文章编号：1000-5773(2007)03-0231-06

球形钨合金破片空气阻力系数实验研究*

谭多望，王广军，龚晏青，高 宁

（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：实验研究了理想球形钨合金破片和经历爆轰驱动的球形钨合金破片长距离飞行时的速度衰减规律。实验结果表明：(1) 对于理想球形钨合金破片，在同一初始速度条件下，衰减系数为常数，空气阻力系数与初始速度有关，两者成线性关系；(2) 对于经历爆轰驱动的球形钨合金破片，由于有轻微的质量损失和变形，速度衰减规律与理想球形钨合金破片有明显的区别，空气阻力系数与飞行速度有关，两者成线性关系。

关键词：球形钨合金破片；衰减系数；空气阻力系数；破片战斗部

中图分类号：O385 **文献标识码**：A

1 引 言

防空、反辐射、面杀伤等类型战斗部一般采用破片战斗部，主要依靠破片动能毁伤目标。破片能否有效地杀伤目标与破片打击目标时的速度、形状和质量密切相关。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、面杀伤等战斗部破片设计的主要选择对象[1-2]。当战斗部完成设计、进行威力评估时，破片飞行规律成为重要问题。国内外大多数破片飞行规律研究都是针对规则钢质破片（如球形、方形、柱形破片）短距离飞行的，而对高密度破片以及长距离飞行的情况研究较少[3]，对经历爆轰驱动的破片的研究至今未见公开报道。为掌握钨珠飞行规律，为战斗部设计和威力评估提供依据，我们通过自由飞弹道靶实验，研究了理想钨珠长距离飞行时的衰减系数和空气阻力系数，得到了理想钨珠飞行规律。但是当这一研究结果应用于装填钨珠的战斗部破片速度计算时，我们发现计算结果与实验结果差异较大，理想钨珠速度衰减规律不适用于战斗部实际产生的钨珠，原因是钨珠经历爆轰驱动后，产生轻微质量损失和变形。我们通过统计、分析战斗部实验结果，得到了经历爆轰驱动的钨珠长距离飞行时的空气阻力系数和速度衰减规律，为战斗部速度计算提供了一种工程计算方法。

2 破片飞行规律[4-5]

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

$$m\frac{\mathrm{d}v}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{2}c_x\rho s v^2 \tag{1}$$

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 是马赫数 Ma 的函数，国外风洞实验结果如图 1 所示。从图中可看出，不同破片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

* 收稿日期：2006-09-15；修回日期：2006-11-29

基金项目：国防科技预研项目

作者简介：谭多望（1967—），男，博士，研究员，主要从事爆炸力学研究. E-mail：dwtan@caep.ac.cn

内($Ma=3\sim5$),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 $c_x=1.45-0.0389Ma$

当阻力系数为常数时,积分(1)式,并记破片初速和飞行距离分别为 v_0 和 x,得到破片存速计算式

$$v=v_0\exp(-\alpha x) \tag{2}$$

$$\alpha=\frac{c_x\rho s}{2m} \tag{3}$$

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。(3)式表明,破片衰减系数除与空气密度、破片本身形状和质量有关外,还与阻力系数 c_x 有关。当阻力系数取为常数时,对于特定的破片,衰减系数也为常数。当阻力系数取如下线性关系时

$$c_x=A-BMa \tag{4}$$

代入(1)式,并积分,得到破片存速计算式

$$v=\frac{Av_0\exp(-A\rho sx/2m)}{A-B(v_0/a)[1-\exp(-A\rho sx/2m)]} \tag{5}$$

式中:a 是标准空气声速,其值为 340.3 m/s。当阻力系数取为其它关系式时,破片存速计算关系式更为复杂,通常需求解微分方程。

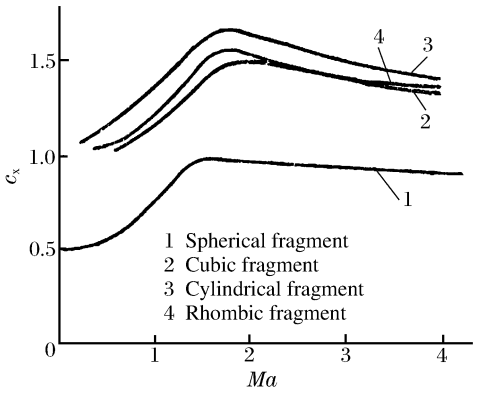


图 1 空气阻力系数与飞行马赫数之间的关系

Fig. 1 Air drag coefficient versus flight Mach number of fragment

3 理想球形钨合金破片空气阻力系数

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实验研究。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,即 2 km/s 左右。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该两个激光屏中点的瞬时速度。

