

# 破片群初速的电探针测量法

谢盘海 曾凡群 马冰

(中国工程物理研究院流体物理研究所 成都 610003)

**摘要** 提出了一种速度衰减系数  $\alpha$  可预先确定的测量全预制和半预制破片群初速  $v_0$  的电探针方法。在效应靶背面竖直方向上依次布置  $n$  根条状铜箔电探针, 测量  $n$  个破片飞行  $x$  距离经历的时间  $t$ , 根据破片速度衰减公式确定  $n$  个破片的  $v_0$ , 测量误差不超过3%。应用最小二乘法原理, 将实验测定的全预制破片群初速拟合成分沿战斗部轴向分布, 实验拟合线与用文献[1]报导的计算方法确定的结果基本一致。

**关键词** 战斗部破片 初速分布 电探针

## 1 引言

战斗部正常破片的初速分布是武器总体计算引战配合和杀伤概率时必需的参数。需要指出的是, 所谓正常破片是指根据武器作战性能及作战目标提出的, 要求在离战斗部一定距离上能穿透规定厚度  $A_3Fe$  靶的破片, 其余的破片统称非正常破片<sup>[2]</sup>。由于很难确定战斗部爆炸形成的几百至上万个破片的飞行方向和飞行过程中的坐标位置, 无法跟踪测量如此众多破片的初速, 更难识别正常和非正常破片。因此, 战斗部正常破片的初速及其初速分布的测量技术至今国内没有很好地解决。

在武器试验靶场, 通常采用多路靶网测量战斗部破片的平均初速。如图1所示, 在战斗部周围布置3~5路靶网, 每路至少设三块靶网, 它们依次为第一靶、第二靶、第三靶。第一靶离爆炸点3~6m, 以靶网不为爆轰产物起动为宜, 具体距离视战斗部的口径而定<sup>[3]</sup>。设爆炸点至第一、二、三...靶的距离分别为  $x_1, x_2, x_3, \dots$ , 以  $x_i$  表示。测得破片经过上述距离的平均速度分别为  $v_1, v_2, v_3, \dots$ , 以  $v_i$  表示。根据破片速度衰减公式:

$$v_x = v_0 e^{-\alpha x} \quad (1)$$

其中:  $\alpha$  为破片速度衰减系数;  $v_x$  为破片飞行  $x$  距离时的瞬时速度;  $v_0$  为破片初速。应用最小二乘法原理, 可求出破片初速<sup>[3]</sup>:

$$\ln v_0 = \frac{\sum x_i^2 \sum \ln v_i - \sum x_i \sum x_i \ln v_i}{n_1 \sum x_i^2 - (\sum x_i)^2} \quad (2)$$

其中  $i=1, 2, 3, \dots, n_1$ , 取由3~5路靶网分别测量的3~5块破片的初速平均值, 作为战斗部破片的平均初速。

经长期使用靶网测量破片初速的实践表明, 这种测速方法存在如下缺点:

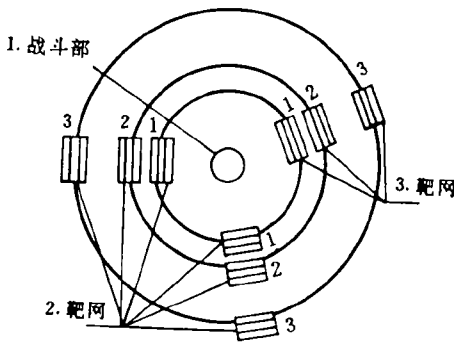


图1 靶网测速试验场地布置图

Fig. 1 Schematic diagram of the layout of target nets for measuring fragment velocities in blast test field

1. Warhead; 2, 3. Target nets

综上所述,这种多路靶网测速法既不能圆满地达到人们预想的结果(测量战斗部破片的平均初速),也不能满足武器总体的要求。

为此,人们逐渐改进了靶网设计,将图1中的每块靶网分割成 $m$ 块能够独立构成充放电回路的小区(称通靶)<sup>[2]</sup>,每路靶网可同时测量一定立体角范围内的 $m$ 个破片初速,企图以破片群的初速代表战斗部破片的初速。可是,这种靶网同样存在由非正常破片导通和不同破片分别通过第一、二、三靶的可能性,破片初速的测量精度和可靠性并没有得到提高。

鉴于上述原因,我们提出了适合于全预制和半预制破片初速测量的电探针方法。有效地克服了靶网测速法的缺点,成功地测量了全预制破片群的初速。并应用最小二乘法,将破片群的初速拟合沿战斗部轴向的分布,从而满足了武器总体计算引战配合和杀伤概率的要求。

