

## 二维飞片形状的测量和数据处理

傅兴海 于 君

(西南流体物理研究所)

**摘要** 本文介绍了一种测量二维形状飞片的光探测系统及其数据处理方法。为了便于说明, 用一个一点起爆爆轰事件作为实际示例。其数据处理结果与闪光 X 光测量结果作了比较, 发现在飞片形状和压力两方面都能很好地符合。

**关键词** 冲击波 光探测系统 二维形状飞片

### 1. 前言

飞片在爆轰产物作用下的运动形态是多种多样的。作为整体运动的飞片通常表现为一维、二维或三维运动。鉴于三维情况在实验观察或理论计算方面比较复杂, 所以常常简化成二维进行处理。

关于二维运动下飞片上各点到达某个空腔位置的时间波形测量, 是较为成熟的方法, 但在某些场合下, 不仅需要时间波形, 而且还需要知道飞片运动到某个特定时间的空间形状, 或称之为飞片的空间波形。但空间波形由于受起爆条件等诸多因素的影响, 有时呈现为很复杂的形状, 这时如果采用闪光 X-射线观察飞片形状, 难以得到满意的效果。为了观察飞片的连续形状, 本文采用高速转镜连续扫描, 通过 2—3 层有机玻璃光探板测出同一截面上二条对应的时间波形, 经过数据处理, 求出相应的二维运动飞片的空间波形。

为验证数据处理方法, 测量了一点起爆下的时间波形, 并用闪光 X-射线观察了飞片形状, 此外采用锰铜压力传感器测量了有机玻璃板内冲击波阵面压力, 作为有机玻璃状态参量计算结果的校验依据。数据处理结果与实验结果符合得很好, 说明这种处理方法是可行的。

### 2. 实验方法

实验装置如图 1 所示。其中炸药采用直径为 200 mm、高度 50 mm 的 TNT/RDX = 40 /

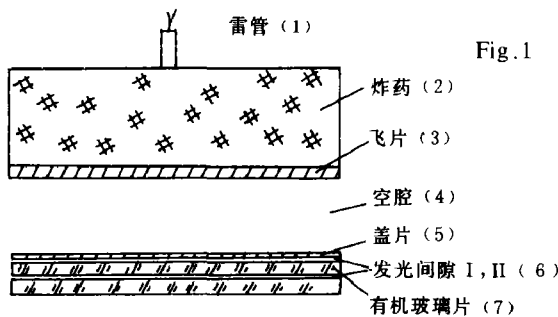


图1 实验装置示意图

Fig.1 Schematic diagram of the experimental set-up

- (1) Detonator
- (2) Explosive
- (3) Flyer plate
- (4) Void
- (5) Cover plate
- (6) Illuminate gap
- (7) PMMA plate

60平面炸药, 飞片采用厚度为3 mm的钢板, 空腔高度38 mm。盖片通常采用厚度为1 mm的钢片, 但有时为了观察飞片自由面波形, 也可以采用厚度为3—5 mm的有机玻璃片。发光间隙厚度约为0.2 mm。飞片经过空腔碰撞盖片后, 介质内产生冲击波向前运动。通过高速相机照相, 可以测出击波到达盖片和有机玻璃I、有机玻璃I和II之间的两条时间波形。波形照片如图2, 由底片测得的时间波形如图3所示。

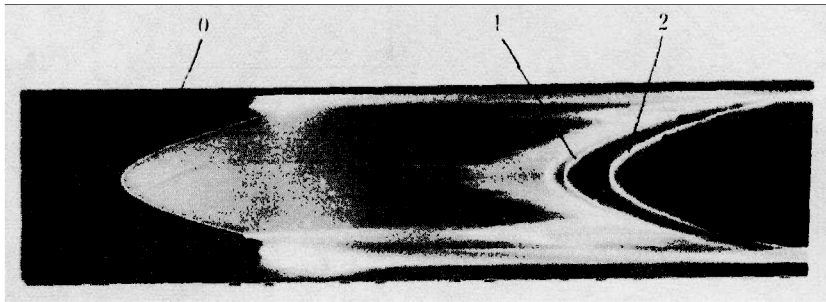


图2 高速狭缝扫描照片

0: 飞片自由面起飞波形; 1: 发光间隙I处波形;  
2: 发光间隙II处波形

Fig.2 Typical high-speed streak camera photograph

0: Initial free-surface shape of flyer plate.  
1: Free-surface shape at the location of illumination-gap I.  
2: Free-surface shape at the location of illumination-gap II

