

文章编号: 1001-1455(2008)06-0481-07

爆轰驱动对钨珠终点弹道性能的影响^{*}

谭多望,曹仁义,王广军,龚晏青

(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: 通过实验比较了理想球形钨珠和经历爆轰驱动的钨珠(初始为球形)主要终点弹道性能的差异,结果表明:(1) 钨珠经爆轰驱动后,发生轻微的质量损失和变形现象,直径 6.0 mm 和 7.5 mm 钨珠的质量损失平均为 8.4%;(2) 对于理想球形钨珠,在同一初始速度条件下,衰减系数为常数,空气阻力系数仅与初始速度有关,两者成线性关系,而对于经历爆轰驱动的钨珠,衰减系数不再为常数,空气阻力系数与飞行速度有关,两者成线性关系;(3) 爆轰驱动明显降低了钨珠的穿甲能力,但长距离飞行后,钨珠仍具有较强的穿甲能力,是破片式战斗部或杀爆战斗部较理想的选择。

关键词: 爆炸力学;终点弹道性能;爆轰驱动;钨珠;空气阻力系数;穿甲

中图分类号: O383

国标学科代码: 130·35

文献标志码: A

1 引 言

防空、反辐射、面杀伤等类型战斗部一般采用破片式战斗部或者杀爆战斗部,主要依靠破片动能毁伤目标。破片能否有效地毁伤目标与破片终点弹道性能(主要是爆轰驱动后的变形和破碎、速度衰减规律以及对目标的侵彻、穿甲能力)密切相关,因此,破片终点弹道性能一直是战斗部设计的基础问题,国内外进行过大量研究,取得了许多成果^[1-2]。这些成果一般是针对规则破片的,如球形、方形、柱形破片,或者是针对自然破片的统计规律,当应用于战斗部实际产生的预制破片时,往往会产生明显的偏差,原因是预制破片经历爆轰驱动后,产生轻微质量损失和变形,其形状介于规则破片和自然破片之间。预制破片经历爆轰驱动后,质量损失和变形各不相同,其终点弹道性能研究十分困难,至今公开报道的研究工作基本没有。

钨合金破片由于密度高、衰减系数小、穿甲能力强,成为防空、反辐射、面杀伤等战斗部破片设计的主要选择对象,如美国的哈姆 AGM-88 高速反辐射导弹 WDU-21B 战斗部装填 10 000 枚方形钨合金破片,法国的西北风 ATAM 空对空导弹战斗部装填 1 850 枚钨珠^[3],美国 Stinger 地对空导弹战斗部改进型的设计思路是,通过粉末冶金方式将钨合金预制破片嵌埋在钛基中,形成钛钨组合壳体,在爆轰驱动下,产生主要起穿甲作用的钨合金破片和起引燃作用的钛合金破片,提高战斗部毁伤威力^[4]。因此,钨合金破片的终点弹道性能日益受到国内外的重视,近期的研究主要有:钨珠穿靶过程中的破损及侵彻缩比规律^[5-6]、各种形状的钨合金破片(主要是球形)对薄靶板的贯穿及弹道极限速度^[7]、钨珠对等效目标的毁伤仿真^[8]、钨珠长距离飞行规律及经历爆轰驱动后的变形和破碎^[9]。

本文中通过统计、分析战斗部实验结果,并与理想球形钨珠实验结果进行比较,研究了爆轰驱动前后钨珠在速度衰减规律和穿甲性能方面的差异,为装填钨珠的战斗部设计提供参考。

2 质量损失和变形

战斗部主要由内外壳体、主装药、钨珠组成,长径比为 2.25。钨珠装填在内外壳体之间,其间隙填充环氧树脂。钨珠材料为 W232,密度 18.0 g/cm³,拉伸强度 0.88 GPa,冲击韧性 0.69 MJ/m²,主装药为 RHT-902 炸药($w(\text{RDX})/w(\text{TNT})=65/35$)。实验中用装填橡皮的回收箱回收钨珠。回收结果表

