

# 梳状靶法研究爆轰驱动全预制破片的飞行规律

杨桂红, 王广军, 龚晏青, 孙永强

(中国工程物理研究院流体物理研究所冲击波物理与爆轰物理实验室, 四川 绵阳 621900)

**摘要:** 为了测量全预制破片在爆轰驱动下的长距离飞行速度, 采用梳状靶测量实验方法测量了全预制钨合金破片的飞行速度。介绍了梳状靶测量实验方法原理, 给出了典型的梳状靶信号。梳状靶测量实验方法测量的全预制钨合金破片的飞行速度与光幕靶实验方法和理论分析的破片飞行规律进行比较, 结果表明, 梳状靶实验方法可行, 并与高精度的光幕靶测量结果一致。

**关键词:** 爆炸力学; 预制破片; 飞行规律; 梳状靶

**中图分类号:** TJ55; O38

**文献标识码:** A

**DOI:** 10.3969/j.issn.1006-9941.2013.05.019

## 1 引言

破片式战斗部中破片空间密度分布可通过统计靶板上有效破片穿孔数和凹痕数得到, 而以速度和穿甲能力等参数表征的破片毁伤能力则难以测量<sup>[1-2]</sup>。目前的测量技术无法跟踪、识别如此众多的破片, 破片初速的测量仍是国内外没有很好解决的问题, 试验中常用断靶法或通靶法进行测量。断靶法可同时测量破片初速和衰减系数, 得到破片飞行规律, 但方法本身不够精确<sup>[3-4]</sup>。通靶法需已知破片衰减系数, 或者通过发射回收破片试验确定衰减系数。由于破片经战斗部主装药爆轰驱动后, 质量损失和变形各不相同, 回收破片的代表性是值得推敲的问题。不管是断靶法还是通靶法, 都假设破片衰减系数为常数, 但国内外的研究表明, 在战斗部设计关心的范围内(破片飞行马赫数为 2~5), 破片衰减系数不是常数而是随飞行速度减小而减小<sup>[5-7]</sup>, 采用衰减系数为常数计算破片初速和着靶速度往往产生明显的偏差<sup>[3]</sup>, 而且对于杀伤半径较大的战斗部, 因破片飞行距离远, 衰减系数减小产生的影响较大<sup>[8-9]</sup>。

针对上述问题, 本研究根据全预制破片特点, 合理假设全预制破片钨珠的空气阻力系数与飞行马赫数之间的关系, 利用梳状靶方法, 测量了爆轰驱动的全预制钨合金破片的飞行距离、时间和速度, 得到预制破片长距离飞行时的飞行规律和初速, 为战斗部破片飞行规律的研究提供了一种简单易行的方法。

## 2 梳状靶测量方法和数据分析

破片测速方法包括光幕测速法、X 光测速法、高速摄影测速法及靶网测速法, 本研究采用与靶网测速类类似的梳状靶测速方法, 主要原因是其简单易行, 而且测试结果精度高。梳状靶测量方法如图 1 所示, 离战斗部从近到远布置一系列梳状靶测点, 每个测点由 2 块相距 1 m 的梳状靶组成, 测量破片从爆心到梳状靶的飞行距离-时间数据和破片在 2 块梳状靶之间的飞行距离-时间数据。梳状靶面向战斗部爆心布置, 即梳状靶中心法线与战斗部爆心和梳状靶中心连线重合。由于梳状靶尺寸小(近区 0.6 m × 1 m、远区 1.2 m × 1 m), 离战斗部较远(>15 m), 破片飞散可看成点源, 梳状靶到战斗部爆心的距离即为破片飞行距离, 梳状靶间距即为破片在两块梳状靶之间的飞行距离。

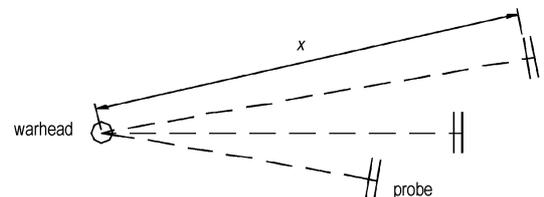


图 1 梳状靶测量方法示意图

Fig. 1 Experimental method of comb targets

梳状靶典型信号见图 2, 低、高幅值信号分别对应 1 个测点的第一、二块梳状靶。在理想情况下, 高低幅值信号一一对应, 由两块梳状靶间距及高低幅值信号时间差可计算破片着靶速度。

