DOI: 10.11883/1001-1455(2015)02-0191-06

测量炸药旁侧爆轰波速度的啁啾光纤布拉格光栅传感器技术*

邓向阳,刘寿先,彭其先,李泽仁,陈光华,蒙建华
(中国工程物理研究院流体物理研究所,四川 绵阳 621999)

摘要:提出了一种适用于啁啾光纤布拉格光栅 CFBG(chirped fiber Bragg grating)传感器测量爆轰波速度的实验公式,该公式考虑了 ASE(amplified spontaneous emission)光源的光谱、CFBG 的平坦度对测量的影响;研究了 CFBG 的反射谱线宽与长度的理论关系,并设计了测量 CFBG 反射谱线宽的实验装置,从而可计算出 CFBG 长度。搭建了测量 CFBG 传感器系统常数的实验装置,并利用实验数据拟合了系统常数;用 CFBG 传感器测量了 RDX/TNT(60/40)的旁侧爆轰波速度,与其爆速有 3.4%的差异。

关键词:爆炸力学;啁啾光纤布拉格光栅传感器;反射谱;爆轰波速度;ASE 光源
中图分类号:O381;O436.1 **国标学科代码**:1303510 **文献标志码**:A

爆轰波速度作为炸药特性参数之一,对流体动力学计算程序定标[1]、化学动态燃烧模型[2]、火箭推进剂研究[3]、炸药的燃烧-爆轰过程研究[4]和不同炸药界面爆轰特性研究[5]具有重要的意义。此外,冲击波速度作为材料的动高压关键参数之一,对研究冲击波的传播规律、材料的动高压特性具有重要的作用[6]。

传统连续测量爆轰波/冲击波速度的方法为微波干涉法,利用从爆轰波阵面或冲击波阵面返回的信号与参考信号叠加,形成拍频信号,处理该拍频信号可得到爆轰波/冲击波的连续速度历史。该方法具有以下不足[7]:(1)仅适用于线性波导中的爆轰波/冲击波速度测量;(2)不能用于金属材料和某些液体材料中爆轰波/冲击波速度测量;(3)微波的焦斑尺寸较大(10 mm 左右),对材料中爆轰波/冲击波速度测量有较大的影响。近 10 年来,利用多普勒效应发展了连续测量冲击波速度的 FP 和 PDV 技术,但设备昂贵、很难测量超高速。光纤光栅作为最近 20 年发展最迅速的光纤无源器件之一,在传感器领域中具有十分广泛的应用,如应变、温度、压力、超声波、加速度、磁场和速度等的测量。啁啾光纤布拉格光栅(chirped fiber Bragg grating,CFBG)传感器利用爆轰波/冲击波作用在 CFBG 上,使光纤光栅的长度减小,使返回信号光幅度减弱的效应测量爆轰波/冲击波的连续速度。该方法具有以下的优点:(1)CFBG 的直径约 125 μm,可实现"原位"爆轰波/冲击波速度的连续测量;(2)具有抗电磁干扰能力强的优点;(3)可连续测量不同炸药、材料界面的爆轰波/冲击波的速度变化;(4)适用于任何炸药、材料中爆轰波/冲击波速度的连续测量。

E. Udd 等[8]率先用 CFBG 传感器连续测量冲击波速度,并申请了发明专利;J. Benterous 等[9]用 CFBG 传感器连续测量电爆炸桥丝在水中产生冲击波的速度;E. Udd 等[10]用 CFBG 传感器测量 Nitromethane 材料中爆轰波的传播速度;J. Benterous 等[11]用 CFBG 传感器测量 PBX 9502 炸药爆轰波速度。E. Udd 等[12-14]用 CFBG 传感器测量 C-3 detasheet 塑形炸药表面爆轰波速度。在我国,目前主要开展了低响应速度下应变、温度、压力和磁场等[15-17]测量技术研究,尚无用 CFBG 传感器连续测量爆轰波/冲击波速度的报导。

本文中,提出一种适用于 CFBG 传感器测量爆轰波速度的实验公式,该公式包含 ASE 光源和 CF-

* **收稿日期**:2013-06-28;**修回日期**:2013-11-19
基金项目:中国工程物理研究院科学技术发展基金项目(2011B0401008)
第一作者:邓向阳(1975—),男,硕士,副研究员,dxycaep@126.com。