^{*} 收稿日期: 2007-06-15; 修回日期: 2008-04-27

作者简介: 谭多望(1967—),男,博士,研究员。

明,钨珠有轻微的变形和质量损失,其形貌与理想球形有一定区别,质量损失平均为 8.4%,如图 1 所示,图中 x 为破片飞行距离。

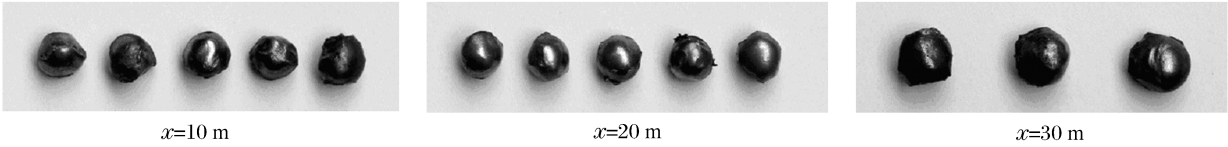


图 1 回收的钨珠
Fig. 1 Softly-recovered tungsten spheres

3 速度衰减规律的变化

3.1 破片飞行速度衰减计算模型^[1,10]

破片在空气中飞行时,受到两个力的作用:重力和空气阻力。重力使破片的飞行弹道发生弯曲,空气阻力使破片速度减小。在破片速度较高时,由于破片质量很小,空气阻力远远大于重力,可以忽略重力对破片速度的影响,因此破片飞行弹道为直线,根据 Newton 阻力定律,其运动微分方程为

$$m \frac{dv}{dt} = -\frac{1}{2} C_x \rho S v^2 \tag{1}$$

式中: m 为破片质量, v 为破片速度, t 为时间, C_x 为空气阻力系数, ρ 为当地空气密度, S 为破片迎风面积。由空气动力学可知, C_x 与破片速度和形状有关。不同形状的破片,在同一马赫数 Ma 的条件下, C_x 是不同的。对于相同的破片, C_x 是 Ma 的函数,国外风洞实验结果如图 2 所示。从图中可看出,不同破片空气阻力系数的最大值均出现于 $Ma = 1.5$ 附近,以后随 Ma 数的增大有减小的趋势。在实用范围($Ma = 3 \sim 5$)内,有如下关系式

球形破片

$C_x = 0.97$

方形破片

$C_x = 1.72 + 0.3/Ma^2$ 或者 $C_x = 1.285 + 1.054/Ma - 0.926/Ma^2$

柱形破片

$C_x = 0.806 + 1.323/Ma - 1.12/Ma^2$

菱形破片

$C_x = 1.45 - 0.039Ma$

当空气阻力系数为常数时,积分式(1),并记破片初速和飞行距离分别为 v_0 和 x ,得到破片存速

$$v = v_0 \exp(-\alpha x) \qquad \alpha = C_x \rho S / (2m) \tag{2}$$

式中: α 称为破片衰减系数,是表征破片在飞行过程中保存速度能力的参数。式(3)表明,破片衰减系数除与空气密度、破片本身形状和质量有关外,还与空气阻力系数 C_x 有关。当空气阻力系数取为常数时,对于特定的破片,衰减系数也为常数。

当空气阻力系数取如下线性关系时

$$C_x = A - BMa \tag{3}$$

代入式(1),并积分,得到破片存速计算式

$$v = \frac{Av_0 \exp(-A\rho Sx/(2m))}{A - B(v_0/c)(1 - \exp(-A\rho Sx/(2m)))} \tag{4}$$

