

基于光纤镀膜探针的固体介质中应力波粒子速度测量技术

杜睿 杨军 廖斌斌 卢强 郑行 丁洋 史国凯 李进 徐海斌 张锁麒 张德志

Measurement technology of stress wave particle velocity in solid medium based on optical fiber coated probe

DU Rui, YANG Jun, LIAO Binbin, LU Qiang, ZHENG Hang, DING Yang, SHI Guokai, LI Jin, XU Haibin, ZHANG Suoqi, ZHANG Dezhi

引用本文:

杜睿, 杨军, 廖斌斌, 等. 基于光纤镀膜探针的固体介质中应力波粒子速度测量技术[J]. 应用光学, 2024, 45(1): 221–228. DOI: 10.5768/JAO202445.0108001

DU Rui, YANG Jun, LIAO Binbin, et al. Measurement technology of stress wave particle velocity in solid medium based on optical fiber coated probe[J]. Journal of Applied Optics, 2024, 45(1): 221–228. DOI: 10.5768/JAO202445.0108001

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.5768/JAO202445.0108001>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

基于PDMS的光纤端面微纳结构转移法

Micro-nano structure transfer method of optical fiber end face based on PDMS

应用光学. 2020, 41(3): 631–636 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0308003>

基于光栅应变传感器的纳米测量机探针设计

Probe design of nanometer measuring machine based on grating strain sensor

应用光学. 2017, 38(3): 506–513 <https://doi.org/10.5768/JAO201738.0308001>

固体火箭发动机羽流流速TDLAS测量方法研究

Study on TDLAS measurement method for plume velocity of solid rocket motor

应用光学. 2020, 41(2): 342–347 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203001>

基于傅里叶变换的细胞牵引力测量研究

Research on cell traction measurement based on Fourier transform

应用光学. 2021, 42(2): 317–326 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0203005>

基于傅里叶变换轮廓术的动态液膜测量

Dynamic liquid film measurement with Fourier transform profilometry

应用光学. 2020, 41(2): 366–374 <https://doi.org/10.5768/JAO202041.0203005>

基于紫外刻写相移光栅的温度应力同时测量传感器

Simultaneous measurement sensor of temperature and stress based on UV lithography phase-shifted grating

应用光学. 2021, 42(1): 200–206 <https://doi.org/10.5768/JAO202142.0108002>



关注微信公众号, 获得更多资讯信息

文章编号: 1002-2082 (2024) 01-0221-08

基于光纤镀膜探针的固体介质中应力波 粒子速度测量技术

杜 睿^{1,2}, 杨 军³, 廖斌斌^{1,2}, 卢 强³, 郑 行¹, 丁 洋³, 史国凯³,
李 进³, 徐海斌³, 张锁麒³, 张德志³

(1. 浙江大学 海洋学院, 浙江 舟山 316021; 2. 浙江大学 海南研究院, 海南 三亚 572024; 3. 西北核技术研究所
强脉冲辐射环境模拟与效应全国重点实验室, 陕西 西安 710024)

摘 要: 粒子速度是分析固体介质中应力波传播规律的一个重要参数。结合激光多普勒效应和全光纤干涉测速系统, 提出了一种基于光纤镀膜探针的固体介质中应力波粒子速度的测量方法。将光纤镀膜探针嵌入有机玻璃 (PMMA) 中, 距爆心同一半径处, 采用 0.125 g TNT 当量的微型炸药球作为爆炸源, 进行填实爆炸产生应力波, 通过采集光纤探针端面的运动信息, 基于短时傅里叶变换的时频分析方法, 解调出端面运动速度, 进而反推出粒子速度。实验结果表明: 不同光纤镀膜探针测得的速度分别为 22.648 m/s、23.505 m/s, 将反推的粒子速度与传统的圆环型电磁粒子速度计方法获取到的数据进行对比, 两者的相对偏差低于 5.00%, 验证了光纤镀膜探针测量固体介质中应力波粒子速度的可行性。

关键词: 光纤镀膜探针; 激光多普勒效应; 短时傅里叶变换; 有机玻璃; 爆炸实验

中图分类号: TN206

文献标志码: A

DOI: 10.5768/JAO202445.0108001

Measurement technology of stress wave particle velocity in solid medium based on optical fiber coated probe

DU Rui^{1,2}, YANG Jun³, LIAO Binbin^{1,2}, LU Qiang³, ZHENG Hang¹, DING Yang³, SHI Guokai³,
LI Jin³, XU Haibin³, ZHANG Suoqi³, ZHANG Dezhi³

(1. School of Oceanology, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China; 2. School of Hainan Institute, Zhejiang University, Sanya 572024, China; 3. National Key Laboratory of Intense Pulsed Radiation Simulation and Effect, Northwest Institute of Nuclear Technology, Xi'an 710024, China)

Abstract: Particle velocity is an important parameter for analyzing the propagation law of stress waves in a solid medium. Combining the laser Doppler effect and an all-fiber interferometric velocimetry system, a measurement method of stress wave particle velocity in solid medium based on fiber coated probe was proposed. The optical fiber coated probe was embedded in the polymethyl methacrylate (PMMA) at the same radius from the burst center, and the miniature explosive ball with 0.125 g TNT equivalent was used as the explosion source to fill in the center cavity and generate stress wave. Based on the time-frequency analysis method of the short-time Fourier transform, the velocity of the optical fiber end surface could be calculated from the collected signal, and then the medium particle velocity could be deduced. The experimental results show that the velocity of the data measured by different fiber coated probes is 22.648 m/s and 23.505 m/s, respectively. The relative difference between the resulting particle velocity and the data obtained by the traditional circular electromagnetic particle speedometer method is less than 5.00%, which indicates the

