

# 高压物理学报

## 圆柱形装药爆炸驱动球形破片的飞散特性

申仕良 李金柱 马峰 姚志彦

### Dispersion Characteristics of Spherical Fragments Driven by Cylindrical Charge

SHEN Shiliang, LI Jinzhu, MA Feng, YAO Zhiyan

引用本文:

申仕良, 李金柱, 马峰, 等. 圆柱形装药爆炸驱动球形破片的飞散特性[J]. 高压物理学报, 2025, 39(2):025101. DOI: 10.11858/gywlb.20240865

SHEN Shiliang, LI Jinzhu, MA Feng, et al. Dispersion Characteristics of Spherical Fragments Driven by Cylindrical Charge[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2025, 39(2):025101. DOI: 10.11858/gywlb.20240865

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.11858/gywlb.20240865>

## 您可能感兴趣的其他文章

### Articles you may be interested in

#### 柱状装药预制破片缩比战斗部爆炸冲击波和破片的作用时序

Blast Wave and Time Sequence of Prefabricated Fragments for Scaled Warhead with Cylindrical Charge  
高压物理学报. 2020, 34(1): 015101 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190780>

#### 爆炸驱动亚毫米级金属颗粒群的飞散特性

Scattering Characteristics of Sub-Millimeter Metal Particle Group Driven by Explosion  
高压物理学报. 2019, 33(6): 065104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20190741>

#### 高压气体载荷下预制破片与空气冲击波的运动关系

Study on Motion Law of Prefabricated Fragment and Air Shock Wave under High Pressure Gas Load  
高压物理学报. 2021, 35(5): 052301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210749>

#### 爆轰驱动下45钢半球壳膨胀断裂破片回收研究

Recovery of Expansion Fracture Fragments of a 45 Steel Hemispherical Shell Driven by Detonation  
高压物理学报. 2023, 37(2): 025301 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220665>

#### 椭圆截面战斗部爆炸驱动破片作用过程的数值模拟

Numerical Simulation of Fragmentation Process Driven by Explosion in Elliptical Cross-Section Warhead  
高压物理学报. 2022, 36(2): 025104 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20210856>

#### PELE侵彻金属靶破碎效应的相似分析

Similar Analysis of PELE Penetrating Metal Target Fragmentation Effect  
高压物理学报. 2023, 37(1): 015103 <https://doi.org/10.11858/gywlb.20220662>

# 圆柱形装药爆炸驱动球形破片的飞散特性

申仕良, 李金柱, 马 峰, 姚志彦

(北京理工大学爆炸科学与安全防护全国重点实验室, 北京 100081)

**摘要:** 为了研究球形预制钨破片在圆柱形装药驱动下的飞散规律, 开展了预制破片战斗部飞散试验。针对传统梳状靶无法测量破片群速度分布的问题, 设计并制作了一种全新的交叉梳状靶, 成功测得了多个破片穿靶产生的脉冲信号和着靶位置。采用 LS-DYNA 模拟研究了圆柱形装药爆炸驱动球形破片的飞散特性。结果表明: 数值模拟结果与试验结果吻合良好, 交叉梳状测速靶能够较为准确地测量多个破片的飞散速度; 增加装药长径比可以削弱装药两端稀疏波对破片速度的影响, 但效果随长径比增加而逐渐减弱。

**关键词:** 交叉梳状靶; 测速装置; 预制破片; 飞散速度; 长径比

**中图分类号:** O389; O521.3

**文献标志码:** A

预制破片杀爆战斗部被广泛应用于现代战争中, 可以高效摧毁巡航导弹、飞机、雷达和轻型装甲车辆等高价军事目标。它主要通过破片和冲击波 2 种毁伤元实现毁伤效果<sup>[1]</sup>。破片速度是战斗部结构设计及优化的重要指标, 准确测量破片速度对于战斗部研发至关重要。

在破片飞散特性研究中, Gurney<sup>[2]</sup> 最早提出了用于计算破片初始飞散速度的 Gurney 公式, 然而, 该公式仅能近似估算破片的最大速度, 无法准确描述多个破片沿装药轴线的速度分布。为解决这一问题, 国内外众多学者在考虑端面效应、稀疏波效应及炸药形状等因素的情况下, 对 Gurney 公式进行了理论修正<sup>[3-9]</sup>。Taylor 公式<sup>[10]</sup>能够快速估算破片飞散角, 但其假设所有破片的飞散角一致, 导致计算结果与实际情况存在较大偏差。Shapiro 公式<sup>[11]</sup>考虑了破片速度沿装药轴线的分布情况, 可用于圆柱、圆锥及弧形壳体的破片飞散角计算, 现已成为常用的破片飞散角计算方法。

在破片飞散速度测量方面, 国内学者利用不同的破片测试装置开展了大量研究。冯顺山等<sup>[12]</sup>开展了静爆试验, 通过脉冲 X 射线摄影方法测试了沿弹轴的破片群平均速度。Huang 等<sup>[13]</sup>利用 X 射线摄影技术, 开展了一端起爆情况下的圆柱形装药静爆试验, 获得了各破片群沿装药轴线方向的平均飞散速度。王高等<sup>[14]</sup>使用电阻网靶法测得了破片群的平均飞行速度, 但该方法的测量精度较低。田会等<sup>[15]</sup>通过环形光幕靶测速装置获得了破片的平均飞行速度, 但未测得每个破片的具体速度。马竹新等<sup>[16]</sup>通过可变阻抗靶网法实现了多个着靶破片的识别和对应, 但具体飞散速度计算仍需改进。戴志远等<sup>[17]</sup>通过高速摄影和帧间分析法成功测得了多个破片的飞散速度。随着计算机技术的发展, 数值模拟在破片飞散特性研究中起到了重要的辅助作用<sup>[18-21]</sup>, 可用于验证试验结果, 并深入探究不同因素对飞散特性的影响。