式中: c 是标准空气声速,其值为 340.3 m/s。当空气阻力系数取为其他关系式时,破片存速计算关系式更复杂,通常需求解微分方程。

3.2 理想球形钨珠飞行速度衰减规律

为掌握钨珠长距离飞行时的速度衰减规律,采用二级轻气炮和激光无阻测量方法进行实验研究。

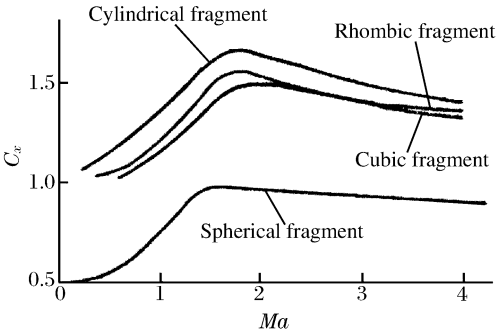


图 2 空气阻力系数与飞行速度之间的关系
Fig. 2 Air drag coefficient versus velocity of fragment

实验在 200 m 自由飞弹道靶上进行。该弹道靶主要由发射器(∅40 mm 的二级轻气炮)、膨胀段、实验段和测控系统组成,总长 200 m,实验段长 182 m,直径 1.5 m,配有 30 个正交阴影测控站,用于观察弹丸姿态和流场,记录弹丸到达测控站的时间。

实验时,钨珠由二级轻气炮发射,初始速度与一般破片式战斗部的破片初速相当,约 2 km/s。在膨胀段采用气动方法分离钨珠和弹托,以保证发射系统不影响实验。在 120 m 的飞行弹道上布置一系列激光屏,测量钨珠到达时刻。钨珠在两个激光屏之间的平均速度即为这两个激光屏中点的瞬时速度。

共进行了 8 发实验,结果表明,在同一初速下,理想球形钨珠长距离飞行时的衰减系数 α 仍为常数,空气阻力系数 C_x 与初速 v_0 有关,在战斗部设计关心的速度范围(0.6~2.2 km/s)内,两者成线性关系

$$C_x = 1.069 - 0.019v_0/c \tag{5}$$

这方面的内容详见文献[11]。

3.3 经历爆轰驱动的钨珠飞行速度衰减规律

在装填钨珠的战斗部实验中,钨珠经主装药爆轰驱动后,有轻微的变形和质量损失,在钨珠速度衰减计算中,我们发现空气阻力系数取式(5)、衰减系数为常数的计算方法不再适用,而空气阻力系数取式(3)的线性关系,计算结果与实验结果吻合,是一种可行的工程计算方法。

3.3.1 实验方法

测量战斗部破片的初速十分困难,主要原因是:(1) 战斗部爆炸后产生大量破片,向四周飞散;(2) 在战斗部爆炸早期,高温高压爆轰产物将破片掩盖,很难观测。破片初速的测量方法通常是,在离战斗部一定距离处布置探针,测量破片飞行距离和时间,根据衰减系数或空气阻力系数,计算破片初速,从而得到战斗部破片飞行规律。

为较全面、准确地测量经历爆轰驱动的钨珠飞行规律,分别从近距离和远距离测量了钨珠飞行距离 x 和时间 t ,通过多套实验数据,运用非线性拟合方法求空气阻力系数,实验布置见图 3。共进行 2 发实验,第 1 发在 $0^\circ \leq \beta \leq 90^\circ$ 范围内布置多个铜箔探针,近距离测量破片飞行距离和时间,第 2 发在 $0 \leq l \leq 120$ m 的范围内布置多个探针,远距离测量破片飞行距离和时间。战斗部装填两种尺寸的钨珠, β 和 l 较小时对应尺寸较小的钨珠, β 和 l 较大时对应尺寸较大的钨珠。