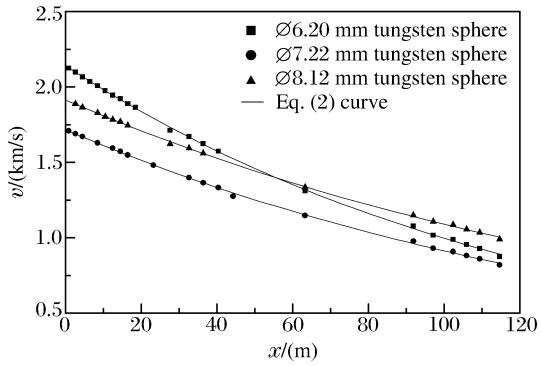


图 2 实验结果与(2)式计算结果的比较

Fig. 2 Comparison between experimental data and Eq. (2) curve

共进行了 8 发实验,钨珠尺寸和环境条件以及由(2)式拟合得到的初速 v_0 和衰减系数 α 见表 1,部分实验结果与(2)式计算结果的比较见图 2。从图中可看出,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,因此服从理想气体状态方程,由压力和温度可求得密度 ρ,再由(3)式可求得阻力系数 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。结合先前我们对不同尺寸的锆珠(密度为 6.55 g/cm^3)和钢珠(密度为 7.85 g/cm^3)的测量结果,在 1.2～2.2 km/s 的初速范围内,阻力系数与破片初速成如下线性关系

$$c_x = 1.069 - 0.019 v_0 / a \tag{6}$$

该方面的内容详见参考文献[6]。

表 1　实验条件和结果

Table 1　The experimental condition and results

No.	d /(mm)	m /(g)	Air temperature /(℃)	Air pressure /(kPa)	v_0 /(m/s)	$\alpha/(\mathrm{m}^{-1})$	c_x
1	6.19	2.219	20.0	94.2	1 777.2	7.34×10^{-3}	0.967
2	6.20	2.225	18.7	95.4	2 139.3	7.31×10^{-3}	0.950
3	7.22	3.453	19.1	94.7	1 717.4	6.50×10^{-3}	0.971
4	7.20	3.450	18.6	94.8	1 990.8	6.41×10^{-3}	0.959
5	7.21	3.451	17.3	94.9	1 945.3	6.47×10^{-3}	0.961
6	8.10	4.821	20.2	94.2	1 764.1	5.77×10^{-3}	0.965
7	8.12	4.912	18.7	94.4	1 913.2	5.69×10^{-3}	0.959
8	8.10	4.857	19.3	95.0	1 953.2	5.79×10^{-3}	0.965

4　经历爆轰驱动的球形钨合金破片空气阻力系数

在装填钨珠的战斗部实验中,钨珠经主装药爆轰驱动后,有轻微的挤压变形和质量损失,其形貌与理想球形有一定区别,见图 3。在钨珠速度衰减计算中,发现阻力系数取(6)式、衰减系数为常数的计算方法不再适用,而阻力系数取(4)式的线性关系,计算结果与实验结果吻合,是一种可行的工程计算方法。

