DOI: 10.11883/1001-1455(2017)04-0727-07

截卵形弹水平入水的速度衰减及空泡扩展特性*

郭子涛[1],张 伟[2],郭 钊[1],任 鹏[3]
(1. 九江学院土木工程与城市建设学院,江西 九江 332005;
2. 哈尔滨工业大学高速撞击研究中心,黑龙江 哈尔滨 150080;
3. 江苏科技大学船海学院,江苏 镇江 212000)

摘要: 利用轻气炮设备对截卵形弹进行了速度在 100～150 m/s 的水平入水实验,利用高速相机记录了整个入水过程,获取了截卵形弹体在水中运动的速度衰减规律,并对平头弹、卵形弹及截卵形入水弹道稳定性及速度衰减规律进行了对比,对截卵形弹体入水形成的空泡扩展行为进行了理论研究,建立了关于空泡扩展的理论模型,得到了固定位置和固定时间处空泡扩展半径、速度分别与时间和侵彻距离的关系,实验数据与理论计算吻合很好。

关键词: 截卵形弹;入水;阻力因数;速度衰减;空泡扩展
中图分类号: O353.4 **国标学科代码**: 13025 **文献标志码**: A

弹体入水在水中兵器领域有广泛的应用,俄、美、德、法等国很早就开展弹体入水的研究工作,而国内对于这方面的研究起步较晚,20 世纪 90 年代初才开始进行超空泡水下兵器的研制,虽然也积累了大量的研究成果,但是由于问题的复杂性,目前仍存在许多问题有待深入研究。

射弹在水中行进时要藏身于其弹体头部产生的空泡内,入水空泡形态的确定是预测入水初期水弹道的关键,但是入水问题的复杂性使得高速入水空泡的动力学问题并不能用数学方法完全解析,因此各种预测方法都不得不借助一些特定的假设来近似处理相关问题。A. May[1-2]研究了钢球垂直入水的问题后发现随着入水深度的增大,弹体的动能损失大部分转化为产生空泡需要的能量,并指出这种原因可能是由空泡的径向扩展引起的;G. Birkhoff 等[3]认为弹体在空泡截面上的动能损失转变为空泡的动能和势能并给出了垂直入水的空泡模型;M. Lee 等[4]则在 G. Birkhoff 等研究的基础上利用能量守恒定律给出了球形弹高速垂直入水的空泡扩展公式;V. Duclaux 等[5]、J. Aristoff 等[6]基于 Rayleigh-Besant 问题的一种求解方法对圆球、柱体及圆盘等低速垂直入水时空泡的产生、增长及后期的颈缩现象进行了理论分析;K. G. Bodily 等[7]研究了 4 种轴对称弹体低速入水后空泡的形成、扩展以及闭合形态。弹体高速入水时产生的空泡形态和尺寸均与弹体头部的形状有密切关系,张伟等[8]、Z. T. Guo 等[9]、Guo Zi-tao 等[10]对几种柱形弹体水平入水进行了实验和理论研究,并在 V. Duclaux 等[5]研究求解 Rayleigh-Besant 问题的基础上对柱形弹体水平入水引起的空泡扩展行为进行了理论分析,同时建立了弹体阻力系数和平头、球头以及几种卵形弹体头型系数之间的关系。张伟等[8]通过实验定性研究了截卵形弹的入水过程,发现截卵形弹作为卵形弹和平头弹的过渡弹体,在高速入水时兼具卵形弹入中速度衰减慢和平头弹入水弹道相对稳定的优点,但到目前,国内关于截卵形弹体入水的定量研究还较少。本文中,利用轻气炮设备对截卵形弹进行一系列高速水平入水实验,对其入水速度衰减规律以及入水形成的空泡扩展动力学行为进行研究,以期研究结果可为相关水下超空泡弹药的设计提供参考。

1 实验设置

实验装置包括一级气体炮发射设备、激光测速装置、水容器以及光学相机等部分。水容器一侧为透

* **收稿日期**: 2015-06-29; **修回日期**: 2015-10-08
基金项目: 国家自然科学基金项目(11562008,11672092)
第一作者: 郭子涛(1979—),男,博士,讲师; **通信作者**: 张 伟,zhdawei@hit.edu.cn。

