



# 高速钨合金破片速度衰减规律试验研究

袁 硕<sup>1</sup>, 赵东志<sup>2</sup>, 程 春<sup>3</sup>, 郭策安<sup>1</sup>, 赵 爽<sup>1\*</sup>, 蒋招绣<sup>3</sup>, 王紫艺<sup>1</sup>

(1. 沈阳理工大学 装备工程学院, 辽宁 沈阳 110158; 2. 北方华安工业集团有限公司, 黑龙江 齐齐哈尔 161046;  
3. 宁波大学 冲击与安全工程教育部重点实验室, 浙江 宁波 315211)

**摘要:** 为研究破片形状、质量等因素对预制破片在飞行过程中速度衰减规律的影响, 利用 25 mm 弹道炮对球形破片、长方体破片以及静爆试验回收长方体破片进行了飞行速度测试试验。其中, 球形破片直径分别为 7 mm 和 8 mm, 质量分别为 3.9 g 和 4.7 g; 长方体破片尺寸为 8 mm×8 mm×7.05 mm, 质量 7.94 g。采用多普勒雷达测速技术, 测量了破片在飞行过程中的实时速度数据, 分析了破片速度随时间的变化规律, 并运用数值分析方法得到破片速度随位移的变化规律, 最后通过数据拟合得到了破片速度衰减系数、球形和长方体破片速度衰减系数与马赫数之间的关系。结果表明: 对于球形破片, 随破片半径的增大, 速度衰减系数呈现减小趋势。对比了 8 mm 球形破片和 8 mm×8 mm×7.05 mm 长方体破片的速度衰减系数, 发现两种破片的质量相差很大, 但平均速度衰减系数接近。1 300~2 100 m/s 初速范围内, 相比长方体规则破片, 静爆试验回收长方体破片的平均速度衰减系数更大, 说明其在空气中飞行受到的阻力更大, 速度衰减更快。静爆试验回收长方体破片形状与实际战斗部爆炸后产生的破片形状更为接近, 试验结果对于战斗部设计及威力评估有更大的参考价值。

**关键词:** 高速破片; 雷达测速; 衰减系数; 破片形状; 空气阻力

**中图分类号:** TJ410 **文献标志码:** A **文章编号:** 1004-499X(2025)01-0077-08

## Experimental Study on Velocity Attenuation Law of High-velocity Tungsten Alloy Fragments

YUAN Shuo<sup>1</sup>, ZHAO Dongzhi<sup>2</sup>, CHENG Chun<sup>3</sup>, GUO Cean<sup>1</sup>, ZHAO Shuang<sup>1\*</sup>, JIANG Zhaoxiu<sup>3</sup>, WANG Ziyi<sup>1</sup>

(1. School of Department of Equipment Engineering, Shenyang Ligong University, Shenyang 110159, China;  
2. North Huan Industry Group Co., Ltd, Qiqihar 161046, China;  
3. MOE Key Laboratory of Impact and Safety Engineering, Ningbo University, Ningbo 315211, China)

**Abstract:** To study the influence of fragment shape, mass and other factors on the velocity attenuation law of prefabricated fragments in the flight process, the flying velocity test was conducted on spherical fragments, cuboid fragments and cuboid fragments recycled from static explosion tests using 25 mm ballistic-gun. Among them, the diameters of the spherical fragments are 7 mm and 8 mm respectively, and the masses are 3.9 g and 4.7 g respectively; the size of the cuboid fragment is 8 mm×8 mm×7.05 mm, and the mass is 7.94 g. Using Doppler radar velocity-measurement technology, the real-time velocity data of fragments during flight were measured, and the variation law of fragment velocity with time was analyzed. The variation law of fragment velocity with displacement was obtained by numerical analysis method. Finally, the fragment velocity-attenuation-coefficient, the relationship between the velocity attenuation coefficient of spherical and cuboid fragments and the Mach number ( $Ma$ ) were obtained through data

fitting. For spherical fragments, the velocity attenuation coefficient shows a decreasing trend with the increase of fragment radius. The velocity attenuation coefficients of 8mm spherical fragments were compared with that of 8 mm×8 mm×7.05 mm cuboid fragments. The result shows that the masses of the two types of fragments are significantly different, but the average velocity-attenuation-coefficients are close. Within the initial velocity range of 1 300–2 100 m/s, compared to cuboid regular fragments, the average velocity-attenuation-coefficient of cuboid fragments recovered from static explosion experiments is larger, indicating that they experience greater air resistance and faster velocity attenuation during flight in the air. The shape of the cuboid fragments recycled from the static explosion test is closer to that of fragments generated after the actual warhead explosion, and the test result has greater reference value for the design and power evaluation of the warhead.

