

文章编号: 1001-1455(2006)03-0284-04

# 石英光纤探针在非金属材料冲击实验中的应用\*

王荣波, 田建华, 何莉华, 李泽仁, 赵剑衡, 吴廷烈  
(中国工程物理研究院流体物理研究所, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 使用石英光纤探针成功测量了 Teflon 样品中的冲击波速度和电炮加载的厚度为 75  $\mu\text{m}$  的 Mylar 膜飞片的平均速度和到达时间一致性。实验证明, 石英光纤探针技术为非金属材料的冲击实验提供了一种直接的、不受电磁干扰的、精确的测量手段。

**关键词:** 爆炸力学; 冲击波速度; 测量技术; 光纤探针; 非金属材料; 飞片速度

**中图分类号:** O389; O521.3      **国标学科代码:** 130·35      **文献标志码:** A

## 1 引 言

长期以来, 电探针是流体动力学实验中主要的诊断手段之一, 在爆轰波速度、飞片速度、爆轰波和飞片击靶波形等流体动力学重要物理参数的测量中发挥了重要作用<sup>[1]</sup>, 取得了许多有价值的成果。然而, 由于受机理的限制, 电探针很难在强电磁辐射的环境中工作, 也不能对不导电的非金属进行直接测量。正是在这种情况下, 光纤探针应运而生, 经过近些年的发展, 技术逐步成熟。

光纤探针结构简单, 不受电磁干扰的影响, 能够实现纳秒甚至亚纳秒的时间响应, 容易大规模使用和长距离传输, 因此受到人们越来越多的关注。美国、法国已在其国家实验中大规模使用了光纤探针, 且取得了良好的效果, 显示出光纤探针广阔的应用前景。

同时, 石英光纤探针由于其受冲击后自发光的特性<sup>[2~3]</sup>, 为非金属材料冲击波速度和飞片平面性的测量提供了一种直接的方法。由于其优良的响应特性<sup>[3~4]</sup>, 使测量可以达到较高的精确度。本文中简要介绍了光纤探针的原理, 给出了石英光纤探针在非金属材料冲击实验中的应用实例。

## 2 石英光纤探针的结构及测量原理

石英光纤探针的结构如图 1 所示。它由一根石英光纤和一根金属套管构成, 金属管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 120~150 nm, 其作用是防止杂光进入光纤。

石英光纤探针是利用熔石英在受到冲击时会产生光辐射的特性<sup>[5]</sup>工作的。图 2 给出了单路光纤探针的系统示意图。由图 2 可知, 光纤探针测量系统由石英光纤探针、传输光纤、光电倍增管、高频电缆和数字示波器组成。冲击产生的光脉冲信号经光纤传输到光电探测器转换为电信号再由示波器记录, 通过判读就可以知道冲击波或飞片到达光纤探针的时刻。

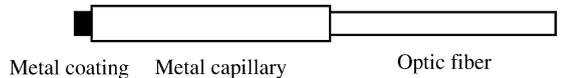


图 1 光纤探针结构示意图

Fig. 1 Schematic of fiber-optic pin

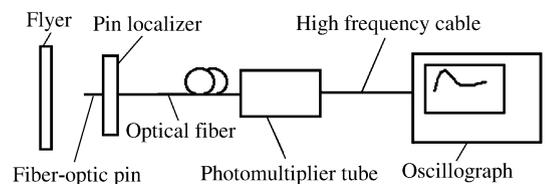


图 2 单路光纤探针测量系统示意图

Fig. 2 Schematic diagram of single channel fiber-optic pin measurement system

\* 收稿日期: 2005-03-30; 修回日期: 2005-08-24

作者简介: 王荣波(1976—), 男, 助理研究员。

在基板和样品的下表面各布置一定数量的光纤探针，就可以测出冲击波在样品中传播的时间。再利用已知的样品厚度就可以计算出样品中的冲击波速度。在飞片行进的方向上安排一定间距  $\Delta l$  (事先设计) 的两组光纤探针，通过测量两组光纤探针的信号时间间隔，就可以计算出飞片在此区间的平均速度。在飞片行进方向上的测试平面内安装大量的光纤探针 (端面在一个平面)，根据各个光纤探针光信号的时刻，就可以测量出飞片的平面性。