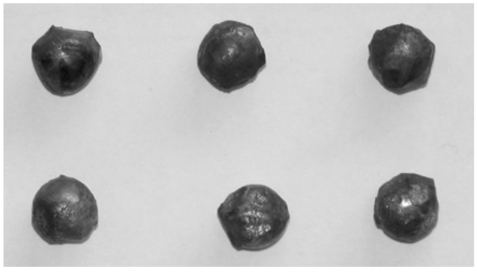


图 3　回收的钨合金破片

Fig. 3　Soft-recovered tungsten fragment

4.1　实验方法

战斗部破片初速是非常难于测量的物理量,其主要原因是:(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没,很难观测。战斗部破片初速测量方法通常是,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,本工作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 4。共进行 2 发实验,每发实验有两种探针布置:第 1 种在 $90^\circ \geqslant \beta \geqslant 0^\circ$ 范围内布置多个探针,近距离测量破片飞行距离和时间;第 2 种在120 m$\geqslant l \geqslant$0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 较小时对应尺寸较小的钨珠,β 较大时对应尺寸较大的钨珠。

4.2　实验数据处理方法

将 $v = \dfrac{\mathrm{d}x}{\mathrm{d}t}$ 代入(5)式积分,并考虑到初始条件 $x=0$ 时 $t=0$,得到

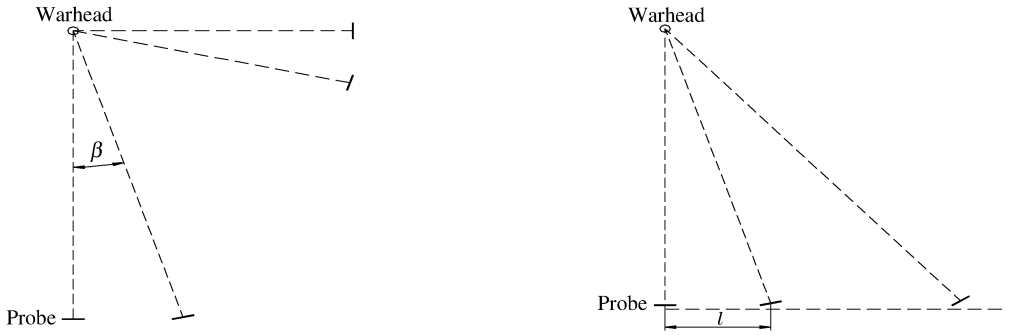
$$t = \frac{1}{c}\left(\frac{1}{v_0} - \frac{B}{aA}\right)[\exp(cx) - 1] + \frac{Bx}{aA} \tag{7}$$

$$c = \frac{A\rho s}{2m} \tag{8}$$

根据实验测得的(x,t)数据,由(7)式拟合求解破片初速 v_0 和阻力系数中的常数 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[7]。Gurney 公式为

$$v_0 = k\sqrt{2E}\left(\eta + \frac{1}{2}\right)^{-1/2} \tag{9}$$

式中：$\sqrt{2E}$ 为主装药 Gurney 能，对于 RHT-906 炸药，$\sqrt{2E}$ =2.70 km/s；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，即战斗部主装药质量与壳体质量之比。考虑到经历爆轰驱动后的钨珠有质量损失，在(8)式的计算过程中，破片质量 m 取回收钨珠的平均质量，虽然钨珠有轻微变形，但其基本形状仍为球形，因此，钨珠迎风面积 s 取理想球形。



