

文章编号 1004-924X(2009)03-0488-05

光纤光栅在低阻抗材料动态性能测试中的应用

王 为, 林玉池, 朱萍玉

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室, 天津 300072)

摘要:研究了光纤 Bragg 光栅在材料性能测试方面的应用。介绍了基于分离式霍布金森压杆(SHPB)的低阻抗材料动态性能测试的原理,探讨了光纤光栅传感器用于 SHPB 实验装置中进行应变测试的相关问题。推导了低阻抗弹性杆中传播的应力波与光纤光栅传感器的波长漂移量之间的关系式,构建了光纤光栅高频动态应变测试系统,对 SHPB 实验装置中被撞击弹性杆的表面应变进行了测试,并与现有仪器进行了对比。实验结果显示,构建的光纤光栅动态应变测试系统在 10 kHz 的频率范围内,具有 40 dB 的信噪比。研究表明,光纤光栅在低阻抗材料的动态性能测试中具有很好的应用前景。

关键词:光纤 Bragg 光栅;低阻抗材料;分离式霍布金森压杆;动态解调

中图分类号:TN253;O482.526 **文献标识码:**A

Application of FBG sensor to measurement of dynamic performance of low impedance material

WANG Wei, LIN Yu-chi, ZHU Ping-yu

(*State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments, Tianjin University, Tianjin 300072, China*)

Abstract: The application of Fiber Bragg Grating(FBG) sensor to measurement of material property is researched. The principle of Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB) for dynamic performance measurement of low impedance material is introduced and the problems related to the application of FBG sensor in SHPB for strain testing are discussed. The relation between the strain wave propagating in elastic bar of low impedance material and the wavelength shift is derived. Then, the interrogation system for high frequency dynamic strain measurement based on FBG is set up and the surface strain of elastic bar in SHPB is measured with the interrogation system and compared with the instrument PI02-04. The experimental results show that the interrogation system has good performance during 10 kHz and its signal-to-noise is about 40 dB. Research results prove that FBG sensor has a good application prospect in the dynamic performance measurement of low impedance material.

Key words: Fiber Bragg Grating (FBG); low impedance material; Split Hopkinson Pressure Bar (SHPB); dynamic demodulation

收稿日期:2008-04-22;修订日期:2008-11-18.

基金项目:教育部博士点专项科研基金资助项目(No. 2003006017)

1 引言

光纤光栅是最近几年发展最为迅速的光纤无源器件之一,具有体积小,防腐蚀,不受电磁干扰,测量信号不受光源起伏、光纤弯曲损耗、连接损耗等因素影响,能实现绝对测量以及具有很强的复用能力等特点^[1]。将光纤光栅传感器用于材料性能测试是近年来光纤光栅传感应用研究的重点,特别是伴随着智能结构和新型复合材料的发展,光纤光栅在复合材料的健康监测和损伤探测等方面的研究得到了广泛的关注。如日本产业技术综合研究所(AIST)的 Hiroshi Tsuda 等人将光纤 Bragg 光栅用于复合材料结构的超声探伤,以取代传统的压电陶瓷传感器,实验中用可调窄带激光器配合传感光纤光栅检测复合材料 CFRP 表面传输的超声波^[2-3],结果显示该传感系统能很好地用于超声探伤领域。

目前,将光纤光栅用于低阻抗材料动态性能的测试很少有研究。传统的低阻抗材料性能的测试运用的是基于分离式霍布金逊压杆(SHPB)的实验装置,通过施加定量的延长时间和脉冲宽度的应力波,以对低阻抗材料的试样进行多次(至少有3次应力波在试件内反射)加载,达到内部应力平衡的效果。而目前常用的检测传感器是应变计,该传感器容易受电磁干扰,且寿命较短。特别是在较恶劣环境下使用,更显不足。本文结合 SHPB 实验装置和光纤光栅的特点,提出一种基于光纤光栅的 SHPB 弹性杆应力波测试方法,并进行了实验研究。

2 低阻抗材料动态性能测试原理

2.1 SHPB 应变测试原理

自1949年 Koslsky 首先提出 Hopkinson 技术以来^[4],人们对于在 $10^1 \sim 10^4/s$ 应变率下的材料的动态力学性能的研究普遍采用 SHPB 或其变形装置。SHPB 技术是利用两根弹性长杆,即输入杆和输出杆,试样夹在两杆中间,借助高压由冲锤高速撞击输入杆产生的应力波对试样进行加载,如图1所示。

