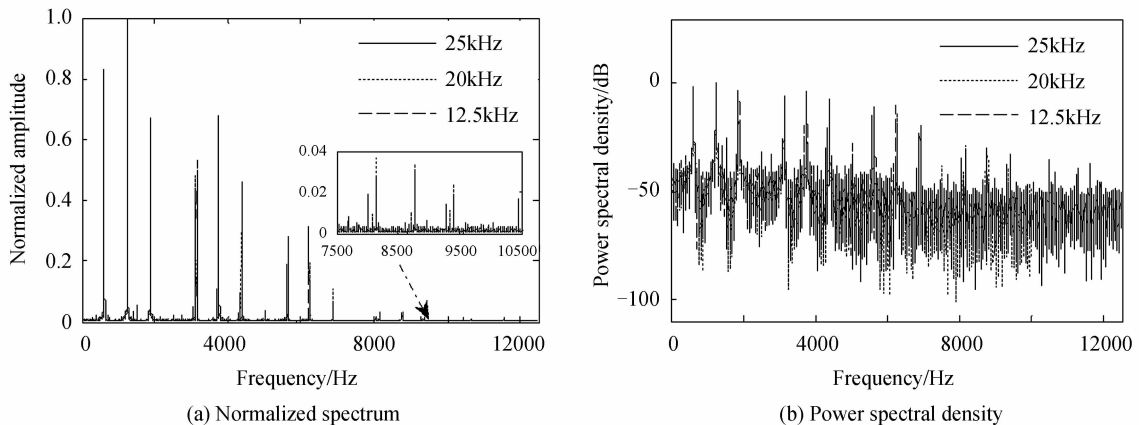


图6 应力波频域信号

Fig. 6 Frequency spectrum of stress wave

能量频谱密度. 分析可得,应变脉冲信号频率分布范围广、成分多,其中可被明显识别的信号频率有 630 Hz、1 260 Hz、1 880 Hz、3 140 Hz、3 760 Hz、4 390 Hz、5 650 Hz、6 270 Hz、6 900 Hz. 频率范围 0~5 000 Hz 内,信号包含频率成分多,频谱幅值较大,5 000~10 000 Hz 内,信号包含频率成分少,频谱幅值较小,信号能量主要集中在 0~5 000 Hz 内. 光纤光栅系统采样频率越高,采集到信号中的高频成分越多. 图 6(b)的能量频谱密度与图 6(a)中的规律保持高度的一致性.

选取 10 组入射应力波形数据,将入射应力波能量与冲杆动能进行对比,如图 7. 冲杆动能与测点  $x_1$ 、 $x_2$  检测入射波能量分别记作  $E_k$ 、 $E_1$ 、 $E_2$ . 实验中冲杆  $A_1A_2$  与测量杆  $B_1B_2$  的冲击作用可视作有限长杆与半无限长杆的共轴撞击. 理论分析认为,当两杆波阻抗相同时,系统满足能量守恒定律<sup>[17]</sup>,即冲杆  $A_1A_2$  的动能将全部传递给测量杆  $B_1B_2$ . 图 7(a)中两测点检测的入射应力波能量基本相同,其规律与图 5(b)波形保持一致,但与冲杆动能具有一定的误差,其主要原因是光纤光栅解调系统采样点数较少,入射应力波形较为尖锐,检测能量小于实际值. 图 7(b)给出了两测点入射应力波能量与冲杆动能相对误差曲线,其传递能比均保持在 93%以上.

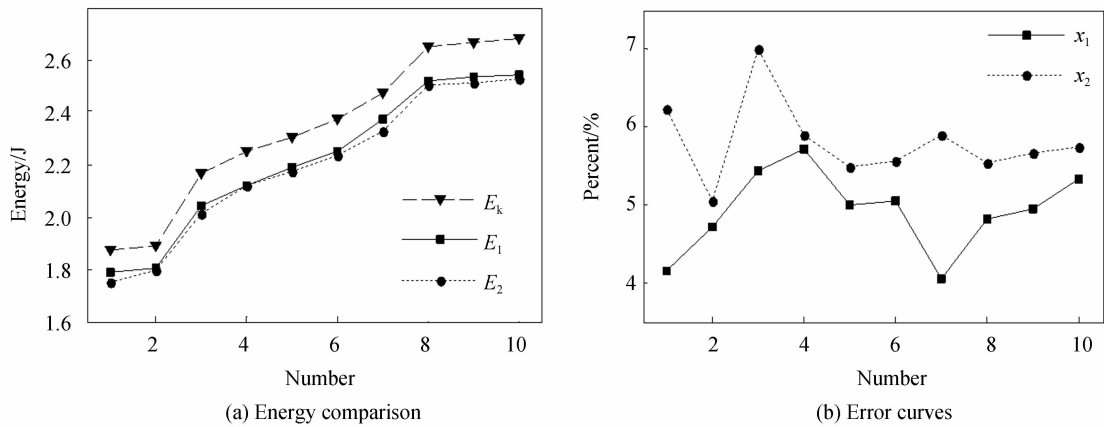


图 7 冲杆动能与入射应力波能量对比

Fig. 7 Comparison of the kinetic energy of impact bar and the incident stress wave energy

### 3 结论

本文基于光纤光栅传感器对冲击能进行检测. 与末速度、示功图、气压法相比,基于光纤光栅的冲击能检测无需破坏系统的内部结构,操作性较强且简单方便,测量结果更加准确可靠;同时,该方法受环境影响较小(如不受电磁干扰、耐腐蚀等),可用于复杂工况下的冲击能检测. 实验结果表明,两杆对心正冲击时,检测入射应力波能量与相应冲杆动能的相对误差保持在 7% 以下,具有良好的重复性和稳定性,基本满足冲击机械性能测试要求. 提高光纤光栅系统解调频率将有利于对更高频冲击能量信号的检测,同时获得更完整的入射应力波形,减小系统误差.