BG 反射谱的平坦度对速度测量的影响;研究 CFBG 的反射谱线宽与长度的理论关系,设计测量 CFBG 反射谱线宽的实验装置,可计算出 CFBG 长度。搭建测量 CFBG 传感器的系统常数的实验装置,并利用实验数据拟合系统常数;测量 RDX/TNT(60/40)的旁侧爆轰波速度,验证 CFBG 传感器的有效性。

1 测量原理

图 1 给出了测量炸药爆轰波的 CFBG 传感器的结构示意图,ASE 光源辐射出的光束,经 3 端口光循环器的 1 端口,到 2 端口,进入 CFBG。满足布拉格反射条件的部分光被反射回来,经 3 端口光循环器的 2 端口到 3 端口,进入快响应探测器,被转换成电信号,并由数字示波器完成记录。

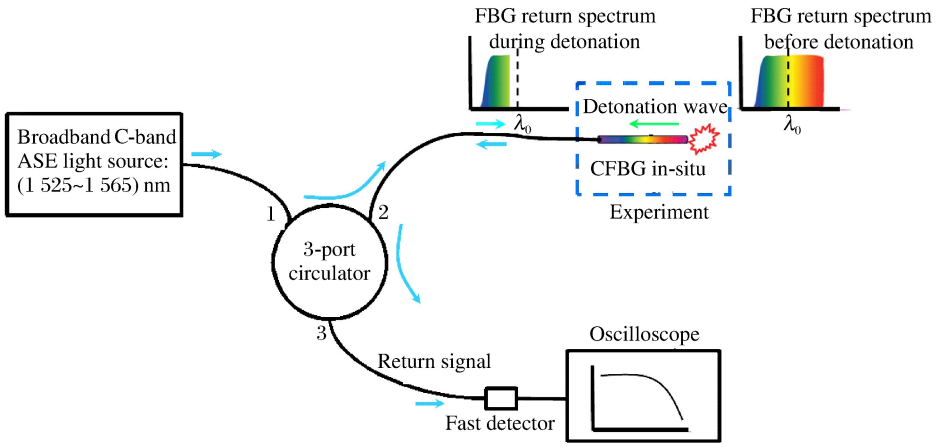

图 1 CFBG 传感器测量爆轰波速度的结构示意图

Fig. 1 Chirped fiber Bragg grating detonation velocity sensor system block diagram

测量爆轰波速度的 CFBG 传感器有一个假设:CFBG 埋在炸药内,由于它的芯径很小,一般约 125 μm,对炸药内爆轰波速度的影响可忽略不计,因此可认为 CFBG 测量的爆轰波速度即为炸药的爆轰波速度。当爆轰波在 CFBG 中传播时,CFBG 的周期结构会逐步被破坏,造成 CFBG 的长度变短。

对于 CFBG 传感器而言,数字示波器记录的信号与 CFBG 的长度有线性关系[14],因此可由数字示波器记录的信号计算爆轰波速度。

爆轰波速度 $D(t)$ 为:

$$D(t)=\frac{\mathrm{d}L(t)}{\mathrm{d}t} \tag{1}$$

式中:$L(t)$ 为光纤光栅在爆轰波作用下的瞬时长度。

示波器记录的随时间变化信号 $s(t)$ 与 ASE 宽光谱光源、探测器的增益和 CFBG 的反射率有关。光电探测器的线宽远大于 CFBG 的线宽,可认为在 CFBG 线宽范围内,光电探测器的增益可视为常数。因此,可将 $s(t)$ 表示为:

$$s(t)=K\int_{\lambda_1}^{\lambda(t)} S_{\mathrm{g}}(\lambda)\,S_{\mathrm{ASE}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda \tag{2}$$

式中:K 为一个常数,与光电探测器有关,$S_{\mathrm{g}}(\lambda)$ 为 CFBG 的反射谱,$S_{\mathrm{ASE}}(\lambda)$ 为 ASE 的光谱,λ_1 为 CFBG 的反射谱的波长下限,$\lambda(t)$ 为介于 CFBG 的反射谱的波长下限 λ_1、上限 λ_2 之间,与爆轰波/冲击波在 CFBG 中的传播相关。