现有破片测试方法多样, 如 X 射线脉冲摄像法、靶网测速法、光幕测速法、电阻网靶法、传统梳状靶法等<sup>[22]</sup>。X 射线摄影或激光测速方法虽然可以测得多个预制破片速度, 但是在瞬态高温、高压及强冲击条件下拍摄的图像质量较差, 难以识别和对应众多破片<sup>[23]</sup>; 传统靶网法只能记录首个破片的初速度, 无法测试后续穿靶破片速度; 光幕靶和电阻网靶虽然能够测量多个破片速度, 但是能够测量的破片数量有限, 难以与穿靶破片对应, 且试验中需要对测试装置进行防护<sup>[24]</sup>; 传统梳状靶仅能测量破片群的

\* 收稿日期: 2024-08-05; 修回日期: 2024-08-28

作者简介: 申仕良(1999—), 男, 硕士研究生, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: shen\_shiliang@126.com

通信作者: 李金柱(1972—), 男, 博士, 副教授, 主要从事爆炸与冲击动力学研究. E-mail: lijinzhu@bit.edu.cn

最高速度,无法反映速度分布情况。

为弥补现有测试方法的不足,本研究在传统梳状靶的基础上,设计一种全新的交叉梳状靶,通过静爆试验研究球形破片在圆柱形装药驱动下的飞散特性,测试预制破片群中多个破片的飞散速度及速度分布,此外,利用 LS-DYNA 模拟起爆及破片飞散过程,分析交叉梳状测速装置的可靠性,并研究不同装药长径比下稀疏波效应对破片速度轴向分布的影响。

## 1 试验方案设计与布局

### 1.1 弹丸结构设计与加工

试验设计的弹丸结构如图 1 所示。弹丸主体由装药、破片和内外衬 3 部分组成。装药为压装圆柱形 8701 炸药,直径为 9.1 cm,高为 18.2 cm,密度为  $1.7 \text{ g/cm}^3$ 。破片为 93 钨合金球形破片,密度为  $17.6 \text{ g/cm}^3$ ,直径为  $(0.70 \pm 0.05) \text{ cm}$ ,单个破片质量约为 3.16 g;每列破片共 15 个,环向共 84 列,总破片数为 1260,破片总质量约为 4.19 kg。内外衬为 1.5 mm 厚高性能聚乙烯圆柱薄壳套筒,对装药外围的预制破片起固定支撑作用。破片采用交错紧密排布方式嵌于内外衬中,其排布方式如图 2 所示。雷管位于弹丸上端面中心,试验时,通过引线接通并引爆,实现上端面中心起爆。



图 1 试验用弹丸照片

Fig. 1 Photo of projectile in the test

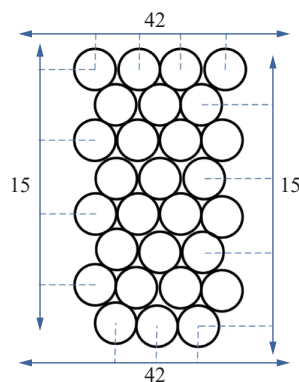


图 2 球形破片交错紧密排布方式

Fig. 2 Staggered tight arrangement of spherical fragments

### 1.2 破片速度测试装置原理与设计

在传统梳状靶的基础上,设计并加工了一种全新的交叉分区梳状靶,能够对多个预制破片进行测试,并获取其着靶位置。交叉梳状靶由前靶、5 cm 厚泡沫夹层和后靶 3 部分组成。为了尽可能多地获得每列破片的着靶情况,将梳状靶设计成长条形,交叉梳状靶的整体尺寸为  $120 \text{ cm} \times 80 \text{ cm}$ ,其结构如图 3 所示。前靶梳齿横向排列,分为 24 个纵向分区;后靶梳齿竖向排列,分为 16 个横向分区;两者重叠

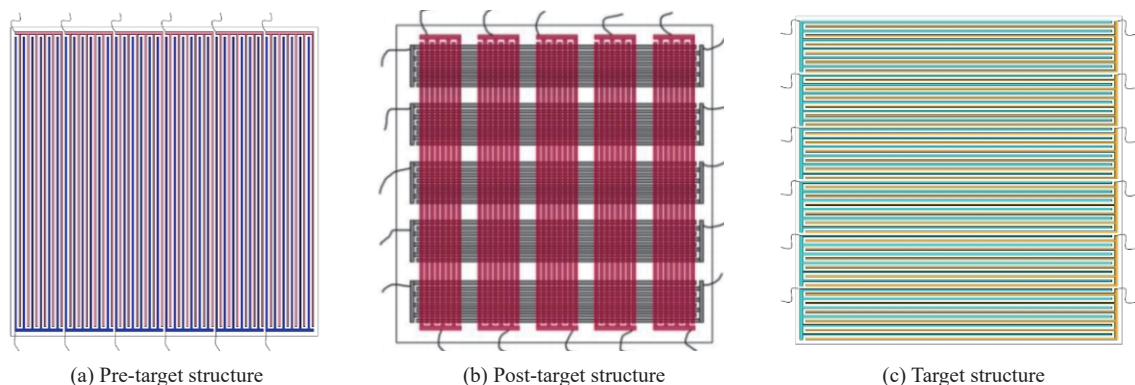


图 3 交叉梳状靶结构示意图

Fig. 3 Schematic diagram of cross-combed target structure



形成多个交叉分区。根据破片直径设定每个分区内的梳齿宽度和相邻梳齿间距,确保击中靶板的破片能输出电信号,同时避免细小破片导通梳齿正负极,降低干扰信号。加工完成后的交叉梳状靶如图 4 所示。将交叉梳状靶固定在靶架上,并用沙袋固定靶架。

试验前,弹丸上端接通触发线。起爆后,触发线产生触发信号,作为时间基准用于确定脉冲信号的时间零点。破片击中靶板时,钨破片导通梳齿正负极并输出中靶信号,破片穿透后电极恢复断路状态。通过分析靶板产生的电信号,可确定破片在纵向和横向分区的着靶时间。破片速度的计算方法有 2 种:(1)通过测量弹丸中心到着靶点的距离,将其除以破片的飞行时间得到破片速度;(2)通过泡沫夹层厚度与前后靶板穿孔时间差计算破片速度。理想情况下,每个破片在前后靶板上产生的信号应一一对应。