收稿日期: 2023-03-07; 修回日期: 2023-05-23

基金项目: 国家自然科学基金 (12102042); 浙江省自然科学基金 (LY23E050012)

作者简介: 杜睿 (1998—), 男, 硕士研究生, 主要从事光纤传感测速研究。E-mail: dr002568@163.com

通信作者: 张德志 (1973—), 男, 博士, 研究员, 主要从事爆炸力学与毁伤效应研究。E-mail: zhangdezhi@nint.ac.cn

feasibility of the proposed method.

Key words: optical fiber coated probe; laser Doppler effect; short-time Fourier transform; polymethyl methacrylate; detonation test

引言

探究固体介质内部应力波传播规律在地震震源特性研究、爆破器材研发、防护工程设计等领域具有重要意义,而如何准确获取固体介质内部应力波参数是学术界的重大难题。在实际研究中,应力波往往是由地下爆炸或天然地震激发,对地上建筑或地下工事造成巨大破坏。激发产生的应力波在爆炸中心附近表现为冲击波,随着冲击波向四处扩散,应力幅值不断衰减,在远区演变成地震波^[1]。直接在野外环境中测量固体介质中应力波粒子速度,存在实验布置复杂、需耗费较大人力物力、会对环境造成一定的破坏等问题。故根据爆炸相似率,采取缩比^[2]的方式,用小当量的炸药球进行爆炸实验。在研究固体介质中应力波传播规律时,通过测量应力波的粒子速度和波速^[3],可以间接得出压力等应力波特性,进而推导出传播介质的力学参数^[4]。

传统的圆环型电磁粒子速度测试技术,可以较好地测量填实爆炸下固体介质中球形应力波的粒子速度。如西北核技术研究所的王占江^[5-7]等人,自 2000 年便开始基于圆环型电磁粒子速度计对黄土、沙土岩、花岗岩等固体介质内填实爆炸激发的球形应力波传播规律进行一系列的研究。该方法虽对固体介质本身的扰动小,测量精度高,但实验条件较为苛刻,需要提供一个相对稳定的强磁场。而基于光纤传感测量超声波、应力波等物理量,具有不受爆炸产生的电磁干扰的优点,对此学者们进行了相关的研究。FISHER N E 等^[8]研究了光纤布拉格光栅应变传感器,对水中的超声波进行测量。MORRIS P 等^[9]利用法布里-珀罗光纤尖端传感器测量液体中的超声波。WATSON S 等^[10]研制出基于法布里-珀罗的光纤干涉仪测量空气中的爆炸冲击波。KOCH C 等^[11]将迈克尔逊干涉仪的一个臂涂上 200 nm 的钛层,通过测量光纤端面反射光的相移测量液体中的冲击波。刘俊明等^[12]利用激光干涉测速技术,测量了炸药样品和 LiF 光学窗口界面粒子速度,进而推导出炸药样品中冲击波波后粒子速度,该方法实际也是在空气中进行测量。MERCIER P 等^[13]研制出基于光纤多普勒测速技术的埋入式单模光纤探针,实现了对炸药内部爆轰波速度的连续测量。刘寿先等^[14]也研制出一种埋入式光纤探针,用来测量液体炸药和固

体炸药内部的爆轰波速度。CRANCH G A 等^[15-16]制作出光纤法布里-珀罗压力传感器和迈克尔逊干涉速度传感器,研究了应力波在固体介质中的传播特性。上述研究聚焦于空气、液体介质中的超声波、应力波,含能材料的爆轰波,固体介质表面粒子速度等方面,对固体中的应力波研究报道较少。

本文聚焦于固体介质内部发生爆炸后,在周围激发出的应力波粒子速度测量。以有机玻璃^[17]作为传播介质,采用光纤端面镀膜探针和激光干涉测速技术^[18],测出爆炸时产生的球形应力波在有机玻璃中传播时,带动嵌入的光纤探针镀膜端面同步运动的速度。再由弹性波在不同介质交界面处的透射与反射理论,进而反推出该位置处的粒子速度。设计了基于微型炸药球填实爆炸的验证实验,采用短时傅里叶变换算法,对实验获取到的数据进行分析,并与圆环型电磁粒子速度计获取到的数据进行对比。

1 应力波粒子速度测量技术

1.1 多普勒测速原理

激光多普勒效应原理如图 1 所示。光源发射的一束光照射到具有相对运动的粒子或物体表面时,该粒子或物体表面接收的光波频率会随着相对运动速度的变化而变化;随后的反射光被探测器探测到时,其光波频率也会发生改变。

