DOI: 10.11883/1001-1455(2015)05-0617-08

钝体倾斜和垂直冲击入水时引起的超空泡流动特性实验研究*

施红辉,胡青青,陈 波,贾会霞
(浙江理工大学机械与自动控制学院,浙江 杭州 310018)

摘要:对 4 种不同头型的钝体、以不同初始速度在小倾斜角度和垂直状态下入水,所产生的空泡流进行了的实验观察,分析了不同工况下空泡产生和发展的特性。实验结果表明:对于倾斜入水及垂直入水,圆台头和平头(即空化器均为圆盘)实验体均能形成较稳定的入水弹道;初始入水速度较低时,空泡的闭合方式为深闭合;初始入水速度较高时,空泡的闭合方式为表面闭合,且运动速度衰减得更快。测量得知,钝体倾斜入水产生的空泡的前部外形轮廓与 Logvinovich 的半经验公式给出的结果相吻合。在垂直入水的情况下,调查了物体头部对空泡的起始点位置及其形态的影响。

关键词:爆炸力学;空泡形态;倾斜入水;钝体;速度;自由液面
中图分类号:O382.1 **国标学科代码**:1303530 **文献标志码**:A

运动体从空气中撞击自由面进入水中,在运动体头部附近发生流动分离,形成一个开口空腔,使运动体除头部外的部分处于空气包层中,该空腔被定义为入水空泡[1-2]。弹体以一定速度冲击入水后,在超空泡内运行,弹体如何能够以最正确的姿态和最佳的速度到达所设定的目标地,这与高速弹体在水中运动产生的空泡形态和变化规律密切相关。不同的空泡形态以及弹体在空泡内部的运动姿态直接决定弹体表面与水介质接触的面积,从而影响弹体入水后的运动阻力和轨迹。产生理想的空泡形态,是入水弹体和水弹道设计中所关心的,也是流体力学上需要解决的关键性基础问题[3]。另一方面,利用超空泡的减阻效果,提高入水后水下兵器的作战性能,已成为当前的发展趋势[4]。水下兵器的技术性能不可避免地与空化泡的形成联系在一起,要考虑固体、气体和液体的物理特性才能确定作用力,而这些力和重力及惯性力一起决定了弹体在入水过程中的受力状态[5]。早期对于入水问题的研究,大多将重点放在入水时物体受到的冲击作用力和物体的结构强度上,而且实验主要是针对垂直入水的[6]。对于小角度(入水轨迹线与水平面之间的夹角)倾斜入水,T. Trucott 等[7]进行了实验研究,他们用步枪发射子弹,使其以 5°~15°的角度进入水箱,观察了在浅水区超空泡的形成和发展,并与 G. V. Logvinivich 的半经验公式[8]进行了比较。但是,他们没有研究钝体入水速度的变化对空泡闭合过程的影响以及钝体的头型对入水后物体的运动轨迹的影响。

本文中,采用一级轻气炮在 18°的角度下发射钝体入水,进一步研究钝体入水后所产生的空泡的发展过程,以及同时出现的钝体的水下运动轨迹和速度衰减。作为对倾斜入水实验的补充,还进行由重力加速钝体入水的实验,研究头型对空泡产生的初始位置以及整体形状的影响。

1 实验装置和实验方法

实验系统主要包括 3 部分:实验观测系统、数据采集系统和钝体发射系统[9-10],实验系统整体结构如图 1 所示。实验观测系统主要由实验水箱及其附属装置构成。实验水箱的前后两面开设有 0.8 m×1.1 m 的 6 个观察窗口,左右两面开设有法兰孔。观察窗口外侧覆盖着有机玻璃。钝体倾斜地穿过水

* **收稿日期**:2014-03-19;**修回日期**:2014-06-05
基金项目:浙江省自然科学基金项目(LQ13A020005,LQ13A020006,Z1110123)
第一作者:施红辉(1962—),男,博士,教授,博士生导师,hhshi@zstu.edu.cn。

面后在水中运行,观测窗口为观察钝体轨迹和空泡发展提供了足够广阔的视场。数据采集系统主要包括高速摄影装置、计算机及辅助光源等。钝体发射系统主要包括高压气瓶、电磁阀、高压气缸、管阀连接器、发射管、支撑架、移动小车和支撑底座等。18°的入水角度的选择不是刻意所为,而是由于发射系统与水箱法兰之间匹配限制的缘故。更多技术细节,可见文献[11]。

