

DOI: 10.11883/bzycj-2017-0416

连续测量爆轰波和冲击波波阵面位置的 波长-时间映射型光纤光栅传感器技术*

邓向阳^{1,2}, 罗振雄², 刘寿先², 蒙建华², 田建华², 何莉华²

(1. 中国科学技术大学物理学院, 安徽 合肥 230022;

2. 中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621999)

摘要: 针对强度型线性啁啾光纤布拉格光栅 (LCFBG) 传感器测量爆轰波、冲击波波阵面位置时不仅需要 LCFBG 被完全破坏, 而且需要其反射长波长处先于短波长处被破坏的缺点, 建立了一种波长-时间映射型 LCFBG 传感器技术。该技术通过高重频、锁模飞秒激光器和色散光纤将爆轰波、冲击波作用下 LCFBG 的瞬态反射谱, 转为相同形状的脉冲信号, 然后根据该脉冲信号的 3 dB 时宽计算出 LCFBG 的长度, 即为爆轰波、冲击波波阵面位置。对波长-时间映射型 LCFBG 传感器的时间分辨本领、波阵面位置的相对测量不确定度进行了分析, 得出它们的值分别为 10 ns 和 1.7%; 针对波长-时间映射型 LCFBG 传感器, 提出了一种二维时间映射数据处理方法, 将脉冲信号的一维时间映射为二维时间, 从而将脉冲信号转换为二维图形, 再通过一系列变换, 就可获得爆轰波、冲击波波阵面位置的二维图形。为验证该技术的有效性, 用波长-时间映射型 LCFBG 传感器测量了 JB-9014 炸药的爆轰波波阵面位置, 对位置曲线进行线性拟合得到的爆轰波速度为 7.58 km/s, 与电探针测量值 7.63 km/s 能很好地吻合, 相对偏差小于 1%。

关键词: 线性啁啾光纤布拉格光栅; 高重频锁模激光器; 波长-时间映射; 啁啾率; 反射谱

中图分类号: O384

国标学科代码: 13035

文献标志码: A

在冲击波物理、爆轰物理领域内, 爆轰波和冲击波波阵面位置诊断工具是必备的测试手段之一, 其对含能炸药的性能评估、炸药的燃烧-爆轰过程研究和复杂爆轰装置的爆轰波传播规律研究具有重要意义^[1-3], 对冲击波在材料内的传播规律研究^[4]也具有重要作用。

传统的测量爆轰波、冲击波波阵面位置方法为离散电探针法, 沿爆轰波、冲击波传播方向, 布置一系列距离预先测量的电探针, 测量爆轰波、冲击波达到电探针的时间, 就可知道爆轰波、冲击波的传播规律, 该方法为离散性测量, 时间分辨本领差。微波干涉法^[5]利用从爆轰波阵面或冲击波阵面返回的携带多普勒信息的信号光与参考光叠加, 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 (对速度积分, 就可获得爆轰波、冲击波波阵面位置), 但该方法具有以下不足: (1) 不能用于金属材料 and 某些液体材料中爆轰波、冲击波速度测量; (2) 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。近二十年发展起来的光子多普勒速度仪 (photonic Doppler velocimetry) 和法布里-珀罗速度仪 (Fabry-Perot velocimetry)^[6-7]利用多普勒效应可实现连续测量爆轰波、冲击波速度, 但对插入光纤的安装工艺有很高的要求, 要求爆轰波、冲击波波阵面接近垂直角度作用在光纤上, 否则多普勒信号光就不能反射回来, 造成测速失败。强度型线性啁啾光纤布拉格光栅 (linear chirped fiber Bragg grating, LCFBG) 传感器利用从 LCFBG 返回信号光幅度与 LCFBG 长度有线性关系来测量爆轰波、冲击波波阵面位置。美国劳伦斯利弗莫尔国家实验室 (LLNL) 从 2007 年~2017 年^[8]连续报导了强度型 LCFBG 传感器技术及其应用; 中国工程物理研究院流体物理研究所^[9]从 2012 年起开始开展强度型 LCFBG 传感器技术研究, 2017 年北京航空航天大学也报道了类似的技术^[10], 然而该方法具有以下缺点:

* 收稿日期: 2017-11-17; 修回日期: 2018-05-15

基金项目: 国家自然科学基金项目 (11672275); 中国工程物理研究院科学技术发展基金项目 (2015B0401079, 2015B0401080)