试验所用的预制破片测速系统如图 5 所示。该系统包括交叉梳状靶、脉冲成形网络、RDX 信号转换器和数据处理终端。试验中,对前靶的 24 个分区和后靶的 16 个分区进行编号,并通过导线连接至 40 条通路,构成完整的脉冲成形网络。当破片穿过测速靶时,靶板产生的电信号通过脉冲成形网络传输至 RDX 信号转换器,进而转换为示波器信号,最终储存在数据处理终端。



(a) Signal converters and data processing terminals



(b) Pulse forming network

图 5 预制破片测速装置

Fig. 5 Velocity measurement system of preformed fragment

### 1.3 试验装置与场地布局

试验布局如图 6 所示。将弹丸放置在距地面 1.50 m 的高度处,交叉梳状靶的靶架高度为 0.90 m,使梳状靶中心和弹丸中心大致处于同一高度。为了使测速靶能够捕捉到弹丸每列所有破片,并防止测

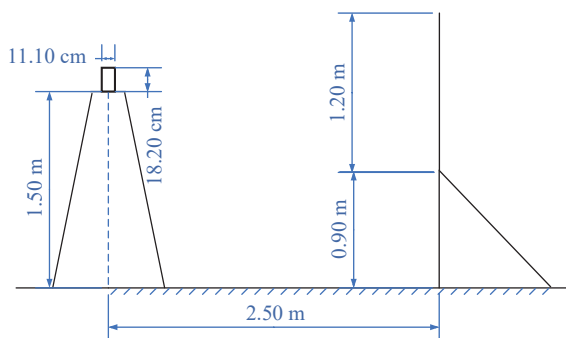
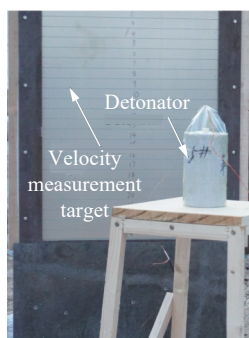


图 6 爆炸试验布局

Fig. 6 Layout of explosion test



速靶在试验过程中受冲击波影响而产生过度变形,将测速靶置于距弹丸约 2.50 m 的位置。共进行 4 次试验,交叉梳状靶编号及弹靶距离  $l$  如表 1 所示。

表 1 速度测量中靶板设置  
Table 1 Target plate setting for velocity measurement

| Test No. | Target No. | $l/\text{m}$ |
|----------|------------|--------------|
| 1        | 1          | 2.40         |
| 2        | 2          | 2.50         |
| 3        | 3          | 2.53         |
| 4        | 4          | 2.53         |

## 1.4 试验结果与分析

通过弹靶距离和测速靶宽度预估测速靶上的破片穿孔列数。如图 7 所示,设交叉梳状靶宽度为  $d$ ,弹丸中心与测速靶左右两侧的夹角为  $\varphi$ ,则有

$$\varphi = 2 \arctan \frac{d}{2l} \quad (1)$$

试验中最近和最远的弹靶距离分别为 2.40 和 2.53 m,对应的  $\varphi$  分别为  $18.925^\circ$  和  $17.984^\circ$ 。试验中弹丸相邻两列破片的夹角为  $4.286^\circ$ ,根据式 (1),理论上 4 个交叉梳状靶上将各有 4 列破片穿孔。

本试验所使用的弹丸装药形状为圆柱形,爆速为 8.3 km/s,在装药上端面中心单点起爆下,根据 Shapiro 公式计算的破片飞散角 ( $\theta$ ) 的轴向分布如图 8 所示。相邻两列预制破片的飞散角在起爆端处为  $3.221^\circ$ ,沿轴线逐渐增大,在轴线中心达到最大值  $4.902^\circ$ ,随后在另一端面降至  $0.328^\circ$ 。除两端面的破片飞散角较小外,其余位置的飞散角接近  $4.8^\circ$ 。

按照靶场布置,弹丸上下端面处破片与交叉梳状靶上下边缘的夹角为  $13.341^\circ$ ,根据 Shapiro 公式的计算结果,在试验设定的弹靶距离下,起爆端处的破片和最下端破片都能着靶,理论上交叉梳状靶可以采集到每列全部 15 个破片的速度和位置信息。

试验后,各交叉梳状测速靶上的破片穿孔情况如图 9 所示。观察不同靶板的破片穿孔分布可知,上端面中心单点起爆下,各靶板的破片着靶效果较好,4 块交叉梳状测速靶上均观察到 4 列破片穿孔,实际着靶列数与理论预估一致。受稀疏波效应的影响,靠近起爆端的破片分布较为稀疏。部分破片的实际穿孔位置与理论位置存在偏差,未能在与其他破片穿孔近似直线的位置上着靶,主要原因是装填时破片未能完全按紧密排布方式排列,导致击中靶板时未能等间距着靶。

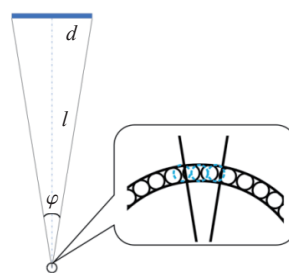


图 7 理论着靶破片列数示意图

Fig. 7 Schematic diagram of the theoretical number of fragment penetration rows

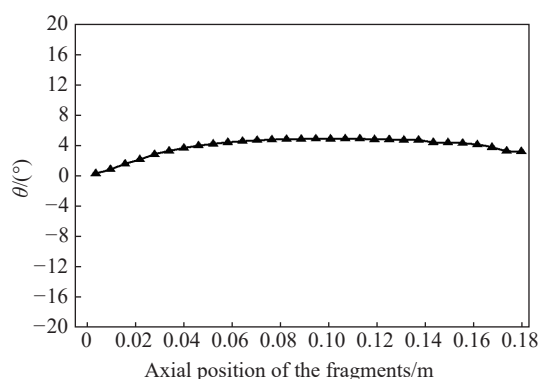


图 8 由 Shapiro 公式得到的飞散角沿装药轴线方向的分布

Fig. 8 Distribution of dispersion angles along the charge axis direction obtained by Shapiro's equation

