

文章编号: 1001-1455(2005)04-0341-09

旋转弹丸入水侵彻规律*

顾建农¹, 张志宏¹, 范武杰²

(1. 海军工程大学理学院, 湖北 武汉 430033;

2. 第212研究所, 陕西 西安 710065)

摘要: 为了建立高速弹体入水弹道的模型, 利用数字式高速录像机实验研究了球形与普通手枪两种弹丸在三个入水角、六种发射速度下斜入水的水中弹道轨迹与空泡。实验结果表明, 弹丸形状对入水弹道的稳定性有重要影响。球形弹丸在斜入水时弹道稳定性较好, 而普通制式弹丸的弹道不稳定。在一定的入水角与速度范围内, 球形弹丸入水初期弹道的空泡特性、弹道轨迹以及速度衰减规律具有一定的相似性。而对于水中速度随时间的衰减规律, 则两种弹丸都具有一定的相似性, 且表现出极强的速度衰减特性。给出了弹丸水中速度衰减规律的数学预报模型, 并与实验结果进行了比较, 理论结果与实验结果吻合较好。

关键词: 流体力学; 数学预报模型; 高速录像; 弹丸; 空泡; 水弹道学

中图分类号: O353.4

国标学科代码: 130·2514

文献标志码: A

1 引言

近百年来, 弹体入水问题曾经吸引了大量学者, 特别是第二次世界大战后更是引起了人们的极大关注。由于入水现象的复杂性, 许多问题至今尚未得到满意的解决, 很难通过解析的方法从理论上进行计算, 主要依靠实验研究来发现和掌握弹体入水后的水中运动规律^[1]。

以前弹体入水的研究主要集中在速度较低鱼雷入水问题上, J. G. Waugh 等^[2]、A. May^[3]对弹体入水特点和实验结果进行了总结。而关于高速弹丸的入水问题, 早期也进行了一些初步实验, 但研究工作相对较少。矶部考^[4]研究了步枪子弹在水下弹道运动规律, 陈先富^[5]研究了高速钢球水平入水的空泡特征。随着破障炮弹、高速射弹研制的需要, 以及暴风雪高速鱼雷在俄罗斯的成功应用, 高速弹体的入水和水中弹道研究更是引起了各国的广泛兴趣, 但高速入水问题的复杂性也大大增加。在足够高的入水速度下, 由于伯努利效应引起弹体表面附近流体的压力降低, 当该压力降至流体的饱和蒸汽压时, 将在弹体表面产生空泡。当空泡数足够少时, 空泡将会包裹整个弹体形成超空泡。

与鱼雷、导弹运动特点不同, 炮弹、火箭深弹以及超空泡水中射弹等弹体入水除因旋转存在马格努斯效应外, 还因入水速度高存在流体的压缩效应。因此, 对旋转弹体高速入水弹道的研究, 无论理论上还是实验上都更加复杂, 发展一种半理论、半经验的工程近似方法不失为一条解决实际问题的途径。根据实验结果确定弹体入水空泡分离的位置及其形状, 再应用理论方法来预测弹体的入水弹道^[6]。

本文中利用数字式高速录像机实验研究两种弹型弹丸入水时的空泡特征以及弹道规律, 为高速弹体入水弹道的数学模型的建立提供基础。

2 实验设备

实验设备包括入水水箱、制式枪弹、可变角度发射装置和水中弹道测量系统四部分。水箱尺寸为 4 m × 2 m × 1 m。实验中采用 $\varnothing 9$ mm 弹道枪作为发射装置, 枪管长 88.63 mm, 缠度 $\eta = 254 \pm 1_5^0$ 。发射弹丸分别为 $\varnothing 9$ mm 制式手枪弹头与头部形状为半球形后部为圆柱体的球形弹头。手枪弹头的质量为

* 收稿日期: 2004-09-10; 修回日期: 2005-03-02

基金项目: 国防科技引信动态特性重点实验室基金项目(00JS34.1.1.JB1101)

作者简介: 顾建农(1963—), 男, 博士, 副教授。

8 g, 弹头长为 15.8 mm。球形弹头的质量为 6.2 g, 弹头长为 13.26 mm。弹道枪、弹与弹头的实物照片如图 1 所示。



图 1 弹道枪、弹与弹头照片

Fig. 1 Photograph for trajectory gun, bullet and pellet

在水箱右侧的顶部建有可变角度斜入水射击平台, 弹道枪置于其上。利用平台下方前后两个长螺杆的上下调节可精确改变和固定入水弹丸的角度, 能够满足弹丸入水时角度的变化 ($30^\circ \sim 60^\circ$), 在距水箱底部 0.5 m 处开有水下射击孔, 孔外建有水下发射装置, 用于弹丸的水下水平发射。

采用 KODAK 公司生产的 KODAK4540MX 数字式高速录像系统测量弹丸水中弹道, 最高记录速度为满幅 4 500 f/s, 分幅 40 500 f/s。