收稿日期: 2012-10-29; 修回日期: 2015-05-14

作者简介: 杨桂红(1966-), 女, 主要从事炸药性能测试相关研究。

e-mail: prof\_duan@sohu.com

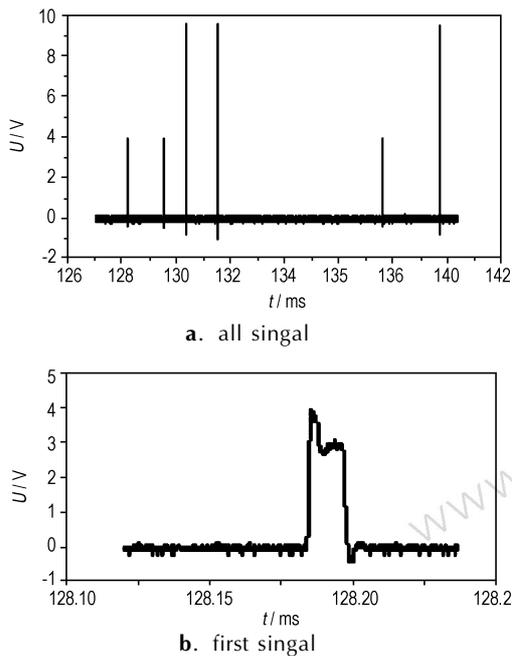


图 2 典型的梳状靶信号

Fig. 2 Typical signals of comb targets

实际上,由于梳状靶结构上的缺陷以及破片密集分布,高低幅值信号有时难以清晰对应。梳状靶是一种测时转换器,是由正极和负极相间而成的断通靶,如图 3 所示。破片击中靶瞬间,将两电极导通输出破片中靶信号。破片穿透靶后,两电极又恢复断路状态。梳状靶可输出多个先后到达的破片中靶信号。高低幅值信号难以清晰对应的原因主要有:(1)破片击中正负极引线,将导致梳状靶部分或全部失效,如图 4a 所示,失效区域不再输出破片中靶信号。(2)破片穿透梳状靶后,使小部分区域失效,如图 4b 所示。(3)破片只击中一块靶的正极或负极,没有信号,但可能在另一块靶中产生信号。(4)为减少对测量的影响,梳状靶由强度低厚度薄的材料制成(1 mm 厚敷铜板),刚性较差,两块梳状靶的间距很难准确控制。为提高测量精度,梳状靶间距不宜太近(本试验为 1 m)。由于战斗部有一定尺寸,破片飞散不是真正点源,加上安装偏差,破片穿透第一块靶后可能不穿透第二块靶,或者,穿透第二块靶的破片可能没有穿透第一块靶。(5)大尺寸梳状靶由多块小尺寸的拼成,破片击中其中一块靶的拼接区域,没有信号,而在另一块靶可能产生信号。(6)破片密集时,信号也密集在较短时间范围内,难以寻找对应关系。

破片着靶速度计算原则是按先后顺序使低、高幅值信号对应,即第 1 个低幅值信号与第 1 个高幅值信号对应,第 2 个低幅值信号与第 2 个高幅值信号对应,依次

类推。另外,战斗部爆炸后,壳体将形成一些小碎片,这些小碎片速度衰减较快,且质量小、形状不规则,对目标基本不起杀伤作用,是无效破片。因此,数据处理过程中,需剔除无效破片信号。另外,误判同一破片高低幅值信号的对应关系或者其它原因,导致破片速度计算结果异常,也需剔除。剔除方法根据 GJB 6390.2-2008《面杀伤导弹战斗部静爆威力试验方法 第 2 部分:破片初速测试》,结合物理规律和理论分析结果进行。