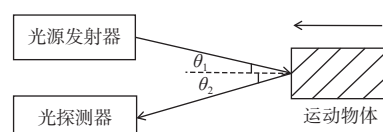


图 1 激光多普勒效应原理

Fig. 1 Schematic diagram of laser Doppler effect

应用在本文中就是激光器发出的激光先传播至光纤镀膜探针端面,再从端面反射至探测器两个阶段。第一阶段激光器作为发射源,光纤镀膜端面为观察端;第二阶段光纤镀膜端面为发射源,探测器作为观察端,其中激光全程在光纤器件中传播。定义两者相对靠近运动时的速度为正,当发射光和反射光的方向共轴时,多普勒频移量 Δf 与运动速度 u 的关系为

$$u = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta f = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot \Delta f \quad (1)$$

式中: λ 表示激光在其所处介质中的波长; λ_0 表示激光在真空中的波长; n 表示激光所处介质的折射率。

设信号光强为 I_1 , 频率为 f_1 , 波长为 λ_1 , 参考光强为 I_2 , 频率为 f_2 , 两光束的初始相位差为 θ , 根据多普勒效应和双光束干涉理论, 激光干涉测速仪的干涉信号可以表示为

$$I = I_1 + I_2 + 2\sqrt{I_1 I_2} \cos[4\pi \int_0^t \frac{v(t)}{\lambda_1} dt + \theta] \quad (2)$$

设 $N(t)$ 为条纹数, $\phi(t)$ 表示条纹数对应的相位差, 则

$$N(t) = \frac{2 \int_0^t v(t) dt}{\lambda_0} \quad (3)$$

$$\phi(t) = 2\pi N(t) \quad (4)$$

则差频 Δf 满足:

$$\Delta f = f_2 - f_1 = \frac{2v(t)}{\lambda_1} = \frac{dN}{dt} = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

速度 $v(t)$ 为

$$v(t) = \frac{\lambda_1}{2} \cdot \Delta f = \frac{\lambda_1}{2} \cdot \frac{dN}{dt} = \frac{\lambda_1}{4\pi} \cdot \frac{d\phi}{dt} \quad (6)$$

可以看出, 干涉信号的频率与速度成正比, 相位与位移成正比。物体表面每移动半个波长可产生一个干涉条纹。速度和条纹数的微分有关, 而和条纹数无关。 Δf 可以通过对干涉信号的时频分析得到, 也可以通过求解相位, 换算成位移, 再对位移进行求导得到。

1.2 光纤端面镀膜探针测量原理

在光纤端面镀上金反射膜, 光纤中的入射光照射在金反射膜时会发生反射。而位于有机玻璃中心的微型炸药球爆炸时产生的球形应力波会带动周围的有机玻璃介质粒子运动, 这也会带动嵌入有机玻璃内部的光纤探针端面的金反射膜运动, 从而产生多普勒频移。解调多普勒频移, 可以得出金反射膜的运动速度, 进而可以由弹性波在不同介质交界面处的透反射理论, 推导出该位置处原有机玻璃的粒子速度。设计加工的光学端面镀膜探针样品如图2所示, 金反射膜层厚 300 nm, 反射率 $\geq 50\%$ 。

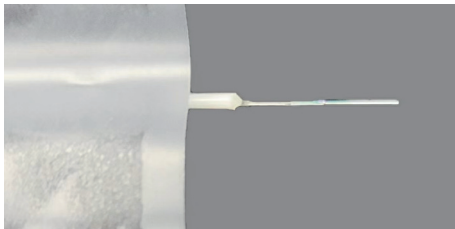


图2 光纤端面镀膜探针

Fig. 2 Optical fiber end-face coated probe

1.3 激光干涉测速技术

如图3所示, 窄线宽光纤激光器发出 1 550 nm 波长的激光, 经过一个 1×2 光纤耦合器分成两路, 一路为参考光, 另一路为信号光。信号光经光纤环形器输出至光纤探针端面, 经光纤端面的金膜反射, 端面发生运动时产生多普勒频移, 经过放大器、滤波器后与经过声光调制器调频、且经衰减器衰减后的参考光混频, 产生的差拍信号经过光电探测单元转换成电压信号, 被示波器记录。通过信号处理可以得到光纤端面运动的速度和位移信息。

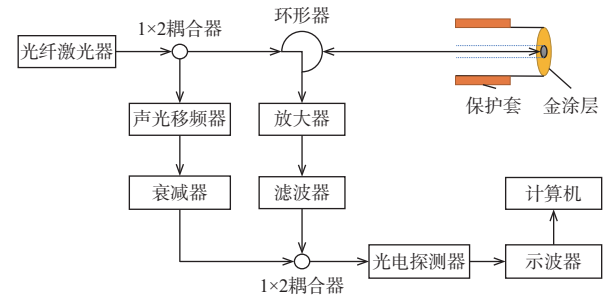


图3 激光干涉测速系统

Fig. 3 Laser interferometric velocimetry system

1.4 弹性波在不同介质交界面处的反射与透射理论

弹性波在不同介质界面上的反射与透射理论^[19]指出, 界面两边的介质波阻抗不匹配时, 界面的表观粒子速度 v_1 不等于入射波在刚抵达界面时的真实粒子速度 v_0 , 两者的关系满足:

$$v_0 = \frac{\rho_1 C_1 + \rho_2 C_2}{2\rho_1 C_1} v_1 \quad (7)$$

式中 $\rho_1 C_1$ 、 $\rho_2 C_2$ 分别表示入射波介质和透射波介质的声阻抗。查阅相关资料可知, 有机玻璃的密度 ρ_1 为 1.18 g/cm³, 传播的声速 C_1 为 2692 m/s; 光纤纤芯是由高纯度的石英玻璃构成, 其材料参数参考石英玻璃, 密度 ρ_2 为 2.20 g/cm³, 传播的声速 C_2 为 5639 m/s。

