

# 多火花式动态光弹性仪及其初步应用

苏先基 马连芬

(1983年8月12日收到)

本文描述了自制的多火花式动态光弹性仪的原理和技术指标。给出三个在应力波研究中应用的例子:冲击载荷下压杆中圆孔和椭圆孔的应力集中;二维平面结构和带孔半无限平面受冲击时的应力波。

多火花照相系统最早是 Granz 和 Schardin<sup>[1]</sup>设计的,曾广泛应用于流体动力学的研究。1955年英国的 Christie<sup>[2]</sup>才开始把它用于动光弹。1957年 Wells 和 Post<sup>[3]</sup>将之引入美国。之后,这种系统得到较大的发展和较为广泛的应用,也促进了动光弹的发展。为了尽快把我国的动光弹研究开展起来,我们和北京科学仪器厂合作,于1981年底试制成功了我国第一台多火花式动态光弹性仪(见图1)。经过半年的试用,它的性能是良好的。下面分别介绍这台仪器的工作原理和用这台仪器进行的关于应力波传播问题的初步研究。

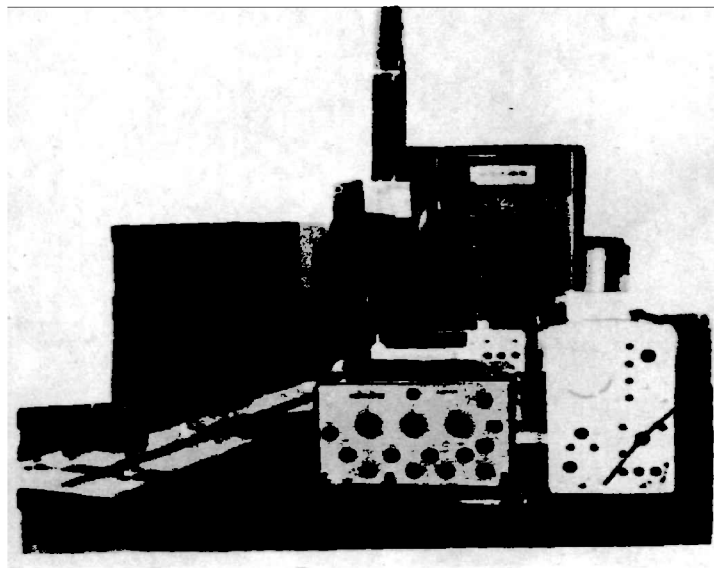


图1 多火花式动态光弹性仪

## 一、仪器工作原理

整套仪器的构造如图 1 所示。它由高速摄影系统, 施加冲击载荷的系统, 以及控制同步、延迟和记录时间的系统三个部分组成。

### 1. 高速摄影系统

本系统又可分成多次放电装置和光学记录装置两个部分。

多次放电装置的原理图如图 2 所示。它具有三个功能: 一是为偏振光场和摄影系统提供光源; 二是控制曝光时间和光强; 三是控制画面速度, 即两幅照片之间的间隙时间。

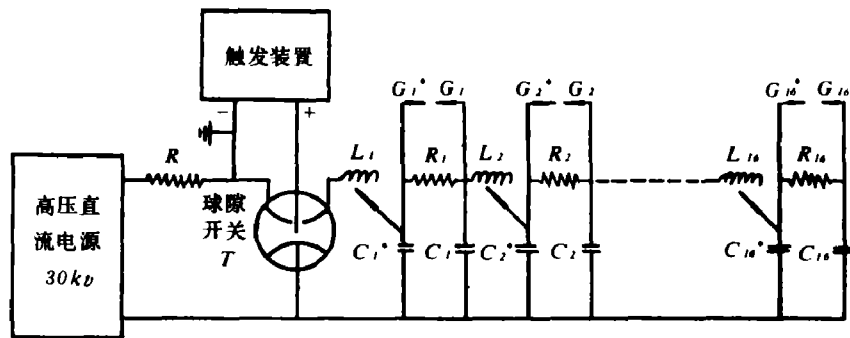


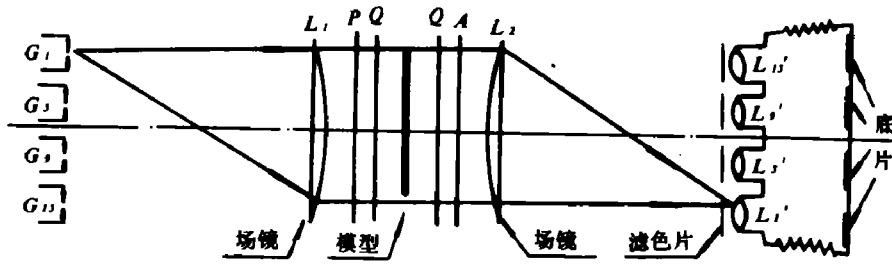
图 2 多次放电装置原理图。G<sub>1</sub>、G<sub>2</sub>……G<sub>16</sub> 为放电器, G<sub>i</sub>、G<sub>i</sub><sup>\*</sup> 为两个电极, T 为球隙开关。