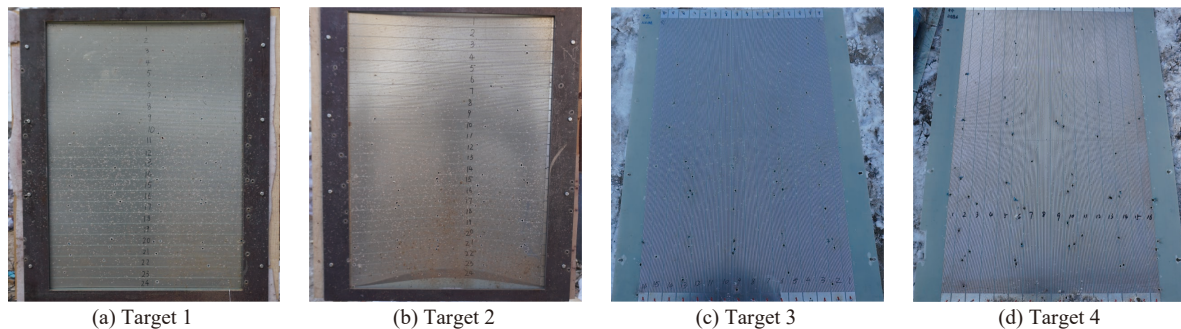


图 9 不同测速靶上的破片穿孔情况

Fig. 9 Fragment perforations on different velocity measurement targets

对各交叉梳状测速靶的破片穿孔情况进行统计,结果如表 2 所示。4 块靶板上的总破片穿孔数和每列穿孔数均略低于理论值。上端面中心单点起爆时,部分爆轰产物在起爆端飞散较快,能量耗散较快,使得端部破片的飞散角较大,破片未能着靶。图 10 为某破片穿透梳状靶的局部放大图。由图 10 可知,少数预制破片在爆炸冲击载荷作用下发生碎裂,与文献 [25] 中发现的钨球破片在试验后出现的轻微变形和碎裂现象一致。碎裂的破片动能较小,未能完全穿透靶板,导致实际穿孔数略少于理论值。

表 2 各交叉梳状靶上破片穿孔数统计

Table 2 Statistics of the number of fragment perforations on each cross-combed target

| Target No. | Number of perforations |            |            |            | Total |
|------------|------------------------|------------|------------|------------|-------|
|            | 1st column             | 2nd column | 3rd column | 4th column |       |
| 1          | 12                     | 11         | 12         | 12         | 47    |
| 2          | 12                     | 11         | 11         | 13         | 47    |
| 3          | 12                     | 11         | 12         | 12         | 47    |
| 4          | 12                     | 14         | 12         | 12         | 50    |



图 10 破片穿透梳状靶的局部状态

Fig. 10 Localized condition of fragment penetrations through the comb-shaped target

选取交叉梳状靶 3 进行分析,如图 11 所示。交叉梳状靶 3 前后共有 4 列破片穿孔,每列破片穿孔在纵向分区内的位置连线接近直线。观察后靶板穿孔分布情况发现,每列破片均在相邻的 2~3 个分区内形成弹孔,相邻两列破片的间距较为一致。

根据交叉梳状靶 3 的破片穿孔情况,对每列破片从上至下进行编号,并计算飞散角,结果如表 3 所示。由表 3 中的数据可知,破片的飞散角由上至下呈现出先减小后增大的规律。例如:第 1 列中,1 号破片的飞散角为  $10.30^\circ$ ,4 号破片的飞散角为  $1.36^\circ$ ;第 2 列中,1 号破片的飞散角为  $8.70^\circ$ ,4 号破片的飞散角为  $1.08^\circ$ 。飞散角最小的破片主要位于每列的 4 号破片,测速靶中心附近的破片飞散角都相对较小。

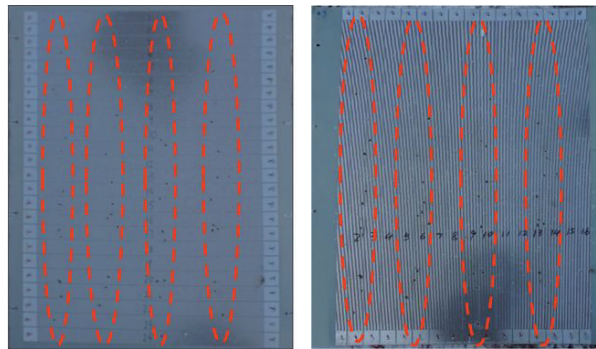


图 11 测速靶 3 的前靶和后靶穿孔分布

Fig. 11 Fragment perforation distribution on the front and rear targets of the velocity measurement target 3

表 3 测速靶 3 上着靶破片的飞散角

Table 3 Dispersion angles of the fragments on the velocity measurement target 3

| Serial No. | $\theta/(^{\circ})$ |            |            |            |
|------------|---------------------|------------|------------|------------|
|            | 1st column          | 2nd column | 3rd column | 4th column |
| 1          | 10.30               | 8.70       | 10.72      | 9.07       |
| 2          | 6.32                | 4.34       | 5.85       | 3.66       |
| 3          | 3.34                | 1.22       | 2.85       | 1.18       |
| 4          | 1.36                | 1.08       | 1.90       | 0.85       |
| 5          | 1.69                | 2.85       | 1.04       | 1.10       |
| 6          | 2.90                | 3.80       | 2.67       | 2.71       |
| 7          | 4.97                | 4.40       | 4.99       | 4.44       |
| 8          | 5.42                | 5.04       | 5.47       | 4.95       |
| 9          | 8.59                | 9.45       | 8.72       | 5.06       |
| 10         | 8.61                | 10.10      | 8.90       | 8.46       |
| 11         | 9.99                | 10.87      | 9.95       | 9.48       |
| 12         | 11.70               |            | 10.66      | 11.13      |