(a) The first experiment (b) The second experiment

图 4 实验布置示意图

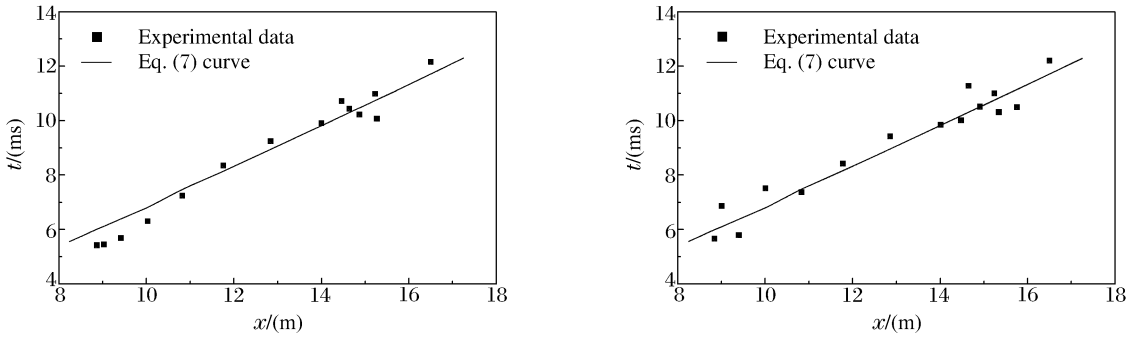
Fig. 4 Experimental set-up

4.3 实验结果及分析

根据 2 发实验测得的所有(x,t)数据，由(7)式拟合得到：v_0=1 530 m/s，A=1.310，B=0.015，即经历爆轰驱动的钨珠空气阻力系数为

$$c_x = 1.310 - 0.015v/a \tag{10}$$

拟合结果与实验结果的比较见图 5 和图 6。从图中可看出，两者吻合，说明钨珠阻力系数取如(10)式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，不同钨珠的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。



(a) The first set of probe (b) The second set of probe

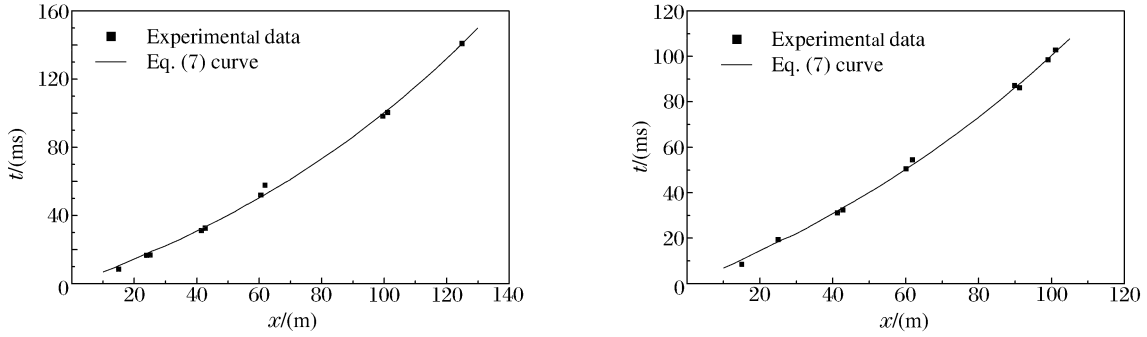
图 5 第 1 发实验

Fig. 5 The first experiment

另外，在实验中发现，钨珠对 l=122.5 m 处 3 mm 厚和 l=80 m 处 8 mm 厚的 Q-235 钢板有一定穿甲率。利用实验回收的钨珠(质量损失平均为 7.3%)进行了穿甲实验，结果表明，回收的钨珠穿透 3 mm和 8 mm 厚 Q-235 钢板所需的弹道极限能量分别约为 620 J 和 1 150 J。按(5)式计算，相应距离处的钨珠动能分别是 603 J 和 1 190 J。虽然弹道极限能量与破片着靶速度、尺寸、形貌等因素有关，但计算和实验结果符合也可以从另一方面说明，经历爆轰驱动的钨珠取(10)式的阻力系数是可行的。为进一

步验证,将拟合结果对以前 1 发战斗部进行了计算。战斗部装填三种尺寸的钨珠,装填比比上述 2 发战斗部高,破片初速也更高,测量方法基本同图 4,在 $90°\geqslant\beta\geqslant0°$ 范围内布置第 1 套探针,近距离测量破片飞行距离和时间,在 $40\ \text{m}\geqslant l\geqslant0$ 范围内布置第 2 套探针,较远距离测量破片飞行距离和时间。当 $v_0=1\,950\ \text{m/s}$(Gurney 公式计算结果为 1 910 m/s)时,计算与实验结果符合,见图 7。