在本文中, 全光纤干涉测速系统测得的是光纤端面的运动速度 v_1 , 圆环型电磁粒子速度计测得的是距爆心某半径处的介质粒子速度 v_0 。爆炸激发的应力波由有机玻璃向光纤纤芯传播, 光纤端面即为两者的交界面, 结合有机玻璃和光纤纤芯的声阻抗, 则有机玻璃介质在距离爆心某半径处的粒子速度满足:

$$v_0 = 2.4527 v_1 \quad (8)$$

2 实验样品与系统设计

2.1 有机玻璃样品的制作

本文实验的固体介质为直径 100 mm、高 100 mm

的有机玻璃样品,其具有高强度密度比、高透明度、易机械加工等优点。如图 4 所示,在样品内部中心空腔处放置 0.125 gTNT 当量的微型炸药球作为爆炸源,使用雷管引爆柔爆索,再由柔爆索引爆微型炸药球,爆炸激发的球形发散应力波在材料内传播造成粒子运动,同时会带动嵌入在有机玻璃内部的圆环型漆包铜线圈和光纤探针端面同步运动。当应力波传播至圆环型电磁粒子速度计和光纤端面镀膜探针端面位置处时,示波器上便会获取到相应变化的电压信号。圆环型电磁粒子速度计的圆心对准炸药球空腔,光纤镀膜探针端面紧贴铜线圈且光纤径向轴对准爆心,以此保证 2 种方法测得的是同一半径处的有机玻璃介质粒子速度。漆包铜线圈、光纤探针、有机玻璃等之间的间隙用环氧树脂 A、B 胶等比例混合填实,再用加压装置使 2 块有机玻璃紧密贴合。

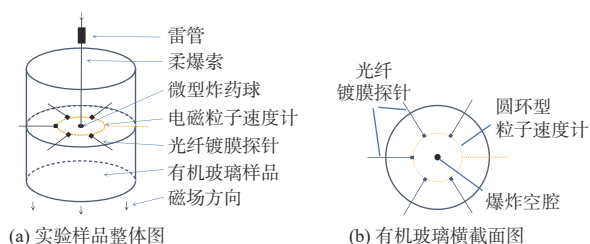


图 4 实验样品设计图

Fig. 4 Design diagram of experimental sample

加压装置如图 5 所示。其作用是固定上下 2 块有机玻璃,其在安装微型炸药球时能够对准正中心,防止错位并进行加压固化。

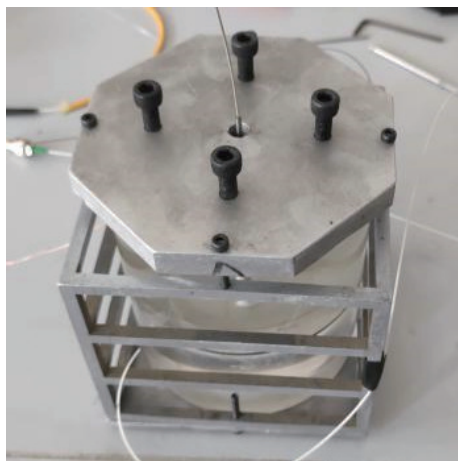


图 5 加压固定装置以及实验样品

Fig. 5 Pressurized fixing device and experimental sample

2.2 测速系统设计

整个实验测速系统如图 6 所示。实验装置主

要包括分时起爆控制器、脉冲电源、螺线管、雷管、激光干涉测速仪、示波器以及实验样品。其中微型炸药球、圆环型电磁粒子速度计和光纤镀膜探针嵌入在有机玻璃样品中。

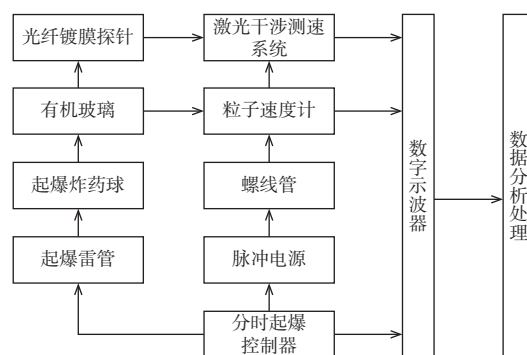


图 6 爆炸实验测速系统图

Fig. 6 Diagram of velocity measurement system in explosion experiment

开展爆轰实验时,由分时起爆控制器同步控制雷管起爆时间、脉冲电源激发时间以及触发示波器采集时间。其中,由电容箱放电(对应起爆器设置的 0 时刻),加载电流进入螺线管线圈,产生一个持续时间较短的磁场。随着加载电流的增加,磁场强度随之增加。当爆炸激发的球形发散应力波在材料内传播造成粒子运动时,将带动圆环型漆包线作相应运动,漆包线运动时,切割磁力线便产生与运动速度成正比的感生电动势,测得此感生电动势,便可由法拉第电磁感应定律算出介质的粒子速度。

