

doi:10.3969/j.issn.1001-8352.2019.06.006

不同类型预制破片速度衰减规律及迎风面积的修正*

全嘉林 苗润源 梁争峰

西安近代化学研究所(陕西西安,710065)

[摘要] 为研究不同速度区间典型预制破片在空气中飞行的速度衰减规律,采用基于多普勒效应的雷达测速装置,获得了典型球形和长方体破片在 $1.5 Ma \sim 4.0 Ma$ 速度区间内的速度衰减规律和衰减系数,并对长方体破片迎风面积的确定方法进行了修正。结果表明:球形破片衰减系数拟合值与经典理论计算值吻合良好, $\varnothing 7 mm$ 和 $\varnothing 8 mm$ 球形破片的速度衰减系数分别为 $0.007 61 m^{-1}$ 和 $0.006 65 m^{-1}$;而长方体破片衰减系数的试验值与经典理论计算值相比明显偏低,约为理论计算值的 $0.75 \sim 0.95$ 倍;长方体破片迎风面积修正系数 k 与 Ma 近似呈线性关系。

[关键词] 杀伤战斗部;预制破片;破片速度;速度衰减;迎风面积

[分类号] TJ410.3+3

Velocity Attenuation Rule of Different Prefabricated Fragments and Correction of Windward Area

QUAN Jialin, MIAO Runyuan, LIANG Zhengfeng

Xi'an Modern Chemistry Research Institute (Shaanxi Xi'an, 710065)

[ABSTRACT] In order to study the velocity attenuation rule of typical prefabricated fragments flying in the air at different velocity intervals, velocity attenuation rule and attenuation coefficient of typical spherical and rectangular fragments in the velocity interval of $1.5 Ma \sim 4.0 Ma$ were obtained by radar velocity measurement device based on Doppler effect. Moreover, the method for determining the windward area of rectangular fragments was modified. The results show that the fitting values of the attenuation coefficients of spherical fragments are in good agreement with those calculated by classical theory. The velocity attenuation coefficients of spherical fragments of $\varnothing 7 mm$ and $\varnothing 8 mm$ are $0.007 61 m^{-1}$ and $0.006 65 m^{-1}$, respectively. While the experimental values of the attenuation coefficients of cuboid fragments are significantly lower than those that was calculated by classical theory, which are about $0.75 \sim 0.95$ times of the theoretical values. Windward area correction coefficient k of cuboid fragments is approximately linear with Ma .

[KEYWORDS] fragmenting warhead; prefabricated fragment; fragment velocity; velocity attenuation; windward area

引言

破片杀伤战斗部主要依靠破片动能毁伤目标,破片的毁伤威力与破片速度密切相关。在杀伤战斗部的研制与验收过程中,破片着靶速度始终是重要的考核指标之一^[1]。而破片着靶速度不仅与其初速相关,亦与其速度衰减特性相关。因此,研究不同形状典型破片的速度衰减规律,对战斗部的优化设计及预估破片毁伤威力有着重要的作用。

国内外针对破片速度衰减规律已经进行了大量的理论与试验研究,主要集中于钨^[2]、钢、锆、非金

属材料^[3]等不同材料破片速度衰减规律的测量与分析,以及破片速度测试系统的设计与改进^[4],而对破片迎风面积的讨论相对较少。破片迎风面积是决定破片衰减规律的重要参数,其传统确定方法是基于均匀取向理论,通过积分的方式取平均迎风面积^[5]。然而破片实际飞行过程中向阻力最小化方向运动,传统的均匀取向理论不能很好地描述破片的飞行过程。因此,需要对破片迎风面积的计算方法进行修正。王鹏等^[6]对圆柱形破片的迎风面积进行了修正。对目前常用的球形和长方体破片的迎风面积修正尚未有学者开展系统的研究。