将试验测得的实际飞散角与 Shapiro 公式的计算结果进行对比,发现靠近两端的破片实际飞散角较大,约为 Shapiro 公式计算结果的 2 倍,其余位置的实际飞散角均小于 Shapiro 公式计算结果。此外,在实际测量中未观察到 Shapiro 公式预测的平台段。由于破片的实际飞散受试验条件和环境影响,Shapiro 公式的计算结果可以作为预估参考,但无法完全反映实际情况。

图 12 为试验中某破片穿过交叉梳状靶后测得的典型脉冲信号。根据交叉梳状靶的测速原理,利用泡沫夹层的厚度除以破片先后穿过前后测速靶的时间差,计算得到测速靶 3 上第 1 列和第 2 列着靶破片的飞散速度( $v$ )。尽管破片穿透前后靶板时存在一定角度和轻微的速度损失,但是影响较小,误差在可接受范围内,处理后的破片速度数据如表 4 所示。

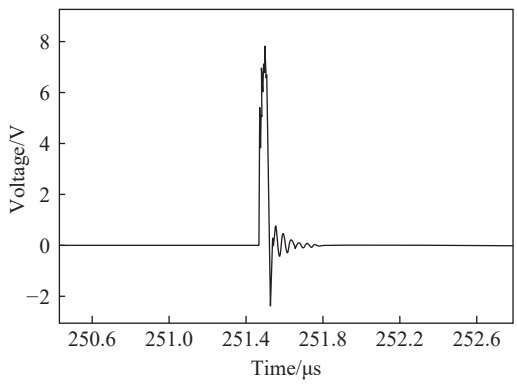


图 12 破片穿靶后产生的典型脉冲信号

Fig. 12 Typical pulse signal generated after fragment penetration of the target



由表 4 可知：试验测得的第 1 列破片的最大速度为 1 564.89 m/s, 平均速度为 1 286.13 m/s; 第 2 列破片的最大速度为 1 564.86 m/s, 平均速度为 1 312.22 m/s。两列破片的飞散速度沿轴向呈先增大后减小的变化趋势, 且两端面附近的破片速度与最高速度之间的差值较大。

表 4 试验测得的破片飞散速度

Table 4 Measured fragment dispersion velocities from the test

| Serial No. | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |            | Serial No. | $v/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |            |
|------------|----------------------------------|------------|------------|----------------------------------|------------|
|            | 1st column                       | 2nd column |            | 1st column                       | 2nd column |
| 1          | 874.96                           | 988.41     | 7          | 1 457.39                         | 1 489.04   |
| 2          | 970.88                           | 964.78     | 8          | 1 508.74                         | 1 543.37   |
| 3          | 1 105.71                         | 1 142.22   | 9          | 1 562.08                         | 1 564.86   |
| 4          | 1 090.10                         | 1 055.14   | 10         | 1 564.89                         | 1 483.69   |
| 5          | 1 256.42                         | 1 396.95   | 11         | 1 385.48                         | 1 380.44   |
| 6          | 1 380.11                         | 1 425.48   | 12         | 1 276.79                         |            |

统计其余测速靶采集到的脉冲信号, 并将其与破片穿孔数进行对应, 发现未能记录到部分脉冲信号, 原因可能是同一分区内多个破片穿孔时间过于接近, 脉冲信号成形时间不足, 导致无法产生第 2 个脉冲信号, 最终表现为脉冲信号略少于破片穿孔数, 后续将对交叉梳状靶进行改进。

## 2 基于数值模拟结果的讨论与分析

### 2.1 计算模型及材料参数

为了进一步分析和验证试验测得的破片速度数据的准确性, 并探讨如何优化试验设计, 采用 LS-DYNA 进行数值模拟, 利用流固耦合算法模拟炸药爆轰驱动破片飞散过程。空气和炸药采用欧拉网格划分, 破片采用拉格朗日网格划分, 将破片单元耦合在空气和炸药构成的多物质混合单元中。由于聚乙烯内外衬较薄, 对破片飞散过程的影响有限, 因此, 在有限元模型中不考虑内外衬结构的影响。有限元计算模型如图 13 所示。

预制破片材料为 93 钨, 考虑到其强度较高, 破片材料采用随动硬化模型。93 钨材料模型参数如表 5 所示, 其中:  $\rho$  为密度,  $\sigma_s$  为极限强度,  $E$  为弹性模量,  $G$  为剪切模量,  $\mu$  为泊松比。

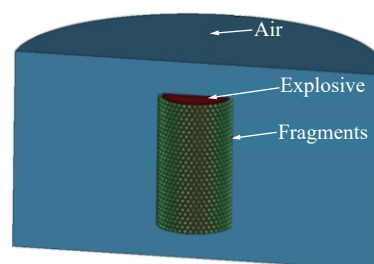


图 13 有限元模型

Fig. 13 Finite element model

表 5 93 钨球形破片的材料参数

Table 5 Material parameters of 93 tungsten spherical fragments

| $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $\sigma_s/\text{GPa}$ | $E/\text{GPa}$ | $G/\text{GPa}$ | $\mu$ |
|--------------------------------------|-----------------------|----------------|----------------|-------|
| 17.6                                 | 1.506                 | 300            | 137            | 0.22  |

炸药材料为 8701 炸药, 采用高能炸药材料模型和 JWL 状态方程描述爆炸过程。JWL 状态方程为

$$p = A \left( 1 - \frac{\omega}{R_1 V} \right) e^{-R_1 V} + B \left( 1 - \frac{\omega}{R_2 V} \right) e^{-R_2 V} + \frac{\omega e}{V} \quad (2)$$

式中:  $p$  为压力,  $A$ 、 $B$ 、 $R_1$ 、 $R_2$ 、 $\omega$  为状态方程参数,  $e$  为初始比内能,  $V$  为相对比容。