为了方便从录像中判读入水弹丸的运动轨迹, 在水箱中沿射击轴线偏右 0.08 m 处的铅垂平面上均匀布置坐标网格线, 垂直网格线间距为 0.1 m, 在每根垂线上每隔 0.1 m 缠上黑色胶带做记号。这样布置网格坐标线一方面不会干扰水中弹丸的运动, 另一方面在录像对焦时可保证弹丸与坐标线图像都清晰, 同时还可尽量减小由于视差带来的判读误差, 弹丸入水实验方案如图 2 所示。

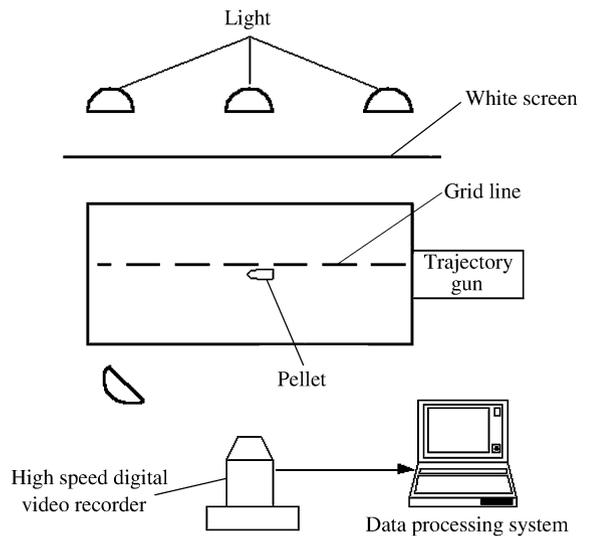


图 2 弹丸入水实验方案

Fig. 2 Scheme of the pellet water-entry experiment

3 实验结果与分析

利用上述设备在水箱中进行了旋转弹丸的水平与斜入水实验。斜入水实验中弹体轴线与水平线间的夹角分别为 30° 、 45° 、 60° 。两种弹型分别为半球头、普通制式弹头。弹丸入水射击速度分别为 137.9、204.2、246.9、303.4、358.4、401.7 m/s。

3.1 弹丸入水的空泡

弹丸入水时不可避免地会在弹体上形成空泡, 而空泡的形成与闭合对弹丸的弹道有重要的影响。图 3 给出了球形弹丸在入水角为 30° 、入水速度为 303.4 m/s 时空泡的初始发展过程照片。从图中可以看出, 斜入水空泡的形成与发展过程分为四个阶段: 开空泡、空泡闭合、颈缩与溃灭。

图 4 是球形弹丸水平入水 0.66 ms 时空泡外形。发射孔距水面和水底均为 0.5 m, 发射速度为 358 m/s。图 5 是球形弹体由水面斜入水 1.22 ms 时空泡外形, 已将图片顺时针旋转了 60° 。弹道与水面夹角为 60° , 发射速度为 246 m/s。

