

# 光学纤维在爆轰测试中的应用

盛 永 定

纤维光学的发展,特别是价格低廉,透光性能良好的塑料光学纤维的出现,为爆轰测试提供了新的测试手段。本文例举了光学纤维在爆轰测试中的应用和应用这一技术时的参数选择,以及要考虑的几个主要问题。

光学纤维(以下简称光纤)与高速相机结合,应用于爆轰物理实验的参数测试,从六十年代中期起就有报导<sup>[1]</sup>。随着纤维光学技术的发展,特别是塑料光纤的出现,使它在爆轰测试中的应用日益广泛,不仅为爆轰实验提供了新的测试手段,而且丰富和扩展了狭缝扫描高速相机的使用性能。

## 一、一般原理

炸药爆轰产物的压力和温度很高,不仅本身能发出强光,而且在压缩其周围气体时,也能使其电离发出强光,从而为高速摄影提供了强光源。

爆轰测试所使用的光纤探针是根据纤维光学原理而设计的。它的最大特点是能弯曲的把光从一端传递到另一端而被测试仪器所接收。如图1所示,当光线以 $\alpha$ 角由折射率为 $n_0$ 的介质射入圆柱形光纤的端面时,根据Snell定律,在 $n_1$ 介质内构成 $\alpha'$ 角,并以 $\alpha_1 = \frac{\pi}{2} - \alpha'$ 射入 $n_1$ 和 $n_2$ 两介质的界面,当 $n_1 > n_2$ ,  $\alpha_1$ 大于或等于临界角时,射向 $n_2$ 介质的光线就在纤维内部产生全反射。经过多次反射后,又能以同样的 $\alpha$ 角在另一端射出。

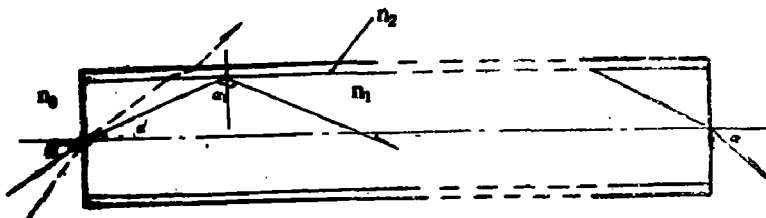


图1 光学纤维的传光原理 ( $n_1 > n_2$ )

对于子午光线,能产生全反射的初始入射光线的最大入射角 $\alpha_M$ 可用下式表示,

$$n_0 \sin \alpha_M = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

$$\text{在空气中 } n_0 = 1 \quad \therefore \text{Sin}\alpha_M = \sqrt{n_1^2 - n_0^2}$$

这就是通常所说的光纤数值孔径,用符号NA (Numerical Aperture) 表示。 $\alpha_M$ 角称光纤的最大受光角。

## 二、应用举例

### (一) 测炸药的内爆参数

用通常的狭缝扫描技术只能测得相机视线所能及的那部分爆轰现象。用光纤探针测试,可以把相机的视线深入到爆炸装置的内部去测试某些有意义的信息。例如图2所示的爆轰装置,它类似于《爆炸物理学》<sup>[2]</sup>一书中所载的研究聚能射流的装置。若用通常的狭缝扫描高速摄影来测试冲击波出金属罩波形,由于受到视角及景深的限制,只能测得很小角度(如图中 $\theta$ )内的信号,对于角度大于 $\theta$ 处波形随时间的变化就几乎无法分辨。而用光纤探针测试,不仅可测得整个金属罩的初始波形和自由面速度,还可以在引爆点附近安放一个光探针,测出引爆的起始时间,从而推算出炸药的平均爆速。

