

## 基于主动光幕阵列静爆试验破片速度测量方法

杨久琪<sup>1</sup>,董涛<sup>1</sup>,陈丁<sup>1</sup>,倪晋平<sup>1</sup>,开百胜<sup>2</sup>

- (1. 西安工业大学 光电工程学院,陕西 西安 710021;  
2. 中国兵器工业集团有限公司 黑龙江北方工具有限公司,黑龙江 牡丹江 157000)

**摘要:**为了准确、可靠地测量到静爆试验中任意水平方向上的破片飞行速度,提出了一种基于主动光幕阵列的静爆破片飞行速度测量方法。首先,以被测弹药静爆点为中心的平面上环形布放 12 组主动式六光幕阵列,当破片穿过其中任意一组光幕阵列的探测幕面时可测量到其飞行参数(如速度、入射角及立靶密集度等);其次,根据所提出的光幕阵列布局配置,建立了其破片飞行参数测量模型,分析了破片速度分量误差在一定范围随各速度分量变化规律。通过理论分析及实弹实验可知:在规定的测试条件下破片速度分量误差不超过 2.7 m/s,可以满足任意水平方向上的破片速度测量需要。

**关键词:**光电测试系统; 毁伤评估; 静爆试验; 破片速度测量; 主动光幕阵列

**中图分类号:** TJ012.3 **文献标志码:** A **DOI:** 10.3788/IRLA202049.0113003

## Measurement method for fragment velocity based on active screen array in static detonation test

Yang Jiuqi<sup>1</sup>, Dong Tao<sup>1</sup>, Chen Ding<sup>1</sup>, Ni Jinping<sup>1</sup>, Kai Baisheng<sup>2</sup>

- (1. School of Optoelectronic Engineering, Xi'an Technological University, Xi'an 710021, China;  
2. Heilongjiang North Tool Co., Ltd., China North Industries Group Corporation Limited, Mudanjiang 157000, China)

**Abstract:** In order to accurately and reliably measure the flying speed of the fragment in any horizontal direction in the static detonation test, a method for measuring the flying speed of the static detonation fragment based on active screen array was proposed. Firstly, twelve groups of active six-screen arrays were arranged around the static explosion point of measured ammunition. The flight parameters (such as velocity, incident angle and vertical target density) of these fragments can be obtained when they pass through the detection area in every six-screen arrays. Secondly, according to the configuration of the proposed screen array, its model was established to obtain the related flight parameters, and then the change rule of error with each velocity component was analyzed in a certain range. Through theoretical analysis and live ammunition experiment, results show that the component errors of fragment velocity is less than 2.7 m/s, and thus the proposed method can meet the measurement requirement of fragment velocity in any horizontal direction.

**Key words:** photoelectric measurement system; damage assessment; static detonation test; measurement of fragment velocity; active screen array

收稿日期:2019-10-05; 修订日期:2019-11-15

基金项目:国家自然科学基金(61471289);陕西省科技厅重点实验室基金(2015SZSJ-60-2)

作者简介:杨久琪(1994-),男,硕士生,主要从事靶场光电测试技术方面的研究。Email:1186270864@qq.com

导师简介:董涛(1980-),男,副教授,博士,主要从事兵器外弹道参数光电测试方面的研究。Email:dongtao80@126.com

陈丁(1982-),男,高级工程师,博士,主要从事光幕阵列动态测试技术方面的研究。Email:xatu@vip.qq.com

## 0 引言

以破片为攻击手段对地面人员、车辆及其他军用设施进行毁伤的智能引信弹药在现代战争中应用广泛,在其研制和生产中,需要对其毁伤效能进行有效评估<sup>[1]</sup>。其中静爆破片飞行速度是评价毁伤效能的一项至关重要的参数,因此高效准确地完成测量对相关武器研制工作具有重要意义。传统弹丸与破片测速方法多基于区截测速原理,由于光电探测设备具有响应快、灵敏度高等优点,目前区截装置多采用基于有源/无源光电探测原理的天幕靶、光幕靶、激光靶等装置<sup>[2-8]</sup>,上述装置被统称为“光幕阵列测试系统”(简称“光幕阵列”)<sup>[2]</sup>。不同于传统身管枪炮弹丸速度测试,被测弹药静爆时,产生的破片飞行方向是随机的,若仍采用两台区截装置进行测速,由于不能保证破片飞行方向与区截装置探测靶面垂直,所以测得的破片速度常存在较大误差。