## 2 破片群初速及其沿战斗部轴向分布的测量原理和方法

### 2.1 破片飞行时间的测量

测量破片飞行时间 $t$ 的探针结构及其试验场地的布局见图2、3。在钢质效应靶背面垂直方向上依次布置 $n$ 根条状铜箔电探针,每根探针在效应靶上的 $H$ 坐标位置是确定的。探针宽度和相邻针间距,可以根据破片尺寸和破片分布密度确定。效应靶既能有效地防止爆轰产物和非正常破片(或来自地面的弹射破片)接通电探针,确保测量结果的可靠性和准确度,又能作为探针充放电的一极(地线)。雷管引爆战斗部的同时触发多路时间间隔测量仪,破片穿透效应靶时接通电探针,由多路时间间隔测量仪记录时间 $t_i$ 。

须要指出的是,如上测量的时间 $t_i$ 包含四部分:

$$t_i = t_1 + t_2 + t_3 + t_4 \quad (3)$$

式中: $t_1$ 为雷管起爆至主装药中的爆轰波阵面到达战斗部壳体内侧某部位的时间,通常由计算确定,也可实测; $t_2$ 为爆轰波作用于战斗部壳体至破片被加速到最大速度 $v_0$ 的时间,它决定于壳体膨胀速度和战斗部的初始半径 $r_0$ 等因素,对中、小型杀爆战斗部,由闪光X

(a)以3~5块破片初速的平均值代表战斗部破片的平均初速,其代表性不够。

(b)由于每路靶网测量的是一定立体角范围内速度较快的破片初速,因此,即使再增加靶网路数,测量的破片初速的平均值仍然高于战斗部破片的平均初速。

(c)战斗部爆炸产生的某些非正常破片,有可能先于正常破片通过靶网,导致破片初速的测量精度和可靠性下降。

(d)由于破片的重量和初速有散布,第一、二、三靶有可能分别被不同破片导通,因此破片初速测量结果的可靠性较低,有时达到不可信赖的程度。

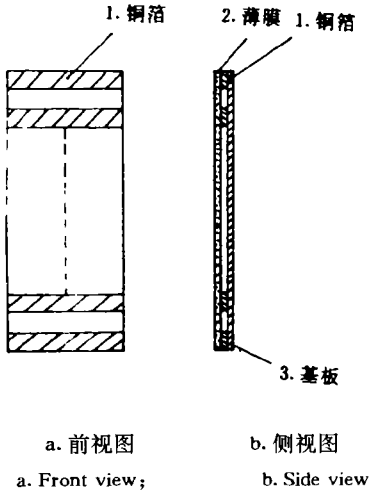


图 2 探针结构

Fig. 2 Construction of copper foil probes  
1. Copper foil; 2. Film; 3. Base plate

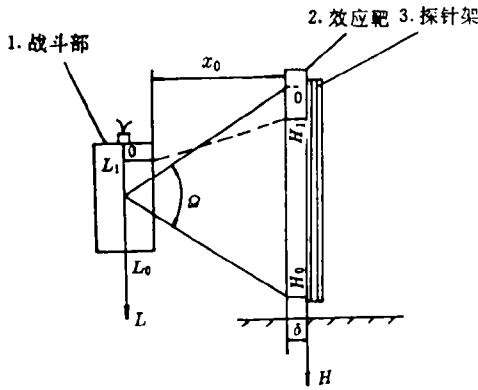


图 3 爆炸试验场探针测速布置图

$L$  为战斗部轴向坐标;  $H$  为靶板  
垂直方向坐标;  $\Omega$  为破片发散角

Fig. 3 Schematic diagram of the layout of  
copper foil probes for measuring fragment  
velocities in blast test fields

$L$ —Axial coordinate of the warhead;

$H$ —Vertical coordinate of the target;

$\Omega$ —Static dispersion angle of the fragment

1. Warhead; 2. Target; 3. Support of the probes

射线测量表明,  $t_2$  通常为几十微秒, 相对于  $t_3$  是小量;  $t_3$  为破片初速  $v_0$  开始飞行至碰靶的时间, 它主要决定于破片初速、破片速度衰减系数  $\alpha$  和破片飞行距离  $x$ , 在飞行距离为米级时,  $t_3$  通常为毫秒量级;  $t_4$  为破片穿透靶板经历的时间, 它决定于破片形状、碰靶速度和靶板厚度, 以及破片与靶板的材料等; 使用薄靶板时, 一般为数微秒, 相对于  $t_3$  也是小量。

