

# 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

杨吉祥<sup>1,2</sup>, 余尚江<sup>2</sup>, 陈显<sup>2</sup>

(1. 武汉大学 动力与机械学院, 武汉 430072; 2. 总参工程兵科研三所, 河南 洛阳 471023)

**摘要:** 利用复合材料封装光纤 Bragg 光栅(FBG)设计制作了用于测量高速碰撞或爆炸与冲击作用下混凝土内部动态应变的 FBG 应变传感器。在霍普金森压杆上对 FBG 在封装前的裸光栅和封装后的 FBG 传感器分别进行了高速冲击试验, 试验表明: 设计的 FBG 传感器的瞬态响应上升时间小于 20  $\mu\text{s}$ , 具有良好的动态响应特性, 可以用于工程中混凝土结构内高速冲击下的动态应变测试。

**关键词:** 光纤 Bragg 光栅(FBG); 爆炸与冲击; 霍普金森压杆; 动态应变

**中图分类号:** TP212.14 **文献标识码:** A

## Shock test for a fiber Bragg grating strain sensor on a SHPB

YANG Ji-xiang<sup>1,2</sup>, YU Shang-jiang<sup>2</sup>, CHEN Xian<sup>2</sup>

(1. School of Power and Mechanical Engineering, Wuhan University, Wuhan 430072, China;

2. The Third Engineers Reserch Institute of the Headquarters of the General Staff, PLA, Luoyang 471023, China)

**Abstract:** A FBG strain sensor packaged with carbon fibre reinforced polymer was developed, it could be used to measure dynamic strain in concrete under high-speed impact or explosion and shock. On a split Hopkinson pressure bar with a FBG strain sensor, high-speed impact tests were conducted. The results indicated that the transient response rise time of the FBG sensor is less than 20  $\mu\text{s}$ , the sensor has good dynamic response characteristics, it can be used to measure the dynamic strain in concrete structures under high-speed impact.

**Key words:** fiber Bragg grating (FBG); explosion and shock; split Hopkinson pressure bar (SHPB); dynamic strain

混凝土材料内部的应力应变是混凝土材料动态性能试验和混凝土结构动态响应分析所需要测试的一个重要内容, 当前在防护工程中的侵彻、爆炸效应研究、战场毁伤评估中需要解决混凝土中动态应力应变测试技术<sup>[1]</sup>, 而为了获得混凝土内部动态应变的信息就必须借助于埋置于混凝土结构内的传感器。由于混凝土内部的测量环境很复杂, 对传感器的各项性能要求很高。而光纤 Bragg 光栅(Fiber Bragg Grating, FBG)作为一种无源光电子器件, 具有可靠性好, 抗电磁干扰、体积小、重量轻、寿命长、便于复用/解复用、远距离传输、耐腐蚀、能在复杂恶劣的环境下工作等优点, 在光纤通信和传感领域已经得到广泛的关注<sup>[2]</sup>。基于 FBG 的优越特性, 我们采用碳纤维复合材料(CFRP)对 FBG 进行了封装, 制成了用于埋入混凝土内测量动态应变的传感器。为了验证设计的传感器在爆炸与冲击荷载作用下的工作可靠性, 在霍普金森压杆上进行了冲击试验。对 FBG 在封装前的裸光栅和封装后制作的 FBG 应变

传感器的高速冲击试验结果表明, 利用 CFRP 封装制成的 FBG 应变传感器具有良好的动态响应特性, 可以用于高速冲击环境下的混凝土结构内部的动态应变测量。

## 1 FBG 应变传感器

### 1.1 FBG 应变传感器的设计

FBG 应变传感器是埋入混凝土结构内进行应变测量的, 如果光纤传感器的弹性模量、泊松比和线膨胀系数与混凝土的不一致, 光纤传感器的埋入, 势必破坏混凝土的连续性, 导致光纤传感器所在处混凝土的应力集中<sup>[3]</sup>。因此在传感器的封装结构设计时必须考虑以下因素: 封装材料的弹性模量、泊松比和线膨胀系数与混凝土的一致或者接近; 封装材料应具有一定的强度, 以保护光栅在混凝土施工过程中不易损坏; 封装材料能够可以和混凝土材料可靠粘接; 封装材料本身能够保护传感光栅不受环境(如潮湿、酸碱的腐蚀等)侵蚀; 选择合适的封装结构和尺寸, 使其埋入后不影响结构的应力状态和分布; 封装结构应简单易于加工, 便于校准和安装埋设定位; 传感器能够经受施工现场的恶劣