高压直流电源是用来给 LC 线路充电的, 设计电压为 30kV。充电后, 每组放电器的两极处于同等高的电势。给触发装置一个脉冲信号, 它就输出一个高压脉冲使球隙开关放电。球隙开关一放电, 便使 T L<sub>1</sub> C<sub>1</sub><sup>\*</sup> 形成回路, 放电器 G<sub>1</sub> 的一极 G<sub>1</sub><sup>\*</sup> 的电位立即下降, 使 G<sub>1</sub><sup>\*</sup> 与 G<sub>1</sub> 之间出现很大的电位差。当这电位差足以击穿 G<sub>1</sub><sup>\*</sup> 与 G<sub>1</sub> 之间的空气时, 就放电发出电火花。接着 C<sub>1</sub> L<sub>2</sub> C<sub>2</sub><sup>\*</sup>, C<sub>2</sub> L<sub>3</sub> C<sub>3</sub><sup>\*</sup>, ……相继出现不平衡, 从而使 G<sub>1</sub><sup>\*</sup>、G<sub>1</sub> 依次发出电火花。每一组放电器由两个直径为 13 mm 的铜球构成。两个铜球之间的距离可在 0 ~ 13 mm 之间调节。间距大时, 所需的击穿电压 (也就是两球之间的电位差) 也高, 因而发出的光也较强。每组放电器放电的持续时间 (按 1/3 峰值计算) < 0.5 μs, 这也就决定了记录装置的曝光时间 < 0.5 μs。两组放电器放电的间隙时间, 近似等于使 C<sub>i-1</sub> L<sub>i</sub> C<sub>i</sub><sup>\*</sup> 回路振荡到最大负电压所需的时间。由关系式

$$R = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{2}{LC}}$$

(其中: R 为幅率 = 1/间隙时间; C 为电容 (法拉); L 为电感 (亨利))。可以看出: 当电容固定时, 可通过改变电感来调节间隙时间。这台仪器的间隙时间为 1 ~ 4 μs。所以, 幅率可在 25 万 ~ 100 万幅/秒之间变化。

光学记录装置如图 3 所示。一端是排成方阵的 16 个放电器, 另一端是由排成方阵的 16 个像机镜头所构成的照相机。在它们之间和偏振光场的两侧, 各放了一个平凸透镜。L<sub>1</sub> 使电火花来的光变成平行光, L<sub>2</sub> 使每个火花的像分别落在对应的那个相机镜头的光阑平面上。这样, 每个火花的光只能进入对应的一个镜头, 每个镜头只能接收到对应的那个火花来的光。于是,



$L'$  为透镜，P 为起偏镜，Q 为  $1/4$  波片，A 为检偏镜。

图3 光学装置示意图

当放电器  $G_i$  依次发出电火花时，每个像机镜头  $L_i'$  后面的底片，就将每个电火花峰值时刻的光弹性条纹图记录了下来。

2. 加载系统

如图4所示，冲击载荷是用小口径运动步枪来施加的。为了避免弹头直接冲击试件而使试件破坏，在枪筒接管的下端和试件之间，安放了一个弹簧钢做的加载头。用一根软轴将枪的扳机连到相机侧面，以便远距离操纵。

3. 控制同步、延迟和测量时间的系统

由于这种相机每次只记录16幅照片，所以严格控制同步和延迟是十分重要的。这个系统的框图如图4所示。

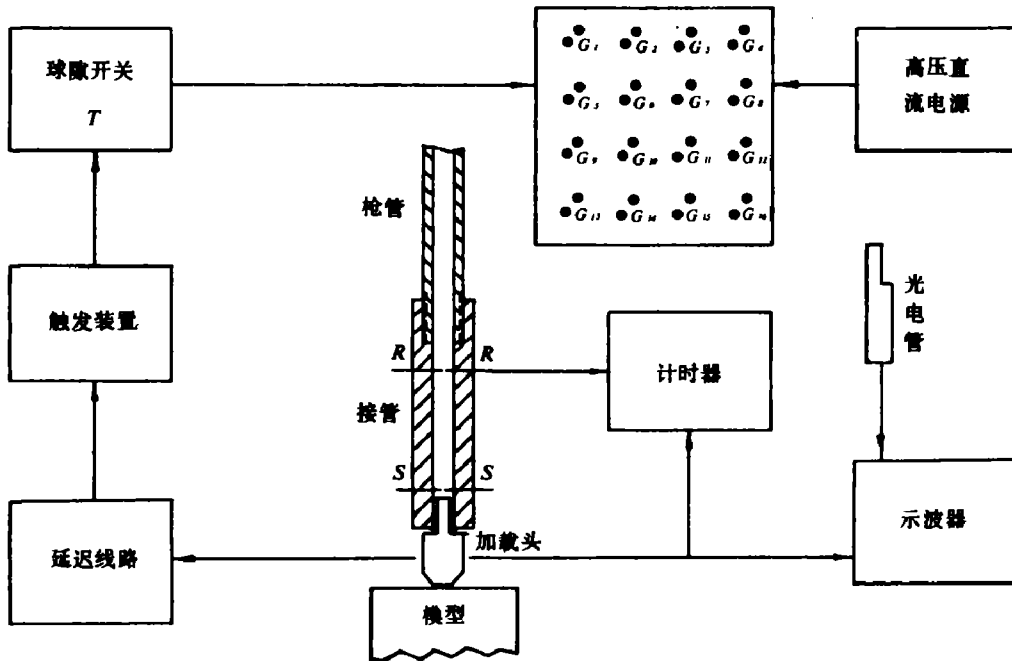


图4 控制系统框图。枪管为小口径运动步枪枪管

当子弹走到枪筒接管的  $R-R$  截面时, 开关  $R$  被接通, 电子计时器开始计时。当子弹打到加载头上时, 开关  $S$  被接通, 电子计时器停止计时。用子弹从  $R-R$  走到  $S-S$  截面所用的时间去除这段距离, 得出子弹的平均速度。