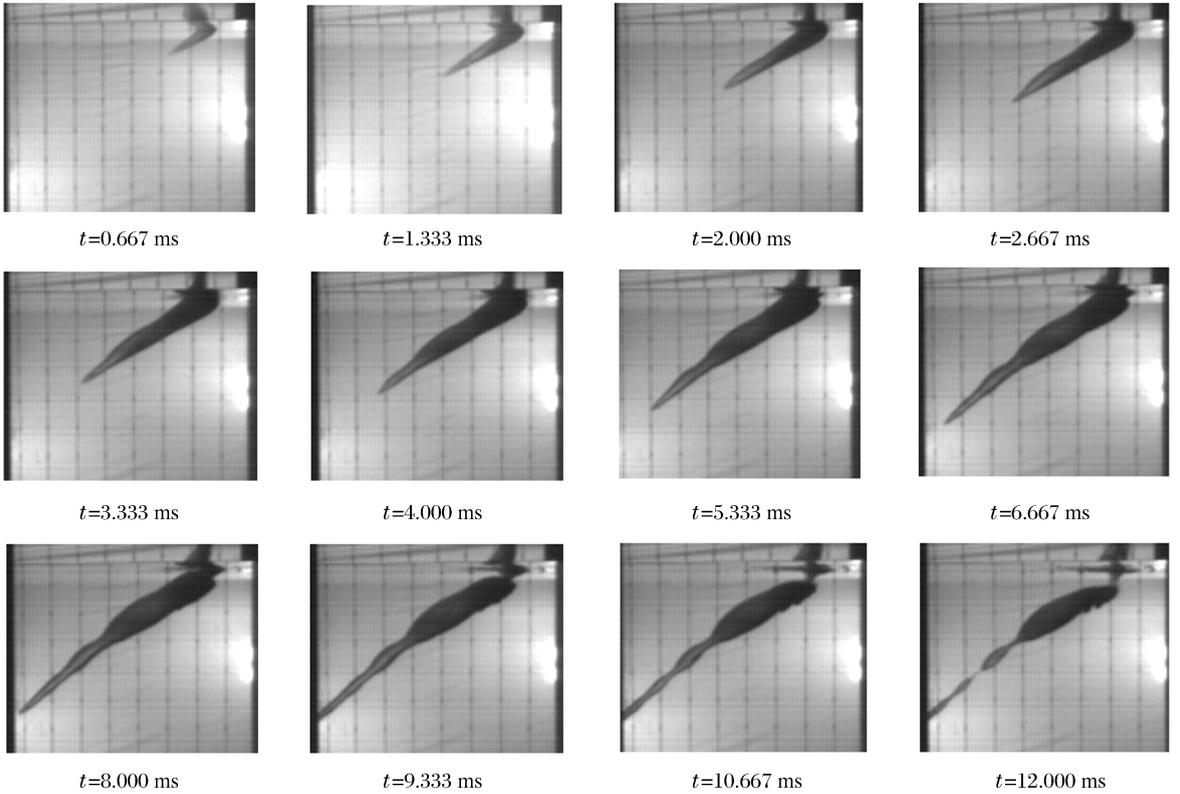


图 3 球形弹丸,入水速度 303.4 m/s,入水角 30°时空泡发展过程
 Fig. 3 Developing process of the cavity of a sphere pellet entering water at the initial velocity of 303.4 m/s, the oblique angle of 30°

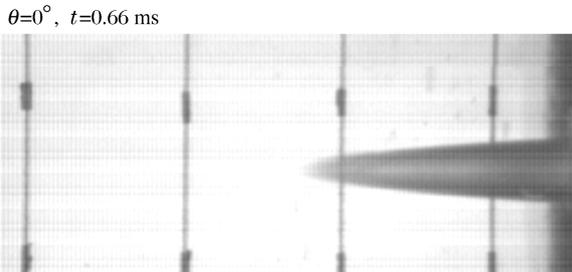


图 4 球形弹丸,水平入水 0.66 ms 时的空泡
 Fig. 4 Cavity of the sphere pellet entering water at the oblique angle of 0°

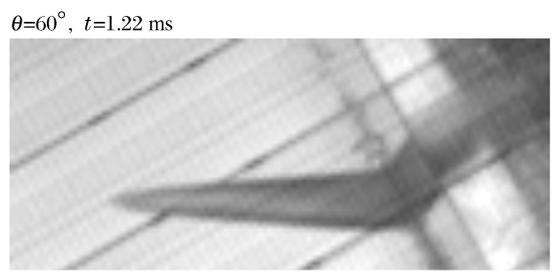


图 5 球形弹丸,入水角 60°,入水 1.22 ms 时的空泡
 Fig. 5 Cavity of the sphere pellet entering water at the oblique angle of 60°

对比图 4 和图 5 可以看出:虽然入水速度、入水角度、入水时间均不同,但从形态上看,空泡仍具有较好的相似性。同样,球形弹丸在入水角度相同,入水速度、入水时间不同的情况下,空泡形态也有较好的相似性,如图 6 所示。

弹体高速入水形成的空泡在水中初弹道的大部分时间内来不及闭合,处于与大气相通状态。空泡内压力

$$p_c = p_a - C_a \rho_a v_0^2 / 2 \tag{1}$$

式中: p_a 为大气压力, ρ_a 为空气密度,气流压力降因数 $C_a = 5 \sim 15^{[3]}$, v_0 为弹丸入水速度。则空泡数

$$\sigma = \frac{\rho_w g h + 0.5 C_a \rho_a v_0^2}{0.5 \rho_w v_0^2} \approx \frac{C_a \rho_a}{\rho_w} = 0.006 \sim 0.018 \tag{2}$$

式中:水深 $h = 0.5 \text{ m}$, ρ_w 为水的密度。

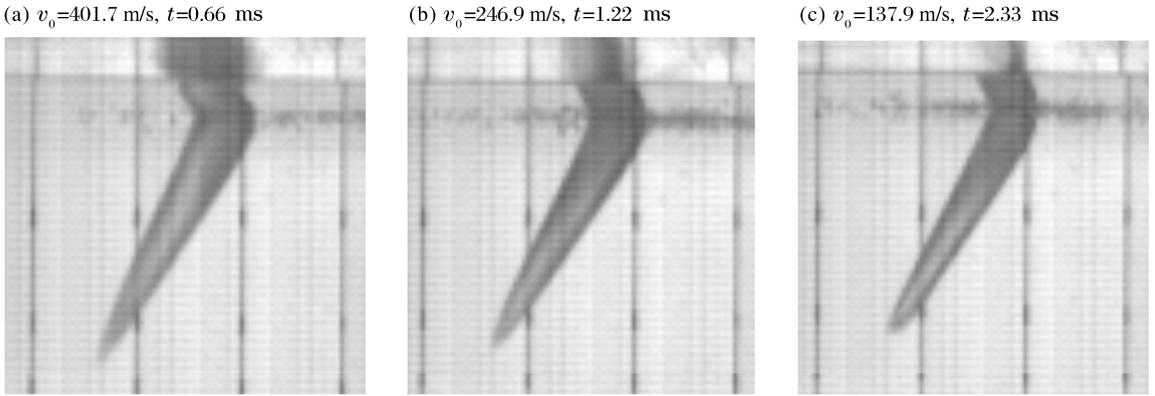


图 6 球形弹丸入水角 60°, 在三种初速下空泡的比较
 Fig. 6 Comparison of the cavities of the sphere pellets entering water at the different initial velocities, the oblique angle of 60°

