文章编号：1000-5773(2005)03-0284-05

两种光纤探针在冲击波作用下的时间响应特性*

王荣波，何莉华，田建华，吴廷烈，叶 雁，李泽仁

（中国工程物理研究院流体物理研究所，四川绵阳 621900）

摘要：对冲击波参数的测量开发了两种光纤探针，以满足强电磁环境和冲击压力较低的情况。一种是冲击自发光光纤探针，另一种是闪光隙光纤探针。这两种光纤探针分别利用融凝石英在受到冲击压缩时发光和氩气（或空气）隙在受到压缩时会产生很强的光辐射的机理研制而成的。自发光光纤探针在大于 70 GPa 冲击压力下，其信号上升时间在 1～3 ns 之间；闪光隙光纤探针在 10～30 GPa 的冲击压力下，其信号上升时间稳定在 2～7 ns 之间。

关键词：冲击波物理；光纤探针；闪光隙；响应时间

中图分类号：O521.3 **文献标识码**：A

1 引 言

在冲击波物理与爆轰物理实验研究中，光纤探针技术得到越来越广泛的应用。在国外，光纤探针已被用于测量飞片速度、飞片平整性、样品中冲击波速度和声速，以及测量飞层和爆轰波在某时刻的波形[1,2]等，取得了许多有价值的成果。

光纤探针作为一种传感器，它的优势在于进出敏感区的信号与电没有任何联系，具有抗电磁干扰、电绝缘、消除了与地面隔离的问题等优点；同时用光纤传输，尺寸小、重量轻、灵敏度高。另外实验证明，在 30 GPa 以下冲击压力范围内，光纤探针的时间响应特性与电探针相比有较强的优势。

2 光纤探针发光机理及其对信号响应时间的影响

光纤探针的测量原理是，当冲击波或飞片撞击光纤端面时，光纤探针产生一个瞬时光信号，这个光信号经光纤传输到光电探测器，变换为电信号，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。光纤探针获得的是冲击波或飞片到达某个空间位置的时间信息。在冲击波或飞片行进的方向上，安排一定间距 Δl（事先设计）的两根光纤探针，通过测量两根光纤探针的信号时间间隔，就可以计算出冲击波或飞片在此区间的平均速度。在冲击波或飞片行进方向上的某一平面内，设置大量的光纤探针（端面在一个平面），根据各个光纤探针光信号的时刻，结合冲击波或飞片速度，就可以描绘出在某个空间位置的冲击波波形和飞片的形变。

目前研究的光纤探针有两种，一种是自发光光纤探针[3]，另一种是闪光隙光纤探针。下面分别对这两种光纤探针的发光机理进行分析。

2.1 冲击自发光光纤探针

自发光光纤探针是在光纤的受撞击端镀金属膜制成，其结构如图 1 所示。其中光纤的端面经过处理，金属膜的作用是防止环境杂光和爆轰产物光进入光纤。其工作原理是融凝石英在受到冲击压缩时会产生相当高的冲击温度，同时产生光辐射[4]。表 1 给出了有关融凝石英的冲击温度、发射率随冲击压力的变化情况，其中 p 为石英中的冲击压力，T 为冲击温度，ε 为石英的表面发射率。在压力较低的情

* **收稿日期**：2004-05-09；**修回日期**：2004-11-17

作者简介：王荣波（1976—），男，学士，助理研究员，主要研究方向为光学测试技术. E-mail：wangrbo@tom.com

况下,其表面发射率很低,辐射出的能量很微弱,所以这种光纤探针一般用在压力较高的情况下。

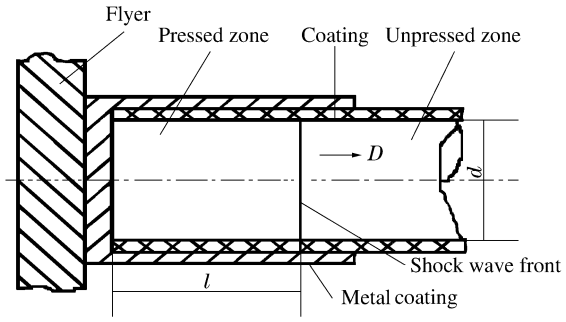


图 1　自发光光纤探针空腔辐射模型

Fig. 1　The cavity radiation model of self-luminescence fiber-optic pin

表 1　融凝石英的冲击温度、发射率随冲击压力的变化

Table 1　The change of quartz's shock temperature and emissivity with shock pressure

p/(GPa)	T/(K)	$\varepsilon/(10^{-3})$
9.8	4 390	12
10.0	4 210	6.4
13.7	3 240	2.5
15.2	3 590	4.7
20.0	2 950	5.8
21.0	2 620	2.3
22.2	3 270	3.5
25.7	2 190	56
25.8	2 930	55
27.5	2 400	41
29.3	2 030	780
29.6	2 930	30
30.2	2 880	22