为了解决上述问题,不少研究者提出了一些方法:如西安工业大学的相关课题组提出采用在破片飞行弹道上布放六光幕光幕靶的方案实现破片速度测量<sup>[9]</sup>;长春理工大学的课题组提出采用激光发射、接收阵列激光靶进行破片速度测量<sup>[10]</sup>,但以上方案均需在试爆目标周围架设光幕靶或激光靶,由于光幕靶和激光靶的光源、探测器件、靶框等部分均暴露在破片杀伤范围内,所以容易被破片击中,导致设备损坏。此外,一些研究者提出采用高速摄影法对破片速度进行测量<sup>[11]</sup>,高速摄影法在弹丸飞行姿态测量、弹道跟踪等方面应用较多,但在对破片这类体积小、速度快且入射方向多的目标进行测量时,存在目标识别困难、分辨能力有限等问题,且容易受爆炸火光等因素干扰;还有研究者提出采用弹道雷达对破片速度进行测量<sup>[12]</sup>,弹道雷达多应用在火炮、火箭炮远距离弹道参数测量。由弹道学可知,通常弹头飞出后,弹道呈升弧较长较直,降弧较短较弯曲的弹道曲线。瞄准目标射击时,在有效射程内弹道的高度与瞄准直线越重合,弹道越低伸。弹道是否低伸,主要和弹头的初速有关。初速越快,弹道就越低伸。此外,也和弹头的质量,空气的密度等其他因素有关。由于测试破片可达 2 000 m/s 左右,速度较高,当攻击地面目标时,其弹道低伸平直。使用弹道雷达对此类目标

进行测试时,地杂波将对雷达造成严重干扰,使其存在低仰角探测盲区。目前,还没有针对静爆破片速度测量准确、高效且不会在测量中造成设备损伤的测量方法。

在光幕阵列测试设备中利用系统自身对外辐射的光源产生探测光幕,通过接收装置接收目标穿过探测光幕时的反射光能量完成目标探测的系统称为主动(或有源)光幕阵列测试系统,其具有抗干扰能力强、灵敏度较高等优点<sup>[12-14]</sup>。文中提出一种采用主动光幕阵列测量方法,不但可以获得任意水平方向入射的破片速度,而且相比于现有测量方案,不需要将设备暴露于破片杀伤范围内,因此不会对测量设备造成损伤,且测试精度较高。文中介绍了系统测量原理与光幕布置方案,建立了破片速度测量数学模型,并对测量误差进行了仿真分析。

## 1 主动光幕探测原理

主动光幕探测原理如图 1 所示,由激光光源产生厚度很薄的一字线扇形探测光幕,当破片等高速飞行物体穿越该光幕时,被激光照射产生的部分散射光线被安装有光学镜头、滤光片、狭缝光阑和光电探测器件的接收装置接收,产生对应弹丸飞越各个光幕时刻的光电信号,进一步通过各个信号的时间间隔和光幕结构参数便可计算得到弹丸的飞行速度,从而实现对目标探测与其飞行速度测量。

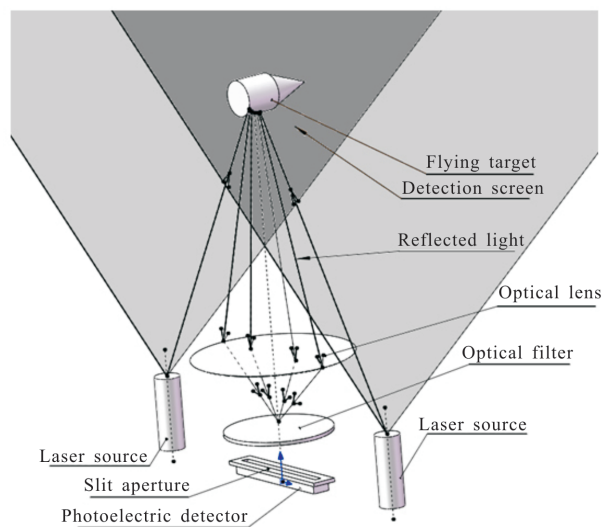


图 1 主动光幕探测原理示意图

Fig.1 Schematic diagram of the detection principle of active screen

由参考文献[13-14]可得,目标反射信号处理后的电压值  $U$  可表示为:

$$U = \frac{K \cdot d \cdot D^2 \cdot P}{L \cdot \tan\left(\frac{\theta}{2}\right)} \quad (1)$$

式中:  $K$  为比例系数;  $d$  为目标口径;  $D$  为系统光学镜头口径;  $P$  为激光光源总功率;  $L$  为目标与系统光学镜头的距离;  $\theta$  为激光光源发散角。

由公式 (1) 可知系统最大探测距离与目标口径  $d$ 、系统光学镜头口径  $D$ 、激光光源总功率  $P$  成正比,与目标与系统光学镜头的距离  $L$ 、激光光源发散角  $\theta$  成反比。针对不同目标,可通过调节激光光源总功率及发散角等调整系统探测性能。

