

# 点引爆圆板装药驱动飞板的 实验及二维数值模拟

庄仕明 刘文翰 孙承纬

(西南流体物理研究所 成都523信箱 成都 610003)

**摘 要** 本文报导点引爆圆板装药驱动飞板的实验及二维数值模拟研究结果。实验测定了有机玻璃、铝、钢和铜四种飞板在爆轰产物驱动下的碰靶时间及碰靶波形,并将二维数值模拟结果与测量结果进行了比较,二者符合较好。文中还就数值模拟中存在的一些问题进行了简要分析、讨论。

**关键词** 圆板装药 爆轰驱动 二维数值模拟

## 一、引 言

炸药二维爆轰产生的爆轰产物驱动体的研究是一个早就为人们所重视的课题。四十年代 Gurney<sup>[1]</sup>用动量、能量守恒关系研究各种炸弹爆炸效应,得到了一种简单实用的确定弹片速度的近似理论。后来 Hoskin<sup>[2]</sup>等人提出的圆柱管在滑移爆轰作用下运动的近似理论,所预言的管壁运动规律在一定范围内与实验结果符合得相当好。但随着军事和民用工业的发展,对各类弹药和爆炸磁压缩装置的设计、爆炸焊接、聚能切割器件等不断提出新的要求,所以,这一课题的研究正在不断深入之中。薄层装药(炸药质量/飞板质量 $<1$ )情形中,飞板在近类似于滑移爆轰波作用下的运动已有许多工作<sup>[3~6]</sup>。本文的实验模型是炸药质量大于飞板质量的情况,研究有机玻璃、铝、钢及铜四种不同材料的飞板在点引爆炸药产生的近似球面散心爆轰波作用下的驱动运动,并用二维流体弹塑性编码 THEPL 进行了数值模拟,两者符合较好。在这个数值编码的基础上扩展功能,可以进一步研究飞板本构关系及断裂性能对爆轰驱动的影响。

## 二、实 验

实验采用 GSJ 型高速相机记录飞板碰靶波形,相机转速为6万转/分,扫描速度为3毫米/微秒。电信号用数字时间间隔仪 E324记录。实验样品都是圆板形的,靶(即有机玻璃光板)有平面及凹球面两种,以下分别介绍。

### 1. 实验模型 I

如图1所示的实验系统模型用来测量 $\varnothing 200\text{mm} \times 2\text{mm}$  钢飞板的碰靶波形及碰靶时间。三对电探针分别装在雷管底部及光探板上距中心对称轴10mm 的两对称位置上。飞板与靶间的初始距离(空腔)为 $h=26\text{mm}$ ,炸药为T/ $\Gamma$ (梯恩梯/黑索金)=35/65,直径200mm,

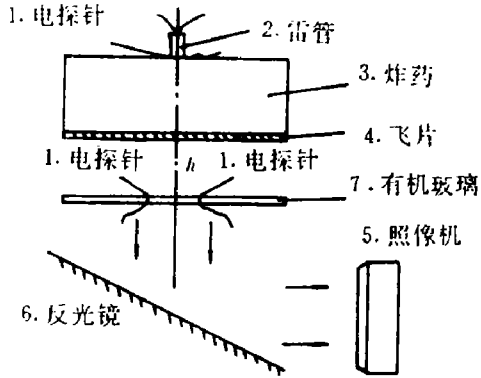


图1 用平面光探板测量钢飞板  
碰靶波形及碰靶时间实验装置示意图

Fig. 1 Experimental assembly for measuring front  
surface shape and time of steel flyer  
impacting on a plane target