对信号 $s(t)$ 进行归一化运算:

$$R(t)=\frac{s(t)}{s(0)}=\frac{K\int_{\lambda_1}^{\lambda(t)} S_{\mathrm{g}}(\lambda)\,S_{\mathrm{ASE}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda}{K\int_{\lambda_1}^{\lambda_2} S_{\mathrm{g}}(\lambda)\,S_{\mathrm{ASE}}(\lambda)\,\mathrm{d}\lambda} \tag{3}$$

式中:$R(t)$ 为归一化信号,$s(0)$ 为初始时刻的示波器记录的的幅度信号。

对式(1)进行有效变换：

$$D(t)=\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t}\Big/\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}L(t)} \tag{4}$$

并考虑到 $R(t)$ 与 $L(t)$ 的线性关系[14]：

$$R(t)=A+BL(t) \tag{5}$$

式中：A、B 为常数，与 CFBG 的长度、有效折射率、折射率调制深度和啁啾系数有密切的关系。

因此，爆轰波/冲击波的速度 $D(t)$ 为：

$$D(t)=\frac{A+BL_0}{B}\frac{\mathrm{d}R(t)}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

式中：L_0 为 CFBG 的初始长度。

2　CFBG 传感器的标定

由测量原理，获得爆轰波/冲击波的速度，需要先获得常数 L_0、A 和 B。

对于 CFBG 的长度测量，可通过测量 CFBG 的反射谱线宽，并利用相关公式计算获得。对于线性 CFBG，其长度周期 $\Lambda(z)$、有效折射率 $n_{\mathrm{eff}}(z)$ 分别为[12]：

$$\Lambda(z)=\Lambda_0+Cz \tag{7}$$

$$n_{\mathrm{eff}}(z)=n_0+\Delta n\cos(2\pi z/\Lambda(z)) \tag{8}$$

式中：Λ_0 为 CFBG 的起始位置的长度周期，C 为 CFBG 的啁啾率，n_0 为光纤光栅纤芯的平均折射率，Δn 为折射率调制，一般为 10^{-4} 量级。

CFBG 的中心反射波长与长度周期有关系：

$$\lambda(z)=2n_{\mathrm{eff}}\Lambda(z) \tag{9}$$

式中：$\lambda(z)$ 为光纤光栅不同位置处的布拉格反射波长。

对于非变迹 CFBG，线宽为[12]：

$$\Delta\lambda=2n_{\mathrm{eff}}[\Lambda(z_{\max})-\Lambda(z_{\min})] \tag{10}$$

式中：$z_{\max}$ 表示 CFBG 的末端位置，$z_{\min}$ 表示 CFBG 的末端位置。

对于长度为 L 的 CFBG，将式(7)～(9)代入式(10)，可得：

$$\Delta\lambda=2n_{\mathrm{eff}}CL \tag{11}$$

由式(11)，只需要测量 CFBG 的反射谱线，就可计算出光纤光栅的长度。

图 2 为测量 CFBG 的反射谱线宽的布局示意图。ASE 宽光谱光源辐射出的光束经 3 端口光循环器的 1 端口，到 2 端口，进入 CFBG。从 CFBG 返回来的部分光经 3 端口光循环器的 2 端口到 3 端口，并传入光谱仪进行光谱记录。

