

文章编号: 1001-1455(2003)05-0425-05

球形钨合金破片终点弹道性能实验研究*

谭多望¹, 李 翔², 温殿英¹, 张 旭¹, 张忠斌¹

(1. 中物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;

2. 中国工程物理研究院, 四川 绵阳 621900)

摘要: 实验研究了球形钨合金破片的速度衰减规律、爆轰驱动下的变形和破碎、对半无限钢靶的侵彻以及对薄钢靶的贯穿。结果表明: (1)破片长距离(120 m)飞行时的衰减系数为常数, 阻力系数与破片初速成线性关系; (2)在爆轰驱动下, 直径为 6.0 和 7.5 mm 的破片破碎率为 2%~3%, 而直径为 8.5 mm 的破碎率为 45%; (3)破片长距离飞行后仍有很强的穿甲能力。

关键词: 爆炸力学; 终点弹道性能; 球形钨合金破片; 衰减系数; 穿甲; 侵彻

中图分类号: O385 国标学科代码: 130°3530 文献标志码: A

1 引 言

破片式战斗部对目标的毁伤效果与破片的成形、衰减系数、穿甲能力等终点弹道性能密切相关。球形钨合金破片(钨珠)由于密度高、衰减系数小、穿甲能力强, 成为防空、反辐射、面杀伤战斗部的主要杀伤元素之一^[1-2]。为较系统地掌握钨珠终点弹道性能, 为战斗部设计和威力评估提供依据, 本文中通过实验研究了钨珠长距离飞行时的速度衰减规律、在爆轰驱动下的变形和破碎以及对钢质靶板的侵彻和穿甲。

2 速度衰减规律

根据 Newton 阻力定律, 球形破片在空中飞行时速度衰减规律为

$$v = v_0 \exp(-\alpha x) \quad (1)$$

$$\alpha = \pi c_x \rho d^2 / 8m \quad (2)$$

式中: v 和 x 分别为破片飞行速度和距离, v_0 为初始速度, α 为衰减系数, m 和 d 分别为破片质量和直径, ρ 和 c_x 分别为空气密度和阻力系数。国外风洞实验结果表明, 当破片速度超过 $2Ma$ 后, 阻力系数与飞行速度有轻微的关系, 随速度的增加而减小, 但具体的关系式未见到公开报道。在战斗部设计关心的范围内(约 $4Ma \sim 6Ma$), 阻力系数近似为常数 $0.97^{[3-4]}$ 。

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了研究。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, 即 2 km/s 左右。在 120m 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该两个激光屏中点的瞬时速度。

共进行了 8 发实验, 根据钨珠尺寸和环境条件以及由式(1)拟合得到初速 v_0 和衰减系数 α , 见表 1, 部分实验结果与式(1)计算结果比较见图 1。从图 1 中可看出, 计算结果与实验结果非常符合, 说明钨珠长距离飞行时的衰减系数 α 仍为常数。

由于空气处于常温和常压状态, 根据理想气体状态方程, 由压力和温度可求得密度 ρ , 再由式(2)可求得阻力系数 c_x , 结果参见表 1。从表中可看出, 阻力系数与破片初速有关。结合先前对不同尺寸的钨

* 收稿日期: 2002-11-19; 修回日期: 2003-01-14

基金项目: 国家自然科学基金项目(59876027)

作者简介: 谭多望(1967—), 男, 副研究员, 博士研究生。

表 1 实验条件和结果

Table 1 The experimental condition and results

No.	d/mm	m/g	$T_0/^\circ\text{C}$	p_0/kPa	$v_0/(\text{m/s})$	α/km^{-1}	c_x
1	6.19	2.22	20.0	94.2	1777.2	7.34	0.967
2	6.20	2.23	18.7	95.4	2139.3	7.31	0.950
3	7.22	3.45	19.1	94.7	1717.4	6.50	0.971
4	7.20	3.45	18.6	94.8	1990.8	6.41	0.959
5	7.21	3.45	17.3	94.9	1945.3	6.47	0.961
6	8.10	4.82	20.2	94.2	1764.1	5.77	0.965
7	8.12	4.91	18.7	94.4	1913.2	5.69	0.959
8	8.10	4.86	19.3	95.0	1953.2	5.79	0.965

珠(密度为 $6.55\text{g}/\text{cm}^3$)和钢珠(密度为 $7.85\text{g}/\text{cm}^3$)的测量结果,在 $1.2\sim 2.2\text{ km/s}$ 初速范围内,阻力系数与破片初速成如下线性关系

$$c_x = 1.069 - 0.019v_0/a \quad (3)$$

式中: a 是标准空气的声速, $a=340.3\text{ m/s}$ 。该方面的内容详见本文作者的另一篇文章[5]。

3 在爆轰驱动下的变形及破碎

钨珠由粉末冶金制造,虽然密度高,但韧性相对较差,在爆轰的强冲击作用下易破碎,影响毁伤效果。为研究钨珠在爆轰驱动下的响应,设计了模拟战斗部加速破片的爆轰驱动装置,通过软回收观察破片的变形,测量破碎率。