在静爆试验时,可将主动光幕探测系统置于预先布置好的沟道内,或采取其他措施,防止静爆破片对设备造成损伤。

## 2 系统测量原理

### 2.1 主动光幕阵列布置方案

基于两平行光幕的区截测速系统仅能测量沿区截平面法向量的一维速度,若要测量三维速度矢量,需要组建六光幕阵列。考虑只要获得目标速度矢量在 3 个线性无关的方向的投影大小即可求得目标速度矢量,因此可采用由 3 组两平行光幕区截系统组成的六光幕阵列,实现其有效测量范围内的破片三维速度矢量测量。

静爆试验通常将被测目标采用支撑杆架起,起爆时破片会向四周飞散。因此采用 12 组六光幕子阵列环绕起爆目标组成测量总阵列,总阵列布置俯视图如图 2 所示。每组六光幕子阵列幕面关系如图 3

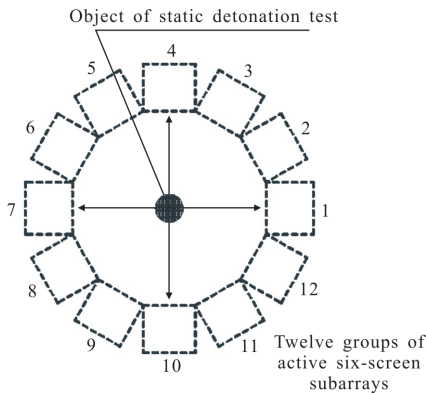


图 2 总阵列布局俯视图

Fig.2 Overhead view of total array layout

所示。虽然相邻子阵列有效测量靶面不能做到无缝拼接,但考虑到静爆试验产生的破片数量较多,且多组设备围绕静爆点布置,形成的测量幕面相对缝隙部分较大,故从两相邻子阵列间缝隙处穿过相对于穿过有效测量靶面是小概率事件,可以保证对破片较高的捕获率。即使漏测部分破片,不影响总体评估结果。每组子阵列触发后将数据传输到基地总站进行分析处理。

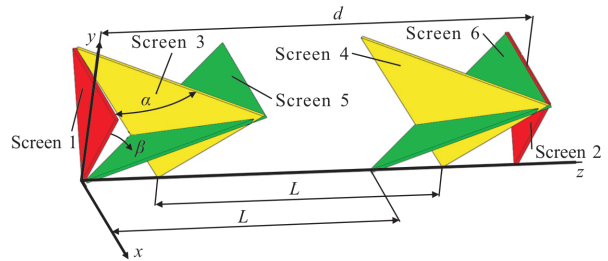


图 3 六光幕子阵列幕面几何关系

Fig.3 Geometrical relationship of six-screen subarray

对每组六光幕阵列单独建立子坐标系,得到其速度矢量  $\vec{v}$  在子阵列坐标系中的测量公式,最后进行坐标变换,获得以试爆目标位置为原点建立的坐标系,即总阵列坐标系中破片速度矢量  $\vec{v}$ 。

### 2.2 六光幕子阵列破片速度矢量公式

选择任意六光幕子阵列,以光幕 1 中心为坐标原点  $O$ ,  $y$  轴正方向竖直向上,  $z$  轴正方向远离试爆中心,建立如图 3 所示的左手坐标系。光幕 1 与 2、光幕 3 与 4、光幕 5 与 6 两两平行;光幕 1 与光幕 2 垂直地面布置,间距为  $d$ ;光幕 3 与光幕 1 夹角  $\alpha$ ,光幕 5 与光幕 1 夹角为  $\beta$ ;光幕 3 与 4、光幕 5 与 6 在  $z$  轴方向间距为  $l$ ,显然其光幕垂直距离分别为  $l \cos \alpha$ 、 $l \cos \beta$ 。因此光幕 1 与 2、光幕 3 与 4、光幕 5 与 6 可分别测量破片速度矢量  $\vec{v}$  在其平面法向量的投影大小。

取光幕 1 与 2、光幕 3 与 4、光幕 5 与 6 平面的单位法向量分别如下:

$$\vec{n}_1 = (0, 0, 1) \quad (2)$$

$$\vec{n}_2 = (0, -\sin \alpha, \cos \alpha) \quad (3)$$

$$\vec{n}_3 = (-\sin \beta, 0, \cos \beta) \quad (4)$$

则破片速度矢量  $\vec{v}$  可表示为:

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) = v_x \vec{e}_1 + v_y \vec{e}_2 + v_z \vec{e}_3 \quad (5)$$

式中： $v_x, v_y, v_z$  分别为破片速度矢量  $\vec{v}$  在空间直角坐标系中的坐标； $\vec{e}_1, \vec{e}_2, \vec{e}_3$  分别为  $x, y, z$  轴正方向的单位向量。