从起爆雷管到起爆柔爆索,再到起爆微型炸药球产生球形应力波,再到进一步通过有机玻璃传播至预埋的铜线圈和光纤探针处后被示波器记录,用时约为 180 μs 。定义磁感应强度相对变化值小于 0.5% 的对应时间范围为“磁场平台”,通过提前测量,得出“磁场平台”对应的时间范围为 13 ms~17 ms。故起爆器时序控制设置为:通道 1 在 0 时刻控制电容箱放电;通道 2 和 3 都在 14 ms 时放电,起爆雷管并同时触发示波器记录信号。

在有机玻璃内部同一半径处预嵌入 5 根光纤镀膜探针和 1 个圆环型电磁粒子速度计,分别编号为 1~6 号。第 1 台示波器通道 1~4 分别用来记录 1~4 号光纤探针的信号,并由分时起爆控制器的通道 2 外部触发;第 2 台示波器通道 1 和 2 分别记录 5 号探针和圆环型电磁粒子速度计的信号,通道 3 和 4 分别记录起爆器的通道 2 和 3 的信号,分

别编号为7号和8号,并由示波器通道4触发。搭建的整个测速系统如图7所示。

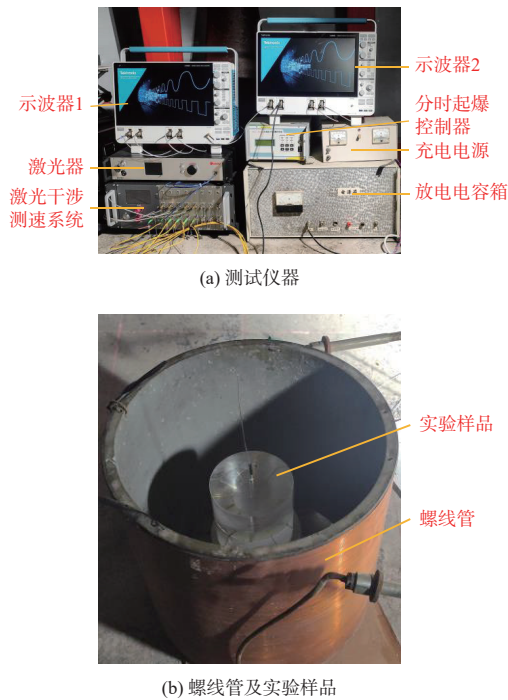


图7 爆炸实验现场图
Fig. 7 Test site of explosion experiment

3 爆炸实验及信号处理

3.1 有机玻璃样品的爆炸实验

实验成功获取到所有通道的信号,2台示波器正常触发,但5根光纤端面镀膜探针的实验信号处理结果并不完全一致。在预嵌入光纤后,爆炸前测得1号和5号光纤端面镀膜探针的实际反射率约为 10^{-4} ,远低于嵌入前的反射率(50%),这意味着因填胶封装的工艺问题,光纤端面所镀的膜损坏或光纤最前端部分已经折断,故探测的信号可能是折断的断面位置处的速度信息,获取到的信号含有较大噪声;3号探针获取到的数据异常;2号和4号探针爆炸前测得反射率分别为55%和64%,获取到的信号较好。

定义触发示波器的瞬间为0时刻,由图8(a)和8(b)并结合实验现场,2号和4号光纤分别在 $300\mu\text{s}$ 和 $400\mu\text{s}$ 时刻附近所测电压信号突降,可推测这时光纤已被炸断。由图8(c)可知,在 $150\mu\text{s}\sim 250\mu\text{s}$ 时刻,圆环型电磁粒子速度计获取到有效信号,且第1个峰位于 $182\mu\text{s}$ 附近,远小于 $250\mu\text{s}$,故 $250\mu\text{s}$ 时刻后光纤被炸断,不会对信号处理产生影