**Key words:** high-velocity fragment; radar measurement velocity; attenuation coefficient; fragment shape; air resistance

破片杀伤战斗部在高能装药爆炸冲击作用下,形成大量高速破片,依靠这些高速破片对目标进行杀伤。破片类型可分为自然破片、预控破片和预制破片3种类型。由于预制破片受到的飞行阻力具有一致性,因此预制破片战斗部在一定范围内有更加密集可靠的杀伤效果<sup>[1-3]</sup>。破片在飞行过程中受空气阻力影响,飞行速度逐渐降低,而预制破片杀伤能力的主要因素之一就是破片的着靶速度<sup>[4]</sup>。因此,研究预制破片速度衰减规律可以为预制破片战斗部威力场模型构建、毁伤效能评估提供理论依据。

关于破片速度衰减规律,国内外学者进行了大量的理论分析以及试验研究。易春林等<sup>[5-6]</sup>通过球形破片速度衰减测试试验,分析了造成影响破片速度预报不确定度的因素,并根据试验研究提出了球形破片速度预测经验公式。谭多望等<sup>[7]</sup>采用不同材料、不同尺寸球形破片进行试验,试验结果表明球形破片的速度衰减系数在一定初速下为定值,其空气阻力系数与破片初速具有一定的线性关系。全嘉林等<sup>[8]</sup>通过试验与理论计算对比发现,长方体破片的试验值与经典理论计算值相比明显偏低,长方体破片迎风面积的修正系数与马赫数呈近似线性关系,并在此基础上提出了长方体破片迎风面积修正公式。张华丽<sup>[9]</sup>建立了破片速度衰减规律试验研究测试系统,并通过对系统采集到的数据进行分析,发现长方体破片和圆柱体破片的空气阻力系数、迎风面积和马赫数之间存在一定的函数关系。竺伟梁等<sup>[10]</sup>通过试验研究发现,在飞行过程中三棱柱大长径比预制破片的自身翻滚对于破片速度衰减规律的影响是不可忽视的。采用翻滚模型长条形破片的速

度衰减规律更接近试验结果。王满林等<sup>[11]</sup>研究了海拔高度对破片速度衰减规律的影响,发现:相同速度时,破片速度衰减系数随海拔升高而减小;相同海拔下,该系数随破片初速度升高而减小。马营等<sup>[12]</sup>对破片模拟弹速度衰减规律进行了试验与仿真研究,发现其空气阻力系数仅与破片轴线和水平面的夹角有关。HU等<sup>[13]</sup>采用了一种大膛、小口径、大展弦比的30 mm口径火炮,测定了STANAG 4496标准规定的 $Ma = 5 \sim 7$ 的准圆柱形破片的减速系数为0.009 312,在空气中的平均阻力系数为1.109。LOTH等<sup>[14]</sup>分析了超声速和高超声速下球形物体的阻力系数,提出了一种新的阻力系数经验模型,模型受到与球上边界层过渡相关的临界雷诺数的限制,该临界雷诺数随着球马赫数的增加而显著增加。NING等<sup>[15]</sup>在实验数据的基础上,提出了一种计算破片初始速度的修正公式。数值计算结果与修正后的结果吻合,修正公式可用于此类圆柱壳破片分布的预测。

上述均基于理想规则形状破片进行研究,且破片初速较低。本文利用弹道炮发射预制破片,采用雷达测速手段,获得不同尺寸球形破片、长方体破片和静爆试验回收长方体破片在500~2 000 m/s速度范围内的速度-时间数据。对数据进行处理,得到破片的速度-位移关系,并利用经验公式和数据拟合得到不同类型破片速度的衰减系数,其中静爆试验回收破片更接近战斗部爆炸后飞散破片的真实情况,研究结果具有重要的现实意义。

## 1 破片速度测试试验

破片速度测量系统由一门25 mm弹道炮、雷达

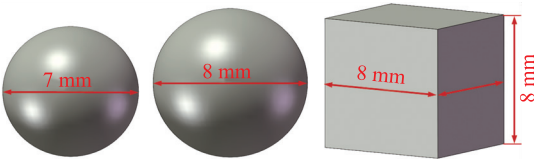
测速装置、破片及弹托组成。雷达测速装置由雷达测速仪和红外触发装置组成,其工作原理为多普勒效应原理,移动中的物体对其接受到的电磁波具有频移效应,即当目标远离雷达时,目标反射电磁波的频率将低于雷达发出的电磁波的频率,雷达测速仪是根据接收到的反射波频移量的计算而得出被测物体的运动速度。点火后,火药气体喷出炮口,破片从炮口飞出,触发红外触发装置,测速雷达开始工作并发射电磁波,电磁波在遇到飞行中的破片时发生发射,反射的电磁波出现频移效应,被雷达测速仪接收并进行处理,从而记录破片的飞行速度-时间数据。试验现场布置如图1所示。



图1 测速试验现场布置

Fig.1 Layout of velocity measurement test

试验预制破片分为4类,第1类破片和第2类破片均为采用93钨合金制作的球形破片,直径分别为7 mm和8 mm,质量分别为3.9 g和4.7 g;第3类破片为采用钨合金制作的尺寸为8 mm×8 mm×7.05 mm的长方体破片,质量7.94 g;第4类破片是第3类破片静爆试验回收破片,四类破片形貌如图2所示。



(a) 规则球形和长方体破片



(b) 静爆试验回收长方体破片

图2 四类试验破片

Fig.2 Four types of experimental fragments

预制破片战斗部的破片最大初速通常在2 000 m/s左右,在战斗部两端的破片速度相对较低,为了覆盖战斗部破片速度范围,破片初速选取2 000 m/s以内。射击发数尽量保证每种类型破片覆盖速度范围。