环境(如混凝土浇筑时振捣棒的振动),以及传输光纤从试件中引出时的保护。

CFRP 是一种非常优秀的强化材料,其比强度、比模量远比通常的材料高,CFRP 强化环氧树脂除了由于 CFRP 的强化获得很高的弹模外,还能非常方便的应用到土木工程中,它可以方便的粘贴在混凝土基体的表面,或者埋入到混凝土中而与混凝土材料良好的匹配。而且碳纤维复合材料在密度、弹性模量等力学性质方面与混凝土材料比较接近<sup>[4]</sup>。经过多次试验和比较,考虑封装结构的加工性能以及传感器的校准方便性等方面的因素,确定 CFRP 作为光纤光栅传感器封装材料。确定的 FBG 应变传感器的结构示意图如图 1 所示。FBG 外均匀包覆一层环氧树脂材料,碳纤维均匀

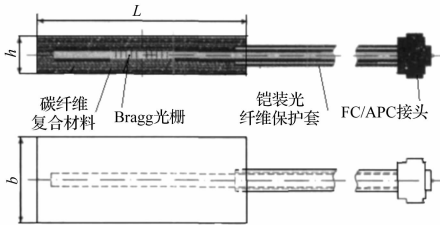


图1 FBG 传感器结构示意图

Fig. 1 The schematic diagram of the FBG sensors

地分布在环氧树脂中。FBG 熔接在具有铠装保护套的光纤上,由封装结构一端引出,引出头连接有标准接口。设计的 FBG 应变传感器的主要技术指标如下:

量程范围	$> \pm 4\ 000\ \mu\epsilon$
线性度	$\leq 1\%$
回差	$\leq 0.5\%$
重复性	$\leq 0.5\%$
瞬态响应上升时间	$< 20\ \mu\text{s}$

## 1.2 FBG 的应变传感原理

光纤光栅是利用光纤材料的光敏性,在纤芯内形成空间相位光栅,其实质作用是在纤芯内形成一个窄带的(透射或反射)滤波器或反射镜<sup>[5]</sup>。FBG 的折射率呈固定的周期性调制分布,光栅波矢方向与光纤轴线方向一致。当光经过 FBG 时,根据模式耦合理论可知,当入射光的波长使得来自各光栅条纹的反射满足谐振加强条件时,光栅对入射光的反射率达到最大值,反射的峰值波长  $\lambda_B$  满足 Bragg 条件:

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

式中:  $n_{\text{eff}}$  为有效折射率,  $\Lambda$  为光栅周期;

当传感光纤光栅周围的应力应变发生变化时,由 Bragg 光栅引起的反射光峰值波长产生偏移,偏移量由下式确定:

$$\Delta\lambda_B = 2\Delta n_{\text{eff}} \cdot \Lambda + 2n_{\text{eff}} \cdot \Delta\Lambda \quad (2)$$

式中:  $\Delta n_{\text{eff}}$ 、 $\Delta\Lambda$  为应力变化引起的有效折射率和光栅周期的改变量值,其变化大小与光纤光栅的本身特性及受力状态有关。由光弹理论可以导出 Bragg 光栅波

长的变化<sup>[6]</sup>:

$$\Delta\lambda_B = (1 - P_e)\lambda_B\epsilon \quad (3)$$

式中:  $P_e$  为光纤有效弹光系数,  $\epsilon$  为光纤光栅所感测的轴向应变。

将式(3)变形得

$$\epsilon(t) = \frac{1}{(1 - P_e)\lambda_B}\Delta\lambda_B(t) \quad (4)$$

可见,通过检测  $\Delta\lambda_B$  的变化,即可测得作用于光纤上的应变  $\epsilon$  的大小。

## 1.3 FBG 波长的高速解调原理

对 FBG 波长的变化进行解调采用的是线性边带滤波的方法,其高速解调器的原理框图如图 2 所示,图中 PIN1、PIN2 表示由 PIN 光电二极管组成的光电探测器,宽带光源发出的光由 3 dB 耦合器 1 进入光纤光栅传感器,其中波长满足 Bragg 条件的光被传感光栅反射后返回耦合器 1,耦合器 1 的出射光经另一 3 dB 耦合器 2 后分为强度相等的两束,一束直接通过光电探测变成电信号,再经前置放大器和低通滤波器后作为系统的参考信号,另一束,经线性边缘滤波器,再经光电转换及放大、滤波后输出。由此通过光电转换将波长变化的光信号转变为易于观测的电信号。