实验用的钨珠材料为 W232(钨含量为 94%),密度为 $18.0\text{g}/\text{cm}^3$ 。钨珠驱动装置如图 2 所示,由主装药、钨珠、内壳体、外壳体等组成。主装药为 RHT-901 炸药($\text{RDX}/\text{TNT}=60/40$)或 RHT-906 炸药($\text{RDX}/\text{TNT}=65/35$),内外壳体材料为 20 钢,厚度分别为 2 和 3 mm,用来模拟全预制战斗部的内外壳体,当钨珠直径为 6.0、7.5 和 8.5 mm 时,分别装填 4 层、3 层和 2 层钨珠,装填间隙填充环氧树脂。

当主装药为 RHT-901 炸药时,在离驱动装置 1.5 m 处,用装填木质锯末的回收箱回收所有的钨珠。回收结果表明,直径为 6.0 和 7.5 mm 的钨珠绝大多数保持完整,但有轻微的挤压变形和质量损失,破碎率为 2%~3%,质量损失平均为 7.3%,其中一发回收的钨珠见图 3;而直径为 8.5 mm 的钨珠破碎率较高,为 45%。由于回收箱与驱动装置之间距离很近,受爆轰产物的干扰,不能安放探针测量钨珠速度,钨珠速度单独进行测量,结果为:直径为 6.0 和 7.5 mm 的钨珠速度基本相同,均为 1.52 km/s 。

当主装药为 RHT-906 炸药时,为观察钨珠长距离飞行后的情况,在离驱动装置较远的地方,用装填橡皮的回收箱回收部分直径为 6.0 和 7.5 mm 的钨珠。回收的钨珠有轻微的挤压变形和质量损失(平均为 8.4%),见图 4。图中距离是指回收箱与驱动装置之间的距离,上面两行是直径为 6.0 mm 的钨

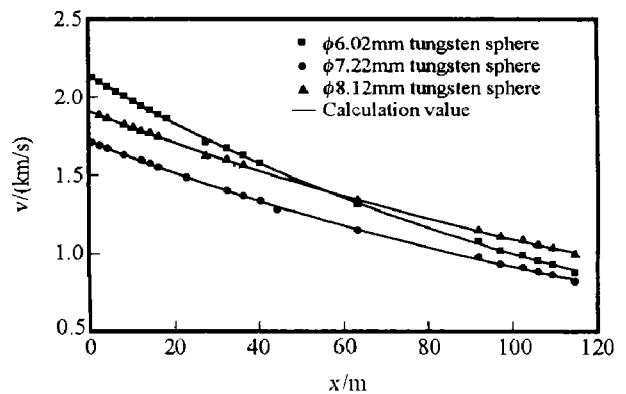


图 1 实验结果与计算结果的比较
Fig.1 Comparison between experimental data and calculation value

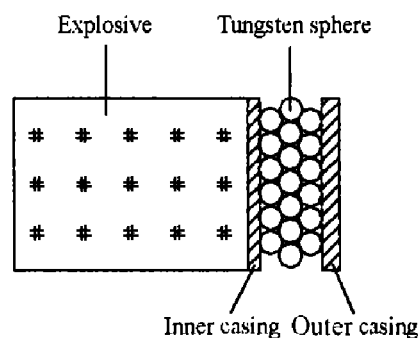


图 2 钨珠驱动装置示意图

Fig.2 Device of explosively driven tungsten spheres

珠, 初速为 1.99 km/s, 最下面一行是直径为 7.5mm 的钨珠, 初速为 1.97km/s。

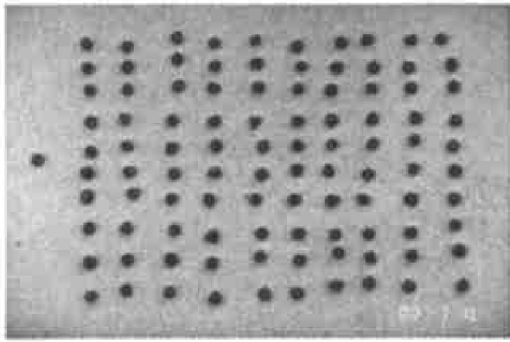


图 3 主装药为 RHT-901 时回收的钨珠
Fig.3 Collected tungsten spheres while the explosive is RHT-901