图 1 示出了自发光光纤探针的空腔辐射模型。石英光纤端面在受到沿轴线飞行的飞片撞击时,光纤中将产生沿轴向传播的冲击波。在冲击波掠过的区域,融凝石英将产生光辐射。随着冲击波向前传播,在光纤端部将很快形成一个由光纤被覆层和飞片材料为壁、腔内充满高温高压石英的等温空腔(见图 1),冲击波阵面就是该空腔的腔口,空腔深度 l 随着冲击波的传播而迅速增加。设冲击波速度为 D,波后粒子速度为 u_p,则空腔深度

$$l=(D-u_p)t \tag{1}$$

根据古费(Gouffe)理论,可以推得等温漫射孔腔腔孔的有效发射率为

$$\varepsilon=\frac{\varepsilon_0[1+(1-\varepsilon_0)(0.25g-0.1875g^2)]}{\varepsilon_0+(1-\varepsilon_0)(0.25g-0.125g^2)} \tag{2}$$

式中:$g=d/l$,d 为光纤芯径;ε_0 为空腔内表面的发射率。

由上式可知,空腔发射率是空腔深度与腔口直径比值的函数。当材料表面发射率一定时,l/d 越大,空腔发射率越大。对光纤探针而言,随着冲击波的向前传播,ε 将越来越大。设空腔深度为 l_0 时 ε 达到最大值,此时光辐射达到最强,记录系统所给出的信号也将达到峰值。则光信号的上升时间为

$$\Delta\tau=l_0/(D-u_p) \tag{3}$$

由此可知,这种光纤探针信号的上升时间与入射飞片的速度有关。飞片速度越大,光纤探针信号上升越快。

2.2　闪光隙光纤探针

如图 2 所示,在被测自由面和光纤之间设置一个气隙,其中充入气体,气体在受到冲击压缩时发光,通过探知这种发光,就可以得到冲击波出自由面的时刻。这就是闪光隙光纤探针的工作原理。用作发光介质的气体一般采用空气和氩气,表 2 给出了空气和氩气部分压力点下的温度值[5]。表中 D 为冲击波速度,p_H 为波后气体的压力,T_H 为波后气体的温度。从表中可以看出,空气在较低的压力下就可达到很高的温度值,而氩气更高。所以,使用空气和氩气作为发光介质是比较理想的。这种探针可以

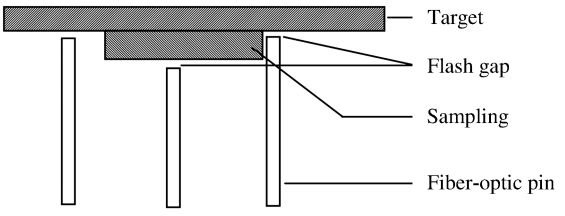


图 2　闪光隙光纤探针测量示意图

Fig. 2　The configuration of the flash gap fiber-optic pin

应用在冲击压力为 10～30 GPa 的实验中。

闪光隙光纤探针的光信号上升时间与闪光隙的厚度 h 和冲击波速度 D 有关，在不考虑二次压缩对信号的贡献的情况下，这种探针的光信号上升时间可由下式计算

$$\Delta\tau = h/D \tag{4}$$

可见，要使这种光纤探针的信号上升时间较快，在保证信号幅度的前提下，应使闪光隙尽量的小。闪光隙的宽度在 20 μm 左右。从实验结果来看，二次压缩对信号幅度的贡献很大，而对信号上升时间的贡献小于 1 ns。

表 2 空气和氩气的几个波后状态参数

Table 2 The state parameters of air and argon after shock wave

Gases	D/(km/s)	p_H/(MPa)	T_H/(K)	Gases	D/(km/s)	p_H/(MPa)	T_H/(K)
Air	3.35	12.7	4 000	Argon	3.90	12.17	12 550
Air	4.54	23.6	6 000	Argon	4.89	20.32	15 400
Air	5.64	36.6	8 000	Argon	5.89	30.54	17 600

3 光纤探针时间响应特性的研究

图 3 示出了单路光纤探针测量系统的示意图。由图可知，光纤探针的信号通路是：瞬态光信号经光纤传输到光电倍增管，由光电倍增管转换成电信号后经高频电缆传输到示波器记录。

