

# 水中爆炸加载金属板变形的实验研究

古和今 恽寿格 洪兵

(江西省科学院) (北京理工大学)

黄骏德

(海军工程学院, 武汉)

**摘要** 本文给出了研究抛体大变形的光学实验测试方法, 用该方法测定了水中爆炸作用下的金属板的变形过程, 得到了金属板上任意点随时间变化的位移曲线和速度曲线以及金属板变形过程的真实位移场。该方法比常用的测量抛体运动速度的电测——探针法前进了一步。

**关键词** 水中爆炸 拉格朗日速度 欧拉速度 位移场 高速狭缝扫描相机

## 一、引言

研究水中爆炸加载金属板的变形是爆炸力学中的一个重要课题。水域作战, 军舰和潜艇是鱼雷、水雷和深水炸弹的主要攻击目标, 其壳体必将受到爆炸冲击作用而变形甚至破坏。对于这类实际问题, 可作如下简化: 把军舰和潜艇的壳体看成由许多四周刚性加固的矩形板组成, 分析水下爆炸对刚性夹固的金属方板的作用。本文在综合参考前人工作<sup>[1-4]</sup>的基础上, 应用高速狭缝扫描相机技术和激光定位技术, 建立了水中爆炸二维测试系统, 测定了描述金属板变形的两个重要物理量, 即变形位移和变形速度。

## 二、原理

本文建立了一种测量抛体表面各质点微元真实运动速度的方法。其原理如下: 利用光学测量中高速狭缝扫描相机技术, 把试板上某质点的空间运动在两个相互垂直方向上的投影连续地扫描记录下来, 再通过矢量运算, 求得质点的运动轨迹, 然后对它求导, 即得到该质点的速度连续曲线。这种方法是用相机追踪抛体上的某个质点, 从而得到质点的运动速度。因此, 我们把它称为拉格朗日速度的光学测量法。

图1是拉格朗日速度测量原理图, 在图1(a)中,  $s_1 s_2$ 表示被测物体的表面曲线,  $P$ 点是在 $s_1 s_2$ 曲线上某个被选定的测试点,  $\vec{n}^0$ 代表初始时刻 $P$ 点的法线方向,  $\vec{\tau}^0$ 代表初始时刻 $P$ 点的切线方向。 $\vec{\tau}^0$ 与水平线的夹角为 $\theta$ , 在平板问题中, 它表示平板的初始倾角。 $\vec{v}$ 是 $P$ 点的运动速度, 记为 $\vec{v} = \vec{v}(t)$ 。定义 $P$ 点的速度 $\vec{v}$ 与法线方向 $\vec{n}^0$ 的夹角为变形角 $\delta$ , 记为 $\delta = \delta(t)$ 。

在图1(b)中,  $\vec{v}_1$ 和 $\vec{v}_2$ 分别代表在不同初始条件 $\theta_1$ 和 $\theta_2$  ( $\theta_1 \neq \theta_2$ )下所观测到的同一时刻 $P$ 点的速度, 因此有

$$|\vec{v}_1| = |\vec{v}_2| = |\vec{v}| \quad (1)$$

$P$ 点速度的方向由于初始条件不同而相差一个角度 $\beta$ ,  $\beta$ 为 $\vec{v}_1$ 和 $\vec{v}_2$ 之间的夹角。由几何

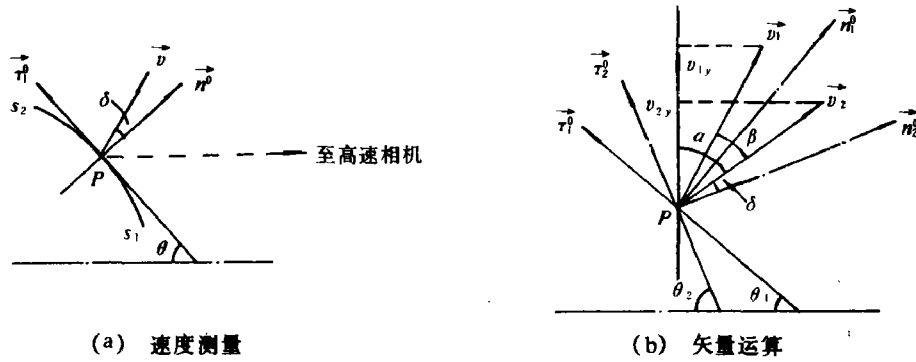


图1 测量原理

Fig. 1 Principle of measurement

(a) Velocity measurement

(b) Operation of vector

关系可知：

$$\beta = \theta_2 - \theta_1 \quad (2)$$

其中 $\theta_1$ 和 $\theta_2$ 代表初始倾角，是两个确定的值，故 $\beta$ 为常数。把 $\vec{v}_1$ 和 $\vec{v}_2$ 投影到铅垂方向上，得到相应的投影分量 $v_{1y}$ 和 $v_{2y}$ ，由数学推导可得