将半球型弹体近似按照球体考虑,按照艾森伯格给出的球体阻力因数与空泡数关联的经验公式

$$C_D = 0.241 + 0.488\sigma \tag{3}$$

可以计算出弹体运动的阻力因数 $C_D = 0.244 \sim 0.250$ 。由上述分析知道,对高速弹体入水,由于空泡数很小,可以忽略空泡数对阻力因数的影响。如果入水深度不大,也可忽略水深对空泡数的影响,从而忽略水深对阻力因数的影响。

由于弹体入水速度大,入水初期可忽略重力对空泡形态的影响,因而可以利用垂直入水的空泡外形计算公式^[3]

$$x = \frac{1.716}{\sqrt{C_D} d_b} y^2 \tag{4}$$

计算水平与斜入水时的初期空泡,式中 d_b 为弹体截面直径或为具有连续变化曲线的其他头型弹丸的最大直径, x 为空泡的横向尺寸, y 为空泡的纵向尺寸。计算结果如图 7 中的曲线 b 所示。图 7 中曲线 a 为重新绘出的图 4 的空泡外形(入水速度为 246 m/s、入水时间 1.22 ms),曲线 c 为重新绘出的图 3 的空泡外形(入水速度 358 m/s、入水时间 0.66 ms),曲线 b 为由(4)式计算的空泡外形,计算中取 $C_D = 0.247, d_b = 9 \text{ mm}$ 。由计算结果和实验结果比较知道,两者吻合较好,因此可以利用式(4)对球形弹丸的初期入水空泡进行预报。

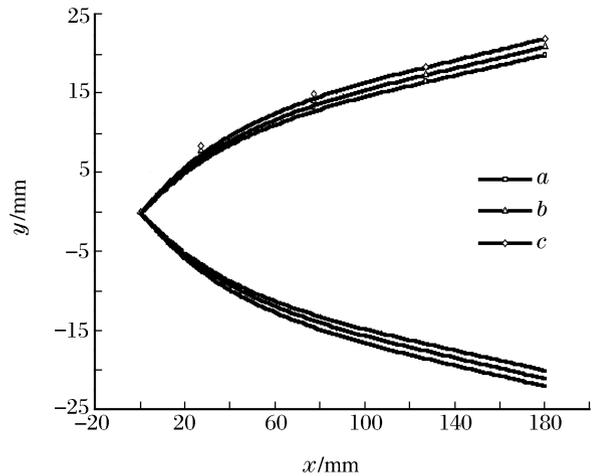


图 7 弹体入水早期空泡外形
 Fig. 7 Shape of the initial cavity of the pellet entering water

比较球形弹丸与普通制式弹丸在入水角为 60°,速度 303.4 m/s 时入水 10 ms 后初始弹道与空泡形态(见图 8),可以看出,在这一入水角度下,弹型变化对弹丸入水初始弹道及空泡形态的影响不大,说明弹丸入水弹道及空泡形态在这一入水角度下对弹型不敏感。

图 9、图 10 分别给出了入水角为 30°、45°,球形、普通制式弹丸入水速度为 303.4 m/s 时的空泡形态,从图中可以看出球形弹丸与普通制式弹丸的空泡形态差别较大,普通制式弹丸的空泡表现出藕节形特征,藕节形空泡的形成是由于制式弹丸在小角度入水时,水对弹丸的托力没有通过形心导致弹丸的快速翻滚,从而形成这种特征的空泡,藕节形空泡的存在对普通制式弹丸弹道的不稳定性有重要影响。

(a) Sphere pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=60^\circ$, $t=10$ ms



(b) General pistol pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=60^\circ$, $t=10$ ms

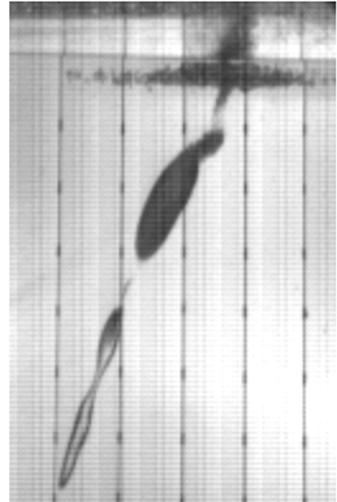
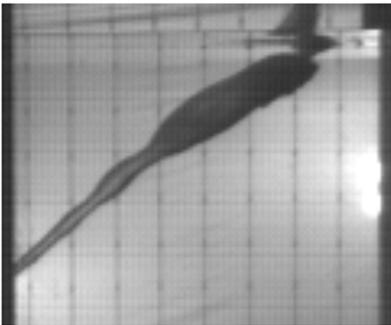