1. Electric pin, 2. Detonator, 3. Explosive, 4. Flyer,  
5. Camera, 6. Mirror, 7. Plexiglass target

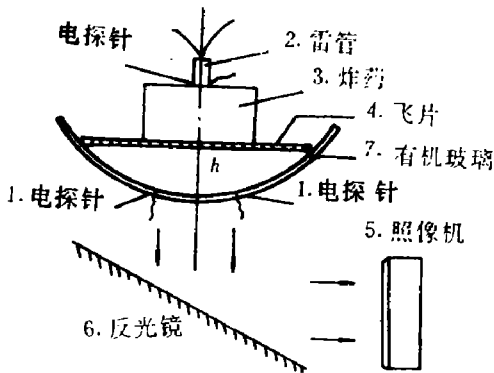


图2 用凹球面光探板测量有机玻璃、铝和铜飞板  
碰靶时间及碰靶波形的实验装置示意图

Fig. 2 Experimental assembly for measuring front  
surface shapes and times of PMMA, Aluminum  
and Brass flyers impacting on concave spheric targets

1. Electric pin, 2. Detonator, 3. Explosive, 4. Flyer,  
5. Camera, 6. Mirror, 7. Plexiglass target

波形换算的。现将数值模拟得到的碰靶时间  $T_{cal}$  连同  $T_{exp}$  一并列于表 2 中。

200mm,

厚度 30mm, 密度  $\rho = 1.715 \text{g/cm}^3$ , 爆速  $D = 7.9 \text{km/s}$ , 多方指数  $\gamma = 2.77$ 。

## 2. 实验模型 I

实验模型 I 如图 2 所示, 与实验模型 I 大体相同, 不同的是光探板由平面改为内半径为 124mm 的凹球面, 炸药厚度 20mm, 直径为 100mm, 小于飞板直径。仍使用三对电探针记录电信号, 第一对在雷管底部, 另外两对分别安在距中心对称轴 50mm 的对称位置上。飞板与光探板底部的初始距离仍用  $h$  (空腔) 表示。用这个实验模型做了有机玻璃、铝、铜三种飞板的实验, 各飞板样品尺寸列于表 1 中。

表 1 实验模型 I 中各飞板尺寸

Table 1 Flyer sizes of experimental model II

材料	有机玻璃	*45 钢	H62 黄铜
直径/(mm)	150	169	169
厚度/(mm)	4.53	2.40	0.81
空腔 $h$ /(mm)	25.23	31.92	31.97
密度/( $\text{g/cm}^3$ )	1.18	2.78	8.40

## 3. 实验结果

由于炸药是在中心对称轴上由一个雷管引爆的, 所产生的爆轰波在短时间内近似为一散心球面波, 爆轰波最先到达的位置是炸药-飞板交界面与中心轴的交点部位。本文所指的碰靶时间即是指起爆时刻与飞板中心部位碰靶的时间差。一方面由于爆轰波在一定范围内是一个球面波, 从中心沿径向, 飞板的作用时间依次滞后; 另一方面由于爆轰波和飞片运动都受旁侧稀疏波的影响, 离对称轴越远, 稀疏越严重, 波形越迟后。而电探针 2 (或电探针 3) 的位置并不在中部, 所以, 实验碰靶时间  $T_{exp}$  是根据电测时间按光测碰靶波形换算的。现将数值模拟得到的碰靶时间  $T_{cal}$  连同  $T_{exp}$  一并列于表 2 中。

表2 各飞板碰靶的时间

Table 2 Times of flyer impacting with target

材料	实验模型	空腔 $h/mm$	$T_{exp}/\mu s$	$T_{cal}/\mu s$
*45 钢	I	26.00	17.28*	16.80
有机玻璃	II	25.23	12.00	11.10
Ly12 铝	II	31.92	15.20	14.72
H62 黄铜	II	31.97	15.30	14.70