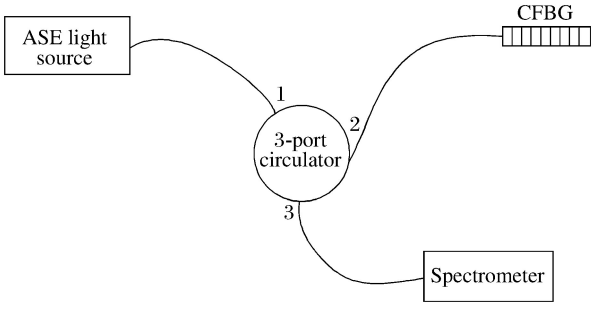

图 2　CFBG 的反射谱线宽测量示意图

Fig. 2　Configuration for measuring reflection spectrum of CFBG

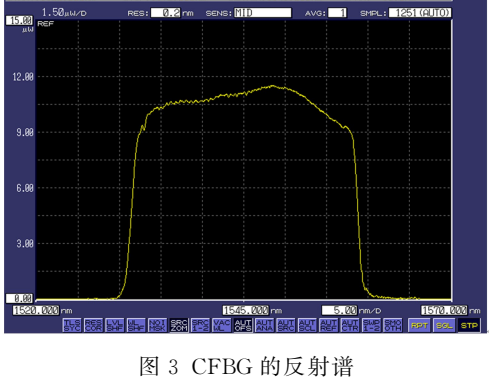

图 3　CFBG 的反射谱

Fig. 3　Reflection spectrum of CFBG

图 3 给出了光谱仪测量的 CFBG 的反射谱，其 3 dB 线宽为 28.5 nm。CFBG 的参数为：标称长度为 20 mm，纤芯的有效折射率为 1.446，啁啾系数为 5×10^{-7}，将这些值代入式(11)，可计算出 CFBG 的长度为 19.7 mm。

图 4 给出了 CFBG 传感器的常数 A 和 B 的测量布局图。ASE 宽光谱光源辐射出的光束经 3 端口光循环器的 1 端口，到 2 端口，进入 CFBG。从 CFBG 的末端位置开始，按一定的步长对 CFBG 进行切割。CFBG 返回来的部分光经 3 端口光循环器的 2 端口到 3 端口，并传入快探测器进行光信号记录。

切割 CFBG 的方法很多[14]，本文中采用一种简单、有效地方法：将 CFBG 固定在螺旋微调架上，可用螺旋调扭对切割步长进行调节。切割步长为 1 mm，相关的数据见图 5，对实验数据进行线性拟合，可得到：$A=0.017$，$B=0.054\ \text{mm}^{-1}$。

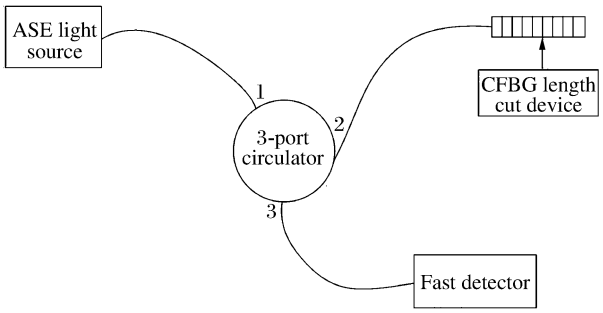

图 4 标定 CFBG 传感器常数的实验布局图

Fig. 4 Configuration for calibrating the constants of CFBG sensor

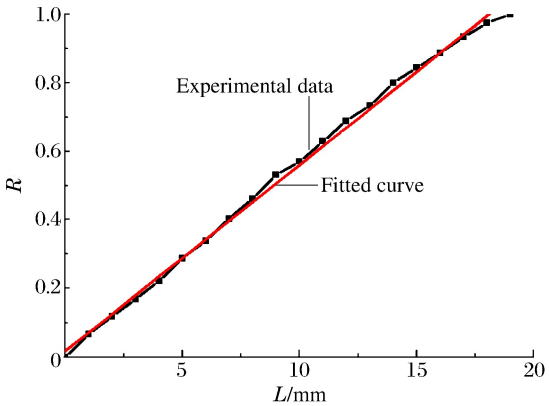

图 5 归一化信号与 CFBG 长度的关系

Fig. 5 Normalied signals vs CFBG length

3 炸药的旁侧爆轰波速度测量

用 CFBG 传感器测量炸药的旁侧爆轰波速度的实验布局如图 6 所示，雷管引爆传播药柱，CFBG 紧贴在传播药柱傍边。传爆药柱为 RDX/TNT(60/40)，其密度为 1.684 mg/cm^3，爆速(传爆药柱内的速度)为 7.786 mm/μs。图 7 为 CFBG 传感器的原始信号。

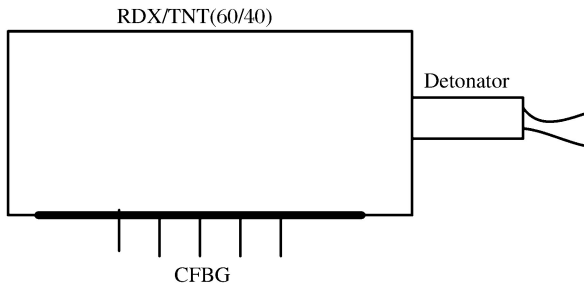

图 6 旁侧爆轰波速度测量的布局示意图

Fig. 6 Configuration for measuring side detonation velocity

图 8 给出了 RDX/TNT(60/40)的旁侧爆轰波的位移曲线，其平均速度为 7.52 mm/μs，与爆速 7.786 mm/μs有 3.4%的差异。该差异主要来源于两部分：(1)CFBG 传感器的测量精度。CFBG 传感器的测量精度主要受限于 CFBG 长度的测量、系统常数 A 和 B 的标定精度和 CFBG 的“尾端”效应等因素[11]，大量对比实验验证 CFBG 传感器的测量精度介于 1%～2%[10～14]；(2)炸药的旁侧爆轰波速度比炸药内部爆轰波速度低。相关实验已证实该关系，但目前无相关的定量关系报导，需要进一步开展研究工作。