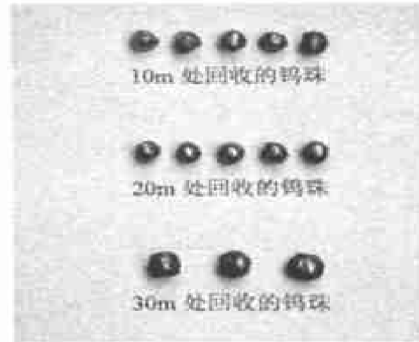


图 4 主装药为 RHT-906 炸药时回收的钨珠
Fig.4 Collected tungsten spheres while the explosive is RHT-906

4 侵彻和穿甲能力

4.1 对半无限钢靶的侵彻

实验装置如图 5 所示, 钨珠直径为 7.5 mm, 由口径为 $\varnothing 14.5$ mm 的火药枪发射, 速度由探针测量, 靶材料为 Q235-A。

由 Poncelet 阻力定律, 可推得破片侵彻深度

$$p = k \frac{\rho_p^{2/3} m^{1/3}}{2 \rho_t} \ln \left[1 + \frac{\rho_t}{B} v_0^2 \right] \quad (3)$$

式中: k 是破片形状系数, 对于球形破片, $k = (16/9\pi)^{1/3}$, ρ_p 和 ρ_t 分别是破片和靶板密度, m 是破片质量, v_0 是破片着靶速度, B 是与靶板材料强度有关的量, 由实验数据拟合得到 $B = 1.48 \text{ GPa}$ 。式(3)计算结果与实验结果的比较见图 6。

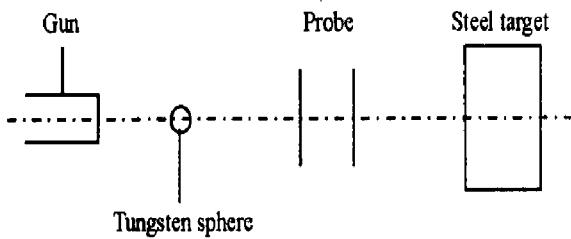


图 5 钨珠对半无限钢靶侵彻的实验装置
Fig.5 Test setup for penetration of a semi-infinite steel target by a tungsten sphere

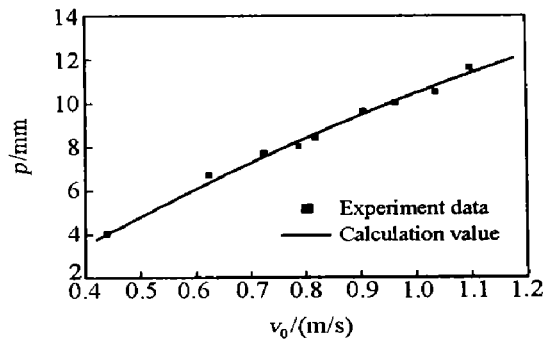


图 6 钨珠速度与侵彻深度之间的关系
Fig.6 The v_0 - p relation

4.2 对薄钢靶的贯穿

实验装置如图 7 所示, 钨珠由口径为 $\varnothing 14.5$ 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 2, 表中 δ 是靶板厚度。

由量纲分析, 球形破片正着靶时, 对钢板的贯穿厚度

$$\delta = \sqrt{A} \left[\frac{mv_{50}^2}{2CA^{3/2}} \right]^{5/9} \quad (4)$$

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 是与靶板材料强度有关的量。由于钨珠穿靶后基本完整, 因此, 钨珠剩余速度计算式为^[8-9]

$$v_r^2 = v_0^2 - v_{50}^2 \quad (5)$$

联立式(4)和(5),得到

$$\frac{1}{2} m (v_0^2 - v_r^2) = A^{3/2} \left[\frac{\delta}{A^{1/2}} \right]^{9/5} C \tag{6}$$

由实验结果拟合得到 $C = 1.44 \text{ GPa}$ 。式(6)计算结果与实验结果比较见图 8, 图中 $x = A^{3/2} \left[\frac{\delta}{A^{1/2}} \right]^{9/5}$, $y = \frac{1}{2} m (v_0^2 - v_r^2)$ 。

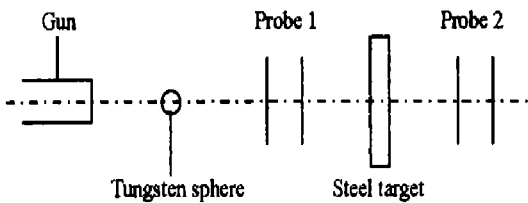


图 7 钨珠对薄钢靶贯穿的实验装置

Fig.7 Test setup for perforation of a thin steel plate by a tungsten sphere

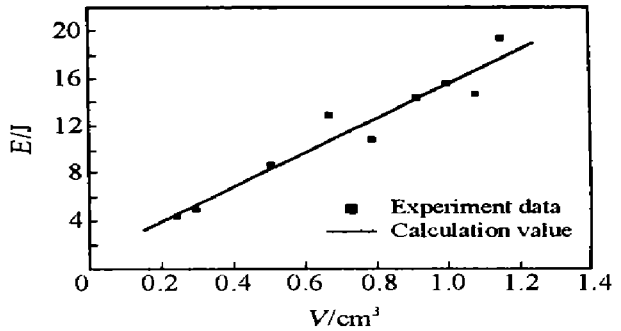


图 8 计算结果与实验结果比较

Fig.8 Comparison between calculation value and Experiment data

表 2 钨珠对薄钢靶贯穿的实验结果

Table 2 The experimental results of perforation of thin steel plates by tungsten spheres