* 收稿日期:2019-05-15

第一作者:全嘉林(1997-),男,硕士研究生,主要从事爆炸力学与战斗部技术研究。E-mail:quan_jialin@163.com

通信作者:梁争峰(1972-),男,博士,研究员,主要从事爆炸力学与弹药技术研究。E-mail:1697589935@qq.com

以典型球形和长方体预制破片为研究对象,采用基于多普勒效应的雷达测速装置,搭建了破片速度衰减规律试验系统,获得了破片的时间-速度测试数据,建立了不同形状预制破片在不同速度区间内的速度衰减规律,并将试验结果与经典理论计算结果进行比较,从迎风面积的角度对破片衰减系数的计算公式进行了修正。

1 破片速度衰减试验研究

1.1 试验

在150 m测速靶上进行。发射装置为一门25 mm弹道炮。为获得较广速度范围内破片速度的衰减规律,采用分段的方法,测试各较小速度区间内破片速度的衰减情况。试验中,通过调整装药量的方式控制破片发射初速,每个相同的装药量进行3发重复性试验。速度测量方法采用雷达测速法,基本原理是利用多普勒效应,雷达向飞行中的破片发射电磁波,并接收破片的反射波,根据发射波与反射波间的频率差得到破片的飞行速度^[7]。测速系统由红外触发装置与雷达数据获取装置组成。点火后,火药气体喷出炮口,红外触发装置触发,雷达工作,跟踪破片并记录不同观测点处破片的速度-时间数据。雷达测速过程中,弹道上除预制破片外,还有弹托分离后的碎片等飞行体,电磁波遇到其他飞行物亦会产生反射波,进而影响破片速度的判读。根据破片发射初速与测试系统每两相邻数据点间的时间差,并考虑到测速系统的系统误差,可以推算出相邻两数据点间的最大速度差应在30 m/s以内。因此,数据处理时将每组数据中与前后相邻数据点速度差明显大于30 m/s的数据点予以剔除。研究对象为战斗部4种典型预制破片,如表1所示。

表1 破片样品参数

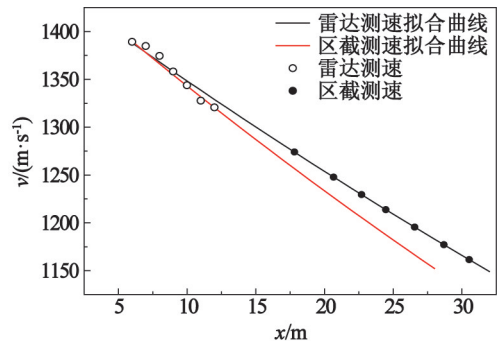
Tab. 1 Parameters of fragment samples

破片编号	形状	材料	破片质量/g	破片特征尺寸/mm × mm × mm
1 [#]	长方体	20 [#] 钢	3.15	12.4 × 6.0 × 5.4
2 [#]	长方体	93钨	7.90	8.0 × 8.0 × 7.0
3 [#]	球形	93钨	3.15	∅7 mm
4 [#]	球形	93钨	4.70	∅8 mm

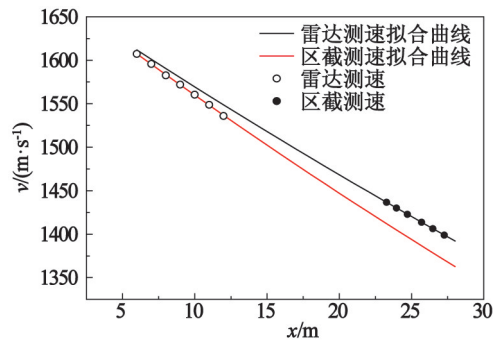
1.2 试验有效性验证

为验证雷达测速系统的可靠性与试验数据的有效性,采用区截测速系统在相同的试验条件下对破片的速度进行测试,通过对比两种测速方法的试验

数据判断试验方法的可靠程度。区截测速方法是目目前较为常用的测速方法,是国军标中规定的破片速度测试方法之一,可以作为评定试验方法有效性的对照^[8]。选取2[#]长方体破片与4[#]球形破片为代表,对相同装药量条件下破片的飞行参量进行了测试。雷达测速测得的是破片的速度-时间($v-t$)数据,而区截测速测得的是破片的位移-时间($x-t$)数据,且测速区段也有一定的差异。因此,统一对两种测速系统测得的数据进行拟合与延拓处理,得到两种方法分别测得的破片的速度-位移($v-x$)关系与相应的拟合曲线,如图1所示。