\* 电讯号干扰较严重

实验测量的各种飞板的碰靶波形及与二维数值模拟的比较分别示于图3、4、5、6中。图中  $\Delta T$  是不同半径( $R$ )位置微元碰靶时间与对称中心位置微元碰靶时间的差值。从图中我们注意到:采用实验模型II的有机玻璃、铝及铜飞板的碰靶波形在靠近加载炸药边缘位置附近有一个超前区域,而采用实验模型I的钢飞板的碰靶波形(图3)却没有这样一个超前区域。两个实验模型的差别仅在于实验模型I中炸药直径与飞板直径相同,光探板为平面,而实验模型II中炸药直径较飞板直径小,光探板改用凹球面。采用实验模型II的各飞板碰靶波形远离中心位置局部超前的原因将在后节中分析讨论。

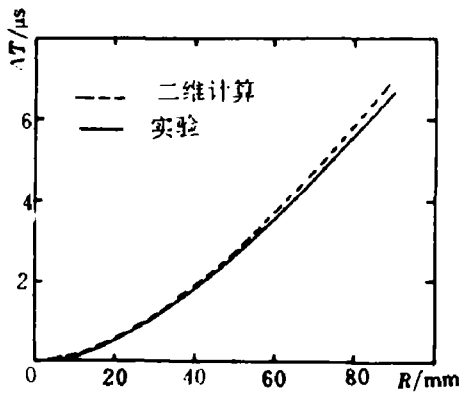


图3 钢飞板的实验及计算碰靶波形  
Fig. 3 Front surface shape of steel flyer impacting on a target by experiment and 2D numerical simulation  
---2D Calculated, —Experimental

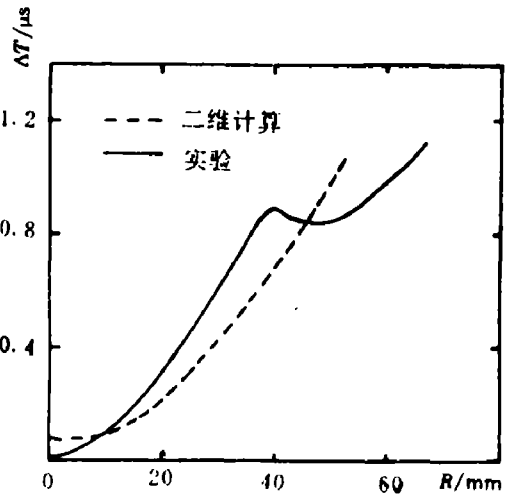


图4 有机玻璃飞板的实验及计算碰靶波形  
Fig. 4 Front surface shape of PMMA flyer impacting on a target by experiment and 2D numerical simulation  
---2D Calculated, —Experimental

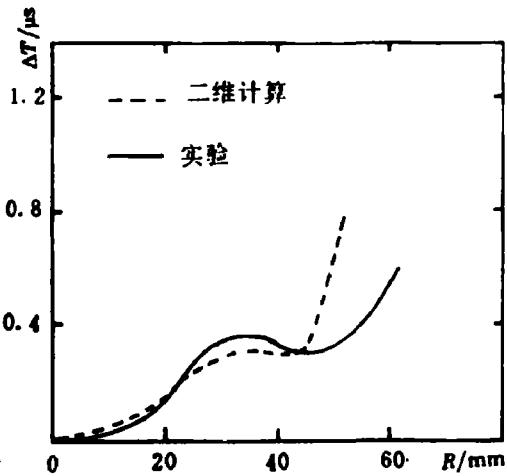


图5 铝飞板的实验及计算碰靶波形

Fig. 5 Front surface shape of aluminum flyer impacting on a target by experiment and 2D numerical simulation  
---2D Calculated, —Experimental

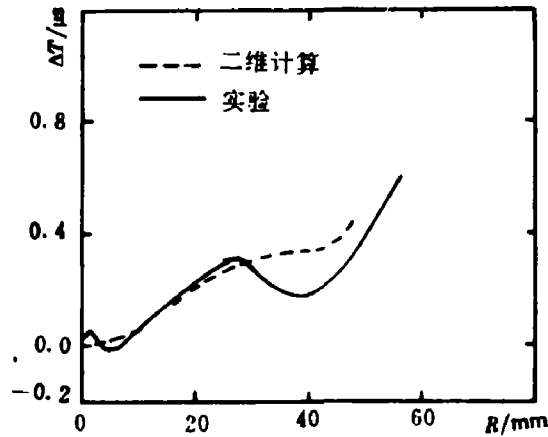


图6 铜飞板的实验及计算碰靶波形

Fig. 6 Front surface shape of brass flyer impacting on a target by experiment and 2D numerical simulation  
---2D Calculated, —Experimental