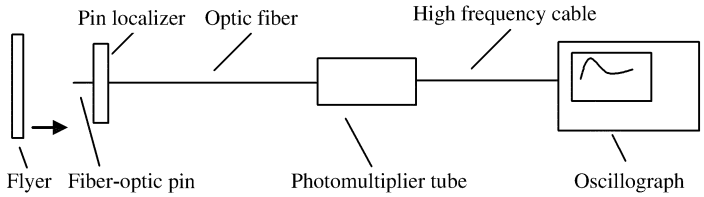


图 3 单路光纤探针测量系统示意图

Fig. 3 Schematic diagram of single channel fiber-optic pin measuring system

示波器最终记录的电信号的上升时间除了与光信号上升时间有关外，还将受到传输光纤色散对信号的展宽、光电倍增管的脉冲上升时间、高频电缆对信号前沿的拉宽效应以及示波器脉冲上升时间等因素的影响。示波器信号最终给出的信号上升时间，由这些因素共同决定，可由下式进行计算

$$t_{rr} = \sqrt{t_{rs}^2 + t_{rd}^2 + t_{rp}^2 + t_{rc}^2 + t_{ro}^2} \tag{5}$$

式中：t_{rr} 为示波器最终记录信号的上升时间；t_{rs} 为光信号的上升时间；t_{rd} 为光纤色散对光信号前沿的展宽值；t_{rp} 为光电倍增管脉冲上升时间；t_{rc} 为电缆对信号前沿的拉宽；t_{ro} 为示波器的脉冲上升时间。

文献[3]对光纤色散对光纤探针信号前沿的展宽作了估算，对于 10 m 长 、芯径为 0.1 mm 的梯度石英光纤而言，色散对前沿的展宽约为 0.6 ns。1 m 长的高频电缆对信号前沿的拉宽不大于 0.5 ns。所用的光电倍增管的脉冲上升时间为 0.4 ns，示波器脉冲上升时间为 0.7 ns。由此可知，整个信号传输和记录系统对最终示波器给出的信号前沿的贡献为 1.1 ns。在信号传输记录系统不变的情况下，影响示波器最终信号上升时间的主要因素是光纤探针的光信号上升时间。由(3)式和(4)式可知，光纤探针光信号的上升时间与冲击波的速度有很大的关系，所以有必要在不同的冲击压力下，对光纤探针的时间响应特性进行考查。

对于自发光光纤探针，用气炮加载的方式，对飞片速度为 5.12、4.0、3.0、1.68 km/s 时光纤探针的时间响应特性进行了考查。实验对应的压力点分别是：156、112、74.2、34.4 GPa。图 4 示出了实验中得到的一个典型信号，该信号响应时间(10%～90%的信号上升时间)是 1.34 ns。各压力点下光纤探针信号的响应时间分散性如图 5 所示。从图中可以看出，在 156、112 和 74.2 GPa 的冲击压力下，光纤探针

的响应时间在 1～3 ns 之间,响应时间及其分散性可以满足精密测试的要求。而在冲击压力为 34.4 GPa时,自发光光纤探针的响应时间在 10～20 ns 之间,此时已不能用作精密测量。鉴于此,开发了可用于较低冲击压力下的闪光隙光纤探针。

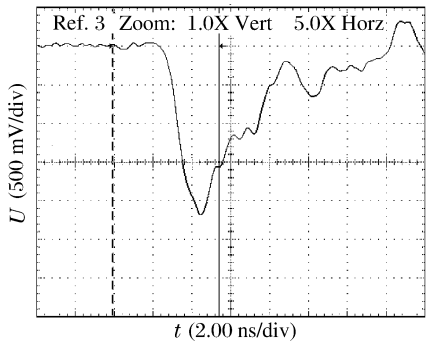


图 4　冲击自发光光纤探针典型信号波形图

Fig. 4　The typical waveform of self-luminescence fiber-optic pin

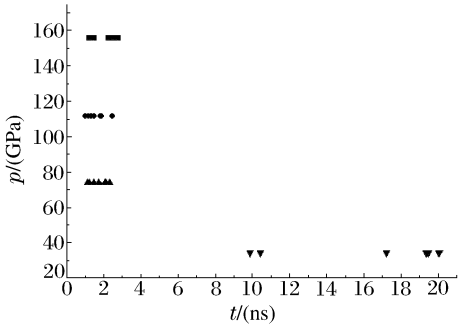


图 5　不同压力点下自发光光纤探针响应时间分散性比较

Fig. 5　The decentralization of self-luminescence fiber-optic pin response time under different shock pressures