响。图8(d)表示起爆器的通道2和通道3同时放电并同步触发2台示波器。

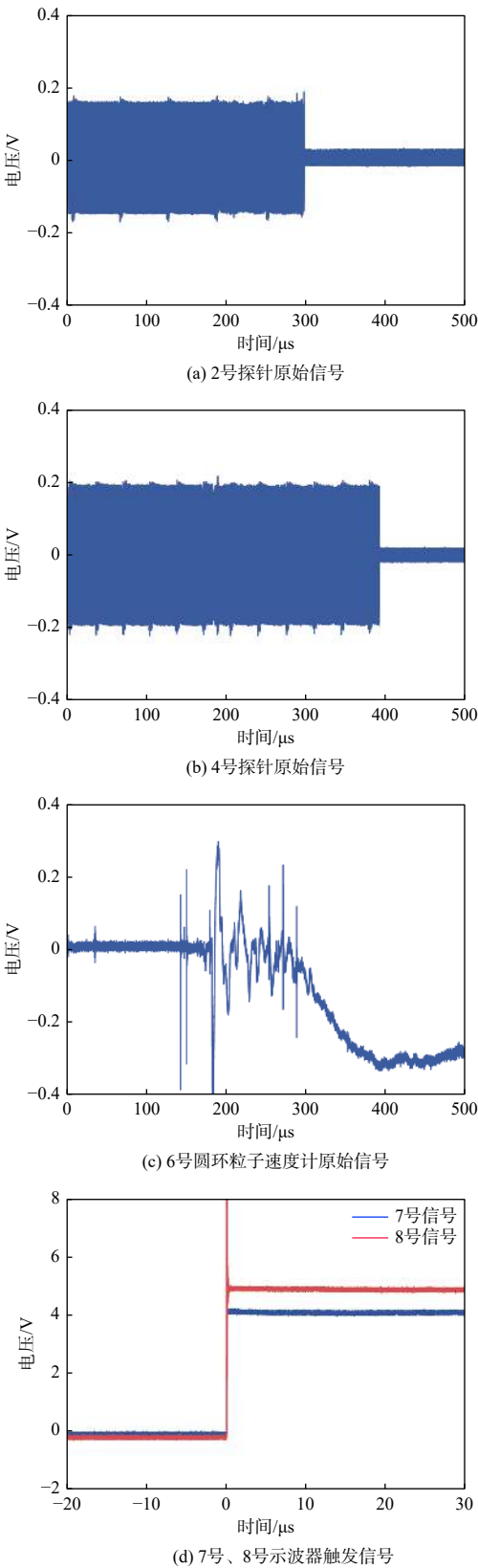


图8 示波器原始信号
Fig. 8 Original signals of oscilloscope

3.2 信号处理及结果分析

利用光纤干涉测速系统得到的信号是掺杂有各种噪声的非平稳信号,主要包括光源的噪声、光探测器的噪声以及光路中非测试面反射光形成的噪声。相对而言,噪声在时域和频域上的能量分布比较均匀,而多普勒信号的能量比较集中,在信号到达时刻和所在频率段,信号的能量会有一个突变,在频谱上会表现出一条“脊线”。本文采用小波变换来减少噪声对有效信号的影响,再通过时频分析得到时频谱,继而得出瞬时频率随时间的变化规律,最终换算出速度随时间的变化曲线。

在信号解调算法中,常用的有短时傅里叶变换、小波变换以及希尔伯特黄变换,本文采用短时傅里叶变换方法,将时域和频域联合起来,其基本思想是在傅里叶变换之前给信号加窗。使用凯塞窗,指定 2×10^6 Hz的频率分辨率,信号被划分为多段后,对每个段进行窗口化,再计算短时傅里叶变换,变换连接成如图9所示的时频谱。

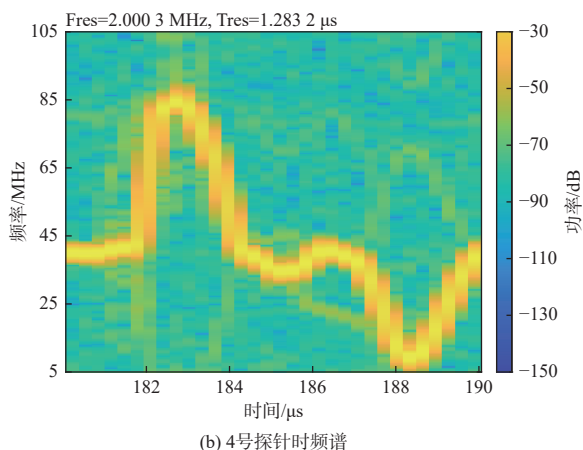
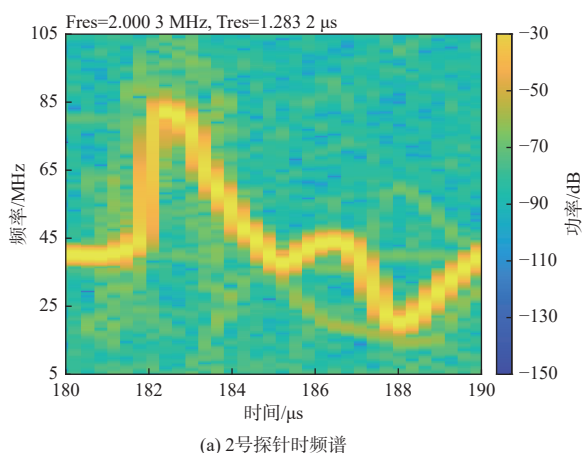


图9 光纤探针信号处理后的时频谱

Fig. 9 Time-frequency spectrum of fiber probe after signal processing

从图9中可以看出,2号和4号探针获取到的信号强烈且较为一致,这也表明了光纤镀膜探针测速法的重复性较好。

从时频谱中提取出各自的瞬时频率 f' ,由多普勒效应和激光干涉测速系统可以得出多普勒频移量 Δf 满足:

$$\Delta f = f' - \Delta f_0 \quad (9)$$

式中 Δf_0 为激光干涉测速系统的初始频移量。

再由式(6)以及单模光纤折射率 n 可以得出:

$$v(t) = \frac{\lambda}{2} \cdot \Delta f = \frac{\lambda_0}{2} \cdot \frac{1}{n} \cdot (f' - \Delta f_0) \quad (10)$$

式中: $\lambda_0=1\,550.004\text{ nm}$; $n=1.468\,2$ 。

对光纤镀膜探针获取到的信号进行处理,结果如图10所示。

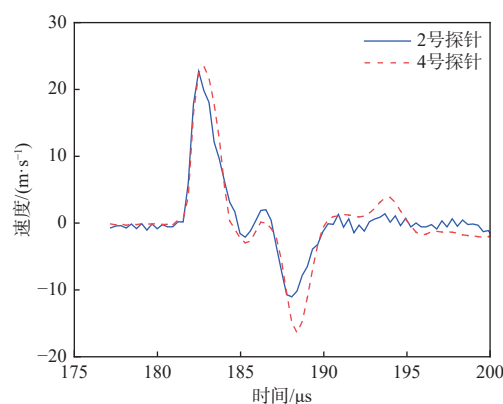


图10 2号、4号探针得到的端面瞬时速度曲线

Fig. 10 End-surface instantaneous velocity curves obtained with probes 2 and 4

由光纤镀膜探针端面的运动速度结合式(6)可以得出有机玻璃在该位置处的粒子速度,将其与圆环型电磁粒子速度计对照实验得到的粒子速度曲线拟合在一起(上升沿移至相同时间点),如图11所示。