明 PC 窗口,相机可通过它观察弹体在水中飞行的弹道轨迹。采用高速相机,光照系统采用 2 个 1 200 W的照明灯。弹体的初速度由激光测速装置测得,弹体在水中的运动速度由高速相机判读。实验前,对由激光测得的速度和相机判读的速度的进行对比,发现偏差小于 3%。T. Børvik 等[11]也验证了高速相机测速的准确性。实验弹体材料为高强度钢,弹径为 12.55 mm,质量为 24.6～25.2 g,截卵形弹体头部曲率半径比为 1,总长度为 27.3 mm,截后最头部尺寸 D_1 为 8.22～9.30 mm,图 1 给出了实验设置和弹体尺寸示意图。

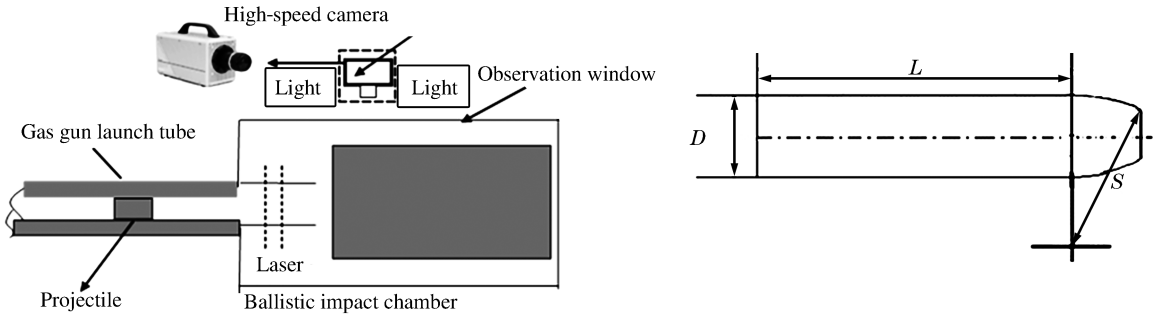

图 1 实验设置及截卵形弹体示意图

Fig. 1 Schematic of experimental set-up and truncated-ogive projectile

2 实验结果及分析

2.1 3 类头型弹体入水弹道稳定性对比

多次的实验结果表明,卵形弹在入水过程中最容易发生弹道的偏转,而截卵形弹在水中运动时的弹道稳定性则介于平头弹和卵形弹之间。图 2～4 所示为相同直径的平头弹、卵形弹以及截卵形弹在相近速度入水时的典型过程。从图 2～4 中可以看出,卵形弹在入水约 4 ms 时弹道已发生严重偏转;而截卵形弹在入水约 4 ms 后弹体虽产生稍微偏转,但弹道比较稳定;平头弹体在水中运动时形成的弹道则最为稳定。