其基本原理是一维应力波理论。在输入杆、输出杆上的传感器,可以测得输入杆上由于应力

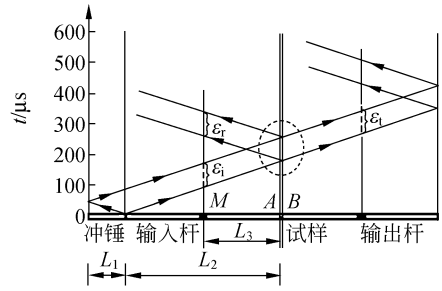


图1 输入、输出杆和试样中应力波与时间的关系图
Fig.1 Relation graph of strain wave and time between input, output bar and specimen

波作用而产生的入射应变脉冲 $\epsilon_i(t)$ 及反射应变脉冲 $\epsilon_r(t)$ 和输出杆上透射应变脉冲 $\epsilon_t(t)$ 。弹性杆中任一点的应变满足一维波动方程:

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

当试样两端面 A、B 受力相等时,试样内部各处的应力应变处于均匀状态,有:

$$\epsilon_i(t) + \epsilon_r(t) = \epsilon_t(t) \quad (2)$$

当输入杆与撞击杆材料相同时,冲锤的长度决定入射应力脉冲 $\epsilon_i(t)$ 的宽度 λ_i ,冲锤直径 d 应远小于这个宽度,以保证输入杆中一维应力波的传播,而不产生横向效应^[5],即:

$$d \ll \lambda_i = 2L_1 \quad (3)$$

应力脉冲的持续时间 τ 为:

$$\tau > 2L_1/c \quad (4)$$

式中, c 为弹性杆中纵向波速 ($c = \sqrt{E/\rho}$),不同材料的 c 值不同。要得到完整的应力波形,所用信号采集系统的频率下限由此时间计算。满足式(4)的时间测试条件时,通过输入杆上的 B 点可测得该点的应变并间接计算出材料性能研究所需的应力-应变关系曲线^[6],即输入杆对试件的加载曲线。入射波在入射杆中经历一次后反射波到达测点 M 的时间 t_1 为:

$$t_1 = (L_2 + L_3)/c \quad (5)$$

式中, L_2 为输出杆的长度。

2.2 基于光纤光栅的测试系统原理

光纤 Bragg 光栅是波长型传感器,当宽带光源进入光纤光栅时,其反射光是一窄带光信号,其中心波长满足如下条件:

$$\lambda_B = 2n_{\text{eff}}\Lambda \quad (6)$$

式中, n_{eff} 是纤芯有效折射率; Λ 为光纤周期。当

光纤光栅受到外界物理量如应变作用时,其中心波长将发生漂移,通过分析可知应变与光纤光栅波长漂移量的关系为^[7]:

$$\varepsilon(t) = \frac{1}{(1-P_e)\lambda_B} \Delta\lambda_B, \quad (7)$$

式中, P_e 为有效弹光系数。该式建立了 SHPB 被撞弹性杆上应变与光纤光栅传感器的波长变换量间的关系。

从式(7)可以看出,为了能检测材料的动态性能,必须构建一套光纤光栅波长解调系统。由于撞击产生的应变为高频动态信号,故系统采用了干涉解调法,配合相位载波技术(PGC)实现光纤光栅的波长解调^[8-9],具体原理如图 2 所示。非平衡 M-Z 干涉仪的一臂缠有被频率为 ω_0 的正弦信号调制的压电陶瓷。当 FBG 的波长发生漂移时,通过干涉仪后将产生相位差。经相位载波技术解调相位差信号,解调系统积分器的输出为: $K^2GHJ_1(C)J_2(C)(\varphi + \Psi)$; 其中 K 与输入光源的功率有关, $J_1(C)$ 和 $J_2(C)$ 为 Bessel 系数, φ 为波长漂移引起的相位差, Ψ 为系统的随机相位差,可以通过高通滤波去除。而由于干涉仪原理可知波长漂移引起的相位差和波长漂移量是成线性关系的,结合式(7)可知图 2 所建立的解调系统实现了被撞弹性杆的动态应变测量。

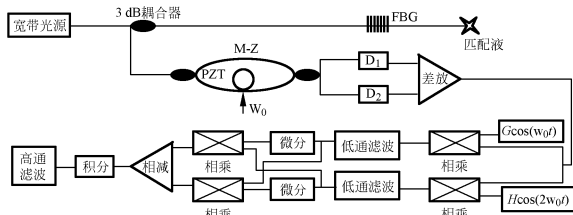


图 2 基于 PGC 的检测系统解调原理图

Fig. 2 Interrogation schematic diagram based on PGC

3 测试系统及测试结果

3.1 测试系统

基于光纤光栅的低阻抗材料动态性能测试系统如图 3 所示。测试系统由冲锤、测速仪、输入杆、输出杆、光纤光栅传感器、宽带光源、光纤光栅解调系统、Nicolet Odyssey 波形记录仪等组成。测试系统输入杆中不同速度的应力波产生不同频率的应变源信号。由于等径弹性杆撞击产生的应