$$|\vec{v}(t)| = \frac{v_{2y}(t)[1 + \lambda^2 - 2\lambda \cos\beta]^{1/2}}{\sin\beta} \quad (3)$$

$$\delta(t) = \arctg \frac{\cos\theta_1 - \lambda \cos\theta_2}{\lambda \sin\theta_2 - \sin\theta_1} \quad (4)$$

其中 $\lambda = v_{1y}(t)/v_{2y}(t)$ ， $v_{1y}$ 和 $v_{2y}$ 的值由高速摄影实验测定得到。 $P$ 点速度大小和方向的数学表达式(3)和(4)对于研究抛体的运动问题具有普遍的适用性。

考虑金属板的周边受到刚性固定约束作用的情况，见图2， $O$ 点为板的对称中心点，则

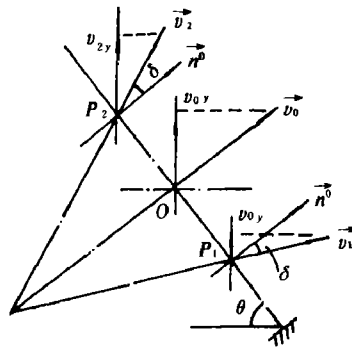


图2 固支下方板的速度测量

Fig. 2 Velocity measurement of a square plate with fixed fulcrum

相互对称的点 $P_1$ 和 $P_2$ 在 $t$ 时刻的速度大小和方向为

$$v = \frac{v_{2y}[(1 + \lambda)^2 - 4\lambda \cos^2\theta]^{1/2}}{\sin 2\theta} \quad (5)$$

$$\delta = \arctg\left[\frac{1-\lambda}{1+\lambda} \operatorname{ctg}\theta\right] \quad (6)$$

式中 $\lambda = v_{1y}/v_{2y}$ ,  $v_{1y}$ 和 $v_{2y}$ 由实验测定, 然后通过改变测试时间 $t$ 以及测试点 $P_1$ 和 $P_2$ , 即可求出试板变形速度随位置和时间变化的分布规律。事实上, 试板的变形速度是空间和时间的函数。

### 三、实 验

#### 1. 实验装置

如图3所示为本文实验测试系统, 它采用了激光定位技术来实现本实验中的远距离试板的精确对准和定位, 即确定合适的拉格朗日质点和试板的初始倾角 $\theta$ 。图中除高速相机和激光发生器外, 其余的装置和仪器均为自制。实验采用板面尺寸为 $150\text{ mm} \times 150\text{ mm}$ , 厚度分别为 $1\text{ mm}$ 钢板和 $2\text{ mm}$ 铝板两种。每种试板各10块, 共计20块。每块试板表面都印制有黑白相间的条纹, 以标识拉格朗日质点的位置, 条纹间隔为 $10\text{ mm}$ 。

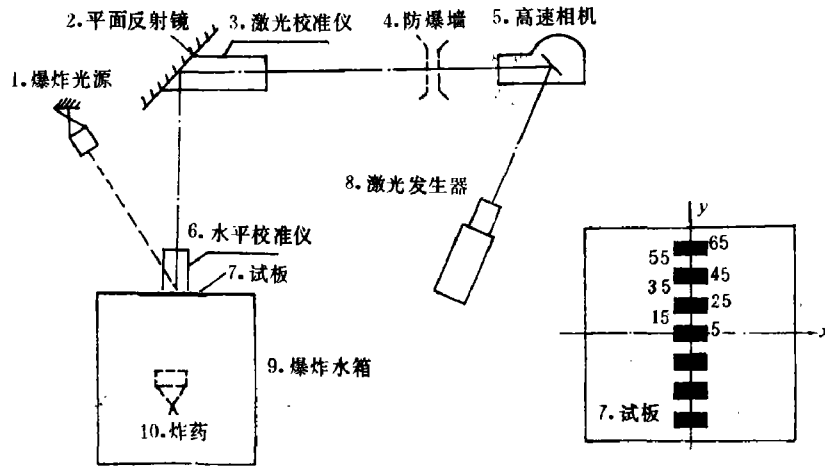


图3 实验测试系统

Fig. 3 Experimental measurement system

1. Explosive light source; 2. Plate mirror; 3. Laser calibration instrument;
4. Antidetonating wall; 5. High streak camera; 6. Horizontal calibration instrument;
7. Specimen; 8. Laser generator; 9. Blast water box; 10. Explosive; 11. Specimen.