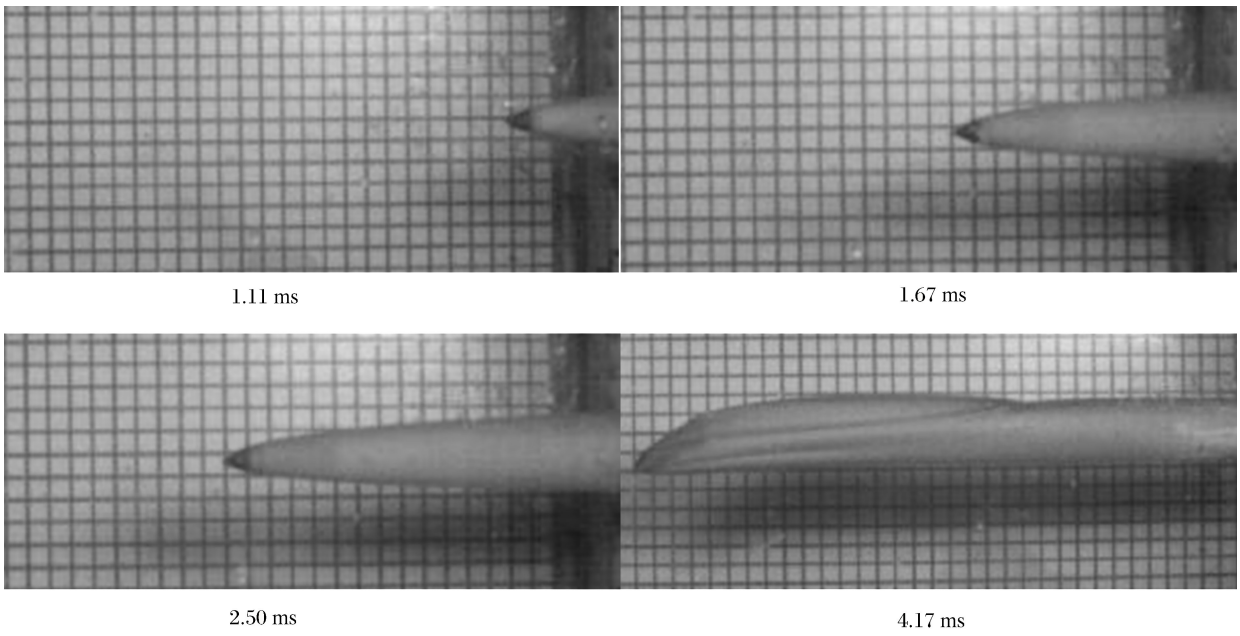

图 2 卵形弹入水及空泡扩展过程

Fig. 2 Processes of the ogival projectile entering the water and its cavity expansion

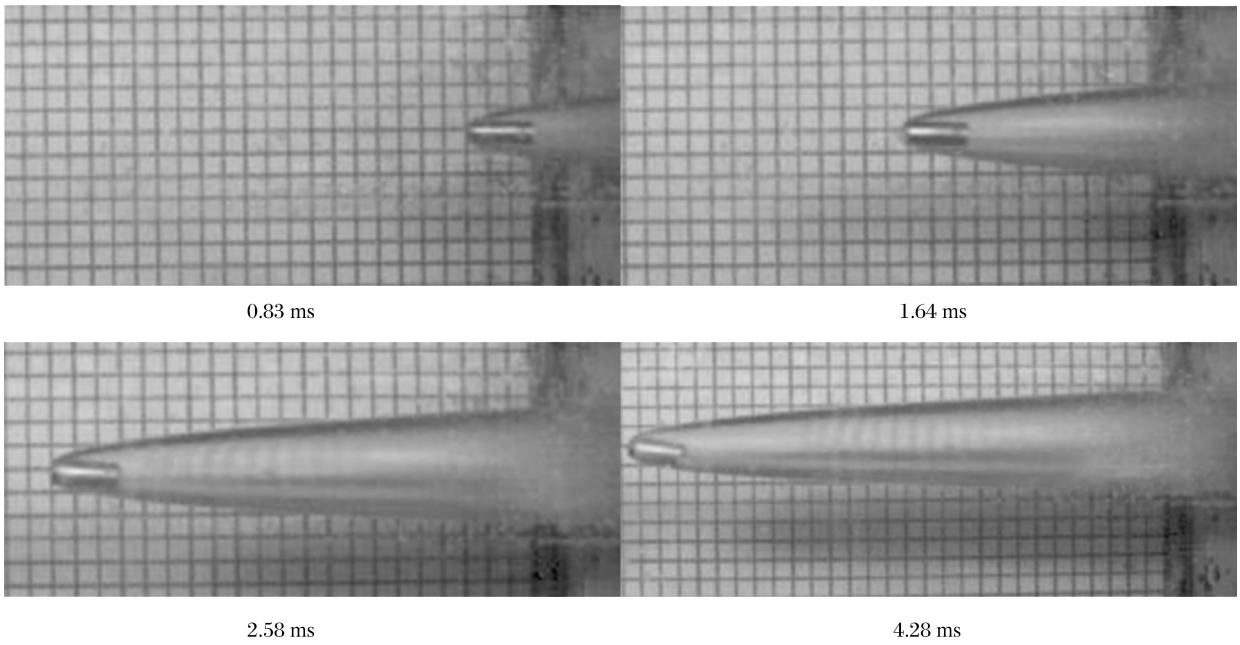

图 3　截卵形弹入水及空泡扩展过程

Fig. 3　Processes of the truncated-ogive projectile entering the water and its cavity expansion