(a) 2[#]破片



(b) 4[#]破片

图1 雷达测速与区截测速结果对比

Fig. 1 Comparison of radar velocity measurement and zone-block velocity measurement

从图1中可以看出,两种测速方法得到的 $v-x$ 曲线较为接近,同一位置处,两种测速方法破片速度的绝对偏差在10~40 m/s左右,相对偏差在3.5%以内,结果较为吻合。因此,可以认为搭建的雷达测速系统是可靠的,可以对试验数据进行下一步的处理与分析。

两种测速方法得到的 $v-x$ 曲线相比,区截测速方法得到的破片速度比雷达测速的结果略微偏小,且两者间的偏差有随位移增加而增大的趋势。之所以出现这种现象,与两种测速方法的特性差异有关。雷达测速属于非接触性测速方法,而采用金属箔靶

的区截测速方法属于接触性测速方法,破片在穿过靶板的过程中,飞行姿态、方向以及能量的损失导致测量结果稍有偏差。位移较大处,破片受更多靶板的拦截作用影响,测量结果偏差也相对更大。

2 结果与分析

2.1 不同形状预制破片速度衰减模型

在试验数据分析时,对飞行过程进行理想化假设。忽略飞行过程中的重力作用与空气阻力横向作用,假设破片在空气中沿飞行方向做一维运动,则破片在空气中飞行的运动方程为:

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho_a A v^2. \quad (1)$$

式中: m 为破片质量; v 为破片飞行速度; t 为时间; C_x 为空气阻力系数; ρ_a 为当地空气密度,取 1.3 kg/m^3 ; A 为破片迎风面积。

对式(1)进行积分,得到速度 v 随位移 x 衰减的关系:

$$v = v_0 e^{-\alpha x}. \quad (2)$$

其中,

$$\alpha = \frac{C_x \rho_a A}{2m}. \quad (3)$$

式中: α 为破片速度衰减系数^[9]。

由于雷达测速得到的是某破片在空气中飞行过程中的 $v-t$ 关系,而式(2)给出的是 $v-x$ 关系;因此,需要将式(2)转换为破片速度 v 与飞行时间 t 的关系。以时间和速度为主要变量,对式(1)进行积分,得到

$$v = \frac{v_0}{1 + \alpha v_0 t}. \quad (4)$$

基于式(4)对 $v-t$ 数据进行非线性拟合,得到不同类型破片各发试验的发射初速度 v_0 与速度衰减系数 α ,对相同装药量下的 3 次重复性试验取破片初速与衰减系数的平均值。结果表明,破片速度衰减系数在较大的速度区间内表现出与速度的相关性,而在较小的速度区间内较为稳定;因此将整体速

度测试区间划分为若干小区间,每个区间速度衰减系数取平均值,得到不同速度段内破片速度衰减系数,如表 2 所示。根据表 2 中的数据,结合式(2)、式(4),即可获得典型预制破片在 $1.5 \text{ Ma} \sim 4.0 \text{ Ma}$ 区间内速度随位移或随时间的衰减关系,对破片某一位置处或某一飞行时间下的飞行速度做出预测。

2.2 破片飞行过程中迎风面积的修正

根据式(3)可知,只要确定破片在飞行过程中的迎风面积 A 与空气阻力系数 C_x ,就能计算出破片速度衰减系数的理论值。马玉媛^[10]测试了破片在 $280 \sim 1400 \text{ m/s}$ 范围内的速度衰减特性,并给出了破片飞行的空气阻力系数经验公式,即

$$C_x = 1.02999 + \frac{0.9927}{\text{Ma}} - \frac{0.8439}{\text{Ma}^2}. \quad (5)$$

适用于本文中的讨论范围为 $1.5 \text{ Ma} \sim 4.0 \text{ Ma}$ 。球形破片空气阻力系数一般认为是定值,取 $C_x = 0.97$ 。