以起爆时刻为  $t=0$  时刻，破片到达光幕 1, 2, ..., 6 的时刻分别为  $t_1, t_2, \dots, t_6$ ，因此有：

$$\vec{v} \cdot \vec{n}_1 = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (6)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n}_2 = \frac{l \cos \alpha}{t_4 - t_3} \quad (7)$$

$$\vec{v} \cdot \vec{n}_3 = \frac{l \cos \beta}{t_6 - t_5} \quad (8)$$

将  $\vec{n}_1, \vec{n}_2, \vec{n}_3$  分别代入公式(6)~(8)，则有：

$$v_z = \frac{d}{t_2 - t_1} \quad (9)$$

$$-v_y \sin \alpha + v_z \cos \alpha = \frac{l \cos \alpha}{t_4 - t_3} \quad (10)$$

$$-v_x \sin \beta + v_z \cos \beta = \frac{l \cos \beta}{t_6 - t_5} \quad (11)$$

因此有：

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) \\ \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_4 - t_3} \right) \\ \frac{d}{t_2 - t_1} \end{bmatrix} \quad (12)$$

则破片速度矢量  $\vec{v}$  为：

$$\vec{v} = v_x \vec{e}_1 + v_y \vec{e}_2 + v_z \vec{e}_3 = \left[ \frac{1}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) \right] \vec{e}_1 + \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_4 - t_3} \right) \right] \vec{e}_2 + \left( \frac{d}{t_2 - t_1} \right) \vec{e}_3 \quad (13)$$

### 2.3 总阵列破片速度矢量公式

任意一六光幕子阵列坐标系  $O_s-xyz$  与总阵列坐标系  $O_T-XYZ$  关系如图 4 所示，总阵列坐标系以试爆目标所在位置为原点，试爆目标架设距地面高度

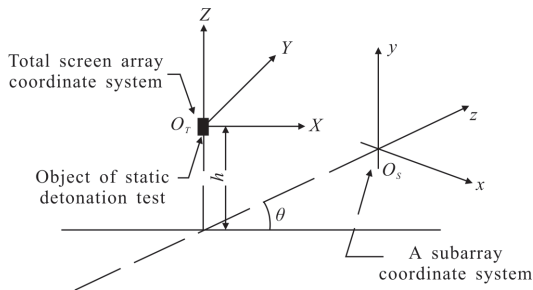


图 4 总阵列布局示意图

Fig.4 Diagram of total array layout

为  $h$ ，子阵列坐标原点  $O_s$  与总阵列坐标原点  $O_T$  水平距离为  $r$ ，子阵列坐标系  $z$  轴与总阵列坐标系  $X$  轴夹角为  $\theta$ ，以图 2 中编号表示各六光幕子阵列，则对第  $i$  号子阵列  $\theta^{(i)} = (i-1) \times 30^\circ$ ，其中  $i=1, 2, 3, \dots, 12$ 。

由 2.2 节知第  $i$  号子阵列坐标系下破片速度矢量  $\vec{v}_i$  为：

$$\vec{v}_i = v_x^{(i)} \vec{e}_1^{(i)} + v_y^{(i)} \vec{e}_2^{(i)} + v_z^{(i)} \vec{e}_3^{(i)} = \left[ \frac{1}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) \right] \vec{e}_1^{(i)} + \left[ \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_4 - t_3} \right) \right] \vec{e}_2^{(i)} + \left( \frac{d}{t_2 - t_1} \right) \vec{e}_3^{(i)} \quad (14)$$

取沿总阵列坐标系坐标轴方向的一组单位向量： $\vec{E}_1=(1, 0, 0), \vec{E}_2=(0, 1, 0), \vec{E}_3=(0, 0, 1)$ ，用  $\vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3$

表示该子阵列坐标系沿其坐标轴的单位向量  $\vec{e}_1^{(i)}, \vec{e}_2^{(i)}, \vec{e}_3^{(i)}$ ，其变换关系如下：

$$\{ \vec{e}_1^{(i)}, \vec{e}_2^{(i)}, \vec{e}_3^{(i)} \} = \{ \vec{E}_1, \vec{E}_2, \vec{E}_3 \} \cdot Q^{(i)} \quad (15)$$

$$Q^{(i)} = \begin{bmatrix} \sin \theta^{(i)} & 0 & \cos \theta^{(i)} \\ -\cos \theta^{(i)} & 0 & \sin \theta^{(i)} \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (16)$$

而对破片速度矢量  $\vec{v}^{(i)}$  有：

$$\vec{v}^{(i)} = v_x^{(i)} \vec{E}_1 + v_y^{(i)} \vec{E}_2 + v_z^{(i)} \vec{E}_3 = v_x^{(i)} \vec{e}_1^{(i)} + v_y^{(i)} \vec{e}_2^{(i)} + v_z^{(i)} \vec{e}_3^{(i)} \quad (17)$$

因此有：

$$\begin{bmatrix} v_x^{(i)} \\ v_y^{(i)} \\ v_z^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} v_x^{(i)} \sin \theta^{(i)} + v_z^{(i)} \cos \theta^{(i)} \\ -v_x^{(i)} \cos \theta^{(i)} + v_z^{(i)} \sin \theta^{(i)} \\ v_y^{(i)} \end{bmatrix} \quad (18)$$