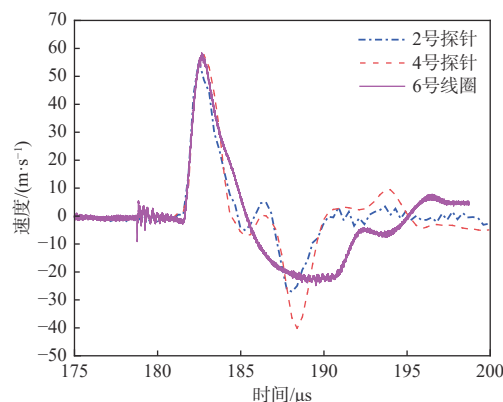


图11 光纤法和电磁法得到的粒子速度比较

Fig. 11 Comparison of particle velocity obtained by optical fiber and electromagnetic methods

对图 10 和图 11 中的速度曲线进行分析,记录结果如表 1 所示。

表 1 光纤镀膜探针和圆环型电磁粒子速度计信号处理结果

Table 1 Signal processing results of optical fiber coated probe and circular electromagnetic particle speedometer

编号	端面峰值速度/(m/s)	上升沿起点/ μ s	上升沿时间/ μ s	脉宽/ μ s	粒子峰值速度/($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)
2	22.648	181.627	0.744	2.612	55.549
4	23.505	181.649	0.596	2.906	57.651
6		180.936	0.764	3.362	58.309

由图 10、图 11 和表 1 可以看出, 0.125 gTNT 当量的微型炸药球在有机玻璃中激发出的球面波, 传播到光纤镀膜探针端面处的粒子速度第 1 个峰值的上升沿持续时间在 0.7 μ s 左右, 光纤端面距离爆炸中心为 25 mm, 这可近似认为在有机玻璃中传播的球面波属于强间断波。2 号和 4 号光纤探针的速度曲线在第 1 个峰的上升沿处相当吻合, 测得的粒子速度分别为 55.549 m/s、57.651 m/s, 这与圆环型电磁粒子速度计测量的粒子速度 58.309 m/s 分别偏差 4.73%、1.13%。造成这一现象的可能原因包括: 从时频谱提取瞬时频率时的误差; 安装时光纤镀膜探针端面与有机玻璃间的注胶填实不是很好; 光纤探针端面嵌入时其距离爆心略大于 25 mm, 以及光纤轴的方向略偏离爆心等。

自上个世纪六七十年代以来, 国内外基于固体介质(黄土、有机玻璃、花岗岩等)进行了多次球面波实验, 并采用电磁粒子速度计来获取实验结果。大量文献表明, 采用圆环型电磁粒子速度计测量的粒子速度, 结果是可信的, 且重复性较好, 故可将圆环型电磁粒子速度计测量作为标准方法进行对比。从处理的结果来看, 光纤镀膜探针获取到的 2 组数据反推的粒子速度与圆环型电磁粒子速度计的数据基本一致, 验证了设计光纤镀膜探针来测量固体介质应力波粒子速度方法的可行性。

4 结论

本文根据激光多普勒效应和激光干涉测速技术, 结合弹性波在不同介质交界面上的反射与透射理论设计实验方案, 搭建填实爆炸下的测速实验系统, 对微型炸药球在有机玻璃中爆炸激发的

应力波粒子速度进行测量。在 0.125 gTNT 当量的微型炸药球爆炸后, 光纤镀膜探针测得距爆心 25 mm 处的粒子速度分别为 55.549 m/s、57.651 m/s, 与传统的圆环型电磁粒子速度计对照实验结果吻合较好, 表明利用光纤镀膜探针法测量固体介质中应力波粒子速度是可行的。同传统方法相比, 光纤镀膜探针法不易受电磁干扰, 其测试对象不局限于球形应力波, 既可以突破实验样品尺寸限制, 还有望应用于实际工程复杂环境中。

参考文献:

[1] 朱小明, 宋宏伟, 刘辉. 岩石中爆炸应力波衰减规律[J]. 山西建筑, 2007, 33(31): 112-113.
ZHU Xiaoming, SONG Hongwei, LIU Hui. The attenuation regular of blasting stress wave in rocks[J]. Shanxi Architecture, 2007, 33(31): 112-113.

[2] 赵生伟, 周刚, 王占江, 等. 小当量水中爆炸气泡的脉动现象[J]. 爆炸与冲击, 2009, 29(2): 213-216.
ZHAO Shengwei, ZHOU Gang, WANG Zhanjiang, et al. Bubble pulses of small-scale underwater explosion[J]. Explosion and Shock Waves, 2009, 29(2): 213-216.