### 3 应用实例

#### 3.1 Teflon 样品中冲击波速度测量

实验装置及探针分布如图 3、4 所示。实验中使用的 Teflon 样品的直径为 15 mm，厚度为  $4.000 \text{ mm} \pm 0.002 \text{ mm}$ 。飞片及基板材料采用 LY-12 铝合金。飞片尺寸为  $\varnothing 100 \text{ mm} \times 3 \text{ mm}$ ，基板尺寸为  $\varnothing 40 \text{ mm} \times 4 \text{ mm}$ 。实验采用化爆加载的方式，加载装置由一块  $\varnothing 100 \text{ mm} \times 37^\circ$  的炸药平面波透镜和一块  $\varnothing 100 \text{ mm} \times 50 \text{ mm}$  的 TNT/RDX 炸药组成。实验共安装 13 根光纤探针，其中 Teflon 样品上安装 6 根且均匀分布在  $\varnothing 13 \text{ mm}$  的圆环上，基板上安装有 7 根，其中 1 根安装在基板中心，另外 6 根安装在  $\varnothing 30 \text{ mm}$  的圆环上。为了防止 Teflon 在冲击加载下发光对测量产生影响，在光纤探针的端面镀有一层铝膜。

图 5 给出了实验中安装于 Teflon 样品下表面的部分光纤探针 (2~5 号探针) 给出的信号波形。实验取得信号的上升时间均在 2 ns 左右，1~13 号光纤探针测到的冲击波到达时间分别为 37.991、38.683、38.668、38.667、38.666、38.675、38.688、38.158、38.164、38.137、38.126、38.113、38.120  $\mu\text{s}$ 。

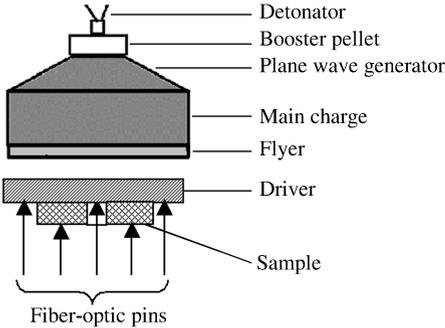


图 3 冲击波速度测量实验装置示意图

Fig. 3 Schematic of shock wave velocity measurement experiment

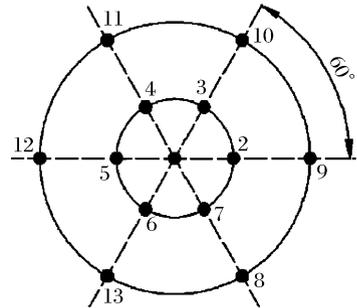


图 4 冲击波速度测量装置的光纤探针布局图

Fig. 4 Arrangement of fiber-optic pins for shock wave velocity measurement

由以上测试数据可知，安装在铝样品下表面的 8~13 探针信号起跳点时刻的平均值为 38.136  $\mu\text{s}$ ，此值与中心探针信号起跳点时刻 37.991  $\mu\text{s}$  存在明显差距，说明飞片冲击靶时呈下凹形状，一般将这种波形表示为

$$\bar{t}(R) = A + BR^2 \tag{1}$$

式中： $R$  为探针到爆轰装置中心的分布半径， $A$ 、 $B$  为常数。

将  $R=0$  和  $R=15$  的测量结果代入得： $A=37.991 \mu\text{s}$ ， $B=647 \mu\text{s}/\text{m}^2$ ，则可由 (1) 式求出冲击波到达与 Teflon 样品下表面探针对应的半径  $R=6.5 \text{ mm}$  处的平均时间为  $\bar{t}=38.018 \mu\text{s}$ ，则冲击波在 Teflon 样品中的传播时间为