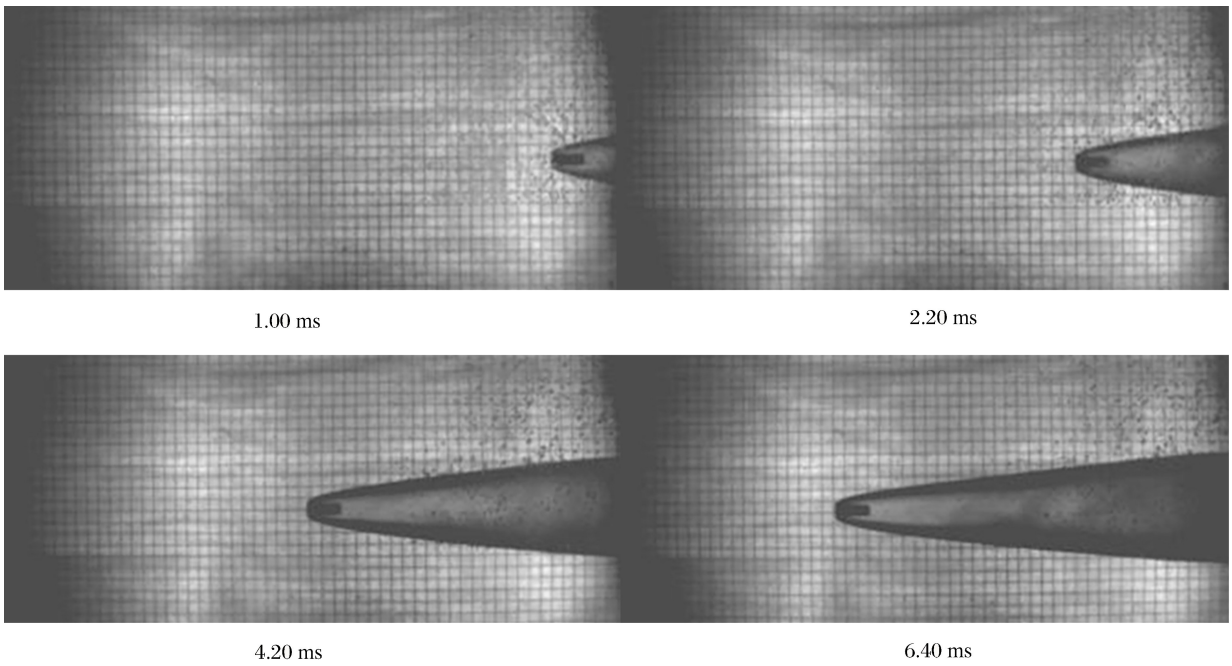

图 4　平头弹入水及空泡扩展过程

Fig. 4　Processes of the flat-nosed projectile entering the water and its cavity expansion

2.2　3 类头型弹体入水速度衰减规律对比

忽略弹体重力效应并根据牛顿第二定律，弹体在水中运动时存在以下方程[9-10]：

$$m_{\mathrm{p}}\frac{\mathrm{d}v_{\mathrm{p}}}{\mathrm{d}t}=-\frac{1}{2}\rho_{\mathrm{w}}A_0C_{\mathrm{d}}v_{\mathrm{p}}^2 \tag{1}$$

式中：m_{p}为弹体质量，v_{p}为弹体水中瞬时速度。

对式(1)进行积分，可得到弹体速度与时间的关系：

$$v_{\mathrm{p}}/v_0=1/(1+\beta v_0 t) \tag{2}$$

式中：速度衰减系数 $\beta=\pi\rho_w R_p^2 C_d/(2m_p)$，$C_d$ 为弹体在水中运动的阻力因数，R_p 为弹体的最大半径。

通过高速相机拍摄的照片以及预先的标定尺寸可以确定弹体入水时间、水中运动位置和水中侵彻距离，从而确定弹体在某时刻水中运动的速度。图 5 所示为平头弹、曲率半径比为 1 的卵形弹和截卵形弹在相近初速入水时的速度衰减随时间的变化关系，图中 2 个速度下的截卵形弹最头部半径尺寸稍有不同。从图中可看出，平头弹速度衰减最快，卵形弹速度衰减最慢，两种头部尺寸的截卵形弹速度衰减则在卵形弹和平头弹之间。