当开关  $S$  接通时, 输给延迟线路一个信号, 延迟线路再按预定的延迟时间, 输一个脉冲信号给触发装置。然后由它给出一个高压脉冲, 使球隙开关触发, 从而引起  $G$ , 依次放电发光。

当开关  $S$  接通时, 还输一个信号给示波器, 使之开始水平扫描。另外, 由光电管将接收到的光信号转换成电信号后, 也输给这台示波器, 作为铅垂记录信号。于是, 在示波器屏幕上就显示出以开关  $S$  接通时为起始时间的光强-时间曲线, 如图 5 所示。曲线上的每一个

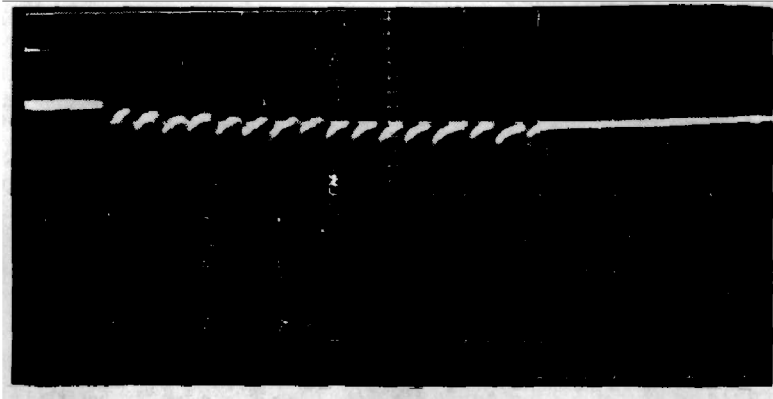


图 5 光强-时间曲线(每大格  $10\mu s$ )

峰值所对应的时刻, 即为每幅条纹图照片所对应的时刻。

## 二、应力波传播研究几例

### 1. 有孔直杆受冲击载荷时应力波的传播<sup>(4,5)</sup>

试件开孔, 孔的形状为园和椭圆两种情况。试件的形状和尺寸如图 6 所示。

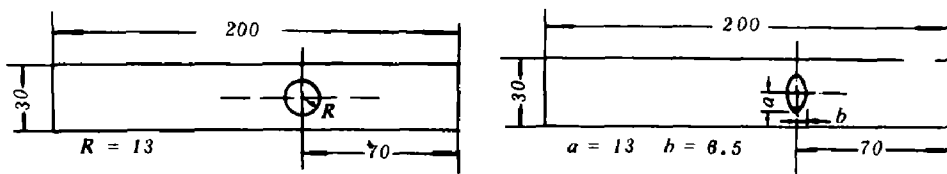


图 6 有孔直杆试件形状和尺寸图。单位:  $mm$

对每种试件都重复进行了多次试验。实验记录了应力波从顶部传到底部的全过程的等色线条纹图。现在选出一部分示于图 7 和图 8。从这些条纹图中, 可以得出孔边最大应力随时间变化的曲线(见图 9), 以及指定时刻的孔边应力分布状态(见图 10)。从图 10 中还可以看出: 园孔边缘开始只有压应力, 随后顶部出现拉应力, 接着, 底部也出现拉应力, 并逐渐与静载