$$\Delta t = \bar{t}_{2\sim 7} - \bar{t}(6.5) = 0.657 \mu\text{s} \tag{2}$$

已知 Teflon 样品厚度  $h=4.00 \text{ mm}$ ，得到样品中的冲击波速度

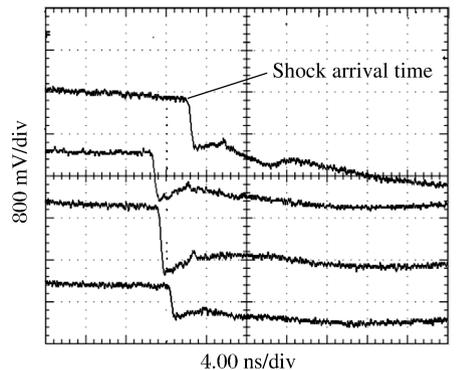


图 5 Teflon 样品下表面部分探针信号

Fig. 5 Signals of fiber-optic pins localized under the Teflon sample

$$D = h/\Delta t = 6.088 \text{ km/s} \tag{3}$$

利用文献[1]提供的总和测量法可以计算出样品上表面光纤探针单次测量标准差为  $0.007 \mu\text{s}$ , 平均值标准差为  $0.003 \mu\text{s}$ 。样品下表面光纤探针的单次测量标准差为  $0.010 \mu\text{s}$ , 平均值测量标准差为  $0.004 \mu\text{s}$ 。

则冲击波穿过样品的时间的标准不确定度

$$u(\Delta t) = \sqrt{0.003^2 + 0.004^2} = 0.005 \mu\text{s} \tag{4}$$

则冲击波速度  $D$  的合成标准不确定度

$$u(D) = \sqrt{u^2(h)/\Delta t^2 + (h/\Delta t)^2 u^2(\Delta t)} = 0.031 \text{ km/s} \tag{5}$$

式中:  $u(h)$  为样品厚度的标准测量不确定度。

### 3.2 电炮加载的 Mylar 膜飞片的到达时间一致性及平均速度测量

实验装置如图 6 所示, Mylar 膜飞片在受到电炮冲击后飞出, 并在加速腔中被加速到很高的速度。实验采用同步机实现起爆和数据采集的同步。实验中使用的 Mylar 膜飞片的厚度为  $75 \mu\text{m}$ , 直径为  $10 \text{ mm}$ , 加速腔长度为  $4 \text{ mm}$ 。实验中使用了 9 根光纤探针, 布局如图 7 所示, 9 根探针分布在两条垂直的测线上, 探针间距为  $4 \text{ mm}$ 。

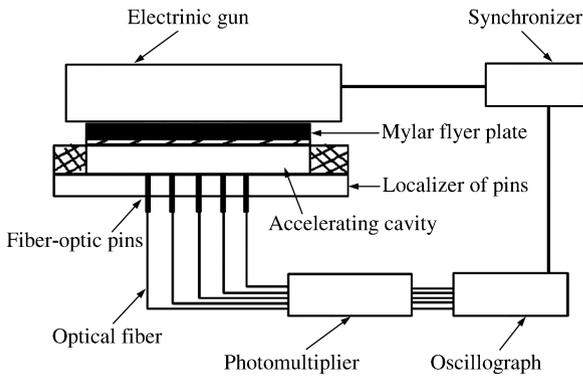


图 6 电炮实验装置示意图

Fig. 6 Schematic of electronic gun experiment

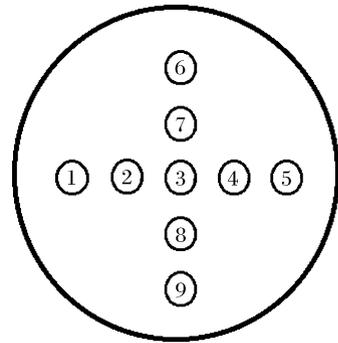


图 7 探针布局图

Fig. 7 Arrangement of fiber-optic pins

图 8 给出了实验取得的部分信号波形(6~9 号探针)。从实验取得的信号来看, 电炮加载时产生的强烈电磁干扰对光纤探针并未产生影响, 这充分体现了光纤探针不受电磁干扰的优点。由于电炮加载时产生的等离子体光辐射很强, 可以透过探针端部镀的金属膜而进入光纤, 该光信号刚好反映了起爆时刻。图 8 中信号的第一个拐点时刻即是电炮起爆时刻, 第二个陡峭的拐点时刻是飞片撞击光纤探针的时刻。实验测得的飞片到达 1~9 号光纤探针端面的时刻分别为  $8461, 8453, 8433, 8472, 8433, 8450, 8477, 8453, 8442 \text{ ns}$ 。实验测得电炮起爆时刻为  $7746 \text{ ns}$ , 与飞片到达探针的时间的平均值  $8453 \text{ ns}$  差  $707 \text{ ns}$ 。则可知飞片在加速腔内飞行的平均速度为  $4/0.707 = 5.66 \text{ km/s}$ 。利用前面的数据可以绘制