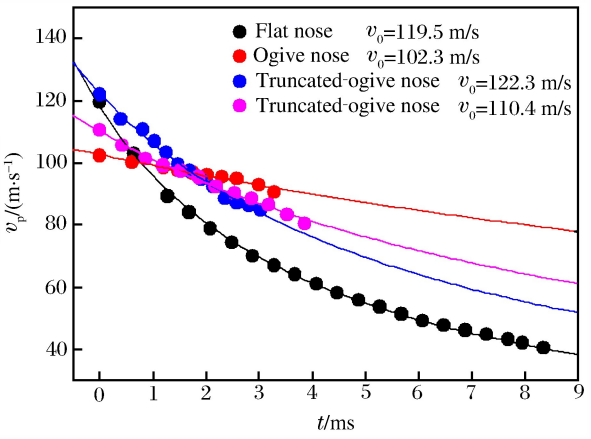

图 5 不同头型弹体速度衰减随时间变化关系

Fig. 5 Relation between velocity attenuation and time for different nose-shaped projectiles

从图中可以计算出卵形弹在水中的阻力因数为 0.192，平头弹在水中的阻力因数为 0.781，v_p=122.3 m/s 时截卵形弹阻力因数为 0.485，v_p=110.4 m/s 时截卵形弹速阻力因数则为 0.326。不同速度的 2 种截卵形弹阻力因数出现差别的原因是速度略大的弹体头部半径稍大，因此在水中运动阻力也较大。

2.3 截卵形弹体入水空泡扩展动力学分析

截卵形弹体水平入水的空泡扩展模型如图 6 所示，当流体具有很高的 Reynolds 数且运动被视为无旋时，流体的运动可以用 1 个包含速度势函数的非稳态 Bernoulli 方程进行描述[5,9]：

$$\left.\frac{\partial\varphi}{\partial t}\right|_R+\frac{\dot{R}^2}{2}=\frac{\Delta p}{\rho} \tag{3}$$

式中：Δp 为弹体入水过程中引起的空泡内外压差，R 为空泡的半径。

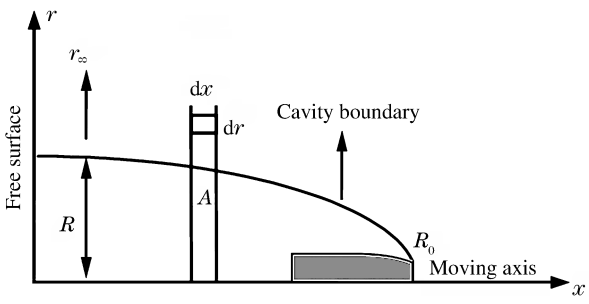

图 6 弹体水平入水空泡扩展模型

Fig. 6 The cavity growth model for projectile's horizontal water-entry

忽略弹体尺寸的影响，同时将弹体在水中的运动看成是一个沿弹体轴线分布的点源，并在每一个截面上空泡独立膨胀，可引入一个表示为下列形式的速度势函数[9-10]：

$$\varphi=R\dot{R}\ln(r/r_\infty) \tag{4}$$

将上式代入式(3)，并考虑初始条件 $R|_{t=t_0}=R_0$ 和 $\dot{R}|_{t=t_0}=\kappa v_p$，对式(3)进行两次积分并适当简化后，即可得到弹体入水空泡半径随时间的近似变化规律：

$$R^2=R_0^2+\frac{2R_0}{1+\beta v_0 t_0}\kappa v_0(t-t_0)-\frac{\Delta p}{\rho N}(t-t_0)^2 \tag{5}$$

式中：$N=\ln(r_\infty/R)$ 表示流体扰动范围的几何函数，κ 为 t_0 时刻弹体在侵彻位移为 x_p 的空泡截面的初始扩展速度与弹体在时刻 t_0 的瞬时速度 v_p 的比值，κ 值实际与弹体头型有关。

当弹体在时刻 t_0 运动到 x_p 时，在 x_p 处截面的空泡将开始扩展，根据能量守恒，空泡截面扩展的初始能量将全部由弹体在此截面处的动能损失转化而来，因此具有以下关系式[9-10]：

$$\pi\rho_w N(R\dot{R})^2|_{t=t_0}=m_p\beta v_p^2 \tag{6}$$

考虑初始条件 $R|_{t=t_0}=R_0$ 和 $\dot{R}|_{t=t_0}=\kappa v_p$，可得到在截卵形弹体入水时的 κ 值：

$$\kappa=\frac{R_{\mathrm{p}}}{R_0}\sqrt{\frac{C_{\mathrm{d}}}{2N}} \tag{7}$$

式中：R_0 和 R_{p} 分别为截卵形弹的最头部半径和弹身最大半径。

将上式代入式(5)，即可得到截卵形弹体入水空泡扩展关于时间的理论表达式：

$$R^2=R_0^2+\frac{2R_{\mathrm{p}}}{1+\beta v_0 t_0}\sqrt{\frac{C_{\mathrm{d}}}{2N}}v_0(t-t_0)-\frac{\Delta p}{\rho N}(t-t_0)^2 \tag{8}$$