代入  $\vec{v}_x^{(i)}, \vec{v}_y^{(i)}, \vec{v}_z^{(i)}$ ，得：

$$\begin{bmatrix} v_x^{(i)} \\ v_y^{(i)} \\ v_z^{(i)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\sin \theta^{(i)}}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) + \frac{d \cos \theta^{(i)}}{t_2 - t_1} \\ -\frac{\cos \theta^{(i)}}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) + \frac{d \sin \theta^{(i)}}{t_2 - t_1} \\ \frac{1}{\tan \alpha} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_4 - t_3} \right) \end{bmatrix} \quad (19)$$

故第  $i$  号子阵列测得的破片速度矢量  $\vec{v}_i$  在总阵列坐标系下表达式如下：

$$\vec{v}_i = v_x^{(i)} \vec{E}_1 + v_y^{(i)} \vec{E}_2 + v_z^{(i)} \vec{E}_3 = \left[ \frac{\sin \theta^{(i)}}{\tan \beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2 - t_1} - \frac{l}{t_6 - t_5} \right) + \frac{d \cos \theta^{(i)}}{t_2 - t_1} \right] \vec{E}_1 +$$

$$\begin{aligned} & \left[ -\frac{\cos\theta^{(i)}}{\tan\beta} \cdot \left( \frac{d}{t_2-t_1} - \frac{l}{t_6-t_3} \right) + \frac{d\sin\theta^{(i)}}{t_2-t_1} \right] \vec{E}_2 + \\ & \left[ \frac{1}{\tan\alpha} \cdot \left( \frac{d}{t_2-t_1} - \frac{l}{t_4-t_3} \right) \right] \vec{E}_3 \end{aligned} \quad (20)$$

式中:  $i=1, 2, 3, \dots, 12$ ;  $\theta^{(i)}=(i-1) \times 30^\circ$ 。

### 3 误差分析

令  $\tau_1=t_2-t_1, \tau_2=t_4-t_3, \tau_3=t_6-t_5$ , 代入第  $i$  号子阵列测得的破片速度矢量  $\vec{v}_i$  在总阵列坐标系下表达式中, 即:

$$\begin{aligned} \vec{v}^{(i)} &= \left[ \frac{\sin\theta^{(i)}}{\tan\beta} \cdot \left( \frac{d}{\tau_1} - \frac{l}{\tau_3} \right) + \frac{d\cos\theta^{(i)}}{\tau_1} \right] \vec{E}_1 + \\ & \left[ -\frac{\cos\theta^{(i)}}{\tan\beta} \cdot \left( \frac{d}{\tau_1} - \frac{l}{\tau_3} \right) + \frac{d\sin\theta^{(i)}}{\tau_1} \right] \vec{E}_2 + \\ & \left[ \frac{1}{\tan\alpha} \cdot \left( \frac{d}{\tau_1} - \frac{l}{\tau_2} \right) \right] \vec{E}_3 \end{aligned} \quad (21)$$

可以看出破片速度矢量  $\vec{v}_i$  的分量  $v_x^{(i)}$  和  $v_y^{(i)}$  是自变量  $d, l, \beta, \theta^{(i)}, \tau_1^{(i)}, \tau_3^{(i)}$  的函数,  $v_z^{(i)}$  是自变量  $d, l, \alpha, \tau_1^{(i)}, \tau_2^{(i)}$  的函数。

$v_x^{(i)}, v_y^{(i)}, v_z^{(i)}$  的测量误差分别为  $\Delta v_x^{(i)}, \Delta v_y^{(i)}, \Delta v_z^{(i)}$ , 由误差传递理论, 即:

$$\begin{aligned} (\Delta v_x^{(i)})^2 &= \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial d} \right| \right)^2 (\Delta d)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial l} \right| \right)^2 (\Delta l)^2 + \\ & \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial \beta} \right| \right)^2 (\Delta \beta)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial \theta^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \theta^{(i)})^2 + \\ & \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial \tau_1^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_1^{(i)})^2 + \left( \left| \frac{\partial v_x^{(i)}}{\partial \tau_3^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_3^{(i)})^2 \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} (\Delta v_y^{(i)})^2 &= \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial d} \right| \right)^2 (\Delta d)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial l} \right| \right)^2 (\Delta l)^2 + \\ & \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial \beta} \right| \right)^2 (\Delta \beta)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial \theta^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \theta^{(i)})^2 + \\ & \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial \tau_1^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_1^{(i)})^2 + \left( \left| \frac{\partial v_y^{(i)}}{\partial \tau_3^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_3^{(i)})^2 \end{aligned} \quad (23)$$

$$(\Delta v_z^{(i)})^2 = \left( \left| \frac{\partial v_z^{(i)}}{\partial d} \right| \right)^2 (\Delta d)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_z^{(i)}}{\partial l} \right| \right)^2 (\Delta l)^2 +$$

$$\begin{aligned} & \left( \left| \frac{\partial v_z^{(i)}}{\partial \alpha} \right| \right)^2 (\Delta \alpha)^2 + \left( \left| \frac{\partial v_z^{(i)}}{\partial \tau_1^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_1^{(i)})^2 + \\ & \left( \left| \frac{\partial v_z^{(i)}}{\partial \tau_2^{(i)}} \right| \right)^2 (\Delta \tau_2^{(i)})^2 \end{aligned} \quad (24)$$