3.3.2 实验数据处理方法

将 $v = dx/dt$ 代入式(4),积分并考虑到初始条件: $x=0$ 时 $t=0$,得到

$$t = \frac{1}{C} \left(\frac{1}{v_0} - \frac{B}{cA} \right) (\exp(Cx) - 1) + \frac{Bx}{cA} \tag{6}$$

$$C = \frac{A\rho S}{2m} \tag{7}$$

根据实验测得的 (x, t) 数据,由式(6)拟合求解破片初速 v_0 和空气阻力系数中的常数 A 和 B 。在拟合过程中,破片初速 v_0 的取值由经典的 Gurney 公式估算^[12]。Gurney 公式为

$$v_0 = k\sqrt{2E}(\eta + 1/2)^{-1/2} \tag{8}$$

式中: $\sqrt{2E}$ 是主装药的 Gurney 能,对于 RHT-902 炸药, $\sqrt{2E} = 2.70$ km/s^[18]; k 是与战斗部类型有关的常数,对于全预制破片式战斗部, $k = 0.9$; η 是战斗部装填比。在式(7)计算过程中,质量 m 取回收钨珠的平均质量,迎风面积 S 则取理想球形的,原因是,钨珠虽然有变形,但基本形状仍为球形。

3.3.3 实验结果及分析

根据 2 发实验测得的所有 (x, t) 数据,由式(6)拟合得到: $v_0 = 1.53$ km/s、 $A = 1.310$ 、 $B = 0.015$,即经历爆轰驱动的钨珠空气阻力系数

$$C_x = 1.310 - 0.015v/c \tag{9}$$

拟合结果与实验结果的比较见图 4。从图中可看出,两者吻合,说明钨珠的空气阻力系数取如式

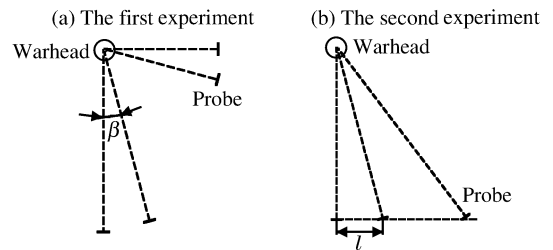


图 3 实验布置示意图
Fig. 3 Experimental set-up

(9)的线性关系是可行的。实验数据点有一定的分散性是因为,经爆轰驱动后,钨珠质量损失和变形各不相同,接通探针的钨珠如果是质量损失少变形小的,则飞行时间短,反之,如果是质量损失多变形大的,则飞行时间长。因此,拟合结果是多个钨珠的统计值,应是战斗部破片的平均值。