破片迎风面积的确定与其飞行姿态有关,除球形破片迎风面积始终恒定外,其他破片在飞行过程中受各种扰动的影响,发生不规则的翻滚与旋转。对非球形破片而言,其迎风面积不断发生变化,难以确定。一般按均匀取向理论取其平均值^[9],即

$$A = \frac{S}{4}. \quad (6)$$

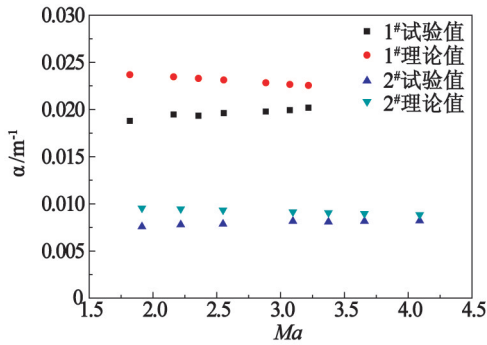
式中: S 为破片的总表面积。

结合式(3)、式(5)、式(6),对 4 种破片速度衰减系数进行计算,并与试验值进行对比,如图 2 所示。从图 2 中可以看出,球形破片衰减系数试验值与理论值较为吻合。而长方体破片衰减系数的试验值相对理论值明显偏低,约为理论计算值的 $0.75 \sim 0.95$ 。根据式(3)可知,破片飞行过程中,在破片质量与空气密度保持不变的情况下,破片速度衰减系数仅为空气阻力系数 C_x 与迎风面积 A 的函数。而结合国外风洞试验的结果与查特斯等人空气弹道试验的结果可知^[5,11],在 $1.5 \text{ Ma} \sim 4.0 \text{ Ma}$ 的范围内,飞行姿态与速度的变化导致的空气阻力系数的变化实际相对较小。因此,试验值与理论值间的偏差,可

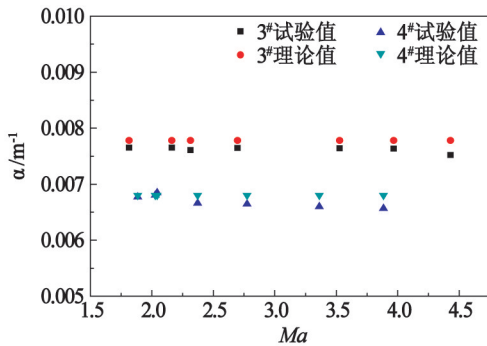
表 2 典型预制破片在不同速度区间内的衰减系数

Tab. 2 Attenuation coefficient of typical prefabricated fragments in different intervals

破片 编号	不同速度区间内破片速度衰减系数 α						10^3 m^{-1} $\bar{\alpha}$
	$1.5 \text{ Ma} \sim 2.0 \text{ Ma}$	$2.0 \text{ Ma} \sim 2.5 \text{ Ma}$	$2.5 \text{ Ma} \sim 3.0 \text{ Ma}$	$3.0 \text{ Ma} \sim 3.5 \text{ Ma}$	$3.5 \text{ Ma} \sim 4.0 \text{ Ma}$	$>4.0 \text{ Ma}$	
1 [#]	18.77	19.40	19.77	20.17			19.53
2 [#]	7.58	7.84	7.87	8.13	8.17	8.21	7.97
3 [#]	7.65	7.63	7.64	7.63		7.52	7.61
4 [#]	6.77	6.77	6.65	6.59	6.46		6.65



(a) 长方体破片



(b) 球形破片

图2 破片衰减系数理论值与试验值对比

Fig. 2 Comparison of theoretical and experimental values of fragment attenuation coefficient

能主要是由破片的迎风面积造成的。为得到工程适用的破片速度衰减规律,需要对破片迎风面积的计算公式进行一定的修正。

为确定出现这种现象的原因,需要进一步分析长方体的飞行过程。式(6)对平均迎风面积的计算是建立在破片飞行过程中迎风面积完全均匀变化的前提上的。而迎风面积虽然难以确定,却并非完全随机,而是在翻滚力矩、空气阻力、重力等多种效应的耦合作用下发生变化。根据最小作用量原理,在破片的翻滚力矩和阻力作用下,破片翻滚并向阻力最小化方向运动,最终沿最小迎风面附近运动。飞行距离越长,这种趋势就越为明显。