### 三、二维数值模拟

本文使用拉格朗日方法二维有限差分流体动力学编码 THEPL 对两种实验模型中的四种不同飞板在爆轰产物驱动下的运动过程进行数值模拟。THEPL 具备处理流体弹塑性物质、高能炸药、理想气体以及多孔物质等的本构关系,具有单向滑移面功能,可以对任意形状的物质区自动产生初始计算网格等功能。

#### 1. 流体力学方程组。

THEPL 中采用如下形式的流体力学方程组

动量方程

$$\begin{cases} \rho \frac{\partial u_x}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{xx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} + (N-1) \frac{t_{xx} - t_{yy}}{x} \\ \rho \frac{\partial u_z}{\partial t} = \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{zz}}{\partial z} + (N-1) \frac{t_{zz}}{x} \end{cases} \quad (1)$$

在  $xz$  坐标系中,  $y$  坐标轴为旋转对称轴;  $N=1, 2$  分别对应平面及柱面几何。  $\rho$  为密度,  $u_x, u_z$  分别为流体在  $x, z$  方向的速度分速;  $t_{xx}, t_{zz}, t_{xz}, t_{zx}$  为有效应力(即应力+人为粘性)分量。

能量方程

$$\rho \frac{\partial e}{\partial t} = P_v + P_s + Q_v + Q_s + Q \quad (2)$$

$e$  为比内能,  $P_v, P_s$  分别为压力对体积变化的做功率及应力偏量对形变的做功率;  $Q_v$  及  $Q_s$  分别是粘性应力球量及偏量的做功率,  $Q$  是外源加入的能量, 方程(2)中未计及热传导的影响。

人为粘性

$$q = \begin{cases} \rho b_1^2 \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} \right)^2 + b_2 c \left( \frac{\partial \rho}{\partial x} \right) & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} > 0 \\ 0 & \frac{1}{\rho} \frac{\partial \rho}{\partial x} < 0 \end{cases} \quad (3)$$

这里  $c$  为声速,  $b_1, b_2$  是具有长度量纲的常数。

## 2. 本构关系

对于有机玻璃, 由于其密度小, 强度低, 故计算时采用流体模型本构关系。

铝、钢及铜的本构关系采用流体弹塑性模型描述。与弹性应变相关的应力服从 Hooke 定律。屈服条件采用 Von Mises 屈服条件。

对于炸药, 其产物状态方程由完全气体  $\gamma$  律描述。炸药的爆轰由一简单的开关函数  $F$  控制。某一位置处炸药的起爆时刻  $\tau$  由此处与引爆点的距离与炸药爆速  $D$  确定。当  $t < \tau$  时,  $F=0$  当  $t \geq \tau$  时,  $F=1$ 。炸药或产物中压力由  $p = p_0 F$  计算, 这里  $p_0$  是 C-J 爆压。

## 3. 物质参数输入数据

计算模型尺寸与各飞板实验模型尺寸完全相同。计算网格按各飞板实验模型中不同物质区域由编码自动生成。计算网格的大小因物质区域不同而不同, 网格大小的划分原则是使整个计算模型中每个网格所代表的物质质量尽量相当。计算时炸药-飞板界面设置为滑移线。炸药参数见第二节, 各飞板物质参数列于表 3 中。