CFBG 传感器实际得到的是爆轰波的位移曲线，从理论上讲，只需要微分就可以得到爆轰波的速度曲线，但由于实验数据存在一定的噪声，对微分带来了很大的影响，使爆轰波速度曲线的品质不尽人意。尽管开展了很多微分运算的方法研究，但目前仍然没有取得实质上的进展。因此，目前 CFBG 传感器给出的都是爆轰波的位移历史。

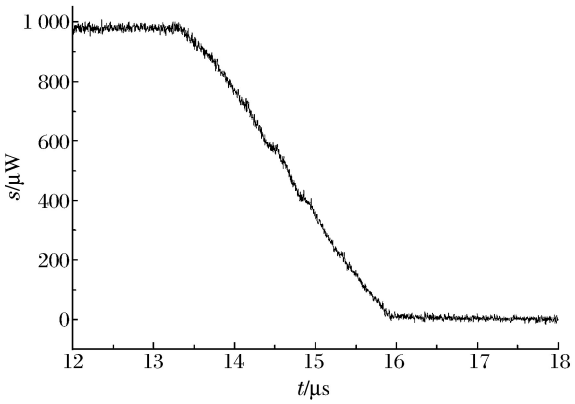

图 7　实验信号

Fig. 7　Experimental signal

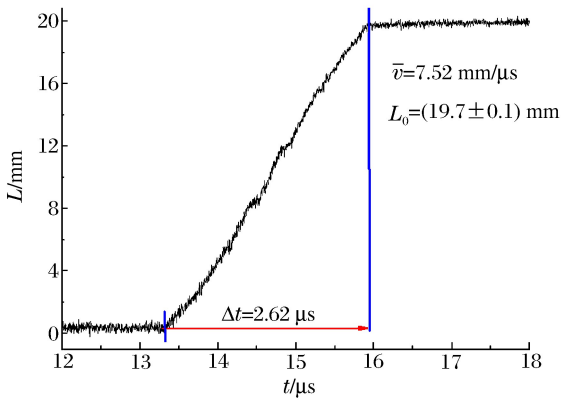

图 8　位移曲线

Fig. 8　Displacement curve

4　结　论

针对测量爆轰波速度的 CFBG 传感器，提出了一种实验公式，与 CFBG 的长度、系统常数 A 和 B 有密切关系，该公式考虑了宽光谱光源的光谱、CFBG 反射谱的不平坦度对测量的影响，提高了 CFBG 传感器的测量精度。研究了 CFBG 的反射谱线宽与 CFBG 长度的理论关系，搭建了测量 CFBG 反射谱线宽的实验装置，实现了从 CFBG 反射谱线宽计算出 CFBG 长度。搭建了可测量系统常数 A 和 B 的实验装置，根据实验数据拟合出了 A 和 B。用 CFBG 传感器测量了 RDX/TNT(60/40)传爆药柱的旁侧爆轰波速度，与 RDX/TNT(60/40)传爆药柱爆速有 3.4%的差异，差异的来源有两部分，一部分为 CFBG 传感器的自身测量精度，另一部分为 RDX/TNT(60/40)传爆药柱的旁侧爆轰波速度与其体内爆轰波速度存在差异。

参考文献：

[1]　Bdzil J B, Fickett W, Stewart D S. Detonation shock dynamics: A new approach to modeling multi-dimensional detonation waves[C]// Proceedings of the Ninth Symposium (International) on Detonation. Portland, OR, 1989: 730-742.

[2]　Aslam T D, Bdzil J B, Hill L G. Extensions to DSD theory: Analysis of PBX 9502 rate stick data[C]// Proceedings of the Eleventh International Detonation Symposium. Snowmass, CO, 1998:21-29.