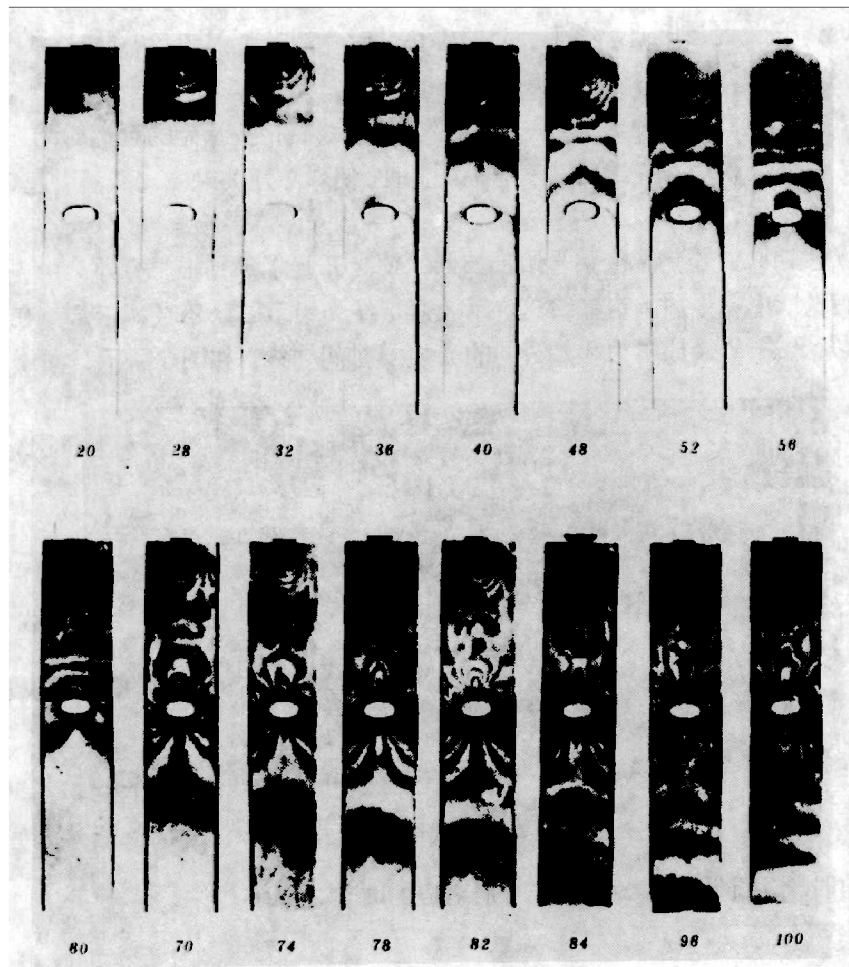


图7 有椭圆孔时的等色线条纹图。单位： $\mu s$

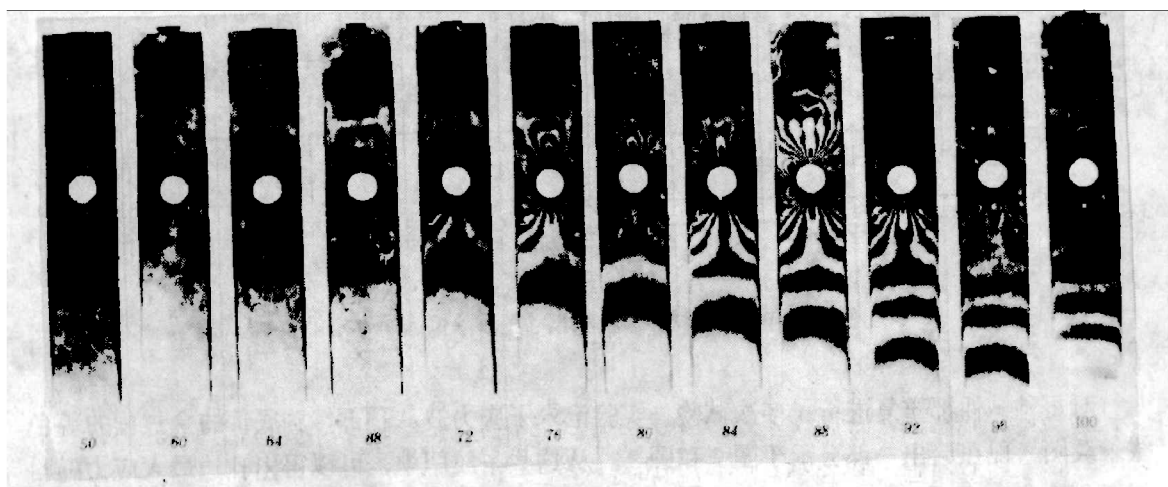


图8 有圆孔时的等色线条纹图。单位： $\mu s$

情况下孔边的应力分布接近。

通常, 应力集中系数定义为

$$K = \left| \frac{\sigma_{max}}{\sigma_{nom}} \right|$$

其中  $\sigma_{max}$  为孔边最大应力;  $\sigma_{nom}$  为试件无孔时, 对应于孔中心处的应力。

由应力—光性定律:

$$\sigma_n - \sigma_\theta = \frac{N}{t} f_o$$

其中:  $\sigma_n$  为法向应力,  $\sigma_\theta$  为切向应力,  $N$  为条纹级数,  $t$  为模型厚度,  $f_o$  为材料条纹值。