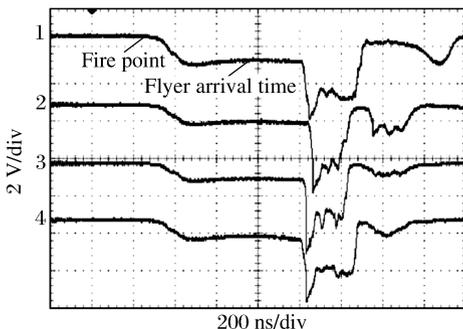


图 8 电炮飞片实验得到的部分信号

Fig. 8 Partial signals obtained in electronic gun flyer experiment

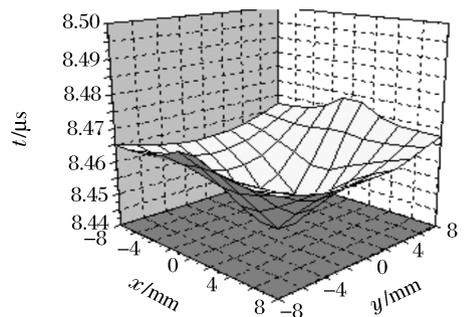


图 9 Mylar 膜飞片三维形状图

Fig. 9 3D shape of Mylar flyer

出飞片到达测试面的形状(如图9所示),飞片呈“锅底”状,与理论分析相吻合。据此可以确定在光纤探针覆盖的范围内( $\varnothing 8$  mm),Mylar膜飞片的到达时间一致性优于30 ns。

## 4 结 论

使用石英光纤探针精确测量了化爆加载下 Teflon 样品中的冲击波速度和电炮加载的 Mylar 膜飞片的平均速度和达到时间一致性。实验结果表明,石英光纤探针在非金属材料冲击波的作用下和非金属飞片的作用下均能达到几个纳秒的响应,可以用于对非金属材料中的冲击波速度和飞片速度及飞片到达时间一致性的精确测量;实验还表明光纤探针是一种不受电磁干扰的精确的测量手段,显示出光纤探针在非金属材料冲击参数测量中广阔的应用前景。

## 参考文献:

- [1] Mitchell A C, Nellis W J. Shock compression of aluminum, copper and tantalum[J]. *Journal of Applied Physics*, 1981,52(5):3 363-3 374.
- [2] 王荣波,吴廷烈,王贵朝,等.冲击作用下快响应光纤探针研究[J].*爆炸与冲击*,2003,23(4):375-379.  
WANG Rong-bo, WU Ting-lie, WANG Gui-chao, et al. A fast rise-time fiber-optic pin for shock wave measurement[J]. *Explosion and Shock Waves*, 2003,23(4):375-379.
- [3] Sandival J S, Idzorek G C, Ortega D. Fiber optic diagnostic for Z-experiments[A]. *IEEE International Conference on Plasma*[C]. New Mexico, United States; Los Alamos National Laboratory, 2001:785-787.
- [4] 王荣波,何莉华,田建华,等.两种光纤探针在冲击波作用下的时间响应[J].*高压物理学报*,2005,19(3):284-288.  
WANG Rong-bo, HE Li-hua, TIAN Jian-hua, et al. The time response character of two types of fiber-optic pins under shock loading[J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2005,19(3):284-288.
- [5] Schmitt D R, Ahrens T J. Shock temperatures in silica glass[J]. *Journal of Geophysical Research*, 1989,94(85): 5 851-5 871.

## Application of fiber-optic pin to nonmetallic shock experiments

WANG Rong-bo<sup>\*</sup>, TIAN Jian-hua, HE Li-hua,  
LI Ze-ren, ZHAO Jian-heng, WU Ting-lie

(*Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics,*  
*Mianyang 621900, Sichuan, China*)

**Abstract:** Shock wave velocity in Teflon sample, average velocity and flatness of Mylar flyer plate driven by electronic gun were measured by fiber-optic pins. Experimental results show that quartz optical fiber pin diagnostic technology provides a direct, electronic noise immune, accurate shock diagnostic for nonmetallic material shock experiments.

**Key words:** mechanics of explosion; shock wave velocity; diagnostic technology; fiber-optic pin; non-metallic material; flyer velocity

\* Corresponding author: WANG Rong-bo  
E-mail address: wangrbo@tom.com  
Telephone: 0816-2484178