8701 炸药的部分材料参数如表 6 所示, 其中:  $v_D$  为爆速,  $p_{CJ}$  为爆压。

表 6 8701 炸药性能参数  
Table 6 8701 explosive performance parameters

| $\rho/(\text{g}\cdot\text{cm}^{-3})$ | $v_D/(\text{km}\cdot\text{s}^{-1})$ | $p_{CJ}/\text{GPa}$ | $A/\text{GPa}$ | $B/\text{GPa}$ | $R_1$ | $R_2$ |
|--------------------------------------|-------------------------------------|---------------------|----------------|----------------|-------|-------|
| 1.7                                  | 8.3                                 | 30                  | 581.4          | 9.801 6        | 4.1   | 1.4   |

采用\*MAT\_NULL 材料模型和线性多项式状态方程对空气介质进行描述,同时在空气域上下表面及侧面施加压力流出边界条件,空气密度为  $1.29 \text{ kg/m}^3$ 。

## 2.2 破片飞散特性仿真结果分析

选取相邻两列预制破片作为研究对象,提取数值模拟得到的速度数据,并与试验测得的破片飞散速度进行对比,结果如图 14 所示,其中:  $x$  为破片轴向位置。相邻两列破片的最大速度分别为  $1629.43$  和  $1666.52 \text{ m/s}$ ,与试验数据的差值分别为  $64.54$  和  $102.66 \text{ m/s}$ ;相邻两列破片的最小速度分别为  $963.79$  和  $990.53 \text{ m/s}$ ,与试验数据的差值分别为  $88.83$  和  $25.75 \text{ m/s}$ ;平均速度分别为  $1438.05$  和  $1482.51 \text{ m/s}$ ,与试验数据的差值分别为  $151.92$  和  $170.28 \text{ m/s}$ 。整体上看,数值模拟结果与试验结果吻合良好,表明试验中使用的交叉梳状测速靶能够可靠地测量破片速度,数值模拟结果进一步验证了试验测速装置的可靠性。

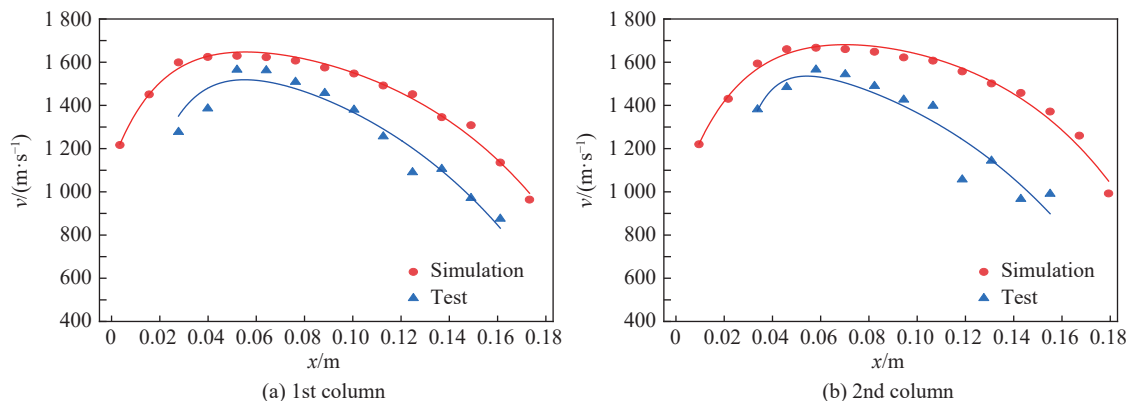


图 14 破片速度沿装药轴线的分布

Fig. 14 Distribution of fragments velocity along the axis of charge

相邻两列破片的实际飞散角与数值模拟结果的对比如图 15 所示。试验测得的破片飞散角与数值模拟结果拟合良好,整体略大于模拟结果。此外,数值模拟中两端破片的飞散角较大,验证了端部破片飞散角较大而未被靶板捕捉的现象。

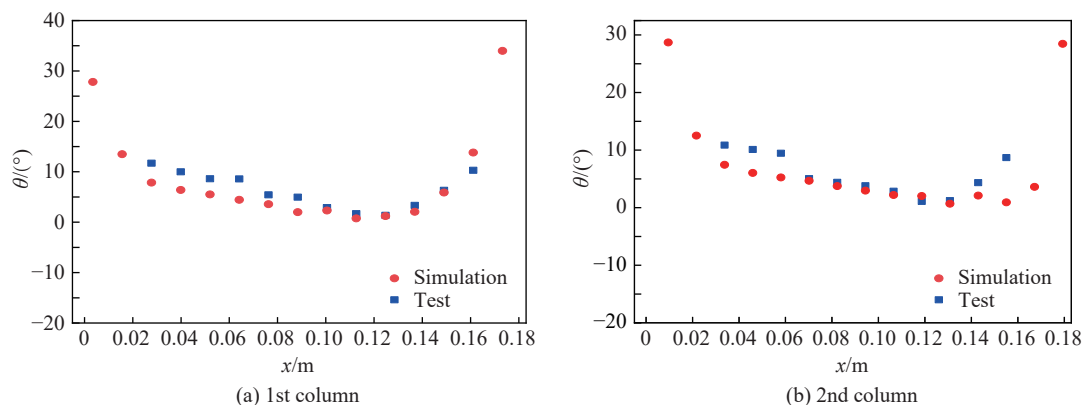


图 15 破片飞散角沿装药轴线的分布

Fig. 15 Distribution of dispersion angle along the axis of charge

### 2.3 稀疏波效应对破片速度的影响

在弹丸两端面处,受稀疏波效应的影响,试验测得的破片飞散速度与最高飞散速度之间的差异较大。为进一步研究稀疏波效应对破片飞散速度的影响,通过数值模拟研究了在长径比( $L/D$ )为 1、2、3、4 的装药驱动下破片的飞散特性,所有工况均采用上端面中心单点起爆。对预制破片轴向位置进行无量纲化处理,使用无量纲量  $x'=x/L$ 。图 16 给出了不同长径比战斗部破片飞散速度在无量纲量  $x'$  坐标下沿轴线的分布情况。从图 16 可以看出,稀疏波效应在弹丸两端面处的影响尤为显著。