需说明的是,我们尝试过实验测量回收钨珠的速度衰减规律,但由于形状不规则,被小口径火炮发射、与弹托分离后,飞行弹道不确定,难以远距离测量,实验没有取得预期结果。

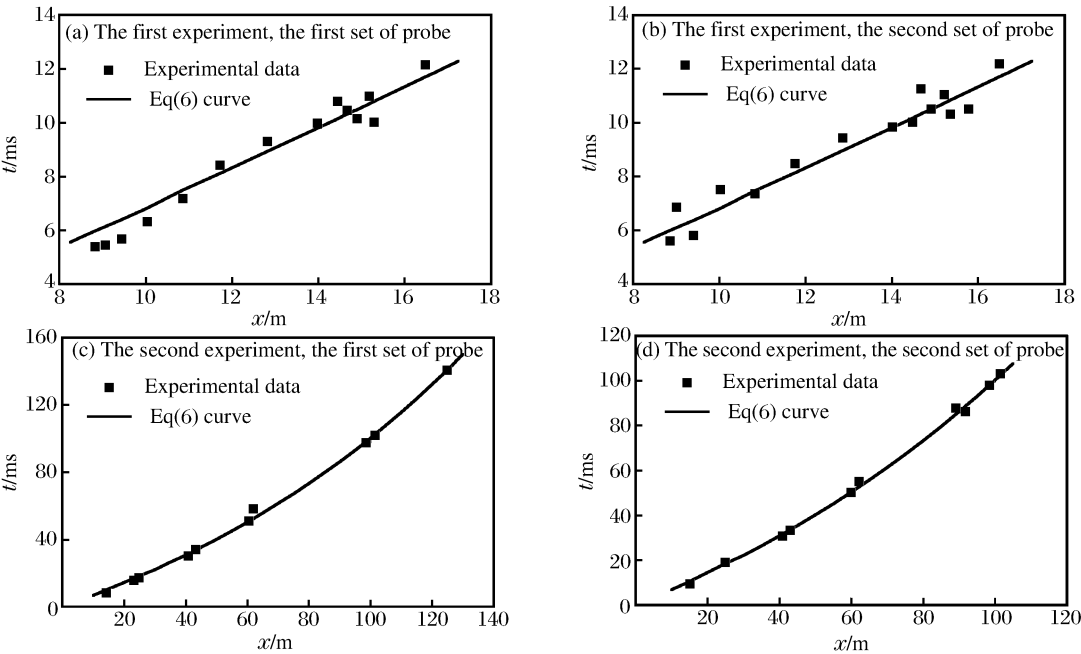


图 4 拟合结果与实验结果的比较
Fig. 4 Comparison between fitting and experimental results

4 穿甲能力的变化

4.1 理想球形钨珠

主要研究了直径 7.5 mm 钨珠的穿甲能力。实验方法如图 5 所示,钨珠由口径 14.5 mm 的火药枪发射,探针 1 测量靶前速度 v_0 ,探针 2 测量靶后剩余速度 v_r ,靶板材料为 Q235-A。实验结果见表 1,表中 d 是钨珠直径, δ 是靶板厚度。

由 Poncelet 阻力定律及量纲分析,球形破片正着靶时,贯穿的靶板厚度^[1]

$$\delta = \sqrt{A} \left(\frac{mv_{50}^2}{2C_1 A^{3/2}} \right)^{5/9} \tag{10}$$

式中: A 为破片截面积, $A = \pi d^2/4$, v_{50} 为破片的弹道极限速度, C_1 是与靶板材料强度有关的量。根据文献[1],该式计算结果与球形破片贯穿软钢板实验结果符合良好,我们选用该式计算钨珠的穿甲能力。由于钨珠穿靶后基本完整,因此,钨珠剩余速度计算式为^[13-14]

$$v_r^2 = v_0^2 - v_{50}^2 \tag{11}$$

联立式(10)和(11),得到

$$\frac{1}{2}m(v_0^2 - v_r^2) = A^{3/2} \left(\frac{\delta}{A^{1/2}} \right)^{9/5} C_1 \tag{12}$$

由实验结果拟合得到 $C_1 = 1.44 \text{ GPa}$ 。

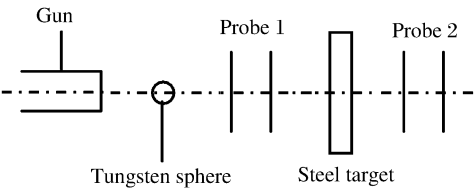


图 5 钨珠穿甲实验装置
Fig. 5 Experimental setup for perforation of a thin steel plate by a tungsten sphere

表 1 理想球形钨珠穿甲实验结果

Table 1 Experimental results of perforation of thin steel plates by ideal tungsten spheres

No.	d/mm	$v_0/(\text{m/s})$	$v_r/(\text{m/s})$	δ/mm	No.	d/mm	$v_0/(\text{m/s})$	$v_r/(\text{m/s})$	δ/mm
1	6.01	1 200	328	12.2	6	7.50	589	314	6.7
2	7.51	1 002	186	14.2	7	7.51	552	292	6.0
3	7.52	897	172	13.1	8	7.51	789	282	11.5
4	7.50	879	230	12.5	9	8.51	732	177	12.6
5	7.51	687	189	9.0					