图 8 球形弹丸与普通制式弹丸空泡及初始弹道比较

Fig. 8 Comparison of the cavities and the initial ballistic trajectory between the sphere and general pistol pellets

(a) Sphere pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=30^\circ$, $t=9.333$ ms



(b) General pistol pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=30^\circ$, $t=9.333$ ms

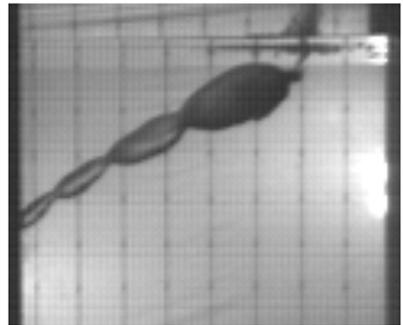
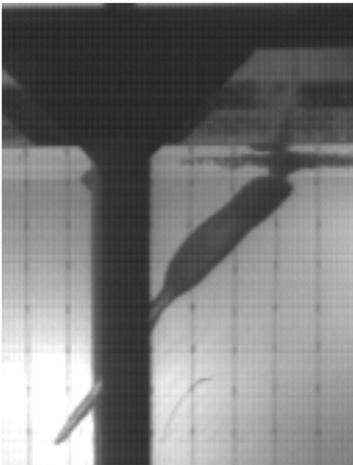


图 9 入水角 30°球形弹丸与普通制式弹丸空泡比较

Fig. 9 Comparison of the cavities between the sphere and general pistol pellets entering water at 30°

(a) Sphere pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=45^\circ$, $t=9.333$ ms



(b) General pistol pellet $v_0=303.4$ m/s, $\theta=45^\circ$, $t=9.333$ ms

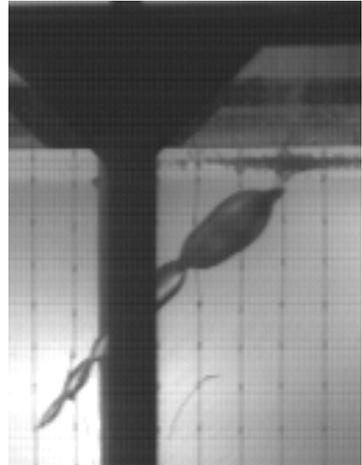


图 10 入水角 45°时球形弹丸与普通制式弹丸空泡比较

Fig. 10 Comparison of the cavities between the sphere and general pistol pellets entering water at 45°

3.2 入水弹丸速度衰减规律

根据弹丸在录像中每幅图片中的位置以及时间间隔,可以从录像图片中整理出各种状态下弹丸入

水速度的衰减规律。图 11 给出了球形弹丸在入水角为 45° 时,三种入水速度下,弹丸入水速度衰减规律的比较,图 12 为球形弹丸在速度为 303.4 m/s 时,三种入水角下,速度衰减规律的比较,图 13 为在入水角为 45° 、速度为 303.4 m/s 时两种弹丸速度衰减规律的比较。从这三幅图可以看出,弹丸的入水速度衰减规律似乎与速度、入水角度无关,而对于球形与普通制式弹丸的速度衰减规律也较一致,表现出一定的相似性,都呈现出极强的速度衰减特性,表明弹丸在入水后不久,速度就很快地衰减了。

弹丸入水后的速度衰减规律可由下面方程推得。如模型入水速度为 v_0 ,弹丸最大横截面积为 A ,质量为 m ,假定入水初期阻力因数 C_D 保持为一常数,不计重力与浮力,则简化的弹丸运动方程为

$$\frac{1}{2}\rho v^2 AC_D = -m \frac{dv}{dt} \tag{5}$$

令减速系数 $\alpha_0 = \rho AC_D / (2m)$,积分式(1),得

$$\frac{1}{v} = \frac{1}{v_0} + \alpha_0 t \tag{6}$$

式中: t 为弹丸入水后的时间, v 为对应入水时刻 t 的速度。

考虑球形弹丸水中运动的翻转,取球形弹丸直径与长度之和的一半作为当量直径,即 $d = 11.15 \text{ mm}$ 。由 $m = 6.2 \text{ g}$, $A = \pi d^2 = 9.76 \times 10^{-5} \text{ m}^2$, $C_D = 0.247$,则 $\alpha_0 = 1.944 \text{ m}^{-1}$ 。

对球形弹丸 45° 斜入水情况,利用式(7)计算了弹丸水中运动速度随入水时间的变化规律,由图 14 可知计算结果与实验结果一致性较好。

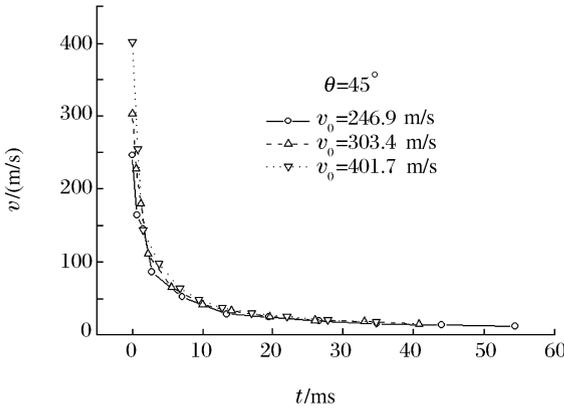


图 11 三种入水速度下,球形弹丸速度衰减规律的比较
Fig. 11 Velocity attenuation for sphere pellets at three initial velocities