力波是标准的矩形,频率成分非常丰富,故实验中将冲锤和输入杆的直径保持一致以便于验证解调系统。

测试系统中所设计的基于相位载波技术的光纤光栅波长解调系统能解调信号的上限频率为 10 kHz, Nicolet Odyssey 波形记录分析仪的采样频率可达 10 MHz; 为了对比,实验中还同时运用当前国内比较先进的动态光纤光栅解调设备即品傲光电的 PI02-04 型光纤光栅解调仪对应力波信号进行测量。测试系统中,用于检测的低阻抗材料为 40Cr 钢性材料,输入杆的直径和长度为: $\Phi 35$ mm 和 1 200 mm; 用于驱动冲锤的压缩空气的压强为 0.1 MPa; 冲锤和输入杆的间距为 90 mm。

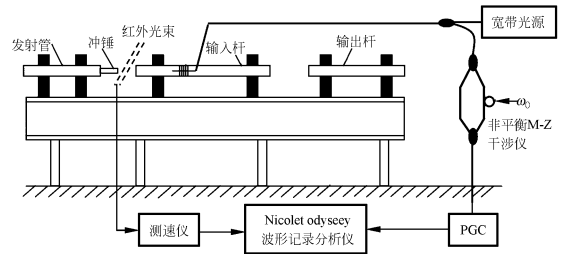


图 3 低阻抗材料动态性能测试原理图

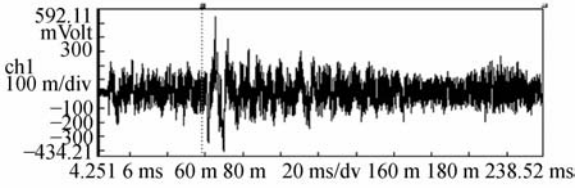
Fig. 3 Schematic diagram of dynamic performance testing of low impedance material

3.2 测试结果分析

测试实验在上述的实验参数和条件下,用设计的解调系统和品傲光电的 PI02-04 解调系统同时检测应力波。品傲光电 PI02-04 是实验室定制的用于动态信号检测的光纤光栅解调设备,该设备单通道具有 12.5 kHz 的采样频率。实验检测的时域信号和运用 OriginPro 软件分析的功率谱信号如图 4 所示。

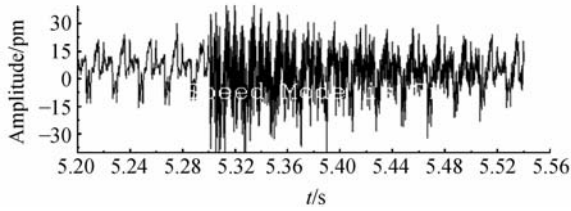
图 4(a)和(b)为设计的解调系统通过 Nicolet Odyssey 采集仪采集到的弹性杆表面应变信号的时域图和 PI02-04 光纤光栅解调系统检测到的应变信号时域图,从实验结果可以看出两种解调系统检测到的信号的持续时间均大约为 230 ms。

图 4(c)和(d)为设计的解调系统和 PI02-04 光纤光栅解调系统检测到的时域信号通过 Originpro 软件分析得到的对应的功率谱图。从分析结果可以看出,两种解调系统均是以 1 700 Hz 为基频的倍频信号叠加,这正是等径杆撞击实验中



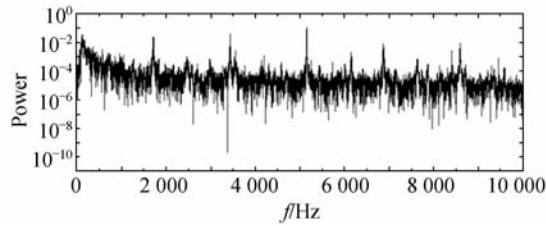
(a) PGC 检测的时域信号

(a) Time-domain signal detected by PGC



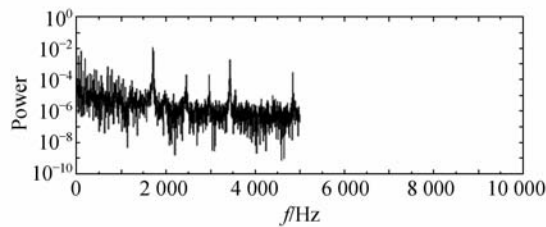
(b) PI02-04 检测的时域信号

(b) Time-domain signal detected by PI02-04



(c) PGC 检测的频域信号

(c) Frequency spectrum of signal detected by PGC



(d) PI02-04 检测的频域信号

(d) Frequency spectrum of signal detected by PI02-04

图4 低阻抗材料动态性能测试结果

Fig. 4 Experiment results of dynamic performance testing of low impedance material