第一作者: 邓向阳 (1975—), 男, 硕士, 副研究员, dxyifp@caep.cn。

(1) 需要所测爆轰波、冲击波完全破坏 LCFBG; (2) 需要 LCFBG 反射长波长处先于短波长处被破坏。

本文中提出一种波长-时间映射型 LCFBG 传感器技术, 通过高重频锁模飞秒激光器和色散光纤将爆轰波、冲击波作用下 LCFBG 的瞬态反射谱, 转为相同形状的脉冲信号, 然后根据该脉冲信号的 3 dB 时宽计算出爆轰波、冲击波波阵面位置; 开展波长-时间映射型 LCFBG 传感器的时间分辨本领和爆轰波、冲击波波阵面位置的相对测量不确定度分析; 针对波长-时间映射型 LCFBG 传感器, 提出一种二维时间映射数据处理方法, 即将一维时间映射为二维时间, 从而将示波器记录的脉冲信号转换为二维图形, 再通过一系列变换, 获取爆轰波、冲击波波阵面位置的二维图形。为验证该技术的有效性, 用波长-时间映射型 LCFBG 传感器测量 JB-9014 钝感炸药的旁侧爆速, 并与电探针测量值进行比较。

1 测量原理

图 1 给出了波长-时间映射型 LCFBG 传感器的结构示意图。重频、锁模飞秒激光器射出的飞秒光脉冲, 经三端口光环行器的端口 1 到端口 2, 进入 LCFBG, 满足 Bragg 反射条件的部分光被反射回来, 经三端口光环行器的端口 2 到端口 3, 进入 1×2 光耦合器, 分为 2 束, 一束进入光谱仪, 进行光谱分析, 另外一束进入色散光纤, 进行波长-时间映射, 然后被掺铒光纤放大器(EDFA)进行放大, 最后被光电探测器和数字示波器转换为电信号并完成记录。

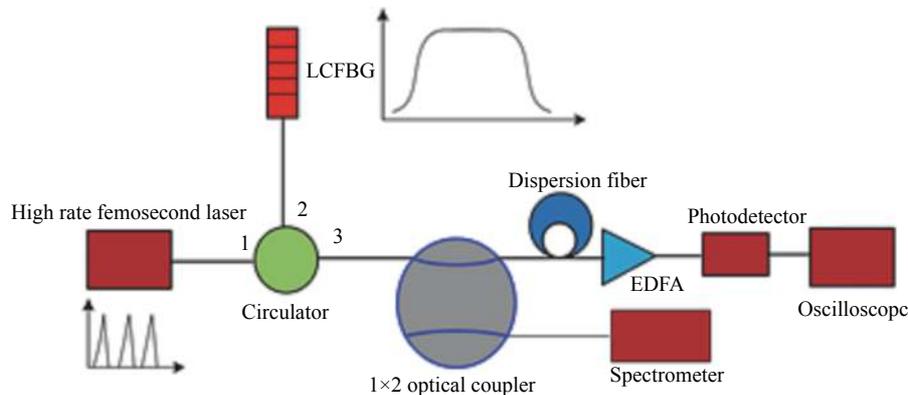


图 1 波长-时间映射型 LCFBG 传感器的结构示意图

Fig. 1 Sketch of the wavelength-time mapping LCFBG sensor

在图 1 所示的波长-时间映射型 LCFBG 传感器中, 重频锁模飞秒激光器的重复频率为 100 MHz, 平均功率为 100 mW, 工作波长介于 1 520~1 600 nm 范围内; LCFBG 长度为 98.23 mm, 中心波长为 1 547.45 nm, 3 dB 带宽为 28.62 nm, 啁啾率为 0.292 nm/mm; 色散光纤为 SMF28e 单模光纤, 长度为 10.2 km, 色散参量为 16.75 (ps·nm⁻¹)/km; 光电探测器的带宽为 20 GHz, 增益为 1 V/mW; 数字示波器的模拟带宽为 12.5 GHz, 采样率为 50 GS/s; 光谱仪的光谱响应范围 800~1 700 nm, 分辨率为 0.02 nm。

在爆轰波、冲击波作用下, LCFBG 长度及其反射谱的 3 dB 带宽有如下关系^[1]:

$$d(t) = \frac{\sigma_{\lambda}(t)}{K} = \frac{\lambda(t) - \lambda_1}{K} = \frac{\sigma_0 - [\lambda_2 - \lambda(t)]}{K} \quad (1)$$