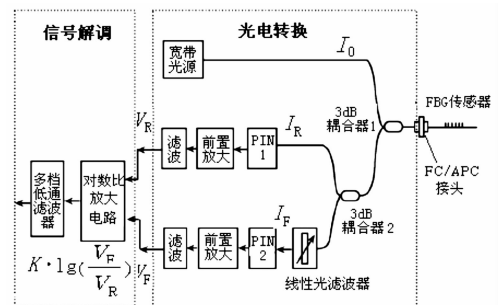


图2 高速解调器的原理图

Fig. 2 The principle of the high speed demodulator

## 2 FBG 应变传感器在 SHPB 上的冲击试验

### 2.1 试验方法

FBG 是制作 FBG 应变传感器的敏感元件,为检验 FBG 在封装前后对高频冲击信号的响应能力,我们将未封装的 FBG 和封装后制作的 FBG 应变传感器分别在分离式霍普金森压杆装置上进行了冲击试验研究。分离式霍普金森杆(Split Hopkinson Pressure Bar,简称 SHPB)是在材料动力学试验中广泛使用并被认为是能够有效的测试材料在高应变率下动态力学性能的实验装置。典型的 SHPB 装置由加载驱动装置、子弹(也称撞击杆)、压杆、测速系统、动态应变测量及数据采集存储系统组成,其中压杆包括入射杆、透射杆和吸收杆,装置示意图如图 3 所示。通过子弹以某一速度撞击入射杆,在杆中产生一个弹性波,弹性波向前传播通过试

样时,试样发生变形,并在入射杆中产生一个往回的反射波,在透射杆中产生一个向前的透射波。通过对入射杆和透射杆上的应变测试,应用弹性波理论就可以测出试样的应力-应变曲线。

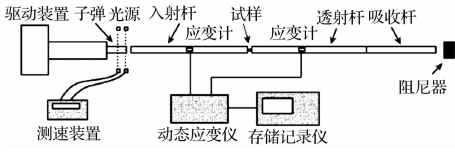


图 3 分离式霍普金森压杆试验装置示意图

Fig. 3 The schematic diagram of the SHPB

试验是在  $\Phi 100$  mm 的霍普金森压杆装置上进行的。子弹撞击入射杆产生冲击信号,入射杆上的 FBG 或者 FBG 应变传感器和电阻应变计同时响应冲击弹性波在杆上引起的应变信号,其中应变计的输出经宽带动态应变放大器放大,FBG 的输出由高速解调仪解调,应变放大器和解调仪的输出通过数字存储示波器记录。由于选择的应变计的频率响应能力足够,应变放大器的带宽足够宽,因此可以将应变计的响应输出看

作标准信号。

为了在霍普金森压杆上产生不同上升时间的脉冲信号,试验中利用了入射波整形技术<sup>[7]</sup>。入射波整形技术是在入射杆的撞击端粘上一个小直径的波形整形器,撞击杆在碰撞加载过程中先撞击整形器,整形器的塑性变形使传入到入射杆中的加载波波形发生变化。改变整形器的材料和尺寸,可以调整输入波的形状。波形整形技术,可以延长入射脉冲的上升沿,让试件有足够的时间达到应力均匀,除此之外还可以平滑波形,消除应力波的高频振荡<sup>[8]</sup>。本试验利用入射波整形技术,使入射杆上的脉冲信号的上升时间的变化范围为  $20\mu\text{s} \sim 500\mu\text{s}$ 。

2.2 未封装的 FBG 的冲击试验

将 FBG 和电阻应变计粘贴于入射杆轴向上的同一位置,经过不断调整脉冲信号上升时间,得到了不同上升时间的 FBG 和应变计的输出波形,共对四只光纤光栅进行了约 80 个炮次的冲击,得到的波形如图 4 所示。波形图中,为了便于与应变计的输出比较,FBG 的输出根据校准数据换算为应变值。