根据式(1)又可导出关系式 $t=[\exp(\beta x)-1]/(\beta v_0)$，代入式(8)即可得到截卵形弹入水形成的空泡半径与弹体侵彻位移的关系式：

$$R^2=R_0^2+\frac{2R_{\mathrm{p}}}{\beta}\sqrt{\frac{C_{\mathrm{d}}}{2N}}\{\exp[\beta(x-x_0)]-1\}-\frac{\Delta p}{\rho N\beta^2 v_0^2}[\exp(\beta x)-\exp(\beta x_0)]^2 \tag{9}$$

在式(8)～(9)中，若 t 和 x 相对 t_0 和 x_0 是变量，则这 2 个公式描述的是在弹道轨迹 x_0 处的空泡截面上的由时刻 t_0 至 t 的径向扩展半径和速度变化情况。

对于截卵形弹以 110.4 m/s 的速度入水的工况，在弹体运动路径上随机选择了 3 个位置空泡截面扩展特性进行了研究，弹体到达 3 处的时间分别对应 1.42、1.89 和 2.36 ms，利用公式对测量的空泡扩展半径分别随时间以及弹体侵彻距离变化的数据进行了拟合，结果如图 7～8 所示，从图中可以看出，本文中所采用的公式可以很好地描述截卵形弹入水空泡扩展规律。

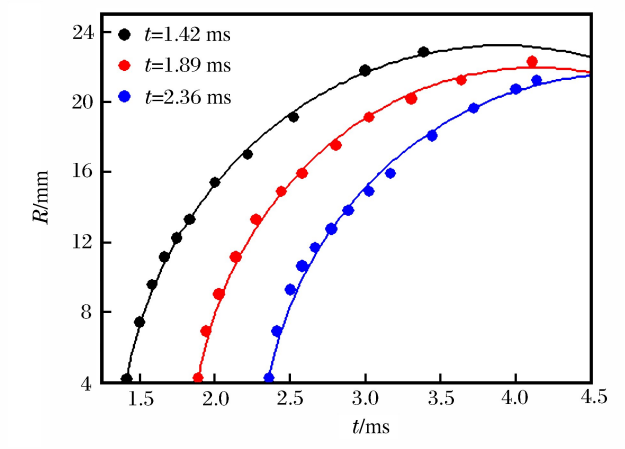

图 7　截卵形弹入水后固定点空泡半径随时间的变化

Fig. 7　Cavity radius at fixed locations varied with time after truncated-ogive projectile's water-entry

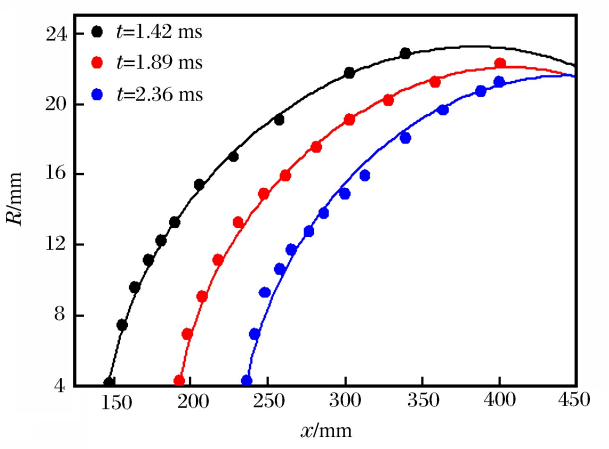

图 8　截卵形弹入水后固定点空泡半径随侵彻距离的变化

Fig. 8　Cavity radius at fixed locations varied with penetration distance after truncated-ogive projectile's water-entry

图 7～8 中拟合得到的 Δp 和 N 如表 1 所示。计算的固定位置 $\sqrt{\Delta p/(\rho_{\mathrm{w}}N)}$ 与弹体侵彻距离之间关系见图 9。Z. T. Guo 等[9]指出 $\sqrt{\Delta p/(\rho_{\mathrm{w}}N)}$ 实际表示空泡截面半径扩展到最大时的平均速度，由图中可以看出，3 个固定点处空泡截面平均扩展速度近似相等，约为 9 m/s，与文献[9]中结论一致。