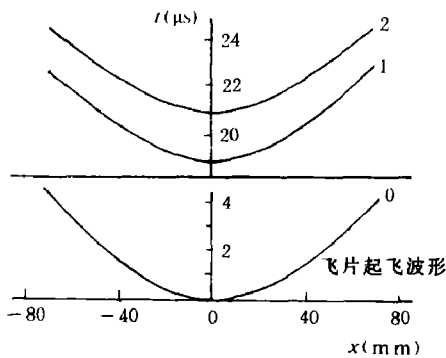


图3 时间波形图

0, 1, 2 意义同图2

Fig.3 Free-surface shape in time scale

0, 1, 2 ditto as Fig.2

为了验证空间波形的处理方法, 利用闪光X—射线照相观察了图1装置中飞片运动的形状, 图4是其中一张照片。

为了验证有机玻璃内击波参数的处理结果, 在光学测试同时, 又采用锰铜压力传感器测量了击波阵面压力。传感器测试系统如图5所示。

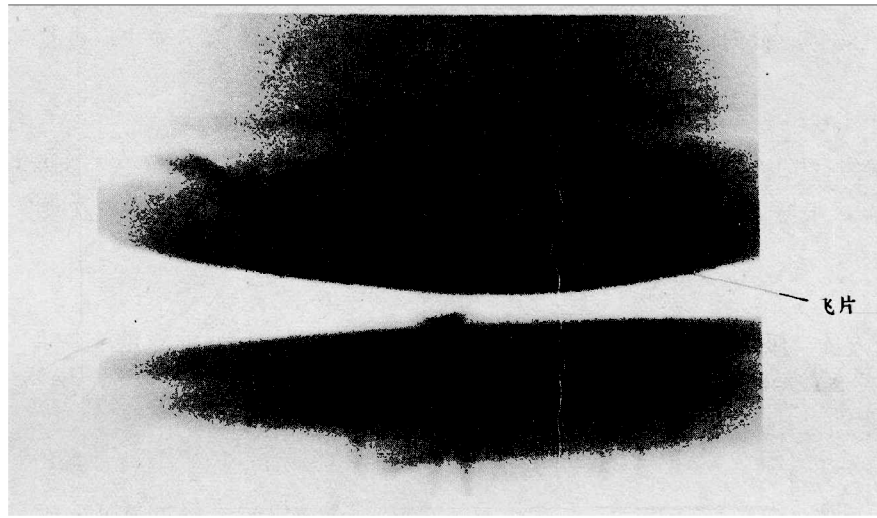


图 4 X光照片

Fig.4 Typical flash X-ray radiograph

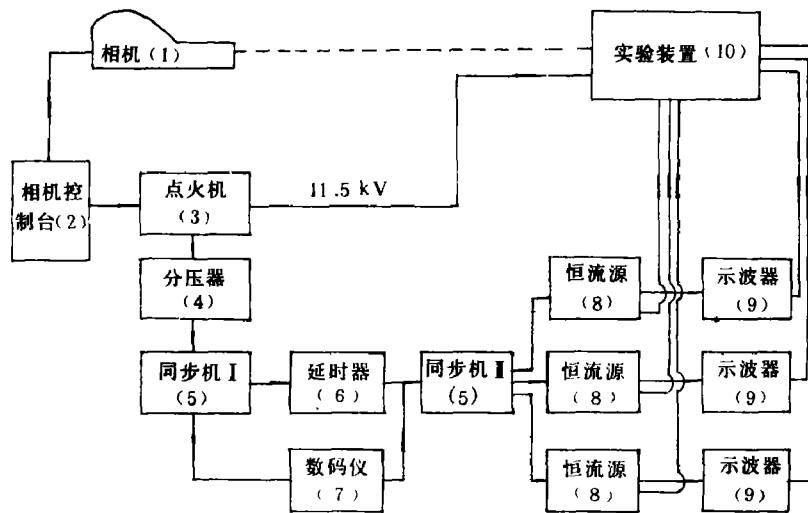


图 5 测试系统框图

Fig.5 Block diagram of the measurement system

- (1) Camera      (2) Camera controller      (3) Igniter
- (4) Divider      (5) Synchronizer I (II)      (6) Delayer
- (7) Data-code converter      (8) Constant-current source
- (9) Oscilloscope      (10) Experimental setup

### 3. 飞片空间波形和速度处理方法

在某个截面上得到的二维时间波形, 呈现为弯曲形状。在其波峰或波谷处, 通常可以看作是正击波。此时可直接从两条时间波形对应点上的时间  $t_1$  和  $t_2$  求出有机玻璃中的击波速度  $D_2$

$$D_2 = H_0 / (t_2 - t_1) \quad (1)$$