表1 破片样品参数

Table 1 Fragment parameters

| 破片类型 | 形状      | 材料   | 破片质量/g | 破片特征尺寸            |
|------|---------|------|--------|-------------------|
| 1    | 球形      | 93 钨 | 3.9    | Φ7 mm             |
| 2    | 球形      | 93 钨 | 4.7    | Φ8 mm             |
| 3    | 长方体     | 93 钨 | 7.94   | 8 mm×8 mm×7.05 mm |
| 静爆试验 |         |      |        |                   |
| 4    | 回收长方体破片 | 93 钨 | <7.94  | -                 |

2 试验结果与分析

2.1 破片速度衰减理论模型

已知破片飞行速度会受到重力以及空气阻力的影响,根据牛顿第二定律,有:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2}v^2 C_D \rho_k A - G \tag{1}$$

式中: $m$ 为破片质量, $v$ 为破片速度, $C_D$ 为破片阻力系数, $\rho_k$ 为空气密度, $A$ 为破片迎风面积, $G$ 为重力。

考虑破片飞行速度快、飞行时间短等因素,重力对于破片速度的影响微弱,式(1)可改写为

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2}v^2 C_D \rho_k A \tag{2}$$

对式(2)进行积分,有:

$$v = v_0 \exp\left(-\frac{C_D \rho_k A x}{2m}\right) \tag{3}$$

式中: $v_0$ 为破片初速, $x$ 为破片飞行距离。

破片阻力系数 $C_D$ 、破片迎风面积 $A$ 、破片质量 $m$ 、空气密度 $\rho_k$ 是造成破片速度衰减的主要原因,用破片速度衰减系数 $K$ 来综合表示,即 $K = \frac{C_D \rho_k A}{2m}$ 。

则破片在空气中的飞行速度 $v$ 和破片位移 $x$ 之间存在以下关系<sup>[16]</sup>:

$$v = v_0 \exp(-Kx) \tag{4}$$

2.2 试验结果

雷达测速方法相对于区截测速法,可以避免破片在穿靶过程中靶板导致的破片飞行姿态和飞行角度的改变,以及穿透靶板时造成的能量损失。但是测速雷达发出的电磁波在遇到弹道中的其他物体,如破碎分离的弹托等,同样会反射电磁波,对试验造

成影响。因此,在对试验结果进行分析之前,要先排除试验数据中的误差点。根据处理后的四类钨合金

破片的速度-时间数据,绘制出四类钨合金破片的速度-时间曲线,如图3所示。

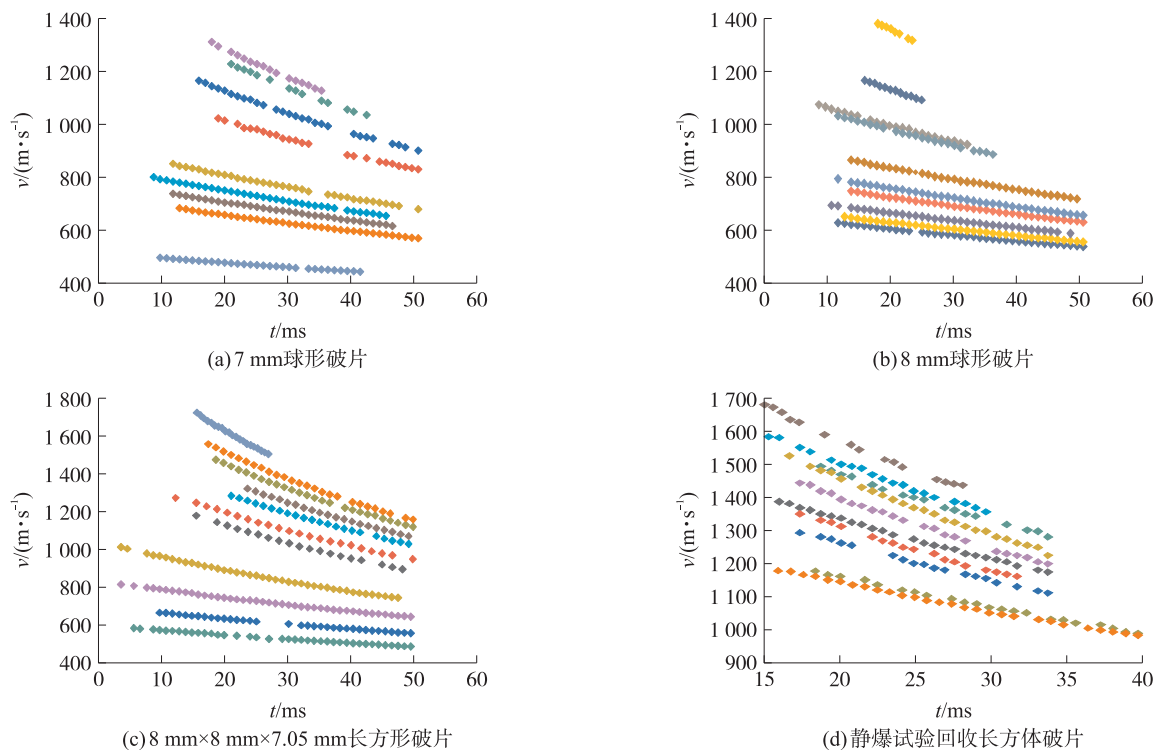


图3 破片速度-时间曲线

Fig.3 Velocity-time curve of fragments

从图3可以观察到,四类破片的飞行速度随时间的变化规律近似呈线性衰减,其初始速度越大,飞行速度随时间的衰减速度也就越快。第1、2、3类破片速度随时间衰减趋势较为平滑,第4类破片的速度衰减呈现一定的波动性。