[3]　Cagliostro D J, Mandell D A, Schwalbe L A, et al. MESA 3-D calculations of armor penetration by projectiles with combined obliquity and yaw[J]. International Journal of Impact Engineering, 1990,10(1):81-92.

[4]　Walker F E. Initiation and detonation studies in sensitized nitromethane[J]. Acta Astronautica, 1979,6(7):807-813 .

[5]　Kasahara J, Hasegawa A, Nemoto T, et al. Performance validation of a single-tube pulse detonation rocket system [J]. Journal of Propulsion and Power, 2009,25(1):173-180.

[6]　Stewart D S, Yao J. The normal detonation shock velocity: Curvature relationship for materials with nonideal equation of state and multiple turning points[J]. Combustion and Flame, 1998,113(1):224-235.

[7]　Benterou J, Udd E, Wilkins P, et al. In-situ continuous detonation velocity measurements using fiber-optic Bragg grating sensors[C]// Proceedings of 34th International Pyrotechnics Seminar. Beaune, France, 2007:309-322.

[8]　Udd E, Benterou J. High speed fiber optic grating sensor system: US 0028489[P]. 2009-01-29.

[9]　Benterou J, Udd E, Wilkins P, et al. In-situ continuous detonation velocity measurements using fiber-optic Bragg grating sensors[R]. LLNL-PROC-233137, 2007.

[10]　Udd E, Benterou J. Damage detection system with sub-microsecond resolution[C]// The 15th International Symposium on: Smart Structures and Materials & Nondestructive Evaluation and Health Monitoring. International Society for Optics and Photonics, 2008:69330B-9.

[11] Benterou J, Bennett C V, Cole G, et al. Internal detonation velocity measurements inside high explosives[C]// SPIE Defense, Security and Sensing. Orlando, FL, 2009.

[12] Udd E, Benterou J, May C, et al. Review of high-speed fiber optic grating sensors systems[C]// Fiber Optic Sensors and Applications Ⅶ. Orlando, Florida, 2010:76770B.

[13] Benterou J, May C A, Udd E, et al. High Speed Measurements using fiber-optic Bragg grating sensors[C]// 2011 SPIE Defense, Security, & Sensing Conference. Orlando, FL, 2011.

[14] Rodriguez G, Sandberg G L, McCulloch Q, et al. Chirped fiber Bragg grating detonation velocity sensing[J]. Review of Scientific Instruments, 2013,84(1):015003.

[15] 王玉田,曹丽芳. 光纤 Bragg 光栅应力测量的研究[J]. 传感技术学报,2007,20(5):1193-1195.
Wang Yu-fang, Cao Li-fang. Research of stress survey by fiber Bragg grating[J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2007,20(5):1193-1195.

[16] 姜德生,何伟. 光纤光栅传感器的应用概况[J]. 光电子·激光,2002,13(4):420-430.
Jiang De-wei, He Wei. Review of applications for fiber Bragg grating sensors[J]. Journal of Optoelectronics·Laser, 2002,13(4):420-430.

[17] 张颖,刘志国,郭转运,等. 高灵敏度光纤光栅压力传感器及其压力传感特性的研究[J]. 光学学报,2002,22(1):89-92.
Zhang Yin, Liu Zhi-guo, Guo Zhuan-yun. A high-sensitivity fiber grating pressure sensor and its pressure sensing characteristics[J]. Acta Optica Sinica, 2002,22(1):89-92.

Chirped fiber Bragg grating sensor for side detonation velocity measurement of the explosion

Deng Xiang-yang, Liu Shou-xian, Peng Qi-xian,
Li Ze-ren, Chen Guang-hua, Meng Jian-hua
(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang* 621999, *Sichuan, China*)

Abstract: An experimental equation of CFBG sensor for detonation velocity measurement which was based on the flatness of ASE light source and CFBG reflection spectrum, was quantitatively established for the first time. The CFBG length could be calculated by the theoretical relation between it and the CFBG reflection spectrum line-width, which was measured experimentally. The constant of the CFBG sensor was fitted by the experimental data. The side detonation-wave velocity of RDX/TNT (60/40) was measured with 3.4% error compared to the publication value.

Key words: mechanics of explosion; chirped fiber Bragg grating sensor; reflection spectrum; detonation velocity; ASE light source

(责任编辑 丁 峰)