式中  $H_0$  为有机玻璃片 I 的厚度;  $t_1$  为波形“1”的时间,  $t_2$  为波形“2”的时间。飞片飞行速度  $w$ , 根据 Hugoniot 曲线求出。已知飞片和有机玻璃的压力  $p$ , 质点速度  $u$  的关系为

$$p_1 = \rho_{01} (c_{01} + \lambda_1 w / 2) w / 2$$

$$p_2 = \rho_{02} (c_{02} + \lambda_2 u_2) u_2$$

其中  $\rho_0$  为材料初始密度,  $c_0$ ,  $\lambda$  为经验常数。下标“1”表示飞片参量, 下标“2”表示靶(有机玻璃)参量。由此得出

$$w = \left[ (B_1 - u_2)^2 + \left( \frac{1-A}{A} u_2 + B_1 + \frac{B_2}{A} \right) u_2 \right]^{1/2} - (B_1 - u_2) \quad (2)$$

式中:  $A = \lambda_1 \rho_{01} / \lambda_2 \rho_{02}$ ;  $B_1 = c_{01} / 2\lambda_1$ ;  $B_2 = c_{02} / \lambda_2$ 。波形上除波峰和波谷处外, 其他部分显然属于斜入射击波, 不能按正击波计算。为了说清楚起见, 取图 3 波形中  $x_i - x_{i+n}$  部分绘于图 6。在  $x_i - x_{i+n}$  范围内, 击波呈弯曲波。波形 1 上各点按其法线方向传播为波形 2。从波形 1 可以得到  $(x_i, H_0)$  点的时间  $t_{1i}$ , 从波形 2 得到对应点  $(x_i, 0)$  点的时间  $t_{2i}$  按

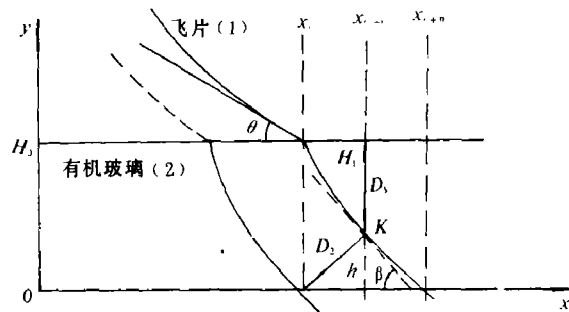


图 6 斜入射击波在有机玻璃光探板中传播示意图

Fig.6 Oblique-incident shock wave propagation in the optical-sonde system made of PMMA plates