4.2 经历爆轰驱动的钨珠

经历爆轰驱动的钨珠穿甲能力由统计战斗部破片穿甲率计算,方法是,在离战斗部一定距离处,布置不同厚度的钢靶板,测量钨珠穿甲率,通过插值得到钨珠的弹道极限穿透厚度 δ_{50} ,结果见表 2。表中钢靶板材料是 Q235-A,尺寸是 1 m×1 m, x 是钢靶板到战斗部爆心的距离, v 是钨珠着靶速度,由式(4)和式(9)计算, n_p 和 n_d 分别是钨珠穿透和未穿透靶板的数量, η 是钨珠穿甲率, d_p 是钨珠穿孔典型直径, δ_{50} 是钨珠弹道极限穿透厚度。表中主要是直径 7.5 mm 钨珠的穿甲结果,只有 1 组直径 6.0 mm 钨珠的结果,原因是实验预估方面的失误,布置的靶板较厚,直径 6.0 mm 钨珠不能穿透。

表 2 战斗部实验钨珠穿甲结果

Table 2 The armor piercing ratio of tungsten spheres in the warhead experiment

No.	d/mm	x/m	$v/(\text{m/s})$	δ/mm	n_p	n_d	$\eta/\%$	d_p/mm	δ_{50}/mm
1	6.0	16.77	1 281.5	12	63	25	71.6	11	10.8
				10	8	52	13.3	11	
2	7.5	50.10	999.5	12	9	83	9.8	11	10.7
				10	38	15	71.7	11	
3	7.5	59.62	921.0	12	0	5	0.0		9.4
				10	5	8	38.5	11	
4	7.5	69.15	848.5	12	3	18	14.3	11	9.0
				10	8	13	38.1	11	
5	7.5	79.23	777.8	10	2	15	11.8	10	7.6
				8	10	13	43.5	10	
6	7.5	88.28	719.2	8	1	4	20.0	10	6.9
				6	3	1	75.0	10	
7	7.5	98.25	659.7	8	0	6	0.0		6.6
				6	9	3	75.0	9	
8	7.5	108.54	603.3	6	3	8	27.3	9	5.3
				5	6	4	60.0	10	

我们发现,在式(10)中引入破片形状 k ,计算结果与实验符合良好,如图 6 所示。图中 $x_1 = A^{3/2}(\delta/A^{1/2})^{9/5}$ 。因此,钨珠对钢靶板穿甲能力计算式统一为

$$m(v_0^2 - v_r^2)/2 = kA^{3/2}(\delta/A^{1/2})^{9/5}C_1 \tag{13}$$

式中: $C_1=1.44\text{ GPa}$,对于理想球形钨珠, $k=1$,对于经爆轰驱动的钨珠, $k=2$,当 $v_r=0$ 时, v_0 和 δ 分别对应钨珠的弹道极限速度 v_{50} 和弹道极限穿透厚度 δ_{50} 。为了验证式(13),我们曾尝试利用实验回收的钨珠进行穿甲实验,实验方法同图 5,同测量回收钨珠的速度衰减规律一样,由于飞行弹道不确定,只有 3 发实验取得了有效数据,见表 3 和图 6 中的实心小方框,从图中可看出,回收钨珠穿甲实验结果与战斗部实验结果及式(13)计算结果仍是符合的。

表 3 回收钨珠穿甲实验结果

Table 3 Experimental results of perforation of thin steel plates by softly-recovered tungsten spheres

No.	m/g	$v_0/(\text{m/s})$	$v_r/(\text{m/s})$	δ/mm
1	3.808	940	539	8.0
2	3.396	1 000	556	8.0
3	3.467	692	351	3.0

4.3 穿甲能力的比较

由式(14),可计算出爆轰驱动前后直径 7.5 mm 钨珠弹道极限穿透厚度的变化,见图 7。从图中可看出,经爆轰驱动后,钨珠弹道极限穿透厚度明显下降。根据钨珠平均质量损失 8.4%,经爆轰驱动后直径 7.5 mm 钨珠的极限穿透厚度下降了 35%。