式中: $d(t)$ 为 LCFBG 的动态长度; K 为啁啾率; σ_0 、 $\sigma_{\lambda}(t)$ 分别为 LCFBG 反射谱的初始 3 dB 带宽和动态 3 dB 带宽; λ_1 、 λ_2 为初始 3 dB 带宽对应的下限波长和上限波长; $\lambda(t)$ 为动态 3 dB 带宽对应的上限波长, 介于 λ_1 、 λ_2 之间, 随冲击过程而发生改变; σ_0 为 28.62 nm, λ_1 为 1 533.13 nm, λ_2 为 1 561.77 nm, K 为 0.292 nm/mm。

由于在 1550 nm 波长附近光谱仪的响应速率过低, 无法记录爆轰波和冲击波作用下 LCFBG 的瞬态反射谱, 因此用一种波长-时间映射方法记录瞬态光谱, 即用高重频飞秒激光器、SMF28e 单模光纤对 LCFBG 的反射谱(输入信号)进行波长-时间映射, 转换为脉冲信号(输出信号), 然后用快响应光电探测器和数字示波器完成该脉冲信号记录。

对于波长-时间映射变换, LCFBG 反射谱的 3 dB 带宽 $\sigma_{\lambda}(t)$ 与示波器记录的脉冲信号的 3 dB 时宽

$\sigma_\lambda(t)$ 之间有如下关系^[11]:

$$\sigma_\lambda(t) = \frac{\sigma_t(t)}{DL} \quad (2)$$

式中: D 为 SMF28e 单模光纤的色散参量, $16.75 \text{ (ps} \cdot \text{nm}^{-1})/\text{km}$; L 为光纤长度, $L=10.2 \text{ km}$ 。

将式 (2) 带入式 (1), 可得

$$d(t) = \frac{1}{K} \frac{\sigma_t(t)}{DL} \quad (3)$$

式中: LCFBG 的啁啾率 K 、色散光纤的长度 L 和色散参量 D 可预先测量, 因此只要获得时域信号的 3 dB 时宽 $\sigma_\lambda(t)$, 就可获得 LCFBG 的长度 $d(t)$ 。

对式 (3) 进行求导, 就可得到爆轰波和冲击波速度。

2 时间分辨本领和波阵面位置的相对测量不确定度

波长-时间映射型 LCFBG 传感器的时间分辨本领主要由重频飞秒激光器的重复频率与光电探测器、数字示波器和波长-时间映射的时间分辨本领共同决定。

激光器的重复频率为 100 MHz, 则时间分辨本领 τ_1 为 10 ns。

光电探测器、数字示波器的带宽 f 与其时间分辨本领 τ 有式 (4) 的关系:

$$\tau = \frac{0.35}{f} \quad (4)$$

将光电探测器、数字示波器的带宽带入式 (4), 可求得它们的时间分辨本领 τ_2 为 18 ps, τ_3 为 28 ps。

波长-时间映射的时间分辨本领由式 (5) 给出^[11]:

$$\tau_4 = 2 \sqrt{\pi \beta_2 L} \quad (5)$$

式中: β_2 为 SMF28e 单模光纤的二阶色散传播常数, $21.3 \text{ ps}^2/\text{km}$ (中心波长为 1 550 nm), 可求出 τ_4 为 52 ps。

则波长-时间映射型 LCFBG 传感器的时间分辨本领 τ 为:

$$\tau = \sqrt{\tau_1^2 + \tau_2^2 + \tau_3^2 + \tau_4^2} \approx 10 \text{ ns} \quad (6)$$

波长-时间映射型 LCFBG 传感器所测爆轰波、冲击波波阵面位置的相对测量不确定度与 LCFBG 的啁啾率、色散光纤的长度和色散参量以及系统的时间分辨本领有密切关系, 对式 (3) 进行相对测量不确定度分析:

$$\frac{\delta d(t)}{d(t)} = \sqrt{\left(\frac{\delta L}{L}\right)^2 + \left(\frac{\delta D}{D}\right)^2 + \left(\frac{\delta K}{K}\right)^2 + \left(\frac{\delta \sigma(t)}{\sigma(t)}\right)^2} \quad (7)$$