对不同装药长径比下破片的最大速度  $v_{\max}$ 、最小速度  $v_{\min}$  以及平均速度  $v_{\text{ave}}$  进行统计,结果如

表 7 所示。当长径比从 1 增加到 2 时,最大速度和平均速度的增益分别为 196.45 和 203.29 m/s;长径比从 2 增加到 3 时,最大速度和平均速度的增益分别为 107.71 和 109.94 m/s;长径比从 3 增加到 4 时,最大速度和平均速度的增益分别为 18.68 和 43.33 m/s。由此可知,当长径比超过 3 时,稀疏波效应已被显著抑制,进一步增加长径比对于提升破片速度的效果有限。因此,在设计圆柱形装药预制破片战斗部时,建议将装药的长径比控制在 3~4 之间,以减少稀疏波效应对试验结果的影响,确保破片飞散速度达到最优效果。

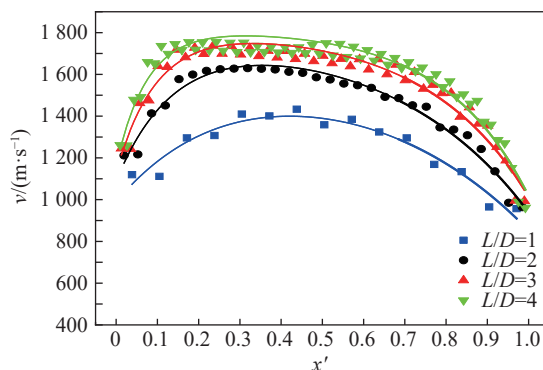


图 16 不同长径比装药结构的破片速度沿轴线的分布

Fig. 16 Distribution of fragments velocity along the axis of charges with different length-to-diameter ratios

表 7 不同长径比下的破片速度

Table 7 Fragments velocities under varying length-to-diameter ratios

| $L/D$ | $v_{\max}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $v_{\min}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ | $v_{\text{ave}}/(\text{m}\cdot\text{s}^{-1})$ |
|-------|-----------------------------------------|-----------------------------------------|-----------------------------------------------|
| 1     | 1432.98                                 | 956.72                                  | 1244.25                                       |
| 2     | 1629.43                                 | 963.78                                  | 1447.54                                       |
| 3     | 1737.14                                 | 993.59                                  | 1557.48                                       |
| 4     | 1755.82                                 | 961.62                                  | 1600.81                                       |

## 3 结 论

为了研究球形预制钨破片在圆柱形装药驱动下的飞散规律,设计并制作了一种全新的交叉梳状靶,通过静爆试验和数值模拟对装置的可行性进行了验证,得到以下主要结论。

(1) 根据预制破片尺寸调整梳齿的宽度和间距,可避免细小碎片导通梳齿,减少干扰信号,保证电信号输出,由此成功测得了多个预制破片的飞散速度和方向。试验中测得的破片穿孔列数与理论值一致,穿孔总数与理论值相近,说明交叉梳状靶有效;然而,部分脉冲信号未被捕捉到,因此,需进一步改进装置。

(2) 试验测得的破片飞散角与 Shapiro 公式计算结果存在显著差异,尤其在两端面处,实际飞散角约为理论值的 2 倍,且沿轴向呈先减小后增大的变化趋势。数值模拟验证了两端破片因飞散角大而未能着靶的情况。

(3) 受稀疏波的影响,两端面处破片飞散速度较低。增加长径比可提升破片的最大速度和平均速度;当长径比从 2 增加到 3 时,破片速度提升效果最为显著,当长径比增至 4 时,破片速度提升效果有限,表明装药长径比在 3~4 之间能够有效提升破片的飞散速度,并有效减少受稀疏波影响的破片数。