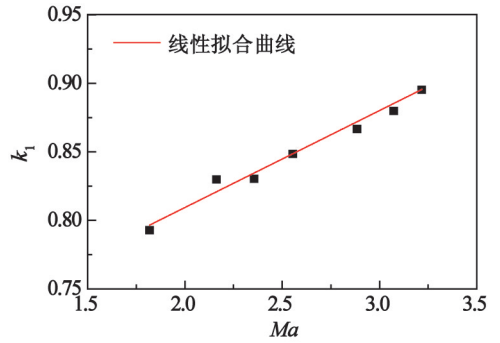
根据空气动力学原理,在破片飞行过程中,空气动力作用点与破片质心不重合,产生的总空气动力矩计算公式如下^[12]:

$$M = \frac{1}{2} \rho_a A l m v^2 \quad (7)$$

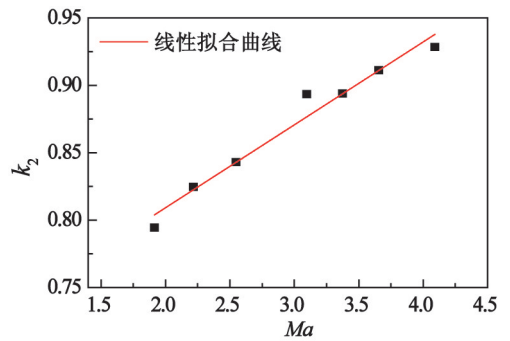
式中: l 是破片的特征尺寸; m 是无量纲空气动力矩系数。

由式(7)可以看出,破片在飞行过程中旋转的角速度与平动线速度有关,因此,长方体破片的修正系数 k 与 Ma 存在一定的函数关系。

设 $k=f(Ma)$,可以通过拟合的方法得到修正系数 k 的经验计算公式。观察到二者关系近似呈线性分布,则线性拟合曲线如图3所示。



(a) 1#破片



(b) 2#破片

图3 长方体破片 $k-Ma$ 曲线

Fig. 3 $k-Ma$ curve of cubic fragments

得到长方体破片 k 与 Ma 间的关系分别为:

1#长方体破片

$$k_1 = 0.6861 + 0.0615Ma; \quad (8)$$

2#长方体破片

$$k_2 = 0.6679 + 0.0708Ma. \quad (9)$$

比较式(8)与式(9)可以看出,两种尺寸长方体破片 k 随 Ma 的变化规律基本统一,数值上较为接近。出于工程应用简化计算的考虑,对两者取平均值,得到长方体破片 k 与 Ma 间的关系为

$$k = 0.6770 + 0.0661Ma. \quad (10)$$

修正后迎风面积的计算公式为

$$A' = \frac{(0.6770 + 0.0661Ma)S}{4}. \quad (11)$$

2.3 迎风面积修正公式适用性验证

为验证式(11)对其他尺寸长方体破片的适用性,开展了 $6.3\text{ mm} \times 7.0\text{ mm} \times 8.1\text{ mm}$ 长方体破片在初速 $607 \sim 1300\text{ m/s}$ 条件下的飞行试验,拟合得到了不同初速下破片衰减系数;并分别将式(6)和式(11)计算得到的迎风面积代入到式(3)中,计算出不同初速下破片衰减系数;表3为将计算值与实

表3 衰减系数实测值、未修正值与修正值对比

Tab. 3 Comparison of measured attenuation coefficient, uncorrected value and corrected value

序号	v_0/Ma	$\alpha_i/10^3 m^{-1}$	$\alpha_c/10^{-3} m^{-1}$	$\left \frac{\alpha_c - \alpha_i}{\alpha_i} \right \times 100/\%$	$\alpha/10^{-3} m^{-1}$	$\left \frac{\alpha - \alpha_i}{\alpha_i} \right \times 100/\%$
1	1.76	24.103 6	22.100 7	8.31	27.855 1	15.56
2	2.12	23.138 0	21.407 4	7.48	26.206 8	13.26
3	2.41	22.295 5	21.080 8	5.45	25.205 6	13.05
4	2.80	22.038 5	20.867 7	3.56	24.204 1	9.83
5	3.33	21.702 0	20.832 2	4.01	23.222 2	7.00
6	3.77	20.371 2	20.946 3	2.82	22.609 4	10.99