(1) Flying plate (2) PMMA plate

照击波传播的规律,  $(x_i, 0)$  点实际上来自波形 1 上的  $K$  点  $(x_{i+j}, H_0 - H_1)$ 。计算表明, 任意有理数  $j$  是一小量, 为简化计算, 将  $x_{i+j}$  点击波速度  $D_2$  近似看做  $x_i$  点的速度。在  $x_{i+j}$  处作曲线 1 的切线, 切点为  $K$ , 切线与  $x$  方向夹角为  $\beta$ 。击波以速度  $D_2$  沿  $K$  点处法线运动, 只要选择适当的  $j$  值, 则曲线 1 上  $K$  点的法线将会通过  $(x_i, 0)$  点, 从而求出击波速度  $D_2$  和入射角  $\beta$ 。设  $x_{i+j}$  处  $y$  轴方向击波视速度  $D_{s(i+j)}$ , 击波 1 和击波 2 对应  $x_{i+j}$  处时间分别为  $t_{1(i+j)}$  和  $t_{2(i+j)}$ , 则

$$D_{s(i+j)} = H_0 / [t_{2(i+j)} - t_{1(i+j)}] \quad (3)$$

击波 1 上, K 点处切线斜率为

$$\operatorname{tg} \beta_{(i+j)} = \frac{[t_{1(i+j)} - t_{1(i+j-dj)}]}{x_{1(i+j)} - x_{1(i+j-dj)}} D_{s(i+j)} \quad (4)$$

K 点到有机玻璃板 I 上表面的距离  $H_1$  为

$$H_1 = (t_i - t_{1(i+j)}) D_{s(i+j)} \quad (5)$$

此时 K 点处法线与  $x_i$  线交点为  $(x_i, y)$ , 则

$$(H_0 - H_1) - y = \operatorname{ctg} \beta_{(i+j)} (x_i - x_{i+j}) \quad (6)$$

第  $i$  点击波速度为

$$D_2 = [(x_{i+j} - x_i)^2 + (H_0 - H_1)^2]^{1/2} (t_{2i} - t_{1(i+j)})^{-1} \quad (7)$$

从 (3) — (7) 式求出第  $(i+j)$  点的击波速度  $D_2$  和击波入射角  $\beta$  后, 可采用倾斜冲击下波后状态参数计算方法<sup>[1]</sup>求飞片速度  $w_i$  和飞片与靶碰撞角  $\theta_i$ 。图 7 绘出了飞片斜冲击下波系图。

图中  $D_2, u_2$  和  $D_1, u_1$  分别为入射波和反射波击波速度及波后粒子速度。

在 [0] 区和 [1] 区有

$$q_0 = w \operatorname{ctg} \theta \quad (8)$$

$$q_0 \cos(a + \theta) = q_1 \cos(\theta + a - \varepsilon_1) \quad (9)$$

$$q_0 \sin(a + \theta) = D_1 \quad (10)$$

$$q_1 \sin(a + \theta - \varepsilon_1) = D_1 - u_1 \quad (11)$$

$$D_1 = c_{01} + \lambda_1 u_1 \quad (12)$$

$$p_1 = \rho_{01} D_1 u_1 \quad (13)$$

在 [2] 区和 [3] 区有

$$q_2 = w / \sin \theta \quad (14)$$

$$q_2 \cos \beta = q_3 \cos(\beta - \varepsilon_2) \quad (15)$$

$$q_2 \sin \beta = D_2 \quad (16)$$

$$q_3 \sin(\beta - \varepsilon_2) = D_2 - u_2 \quad (17)$$

$$D_2 = c_{02} + \lambda_2 u_2 \quad (18)$$

$$p_3 = \rho_{02} D_2 u_2 \quad (19)$$

边界条件为  $p_1 = p_3, \theta - \varepsilon_1 = \varepsilon_2$ 。由 (8) — (19) 式叠代, 可求出  $w$  及其他各参量。假定飞片在给定空腔下, 所对应的空间波形的变化可以忽略不计, 则飞片空间波形  $HF_i$  为

$$HF_i = \sum_{i=1}^n w_i (t_{i+1} - t_i) / \cos \theta_i \quad (20)$$

#### 4. 处理结果与实验比较

通过微机程序对图 3 波形进行了处理。处理所得的飞片自由面空间幅度和 X 光实验结果列于表 1, 其中  $x$  为距起爆轴线的距离。此外, 利用图 3 波形计算了有机玻璃内击波阵面的压力及其他参数, 计算的压力  $p$  与锰铜压力传感器实测结果列于表 2。可以看出, 处理的空