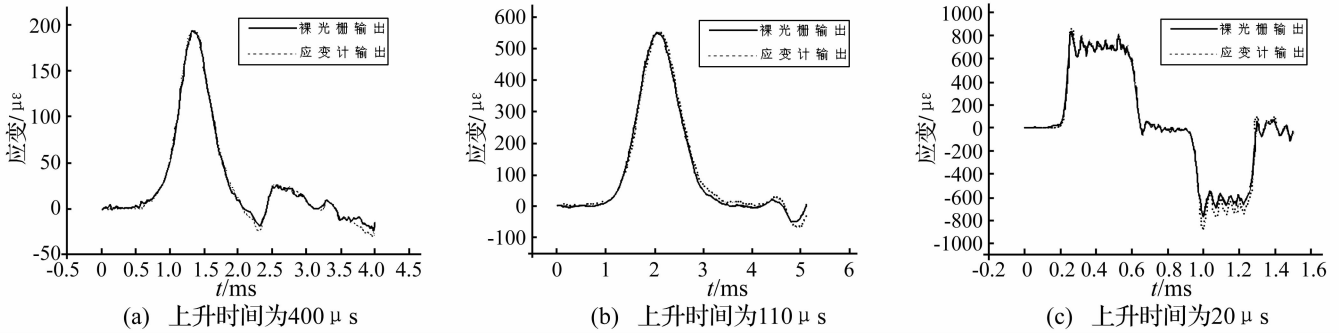


图 4 不同上升时间光栅和应变计的输出比较图

Fig. 4 Compared with output of the FBG and strain gauge at the different rise time

2.3 FBG 应变传感器的冲击试验

由于设计的 FBG 应变传感器为片式结构,为将传感器粘贴于霍普金森压杆上,我们专门另外加工了一个压杆,在杆上铣了一个比 FBG 传感器面积稍大一点的平面。FBG 应变传感器用 502 快干胶粘贴在霍普金森压杆上,也在杆上的相应位置粘贴电阻应变计,比较光纤传感器与应变计的输出,其试验照片如图 5 所示。经过多炮次的冲击,得到了不同上升时间的 FBG 传感

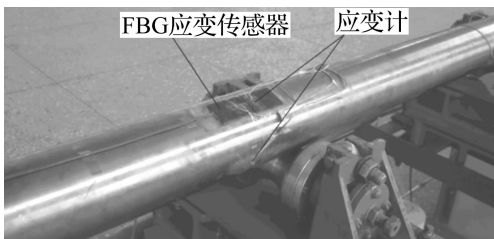
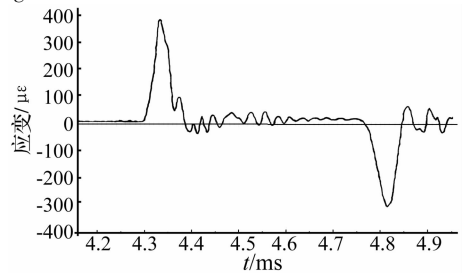
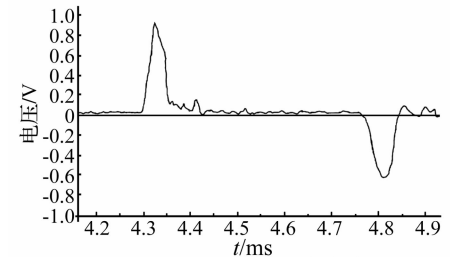


图 5 FBG 传感器在霍普金森压杆上动态性能试验照片

Fig. 5 The experimental photo of FBG sensors on the SHPB



(a) 应变计响应波形



(b) FBG 传感器响应波形

图 6 FBG 传感器与应变计的响应比较

Fig. 6 Compared with response of the FBG sensors and strain gauge

## 4 结论

本文给出了随机激励下响应均方根的参数灵敏度表达式,并将其应用于实际汽车工程中的平顺性优化,算例表明当系统路径参数较多时,该方法能迅速地选择关键参数,大大简化随机振动的优化设计过程,优化效果明显。

### 参考文献

- [1] Kim S, Singh R. Vibration transmission through an isolator modeled by continuous system theory [J]. Journal of Sound and Vibration, 2001, 248(5):925-953.
- [2] Singh R, Kim S. Examination of multi-dimensional vibration isolation measures and their correlation to sound radiation over a broad frequency range [J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 262(3):419-455.
- [3] Dubbaka K R, ZWENG F J, Haq S U. Application of noise path target setting using the technique of transfer path analysis[J]. SAE Paper, 2003-01-1402.
- [4] 张义民,李鹤,闻邦椿,等.基于灵敏度的振动传递路径的

参数贡献度分析[J].机械工程学报,2008,44(10):168-171.

