

文章编号: 1001-1455(2003)04-0375-05

冲击作用下快响应光纤探针研究*

王荣波, 吴廷烈, 王贵朝, 田建华, 何莉华

(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 为满足在特殊的环境条件下对冲击波速度、飞片速度等冲击波物理参数的精密测量要求, 开发了一种快响应光纤探针技术。该光纤探针由一根一端镀膜的梯度石英光纤和一根金属套管构成。在测量爆轰波、飞片和冲击波到达时间的实验中, 可达到纳秒甚至亚纳秒的时间响应。实验证明该技术是一种可靠的、高时间分辨率的测试手段。

关键词: 爆炸力学; 光纤探针技术; 光纤色散; 响应时间

中图分类号: O521.3 国标学科代码: 130°35 文献标志码: A

1 引 言

随着精密物理实验的发展, 对测试工作的精度要求越来越高。当信号处于长距离传输、强电磁环境中以及直接测量非金属材料参数等情况时, 传统的电子学探针难以满足测量精度的要求。而光纤探针技术正是解决这些问题的理想方法。国外已有多家研究机构开发了这种技术^[1~4], 并将其用于对爆轰波波形、飞片速度、飞片平面度及冲击波速度等参数的测量。

在多年研究的基础上, 我们开发了快响应光纤探针技术, 并在不同的加载条件下对它的动态响应特性进行了考察, 取得了较理想的结果。

2 光纤探针光信号产生机理

有多种发光机理^[1]对光纤探针的光信号有贡献, 其中石英受到冲击压缩时发光是一种公认的发光机制。下面对这一机理进行重点讨论。

1989 年 D. R. Schmitt 等^[5]给出了有关融凝石英的冲击温度和发射率随冲击压力的变化情况。结果表明, 融凝石英在受到冲击压缩时会产生很高的冲击温度, 同时产生光辐射。光纤探针光信号的强弱由石英的温度决定, 由于石英光纤芯的温度与冲击压力有直接的关系, 所以光纤探针的光信号直接受冲击压力的影响。

假设高温石英为绝对黑体, 则光纤探针光信号的功率可由下式进行估算

$$I = \int_{\lambda_0}^{\lambda_1} L^0(\lambda, T) \Delta\Omega S d\lambda \quad (1)$$

式中: $L^0(\lambda, T)$ 为黑体光谱辐射亮度; (λ_0, λ_1) 为光电倍增管的阴极响应波长范围; $\Delta\Omega$ 为光纤接收立体角; S 为光纤截面积。

由普朗克黑体辐射公式可知

$$L^0(\lambda, T) = (c_1/\pi) \lambda^{-5} (e^{c_2/(\lambda T)} - 1)^{-1} \quad (2)$$

式中: $c_1 = 2\pi hc^2$, $c_2 = hc/k$, 其中 c 为光速, h 为普朗克常数, k 为玻尔兹曼常数。

通过光纤的数值孔径估计光接收临界角, 所用的光纤的数值孔径为 0.19, 最大接收角约 0.19, 则

$$\Delta\Omega = 4\pi \sin^2(0.19/2) = 0.113 \quad (3)$$

压力在 50GPa 以上时, 融凝石英的冲击雨贡纽压力与温度的关系^[2]可由下式近似给出

* 收稿日期: 2002-09-13; 修回日期: 2002-12-25

作者简介: 王荣波(1976—), 男, 学士, 研究实习员。

$$T = -2000 + 97p - 0.044p^2 \quad (4)$$

式中: T 为温度, K; p 为压力, GPa。光纤芯径为 $60\mu\text{m}$, 则受光面积 $S = 2.83 \times 10^{-9} \text{m}^2$ 。光电倍增管的阴极响应波长范围为 $0.38 \sim 0.85\mu\text{m}$ 。

将(2)~(4)式及已知量代入(1)式得出光纤探针光信号功率随压力的变化关系。通过数值积分可得出该关系曲线, 如图1所示。从估算可知光纤探针的光信号功率是较高的, 例如在冲击压力为 50GPa 时, 光信号功率为 $128\mu\text{W}$ 。随着压力的增大光信号不断增强, 这对用光电倍增管探测并记录该光信号是十分有利的。