表 3 各飞板物质参数数据

Table 3 Material data for flyers

材料	实验模型	$\rho_0 / (\text{g/cm}^3)$	$c_0 / (\text{km/s})$	$S$	$\nu$	$\Gamma$	$Y / (\text{GPa})$
"45 钢	I	7.92	4.580	1.510	0.290	2.02	0.75
有机玻璃	I	1.18	2.432	1.579	—	1.00	—
Ly12 铝	I	2.78	5.350	1.350	0.333	1.70	0.55
H62 黄铜	I	8.40	3.985	1.497	0.370	2.00	0.45

另外需要说明的是: 实验模型 I 中, 飞板是由凹球面光探板边缘部位支承的, 由于介质中横波(剪切波或弯曲波)的速度小, 由支承点反射回来的横波对板的运动即使是有影响也很晚, 所以, 计算时飞板作完全未支承处理。

## 4. 计算结果

由 THEPL 编码数值模拟得到的各飞板中点碰靶时间  $T_{cal}$  已列于表 2 中。由计算得到的碰靶波形已同实验值一同分别示于图 3、4、5、6 中。可以看出, 计算结果与实验结果符合得很好。图 7、图 8 中画出的是由计算得到的各飞板中点位置速度-时间变化曲线。

## 四、分析讨论

1. 由图 7 所示, 铝及钢飞板的中点速度随时间的变化曲线有一个很明显的二次加速过程, 而图 8 中所示的有机玻璃及铜飞板的中点速度曲线却没有这样一个二次加速波形, 这是由于, 对于有机玻璃飞板, 计算时采用的是流体模型描述其本构关系, 板内不存在弹

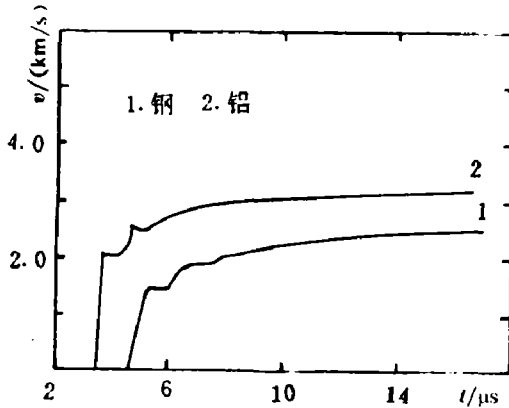


图7 由数值模拟得到的钢及铝  
飞板中点的速度-时间曲线

Fig. 7 Calculated velocity as a function of  
time for the centre points of flyers

1. steel, 2. Aluminum

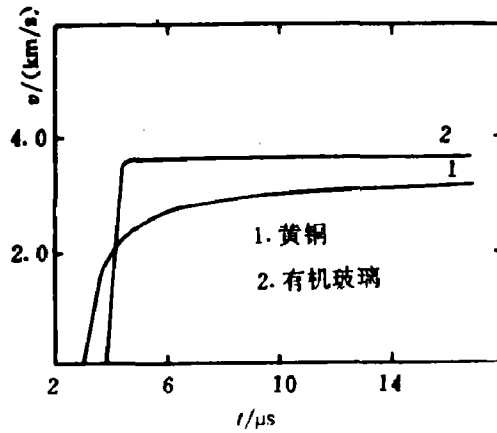


图8 由数值模拟得到的有机玻璃、黄铜  
飞板中点的速度-时间曲线

Fig. 8 Calculated velocity as a function of  
time for the centre points of flyers

1. Brass, 2. Plexiglass

塑性波的加载和卸载作用,而是沿加载波方向整个厚度的微元先后被单调加速到同样的速度。对于铜飞板,其板内存在入射波,反射波的作用,但因其板很薄,入射波,反射波在板内传播很短时间就被反射或再反射,在作图精度内难以表达。

2. 对于钢飞板,无论是计算波形还是实验波形都是单调的,即沿径向方向碰靶时间单调滞后。而对于铝及铜飞板,实验及计算碰靶波形都不是单调滞后的,在靠近炸药边缘的部位都出现不同程度的超前。有机玻璃飞板的实验波形也是如此,致于计算波形与实验波形二者在精细结构上存在性态上的差别,是由于采用流体模型描述其本构关系带来误差所致。