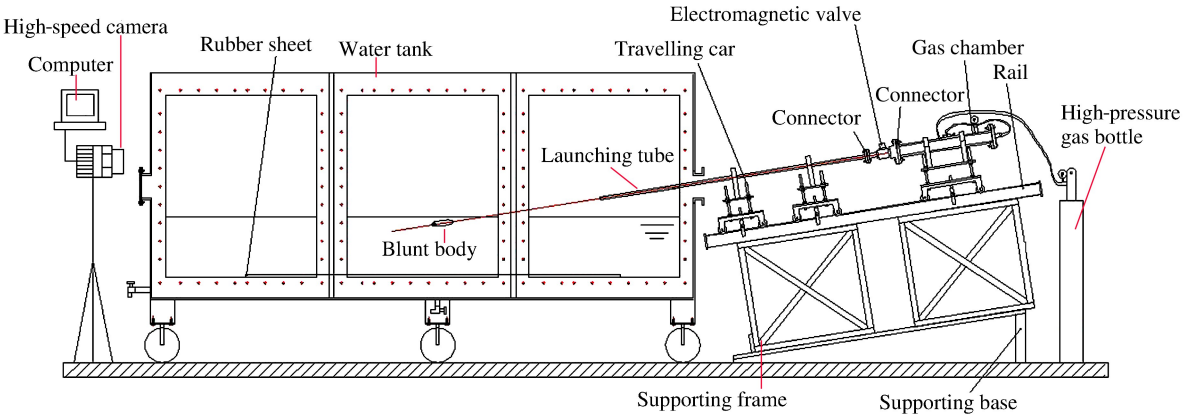

图 1 弹体发射系统的结构示意图

Fig. 1 Schematic of the experimental setup

实验主要工作过程为:先移动气缸支架,打开管阀连接器,将钝体放入发射管中,锁紧管阀连接器;在水箱内放入实验所需的一定深度的水,打开高压气源将高压氮气充入到高压气缸中,使高压气缸的压力达到实验需要的压力值;打开电磁阀,高压气体推动钝体高速运动,高速钝体入水产生超空泡流。待实验发射系统准备就绪后,根据预设的拍摄参数及辅助光源的摆放位置,打开灯光,调出拍摄记录窗口。按下发射开关的同时,点击拍摄开始按钮,同步记录弹体运行及空泡发展过程。一组实验结束,关闭灯光,终止该次拍摄。保存相关数据后,打开发射管及管阀连接器,更换弹体,进行不同条件的实验研究。

2 实验结果及分析

2.1 头型对钝体入水后运动稳定性的影响

首先要研究钝体形状对入水过程的影响[12]。现选取 7 种不同几何尺寸的钝体进行实验,它们的外形尺寸如图 2 所示。图 2(a)中的 4 个钝体用于倾斜入水实验,从左到右依次是圆台、平头、圆头和尖头;图 2(b)中的 3 个钝体用于垂直入水实验,钝体的材料为铝镁合金。