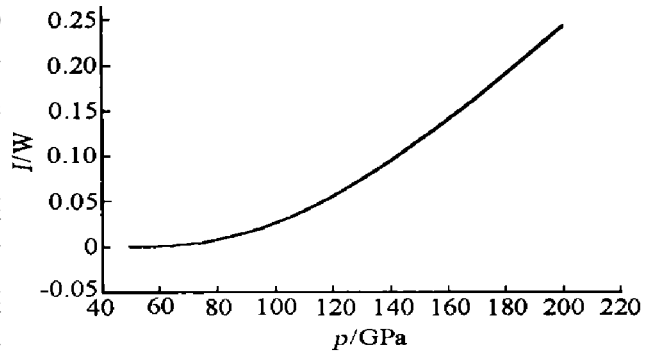


图1 光纤探针光信号功率随压力的变化

Fig.1 Variation of calculated optical power with shock pressure in quartz fiber

3 光纤色散对光纤探针的影响

在长距离传输时, 光纤色散将对光纤探针的响应时间产生影响。因此, 对它进行分析和估算是必要的。对芯径为 0.06mm 的自聚焦多模梯度光纤而言, 色散的主要因素是材料色散。由光纤色散理论^[6]可知, 由于材料色散, 谱宽为 $\Delta\lambda$ 的光源, 单位长度光纤的脉冲展宽为

$$\Delta\tau_{\text{mat}} = -\frac{\lambda\Delta\lambda}{c} \frac{d^2n(\lambda)}{d\lambda^2} \quad (5)$$

式中: $\Delta\tau_{\text{mat}}$ 为单位长度光纤的脉冲展宽, λ 为波长, c 为光速, $n(\lambda)$ 为波长为 λ 时的折射率。

在光电倍增管的阴极波长响应范围内, 材料色散对光纤信号底宽每公里展宽为

$$\Delta\tau_{\text{mat}} = \int_{0.38}^{0.85} -\frac{\lambda}{c} n''(\lambda) d\lambda = -\frac{1}{c} [\lambda n'(\lambda) - n(\lambda)]_{0.38}^{0.85} \quad (6)$$

熔石英的色散公式为

$$n^2 - 1 = \frac{0.6961663\lambda^2}{\lambda^2 - 0.0684043^2} + \frac{0.4079426\lambda^2}{\lambda^2 - 0.1162414^2} + \frac{0.8974794\lambda^2}{\lambda^2 - 9.896161^2} \quad (7)$$

将(7)式求导并连同(7)式一起带入(6)式可得

$$\tau_{\text{mat}}(0.38, 0.85) = 183\text{ps/m} \quad (8)$$

采用 80m 长的光纤, 则信号底宽展宽为 14.6ns 。根据实验结果分析, 光纤探针光信号的前沿约为底宽的 $1/3$ 。则 80m 长的光纤色散对探针信号前沿的展宽为 4.9ns 。记录系统所用的光电倍增管的脉冲上升时间是 0.4ns , 模拟带宽 500MHz 的数字示波器的响应时间约 0.7ns , 都比色散的影响小得多。可见, 在长距离传输时光纤色散是影响光纤探针时间响应特性的最主要因素。表1给出了通过公式(6)算出的在不同波长范围内石英光纤信号的材料色散值。

为了减小色散的影响应尽量使用长度较短的光纤, 在目前的实验中, 我们使用的光纤一般都小于 20m 。减小色散的另一种有效方法是在光电倍增管的光输入端加干涉滤光片。

表1 不同的波长范围内石英光纤信号的材料色值

Table 1 Dispersion of quartz fiber with various wavelength

波长范围/ μm	0.38~0.85	0.38~0.70	0.38~0.60	0.38~0.50	0.38~0.48	0.38~0.46
材料色散/(ps/m)	183	165	142	102	91	78

4 探针结构和动态实验

4.1 探针结构

光纤探针的结构如图2所示。它包括一根梯度石英光纤和一根金属套管, 光纤的芯径 $60\mu\text{m}$, 外径 $175\mu\text{m}$, 金属套管的外径 0.9mm , 内径 0.3mm , 用快干胶将其与光纤粘牢, 它主要起提高探针的强度和