#### 2. 实验结果及其讨论

在爆炸后回收的试板中, 以板面变形具有对称性的变形试板为有效试板, 共12块, 其中部

表1

Table 1

试板材料	钢			铝		
编 号	1	2	3	4	5	6
$W_{max}/\text{mm}$	24.84	22.69	22.45	18.24	12.26	12.95
$W_{max}/h$	24.84	22.69	22.45	9.12	6.13	6.475

分试板中心点的最大残余挠度  $W_{max}$  和  $W_{max}/h$  值见表1,  $h$  为试板的厚度。

从回收的试板中可以看出, 试板残余变形模式与材料的性能有关。铝板的变形模式其轮廓线很清楚, 就象是一个“正四棱锥”, 而钢板的变形模式其轮廓线则不明显, 整个残余变形的形状比较“圆滑”。

图4是典型的狭缝扫描记录像片, 像片上黑白相间的扫描线代表试板上沿  $y$  轴方向分布的各质点微元在铅垂方向上的运动轨迹。从图中可以看到, 扫描线经历了由“平直到缓慢上升, 明显偏折再继续上升, 然后趋于“平直”的过程。这说明, 试板上质点的变形过程是随时间变化的, 在扫描线出现明显偏折的地方, 速度变化更快。

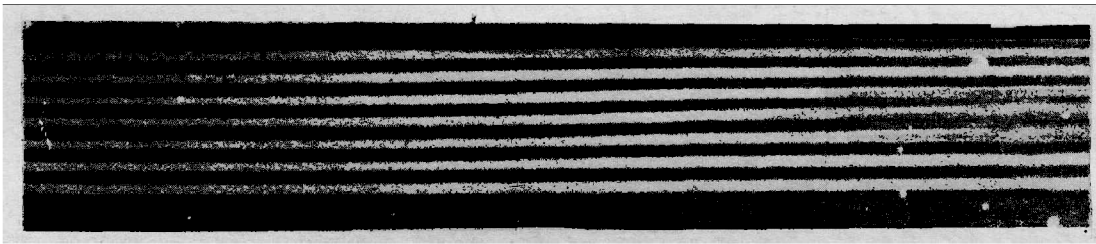


图4 狭缝扫描像片 (1 mm 钢板,  $W_{max} = 24.84$  mm)

Fig. 4 High speed streak photograph

规定试板的轴向变形量为  $z$ , 切向变形量为  $y$ , 座标原点取在试板的对称中心点上,  $z$  轴垂直于板面并指向变形方向。对图4中的扫描曲线进行判读和数据处理, 可得到试板上任意点的位移曲线  $z = z(y_0, t)$  和  $y = y(y_0, t)$  以及速度曲线  $v = v(y_0, t)$ , 其中  $y_0$  表示试板上拉格朗日质点的位置。详细的计算结果可参见文献[5], 本文仅给出  $z = z(y_0, t)$  和  $v = v(y_0, t)$  的部分曲线图形。

图5是位移曲线, 它反映了试板变形过程的一些特点: 总的变形过程很短, 大约历时  $300\mu s$ ; 轴向最大变形为  $24.84$  mm, 它出现在试板的中心部分。对于  $y_0 = 5$ , 可以认为