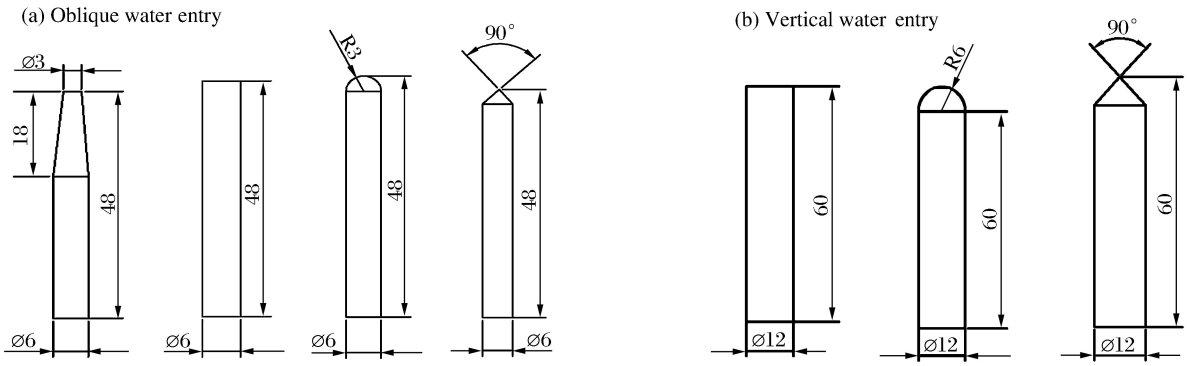

图 2 钝体外形尺寸

Fig. 2 Geometry of the blunt body shapes

实验工况在表 1 中给出,各实验中的水深为 59～62 cm[10]。图 3～9 给出了各工况下入水过程的高速摄影照片,拍摄速度均为 500 s^{-1},相邻 2 幅照片之间的时间间隔为 2 ms。下面通过讨论实验结果,分析相关超空泡流动的特性。

表 1 不同工况下的实验参数

Table 1 Experimental parameters in different cases

工况	头型	p_0/MPa	α/(°)	m/g	v_0/(m·s^{-1})
1	平头	0.3	18	3.569 9	14.64
2	圆头	0.3	18	3.445 8	9.58
3	圆台头	0.2	18	2.992 8	6.29
4	圆台头	0.3	18	2.992 8	12.24
5	圆台头	0.5	18	2.992 8	35.35
6	圆台头	1.0	18	2.992 8	82.76
7	尖头	0.3	18	3.305 9	14.19
8	平头	重力加速	90	18.131 3	4.425
9	圆头	重力加速	90	17.580 8	4.560
10	尖头	重力加速	90	17.050 3	4.545

如图 3～6 所示，平头、圆头、圆台头和尖头 4 种头型的钝体倾斜入水过程基本都经历了撞击、流动形成、空泡形成和空泡闭合这 4 个过程。这 4 个实验的入水初速度基本上属于同一数量级。对比可知，圆台头和平头（即空化器均为圆盘）钝体形成了较稳定的入水弹道（基本上保持直线运动），如图 3、5 所示。圆头钝体、尖头钝体的入水弹道稳定性依次递减，例如从图 4(f)中可以看到圆头航行体尾部已经开始撞击到空泡壁的上侧，钝体运行轨迹发生偏转；尖头航行体冲击水面后，从图 6(b)中可以看到整个钝体运行的姿态很快发生了顺时针偏转。