对于类似光幕阵列设备在测试中误差分量之间的相关性分析在参考文献[2-3]中已有所叙述, 其影响较小, 工程应用中往往可以忽略。

由公式(20)反解出  $\tau_1, \tau_2, \tau_3$  表达式如下:

$$\tau_1 = \frac{d}{v_x \cos\theta + v_y \sin\theta} \quad (25)$$

$$\tau_2 = \frac{l}{v_x \cos\theta + v_y \sin\theta - v_y \tan\alpha} \quad (26)$$

$$\tau_3 = \frac{l}{v_x \cos\theta + v_y \sin\theta + v_y \tan\beta \cos\theta - v_x \tan\beta \sin\theta} \quad (27)$$

从公式(25)~(27)可看出, 在系统参数误差  $\Delta d, \Delta l, \Delta \alpha, \Delta \beta, \Delta \theta$  确定时,  $\Delta v_x^{(i)}, \Delta v_y^{(i)}$  随  $v_x^{(i)}, v_y^{(i)}$  的变化而变化;  $\Delta v_z^{(i)}$  随  $v_x^{(i)}, \Delta v_y^{(i)}, v_z^{(i)}$  的变化而变化。根据现有的测量手段误差数据, 设置仿真条件:  $d=4 \text{ m}, l=2.5 \text{ m}, \alpha=\beta=22.5^\circ; \Delta d=0.000 5 \text{ m}, \Delta l=0.000 5 \text{ m}, \Delta \alpha=\Delta \beta=0.01^\circ, \Delta \theta=0.05^\circ, \Delta \tau_1=\Delta \tau_2=\Delta \tau_3=10^{-7} \text{ s}$ 。

对第 1 号子阵列, 分析  $\Delta v_x^{(1)}, \Delta v_y^{(1)}$  随  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$  的变化, 得图 5、6。

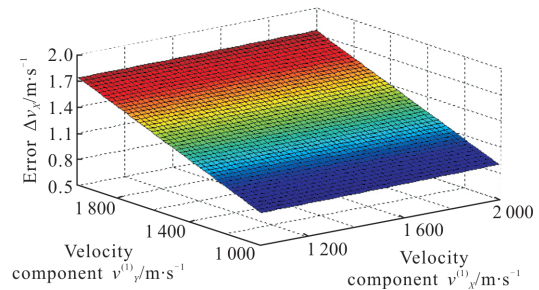


图 5  $\Delta v_x^{(1)}$  随  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$  变化规律示意图

Fig.5 Change rule of  $\Delta v_x^{(1)}$  along with  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$

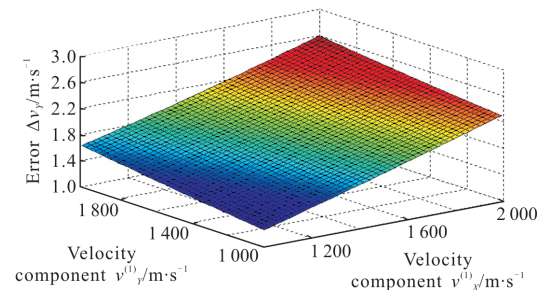


图 6  $\Delta v_y^{(1)}$  随  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$  变化规律示意图

Fig.6 Change rule of  $\Delta v_y^{(1)}$  along with  $v_x^{(1)}, v_y^{(1)}$

由图 5、6 可看出对于第 1 号子阵列( $i=1$ ),  $\Delta v_x^{(1)}$ 、 $\Delta v_y^{(1)}$  均随  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  的增长而增长, 但  $\Delta v_x^{(1)}$  受  $v_x^{(1)}$  的影响相对于  $v_y^{(1)}$  很小; 同样,  $\Delta v_y^{(1)}$  受  $v_y^{(1)}$  的影响相对于  $v_x^{(1)}$  很小。当  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  均达到 2000 m/s 时,  $\Delta v_x^{(1)}$  不超过 1.8 m/s,  $\Delta v_y^{(1)}$  不超过 2.7 m/s。

令  $i=1, v_z^{(1)}=1500$  m/s, 分析  $\Delta v_z^{(1)}$  随  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  的变化, 得到图 7。