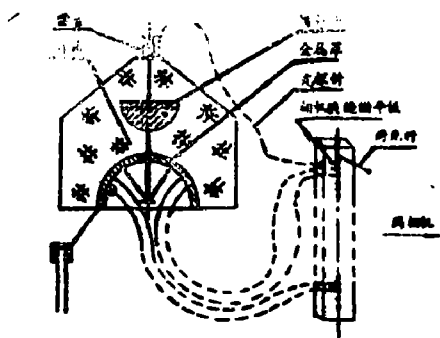


图2 聚能射流爆轰装置示意图

图3是这种装置测试结果的典型照片。前面一个信号是引爆点监测信号,由它指示出该装置引爆的初始时间,作为时基。后面的信号表示了冲击波在金属罩前界面随时间的变化规律。

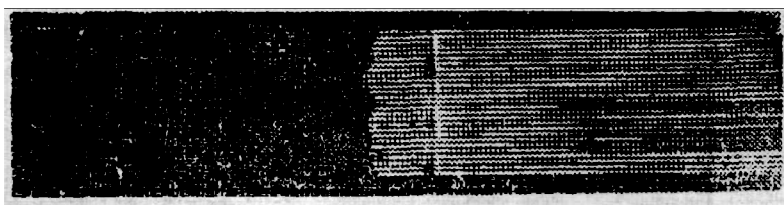


图3 聚能爆轰装置测试信号

### (二) 测多层介面的状态参数

图4所示的是动高压技术中常用的实验装置。推动飞片的加载手段可以是空气炮或炸药。用光探针测试就能充分利用飞片与靶的空间及面积达到多项测试的目的。例如,经合理设计,可在一次实验中同时测得飞片经过不同空腔位置的时间,取得飞片飞行速度的变化规律,飞片击靶波形以及冲击波在不同介质中的传播速度和靶上样品的自由表面速度等数据。

图5照片是实验结果的部分信号。它表示了冲击波到达不同位置的时刻。

上面举的二个实例都是使用单狭缝扫描配合光探针测试技术来完成的。从获取的信号图象可看出,光信息的持续时间可以小于 $0.1\mu\text{s}$ ,这是由于进入光纤的冲击波很快破坏了它的传光性能所致。这一现象不但有利于采用多狭缝配合光探针进行测试,以便获取更多的光信号,而且还可以利用这一特性来研究冲击波由惰性介质进入炸药中,由冲击波发展到爆轰的过程<sup>[3]</sup>。

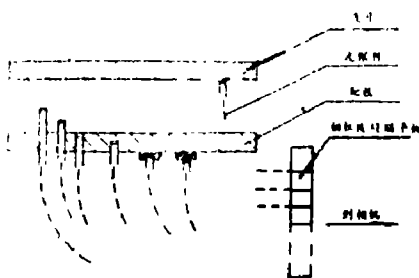


图4 测多介面参数的动高压实验装置示意图



图5 冲击波过不同介面的信号

### 三、参数选择

应用光探针测试技术时。合理的选择某些参数和正确的工艺安装是很重要的。因为它将直接影响到测试结果的精度。参数的选择要根据实验本身对测试精度，空间和时间鉴别率，信号图象的黑密度要求，工艺安装的可能性，测试系统的防护等加以综合考虑。

#### (一) 通光孔径

由于光探针所获得的信号是光纤入射端面受光角以内的平均光效应，所以通光孔径的大小决定了测试的空间鉴别率。例如选用的探针通光直径 $d = 1.0\text{mm}$ ，数值孔径 $NA = 0.5$ ，入射端面与被测点的间隙 $\Delta l = 0.1\text{mm}$ ，那么在像面上所记录的每一个光信号图象就表示了被测点在直径为 $1.1\text{mm}$ 空间范围内的平均效应。

探针通光孔径的大小还影响到测试的时间鉴别率，当相机的狭缝宽度不阻挡光探针出射端时，其时间鉴别率将不低于 $d/\beta V$  ( $\beta$ : 相机的物像放大率， $V$ : 相机的扫描速度)，由此可见，为了提高测试的空间和时间鉴别率，光探针的通光孔径越小越好。但如果 $d$ 过小，或者小于相机的衍射象差，则不仅提高不了鉴别率，反而会造成底片感光不足。因此，用于爆轰实验的光探针通光孔径一般选择 $0.5 \sim 1.0\text{mm}$ 之间。因为小于 $0.5\text{mm}$ 时，不仅要求有高亮度的光源，而且在加工安装过程中损伤几率增大。

图6是使用15根不同形式的光探针同时测一个爆轰装置的某一波阵面的信号照片。探针长度都是1米，透光率为50%，上方十个信号是使用裸体单丝塑料光纤探针，它们的通光孔径分别是 $0.5\text{mm}$ 和 $1.0\text{mm}$  (各5根)。下面五个带拖影的信号，使用的是玻璃光导束探针，通光孔径 $1.0\text{mm}$ 。全部信号都很清晰。用自动记录测微密度计测得各信号图象在底片上的黑密度 $D$ 值如图7。它们均大于底片本身灰雾值 ( $D_0$ )  $0.5$ 以上。这时的信号和噪声很易区别。显然，在这种情况下，选用通光孔径为 $0.5\text{mm}$ 的光探针比较合理。