### 2.3 数据处理

由式(4)获得飞行速度与破片位移的函数关系,将速度-时间的数据转换为速度与位移的数据,数据处理方法<sup>[10]</sup>如下。

将时间数据乘以0.001,把时间单位从ms转换成s。计算相邻两测速点之间的加速度:

$$a = \frac{v_i - v_j}{t_i - t_j} \quad (5)$$

式中: $v_i, t_i$ 分别为两测速点中后一点的速度与时间; $v_j, t_j$ 分别为两测速点中前一点的速度与时间。

取前四测速点计算平均测量时间步长:

$$\bar{t} = (t_4 + t_3 - t_2 - t_1) / 2 \quad (6)$$

式中: $t_1, t_2, t_3, t_4$ 为前四测速点的时间。

计算平均加速度:

$$\bar{a} = (a_1 + a_2 + a_3 + a_4) / 4 \quad (7)$$

式中: $a_1, a_2, a_3, a_4$ 为前四测速点的时间所对应的加速度。

通过计算得到的平均测量时间步长和平均加速度,补齐未被测量到的时间和未被测量时间对应的速度,将首个测速点所对应的时间减去不同平均时间步长,直到时间小于或等于0,记录每个计算结果,即 $t_M = t_1 - M \times \bar{t}$ ,  $M = 1, 2, \dots, n$ ,直到 $t_M \leq 0$ 。将首个测速点所对应的速度减去 $M$ 个平均时间步长并乘以平均加速度,计算出与时间相对应的速度值,即 $v_M = v_1 - M \times \bar{a} \times \bar{t}$ 。

通过计算得到不同速度下所对应的破片位移量:

$$\begin{aligned} l_1 &= l_0 + v_1 \times (t_1 - t_0) \\ l_2 &= l_1 + v_2 \times (t_2 - t_1) \\ &\vdots \\ l_n &= l_{n-1} + v_n \times (t_n - t_{n-1}) \end{aligned} \quad (8)$$

式中: $n$ 从1开始, $l_0 = 0$ 对应起始炮口位置, $v_0$ 等于破片出炮口时刻 $t_0$ 所对应的破片初速, $l_n$ 为速度为 $v_n$ 时破片的位移量。

破片对于人员的杀伤标准为破片的动能要大于

98 J,对于 7 mm 厚装甲的杀伤标准为破片的动能要大于 2 158 J<sup>[13]</sup>。根据动能公式  $E = \frac{1}{2}mv^2$ ,破片质量越大,造成杀伤所需要的速度也就越小。这里计

算质量最小的第 1 类破片对人员和 7 mm 厚装甲的杀伤临界速度分别为 158 m/s 和 744 m/s。因此,根据计算结果选取 0~50 m 范围内的破片速度-位移数据,绘制钨合金速度随位移的变化曲线,如图 4 所示。