铝、铜及有机玻璃实验波形在炸药边缘部位局部超前的原因可能有多种,最大可能性是凹球面光探板的影响,也可能是炸药直径较飞板直径小而产生的一些副效应。为了澄清事实,我们做了一次对比实验。对比实验模型如图9所示。

对比实验模型中,炸药为  $T/\Gamma=4/6$ ,样品直径100mm,厚度40mm,飞板为45号钢,直径200mm,厚2.28mm,以平面光探板作靶,空腔高度  $h=62.5\text{mm}$ ,在雷管底部及光探板中心点各装一对电探针测碰靶时间。对比实验中炸药与原实验中所用炸药不同,但并不影响飞板碰靶波形的性态。

图10即为由对比实验模型得到的钢飞板的碰靶波形。波形曲线与图3中波形曲线类似,即沿径向方向碰靶时间单调滞后,并不出现边缘局部超前现象。这说明炸药直径较飞板直径小时,在炸药边缘附近并不产生使局部加载加强的副效应,即便是存在,其影响也可忽略不计。

3. 若飞板一开始就同时被加速到某一速度向前飞行,那么由凹球面光探板得到的碰靶波形将是一二次曲线,且从边缘到中心依次滞后。在散心爆轰波作用下,从中心到边缘各微元被加速的时间是依次滞后的。若不计爆轰波的斜入射和侧面稀疏的影响,那么,飞

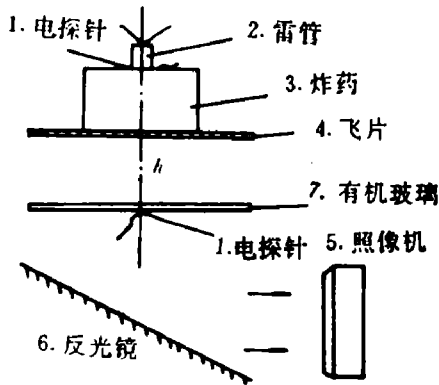


图 9 飞板碰靶波形对比实验装置示意图

Fig. 9 Contrast experiment assembly

1. Electric Pin, 2. Detonator, 3. Explosive, 4. Flyer, 5. Camera, 6. Mirror, 7. Plexiglass target

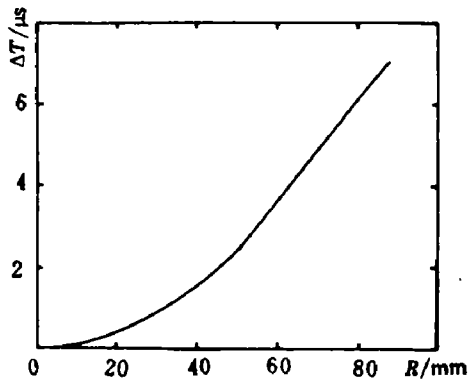


图 10 由对比实验模型得到的飞板碰靶波形  
由实验测得的中点碰靶时间为  $32.25\mu\text{s}$

Fig. 10 Front surface shape of flyer impacting on a target by the contrast experiment. The time of impacting target  $T_{mp} = 32.25\mu\text{s}$