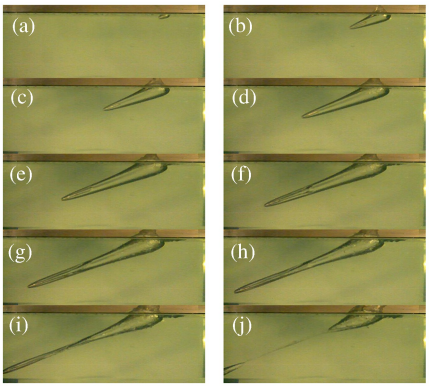

图 3 工况 1 中的钝体倾斜入水

Fig. 3 Oblique water entry of the blunt body in case 1

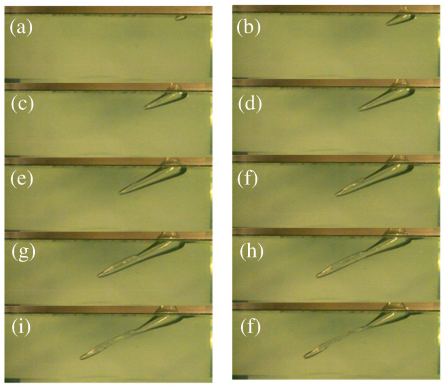

图 4 工况 2 中的钝体倾斜入水

Fig. 4 Oblique water entry of the blunt body in case 2

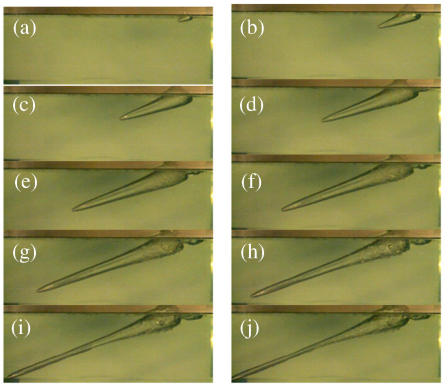

图 5 工况 4 中的钝体倾斜入水

Fig. 5 Oblique water entry of the blunt body in case 4

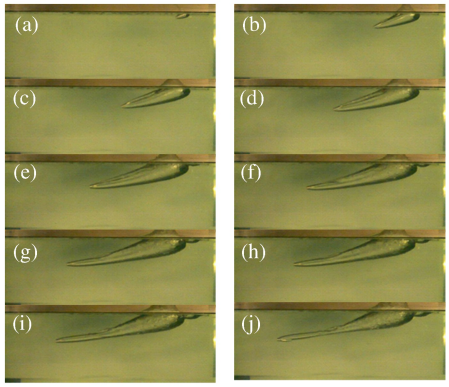

图 6 工况 7 中的钝体倾斜入水

Fig. 6 Oblique water entry of the blunt body in case 7

多次重复实验后，均发现圆头和尖头的钝体在相同工况下很容易俯冲或出现向上弯轨道的情况，出现忽扑、弹跳等不稳定运行的行为[10]。分析认为：在小角度倾斜入水的时候，尖头钝体在冲击水面瞬间不是头部顶端先接触水面，而是下侧的肩部拐角处先接触水面；这样向上运动的水花会冲击尖头的下侧面，给钝体施加了一个顺时针力矩。圆头钝体的情况也类似，但受影响的程度应该小于尖头钝体。当然，入水前物体具有初始惯性，即使受到力矩作用，也不一定马上发生较大的偏转。