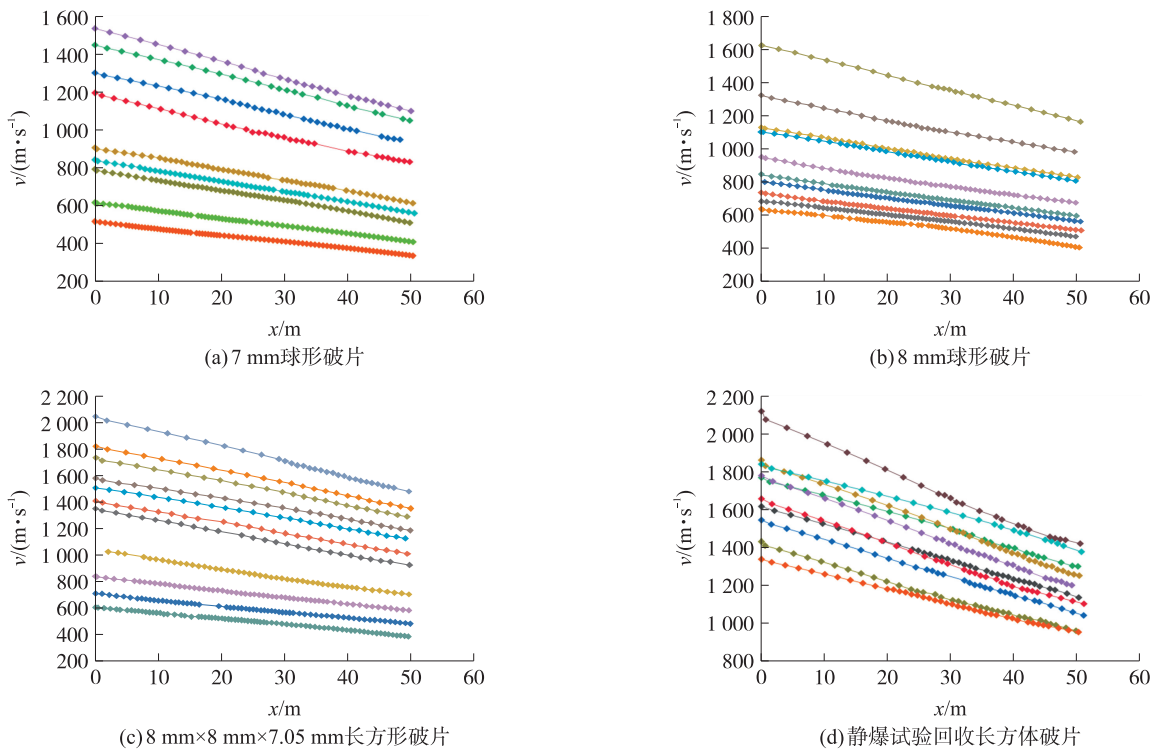


图 4 破片速度-位移曲线  
Fig. 4 Velocity-displacement curve of fragments

从图 4 可以看到,形状规则的第 1、2、3 类破片各自的速度随位移衰减趋势较为平滑,对第 1、2、3 类破片的速度衰减系数  $K$  取平均值。第 4 类破片形状不规则,这类破片更接近预制破片战斗部爆炸过后的破片形状,其速度随位移衰减趋势呈现一定波动性。

对速度-位移数据按照式(4)进行拟合,得到不同初速条件下破片速度随位移的衰减系数  $K$ ,如图 5 所示,不同类型破片对应的平均速度衰减系数  $\bar{K}$  如表 2 所示。

从图 5 中可以看到,三形状规则破片的速度衰减系数  $K$  随着初始速度的增加而减小,并且减小趋势逐渐平缓。静爆试验回收长方体破片由于其形状不规则,其速度衰减系数  $K$  并无明显的变化规律。采用多项式拟合得到前三类破片速度衰减系数随破片初速的变化曲线,得到三类破片速度衰减系数  $K$  与马赫数( $Ma$ )之间的关系如下。

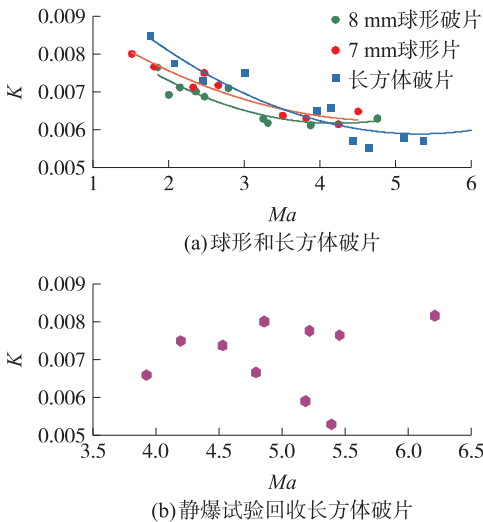


图 5 不同破片速度衰减系数  $K$  与  $Ma$  之间的关系  
Fig. 5 Relationship between decay coefficients  $K$  and  $Ma$  at different fragment speeds

表 2 四类破片速度衰减系数

| Table 2 The velocity attenuation coefficient of four types of fragments |      |                               |          |            |
|-------------------------------------------------------------------------|------|-------------------------------|----------|------------|
| 破片类型                                                                    | 试验编号 | 初始速度<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 衰减系数     | 平均衰减<br>系数 |
| 7 mm<br>球形破片                                                            | 1    | 514.99                        | 0.008 01 | 0.007 017  |
|                                                                         | 2    | 614.39                        | 0.007 67 |            |
|                                                                         | 3    | 790.17                        | 0.007 32 |            |
|                                                                         | 4    | 839.56                        | 0.007 61 |            |
|                                                                         | 5    | 903.18                        | 0.007 18 |            |
|                                                                         | 6    | 1 191.96                      | 0.006 81 |            |
|                                                                         | 7    | 1 297.43                      | 0.006 31 |            |
|                                                                         | 8    | 1 443.91                      | 0.006 15 |            |
|                                                                         | 9    | 1 530.97                      | 0.006 09 |            |
| 8 mm<br>球形破片                                                            | 1    | 636.92                        | 0.007 65 | 0.006 759  |
|                                                                         | 2    | 686.38                        | 0.006 93 |            |
|                                                                         | 3    | 736.81                        | 0.007 12 |            |
|                                                                         | 4    | 809.43                        | 0.007 02 |            |
|                                                                         | 5    | 848.77                        | 0.006 88 |            |
|                                                                         | 6    | 956.75                        | 0.007 10 |            |
|                                                                         | 7    | 1 114.11                      | 0.006 29 |            |
|                                                                         | 8    | 1 135.88                      | 0.006 18 |            |
|                                                                         | 9    | 1 328.82                      | 0.006 12 |            |
|                                                                         | 10   | 1 632.34                      | 0.006 30 |            |
| 8 mm×8 mm×<br>7.05 mm<br>长方体破片                                          | 1    | 601.00                        | 0.008 48 | 0.006 673  |
|                                                                         | 2    | 705.99                        | 0.007 75 |            |
|                                                                         | 3    | 835.99                        | 0.007 29 |            |
|                                                                         | 4    | 1 021.99                      | 0.007 50 |            |
|                                                                         | 5    | 1 349.00                      | 0.006 50 |            |
|                                                                         | 6    | 1 409.00                      | 0.006 57 |            |
|                                                                         | 7    | 1 507.99                      | 0.005 71 |            |
|                                                                         | 8    | 1 579.00                      | 0.005 53 |            |
|                                                                         | 9    | 1 736.99                      | 0.005 79 |            |
|                                                                         | 10   | 1 824.00                      | 0.005 71 |            |
|                                                                         | 11   | 2 050.00                      | 0.006 31 |            |
| 静爆试验回收<br>长方体破片                                                         | 1    | 1 335.36                      | 0.006 59 | 0.007 085  |
|                                                                         | 2    | 1 428.22                      | 0.007 49 |            |
|                                                                         | 3    | 1 541.85                      | 0.007 37 |            |
|                                                                         | 4    | 1 631.42                      | 0.006 66 |            |
|                                                                         | 5    | 1 653.59                      | 0.008 00 |            |
|                                                                         | 6    | 1 765.34                      | 0.005 90 |            |
|                                                                         | 7    | 1 775.39                      | 0.007 76 |            |
|                                                                         | 8    | 1 835.65                      | 0.005 29 |            |
|                                                                         | 9    | 1 857.00                      | 0.007 64 |            |
|                                                                         | 10   | 2 113.89                      | 0.008 15 |            |