板各微元的加速过程将如同图 7、图 8 中所示的飞板中点加速过程一样,在很短时间内被加速到某一稳定速度向前飞行。在平面光探板情形下,碰靶波形是中心超前,沿径向依次滞后,如图 3、图 10 所示。但在凹球面光探板情况,飞板碰靶波形将取决于上述两种波形变化趋势影响的强弱及飞片初始飞行状态的特点。即当强冲击波到达飞片下表面时,反射稀疏波由于强拉伸使用,使飞片下底面有一薄层脱离主体向前飞行,其速度约  $1.5\text{mm}/\mu\text{s} \sim 2.0\text{mm}/\mu\text{s}$ 。随着爆轰产物作用不断地加强,以及薄层速度迅速衰减,飞片主体很快追及脱离主体的薄层,所以当飞行距离增大时,飞片又变成整运动。计算模型只能给出飞片整体运动规律,而不能算出脱离主体的飞层运动。所以在凹光探板实验中,对应飞片边侧低飞行空腔处,实验波形出现局部超前。而对于平光探板实验,飞片各部位都处于高空腔飞行,所以没有此现象。另外,爆轰波的斜入射和侧面稀疏波的影响将导致边部波形滞后量增大。由以上分析,图 4、5、6 中各飞板碰靶波形沿径向不单调滞后的原因也就清楚了。

4. 从表 2 知,对本文所考虑的几种飞板,碰靶时间的计算值都较实验值短,这可能有两方面的原因:

第一,在 THEPL 编码中,对炸药爆轰的处理是由简单的燃烧(开关)函数确定,产物状态方程用完全气体  $\gamma$  律描述,这导致在爆轰产物膨胀后期压力过高,若改用 JWL 方程,估计会有改善。

第二,在物体作高超音速飞行中,空气阻力是一个不可忽略的减阻因素,飞行时间愈长,影响愈大。从图 7、图 8 可知,飞板的速度在开始运动后约  $2\mu\text{s}$  内就都至少达到 7 倍以上音速。虽然本文所涉及的计算时间不长,但因计算时,飞板前边界取自由表面,而完全未计及空气阻力的影响,所以,对碰靶时间的提前大小总会有影响的。

一般高能炸药爆轰加载对金属的压缩效应较小,所以,要改善计算精度,使用更好的炸药爆轰产物状态方程,比改进金属本构关系更为重要。

若不仅仅考虑驱动效应问题,而是研究飞板在爆轰波作用下的变形过程,那么,飞板

的压缩、屈服、硬化、断裂及至热软化效应等都将需要仔细加以研究,这时,高应变率下材料的本构关系,断裂性能等将成为重要问题。

#### 参 考 文 献

- [1] Gurney R W. The Initial Velocities of Fragments from Bombs, Shells and Grenades, BRL Report, 1943, 405
- [2] Hoskin N E, Allam J W S, et al. The Motion of Plates and Cylinders Driven by Detonation Wave at Tangential Incident, 4th symp. on Detonation, A5-A15, 1965
- [3] Bol J, Honcia G. Velocity of H E Accelerated Plates for Low Values of  $\alpha$ , 3rd symp. on Ballistic 1977, F3. 1~9
- [4] Fucke W, Bol J Land Schumann St. Velocity of Sandwich Plates Driven by Thin H E Layers, 10th Symp. on Ballistic, 1987, 1~8
- [5] Yadav H S, Flyer Plate Motion by Thin Sheet of Explosive, Propellants, Explosives, Pyrotechnics 13, 1988, 17~20
- [6] Ehrlich M, et al. The Motion of Explosive Driven Plates, Proceedings of the 11th International Symposium Ballistic 1989, (2), 447

## EXPERIMENTAL MEASUREMENTS AND 2D NUMERICAL SIMULATIONS OF THE MOTION OF FLYERS DRIVEN BY SLAB CHARGE INITIATED AT CENTRED POINT

Zhuang Shiming Liu Wenhan Sun Chengwei

(Southwest Institute of Fluid Physics, Chengdu 610003)

**ABSTRACT** The results of experimental measurements and 2D numerical simulations of the motion of flyers driven by slab charge initiated at centred point are reported in this paper. The time and the front surface shape of flyers impacting on targets were measured experimentally and simulated by 2D numerical code for four different flyers of PMMA, Aluminum, steel and Brass. The numerical simulation results agree well with the experimental data. Some techniques on numerical simulation are also mentioned in the paper.

**KEY WORDS** slab charge, detonation driving, 2D numerical simulations