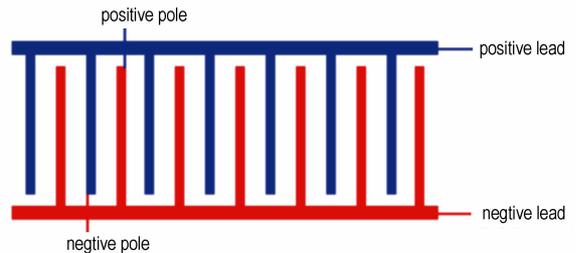


图 3 梳状靶原理示意图

Fig. 3 Schematic of Comb targets principle

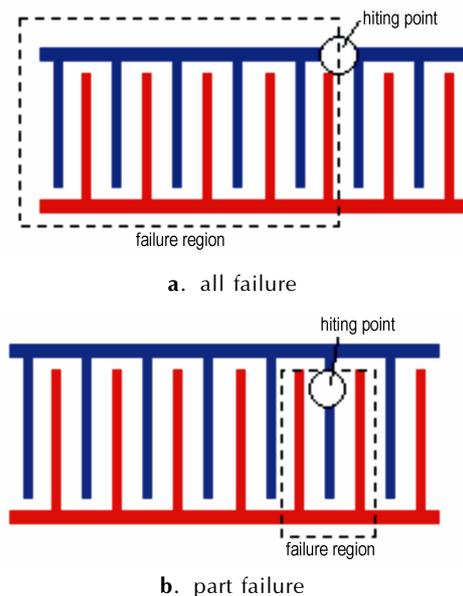


图 4 梳状靶失效示意图

Fig. 4 Schematic of comb targets failure

根据破片飞行理论<sup>[3]</sup>,可以合理地假设战斗部产生的钨珠的空气阻力系数  $c_x$  与飞行马赫数  $M$  有如下线性关系:

$$c_x = A - BM \quad (1)$$

式中,  $A$ 、 $B$  是无量纲常数。

破片衰减速度计算式<sup>[2]</sup>:

$$v = \frac{av_0 \exp\left(-\frac{Aps_x}{2m}\right)}{A - B \frac{v_0}{a} \left[1 - \exp\left(-\frac{Aps_x}{2m}\right)\right]} \quad (2)$$

式中,  $\rho$  为破片密度,  $\text{g} \cdot \text{cm}^{-3}$ ;  $s$  为破片迎风面积,  $\text{m}^2$ ;  $a$  为常数;  $m$  为破片质量,  $\text{g}$ 。将  $v = dx/dt$  代入式(2), 积分并考虑到初始条件:  $x=0$  时  $t=0$ , 得到破片飞行距离-时间计算式

$$t = \frac{2m}{A\rho s} \left( \frac{1}{v_0} - \frac{B}{aA} \right) \left( \exp\left(\frac{2m}{A\rho s}x\right) - 1 \right) + \frac{Bx}{aA} \quad (3)$$

根据梳状靶测到的破片飞行距离  $x$  和平均时间  $t$ , 由式(2)拟合求解得到:

$$\begin{cases} v_0 = 1520 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \\ A = 1.52 \\ B = 0.01 \end{cases} \quad (4)$$

在拟合过程中, 由于破片由炸药爆炸驱动, 因此破片初速  $v_0$  的取值由经典的 Gurney 公式<sup>[3]</sup>估算:

$$v_0 = k\sqrt{2E} \left( \eta + \frac{1}{2} \right)^{-1/2} \quad (5)$$

式中,  $\sqrt{2E}$  是 Gurney 能, 实验中利用 RHT-906 炸药驱动全预制破片, 其中  $\sqrt{2E} = 2.70 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ ,  $k$  是与战斗部类型有关的常数, 对于全预制破片式战斗部,  $k = 0.9$ ,  $\eta$  是战斗部装填比, 本文计算时  $\eta = 0.16$ 。

利用式(3)对破片飞行距离随时间变化进行计算, 绘制破片飞行规律曲线, 结果如图5所示。梳状靶测到破片飞行距离-时间曲线也绘于图5, 以便比较。利用式(2)对破片飞行速度随飞行距离变化进行计算, 绘制飞行速度衰减规律曲线, 结果如图6所示。梳状靶测到的破片着靶速度与飞行距离之间的关系曲线也绘于图6。图6曲线曲率突变是因为全预制破片钨珠尺寸改变所致(飞行距离  $x$  较小时对应  $\Phi 6.0 \text{ mm}$  钨珠, 飞行距离  $x$  较大时对应  $\Phi 7.5 \text{ mm}$  钨珠)。从图5和图6可见, 计算结果与实验结果吻合, 说明式(2)和(3)计算破片飞行速度是可行的。回收结果表明, 钨珠有轻微的变形和质量损失(平均为 8.4%), 其形貌与理想球形有一定区别, 但其基本形状仍为球形, 变化不大, 见图7。