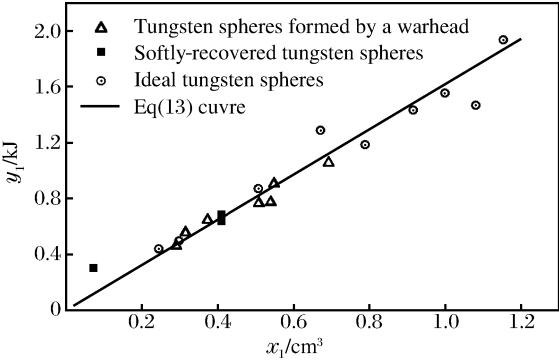


图 6 式(13)计算结果与实验结果的比较
Fig. 6 Comparison between Eq. 13 calculation value and experimental data

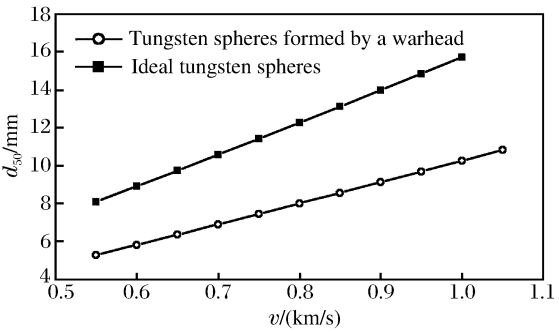


图 7 爆轰驱动前后直径 7.5 mm 钨珠弹道极限穿透厚度的变化
Fig. 7 Ballistic limit perforation thickness of tungsten sphere with a diameter of 7.5 mm

5 结 语

- (1) 本文中钨珠穿甲计算模型的有效性主要被直径 7.5 mm 的钨珠验证,其他尺寸的钨珠实验数据只有 3 组(理想形状的 2 组,经历爆轰驱动的 1 组),有待于进一步的验证;
- (2) 弹道极限穿透厚度的含义是被给定破片完全贯穿的概率为 50%时靶板的厚度。对于给定的破片,并不存在一个固定不变的弹道极限穿透厚度,即靶板小于该厚度时被破片贯穿,大于该厚度时不被贯穿。确切地说,存在着的是一段厚度区间,当靶板厚度在该区间时,可能被贯穿,也可能不被贯穿;当低于该区间下限时,被贯穿的概率接近 100%,当高于该区间上限时,被贯穿的概率几乎为零。因此,确定弹道极限穿透厚度是很困难的,比较可信的方法是进行多发实验。本文中通过 2 块不同厚度钢板的穿甲率确定弹道极限穿透厚度,虽然实验数量较少,但破片着靶数量较多,结果应是比较可信的;
- (3) 同一方向的钨珠初速是有一定分布的,并且经爆轰驱动后,钨珠质量损失和变形各不相同,从严格意义上来说,几乎每个钨珠所对应的空气阻力系数和弹道极限穿透厚度都是不相同的,因此,经历爆轰驱动的钨珠的空气阻力系数和弹道极限穿透厚度是战斗部实验的统计结果,应是所有钨珠的平均值,可用于装填钨珠的战斗部破片速度和穿甲能力的工程计算;
- (4) 钨珠经爆轰驱动后,发生轻微的质量损失和变形现象,保存速度和穿甲能力均有所降低,但长距离飞行后,仍具较强的穿甲能力,是破片式战斗部或杀爆战斗部较理想的选择。

参考文献:

[1] 隋树元,王树山. 终点效应学[M]. 北京:国防工业出版社,2000:53-195.

[2] Held M. Fragmentation warheads[C]//Carleone J. Tactical Missile Warheads. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993:387-464.

[3] 午新民,王中华. 国外机载武器战斗部手册[Z]. 北京:国防工业出版社,2005.

[4] Hebeisen J C, Maselli M M. Composite titanium/tungsten warhead body for an advanced stinger missile[C]//Proceedings of the 43rd Annual of Bomb & Warhead Technical Meeting. New Mexico: Technology Transfer Center, 1993:97-111.