#### 参考文献

- [1] LUO Ming. Present situation and development trend of domestic hydraulic breaker[J]. *Construction Machinery*, 2004, **10**: 19-22.  
罗铭. 国内液压破碎器市场现状及发展趋势[J]. *建筑机械*, 2004, **10**: 19-22.
- [2] WANG Xue, GONG Jin, ZOU Xiang-fu, et al. The summarization of hydraulic impact machine development[J]. *Chinese Hydraulic & Pneumatics*, 2006, **11**: 49-53.  
王雪, 龚进, 邹相伏, 等. 液压冲击机械的发展概况[J]. *液压与气动*, 2006, **11**: 49-53.
- [3] LIU Zhong, WU Jin-song, LI Wei. Research on testing principles & methods and experimental research on hydraulic impact machine[J]. *China Machine Engineering*, 2007, **18**(15): 1769-1772,1818.  
刘忠, 伍劲松, 李伟. 液压冲击机械测试原理与方法及试验研究[J]. *中国机械工程*, 2007, **18**(15): 1769-1772,1818.
- [4] DING Chong-chong, YANG Guo-ping, LIANG Cui-ping, et al. Research on performance testing method for hydraulic impactor[J]. *Machine Tool & Hydraulics*, 2011, **39**(4): 56-58.  
丁冲冲, 杨国平, 梁翠平, 等. 液压冲击器性能测试方法的研究[J]. *机床与液压*, 2011, **39**(4): 56-58.
- [5] DING Wen-si, YANG Xiang-bi, LIU Zhong. Research on a new performance testing method for hydraulic impactor[J]. *Rock Drilling Machinery & Pneumatic Tools*, 2000, **4**: 50-57.

- 丁问司, 杨襄璧, 刘忠. 液压冲击器冲击性能新型测试方法研究[J]. 凿岩机械气动工具, 2000, **4**: 50-57.
- [6] WU Zhong-jie, LIN Jun, PENG Shi-ming. Development of hydro efflux hammer and the impact energy measuring method[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2006, **27**(9): 1037-1040.  
吴忠杰, 林君, 彭视明, 等. 液动射流式冲击器冲击功测量方法及仪器研制[J]. 仪器仪表学报, 2006, **27**(9): 1037-1040.
- [7] YU You-long, YE Hong-an, LIU Zhi-guo, *et al.* Fiber Bragg grating current sensor[J]. *Acta Optica Sinica*, 2001, **21**(5): 586-588.  
余有龙, 叶红安, 刘治国, 等. 光纤光栅电流传感器[J]. 光学学报, 2001, **21**(5): 586-588.
- [8] YU You-long, XUE Hang, WANG Yan-xiao, *et al.* Temperature distributed sensing technique for the local-area of the surface based on fiber Bragg gratings[J]. *Acta Photonica Sinica*, 2014, **43**(5): 0506001.  
余有龙, 薛航, 王彦晓, 等. 基于光纤光栅的物体表面附近温度场测量[J]. 光子学报, 2014, **43**(5): 0506001.
- [9] YU You-long, TAN Hua-yao, LIAO Xin-yi, *et al.* Temperature-independent fiber Bragg grating displacement sensor [J]. *Acta Optica Sinica*, 2000, **20**(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, **20**(4): 538-542.
- [10] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection[J]. *Electron Lett*, 1992, **28**(3): 236-238.
- [11] LU Guan, LIANG Da-kai, HU Xing-liu, *et al.* Energy detection of low velocity impact on fiber optic composite material structure[J]. *Chinese Journal of Science Instrument*, 2010, **31**(3): 577-581.  
陆观, 梁大开, 胡兴柳, 等. 光纤复合材料结构低速冲击判位研究[J]. 仪器仪表学报, 2010, **31**(3): 577-581.
- [12] YU Shang-jiang, YANG Ji-xiang, 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 传感器高速冲击实验研究[J]. 传感技术学报, 2009, **22**(1): 137-141.
- [13] ZHNEG Su-lu, WANG Dong-dong, ZHENG Rui-xiang, *et al.* Research on the detection system for impact energy of pneumatic drill based on stress wave technique[C]. New Jersey: Institute of Electrical and Electronics Engineers, 2015: 1448-1452.
- [14] JING Jing, YU Jiu-yang, ZHENG Xiao-tao, *et al.* Longitudinal impact behaviors of mechanical rapping ash removal devices[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2014, **33**(5): 125-131.  
靖静, 喻九阳, 郑小涛, 等. 机械振打除灰装置的纵向冲击特性[J]. 振动与冲击, 2014, **33**(5): 125-131.
- [15] SUN Shi-hui, YU You-long, LI Hui, *et al.* Detection technique of stress waves based on fiber Bragg grating[J]. *Chinese Journal of Lasers*, 2016, **43**(5): 0505002.  
孙诗惠, 余有龙, 李慧, 等. 基于光纤光栅的应力波检测技术研究[J]. 中国激光, 2016, **43**(5): 0505002.
- [16] 李立碑, 孙玉福. 金属材料物理性能手册[M]. 北京: 机械工业出版社, 2011: 360-363.
- [17] 王礼力. 应力波基础(第二版)[M]. 北京: 国防工业出版社, 2005: 39-47.