SM28e 单模光纤的长度 L 和色散参量 D 可由色散分析仪进行测量 (如 EXFO 的 FTB-5800 分析仪), 测量值分别为 10.20 km 和 $16.75 \text{ (ps} \cdot \text{nm}^{-1})/\text{km}$ 。它们的测量不确定度分别为:

$$\delta L = \pm(0.01 \text{ km} + 0.01L) \approx \pm 0.11 \text{ km} \quad (8)$$

$$\delta D = \frac{\pm 0.5}{L} \text{ (ps} \cdot \text{nm}^{-1})/\text{km} \quad (9)$$

K 由下式计算:

$$K = \frac{2n}{c} \frac{d\eta}{d\lambda} \quad (10)$$

式中: n 为 LCFBG 的折射率, 1.468 2 (中心波长为 1 550 nm); c 为真空光速; $d\eta/d\lambda$ 为 LCFBG 的时延曲线的斜率, η 为时延, λ 为波长。时延曲线可由 LUNA 公司的光学背向散射反射计 (OBR) 进行测量, 时延 τ 为 968 ps, 相应的测量不确定度为 1 ps, 将其带入式 (10), 可计算出 K 为 0.292 nm/mm, δK 为 $3 \times 10^{-4} \text{ nm/mm}$ 。

由数字示波器测量得到 $\sigma_i(t)=4.88 \text{ ns}$; $\delta\sigma_i(t)$ 由光电探测器、数字示波器和波长-时间映射的时间分辨本领决定, $\delta\sigma_i(t)$ 为 62 ps。

$$\frac{\delta d(t)}{d(t)} = \sqrt{\left(\frac{0.11}{10.2}\right)^2 + \left(\frac{0.05}{16.75}\right)^2 + \left(\frac{0.0003}{0.292}\right)^2 + \left(\frac{0.062}{4.88}\right)^2} \approx 1.7\% \quad (11)$$

3 数据处理方法

图 2 给出了有机玻璃中冲击波波阵面位置测量的脉冲信号(注: LCFBG 的长度为 35.20 mm, 色散光纤的长度为 50.02 km)。从图 2 可看出, 在显示数据全貌的条件下, 很难显示数据细节。

根据图 2 中脉冲信号的特征, 可将脉冲信号分为 3 个阶段:

(1) LCFBG 没有受到爆轰波、冲击波作用, 脉冲信号大概介于 0~4 μs 之间, 提取 A 点附近 (2 μs) 一个周期内信号, 如图 3(a) 所示;

(2) LCFBG 开始受到爆轰波、冲击波作用, 脉冲信号介于 4~10 μs 之间, 提取 B 点附近 (5 μs) 的一个周期信号, 如图 3(b) 所示;

(3) LCFBG 的大部分被破坏, 提取 C 点附近 (9 μs) 的一个周期信号, 如图 3(c) 所示。

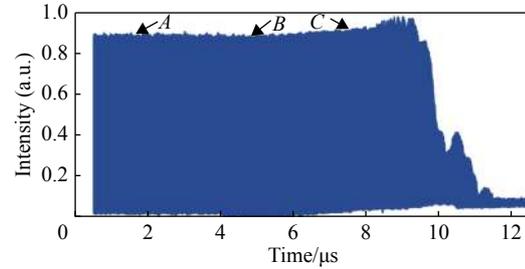


图 2 有机玻璃中冲击波波阵面位置测量的脉冲信号
Fig. 2 Pulse signal for measuring the wave-front position of the shock wave in the PMMA

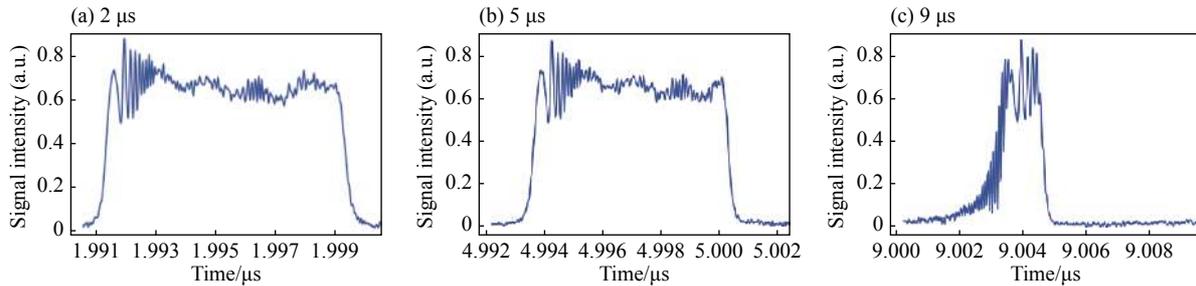


图 3 3 个不同时刻附近的 10 ns 周期信号

Fig. 3 Periodic signals at various 10 ns time slice windows

考虑到脉冲信号为周期信号, 可将任何时刻 t 用式 (12) 表示:

$$t = nT + \frac{m}{N}T \quad (12)$$

式中: n 为周期序数; T 为周期; N 为一个周期内的数据点; m 为数据点的序列, $m \leq N$ 。

将时域信号按以下方式映射为二维图形, 则可得到图 4:

- (1) 将 nT 视为横坐标, 时间增量为 T ;
- (2) 将 $(m/N)T$ 视为纵坐标, 时间增量为 T/N ;
- (3) 将一维时间 t 与二维时间 $(nT, (m/N)T)$ 一一对应;

(4) 将时域信号的幅度转换为二维时间下的信号幅度, 并用不同颜色进行等效表示。

将图 4 的纵坐标按照下式及式 (1) 进行变换, 可得到 LCFBG 的动态长度的二维图形, 如图 5 所示。

$$\lambda - \lambda_c = \frac{t - t_c}{D \cdot L} \quad (13)$$

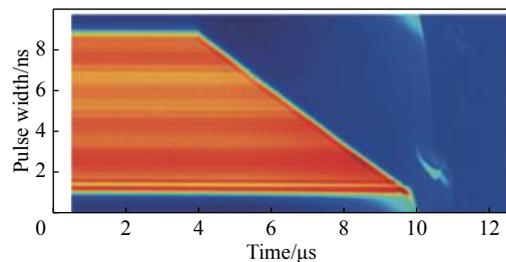


图 4 脉冲信号的二维映射图形

Fig. 4 Two dimensional mapping figure of the pulse signal

式中: λ_c 为中心波长, t_c 为中心波长对应的时间。

对图 5 进行数据提取, 可获得 LCFBG 的动态长度曲线, 如图 6 所示。

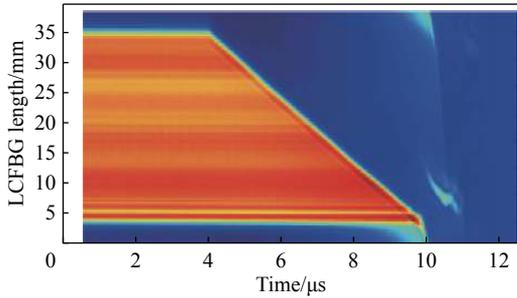


图 5 LCFBG 的二维图形

Fig. 5 Two dimensional mapping figure of the LCFBG

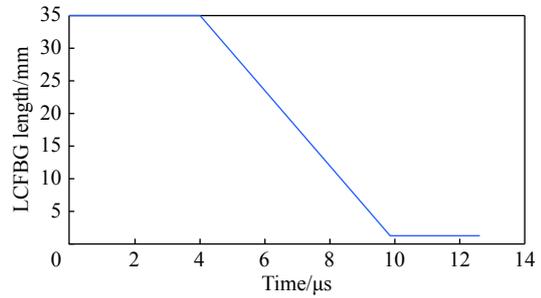


图 6 LCFBG 的动态长度曲线

Fig. 6 LCFBG length versus time

4 JB-9014 钝感炸药旁侧爆速测量

图 7 给出了用波长-时间映射型 LCFBG 传感器测量 JB-9014 钝感炸药的爆轰波波阵面位置的实验布局。JB-9014 主药柱由 BL-21 雷管、JH-9005 药柱引爆。LCFBG 布置在主药柱的旁侧, 完成沿其长度方向的爆轰波波阵面位置测量。LCFBG 的长度为 98.23 mm, 传爆药柱 JH-9005 的尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 11 \text{ mm}$, 主药柱 JB-9014 的尺寸为 $\varnothing 30 \text{ mm} \times 100 \text{ mm}$ 。