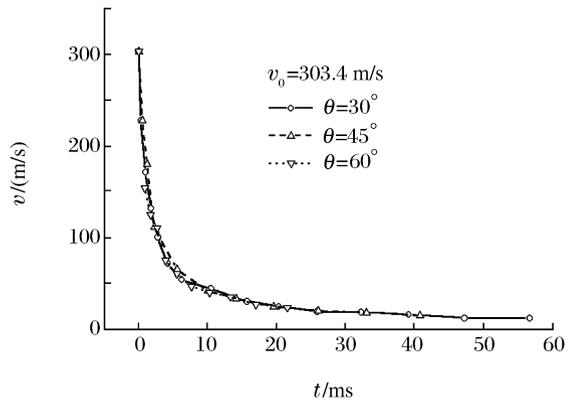


图 12 三种入水角下,球形弹丸速度衰减规律的比较
Fig. 12 Velocity attenuation for sphere pellets at three oblique angles

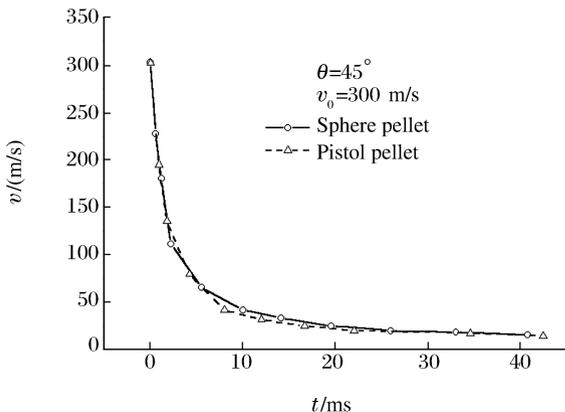


图 13 两种弹丸速度衰减规律的比较
Fig. 13 Velocity attenuation for the sphere and pistol pellets

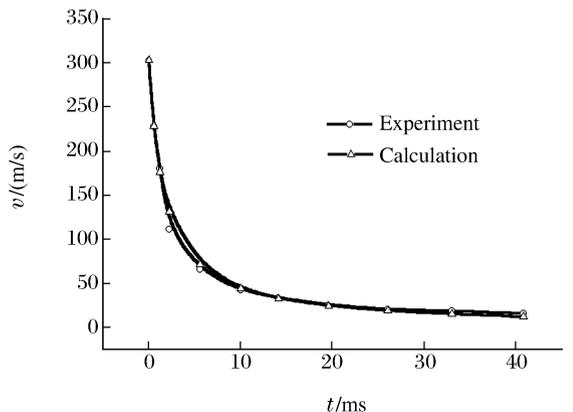


图 14 球形弹丸水中运动速度衰减规律
Fig. 14 Experimental and calculated velocity attenuation for sphere pellets in water

3.3 弹体入水的侵彻距离与水中运动的稳定性

弹体在水中运动的侵彻距离,指的是弹体消耗本身动能克服水体阻力、在水中所能到达的最大距离。准确计算出在一定入水初始条件下弹体的侵彻距离,对于研制新型延时或水压引信、有效打击水下目标或破除水下障碍具有实际意义。侵彻距离除与弹型和入水初始条件有关外,还与弹体绕纵轴的旋转角速度有关,类似炮弹那样的尖拱形弹头,即使在空气中能靠一定旋转角速度来保持运动稳定性,但由于弹体入水产生空泡和低压忽扑现象,以及水中阻力及力矩的加大,将会使弹体失稳翻转,不能保持弹尖始终朝前,由于弹体迎流面积增大,运动阻力随之增加,侵彻距离将大大减小。

通过对球形弹丸和普通制式弹丸进行入水弹道实验,得到了二种弹丸在不同入水速度下,弹体在水中水平方向的侵彻距离,如图 15 所示。曲线 *a* 为普通制式弹丸进行 24 次射击、曲线 *b* 为普通制式弹丸截去头部(平头部分面积是弹头横截面积的 1/10)进行 14 次射击、曲线 *c* 为球形制式弹丸进行 27 次射击得到的统计结果。对普通制式弹丸而言,弹丸入水的侵彻距离随入水速度的增加而增加,而对截头制式弹丸和球形弹丸而言,弹丸入水的侵彻距离随速度增加呈现波浪式递增变化。对截头制式弹丸而言,入水速度低时,其侵彻距离小于普通制式弹丸,而在入水速度较高时,情况正好相反。