测值进行对比的结果。其中, α_i 为衰减系数实测值, α 为利用式(6)求得的衰减系数; α_c 为利用式(11)求得的衰减系数。

由表3可知, 利用破片迎风面积经典理论计算的破片衰减系数与实测值间的误差在7%~16%之间; 而利用修正后的迎风面积计算, 破片衰减系数与实测值的偏差均小于10%, 可满足工程应用需求。

3 结论

1) 结合典型预制破片在不同速度区间内的 $v-x$ 、 $v-t$ 关系, 对试验数据进行拟合处理, 得到4类预制破片在1.5 Ma~4.0 Ma范围内的平均衰减系数分别为0.019 53、0.007 97、0.007 61、0.006 65 m^{-1} 。

2) 球形破片衰减系数拟合值与理论计算值吻合较好; 而长方体破片衰减系数受迎风面积变化规律影响, 其拟合值约为理论计算值的0.75~0.95倍。迎风面积修正系数 k 与 Ma 近似呈线性关系。

参考文献

- [1] 郑雄伟, 孙兴昀, 周涛. 美俄海军防空反导战斗部技术研究综述[J]. 飞航导弹, 2016(4): 48-51, 62.
- [2] 易春林, 李丽萍, 吕永柱, 等. $\varnothing 8$ 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, 67.
YI C L, LI L P, LÜ Y Z, et al. Study on velocity attenuation regularity of $\varnothing 8$ tungsten spherical fragment and speed forecast [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2014, 34(6): 61-63, 67.
- [3] 杨世全, 孙传杰, 钱立新, 等. 非金属壳体低附带战斗部实验与破片飞散分析[J]. 高压物理学报, 2018, 32(4): 131-135.
YANG S Q, SUN C J, QIAN L X, et al. Experimentation and fragment flight analysis of low-collateral-damage warhead with nonmetal shell [J]. Chinese Journal of High

Pressure Physics, 2018, 32(4): 131-135.

- [4] KPENYIGBA K M, JANKOWIAK T, RUSINEK A, et al. Effect of projectile nose shape on ballistic resistance of interstitial-free steel sheets [J]. International Journal of Impact Engineering, 2014, 79: 83-94.
- [5] 王儒策, 赵国志. 弹丸终点效应[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1993.
- [6] 王鹏, 马晓青, 高润芳. 圆柱形破片形状系数研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(3): 161-163, 166.
WANG P, MA X Q, GAO R F. Research on figure modulus of cylindrical fragment [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(3): 161-163, 166.
- [7] 白蕊霞, 王斌永, 童鹏. 激光多普勒测速雷达技术研究现状[J]. 激光与红外, 2016, 46(3): 249-253.
BAI R X, WANG B Y, TONG P. Research status of laser Doppler velocity radar technology [J]. Laser and Infrared, 2016, 46(3): 249-253.
- [8] 中国物理研究院. 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: GJB 6390.2—2008 [S]. 北京: 总装备部军标出版发行部, 2008.
China Academy of Engineering Physics. Static power method for anti-surface missile warhead: part 2 measurement of initial velocity of fragments: GJB 6390.2—2008 [S]. Beijing: Military Standard Publishing Department of General Armament Department, 2008.
- [9] 隋树元, 王树山. 终点效应学[M]. 北京: 国防工业出版社, 2000.
- [10] 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 Y Y. A study on the velocity dampings and penetrating depth of small preformed fragments [J]. Acta Armamentarii, 1981, 2(1): 52-58.
- [11] DAVIDSON R O. Ammunition series section 2, design for terminal effects: AD389304 [R]. 1976.
- [12] 韩子鹏. 弹箭外弹道学[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2008.