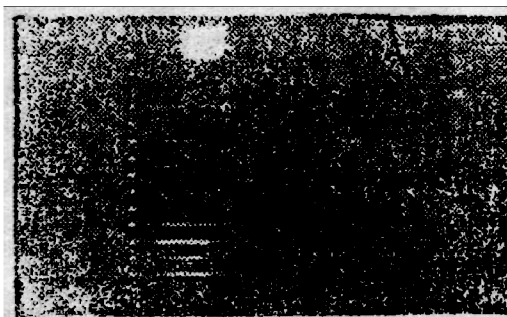


图6 不同形式光探针获取的信号

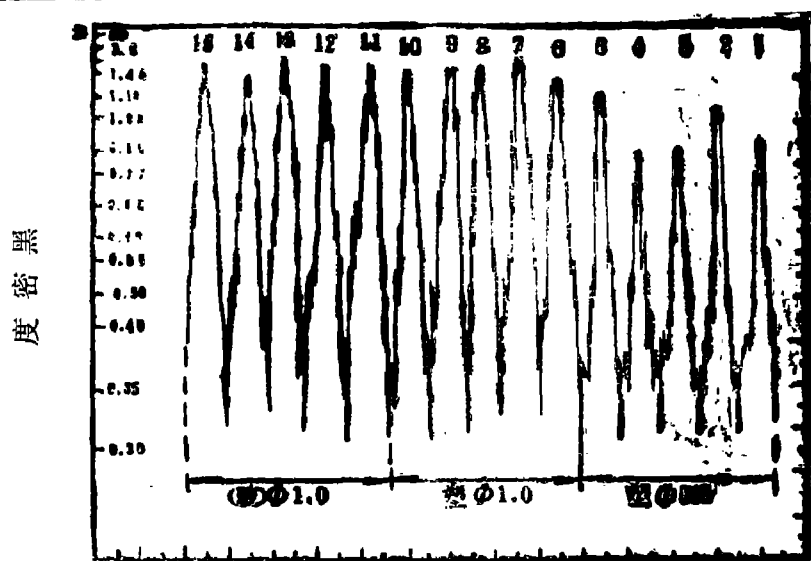


图 7 材料和直径各异的光探针在同一爆轰条件下得到的信号黑密度值。

图 6 的下面 5 个信号产生拖影的原因是由于在玻璃光导纤维外面套有塑料保护套管，空气冲击波在端面附近的套管内壁多次反射发出比较强的光，其一部分由光学纤维的侧壁射入纤维内部经过传导，在出射端射出，致使信号图象产生拖影，这种拖影有利于信号识别。

### (二) 数值孔径

光纤的数值孔径表征了其收集光的能力。能通过光纤传输的光线最大入射角  $\alpha_M$  由公式  $\text{Sin}\alpha_M = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$  给出。在选择 NA 值时应考虑到：

1. 为了提高测试的空间鉴别率，不希望收集到比探针入射端面更大范围的光信息。
  2. 探针出射端面远离相机，希望出射光束发散角尽量小，以便相机能接收更多的光能。
  3. 能通过光纤传输的入射光线除  $\alpha_M$  角以内的子午光线外，还有比  $\alpha_M$  角大得多的弧矢光线。后者经过光纤在出射端的光强分布不均匀。这种不均匀性随 NA 值的增加而变得严重。
  4. 光在弯曲光纤内的光漏损，随 NA 值的减小而增加。
  5. 被测点发光性质近似于朗伯 (Lambert) 光源，NA 值小，收集到的光能量少。
  6. 由光探针出射端面的不平度带来的光强度分布不均匀性，随 NA 值增大而有所改善。
- 综合考虑以上各点，权衡利弊，在无特殊要求情况下，一般选择 NA = 0.5 左右较适宜。

### (三) 透光效率

透光率是光纤的一个重要质量指标。在爆发测试中，为了使发光较弱的测试点信息也能被记录，希望透光率尽可能高一些。但光纤的透光率要受到材料和制造工艺的限制。合理确定探针透光率的计算方法是：从所使用的记录底片瞬时曝光特性曲线上，查出大于底片灰雾 0.5 以上所需要的曝光量<sup>\*</sup>，推算出探针出射光的发光亮度，从而进一步算出其透光率。在计算过程中除作一般的光度学考虑外，还应注意到测点发光光谱特性与光纤、相机的透光特性等问题。因此实际计算比较繁复。通常用实验的方法加以确定。例如对于压力和粒子速度相近的某些测试点，当采用的记录底片反差系数  $\gamma = 1$  时，用狭缝扫描方法测得的信号图象黑密度  $D = 1.0$ ，当改用透光率为 50% 的光探针测试时，只要探针出射端面在相机的焦面上成