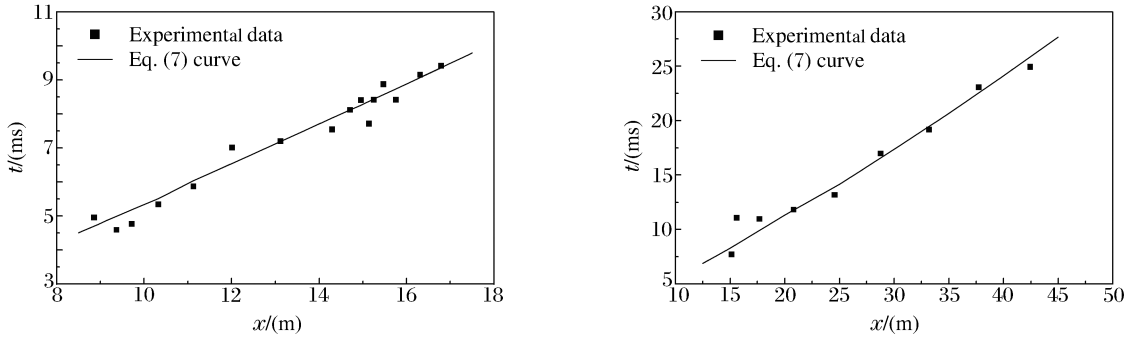
最后需说明的是,我们尝试过实验测量回收钨珠的速度衰减规律,但由于回收钨珠形状不规则,被小口径火炮发射、与弹托分离后,飞行弹道不确定,难以远距离测量,实验没有取得预期结果。



(a) The first set of probe　　(b) The second set of probe

图 6　第 2 发实验

Fig. 6　The second experiment



(a) The first set of probe　　(b) The second set of probe

图 7　第 3 发实验

Fig. 7　The third experiment

5　结　论

(1) 在同一初速条件下,理想球形钨合金破片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内,两者成线性关系 $c_x=1.069-0.019v_0/a$ (a 是标准空气声速)。

(b) 装填在战斗部中的球形钨合金破片经爆轰驱动后,产生轻微质量损失和变形,速度衰减规律与理想球形钨合金破片有明显的区别,空气阻力系数 c_x 与飞行速度 v 有关,两者成线性关系 $c_x=1.310-0.015v/a$ 。该结果由战斗部实验数据统计、分析得到,适用于装填钨珠的战斗部破片速度的工程计算。

References:

[1]　Held M. Fragmentation Warheads [A]. Carleone J. Tactical Missile Warheads [C]. Washington DC: The American

Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 1993: 462-464.
[2] Loyd R M. Physics of Directed Hit and Near Miss Warhead Technology [M]. Washington DC: The American Institute of Aeronautics and Astronautics, Inc, 2001: 199-276.
[3] Brinkley R F. Ballistics of Projectile Fragments [M]. Pennsylvania: Bureau of Mine, 1968: 73-78.
[4] Sui Sh Y, Wang Sh Sh. Terminal Effects [M]. Beijing: National Defence Industry Press, 2000: 87-90. (in Chinese)
隋树元, 王树山. 终点效应学 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2000: 87-90.
[5] Davidson R O. Ammunition Series Section 2, Design for Terminal Effects [R]. AD 389304, 1976.
[6] Tan D W, Wen D Y, Zhang Zh B, et al. Long-Distance Flight Performances of Spherical Fragments [J]. Chinese Journal of High Pressure Physics, 2002, 16(4): 271-275. (in Chinese)
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.
[7] Charron Y J. Estimation of Velocity Distribution of Fragment Warheads Using a Modified Gurney Method [R]. AD A074759, 1979.

Experimental Studies on Air Drag Coefficient of Spherical Tungsten Fragments

TAN Duo-Wang, WANG Guang-Jun, GONG Yan-Qing, GAO Ning

(*Laboratory for Shock Wave and Detonation Physics Research, Institute of Fluid Physics, CAEP, Mianyang* 621900, *China*)

Abstract: The air drag coefficients of spherical tungsten fragments are studied. The fragment includes ideal sphere and real fragment formed by a warhead. The experimental results show that: (1) for ideal spheres, the attenuation coefficient of velocity is constant, the air drag coefficient is slightly affected by the initial velocity and is a linear function of initial velocity, and (2) for real fragments formed by a warhead, the flight performances are different from ideal spheres, the air drag coefficient is affected by the flight velocity and is a linear function of flight velocity.

Key words: spherical tungsten fragment; attenuation coefficient of velocity; air drag coefficient; fragmentation warhead