### 2.2 破片初速的确定

众所周知, 仅仅已知  $\alpha$ 、 $x$  和  $t$ , 根据破片速度衰减公式(1)是无法确定破片初速  $v_0$  的, 为此, 我们对(1)式作了适当的数学处理, 将它变换成破片初速与  $\alpha$ 、 $x$  和  $t$  的显函数形式。

显然, 公式(1)中破片飞行  $x$  距离时的瞬时速度  $v_r$  为

$$v_r = dx/dt \quad (4)$$

将(4)代入(1), 得

$$dx/dt = v_0 e^{-\alpha x} \quad (5)$$

令  $\alpha = \text{Constant}$ , 积分(5)式, 得

$$v_0 = \frac{1}{\alpha t} (e^{\alpha x} - 1) \quad (6)$$

其中,  $t$  是破片以初速  $v_0$  飞行  $x$  距离经历的时间。对于全预制和半预制破片,  $\alpha$  是可以预先确定的常数<sup>[3]</sup>。由实验测量的距离  $x$  和时间  $t$  代入(6)式, 即可确定破片初速  $v_0$ 。

必须指出, 如果不结合其它方法测量, (6)式中的时间  $t$  和距离  $x$  是很难准确确定的, 通常只能取近似值。由(3)式可知, (6)式中的时间  $t$  为

$$t = t_4 - t_1 - t_2 - t_3 \quad (7)$$

如果忽略  $t_2$  和  $t_3$ , 则

$$t = t_4 - t_1 \quad (8)$$

其中  $t_1$  由计算确定。设破片垂直命中靶板, 则(6)式中的距离  $x$  为

$$x = x_0 + \delta - (r - r_0) \quad (9)$$

其中:  $x_0$  是战斗部静态时壳体至效应靶的水平距离;  $r_0$  是战斗部初始半径;  $r$  是破片速度为  $v_0$  时的战斗部半径;  $\delta$  是效应靶厚度。如果

忽略 $(r-r_0)$ ,则

$$x = x_0 + \delta \quad (10)$$

将(8)、(10)代入(6)式,得

$$r_0 = \frac{1}{\alpha(t_t - t_1)} [e^{\alpha(t_0 + \delta)} - 1] \quad (11)$$

由于 $\alpha$ 、 $x_0$ 和 $\delta$ 是已知量,只要将 $n$ 根电探针测量的时间 $t_i$ 和计算确定的时间 $t_1$ 分别代入(11)式,即可得 $n$ 个破片的初速 $v_0$ 。

### 2.3 沿战斗部轴向破片初速分布的确定

为了给武器总体提供战斗部破片的初速分布,通常以破片群的初速代表战斗部破片的初速分布。严格分析,这种代表性与真实情况也存在一定的差距,当然,破片群包含的破片数越多,其代表性越好,但相应的试验工作量和试验费用等将加大。如果能将测量有限的 $n$ 个破片的初速处理成沿战斗部轴向的分布,并假定战斗部径向破片的速度是均匀的,就能确定战斗部破片的初速分布,充分满足武器总体的要求。

设战斗部长 $L_0$ ,破片发散角 $\Omega$ ,在 $\Omega$ 立体角内靶孔的分布范围为 $H_0$ (见图3)。假定从统计规律观察,战斗部轴向由起爆端至尾端的破片基本是依次命中靶板的,即战斗部轴向 $L_1, L_2, \dots$ (以 $L_i$ 表示)部位的破片依次分别命中靶板 $H_1, H_2, \dots$ (以 $H_i$ 表示)部位,而且有

$$L_0/H_0 = L_i/H_i, \quad 0 \leq L_i \leq L_0, 0 \leq H_i \leq H_0 \quad (12)$$

由(12)式可知,只要根据某根探针在靶板上的 $H$ 坐标位置 $H_i$ ,就能确定命中该探针的破片沿战斗部轴向的坐标位置 $L_i$ 。依次类推,根据已知 $n$ 根电探针在效应靶上的坐标位置,即能确定 $n$ 个破片沿战斗部轴向 $L$ 坐标的位置。于是,我们可得到与 $n$ 个破片相对应的 $n$ 组 $(v_0, L)$ 参数,应用最小二乘法,将 $n$ 组参数进行拟合,可确定沿战斗部轴向的破片初速分布曲线。显然, $n$ 值越大,拟合曲线的精度越高。