利用化爆加载的方式对闪光隙光纤探针在 10～30 GPa 的时间响应特性进行了研究。实验实测的压力为 29.4、20.1 和 14.9 GPa。图 6 示出了一个典型的闪光隙光纤探针信号波形,其响应时间为 2.49 ns。这三个压力点下闪光隙光纤探针的响应时间分散性如图 7 所示。从图中可以看出,在 20.1 和 29.4 GPa 的冲击压力下,闪光隙光纤探针的响应时间分布在 1.5～3.0 ns 之间;在 14.9 GPa 时,其信号响应时间分布在 2～7 ns 之间。可见,闪光隙光纤探针在较低的冲击压力下的时间响应特性比自发光光纤探针优良,可以满足精密物理测试的要求。

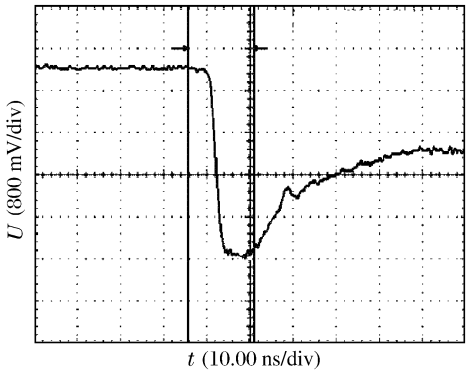


图 6　闪光隙光纤探针典型信号波形

Fig. 6　The typical waveform of flash-gap fiber-optic pin

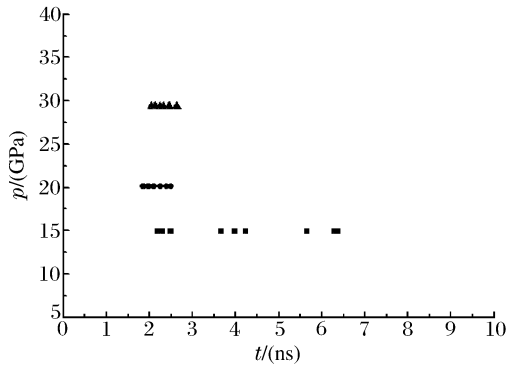


图 7　不同压力点下自发光光纤探针响应时间分散性比较

Fig. 7　The time decentralization of flash-gap fiber-optic pin response time under different shock pressures

4　结　论

利用两种不同的发光机理,研制了两种不同的光纤探针。这两种光纤探针在冲击作用下的时间响应特性都很优良,自发光光纤探针在大于 70 GPa 冲击压力下,其信号响应时间为 1～3 ns;闪光隙光纤探针在 15～30 GPa 冲击压力下,其信号响应时间为 2～7 ns。它为在强电磁环境及冲击压力较低的情况下对冲击波参数的精确测量提供了一种可靠的测试技术。

References:

[1] 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.

[2] Veeser L R, Clark D A, Holtkamp D B, et al. Subcritical Plutonium Experiment at the Nevada Test Site [R]. California: University of California, 1997/1998. 94－101.

[3] Wang R B, Wu T L, Wang G C, et al. A Fast Rise-Time Fiber-Optic Pin for Shock Wave Measurement [J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(4): 375－379. (in Chinese)
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.

[4] Schmitt D R, Ahrens T J. Shock Temperatures in Silica Glass [J]. J Geophys Res, 1989, 94(85): 5851－5871.

[5] Tang J Y, Peng Q X, Gu Y, et al. Radiant Properties of Argon Gases under Shock Compression [J]. Chisese Journal of High Pressure Physics, 2001, 15(4): 285－290. (in Chinese)
唐敬友, 彭其先, 谷 岩, 等. 冲击压缩下氩气辐射特性初步研究 [J]. 高压物理学报, 2001, 15(4): 285－290.

The Time Response Character of Two Types of Fiber-Optic Pin under Shock Wave Loading

WANG Rong-Bo, HE Li-Hua, TIAN Jian-Hua,
WU Ting-Lie, YE Yan, LI Ze-Ren

(1. *Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: Two types of fiber-optic pin have been developed for measuring shock wave physics characters in strong electromagnetic environment and low shock pressure experiments. One is the shock self-luminescene fiber-optic pin, and the other is the flash-gap fiber-optic pin. The physical mechanism of the fiber-optic pins is the quartz and the argon (or air) gap can luminesce under shock compressed. The dynamic time response character of the fiber-optic pins have been tested under shock loading. The response time of self-luminescene fiber-optic pin signals are less than 3 ns, which obtained in experiments that shock pressure was higher than 70 GPa. The response time of flash-gap fiber-optic pin signals are between 2 ns and 7 ns under 10～30 GPa shock pressures.

Key words: shock wave physics; fiber-optic pin; flash-gap; response time