## 参考文献:

- [1] 洪豆, 郑宇, 李文彬, 等. 破片战斗部杀伤面积影响规律研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2021, 42(5): 37–42.  
HONG D, ZHENG Y, LI W B, et al. Research on influence law of fragment warhead's killing area [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2021, 42(5): 37–42.
- [2] GURNEY R W. The initial velocities of fragments from bombs, shells and grenades: BRL 405 [R]. Maryland: Army Ballistic Research Laboratory, 1943.
- [3] ZULKOSKI T. Development of optimum theoretical warhead design criteria: B015617 [R]. China Lake, California: Naval Weapons Center, 1976: 39–44.
- [4] CHARRON Y J. Estimation of velocity distribution of fragmenting warheads using a modified Gurney method [D]. Wright Patterson: Air Force Institute of Technology, 1979.
- [5] HENNEQUIN E. Influence of the edge effects on the initial velocities of fragments from a warhead [C]//Proceedings of the 9th International Symposium on Ballistics. Shrivenham, 1986.
- [6] POOLE C J, OCKENDON J, CURTIS J. Gas leakage from fragmentation warheads [C]//Proceedings of the 20th International Symposium on Ballistics. Florida, 2002.
- [7] 蒋浩征. 杀伤战斗部破片飞散初速  $v_0$  的计算 [J]. *兵工学报*, 1980(1): 68–79.  
JIANG H Z. Calculation of initial velocity  $v_0$  of fragments of a lethal warhead [J]. *Acta Armamentarii*, 1980(1): 68–79.
- [8] BACKOFEN J E. The effects of cylinder geometry and material on Gurney velocities and gas-push Gurney velocities measured during cylinder test experiments [R]. Oak Hill: BRIGS, 2002.
- [9] 宋锋, 蒋建伟. 杀爆战斗部设计专家系统研究 [J]. *弹箭与制导学报*, 2007, 27(4): 119–122.  
SONG F, JIANG J W. Research on the expert design system of blast and fragmentation warhead [J]. *Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance*, 2007, 27(4): 119–122.
- [10] TAYLOR G I. The fragmentation of tubular bombs [J]. *Scientific Papers of G I Taylor*, 1963, 3(44): 387–390.
- [11] LI Y, CHEN D, JIANG M, et al. Research on the characteristic of projectile fragments dispersion based on fragment warhead design [J]. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 2019, 573: 012104.
- [12] 冯顺山, 崔秉贵. 战斗部破片初速轴向分布规律的实验研究 [J]. *兵工学报*, 1987(4): 60–63.  
FENG S S, CUI B G. An experimental investigation for the axial distribution of initial velocity of shells [J]. *Acta Armamentarii*, 1987(4): 60–63.
- [13] HUANG G Y, LI W, FENG S S. Axial distribution of fragment velocities from cylindrical casing under explosive loading [J]. *International Journal of Impact Engineering*, 2015, 76: 20–27.
- [14] 王高, 尹国鑫, 李仰军, 等. 电阻网靶破片群速度测量方法 [J]. *探测与控制学报*, 2011, 33(3): 47–50, 55.  
WANG G, YIN G X, LI Y J, et al. Fragments velocity measuring based on resistor net target [J]. *Journal of Detection & Control*, 2011, 33(3): 47–50, 55.
- [15] 田会, 金朋刚, 田亚男, 等. 一种用于破片测速的环形光幕装置 [J]. *测试技术学报*, 2018, 32(4): 353–357.  
TIAN H, JIN P G, TIAN Y N, et al. Study on the circular ring light screen device for measuring velocity of flying fragments [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2018, 32(4): 353–357.
- [16] 马竹新, 王代华, 张瑞刚, 等. 基于可变阻抗靶网的多通道破片测速系统 [J]. *现代电子技术*, 2022, 45(11): 83–87.  
MA Z X, WANG D H, ZHANG R G, et al. Burst fragment's multi-channel speed measuring system based on variable impedance target [J]. *Modern Electronics Technique*, 2022, 45(11): 83–87.
- [17] 戴志远, 闫克丁. 基于高速相机的破片速度计算方法 [J]. *计算机与数字工程*, 2021, 49(8): 1647–1650.  
DAI Z Y, YAN K D. Fragment velocity calculation method based on high speed camera [J]. *Computer & Digital Engineering*, 2021, 49(8): 1647–1650.
- [18] 史志鑫, 尹建平. 起爆方式对预制破片飞散性能影响的数值模拟研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2018, 39(12): 84–88.  
SHI Z X, YIN J P. Numerical simulation study on effect of detonation method on the dispersion performance of prefabricated fragments [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2018, 39(12): 84–88.
- [19] 邓吉平, 胡毅亭, 贾宪振, 等. 爆炸驱动球形破片飞散的数值模拟 [J]. *弹道学报*, 2008, 20(4): 96–99.  
DENG J P, HU Y T, JIA X Z, et al. Numerical simulation of scattering characteristics of spherical fragment under blasting [J]. *Journal of Ballistics*, 2008, 20(4): 96–99.

- [20] 刘荣琦. 预制破片爆轰过程模拟与仿真 [D]. 沈阳: 沈阳理工大学, 2023.  
LIU R Q. Simulation and simulation of detonation process of prefabricated fragments [D]. Shenyang: Shenyang Ligong University, 2023.
- [21] 李明星, 王志军, 黄阳洋, 等. 不同形状轴向预制破片的飞散特性研究 [J]. *兵器装备工程学报*, 2017, 38(12): 65–69.  
LI M X, WANG Z J, HUANG Y Y, et al. Study on the scattering characteristics of different shape axial prefabricated fragment [J]. *Journal of Ordnance Equipment Engineering*, 2017, 38(12): 65–69.
- [22] 李明静. 破片和冲击波对典型飞机机翼联合毁伤效应的研究 [D]. 北京: 北京理工大学, 2020.  
LI M J. Research on combined effects of fragment and blast loading on the wing of typical aircraft [D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2020.
- [23] 马宏伟, 王珂, 李艳, 等. 基于数字图像处理的破片速度参数测量 [J]. *测试技术学报*, 2004, 18(4): 355–358.  
MA H W, WANG K, LI Y, et al. Fragment velocity measurement based on digital image processing [J]. *Journal of Test and Measurement Technology*, 2004, 18(4): 355–358.
- [24] 李丽萍, 孔德仁, 易春林, 等. 战斗部破片速度测量方法综述 [J]. *测控技术*, 2014, 33(11): 5–7, 13.  
LI L P, KONG D R, YI C L, et al. Review of method to measure the velocity of warhead fragments [J]. *Measurement & Control Technology*, 2014, 33(11): 5–7, 13.
- [25] 谭多望, 王广军, 龚晏青, 等. 球形钨合金破片空气阻力系数实验研究 [J]. *高压物理学报*, 2007, 21(3): 231–236.  
TAN D W, WANG G J, GONG Y Q, et al. Experimental studies on air drag coefficient of spherical tungsten fragments [J]. *Chinese Journal of High Pressure Physics*, 2007, 21(3): 231–236.

## Dispersion Characteristics of Spherical Fragments Driven by Cylindrical Charge

SHEN Shiliang, LI Jinzhu, MA Feng, YAO Zhiyan

(State Key Laboratory of Explosion Science and Safety Protection, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

**Abstract:** To investigate the dispersion characteristics of spherical tungsten fragments driven by a cylindrical charge, dispersion tests were conducted on a warhead with spherical prefabricated fragments. Considering the limitation of traditional comb targets, which can only measure the maximum velocity instead of the velocity distribution of the fragment group, a novel crossed-comb target was designed and fabricated. This velocity measurement device successfully recorded the pulse signals generated by multiple fragments penetrating the target and the impact positions. Numerical simulations were conducted using LS-DYNA to calculate the dispersion characteristics of spherical fragments driven by cylindrical charges. The results indicate that the numerical simulation results agree well with the test data. The designed crossed-comb shaped target can accurately measure the scattering velocities of multiple fragments. Increasing the length-to-diameter ratio can mitigate the effect of rarefaction waves at both ends of the charge on the fragment velocities; however, this mitigating effect diminishes as the length-to-diameter ratio continues to increase.

**Keywords:** cross-comb target; velocity measurement device; prefabricated fragments; dispersion velocity; length-to-diameter ratio