表 1　不同时刻对应的 Δp 和 N

Table 1　The values of Δp and N at different locations

t_0/ms	Δp/Pa	N
1.42	1.14×10^5	1.362 10
1.89	1.19×10^5	1.391 97
2.36	1.15×10^5	1.413 47

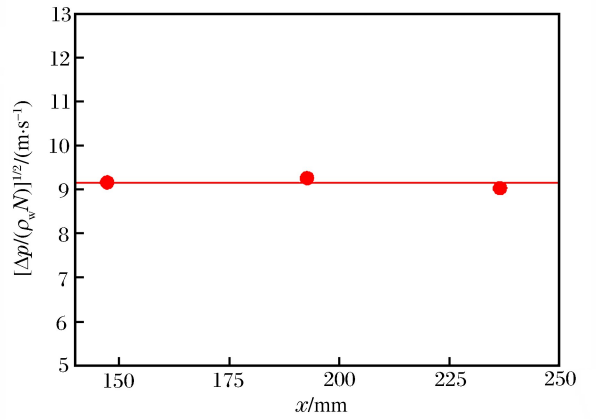

图 9　不同侵彻距离点上 Δp 的值

Fig. 9　The values of Δp at different locations along the penetration distance

图 10 所示为固定点处空泡截面径向扩展瞬时速度 v_c 随时间的变化，可以看出，空泡截面径向扩展速度随时间是逐渐减小的，当空泡扩展速度减小为零时，空泡半径将达到最大。在式(8)～(9)中，若 t_0 和 x_0 相对于 t 和 x 是变量，则 2 个公式描述的是在 t 时刻的整个空泡场沿弹体侵彻位移 x_0 至 x 区间上的半径变化。截卵形弹体在入水 2.694 ms、对应侵彻位移为 266.5 mm 时，空泡半径在侵彻路径上的变化如图 11 所示，图中可以看出，实验数据和理论结果吻合较好。

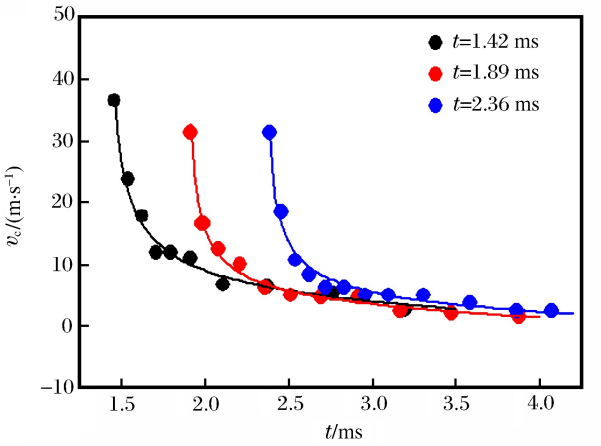

图 10 不同时刻对应位置处空泡截面径向扩展速度随时间的变化

Fig. 10 Relation between radial expansion velocity of cavity wall and time at different locations

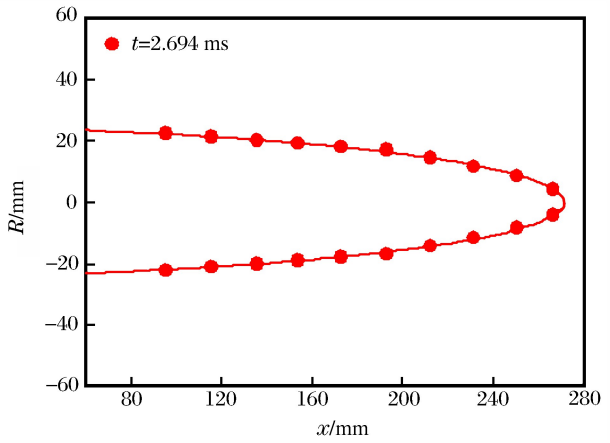

图 11 在特定时刻空泡半径沿侵彻距离的变化

Fig. 11 Variation of cavity radius with penetration distance at fixed time

3 结 论

通过对截卵形弹水平入水的实验，对截卵形形弹的入水弹道稳定性、速度衰减规律以及空泡扩展特性进行了定性定量的探讨及理论分析，建立了关于截卵形弹入水空泡扩展的理论模型。得到如下结论：