实验中, 采用以下方法布置 LCFBG: (1) 沿主炸药的一条母线进行标记, 并沿标记线进行刻槽; (2) 将 LCFBG 布置在槽内, 并用速干胶水进行填充、定位。由于所刻通槽可能凹凸不平, 造成 LCFBG 受到一定的应力, 因此需要在实验装置安装完毕后, 用光谱仪检测 LCFBG 反射谱的中心波长, 以判断 LCFBG 的大致受力。需要注意的是, 应尽量选择与 LCFBG 力学性能接近的速干胶水, 避免对冲击波造成较大扰动。此外, 当 LCFBG 安装完毕后, 需要用专门仪器对 LCFBG 的起始安装位置进行测量。

图 8 给出了数字示波器记录的脉冲信号, 图 9 给出了爆轰波波阵面的位置曲线。从图 9 可看出, 爆轰波波阵面位置几乎与时间呈线性关系, 对数据进行线性拟合, 可得到 JB-9014 钝感炸药的爆速为 7.58 km/s, 电探针测试值为 7.63 km/s^[12], 两者之间的相对偏差小于 1%。

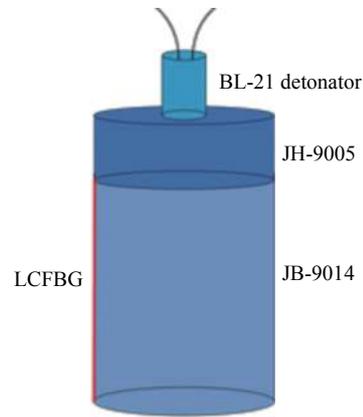


图 7 JB-9014 炸药爆轰波波阵面位置测量实验布局

Fig. 7 Configuration for measuring the wave-front position of the JB-9014 explosive

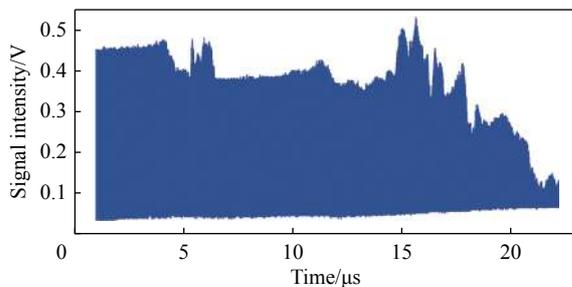


图 8 数字示波器记录的脉冲信号

Fig. 8 Experimental signals recorded by digital oscilloscope

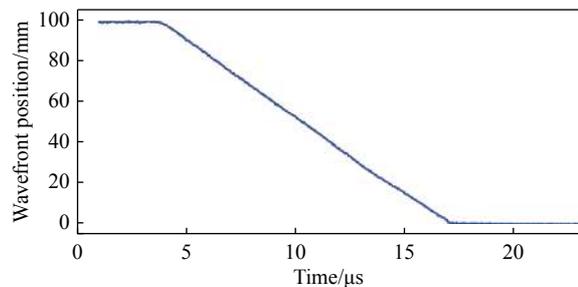


图 9 爆轰波波前位置曲线

Fig. 9 Curve of wavefront movement

5 结 论

依据线性波长-时间映射关系,将波长-时间映射型 LCFBG 传感器的数字示波器记录的脉冲信号换算为瞬态光谱,然后根据 LCFBG 的长度-波长关系,可计算出 LCFBG 的动态长度,即爆轰波、冲击波波阵面的瞬态位置。

波长-时间映射型 LCFBG 传感器的时间分辨本领由锁模飞秒激光器的重复频率、光电探测器带宽、数字示波器带宽和波长-时间映射的时间分辨本领共同决定。通常,光电探测器、数字示波器和波长-时间映射的时间分辨本领远高于锁模飞秒激光器的时间分辨本领,因此该传感器的时间分辨本领主要受限于锁模飞秒激光器的重复频率。

影响波长-时间映射型 LCFBG 传感器的爆轰波、冲击波波阵面位置的相对测量不确定度的因素很多,如色散光纤的长度和色散参量、LCFBG 的啁啾率和记录系统的时间分辨本领等。

针对波长-时间映射型 LCFBG 传感器,提出了一种获得爆轰波、冲击波位置的二维时间映射数据处理方法,将一维时间映射为二维时间,从而将脉冲信号转换为二维图形,再通过一系列变换,就可获得 LCFBG 位置的二维图形,对该二维图形进行数据提取,就可获得 LCFBG 的位置曲线;采用波长-时间映射型 LCFBG 传感器测量了 JB-9014 钝感炸药的旁侧爆速,其线性拟合值为 7.58 km/s,与电探针测量值 7.63 km/s 很好地吻合。