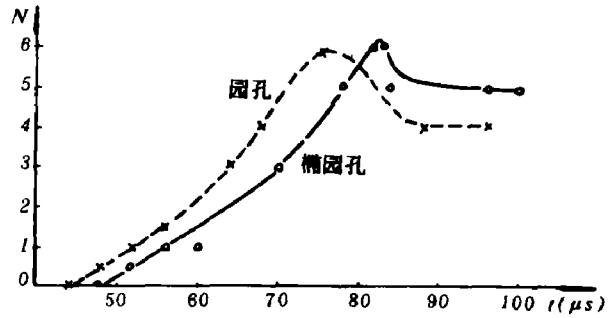


图9 孔边最大应力随时间变化曲线

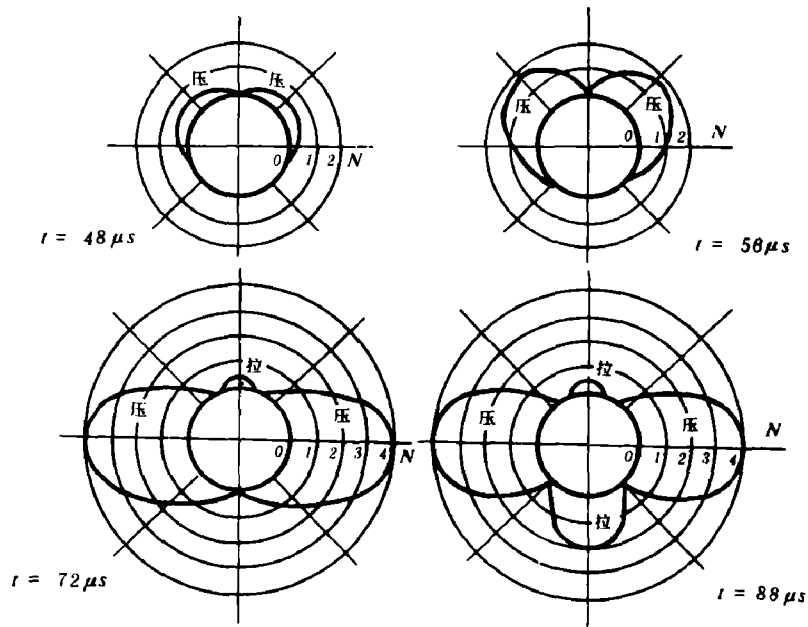


图10 指定时刻的孔边应力分布状态

因孔边为自由边,  $\sigma_n = 0$ , 于是,

$$\sigma_{max} = \frac{N_{max}}{t} f_o, \quad \sigma_{nom} = \frac{N_{nom}}{t} f_o$$

从而得到

$$K = \frac{N_{max}}{N_{nom}}$$

如果定义

$$\alpha = \frac{K_{椭圆}}{K_{圆}}$$

由于  $N_{nom, 椭} = N_{nom, 圆}$ , 则可以得到

$$\alpha = \frac{N_{max, 椭}}{N_{max, 圆}}$$

于是, 从图 9 可以得出  $\alpha$  随时间的变化曲线, 如图 11 所示。

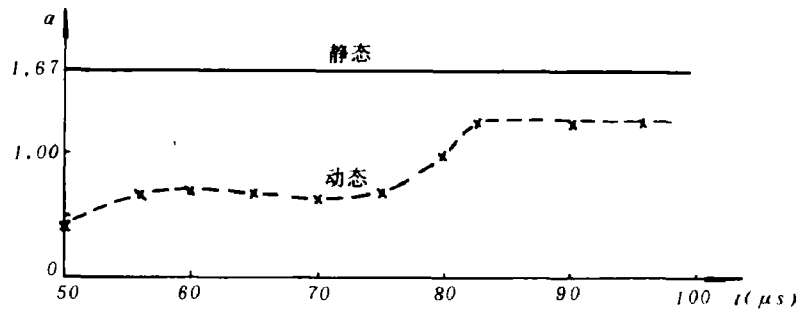
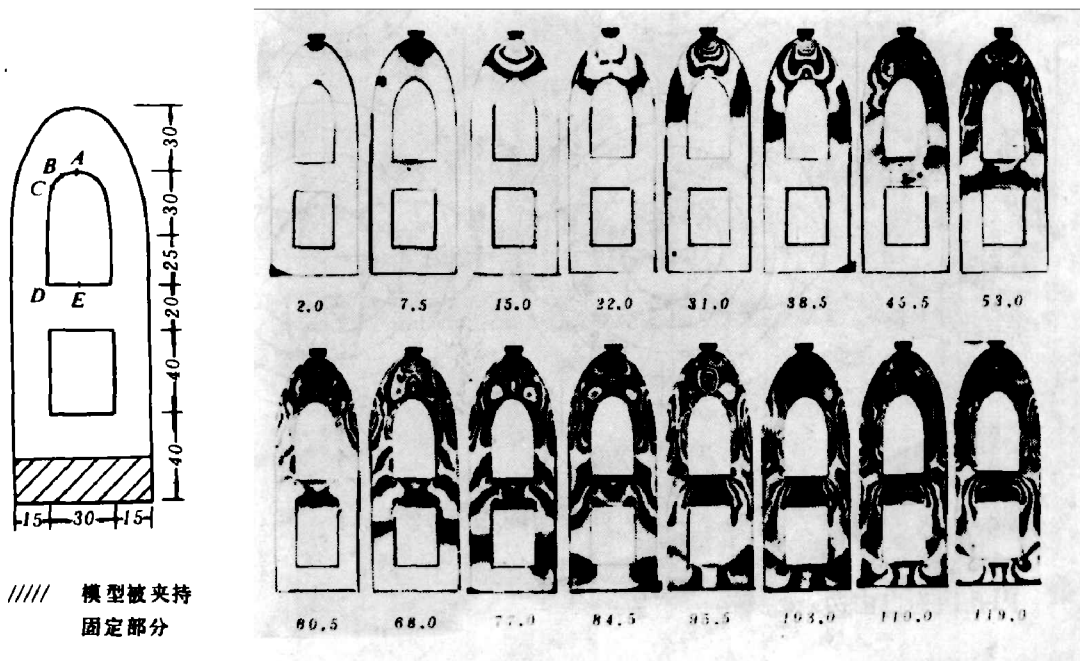