通过重力加速自由落体的钝体，实现了垂直入水实验。图 7～9 分别给出了平头、圆头和尖头 3 种头型的钝体垂直入水诱导产生超空泡的发展过程。

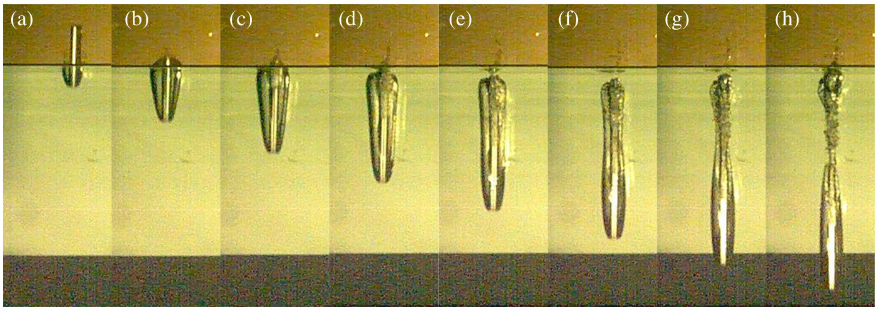

图 7 工况 8 中的钝体垂直入水

Fig. 7 Vertical water entry of the blunt body in case 8

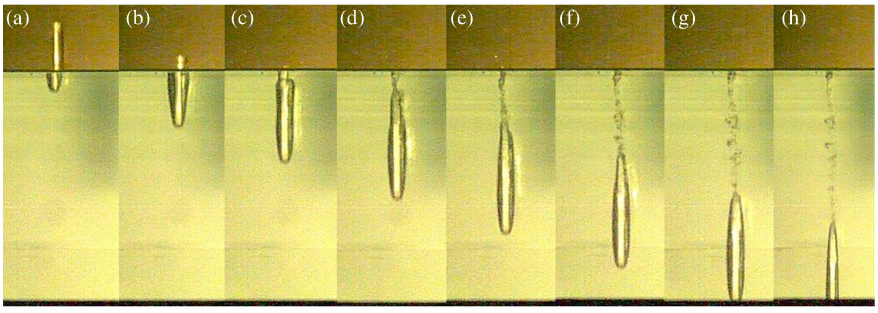

图 8 工况 9 中的钝体垂直入水

Fig. 8 Vertical water entry of the blunt body in case 9

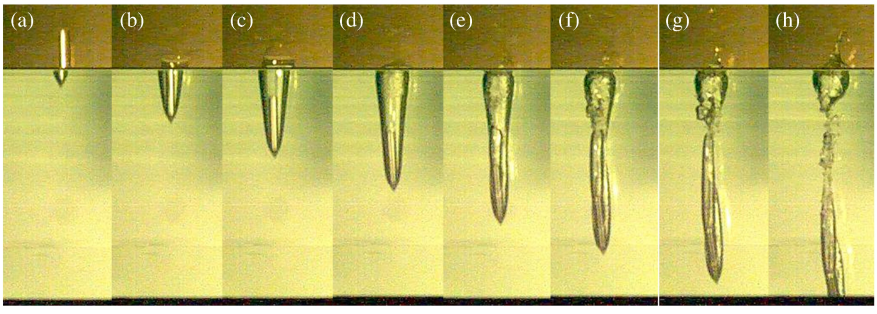

图 9 工况 10 的钝体垂直入水

Fig. 9 Vertical water entry of the blunt body in case 10

与倾斜入水工况类似,平头和圆头钝体的运行稳定性较好,尖头的较差(实验照片显示,此时是因为尖头钝体与空泡壁面碰撞后发生轨迹偏移)。这 3 个钝体的入水速度基本相同(见表 1),图 7～9 中所示的入水时刻也基本相同,但是空泡表面闭合的时间有差异。平头钝体的空泡表面闭合发生在图 7(b)的时刻,也就是入水后的 2 ms;圆头钝体的空泡表面闭合发生在图 8(b)和图 8(c)之间的时刻,也就是入水后的 3 ms;尖头钝体的空泡表面闭合时间发生在图 9(d)的时刻,也就是入水后的 6 ms。表面闭合时间长,意味着有更多的空气被吸入空泡,不但使空泡直径增大,而且流动着的空气有可能扰动相对细长的物体,使其与空泡壁面碰撞。在何春涛等[13]的低速圆柱体入水实验研究中,并未涉及物体头型对空泡表面闭合时间的影响。

2.2 入水初始速度对运动稳定性和空泡闭合方式的影响

钝体入水时的初始速度是钝体入水前自身所带的所有动能的体现,是钝体运行距离以及能否发生空泡流的决定性因素。如果入水速度过小,钝体在水中将不能完全被空泡包裹,从而摩擦阻力增大,运动距离缩短。图 10 和图 11 对比了工况 6 和工况 3 这 2 个高速和低速入水工况。由图可知,在入水角

度为 18°时，入水初始速度对入水初始弹道影响不明显，钝体基本都是沿着近似相同的弹道运动（基本上保持直线运动）。观测空泡形态后可知，在低速钝体入水的情况下，空泡的外形尺寸相对较小；而在高速钝体入水的情况下，空泡的外形尺寸相对较大，在工况 6 中的空泡最大直径是工况 3 的 2～3 倍。

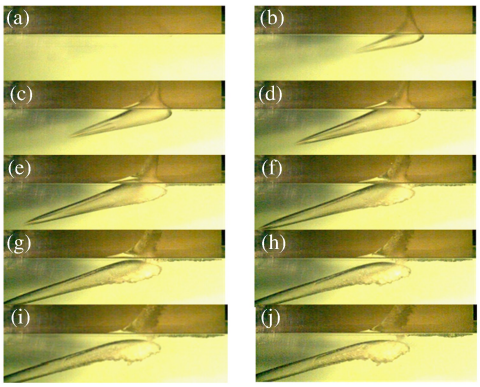

图 10　工况 6 中的钝体高速入水

Fig. 10　High-speed water entry of the blunt body in case 6

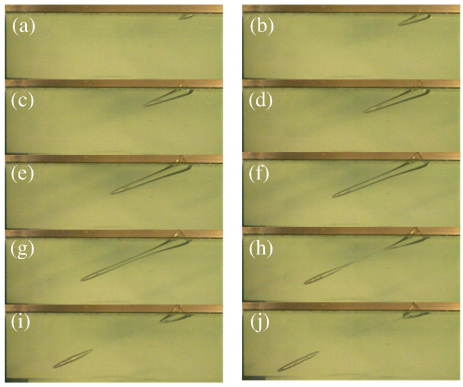

图 11　工况 3 中的钝体低速入水

Fig. 11　Low-speed water entry of the blunt body in case 3

另外，实验指出钝体在不同的初始速度下入水后，空泡的闭合方式是不同的。入水速度较低时（工况 3 和 4），闭合方式为在自由液面以下某一深度发生空泡闭合，即深度闭合，见图 12(a)；入水速度较高时（工况 5 和 6），空泡易于在自由液面处发生空泡闭合，即表面闭合，见图 12(b)。