\* 高速摄影底片瞬时曝光特性曲线可通过实验作出

象直径等于狭缝像宽，并且在其它测试条件相同时，就能在底片上获得黑密度 $D \approx 0.7$ 的清晰图象。这种关系实际上由图7的黑密度测量曲线上就已得到。

用光探针测试爆裂参数的优点之一是可以利用探针的不同排列方式缩放物像比例，这样就相应地减少了对相机焦距的严格要求，为选用较大的D/f镜头来增强相机的光力创造了条件。

#### (四) 弯曲半径

光纤的弯曲半径有两个含义，光学允许弯曲半径和机械损伤允许弯曲半径。

纤维光学理论指出，光纤的弯曲将导致数值孔径减小，透光率降低和出射光强度分布不均。图8和图9的实验曲线和图形分别给出了对不同弯曲程度的光纤的实验结果。由图可知，只有当弯曲半径R和通光直径d的比值 $\frac{R}{d} > 20$ 时，弯曲光纤才能取得和直光纤相近的传光效果，这就是光纤的光学允许最小弯曲半径。

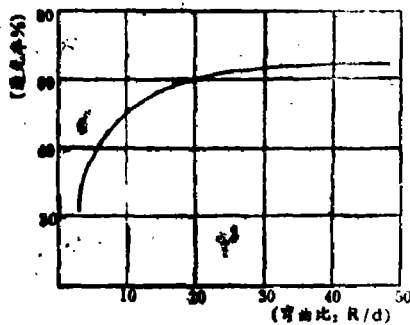


图8 弯曲光纤纤维透光率曲线

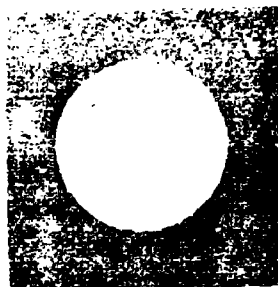


图9-a 直纤维出射光之图形

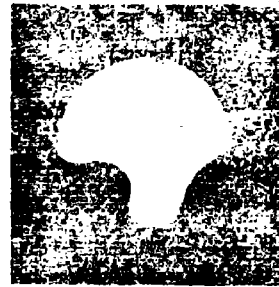


图9-b 弯纤维

光纤受外力作用时将发生弯曲，当外力超过容限时将会使纤维损伤或折断，这就是光纤的最小机械损伤允许弯曲半径。对于单丝光纤实验得到以下近似表示式：

玻璃光纤： $R \geq 50d + 1000d^2$

塑料光纤： $R \geq 5d$

由于玻璃光探针多由数百根直径约 $20 \sim 30 \mu$ 单丝集束而成，塑料光探针则多采用直径 $0.5 \sim 1.0 \text{ mm}$ 单丝。所以，当使用玻璃光导束探针时，着重考虑的是机械损伤允许弯曲半径，使用塑料单丝探针时，着重考虑的是光学允许弯曲半径。

#### (五) 狭缝宽度和扫描速度的选择

前面已讲到使用光探针测试时，探针出射端面成象在狭缝内，因此狭缝的宽度应保证不阻碍光探针出射端面成完整像。只有这样才能充分利用探针出射光能量。但狭缝不能过宽，否则将使底片的灰雾增加，影响所获取信号的图象质量。

相机扫描速度的选择要从爆裂实验对测试精度的要求，测点的发光亮度，所选用的探针技术性能等综合加以考虑。过高的追求扫描速度只能使获得的图象前沿模糊，给分析测量带来较大的误差。特别是扫描速度达到 $M/\text{ns}$ 的数量级时，不同入射角的光线经过光纤到达出射端面的时差将造成同一瞬间信息沿时间轴的离散。

#### (六) 探针的端面形状

探针的端面如果不与光纤轴线垂直，受光时相当于斜光线入射，它改变了射入光纤光线的

入射角和出射角,也必然影响到出射光的强度分布。由于出射端要与高速相机配合,这样,端面形状又将影响到所获取的信号图象质量。

通过对斜光线的计算和实测均证明,只有当探针的端面与光纤的轴线垂直时,出射光强度分布才比较均匀,获取的信号图象前沿也比较平直,它对测试结果的信号分析带来的误差也随之减小。故在探针设计和安装时,除对端面有一定的平面度要求外,在测试操作过程中还应注意探针的出射端面要尽可能与相机的光轴垂直。为此目的,在对象板上有时专门安放了一个瞄准杆,如图2所示,供相机对光轴用。