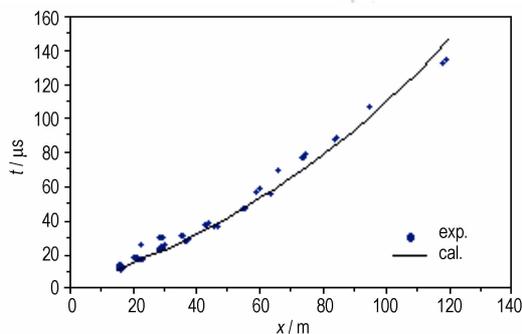


图5 梳状靶破片飞行距离-时间测量结果与计算的比较  
Fig.5 Experimental and numerical results of flying distance versus time of fragments

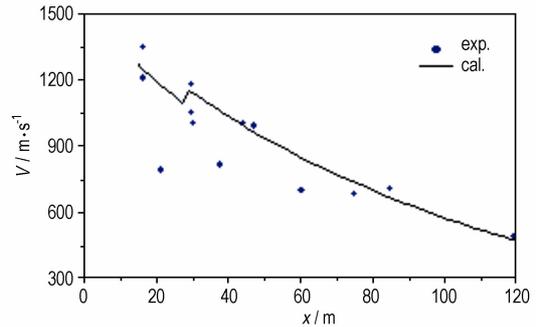


图6 梳状靶速度测量结果与计算的比较

Fig.6 Comparison of velocity measured by comb targets and numerical results

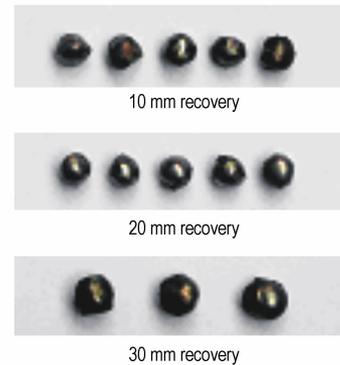


图7 回收的钨珠

Fig.7 Recovery of tungsten fragments

### 3 光幕靶验证

为了验证梳状靶测试结果的可靠性, 采用西安兵器工业第203研究所的光幕靶测量了预制破片钨珠的破片速度。一个光幕靶测点包含2块尺寸为  $500 \text{ mm} \times 700 \text{ mm}$ 、间距  $160 \text{ mm}$  的激光屏, 破片通过激光屏时, 产生扰动, 输出破片中靶信号, 由激光屏间距及破片通过两块激光屏的时间差计算破片着靶速度。典型的光幕靶信号见图8, 图中黄色信号是破片通过第一块激光屏时产生的信号, 红色信号是破片通过第二块激光屏时产生的信号。光幕靶测量原理与梳状靶类似, 在破片较密集的情况下, 同样存在信号难以对应的问题。

同梳状靶一样, 光幕靶记录所有破片到达信号, 应剔除无效破片信号。原则是根据信号的幅值和形状, 以及速度计算结果。如果某个破片的速度明显偏离理论计算结果或物理规律, 所对应的信号与钨珠信号有明显区别, 则认为是无效破片信号, 应剔除。处理后的试验结果与式(3)计算结果的比较符合, 进一步说明式(2)和(3)计算破片飞行速度是可行的。实际上, 不管是梳状靶还是光幕靶, 着靶速度测量结果有一定分

散性,主要有三方面原因,一是破片初速本身有一定分布,并且经爆轰驱动后,破片产生的质量损失和变形各不相同,速度衰减也各不相同,经长距离飞行后,着靶速度产生差异;二是着靶速度由两块梳状靶或激光靶记录的信号计算,必须分辨出同一破片在两块靶上产生的信号,使两块靶记录的信号对应起来,才能正确计算着靶速度。在破片较多的情况下,信号对应存在误判的可能。从上述数据处理方法可知,误判后如果结果明显偏离物理规律或理论计算,数据被剔除,如果在合理范围内,数据则被保留;三是难以确定对应关系的数据被舍去,不能利用全部有效数据。而从图 5 可看出,破片着靶时间测量结果分散性较小,主要原因,一是不存在信号对应问题,二是时间取所有破片的平均值,能利用全部有效数据。