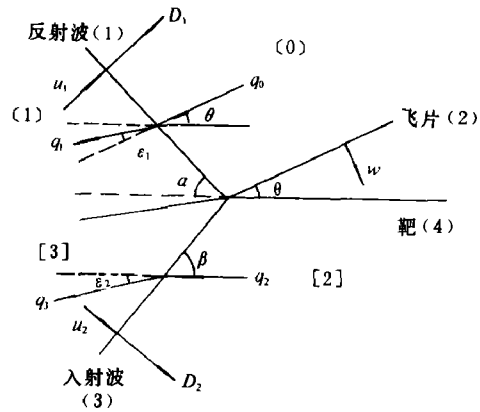


图 7 飞片斜冲击波系图

Fig. 7 Diagram of the oblique-shock wave system induced by oblique impact of flying plate

- (1) Reflective wave
- (2) Flying plate
- (3) Incident wave
- (4) Target

间波形与实验观测是符合的, 压力计算结果与实测值相差约6%, 也是符合较好的。说明这种处理方法能够反映实际情况。

表1 处理和实测空间波形比较

Table 1 Comparison between the results deduced from microprocessor and measured from the flash X-ray photograph

$x / (\text{mm})$	1.44	4.75	8.43	12.59	17.87	21.55
处理 $HF / (\text{mm})$	0.06	0.11	0.29	0.44	0.98	1.31
实测 $HF / (\text{mm})$	0.01	0.07	0.25	0.48	0.98	1.30
相 差 $/ (\text{mm})$	0.05	0.04	0.04	-0.04	0	0.01
$x / (\text{mm})$	23.19	28.10	28.56	33.68	37.25	38.49
处理 $HF / (\text{mm})$	1.43	2.03	2.18	2.67	3.32	3.39
实测 $HF / (\text{mm})$	1.52	2.10	2.17	2.77	3.37	3.42
相 差 $/ (\text{mm})$	-0.09	-0.07	0.01	-0.10	0.05	-0.03
$x / (\text{mm})$	43.16	43.44	49.40			
处理 $HF / (\text{mm})$	4.17	4.25	5.14			
实测 $HF / (\text{mm})$	4.14	4.18	5.04			
相 差 $/ (\text{mm})$	0.03	0.07	0.10			

表2 计算和实测压力比较

Table 2 Comparison between the calculated pressures and the measured pressures

$x / (\text{mm})$	5	25	35	55
$p_{\text{计算}} / (\text{GPa})$	9.42	7.79	7.06	5.93
$p_{\text{实测}} / (\text{GPa})$	9.99	7.60	6.95	6.28

## 5. 结论

由上述结果可以看出, 采用多层有机玻璃探板测得两条时间波形反推出二维运动飞片的空间波形, 是一种简便易行的方法。空间波形与压力的处理结果与实验值符合较好, 证明这种处理方法是可行的, 能够满足一般测试精度要求。

本实验得到周光辉、张景欣、丁宁贤、邵玉栋、周腊梅、伍绍珍等同志支持和帮助, 在此向有关同志致谢。

## 参 考 文 献

- [1] 经福谦等, 实验物态方程导引, 科学出版社 (1986)。

---

**MEASUREMENT OF TWO-DIMENSIONAL SHAPE  
OF A FLYING PLATE AND THE METHOD  
OF DATA TREATMENT**

Fu Xinghai, Yu Jun

*(Southwest Institute of Fluid Physics)*

**ABSTRACT** In this paper, an optical-sonde system for measuring the shape of a two-dimensional flying plate and the corresponding data treatment method are described. For illustration, an one-point initiation detonation event is given as an practical example. The data treatment results were compared with that of the flash X-ray measurement, and it is found that both the shape and the pressure are in good accord.

**KEY WORDS** shock wave, optical-sonde system, flying plate with two-dimensional shape

---