- [5] 张义民,赵薇.具有直线与摇摆耦合运动的振动传递路径系统的参数灵敏度分析[J].噪声与振动控制,2008,28(6):35-38,62.
- [6] 赵薇,张义民.具有随机路径的振动传递路径系统的随机响应分析[J].振动与冲击,2009,28(2):99-101,116.
- [7] 林家浩,张亚辉.随机振动的虚拟激励法[M].北京:科学出版社,2004.
- [8] 周密.基于虚拟激励法的汽车平顺性仿真[D].长春:吉林大学,2008,4.
- [9] 胡海岩.机械振动与冲击[M].北京:航空工业出版社,2002.
- [10] Vetter W J. Matrix calculus operations and taylor expansions [J]. SIAM Review,1973,15(2):359.
- [11] 庄表中.结构随机振动[M].北京:国防工业出版社,1995.
- [12] 曹立文.基于道路友好性的货车平顺性研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2001,07.
- [13] 余志生.汽车理论[M].北京:机械工业出版社,2004:170-213.

(上接第63页)

器的响应波形,图6所示为主频是43 kHz的FBG传感器与应变计的响应波形图。

### 2.4 试验结果

由于我们的霍普金森压杆直径较大( $\Phi 100$  mm),不易产生更快上升时间的脉冲信号,因此未能在更高频率下对传感器的动态性能进行试验。通过对图4和图6的波形分析可以得出:

(1)从图4中可以看出,FBG和应变计的响应波形形状和上升时间完全一致,FBG可以对上升时间为20  $\mu$ s的脉冲信号进行响应,信号未产生延迟或畸变。

(2)图6所示的波形为在霍普金森压杆产生的脉冲上升时间约为20  $\mu$ s的三角波时,FBG光纤传感器的响应与电阻应变计响应的比较。从图中可以看出,FBG光纤传感器与杆上应变计的响应波形形状和上升时间完全一致,通过对这两个信号进行FFT分析发现,两个信号的主频均为43 kHz。这说明FBG光纤传感器能够对这种频率较高的信号正确响应,未产生延迟或畸变。

(3)从图4中FBG在封装前的裸光栅的响应波形和图6中封装后的FBG应变传感器的响应波形可以看出,封装材料并没有对FBG的动态响应特性造成影响,二者都可以对上升时间为20  $\mu$ s的脉冲信号进行正确响应,碳纤维复合材料对FBG进行了很好的保护,更适合于高速冲击环境下的混凝土结构内部的动态应变测量。

## 3 结论

本次试验利用FBG和用复合材料封装的FBG应变传感器在霍普金森压杆上进行了多炮次的高速冲击试验,通过试验可以得知,封装前后没有改变FBG的传感特性,且设计的FBG传感器的瞬态响应上升时间小于20  $\mu$ s,具有良好的动态响应特性,可以用于工程中混凝土结构内高速冲击下的动态应变测试。

### 参考文献

- [1] 李晓军,张殿臣,李清献.常规武器破坏效应与工程防护技术[M].洛阳:总参工程兵科研三所,2001.
- [2] 申人升,于永森,张金,等.薄壁应变筒式光纤光栅压力传感器的研究[J].光电子·激光,2008,19(11):1433-1436.
- [3] 赵廷超,黄尚廉,陈伟民,等.光纤传感器在混凝土结构内应力检测中的应用[J].压电与声光,1996,18(6):394-399.
- [4] 王勃.FRP加筋混凝土梁的力学与自感知性能研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2004.
- [5] 李川,张以馍,赵永贵,等.光纤光栅:原理、技术与传感应用[M].北京:科学出版社,2005.
- [6] Kuang K S C, Kenny R, Whelan M P, et al. Embedded fibre bragg grating sensors in advanced composite materials [J]. Composites Science and Technology, 2001, 61:1379-1387.
- [7] 王晓燕.分离式霍普金森压杆实验端面摩擦效应研究[D].长沙:国防科学技术大学,2004.
- [8] 李为民,许金余,沈刘军,等. $\Phi 100$  mm SHPB应力均匀及恒应变率加载试验技术研究[J].振动与冲击,2008,27(2):129-132.