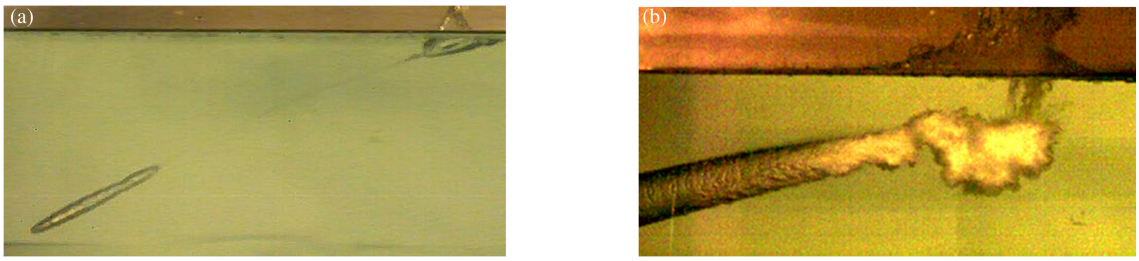

图 12　典型的空泡深度闭合和表面闭合

Fig. 12　Deep closure and surface closure of the cavity

2.3　不同初始速度的钝体入水后运行速度的变化

图 13 给出了不同初速度下尺寸完全相同的圆台头钝体倾斜入水后的运动位移和速度曲线。

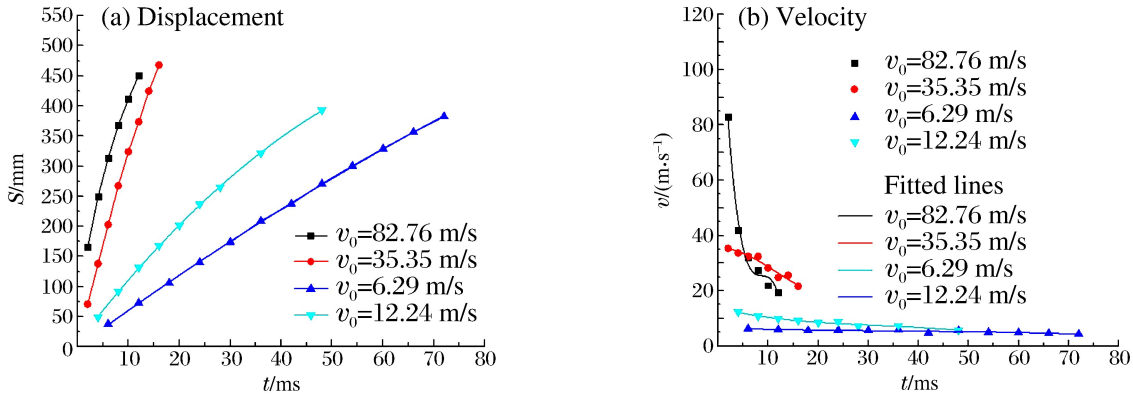

图 13　不同初速度下钝体入水后的位移和速度对比

Fig. 13　Comparison of displacement and velocity after water entry among the blunt bodies with different initial velocities

因为钝体要克服摩擦力阻力，所以随着时间的延长，它的速度呈衰减趋势。但是在不同初始入水速度下，钝体速度衰减率有较大的区别，即初始入水速度越大，钝体速度衰减越快；初始入水速度较小时，

钝体运行速度衰减较慢。从位移曲线可以看出:对于初始速度大的钝体,虽然其速度衰减很快,但在较短的时间内由于钝体自身带有较大动能,可以使钝体在速度完全衰减到零之前,达到较远的运行距离;对于初始速度低的钝体,虽然其自身所带的动能较小,运动速度不高,但由于在入水时也能够卷入一定量的空气,这些空气能增加空泡存在的时间,使钝体能够一直被完全包裹在空泡内部,从而能减小钝体周围与水的接触面积,实现减阻,这样保证了钝体运行轨迹的延长。

2.4 空泡外形轮廓特性分析

空泡的外形尺寸受空化器形状、边界条件、弹体在空泡内的稳定性等因素的影响,下面结合空泡外形轮廓的相关公式对入水空泡的外形轮廓特性展开分析。G. V. Logvinovich在 1969 年提出的空泡界面扩张的独立原理,给出了计算空泡外形轮廓的半经验公式[8],空泡轮廓前沿部分($x\leqslant 2R_0$)的表达式为:

$$R(x)=R_0\ (1+3x/R_0)^{1/3} \qquad (1)$$

后沿部分($x>2R_0$)的表达式为:

$$R(x)=R_{\mathrm{k}}\sqrt{1-\left(1-\frac{R_1^2}{R_{\mathrm{k}}^2}\right)\left|1-\frac{x}{x_{\mathrm{k}}}\right|^{\frac{1}{\chi}}} \qquad (2)$$