参考文献:

- [1] HILL L G, BDZIL J B, ASLAM T D. Front curvature rate stick measurements and detonation shock dynamics calibration for PBX9502 over a wide temperature [C]//Proceeding of Eleventh Symposium (International) on Detonation. Colorado: Office of Naval Research, 1997: 1029-1037.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 徐森, 刘大斌, 彭金华, 等. 药柱冲击波在有机玻璃中的衰减特性研究 [J]. 高压物理学报, 2010, 24(6): 421-437.
XU Sen, LIU Dabin, PENG Jinhua, et al. Study on the shock wave attenuation of the booster charge in the PMMA gap [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2010, 24(6): 421-437.
- [5] BENTEROUT J J, UDD E, WILKINS P, et al. *In-situ* continuous detonation velocity measurements using fiber-optic Bragg grating sensors [C]//Proceedings of the 34th International Pyrotechnics Seminar V1. Beaune, France, 2007: 309-322.
- [6] HARE D E, HOLTKAMP D B, STRAND O T. Embedded fiber optic probes to measure detonation velocities using the photonic Doppler velocimeter: LLNL-PROC-425117 [R]. Livermore: Lawrence Livermore National Laboratory, 2010.
- [7] MERCIER P, BENIER J, FRUGIER P A, et al. Nitromethane ignition observed with embedded PDV optical fibers [C]. EPJ Web of Conferences. EDP Sciences, 2010, 10: 00016.
- [8] RODRIGUEZ G, STEVE M G. Ultrafast fiber Bragg grating interrogation for sensing in detonation and shock wave experiments [J]. Sensors, 2017, 17: 248.
- [9] 邓向阳, 刘寿先, 彭其先, 等. 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 [J]. 爆炸与冲击, 2015, 35(2): 191-196.
DENG Xiangyang, LIU Shouxian, PENG Qixian, et al. Chirped fiber Bragg grating sensor for side detonation velocity measurement of the explosion [J]. Explosion and Shock Waves, 2015, 35(2): 191-196.
- [10] PENG W, HAO L, LIU T L, et al. Detonation velocity measurement with chirped fiber Bragg grating [J]. Sensor, 2017, 17: 2252.
- [11] GODA K, SOLLI D R, TSIA K K, et al. Theory of amplified dispersive Fourier transformation [J]. Physical Review A, 2009, 80(4): 043821.
- [12] 谭多望, 方青, 张光升, 等. 钝感炸药直径效应实验研究 [J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(4): 300-304.
TAN Duowang, FANG Qing, ZHANG Guangsheng, et al. Experimental study on the diameter effect for JB-9014 rate sticks [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 300-304.

Wavelength-time mapping linear chirped fiber bragg grating sensor for measuring the wave-front position of detonation and shock wave

DENG Xiangyang^{1,2}, LUO Zhenxiong², LIU Shouxian², MENG Jianhua², TIAN Jianhua², HE Lihua²

(1. *School of Physical Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230022, Anhui, China;*

2. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang 621999, Sichuan, China*)

Abstract: A new wavelength-time mapping linear chirped fiber Bragg grating (LCFBG) sensor is proposed, to resolve the problems in which the LCFBG needs to be entirely destroyed and be damaged accordingly to the reflective position for the longer wavelength prior to the shorter wavelength in the intensive LCFBG sensor. In this sensor, the reflective spectrum of the LCFBG destroyed by the detonation and the shock wave is transferred into the same temporal pulse by the high-repetition rate mode-locked laser and the dispersive fiber, which is then used to obtain the length of the LCFBG. The time-resolution and the relative uncertainty of the wave-front position in this sensor are analyzed and their values are found to be 10 ns and 1.7%, respectively. For the data analysis, the experimental data is transformed to 2D image and the wave-front position of the detonation and the shock wave is calculated from this 2D image. The detonation speed of the JB-9014 explosive is linearly fitted to be 7.58 km/s from the wave-front position of the detonation, which is coincidental with the electrical pin's result of 7.63 km/s (relative error less than 1%).

Keywords: linear chirped fiber Bragg grating; high-repetition rate mode-locked laser; wavelength-time mapping; chirped rate; reflective spectrum

(责任编辑 王小飞)