图11  $\alpha$  随时间的变化曲线



(a) 模型的形状和尺寸

(b) 等差线条纹图

图12 弹头形平面结构中的应力波的传播

众所周知, 在静态情况下, 对圆孔和椭圆孔分别有

$$(\sigma_{\theta})_{max, 椭} = p(1 + 2a/b) = 5p;$$

$$(\sigma_{\theta})_{max, 圆} = 3p,$$

于是

$$\alpha_{静} = \frac{(\sigma_{\theta})_{max. 静}}{(\sigma_{\theta})_{max. 动}} = \frac{5}{3} = 1.67$$

从图 11 中可以看出：在开始时， $\alpha_{动}$  比  $\alpha_{静}$  小得多。到后来， $\alpha_{动}$  就渐渐与  $\alpha_{静}$  接近。

### 2. 在一弹头形平面结构中应力波的传播

模型的形状和尺寸如图 12(a) 所示。顶部内、外边界的曲线方程分别为  $(x/1.5)^2 + (y/3)^2 = 1$  和  $(x/3)^2 + (y/6)^2 = 1$ 。试验时，下端固定，上端受冲击载荷。等差条纹图如图 12(b) 所示的一部分。从这些图里，可以清楚地看到应力波传播过程的全 面情况。在初始阶段，结构的顶部及两侧受压。但是，两侧杆的上半部很快变成受弯。通过分析这些照片，可以得出一些指定点的条纹级数  $N$  随时间  $t$  变化的曲线（见图 13）。也还可以得出给定时刻的沿内边界的应力分布，如图 14 所示。

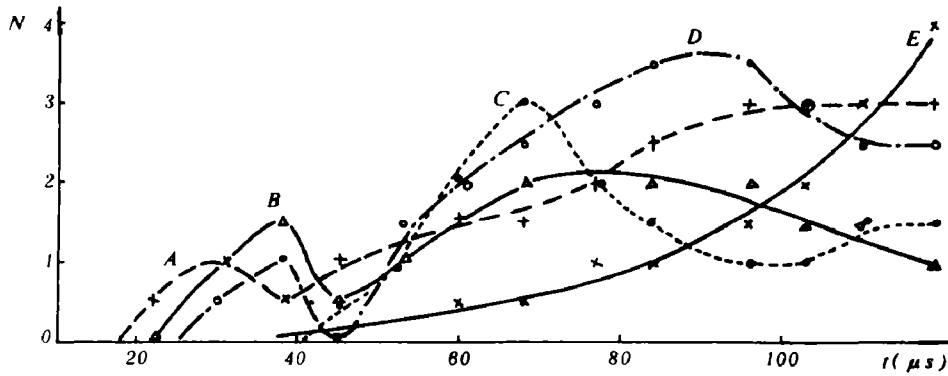


图13 指定点的  $N-t$  曲线

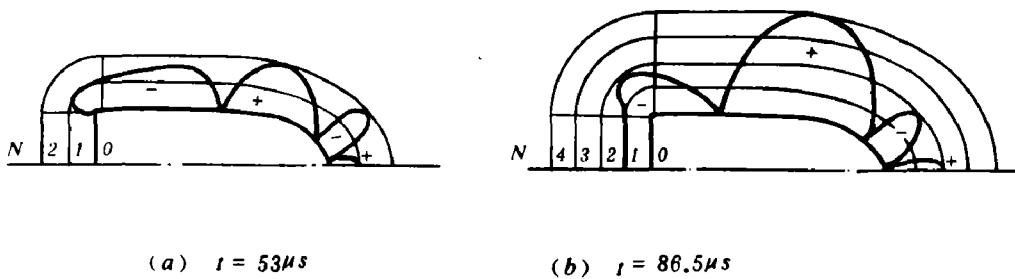


图14 沿内边界的应力分布

### 3. 半无限平面受冲击时，应力波的传播和孔边缘的应力分布

这是个带有普遍意义的问题。应力的大小和分布状态，与孔洞的形状、载荷的大小、载荷作用点的位置、距离等密切相关。Durelli 等人<sup>[6-9]</sup>曾做过园孔、椭圆孔和方孔的情况。这里做了两种状态，状态 I 为马蹄孔，状态 II 为马蹄孔与沟槽结合，模型形状尺寸如图 15 所示。

通过多次试验，记录了从冲击开始，到左右和下部边界反射之前的全过程的等色线条纹



图 现将其中的部分照片示于图 16和图 17中。将这些图形放大，可描出孔边不同时刻的等差线图，从而得出孔边的应力分布状态。现将两种状态的两个时刻的孔边应力分布图示于图 18中。从这里可以清楚地看出它们的大小、分布和发展趋势。

另外，对于孔边若干给定点，可以得到条纹级数  $N$  随时间  $t$  的变化曲线。同时，还画出以载荷作用线为对称轴的，与指定点相对称的那些点（在那里没有孔的影响）的  $N \sim t$  曲线进行对照比较，见图 19。把两种状态的  $N \sim t$  曲线放在一起，可以明显地看出：有沟槽时，孔边的应力大大减小了。仔细分析这些图形，还可得出孔边应力集中系数，以及沟槽对应力集中系数的影响。