产生的应力波为方波的体现。另外,由于PI02-04解调系统的检测频率范围较低,使得在5 kHz以后就没有了信号,这体现出设计的解调系统在频率方面的优势;但在信噪比方面,PI02-04检测信号的信噪比约为50 dB,设计的解调系统检测信号的信噪比约为40 dB,显示出PI02-04在抑制噪声方面的优势。

4 结 论

本文论述了基于SHPB的低阻抗材料动态性能测试原理,并将光纤光栅传感器引入低阻抗材料动态性能检测中。实验结果显示,构建的光纤光栅低阻抗材料动态性能测试系统在10 kHz的范围内具有40 dB的信噪比。研究表明,光纤光栅在低阻抗材料性能检测方面有着广阔的前景。

从实验结果还可以看出,设计的解调系统存在着频率范围有限、信噪比不够理想等不足,这也正是下一步需研究的方向。对于频率范围的限制可以通过提高缠绕于干涉仪上压电陶瓷的调制信号的频率或采用其他的动态解调方法如结合干涉仪和 3×3 耦合器的解调方法来解决;而解调系统的噪声主要来源于外界环境对干涉仪的干扰和解调系统中模拟电路的不稳定,因此可以通过添加参考光纤光栅和实现数字化电信号处理等方法提高系统的信噪比。总之,光纤光栅传感器应用于低阻抗材料性能测试,将代替传统的电阻应变片,为材料性能测试提供一种更加有效的方法。

参考文献:

- [1] 李丽,林玉池,付鲁华,等. 光纤光栅空分光复用传感系统的研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(4): 473-477.
LI L, LIN Y CH, FU L H, et al.. Research on spa-

tial division multiplexing of fiber Bragg grating sensors[J]. *Opt. Precision Eng.*, 2007, 15(4): 473-477. (in Chinese)

- [2] TSUDA H. Ultrasound and damage detection in CFRP using fiber Bragg grating sensors[J]. *Composites Science and Technology*, 2006(66): 676-

683.

- [3] LEE J R, TSUDA H, TOYAMA N. Impact wave and damage detections using a strain-free fiber Bragg grating ultrasonic receiver[J]. *NDT&E International*, 2007(40):85-93.
- [4] KOSLSKY Y H. An investigation of the mechanical properties of materials at very high rates of loading[J]. *Proc Phys. Soc. London*, 1949(62):676-700.
- [5] LO Y, 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.
- [6] 刘德顺, 朱萍玉, 彭佑多, 等. 冲击载荷下弹性杆端的作用—位移关系曲线的一点应变测试法[J]. 湘潭矿业学院学报, 2000, 15(2):18-22.
- LIU D SH, ZHU P Y, PENG Y D, *et al.*. A meth-

- od for determination of dynamic force-displacement curve from one-point strain measurement on an elastic rod endface [J]. *Journal of Xiangtan Mining Institute*, 2000, 15(2):18-22. (in Chinese)
- [7] MOREY A W, MELTZ G, GLENN W. Fiber optic Bragg grating sensors [J]. *Fiber Optic Lasers Sensors VII*, 1989, 1169:98-107.
- [8] KERSEY A D, BERKOFF T A, MOREY W. High-resolution fiber-grating based strain sensor with interferometric wavelength-shift detection [J]. *Electron Lett.*, 1992, 28(3):236-238.
- [9] DANDRIDGE A, TVETEN A, GIALLORENZI T. Homodyne demodulation scheme for fiber optical sensors using phase generated carrier [J]. *IEEE. Journal of Quantum Electronics*, 1982, 18(10):1647-1655.

作者简介:



王 为(1980—),男,博士研究生,主要从事光纤传感及检测技术的研究。E-mail: wangweivip@tju.edu.cn



朱萍玉(1971—),女,湖北钟祥人,博士,教授,2003年于中南大学获得博士学位,主要从事光纤传感技术及应用、工程测试及信号处理的教学和科研工作。E-mail: zhu.pingyu@gmail.com

导师简介:



林玉池(1946—),男,教授,博士生导师,主要从事光电检测及可视化检测技术的研究。E-mail: ychlin@tju.edu.cn