[5] 曹菊珍,李恩征,王政. 钨珠在穿靶过程中破损问题的数值研究[J]. 高压物理学报,2001,15(2):97-102. CAO Ju-zhen, LI En-zheng, WANG Zheng. Numerical study on the damaging of wolfram balls flying in gases[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2001,15(2):97-102.

[6] O'Connor E J, Yatteau J D. Size scaling in ballistic limit velocities for small fragments perforating thin plates[C]//

- Crewther I R. Proceeding of 19th International Symposium on Ballistics. Thun, Switzerland: Vetter Druck AG, 2001:1107-1114.
- [7] 高润芳, 韩峰, 马晓青, 等. 几种钨合金破片垂直侵彻装甲钢板极限穿透速度研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(4): 57-62.
- GAO Run-fang, HAN Feng, MA Xiao-qing, et al. Investigation of tungsten fragments of different shape penetrating armour plate[J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(4): 57-62.
- [8] 何勇, 刘媛君. 预制破片战斗部对巡航导弹毁伤仿真研究[J]. 弹箭与制导学报, 2005, 25(1): 31-33.
- HE Yong, LIU Yuan-jun. Research on the damage simulation of performed fragment warheads to the cruise missile [J]. Journal of Projectiles, Rockets, Missiles and Guidance, 2005, 25(1): 31-33.
- [9] 谭多望, 李翔, 温殿英, 等. 球形钨合金破片终点弹道性能实验研究[J]. 爆炸与冲击, 2003, 23(5): 425-429.
- TAN Duo-wang, LI Xiang, WEN Dian-ying, et al. Experimental investigation of terminal effects of spherical tungsten fragments[J]. Explosion and Shock Waves, 2003, 23(5): 425-429.
- [10] 蒋浩征, 周兰庭, 蔡汉文. 火箭战斗部设计原理[M]. 北京: 国防工业出版社, 1982: 163-165.
- [11] 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 Duo-wang, WEN Dian-ying, ZHANG Zhong-bin, et al. Long-distance flight performances of spherical fragments[J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(4): 271-275.
- [12] Charron Y J. Estimation of velocity distribution of fragment warheads using a modified Gurney method[R]. AD A074759, 1979.
- [13] Recht R F. Penetration of thin targets by fragments[C]//Carleone J. Tactical Missile Warheads. Washington D C: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993: 507-554.
- [14] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets[J]. International Journal of Engineering Science, 1978, 16(2): 1-99.

Influence of detonation driving on terminal ballistic effects of tungsten spheres

TAN Duo-wang^{*}, CAO Ren-yi, WANG Guang-jun, GONG Yan-qing
(Laboratory for Shock Waves and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics,
China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Tests were performed to investigate the influence of detonation driving on terminal ballistic effects of tungsten spheres. The experimental results show that (1) tungsten spheres are slightly deformed and damaged as a result of the high shock pulse during detonation, the average mass loss of tungsten spheres with a diameter of 6.0 mm and 7.5 mm is 8.4%; (2) for ideal tungsten spheres, the attenuation coefficient of velocity is constant, the air drag coefficient is a linear function of initial velocity, whereas for tungsten spheres formed by a warhead, the attenuation coefficient of velocity is not constant, the air drag coefficient is a linear function of flight velocity; (3) the deformation and damage of tungsten spheres exerts a obvious influence on the perforation thickness, for tungsten spheres with a diameter of 7.5 mm, experiments and calculations confirm a 35%-reduction in ballistic limit perforation thickness.

Key words: mechanics of explosion; terminal ballistic effect; detonation driving; tungsten sphere; air drag coefficient; perforation

^{*} Corresponding author: TAN Duo-wang
E-mail address: dwtan@caep.ac.cn
Telephone: 86-816-2485106