[3] 胡杨, 陈永涛, 金山. 用于冲击波速度测量的自检式光纤传感系统[J]. 红外与激光工程, 2012, 41(9): 2444-2448.
HU Yang, CHEN Yongtao, JIN Shan. Self-check fiber-optic sensor system in shock-wave velocity detection[J]. Infrared and Laser Engineering, 2012, 41(9): 2444-2448.

[4] 卢强, 王占江, 门朝举, 等. 有机玻璃中球形应力波传播的分析[J]. 爆炸与冲击, 2013, 33(6): 561-566.
LU Qiang, WANG Zhanjiang, MEN Chaoju, et al. Analysis of spherical stress wave propagating in PMMA[J]. Explosion and Shock Waves, 2013, 33(6): 561-566.

[5] 王占江, 李孝兰, 张若棋, 等. 固体介质中球形发散波的实验装置[J]. 爆炸与冲击, 2000, 20(2): 103-109.
WANG Zhanjiang, LI Xiaolan, ZHANG Ruoyi, et al. An experimental apparatus for spherical wave propagation in solid[J]. Explosion and Shock Waves, 2000, 20(2): 103-109.

[6] 卢强, 王占江, 丁洋, 等. 线黏弹性球面发散应力波的频率响应特性[J]. 爆炸与冲击, 2017, 37(6): 1023-1030.
LU Qiang, WANG Zhanjiang, DING Yang, et al. Characteristics of frequency response for linear viscoelastic spherical divergent stress waves[J]. Explosion and Shock Waves, 2017, 37(6): 1023-1030.

- [7] 卢强, 王占江, 张景森, 等. 黄土和砂土岩中填实爆炸辐射弹性波的对比研究[J]. 爆炸与冲击, 2019, 39(5): 31-37.
- LU Qiang, WANG Zhanjiang, ZHANG Jingsen, et al. Comparative studies on characteristics of elastic wave radiated from the tamped explosion in loess and rock-like sandy soil[J]. Explosion and Shock Waves, 2019, 39(5): 31-37.
- [8] FISHER N E, WEBB D J, PANNELL C N, et al. Ultrasonic hydrophone based on short in-fiber Bragg gratings[J]. *Applied Optics*, 1998, 37(34): 8120-8128.
- [9] MORRIS P, HURRELL A, SHAW A, et al. A Fabry-Pérot fiber-optic ultrasonic hydrophone for the simultaneous measurement of temperature and acoustic pressure[J]. *The Journal of the Acoustical Society of America*, 2009, 125(6): 3611-3622.
- [10] WATSON S, GANDER M J, MACPHERSON W N, et al. Laser-machined fibers as fabry-perot pressure sensors[J]. *Applied Optics*, 2006, 45(22): 5590-5596.
- [11] KOCH C, JENDERKA K V. Measurement of sound field in cavitating media by an optical fibre-tip hydrophone[J]. *Ultrasonics Sonochemistry*, 2008, 15(4): 502-509.
- [12] 刘俊明, 张旭, 裴红波, 等. JB-9014钝感炸药冲击Hugoniot关系测量[J]. 高压物理学报, 2018, 32(3): 43-49.
- LIU Junming, ZHANG Xu, PEI Hongbo, et al. Measurement of Hugoniot relation for JB-9014 insensitive explosive[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2018, 32(3): 43-49.
- [13] MERCIER P, BÉNIER J, FRUGIER P A, et al. Nitromethane ignition observed with embedded PDV optical fibers[J]. *EPJ Web of Conferences*, 2010, 10: 00016.
- [14] 刘寿先, 黄文斌, 邓向阳, 等. 基于埋入式光纤探针的炸药内爆波速度测量技术初探[C]//2014(第六届)含能材料与钝感弹药技术学术研讨会论文集. 成都: [出版者不详], 2014: 4.
- LIU Shouxian, HUANG Wenbin, DENG Xiangyang, et al. Continuous detonation velocity measurement using embedded fiber probe[C]// Collection of the 2014 Symposium on Energy Materials and Plunt Ammunition Technology, Chengdu: [s.n.], 2014: 4.
- [15] CRANCH G A, LUNS福德 R, GRÜN J, et al. Characterization of laser-driven shock waves in solids using a fiber optic pressure probe[J]. *Applied Optics*, 2013, 52(32): 7791-7796.
- [16] CRANCH G A, GRÜN J, WEAVER J, et al. High power laser and explosive driven shock wave characterization in solids using fiber optic probes[J]. SPIE, 2015, 9634: 189-192.
- [17] 高赞, 贾宪振, 郭炜, 等. 冲击波在有机玻璃中输入和传播规律研究[J]. 科学技术与工程, 2012, 12(19): 4634-4637.
- GAO Zan, JIA Xianzhen, GUO Wei, et al. Study on input and transmit rules of shock wave in PMMA[J]. Science Technology and Engineering, 2012, 12(19): 4634-4637.
- [18] 周健, 龙兴武. 差动激光多普勒测速仪在固体速度测量中的应用[J]. 应用光学, 2009, 30(2): 334-337.
- ZHOU Jian, LONG Xingwu. Application of differential laser Doppler velocimeter in solid velocity measurement[J]. Journal of Applied Optics, 2009, 30(2): 334-337.
- [19] 王礼立. 应力波基础[M]. 2版. 北京: 国防工业出版社, 2005: 45-47.
- WANG Lili. Foundation of stress waves[M]. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2005: 45-47.