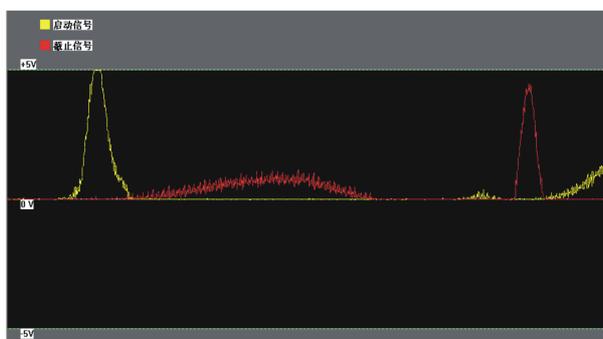


图 8 光幕靶典型信号

Fig. 8 Signal of laser sheet measurements

## 4 结 论

采用梳状靶法测量了全预制钨合金破片在爆轰驱动下的飞行衰减规律,其结果与光幕靶测量方法及理论计算符合,说明梳状靶测量钨珠破片飞行衰减规律

是可行的,为装填钨珠的战斗部威力实验提供了一种简单易行的测量方法。另一方面,从严格意义上来说,几乎每个破片所对应的空气阻力系数都是不相同的,因此,经历爆轰驱动的预制破片的空气阻力系数应该用所有破片的平均值作为装填预制破片的战斗部破片初速和飞行特性的工程计算参数。

### 参考文献:

- [1] Held M. Fragmentation Warheads [M] // Carleone J. Tactical Missile Warheads. Washington DC: the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 1993: 462-464.
- [2] Victor A C. Warhead performance calculations for threat hazard assessment [C] // 1996 DDESB Explosives Safety Seminar. Las Vegas, Nevada, 1996: 1-20.
- [3] Г И 鲍克洛夫斯基. 爆炸及其作用 [M]. 张国伟, 译. 北京: 国防工业出版社, 1979: 48.  
Г И Pokrovsky. Explosion and its effects [M]. ZHANG Guo-wei. Beijing: Publisher of Defensive Industry, 1979: 48.
- [4] 杨彦通, 龙洪明. 导弹战斗部破片杀伤试验误差分析 [J]. 国防技术基础, 2003(3): 28-29.  
YANG Yan-tong, LONG Hong-ming. Error analysis of fragments of missile warhead [J]. *Defensive Technique*, 2003(3): 28-29.
- [5] DAVIDSON R O. Ammunition Series Section 2, Design for Terminal Effects [R]: AD389304, 1976.
- [6] 谭多望, 王广军. 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 Duo-wang, WANG Guang-jun. Air drag coefficients measurements of spherical Tu fragments [J]. *Chinese High Pressure Physics*, 2007, 21(3): 231-236.
- [7] Richard M L. Physics of directed hit and near miss warhead technology [M]. Washington DC: the American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc. 2001: 199-276.
- [8] 谭多望, 曹仁义, 王广军. 爆轰驱动对钨珠终点弹道性能的影响 [J]. 爆炸与冲击, 2008, 28(6): 481-487.  
TAN Duo-wang, CAO Ren-yi, WANG Guang-jun. Flying property of Tu fragments under detonation driven [J]. *Explosive and Shock Wave*, 2008, 28(6): 481-487.
- [9] Charron Y J. Estimation of velocity distribution of fragment warheads using a modified Gurney method [R]. AD A074759, 1979.

## Experimental Study on Flying Laws Detonation Driven Precast Fragments by Comb Targets Method

YANG Gui-hong, WANG Guang-jun, GONG Yan-qing, SUN Yong-qiang

(Institute of Fluid Physics, National Key Laboratory of Shock Wave and Detonation Physics, CAEP, Mianyang 621900, China)

**Abstract:** In order to measure flying velocities of controlled tungsten alloy fragments under detonation driven, comb targets method was used to study the initial velocities. Schematic of comb targets and typical signal of comb targets were discussed. The experimental results of flying law and long distance flying time of tungsten alloy fragments were validated by laser measurement method and theoretical flying law of fragments. The results show that the comb targets method is feasible.

**Key words:** explosive mechanics; precast fragments; flying laws; comb targets

**CLC number:** TJ55; O38

**Document code:** A

**DOI:** 10. 3969/j. issn. 1006-9941. 2013. 05. 019