(1)对比截卵形弹、平头弹以及卵形弹入水时的空泡扩展过程和入水弹道稳定性，发现截卵形弹的弹道稳定性介于卵形弹和平头弹之间。

(2)获得了截卵形弹的入水速度衰减规律，并与平头弹和卵形弹水中速度衰减特性进行了对比，同时获得 2 种截卵形弹在水中运动的阻力因数。

(3)建立关于截卵形弹体入水空泡扩展的理论模型，得到固定位置和固定时间空泡径向扩展半径、速度与侵彻时间和距离的关系，同时得到固定位置的空泡截面平均扩展速度近似相等，实验数据与理论结果吻合较好。

参考文献：

[1] May A. Effect of surface condition of a sphere on its water-entry cavity[J]. Journal of Applied Physics, 1951,22(10):1219-1222.

[2] May A. Vertical entry of missiles into water[J]. Journal of Applied Physics, 1952,23(12):1362-1372.

[3] Birkhoff G, Isaacs R. Transient cavities in air-water entry[R]. Navord Report, 1951.

[4] Lee M, Longoria R G, Wilson D E. Cavity dynamics in high-speed water entry[J]. Physics of Fluids, 1997,9(3):540-550.

[5] Duclaux V, Caill F, Duez C, et al. Dynamics of transient cavities[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2007(591):1-19.

[6] Aristoff J, Bush J. Water entry of small hydrophobic spheres[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2009(619):45-78.

[7] Bodily K G, Carlson S J, Truscott T T. The water entry of slender axisymmetric bodies[J]. Physics of Fluids, 2014,26(7):45-78.

[8] 张伟，郭子涛，肖新科，等. 弹体高速入水特性实验研究[J]. 爆炸与冲击，2011，31(6)：579-584.
Zhang Wei, Guo Zitao, Xiao Xinke, et al. Experimental investigations on behaviors of projectile high-speed water entry[J]. Explosion and Shock Waves, 2011,31(6):579-584.

[9] Guo Z T, Zhang W, Xiao X, et al. An investigation into horizontal water entry behaviors of projectiles with different nose shapes[J]. International Journal of Impact Engineering, 2012,49(2):43-60.

[10] Guo Zitao, Zhang Wei, Wang Cong. Experimental and theoretical study on the high-speed horizontal water entry behaviors of cylindrical projectiles[J]. Journal of Hydrodynamics, Ser. B, 2012,24(2):217-225.

[11] Bϕrvik T, Langseth M, Hopperstad O S, et al. Ballistic penetration of steel plates[J]. International Journal of Impact Engineering, 1999,22(9/10):855-886.

Characteristics of velocity attenuation and cavity expansion induced by horizontal water-entry of truncated-ogive nosed projectiles

Guo Zitao[1], Zhang Wei[2], Guo Zhao[1], Ren Peng[3]

(1. *School of Civil Engineering & Urban Construction, Jiujiang University, Jiujiang* 332005, *Jiangxi, China*;
2. *Hypervelocity Impact Research Center, Harbin Institute of Technology, Harbin* 150080, *Heilongjiang, China*;
3. *School of Naval Architecture & Ocean Engineering, Jiangsu University of Science and Technology, Zhenjiang* 212000, *Jiangsu, China*)

Abstract: In this paper, the horizontal water-entry experiments of truncated-ogive projectiles at the velocity range of 100～150 m/s were conducted using a light-gas gun and a high-speed camera to record the whole water-entry process. The characteristics of the velocity attenuation and the drag coefficients of truncated-ogive projectiles were obtained, and the trajectory stability and the characteristics of velocity attenuation for the flat-nosed, the ogive-nosed and the truncated ogive-nosed projectiles were compared and analyzed. The cavity expanding behaviors induced by the truncated ogive-nosed projectile's water entry were studied and a theoretical model of the cavity expansion was established. The relationships between the radial cavity radius, cavity wall velocity and time, penetration distance at fixed locations and fixed times were obtained, and good agreements were found between the experimental observations and the theoretical analysis.

Keywords: truncated-ogive projectile; water-entry; drag coefficient; velocity attenuation; cavity expansion

（责任编辑　王易难）