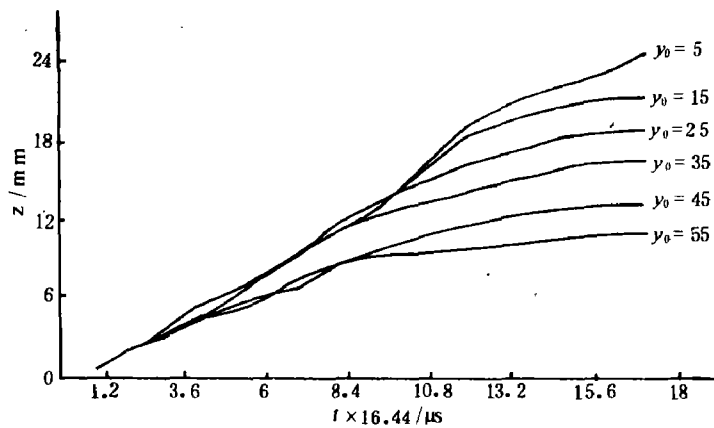


图5  $z = z(y_0, t)$

Fig. 5  $z = z(y_0, t)$

$z = z(y_0, t)$  描述了平板中心点的整个变形过程, 这个结果与文献[6]中的实验测试结果是相当一致的。

图6为速度曲线, 从图中可以看出, 速度大小有两次大的起伏变化, 此结果和水中爆炸过程的“二次加载”现象相对应。在水中冲击波作用后, 板变形速度的不稳定性表明了水中爆炸的复杂性。在  $t = 180.9 \mu\text{s}$  时, 速度达到最大值, 为  $145 \text{ m/s}$ 。

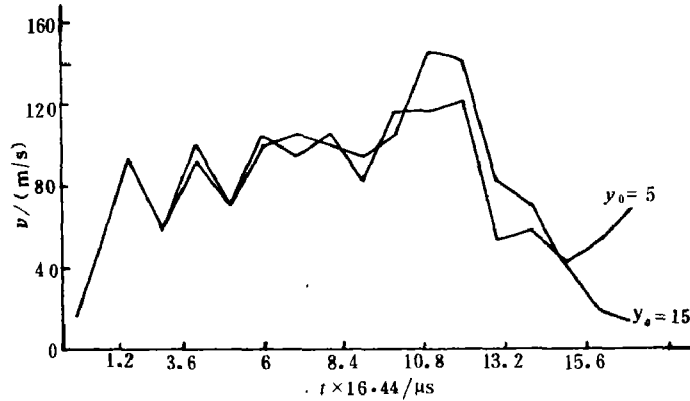


图6  $v = v(y_0, t)$

Fig. 6  $v = v(y_0, t)$

图7所描述的是试板在二维情况下变形的实验结果。图中曲线为等时线, 它表示试板在某一时刻的变形位置。从图中可以看出, 开始变形时, 整个试板表面几乎均向前运动, 随后, 试板的中心部分仍然像刚性平板一样向前运动, 但边缘部分的运动却比中间部分要慢得多。该图形描述了整个试板在任意时刻的变形形状。

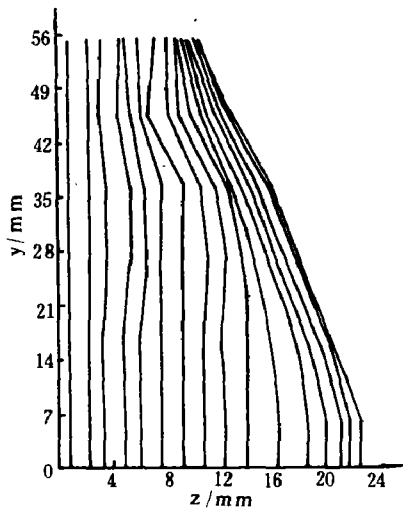


图7 位移场

Fig. 7 Displacement field

下面结合实验结果说明平板在水中爆炸作用下的变形机理。水中爆炸作用主要有两种形式的载荷作用, 即冲击波的作用和高压气体膨胀功以及由它所形成的高速水流的作用。正是这两种载荷的作用, 尤其是后者, 使得金属板的变形过程复杂化。本文认为板的变形过程经历了如下三个阶段:

第一阶段, 入射冲击波在板面上反射使板产生加速运动。这个过程较短, 只有  $32.9 \mu\text{s}$ 。由文献[6]可计算出入射冲击波作用在板上的冲量  $i = 13.043 \times 10^2 \text{ Pa}\cdot\text{s}$ , 入射冲击波的作用, 使得试板获得第一次加载, 板的运动速度由零突跃到  $92.89 \text{ m/s}$ 。与此同时, 紧随击波之后是一组稀疏波。稀疏波是由于试板的运动而引起的, 它的作用效果是使水介质中的压力下降直至出现负压。另外, 由于试板周边被夹固,

板在运动过程中，还会产生由板的周边传出的挠曲波，挠曲时间等于波由平板边缘传播到平板中心的时间，即 $\theta_d \approx 50\mu\text{s}$ 。因此，水介质中的压力场是入射波、反射波和挠曲波综合作用的结果。由时间上推测，这三者综合作用的结果正是图6中速度在 $t=65.77\mu\text{s}$ 时波动的原因。