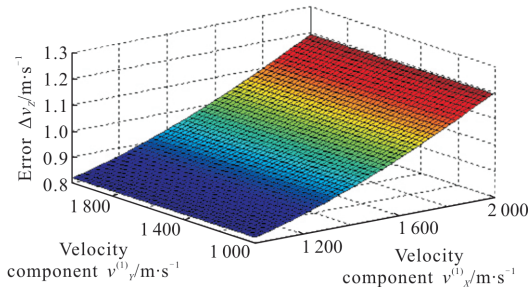


图 7  $\Delta v_z^{(1)}$  随  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  变化规律示意图

Fig.7 Change rule of  $\Delta v_z^{(1)}$  along with  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$

由图 7 可看出对于第一号子光幕阵列( $i=1$ ), 当速度分量  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  从 1000 m/s 变化至 2000 m/s 时,  $\Delta v_z^{(1)}$  几乎不随  $v_y^{(1)}$  变化, 而随  $v_x^{(1)}$  的增大而增大。当  $v_x^{(1)}$ 、 $v_y^{(1)}$  均达到 2000 m/s 时,  $\Delta v_z^{(1)}$  不超过 1.2 m/s。

为分析  $\Delta v_z^{(1)}$  随  $v_z^{(1)}$  的变化, 令  $i=1, v_x^{(1)}=1500$  m/s,  $v_y^{(1)}=1500$  m/s; 得到图 8。

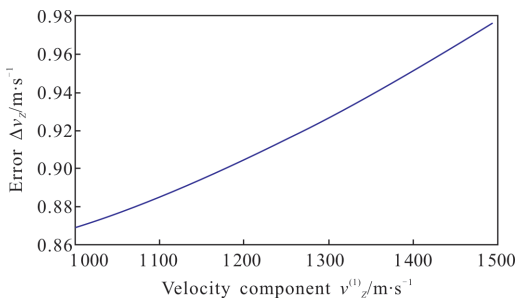


图 8  $\Delta v_z^{(1)}$  随  $v_z^{(1)}$  变化规律示意图

Fig.8 Change rule of  $\Delta v_z^{(1)}$  along with  $v_z^{(1)}$

由图 8 可看出对于第一号子光幕阵列( $i=1$ ), 当  $\Delta v_x^{(1)}=1500$  m/s,  $v_y^{(1)}=1500$  m/s 时, 分量  $v_z^{(1)}$  从 1000 m/s 变化至 1500 m/s,  $\Delta v_z^{(1)}$  不超过 0.98 m/s。

同理对  $i=2、3、\dots、12$  时进行仿真, 结果如下:

(1)  $\Delta v_x^{(i)}$  随  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  增大而增大, 且受  $v_y^{(i)}$  的影响大于  $v_x^{(i)}$ , 当  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  从 1000 m/s 变化至 2000 m/s 时,  $\Delta v_x^{(i)}$  不超过 2.4 m/s;

(2)  $\Delta v_y^{(i)}$  随  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  增大而增大, 且受  $v_x^{(i)}$  的影响大于  $v_y^{(i)}$ , 当  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  从 1000 m/s 变化至 2000 m/s 时,  $\Delta v_y^{(i)}$  不超过 2.7 m/s;

(3) 当  $v_z^{(i)}=1500$  m/s 时, 在  $i=1、2、6、7、8、12$  时  $\Delta v_z^{(i)}$  受  $v_x^{(i)}$  的影响大于  $v_y^{(i)}$ , 在  $i=3、4、5、9、10、11$  时  $\Delta v_z^{(i)}$  受  $v_x^{(i)}$  的影响小于  $v_y^{(i)}$ , 且当  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  从 1000 m/s 变化至 2000 m/s,  $\Delta v_z^{(i)}$  不超过 2.3 m/s;

(4) 当  $v_x^{(i)}$ 、 $v_y^{(i)}$  为 1500 m/s 时,  $v_z^{(i)}$  从 1000 m/s 变化至 1500 m/s,  $\Delta v_z^{(i)}$  不超过 1.23 m/s。

仿真结果表明: 该方案可以满足相关试验要求。

#### 4 实验验证

根据指标要求, 所提方法可适用不小于直径 5 mm 的球形或 5 mm×5 mm×5 mm 立方形预制破片测试, 已验证可对装载 200、500、1000、2000 块预制破片的多型弹药进行测试。