## 3 实验测量结果和测量误差

### 3.1 测量结果

实验测量了离爆炸点10 m处的两块效应靶上的32个全预制破片的初速 $v_0$ ,并根据探针在靶板垂直方向上的 $H$ 坐标位置,确定了沿战斗部轴向破片的初速分布,详见图4。图中横坐标 $(L/L_0)$ 是战斗部轴向初始相对破片位置,曲线1、2分别是实验拟合线和文献[1]给出的,单端起爆条件下的计算结果。

### 3.2 破片初速的测量误差

由于靶网测量破片初速的可靠性始终受到人们的怀疑,故对破片初速测量的误差分析也就失去了实际意义。而本文的电探针测速法已经克服了靶网测速法的缺点,因此,有必要、也有可能对破片初速的测量误差问题进行分析。

由(6)式可知,破片初速 $v_0$ 的测量误差与 $\alpha$ 、 $x$ 和 $t$ 的测量误差有关。我们仅仅讨论距离 $x$ 和时间 $t$ 的系统测量误差对破片初速测量的影响,不考虑破片速度衰减系数 $\alpha$ 的不准确度对破片初速的影响。将(6)式两边取微分,得

$$dr_0 = \frac{dx}{t} e^{\alpha x} - \frac{dt}{\alpha t^2} (e^{\alpha x} - 1) \quad (13)$$

其中,(13)式右边二项分别表示破片飞行距离  $x$  和时间  $t$  的微小变化引起初速  $v_0$  的变化量,它们分别是:

$$\Delta v_0(x) = \frac{\Delta x}{t} e^{\alpha x} \quad (14)$$

$$\Delta v_0(t) = \frac{\Delta t}{\alpha t^2} (e^{\alpha x} - 1) \quad (15)$$

将(14)与(15)式相加,得:

$$\Delta v_0(x, t) = \Delta v_0(x) + \Delta v_0(t) \quad (16)$$

将(7)式与(8)式和(9)式与(10)式进行比较发现,(11)式中的破片飞行距离和时间的偏差分别为:

$$\Delta x = - (r - r_0) \quad (17)$$

$$\Delta t = - (t_2 + t_1) \quad (18)$$

对小、中型杀爆战斗部,由闪光 X 射线测量表明,  $(r - r_0)$  为几厘米到几十厘米,  $(t_2 + t_1)$  为几十微秒左右。在实际测量中,距离  $x$  和时间  $t$  分别为数米和数毫秒,将如上估计的  $x, t$  和  $\Delta x, \Delta t$  分别代入(14)和(15)式,可确定  $\Delta v_0(x)/v_0$  和  $\Delta v_0(t)/v_0$  的极差为 10% 左右,而  $\Delta v_0(x, t)/v_0$  可望不超过 3%。如果必须再缩小误差,要辅以其它数值计算和实验测试技术,此处从略。

需要强调指出的是,这里没有讨论距离  $x$  的人为测量误差,也没有考虑破片非垂直

命中靶板引起飞行距离的变化。由于记录仪器的时间分辨率较高(10 ns),可以忽略信号记录系统本身的时间测量误差。至于图 4 中 32 个实验点的分散程度与其它许多因素有关,并非完全取决于破片初速的测量精度,本文不作详细讨论。

### 4 结果讨论

1 利用风洞试验得到的球形、正方形、矩形及菱形等弹丸在空气中的阻力系数,可以比较准确地确定这些形状的破片速度衰减系数  $\alpha^{[3]}$ 。因此,我们提出的测量技术适用于  $\alpha$  可预先确定的全预制和半预制破片初速的测量。

由于半预制破片战斗部爆炸产生的连片或碎裂破片也有可能命中效应靶上的探针,故将按破片设计尺寸计算的速度衰减系数  $\alpha$  代入(6)式确定初速  $v_0$  时,必然产生一定的误差。因此,在实际测量中,可以根据探针位置上的靶孔尺寸和破片侵彻扩孔系数,估计相应的碰靶破片尺寸,对  $\alpha$  进行修正,具体修正方法不再赘述。由此可知,本文叙述的破片初速测量法,以测量全预制破片的初速最佳,半预制破片次之。