第二阶段，空化区的形成及其作用过程。随着板速的增加，稀疏波的作用越来越强，因而导致板面附近水的压力迅速下降。在板的厚度较小的情况下，压力可以降低到足以使水发生空化，这是第二阶段运动的开始。在一维情况下，初始空化点出现的时间和位置由下列联立方程确定<sup>[2]</sup>。

$$\begin{cases} p(x, t) = -(p_k + p_0) \\ \frac{\partial p(x, t)}{\partial x} = 0 \end{cases}$$

其中 $p_k$ 为空化压力， $p_0$ 为静水压力。

空化一经出现就迅速扩展，形成空化区。空化区的压力被认为是一个常数，其压力梯度为零。这样，被空化拉断的水质点以其各自在进入空化状态时所获得的速度作等速运动。另外，板以及附在板面上的一层水在变形阻力作用下将不断减速。因而被空化拉断的水终于会撞到前面的附加水层上，不断给板和附加水层补充动量，使它们继续运动<sup>[1]</sup>。空化区不可能一直向水的内部扩展，当水中的压力大于空化压力 $p_k$ 时，空化区的扩展就停止下来。

第三阶段，再加载过程。在空化区停止扩展的同时，主体水<sup>[1]</sup>在爆炸气球的压力作用下仍然向外加速膨胀，追贴上一部分被空化拉断的水，并把它们吸附成自己的一部分。由于主体水的运动速度大于附加水层的运动速度，因而空化区不断缩小，终于在某一时刻（大约 $148\mu\text{s}$ ），主体水赶上附加水并与其发生碰撞，空化区随之消失。碰撞时，主体水将大部分能量传递给附加水和试板，从而使板获得足够的能量，进行一次突跃加载，这就是再加载的原因。以后，试板在材料的变形阻力作用下迅速减速直至停止运动。

总之，通过以上对实验结果的分析，我们了解到夹固方板在水中爆炸作用下变形过程的一些重要环节。如入射冲击波、反射冲击波、反射稀疏波和挠曲波对板变形的作用和影响，空化区的形成和消失，再加载现象等等。

#### 四、结 论

1. 本文提出了对夹固平板变形过程的主要物理量，即变形位移和变形速度进行测定的光学实验方法。

2. 应用本文所建立的实验装置，对水中爆炸加载下夹固方板的变形过程进行了测量，得到了试板上各拉格朗日质点随时间连续变化的位移曲线和速度曲线。

3. 由实验结果可以看到试板中间部分（ $y_0 < 25$ ）的变形经历了“加速——波动——平稳——再加速——减速至停止”的过程。试板变形从第一次加速结束到第二次加速开始所花费的时间最长，约占总变形时间的46%，最大变形速度出现在再加载阶段。

## 参 考 文 献

- [1] 郑哲敏, 杨振声等编著, 爆炸加工(修订本), 国防工业出版社, (1981).
- [2] 杨显成, 水下爆炸船底壁压分析, 六机部702研究所, (1981).
- [3] Yun Shourong, Experimental Determination of Two-Dimensional Strain of Liners under Explosive Loading, the 5th APS Topical Conference on Shock Waves in Condensed Matter, Monterey, California, (1987).
- [4] Rentz T. R., Experimental Investigation into the Dynamic Response of a Stiffened Flat Plate Loaded Impulsively by an Underwater Shock-Wave, AD -A151321, (1984).
- [5] 古和今, 水中爆炸加载金属板变形研究, 北京理工大学硕士论文, (1988).
- [6] 孙同坤, 刘小萍等, 水下爆炸时平板变形过程和爆炸冲量的测量, 中国科学院力学所, (1964)

## EXPERIMENTAL INVESTIGATIONS ON LARGE DEFLECTIONS OF PLATES BY UNDERWATER EXPLOSIVE LOADING

Gu Hejin, Yun Shourong, Hong Bing  
(Jiangxi Academy of Sciences) (Beijing Institute of Technology)

Huang Junde  
(Naval Academy of Engineering, Wuhan)

**ABSTRACT** This paper presents an experimental method of determining the process of large deflections of plates by underwater explosive loading using high-speed streak camera. Using this method, the two-dimensional displacements and the Lagrangian velocities of the deformed metal-plate were measured. This method exhibits better performance than the conventional electric-probe method for this kind of experimental investigation.

**KEY WORDS** underwater explosion, Lagrangian velocity, Eulerian velocity, displacement field, high-speed streak camera.