保证垂直定位两方面的作用。光纤的端面经过光学加工并镀有金属膜，金属膜的厚度为100~150nm，其作用是防止杂光进入光纤。

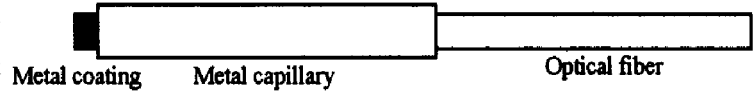


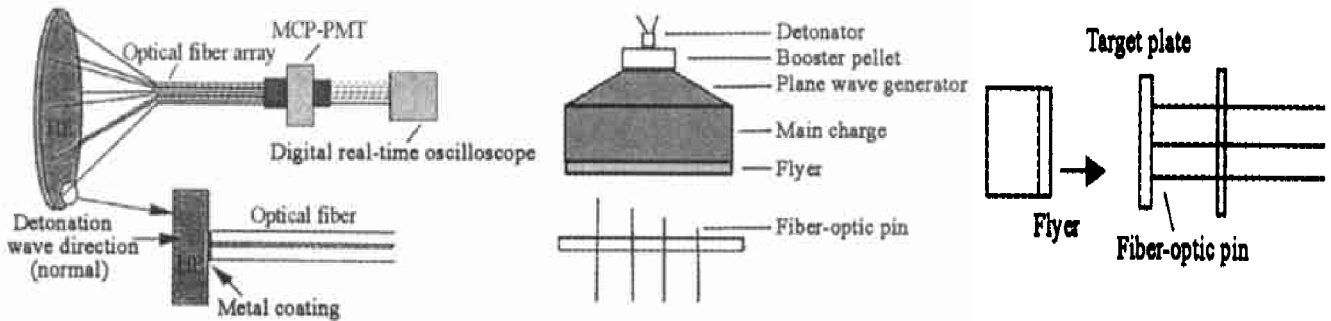
图 2 光纤探针结构示意图
Fig. 2 Schematic of fiber-optic pin

当飞片或冲击波到达探针端面时，由于冲击压力的作用石英光纤会产生光辐射。通过检测这种光辐射就可以获得飞片或冲击波的到达时间。

光纤探针所用的记录系统由光电倍增管和数字示波器组成。其中光电倍增管为脉冲响应时间小于0.4ns的GDB-608型微通道板光电倍增管，数字示波器的采样率可达5GSa/s，模拟带宽1GHz。这是取得亚纳秒时间响应信号的重要保证。

4.2 动态实验

为了考察光纤探针的动态响应特性，图3给出了研究光纤探针在爆轰波、飞片和冲击波作用下响应特性的实验系统示意图。其中图3(a)为爆轰波实验示意图，实验中所使用的药柱是特屈儿，光纤探针与药柱表面垂直紧贴。预估光纤中的冲击压力为30GPa。图3(b)为化爆飞片撞击实验示意图，实验中使用的光纤探针为12根，平均分为四个台阶，其中，一台阶距飞片10mm，台阶间距均为4.7mm，光纤长度6m。通过测量飞片到达各台阶的时间差，可以算出飞片的平均速度。实验所用主药柱为 $\varnothing 100\text{mm} \times 50\text{mm}$ 的TNT/RDX(35/65)炸药，铁飞片厚2mm。其记录系统与图3(a)实验相同。光纤探针的一个重要用途是测量靶内的冲击波速度，了解它在与靶材料直接接触时的响应特性是非常重要的。为此，在二级轻气炮上对光纤探针的这一特性进行了研究。实验布局如图3(c)所示，记录系统与前述试验相同，所用光纤长度为15m，飞片和靶板的材料均为铁。用磁测速装置给出弹丸(飞片)速度。



(a) 爆轰波实验 (b) 化爆飞片撞击实验 (c) 冲击波实验
(a) Detonation experiment (b) Flyer experiment (c) Shock wave experiment

图 3 光纤探针时间响应特性实验示意图

Fig. 3 Schematic of experiments for time response performance investigation of optic-fiber pin

5 结果和讨论

在 20 发爆轰波作用实验取得的信号中，有 90% 的信号响应时间(为 10%~90% 信号上升时间)小于 1.5ns，其中有相当一部分是亚纳秒的。图 4 给出了两个用 7m 长的光纤取得响应时间小于 1ns 的信号，其中图 4(a)信号的响应时间是 0.98ns，图 4(b)信号的响应时间是 0.89ns。

图 5 给出了一发飞片撞击实验的部分信号。光纤探针测得的飞片速度为 3.8km/s。图中 2 个信号分属 2 个台阶，图 5(a)、(b)的响应时间分别是 0.94ns 和 0.82ns。这说明光纤探针在飞片的撞击下可以达到很高的响应速度。