对于直径 7 mm 球形破片,有:  
 $K=0.010\ 03-0.001\ 55Ma+0.000\ 157\ 6Ma^2$  (9)  
对于直径 8 mm 球形破片,有:  
 $K=0.009\ 92-0.001\ 66Ma+0.000\ 177\ 8Ma^2$  (10)  
对于长方体破片,有:  
 $K=0.010\ 4-0.001\ 34Ma+0.000\ 081\ 8Ma^2$  (11)

2.4 结果分析

由式(4)可知,影响破片速度衰减系数的因素包括空气阻力系数、空气密度、破片迎风面积以及破片质量。由于试验环境并未发生改变,所以对于所有的破片试验,空气密度均可看作同一密度,不会对不同破片的试验结果造成影响。

在球形破片的飞行过程中迎风面积的计算公式<sup>[13]</sup>为

$$A=\pi r^2\sin\theta$$

(12)

式中: $r$ 为球形破片半径, $\theta$ 为破片飞行方向与试验时当地风速方向的夹角。因为试验破片在飞行 50 m 距离后速度远大于当地风速,可以忽略试验时风向对于破片飞行的影响,这里认为夹角  $\theta$  为  $0^\circ$ 。

球形破片的迎风面积可改写为

$$A=\pi r^2$$

(13)

根据文献[17],球形破片拟合空气阻力系数与破片飞行速度之间存在如下函数关系:

$$C'_D=\begin{cases}0.43 & Ma<0.3 \\ 0.516-0.625Ma+1.085Ma^2 & 0.3\leq Ma<1.1 \\ 1.247-0.101Ma+0.008Ma^2 & 1.1\leq Ma\leq 6.0\end{cases}$$

(14)

式中: $Ma=\frac{v}{v_s}$ , $v$ 为破片飞行速度, $v_s$ 为当地声速。

对于长方体破片,迎风面积可以采用如下经验公式计算:

$$A=Hm^{2/3}$$

(15)

式中: $H$ 为破片形状系数, $m$ 为破片质量。

根据文献[18],长方体钨破片的形状系数计算公式为

$$H=0.6\times 10^{-3}\frac{X+XY+Y}{(XY)^{\frac{2}{3}}}$$

(16)

式中: $X=\frac{b}{a}$ , $Y=\frac{c}{a}$ 。 $a,b,c$ 分别为长方体的厚度、宽度和长度。

由此可以得出长方体破片迎风面积计算公式为

$$A=0.6\times 10^{-3}\frac{X+XY+Y}{(XY)^{\frac{2}{3}}}m^{2/3}$$

(17)

马玉媛等<sup>[19]</sup>通过试验研究,拟合出了长方体破片在飞行过程中破片空气阻力的经验公式为

$$C'_D=1.029\ 99+\frac{0.992\ 7}{Ma}-\frac{0.843\ 9}{Ma^2}$$

(18)

直径 7 mm 和 8 mm 的球形破片在试验过程中

空气密度相同,根据上述研究,两类球形破片相同速度下的空气阻力系数也相同,影响破片速度衰减系数的因素为破片质量和破片迎风面积。根据理论计算,对比两种尺寸球形破片的速度衰减系数。

$$\frac{K_1}{K_2}=\frac{\frac{C_D\rho_kA_1}{2m_1}}{\frac{C_D\rho_kA_2}{2m_2}}\tag{19}$$

式中: $K_1$  为 7 mm 球形破片速度衰减系数, $m_1$  为 7 mm 球形破片质量; $K_2$  为 8 mm 球形破片速度衰减系数, $m_2$  为 8 mm 球形破片质量。

球形破片质量计算公式为

$$m=\frac{4}{3}\pi r^3\rho\tag{20}$$

式中: $r$  为球形破片半径, $\rho$  为球形破片密度。  
将式 (13) 和式 (20) 代入式 (19),化简得:

$$\frac{K_1}{K_2}=\frac{\frac{C_D\rho_k\pi r_1^2}{2\times\frac{4}{3}\pi r_1^3\rho}}{\frac{C_D\rho_k\pi r_2^2}{2\times\frac{4}{3}\pi r_2^3\rho}}=\frac{r_2}{r_1}\tag{21}$$

式中: $r_1$  为 7 mm 球形破片半径, $r_2$  为 8 mm 球形破片半径。

通过理论计算,7 mm 和 8 mm 球形破片衰减系数之比为 1.143,通过试验测得两类破片的平均速度衰减系数之比为 1.038。根据理论计算和试验结果可知,在一定的速度范围内,球形破片的速度衰减系数随破片半径的增加而减小。