在针对某型弹药进行设计定型试验中, 试验布置如图 9 所示。被测弹药放置于静爆场中心, 在其杀伤半径内围绕被测弹药布置 12 组六光幕子阵列探

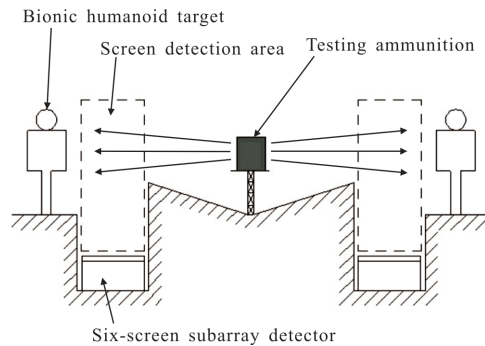


图 9 实验布局示意图

Fig.9 Schematic layout of the experiment

测装置于相应的坑道内, 避免设备被破片击中。此外, 在每组光幕探测区后布置一个配置有防弹衣及相应传感器的仿生人形靶, 进行破片毁伤效果评估。根据速度合成公式:

$$|\vec{v}| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad (28)$$

可得破片速度绝对值, 通过计算机处理并记录数据如表 1 所示。

表 1 破片速度测量数据表

Tab.1 Fragment velocity measurement data

Test sequence number	Number of fragments captured	Average fragment velocity/m·s <sup>-1</sup>
1	121	2 162
2	96	2 107
3	143	2 085
4	107	2 176
5	88	2 010

由于主动光幕阵列属于非接触测量, 得到准确破片速度的同时, 也不会影响破片对仿生人形靶毁伤效果。通过测量破片速度, 进一步可以计算破片动能, 动能越高则对人形靶毁伤效果越好。而且, 仿生人形靶人体关键部分上布设有传感器, 可以得到破片对人体毁伤效果。破片动能与仿生人形靶毁伤效果形成有效对比关系, 也可验证仿生人形靶外部所穿防弹背心防护效果。

实验结果表明, 该方法具有可行性, 可以实现静爆破片速度测量。且测试中对于穿着防弹衣的人形靶, 破片毁伤效果良好, 这与基于实验数据的预估毁伤效果相吻合。

## 5 结 论

通过研究及实验, 所提出的主动光幕阵列静爆破片速度测量方法不但可以实现任意水平方向的破片速度测量, 且能有效避免试验中破片对测量设备造成损伤。根据对所提出的测量模型进行仿真分析, 获得了测量误差变化规律, 并得到破片速度分量在一定范围内时, 其最大误差小于 2.7 m/s, 结果显示其具有较高的测量精度, 并通过实验验证了方法的可行性, 对相关破片武器毁伤性能评估具有促进意义。

### 参考文献:

[1] Yu Yuting, Shu Jingrong, Ding Bosheng. Design of fuze-warhead coordination based on laser fuze and prefabricated fragment ammunition [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(3): 0303003. (in Chinese)

[2] Ni Jinping. Technology and Application of Measurment of the Light Screen Array [M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2014. (in Chinese)

[3] Li Hanshan, Gao Junchai, Wang Zemin. Object location fire precision test technology by using intersecting photoelectric detection target[J]. *Optik*, 2014, 125(3): 1325-1329.

[4] Chen Ding, Ni Jinping, Li Xiaojuan. Analysis of probability of exterior ballistic projectiles from rapid-fire weapon passing through a screen simultaneously [J]. *Acta Armamentarii*, 2018, 39(2): 383-390. (in Chinese)

[5] Yu Jiyan, Li Yongxin, Wang Xiaoming. Measurement of impact points using reflective light screen target of single column light source [J]. *Optics and Precision Engineering*, 2010, 18(6): 1354-1360. (in Chinese)

[6] Yuan Yun, Tian Hui. Analysis and amendment on the sensitivity of large target area light screen [J]. *Infrared and Laser Engineering*, 2018, 47(6): 0617004. (in Chinese)

[7] He Kaiping, Xu Da, Li Hua. High precision measurement for barrange weapon dispersion based on large area triangle composite light-screens[J]. *Optics and Precision Engineering*, 2015, 23(6): 1523-1529. (in Chinese)

[8] Chen Ding, Ni Jinping. Pulse compression-based improvement on the estimation accuracy of time interval between two trigger signals in light screen array [J]. *Optik*, 2018, 158: 675-683.

[9] Ni Jinping, Yang Lei. A measuring method for velocity of warhead fragments[J]. *Acta Armamentarii*, 2007, 28(1): 33-37. (in Chinese)

[10] Wei Hongqiang, Wang Jinsong, Feng Jinliang, et al. Measurement method for velocity of warhead fragments based on laser screen [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2008, 29(10): 2225-2229. (in Chinese)

[11] Liu Zeqing, Zhang Yurong, Zhao Jianxin, et al. High-speed photography velocity measurement in range based on digital photogrammetry[J]. *Journal of Ballistics*, 2015, 27(4): 47-51. (in Chinese)

[12] Yang Yong. Research on the technologies of fragment velocity parameter measurement based on millimeter-wave array radar [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2011. (in Chinese)

[13] Gao Juan, Dong Tao, Ni Jinping. Light curtain sensor based on laser reflection [J]. *Journal of Applied Optics*, 2013, 34(2): 359-362. (in Chinese)

[14] Wang Zhuang. The design of active dual-light curtain precision velocity measuring system [D]. Tianjin: Tianjin University, 2012. (in Chinese)