由式(5),还可得

$$v = v_0 e^{-\alpha_0 s} \tag{7}$$

式中： s 为弹体入水后的侵彻距离。

将式(6)对时间积分可得弹丸入水侵彻距离与入水时间的关系

$$s = \frac{1}{\alpha_0} \ln(1 + \alpha_0 v_0 t) \tag{9}$$

在与图 14 相同的射击条件下,图 16 给出了弹丸入水的侵彻距离随时间的变化规律,理论计算结果与实验结果吻合较好。

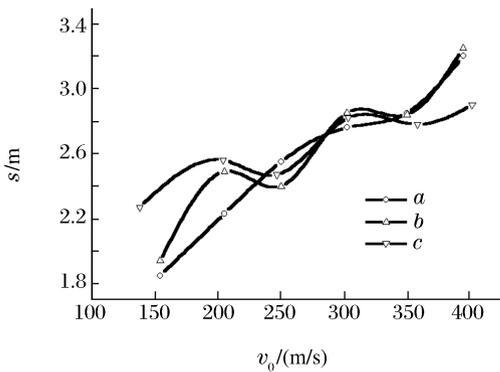


图 15 弹丸入水侵彻距离与入水速度的关系
Fig. 15 Penetration distance versus initial velocity for the pellet in water

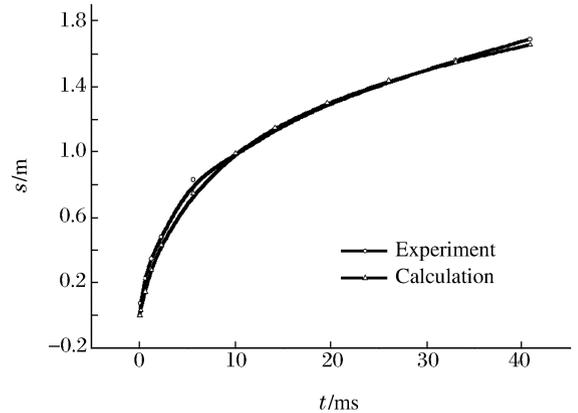


图 16 弹丸水中侵彻距离与入水时间的关系
Fig. 16 Penetration distance versus time for the pellet in water

要使弹丸有很大的侵彻距离,可以有两种方法:一是采用水中运动姿态稳定的弹型;二是加大弹体绕纵轴自身的旋转。通过旋转来保证弹体在水中运动的稳定性,相对于空中而言则需施于弹体绕纵轴更大的旋转角速度,维持弹体在水中稳定运动的转速

$$\omega_w = \sqrt{\rho_w / \rho_a} \omega_a \approx 29\omega_a \tag{10}$$

式中： ω_a 为原型弹体在空气中稳定飞行需要的转速,rad/s。

弹体入水时要达到如此大的转速,仅靠改变炮管的膛线缠度是难于实现的,而且转速过高,也会使马格努斯力矩过大,反而造成弹体入水后的密集度下降。况且,将能量用于弹体的旋转也会降低弹体的发射速度。对尖拱形弹体,在一般转速情况下,如果能使其抬头力矩和俯仰力矩相平衡,也有可能避免弹体在水中运动失稳。一种有效的方法是对弹体的结构和线型进行改进,加大长径比,采用截头圆锥性

头部,使其仍然能够保持在空中飞行的低阻性,而通过阻心后移、重心前移等手段来实现弹体在水中运动时的稳定性。

图17给出了球形与普通制式弹丸在入水角度为 45° 、入水速度为 303.4 m/s 时的入水弹道比较,从图中弹丸运动过后空泡溃灭的迹线大致可以识别出弹丸的运动轨迹。可以看出球形弹丸的入水弹道具有较好的稳定性,其轨迹基本上呈一条直线,且与入水角基本一致。而普通制式弹丸的轨迹会出现突然弯曲的轨道,说明弹丸线型对弹丸入水弹道轨迹有较大影响。