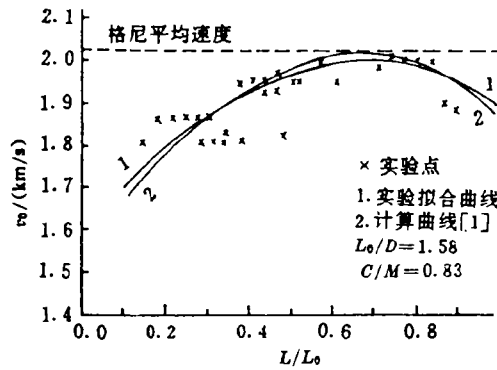


图 4 沿战斗部轴向破片的初速分布

$L_0/D$  是战斗部初始长度与直径之比;

$C/M$  是装药与金属壳的质量比;

$L/L_0$  是沿战斗部轴向初始相对破片位置

Fig. 4 Initial velocity distribution of fragments along the warhead axis

× — Experimental points;

--- Gurney average velocity;

$C/M$  — Ratio of the mass of the charge to that of the metal

$L_0/D$  — The ratio of the length of the warhead to its diameter;

$L/L_0$  — Initial relative fragment position along the warhead axis

1. Experimented fit curve;

2. Calculated curve<sup>[1]</sup>

2 由于某些原因,战斗部轴向相邻位置上的部份破片有可能交错命中靶板,我们只能从统计规律观察,才能假定战斗部轴向从起爆端至尾端的破片是依次分别命中靶板的。因此,图 4 中的实验拟合线只能反映沿战斗部轴向破片初速的统计分布规律,拟合线的精度除了与实验点数目  $n$  的大小有关外,还与破片发散角  $\omega$  的测量精度等因素有关。

3 图 4 中实验拟合线的极值点( $L/L_0 \approx 0.63$ )与计算曲线( $L/L_0 = 0.75$ )并不一致,但与文献[4]按气体泄漏模型用 HEMP 程度对全预制破片计算的结果基本一致,其确切原因有待进一步探讨。

4 采用闪光 X 射线测量破片群的初速及其沿战斗部轴向的分布是一种比较准确的方法<sup>[3]</sup>,但对大、中型战斗部存在底片防护方面的困难,一般不宜采用。利用高速分幅摄影法<sup>[5]</sup>,对全预制和半预制破片也由(6)式确定破片群的初速。但适合毫秒级时间测量的相机幅频,通常只有每秒上万幅左右,其时间分辨率仅为 100  $\mu\text{s}$  左右,于是对破片初速的测量精度远低于本文的电探针测量技术。因此,相对于上述两种方法而言,电探针测速法具有适应性强(不限战斗部口径),破片初速测量精度高,使用方便,节省试验费用等特点。

本工作得到了张寿齐研究员的指导,李发伯、王广军、李 强、严维俭、周光前等同志参加了实验测试工作,在此一并表示感谢。

### 参 考 文 献

- 1 张寿齐. 圆柱形有壳装药侧向飞散速度分布的预估. 爆炸与冲击, 1988, 8(3): 215
- 2 周申生. 从总体角度谈防空导弹战斗部的几个问题. 见: 中国兵工学会火箭导弹战斗部技术研讨会论文集, 重庆, 1989; 上册 2~3
- 3 北京工业学院 8 系编. 爆炸及其作用(下册), 北京: 国防工业出版社, 1979: 44
- 4 Karpp R R, Predben W W. Calculation of Fragment Velocities from Fragmentation. Munition, Ballistic Research Laboratories, In: Proc of the 1st International Symposium on Ballistics, 1974: 145~176
- 5 U S Army Test and Evaluation Command Test Operations Procedure. Aberdeen Proving Ground Maryland. ADA081510, 31 January 1980

## ELECTRIC PROBE MEASUREMENT TECHNIQUE OF THE INITIAL VELOCITIES FOR FRAGMENTS

Xie Panhai, Zeng Fanqun, Ma Bing

(Institute of Fluid physics, CAEP, P. O. Box 523, Chengdu, China, 610003)

**ABSTRACT** An electric probe measurement technique of the initial velocities for both pre-formed and fireformed fragment groups with velocity attenuation coefficient ( $a$ ) determined previously is presented.  $N$  pieces of copper foil probe are kept in sequence, close to rears of the targets to measure the flight times ( $t$ ) of  $n$  fragments in  $x$ -distance. According to the velocity attenuation formula of fragments derived in this paper,  $v_0 = (e^{at} - 1)at$ , the initial velocities of  $n$  fragments are determined.

Analysis indicates that the measurement error of the fragment initial velocities is less than 3% and the initial velocities of the fragment groups are fitted into a distribution curve along the warhead axis by the least square method. The experimental fit curve is basically in agreement with the results estimated by the method given in reference [1].

**KEY WORDS** warhead fragment, initial velocity distribution, electric probe