对比直径 8 mm 球形破片和 8 mm×8 mm×7.05 mm 长方体破片,同样可以忽略空气密度,通过式 (17) 计算出长方体破片的迎风面积为 71.77mm<sup>2</sup>,破片质量为 7.94g。两类破片的迎风面积比为 0.7,破片质量比为 0.592。两类破片平均速度衰减系数相差 1.27%,二者的存速能力相仿。

利用速度衰减系数公式和迎风面积计算公式,反算得到初速 1 300~2 100 m/s 范围内,静爆试验回收破片和规则破片形状系数、阻力系数的乘积,如表 3 所示。从表中可以看出,形状系数与阻力系数的乘积越大,破片速度衰减系数越大。长方体规则破片的速度衰减系数、形状系数与阻力系数的乘积普遍大于静爆试验回收破片。静爆试验回收破片的速度衰减系数、形状系数与阻力系数的乘积并不随

破片初速增加而显著变化,而是在某一个数值上下波动。初速 1 300~2 100 m/s 范围内,长方体规则破片的平均速度衰减系数、形状系数与阻力系数的乘积分别为 0.006 0 和 0.136 4,而静爆试验回收长方体破片的平均速度衰减系数、形状系数与阻力系数的乘积分别为 0.007 1 和 0.160 6。表明,相较于长方体规则破片,静爆试验回收破片在空气中飞行受到的阻力更大,速度衰减更快。

表 3 初速 1 300~2 100 m/s 范围内长方体破片速度衰减情况

Table 3 Velocity attenuation of cuboid fragments in the range of initial velocity 1 300~2 100 m/s

| 破片类型        | 初速<br>/(m·s <sup>-1</sup> ) | 速度衰减<br>系数 | 形状系数与阻力<br>系数的乘积 |
|-------------|-----------------------------|------------|------------------|
| 长方体规则破片     | 1 349.00                    | 0.006 50   | 0.147 36         |
|             | 1 409.00                    | 0.006 57   | 0.148 94         |
|             | 1 507.99                    | 0.005 71   | 0.129 45         |
|             | 1 579.00                    | 0.005 53   | 0.125 37         |
|             | 1 736.99                    | 0.005 79   | 0.131 26         |
|             | 1 824.00                    | 0.005 71   | 0.129 45         |
|             | 2 050.00                    | 0.006 31   | 0.143 05         |
|             | 2 113.89                    | 0.008 15   | 0.184 76         |
| 静爆试验回收长方体破片 | 1 335.36                    | 0.006 59   | 0.149 40         |
|             | 1 428.22                    | 0.007 49   | 0.169 80         |
|             | 1 541.85                    | 0.007 37   | 0.167 08         |
|             | 1 631.42                    | 0.006 66   | 0.150 98         |
|             | 1 653.59                    | 0.008 00   | 0.181 36         |
|             | 1 765.34                    | 0.005 90   | 0.133 75         |
|             | 1 775.39                    | 0.007 76   | 0.175 92         |
|             | 1 835.65                    | 0.005 29   | 0.119 93         |
|             | 1 857.00                    | 0.007 64   | 0.173 20         |
|             | 2 113.89                    | 0.008 15   | 0.184 76         |

3 结束语

利用 25 mm 口径弹道炮对直径 7 mm 和 8 mm 球形破片、8 mm×8 mm×7.05 mm 长方体破片及其静爆试验回收破片进行了飞行速度衰减规律测试试验,数据拟合得到了破片速度衰减系数,以及球形和长方体破片速度衰减系数与马赫数之间的关系,得出如下结论:

- ①直径 7 mm 和 8 mm 球形破片、8 mm×8 mm×7.05 mm 长方体破片及其静爆试验回收破片的平均衰减系数分别为 0.007 017,0.006 759,0.006 673 和 0.007 085。
- ②对于球形破片,半径越大,破片速度衰减系数越小。4.7 g 球形破片和 7.94 g 长方体破片的平均速度衰减系数相近。
- ③静爆试验回收长方体破片速度衰减系数散布