在冲击波实验中取得了如图 6 所示的信号，图 6(a)、(b)的响应时间分别为 2.5ns 和 1.2ns，幅度分别为 1.8V 和 2.5V。这说明在与靶材料直接接触时光纤探针的响应特性也很优良，这对于测量冲击波的速度是很有利的。

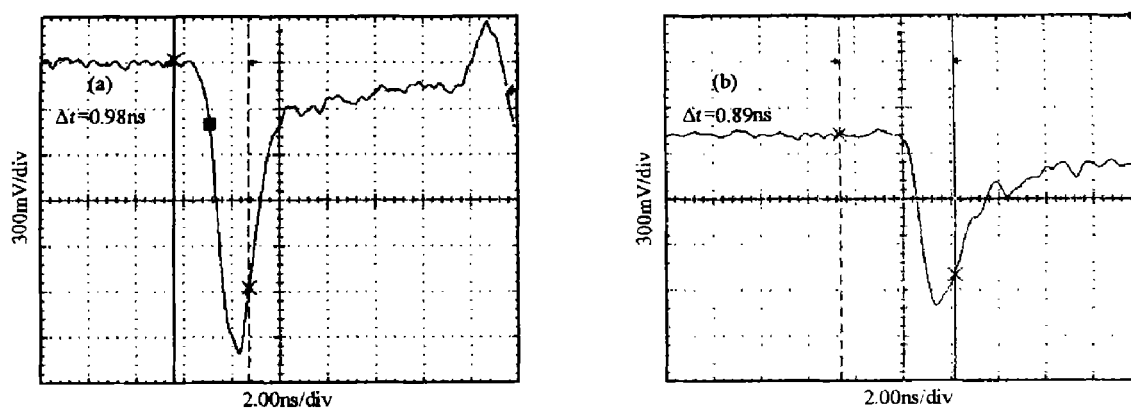


图 4 爆轰波实验中取得的典型信号

Fig.4 Typical signals obtained in the detonation experiments

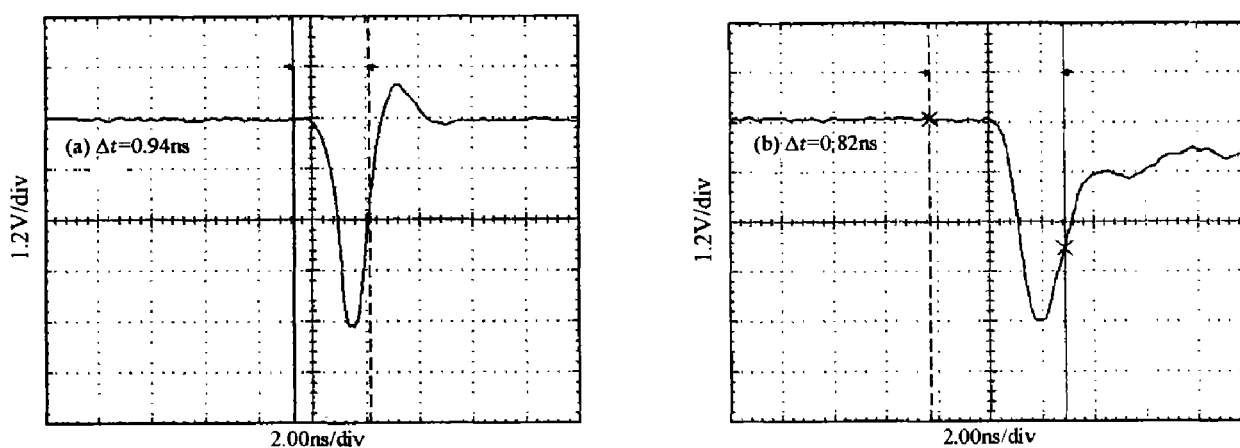


图 5 飞片撞击实验中取得的典型信号

Fig.5 Typical signals obtained in the flyer experiments

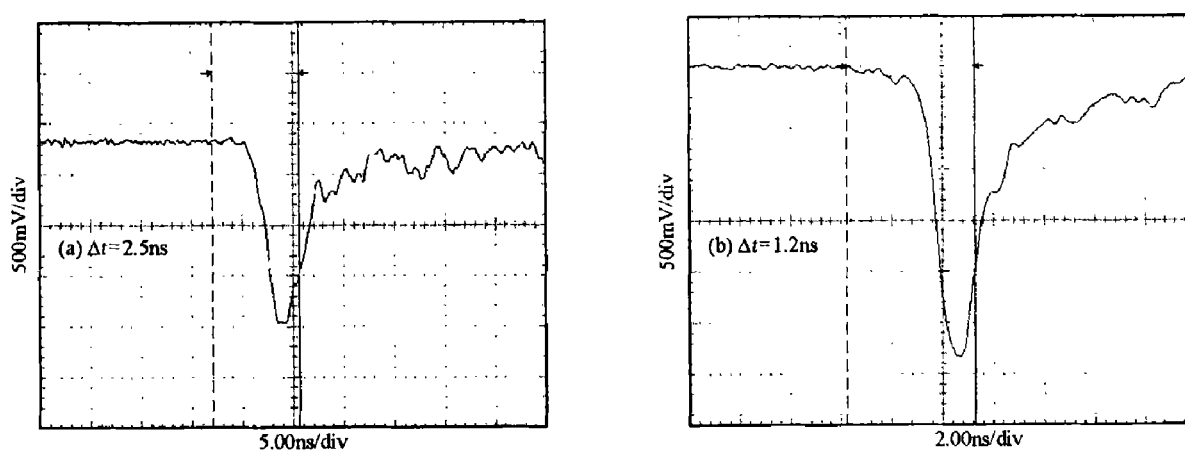


图 6 冲击波实验取得的典型信号

Fig.6 Typical signals obtained in shock wave experiments

表 2 给出了 3 发爆轰波实验的数据, 其中 U_{95} 为置信水准为 95% 的扩展不确定度。从表中可以看出光纤探针的时间响应特性是很稳定的, 一般都保持在 1 ns 左右。表中序号为 1、2、3 的实验中分别安装了 4、5、6 根光纤探针, 每发实验均取得了全部信号。

表 2 典型实验结果

Table 2 Typical results of experiments

序号	响应时间 $\Delta t/\text{ns}$					$\overline{\Delta t}/\text{ns}$	U_{95}/ns
1	1.185	0.954	0.983	1.397		1.13	0.32
2	0.974	1.055	1.154	0.966	1.089	1.05	0.13
3	1.144	0.733	1.343	1.229	1.217	0.892	1.09

6 结 论

从用三种不同的加载方式进行的实验取得的结果来看, 光纤探针技术是一种在冲击载荷下可靠性高、响应快的测试技术, 该技术为爆轰物理和冲击波物理研究提供了一种可靠的、不受电磁干扰的、高时间分辨率的测试手段。

参考文献:

- [1] Roeske F. A fast rise-time fiber optic pin[R]. Livermore, CA94551.
- [2] George M J, Menikoff R, Vesser L R. The use of optical fibers for shock pressure and timing measurements at high pressures[R]. LA-11148-MS, 1988: 1-33.