以上是我们近半年来结合仪器的试用所做的一部分探索。应用动态光弹性解决实际问题，还有一些困难有待进一步解决。如模型材料动态性能的全面测定，内部点的主应力分离，以及相似模拟等问题。我们曾做了一些尝试，由于条件和时间限制，都还未能完全解决。但是，可以看到：通过这种多火花式动态光弹性仪，是可以得到很好的等色线条纹照片的，通过这些照片可以得到关于应力波传播规律的了解；利用自由边界或一些其它条件，也可以得出初步的定量结果。将仪器的偏振片和  $1/4$  波片去掉，做动云纹和动散斑，也得到了曝光足够的和

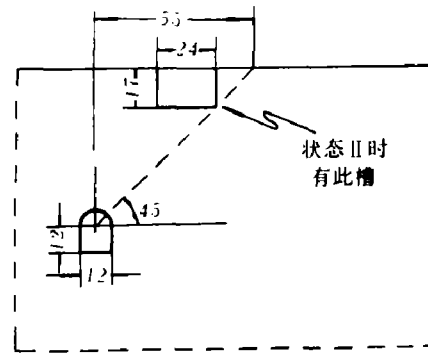


图15 模型的形状和尺寸

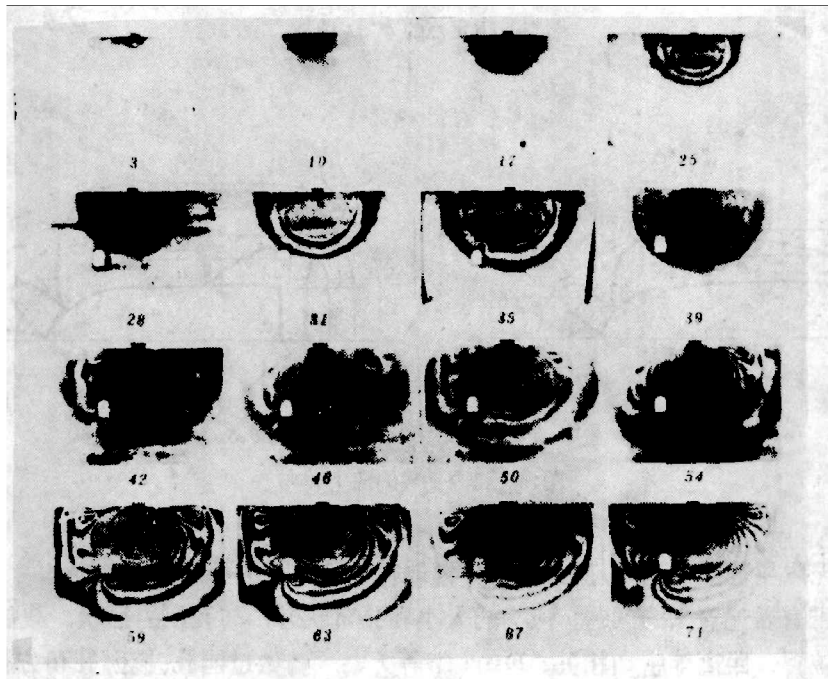


图16 有马蹄形孔时的应力波传播。单位：μs

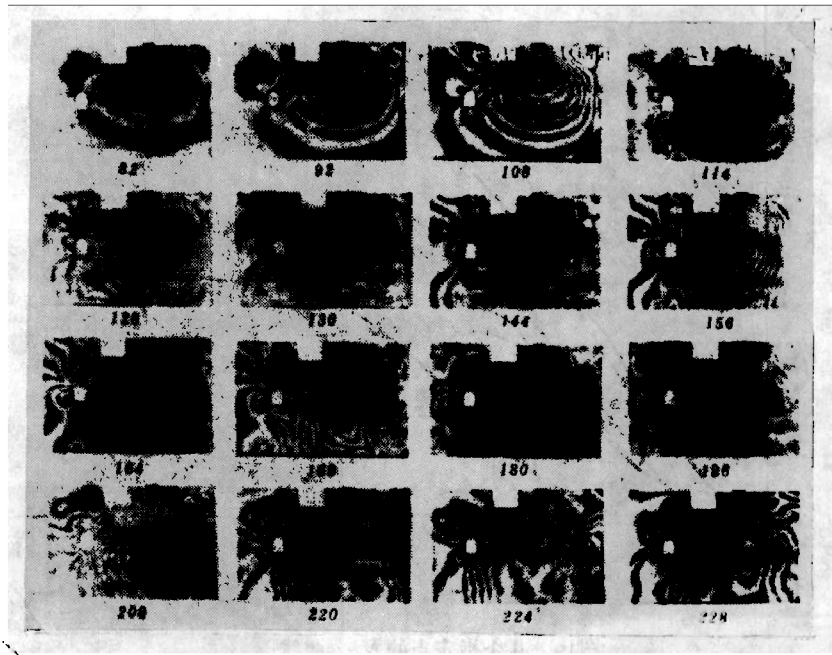


图17 马蹄孔与沟槽结合时应力波的传播。单位:  $\mu s$

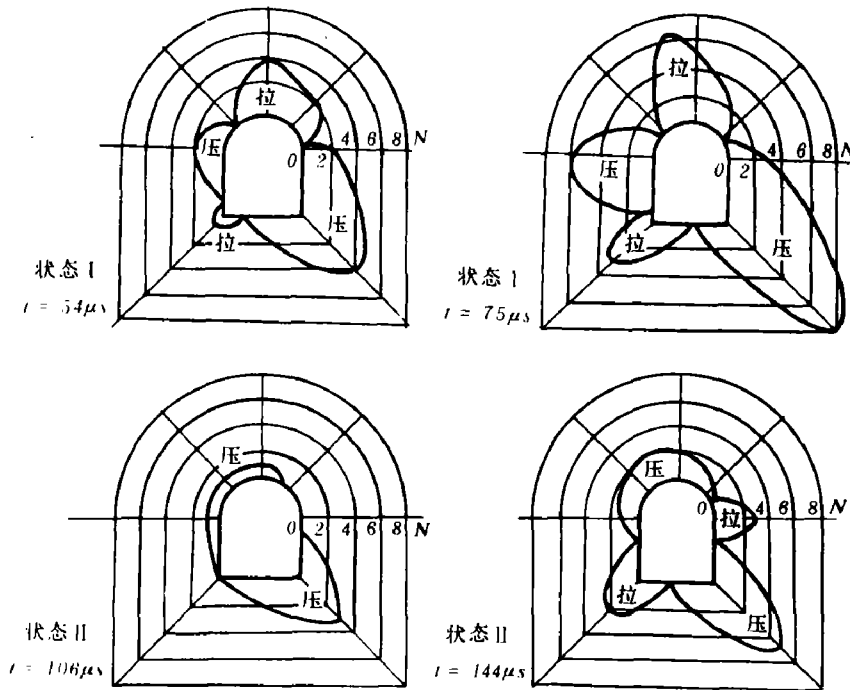
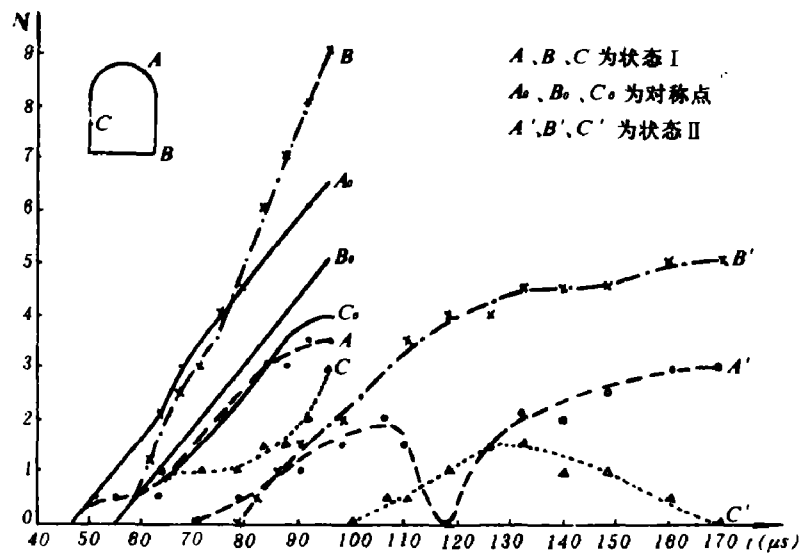


图18 给定时刻孔边应力分布状态

图19 几个指定点的  $N-t$  曲线

反差很好的照片。看来，通过这种仪器，用动云纹法或动散斑法，为动光弹提供分离主应力的辅助信息或直接解决动力学问题，是大有希望的。

## 参 考 文 献

- [1] Cranz, C., Schardin, H., *Zeits. Phys.*, 56 (1929), 147—183.
- [2] Christie, D. G., *J. Photographic Sci.*, 3 (1955), 153—159.
- [3] Dally, J. W., *Exp. Mech.*, 29 (12) (1980), 409—416.
- [4] Dally, J. W., Halblieb, W. F., *J. Mech. Engr. Sci.*, 7 (1) (1965), 23—27.
- [5] North, W. P. T., Taylor, C. E., *Exp. Mech.*, 6 (7) (1966), 289—296.
- [6] Durelli, A. J., Riley, W. F., *J. Appl. Mech.*, 28 (2) (1961), 245—251.
- [7] Durelli, A. J., Daniel, I. M., *Developments in Mechanics*, 2 (1961), 268—285.
- [8] Durelli, A. J., Riley, W. F., *J. Appl. Phys.*, 32 (7) (1961), 1255—1260.
- [9] Durelli, A. J., Riley, W. F. et al., *Symp. Photoelasticity*, Pergamon, (1963), p. 251—263.

**MULTIPLE SPARK TYPE DYNAMIC PHOTO-  
ELASTIC INSTRUMENT AND ITS  
PRELIMINARY APPLICATION**

Su Xianji Ma Lianfen

**Abstract**

In this paper, the fundamentals and technical specifications of multiple spark type dynamic photoelastic instrument made by ourself are described. Three examples in application to stress wave studies are given. These are the stress concentration at circular or elliptical hole in strut under impulsive loads, the stress waves in the two-dimensional plane structure and semi-infinite plane with a hole under impact.