较大,且平均速度衰减系数比同质量规则长方体破片大。静爆试验回收长方体破片更接近战斗部爆炸后飞散破片的真实情况,试验结果对于预制破片战斗部威力评估具有指导意义。

## 参考文献

- [1] 卢芳云. 武器毁伤与评估[M]. 北京:科学出版社,2021:152-168.  
LU Fangyun. Weapon damage and assessment [M]. Beijing: Science Press,2021:152-168. (in Chinese)
- [2] 徐豫新. 破片毁伤效应与防护技术[M]. 北京:北京理工大学出版社,2020.  
XU Yuxin. Damaging effect of ballistic fragments and protection technics[M]. Beijing:Beijing Institute of Technology Press,2020. (in Chinese)
- [3] 黄佳豪,郑宇轩,王斌,等. 间隔双破片对2A12铝合金靶板的联合毁伤和穿透能力研究[J]. 兵器装备工程学报,2023,44(S1):88-92.  
HUANG Jiahao, ZHENG Yuxuan, WANG Bin, et al. Study on combined damages and penetration abilities of interval dual fragments to 2A12 aluminum alloy target plates[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2023, 44 ( S1 ): 88 - 92. (in Chinese)
- [4] 李巧歌,梁增友,盛鹏,等. 碳纤维复合靶板抗破片侵彻弹道极限[J]. 复合材料学报,2024,42(2):1-10.  
LI Qiaoge, LIANG Zengyou, SHENG Peng, et al. Ballistic limit velocities of carbon fiber material target plate against fragment penetration[J]. Acta Materiae Compositae Sinica, 2024, 42 ( 2 ): 1-10. (in Chinese)
- [5] 易春林,李丽萍,李广嘉,等.  $\varphi 8$  mm 钨球破片速度预测不确定度的评定方法[J]. 测试技术学报,2014,28(4):288-292.  
YI Chunlin, LI Liping, LI Guangjia, et al. Evaluation method of prediction uncertainty of  $\varphi 8$  mm spherical fragment speed[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 28(4):288-292. (in Chinese)
- [6] 易春林,李丽萍,吕永柱,等.  $\Phi 8$  钨球破片速度衰减试验及速度预报方法研究[J]. 弹箭与制导学报,2014,34(6):61-63.  
YI Chunlin, LI Liping, LY Yongzhu, et al. Study on velocity attenuation regularity of 8 tungsten spherical fragment and speed forecast [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(6):61-63. (in Chinese)
- [7] 谭多望,温殿英,张忠斌,等. 球形破片长距离飞行时速度衰减规律研究[J]. 高压物理学报,2002,16(4):271-275.  
TAN Duowang, WEN Dianyong, ZHANG Zhongbin, et al. Long-distance flight performances of spherical fragments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16 ( 4 ): 271 - 275. (in Chinese)
- [8] 全嘉林,苗润源,梁争峰. 不同类型预制破片速度衰减规律及迎风面积的修正[J]. 爆破器材,2019,48(6):28-32.  
QUAN Jialin, MIAO Runyuan, LIANG Zhengfeng. Velocity attenuation rule of different prefabricated fragments and correction of windward area [J]. Explosive Materials, 2019, 48 ( 6 ): 28 - 32. (in Chinese)
- [9] 张华丽. 典型破片速度衰减规律实验研究[D]. 南京:南京理工大学,2015.  
ZHANG Huali. Experimental study on velocity attenuation law of typical fragments [D]. Nanjing: Nanjing University of Science and Technology, 2015. (in Chinese)
- [10] 竺伟梁,程春,庞兆君,等. 三棱柱形大长径比预制破片速度衰减规律研究[J]. 弹箭与制导学报,2021,41(2):141-144.  
ZHU Weiliang, CHENG Chun, PANG Zhaojun, et al. Research on the velocity attenuation rule of large-aspect ratio of triangular prism prefabricated fragments [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2021, 41(2):141-144. (in Chinese)
- [11] 王满林,李法涛,于洪海,等. 高空破片速度衰减规律试验研究[J]. 兵器装备工程学报,2022,43(12):172-176.  
WANG Manlin, LI Fatao, YU Honghai, et al. Experimental study on velocity attenuation law of fragments at a high altitude [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2022, 43 ( 12 ): 172 - 176. (in Chinese)
- [12] 马营,胡杰,冯志威,等. 破片模拟弹速度衰减规律试验研究[J]. 兵器装备工程学报,2024,45(2):54-61.  
MA Ying, HU Jie, FENG Zhiwei, et al. Experimental study on velocity attenuation law of fragment simulated projectile [J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering, 2024, 45 ( 2 ): 54 - 61. (in Chinese)
- [13] HU J, CHEN H, YU Y, et al. Experimental study on motion law of the fragment at hypersonic speed [J]. Processes, 2023, 11(4):1078.
- [14] LOTH E, DASPIT J T, JEONG M, et al. Supersonic and hypersonic drag coefficients for a sphere[J]. AIAA, 2021, 59:3261-3274.
- [15] NING J G, DUAN Y, XU X Z, et al. Velocity characteristics of fragments from prismatic casing under internal explosive loading[J]. International Journal of Impact Engineering, 2017, 109:29-38.
- [16] 王树山. 终点效应学[M]. 北京:科学出版社,2019:180-209.  
WANG Shushan. Terminal effect [M]. Beijing: Science Press, 2019:180-209. (in Chinese)
- [17] 刘建斌,郭德龙,任云燕,等. 球形破片空气阻力系数和飞行特性研究[J]. 北京理工大学学报,2023,43(7):676-684.  
LIU Jianbin, GUO Delong, REN Yunyan, et al. Air resistance coefficient and flight speed characteristics of spherical fragments [J]. Transactions of Beijing Institute of Technology, 2023, 43(7):676-684. (in Chinese)
- [18] 石志杰,姜春兰. 不同形状预制破片的速度衰减特性及极限贯穿速度分析[J]. 弹箭与制导学报,2004(S2):312-314.  
SHI Zhijie, JIANG Chunlan. Analysis of velocity decay property and ballistic limit of different shape pre-formed fragment [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2004(S2):312-314. (in Chinese)
- [19] 马玉媛. 小型预制破片的速度衰减和侵彻深度的研究[J]. 兵工学报,1981,2(1):52-58.  
MA Yuyuan. A study on the velocity dampings and penetrating depth of small preformed fragments [J]. Acta Armamentarii, 1981, 2(1):52-58. (in Chinese)