式中:$\chi=0.85$ 为修正系数,R_{k}为空泡的最大直径,R_1为 $x=2R_0$时空泡的直径,x_{k}为空泡最大直径处对应的 x 值。



图 14 空泡外形轮廓的测量方法

Fig. 14 The measuring method of the cavity contour

空泡外形轮廓测量的方法如图 14 所示,由于入水空泡闭合前尾部形状复杂,故只对能够测量的部分进行测量后对比分析。利用式(1)~(2),结合从高速摄影照片测得的数据,绘制出超空泡的外形轮廓,并与式(2)对比,见图 15。

由式(2)得到的空泡外形轮廓是一个轴对称的椭球形,由实验图片测量得到的空泡前段部分的形状和式(2)的吻合较好,在后半段特别是靠近自由液面的空泡尾部出现一定偏离,呈现非轴对称状态。这可能是因为钝体入水冲击水面形成空泡时,卷入了空气,使空泡尾部被扰动;而自由水面产生水花的同时,也会产生反向的再进入射流冲击空泡的尾部,使空泡尾部形态发生变化。对比钝体入水后 4 个不同时刻的空泡形态变化,发现随着时间的增长,运动体距离入水点越远,且空泡沿着钝体的运动轨迹一直做径向扩张,直至空泡闭合。图 15 的对比,从另一个角度证实了本文实验的可靠性。

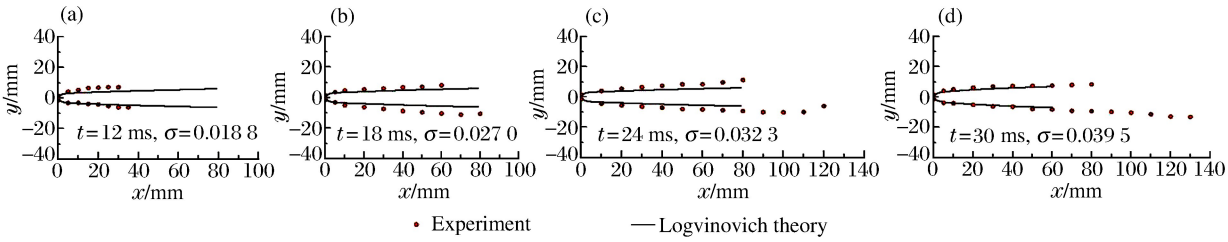

图 15 工况 3 实验和 Logvinovich 理论确定的超空泡外形轮廓位置

Fig. 15 The cavity contours by current experiment in case 3 and Logvinovich's theory

对不同头型钝体垂直入水产生空泡时,空化起始发生点做进一步分析(由于垂直入水空泡实验所用钝体直径(12 mm)较大,空泡尺寸也较大,这有利于更清晰地拍摄到的空泡形态),因为这与物体的受力状密切相关[14]。超空泡的起始点将发生在钝体表面上的最小压力处。在图 16(a)中,从左到右示意出了 3 种不同头型钝体产生空泡时,前端空泡起始发生点的位置。图 16(b)和 16(c)分别给出了相应的 3 种头型的实验和数值结果[10]。

对比实验结果和数值计算结果[10],不难发现平头钝体的空泡产生于前缘拐角处,圆头钝体的空泡

起始于圆头的前缘部分(依照速度大小会前后移动)，尖头钝体的空泡起始于锥型和柱体交界的凸缘处。钝体的头部形状不仅会影响空泡的起始点位置，也会影响空泡的形态大小，所以选择合理的头型是保证钝体能够在超空泡流状态下稳定运行、实现减阻所要考虑的重要因素之一。