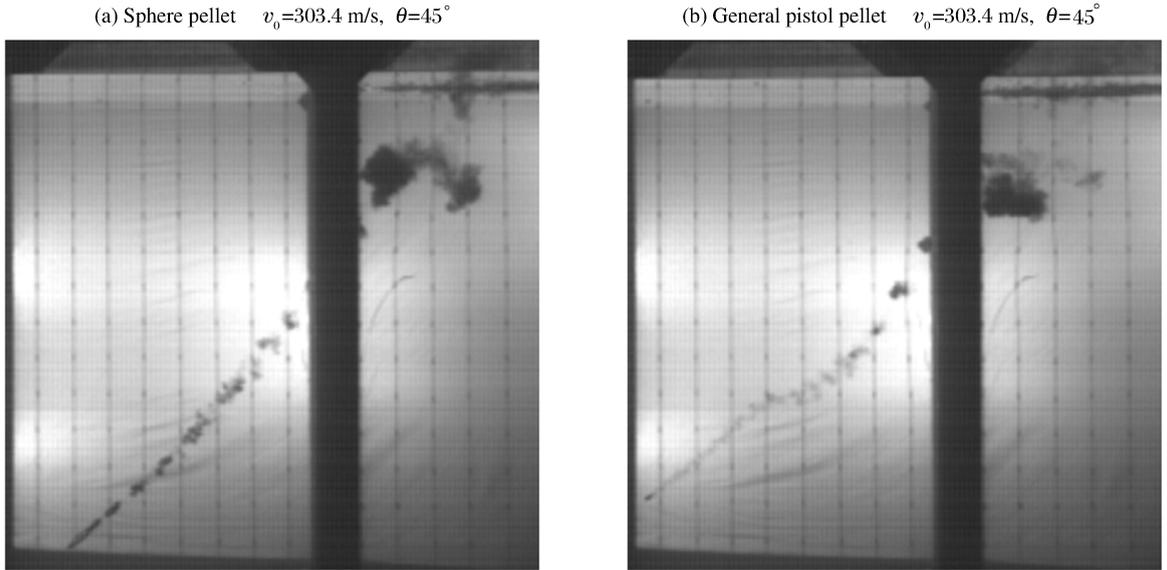


图17 球形与普通制式弹丸弹道轨迹比较

Fig. 17 Comparison of the ballistic trajectories between the sphere and general pistol pellets in water

4 结论

对实验结果的分析表明,弹丸形状对入水弹道的稳定性有重要影响。对球形与普通制式弹丸,球形弹丸在斜入水角为 $45^\circ\sim 60^\circ$ 时弹道稳定性较好,是一种比较好的线型。在空气中能使弹丸稳定运动的旋转并不能使弹丸在水中运动稳定,需通过优化线型设计使弹体在水中作稳定的运动以获得最大的侵彻距离。

在一定入水角与速度范围内,球形弹丸入水初期弹道的空泡特性、弹道轨迹以及速度衰减规律具有一定的相似性。而对于水中速度随时间的衰减规律,则两种弹丸都具有一定的相似性,且表现出极强的速度衰减特性。

通过理论分析,给出了弹丸入水侵彻距离与入水速度、弹丸水中速度与入水时间、弹丸水中侵彻距离与入水时间的数学预报模型,并与实验结果进行了比较,理论结果与实验结果吻合较好。

参考文献:

- [1] 顾建农,张志宏,郑学龄. 弹体入水弹道研究综述[J]. 海军工程大学学报,2000,12(1):18-23.
GU Jian-nong, ZHANG Zhi-hong, ZHENG Xue-ling. A review of the body's waterentry ballistics research[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000,12(1):18-23.
- [2] Waugh J G, Stubstad G W. 水弹道学模拟[M]. 陈九锡,张开荣,译. 北京:国防工业出版社,1979:1-281.
- [3] May A. 入水弹道学[M]. 徐宣志,严忠汉,译. 西安:鱼雷兵器编辑出版社,1983:1-457.
- [4] 矾部考. 水下弹道的研究[M]. 周佩芬,译. 北京:国防工业出版社,1983:1-50.
- [5] 陈先富. 弹丸入水空穴的试验研究[J]. 爆炸与冲击,1985,5(4):70-73.
CHEN Xian-fu. Experimental studies on the cavitation phenomena as a pellet entering water[J]. Explosion and

Shock Waves, 1985, 5(4):70-73.

[6] 顾建农, 张志宏, 范武杰, 等. 旋转弹体入水弹道的计算方法[J]. 海军工程大学学报, 2001, 13(1):1-7.

GU Jian-nong, ZHANG Zhi-hong, FAN Wu-jie, et al. The hydroballistic calculation method for the entry of a rotary projectile[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2001, 13(1):1-7.

Experimental study on the penetration law for a rotating pellet entering water

GU Jian-nong^{1*}, ZHANG Zhi-hong¹, FAN Wu-jie²

(1. Science College, Naval University of Engineering, Wuhan 430033, Hubei, China;

2. The 212th Research Institute, Xi'an 710065, Shaanxi, China)

Abstract: To create a mathematical model for the hydro-ballistic trajectory of high speed pellet entering water, the hydro-ballistic trajectory and cavity of sphere and pistol pellets entering water at three oblique angles and six velocities have been experimentally studied using a high-speed digital video recorder. The experimental results show that the shape of the pellet has significant influence on the hydro-trajectory stability. The hydro-ballistic trajectory of the sphere pellet obliquely entering water is more stable than that of the general pistol pellet. The initial cavity, ballistic trajectory and velocity attenuation of the sphere pellets are similar at different water-entry angles and initial velocities. The velocity of pellet in water decreases very quickly, and the attenuation is similar for both of the sphere and pistol pellets. A calculation model is proposed to predict the velocity attenuation of the pellet. Calculated results are in good agreement with the experimental.

Key words: fluid mechanics; calculation model; high-speed video recorder; pellet; cavity; hydro-ballistic trajectory

* Corresponding author: GU Jian-nong

E-mail address: gujiannong@663.com.cn

Telephone: 027-83645114