#### 四、塑料和玻璃光探针比较

目前用于爆轰测试的光纤主要有折射率呈阶梯变化的圆柱形塑料光纤和玻璃光纤两种。从实验所取得的信号图象质量比较,二者无明显差别,但从经济和工艺角度比较,塑料光纤制作的光探针要比玻璃光探针优越。

(一)塑料光纤的价格极其低廉。几乎可以和同长度的金属导线的价格相比。

(二)塑料光探针的加工成型和工艺安装均比玻璃光探针简单,对各种环境条件的适应性强。

(三)塑料光纤抗机械损伤性能比玻璃好,这对于室外爆轰实验作业尤为有利。

(四)塑料光探针多由单丝制成,可以裸体使用,它比多丝玻璃光导束探针占用的空间小,有利于提高测试的空间鉴别率。

(五)塑料的比重约为玻璃的 $1/2.5$ ,又可以裸体使用,有利于减小整个探测系统的重量和体积。

(六)塑料光纤的光谱透光性能不如玻璃,由于有机分子的吸收,它在红光和近红外波段有几个吸收峰,而玻璃光纤在整个可见光区域均有良好的透光特性。

塑料的线吸收虽比玻璃大,但塑料的折射率比玻璃低,所以端面的费涅尔损失也相应减小,使用中又多采用单丝,无玻璃光纤探针集束时捆扎因数损失,故在 $2\sim 3$ 米的长度范围内,白光的平均透光率与玻璃光导束相比反而要高( $5\sim 10\%$ )。

由于塑料光纤有上述优点,因此它已被广泛应用于爆轰实验测试。它的不足之处是化学稳定性差,耐热性能也不如玻璃,当温度超过 $100^{\circ}\text{C}$ 时,会迅速老化,透光性能下降,并呈现黄色,因此在某些特殊场合,它还不能完全代替玻璃光导束探针。

#### 结 束 语

用光纤制作的光探针,目前已广泛应用于炸药的研究和爆轰物理实验的参数测试。这一测试技术与通常的狭缝扫描光测技术相比,其优点在于:

1. 探针能深入到爆轰装置结构的内部去观测不处于相机视线内的那部分光信号,并能把实验装置的三维空间信息转换成二维扫描图象。

2. 测量的范围一般不受试验装置的大小及相机放大倍率的限制。

3. 它不仅可测轴对称面上的波形信号, 而且还可同时测非轴对称面上的波形信号及多层结构爆轰装置的状态参数。

4. 可以在同一次试验中, 在同一张底片上获取几个爆炸装置的信号, 为多路引爆系统的监测提供了非常方便的方法。

5. 能用光探针完成的测试项目, 原则上用电探针也能胜任, 但由于一般电子学记录仪器难于同时满足大量程、高分辨率的要求。特别当测点很多时, 不仅要大大增加电子学记录仪器的台数, 而且为了使这些仪器有共同的时间基准, 并同时满足大量程和高分辨率要求, 则又要增加同步、延迟、触发等器件设备, 对于安置探针的测点, 又有防电磁干扰等问题。相比之下, 用光探针测试, 耗资小, 方法简单, 其优点是比较明显的。当然, 光探针的端面不可能做得和电探针尖端那样小, 因此它的测试精度目前还达不到电探针的水平。

6. 光探针测得的信号是不连续波形, 因而空间鉴别率低于直接狭缝扫描所得到的波形。空间鉴别率的提高有赖于采用更细的光纤和测点的紧密排列。

在完成本文过程中, 秦玉根、李承德、张寿齐同志提出了许多宝贵意见, 在此致以衷心谢意。

## 参 考 文 献

- [ 1 ] R.S.I 35 (11)、1546 (1964)
- [ 2 ] 《爆炸物理学》 Ф.А.鲍姆等著中译本科学出版社(1963)
- [ 3 ] Appl. Opt., 11 (7)、1641 (1972)
- [ 4 ] 《高分子》(日文) Vol: 22 No: (257)、436—441 (1973)
- [ 5 ] 《特公昭》(日文) 44—26979 (1969)
- [ 6 ] 《光学纤维基础》 大越孝敬编  
刘时衡、梁民基译、邮电出版社(1980)

## THE APPLICATION OF OPTICAL FIBERS ON THE MEASUREMENT OF DETONATION

Cheng Yong-ding

The Development of optical fibers, particularly the appearance of plastic fibers, which are cheap in price and have high transparent property, provide a new measurement method for the measurement of detonation.

Some examples of the application of optical fibers are illustrated in the measurement of detonation in this paper. The selection of their parameters is discussed. Several main technical problems that should be considered are also given.