- [3] Homae T, Moritoh T, Ooya K, et al. A simple fiber-optic pin for detecting a shock-wave[J]. Front Review of Scientific Instruments, 2000, 71(11): 4192-4194.
- [4] Veaser L R, Clark D A, Holtkamp D B, et al. Subcritical plutonium experiment at the nevada test site[R]. Physics Division Progress Report, 1997/1998: 94-101.
- [5] Schmitt D R, Ahrens T J. Shock temperatures in silica glass[J]. Journal of Geophysical Research, 1989, 94(85): 5851-5871.
- [6] 孙小菡. 光纤通信原理与系统[M]. 南京: 东南大学出版社, 1999: 48-60.

A fast rise-time fiber-optical pin for shock wave measurement

WANG Rong-bo^{*}, WU Ting-lie, WANG Gui-chao, TIAN Jian-hua, HE Li-hua
*(Institute of Fluid Physics, China Academy
of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)*

Abstract: A fast rise-time fiber-optical pin has been developed for measuring shock wave velocity, flyer velocity etc in special environment. The pin consists of a graded index optical fiber (one end coated with metal) and a metal capillary. The intrinsic rise time of signals obtained from detonation experiments, flyer experiments and shock wave experiments is less than one nanosecond, indicating such a pin is reliable and high time resolved for measurement.

Key words: mechanics of explosion; fiber-optic pin technique; optic fiber dispersion; response time

* Corresponding author: WANG Rong-bo
Telephone: 0816-2484178