No.	d/mm	$v_0/(\text{m/s})$	$v_r/(\text{m/s})$	δ/mm
1	6.01	1200	328	12.2
2	7.51	1002	186	14.2
3	7.52	897	172	13.1
4	7.50	879	230	12.5
5	7.51	687	189	9.0
6	7.50	589	314	6.7
7	7.51	552	292	6.0
8	7.51	789	282	11.5
9	8.51	732	177	12.6

4.3 经爆轰驱动长距离飞行后对薄钢靶的贯穿

钨珠驱动装置见图 2(主装药为 RHT-906 炸药), 在离装置较远的地方放置靶板, 观察钨珠长距离飞行后的穿甲能力。当钨珠直径为 6.0 mm 时, 初速为 1.99 km/s, 能穿透 20m 处 5 mm 厚的 Q235-A 钢板, 大多数穿孔为圆形, 孔径为 8 ~ 10mm。当钨珠直径为 7.5 mm 时, 初速为 1.97km/s, 能穿透 30 m 处 5 mm 厚的 Q235-A 钢板, 大多数穿孔为圆形, 孔径为 10 ~ 12mm, 典型的穿孔见图 9(a), 也能以 20° 的着角穿透 122 m 处一层 8 mm 厚的木板和一层 4mm 厚的角钢, 照片见图 9(b)。



图 9 钨珠飞行后在厚钢板上的典型穿孔

Fig.9 Typical perforation of a steel plate by a tungsten sphere

5 结 论

(1)在战斗部设计关心的速度范围内(1.7 km/s~2.1 km/s),钨珠长距离飞行时的衰减系数仍为常数,空气阻力系数与初速有关,两者成线性关系;

(2)在爆轰驱动下,直径为6.0和7.5 mm的钨珠基本保持完整,破碎率为2%~3%,而直径为8.5 mm的破碎率为45%;

(3)破片长距离飞行后仍有较强的穿甲能力。

参考文献:

- [1] 中国航天工业总公司《世界导弹大全》修订委员会.世界导弹大全[M].北京:军事科学出版社,1998.
- [2] Held M. Fragmentation warheads[A]. Carleone J. Tactical missile warheads[C]. Washington DC: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1993:439-446.
- [3] 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.
- [4] Davidson R O. Ammunition Series Section 2, Design for Terminal Effects[R]. AD389304, 1976.
- [5] 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 Dianying, ZHANG Zhongbin, et al. Long-distance flight performances of spherical fragments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(4):271-275.
- [6] 隋树元,王树山.终点效应学[M].北京:国防工业出版社,2000:125-136.
- [7] Backman M E, Goldsmith W. The mechanics of penetration of projectiles into targets[M]. Int J Engng Sci, 1978, 16: 1-99.
- [8] Recht R F. High velocity impact dynamics; Analytical modeling of plate penetration dynamics[A]. Zukas J A. High velocity impact dynamics[C]. New York: John Wiley & Sons Inc, 1990:443-513.
- [9] Wilkins M L. Mechanics of penetration and perforation[J]. Int J Engng Sci, 1978, 16:793-807.

Experimental investigation of terminal effects of spherical tungsten fragments

TAN Duo-wang^{1*}, LI Xiang², WEN Dian-ying¹, ZHANG Xu¹, ZHANG Zhong-bin¹

(1. Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics, Institute of Fluid Physics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China;
2. China Academy of Engineering Physics, Mianyang 621900, Sichuan, China)

Abstract: Ttests were performed to investigate the terminal effects of spherical tungsten fragments, i.e., the behavior during long-distance flight, the deformation and driven by detonation, the penetration of semi-infinite steel targets and the perforation of thin steel plates. The experimental results show that a) the attenuation coefficient of velocity is constant and the air drag coefficient is a linear function of initial velocity. b) Driven by detonation, the percentage of fragments with a diameter of 6.0mm and 7.5mm is 2%~3%, whereas break percentage is 45% for the fragments with a diameter of 8.5mm. c) The fragments can still perforate thin steel plates after traveling long distances.

Key words: mechanics of explosion; terminal ballistic effects; pherical tungsten fragment; attenuation coefficient of velocity; perforation; penetration

* Corresponding author: TAN Duo-wang