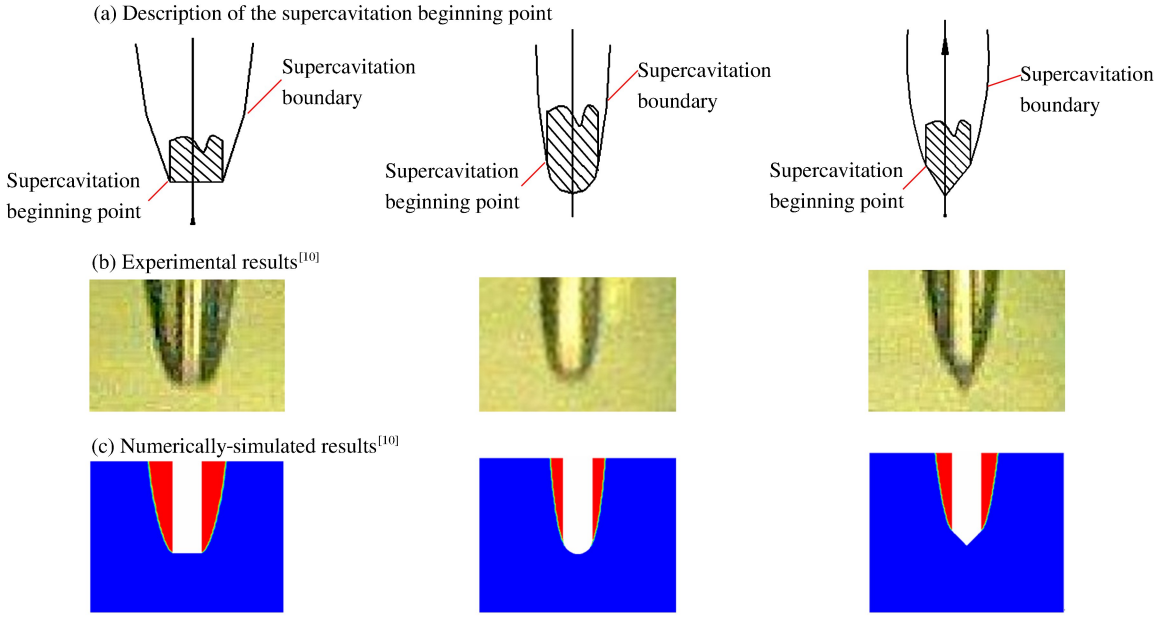

图 16　垂直冲击入水时钝体头部形状对超空泡发生位置的影响

Fig. 16　The dependence of the supercavitation beginning points on the head shapse of blunt bodies in the case of vertical water entry

3　结　论

通过实验，对小角度倾斜入水及垂直入水钝体的头型、初始速度等因素进行了分析，研究了不同工况下的空泡形态发展过程中诸多复杂因素。结论如下：(1)头型对钝体入水空泡的弹道及形态特性有重要影响，在倾斜入水及垂直入水时，圆台头和平头的钝体能形成较稳定的入水弹道，圆头和尖头钝体的入水弹道较不稳定。(2)入水初始速度对入水初始弹道稳定性影响不明显，但不同初始速度下空泡的闭合方式不同，即初始速度较低时入水空泡的闭合方式是深度闭合，初始速度较高时入水空泡的闭合方式是表面闭合。(3)不同初始速度下钝体速度都随时间衰减，而且初始速度越大，钝体速度衰减得越快。(4)对于倾斜入水的空泡，其空泡前部外形轮廓是一个关于轴对称的椭球体；对于垂直入水的空泡，钝体的头部不仅会影响空泡的起始点位置，也会影响空泡的形态大小。

参考文献：

[1]　魏平，侯健，杨柯. 超空泡射弹研究综述[J]. 舰船电子工程，2008，28(4)：13-14.
Wei Ping, Hou Jian, Yang Ke. Summary of supercavitating projectile researches[J]. Ship Electronic Engineering, 2008, 28(4): 13-14.

[2]　施红辉，罗喜胜. 可压缩性和高速多相流动[M]. 合肥：中国科学技术大学出版社，2014：156-247.

[3]　石汉成，蒋培，程锦房. 头部形状对水雷入水载荷及水下弹道影响的数值仿真分析[J]. 舰船科学技术，2010，32(10)：104-107.
Shi Han-cheng, Jiang Pei, Cheng Jin-fang. Research on numerical simulation of mine water-entry impact acceleration and underwater ballistic trajectory under the different mine's head shape[J]. Ship Science and Technology, 2010, 32(10): 104-107.

[4]　丛敏. 超空泡：未来水下武器系统的挑战[J]. 飞航导弹，2007(12)：11-14.

[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] Shi H H, Itoh M, Takami T. Optical observation of the supercavitation induced by high-speed water entry[J]. Journal of Fluids Engineering, 2000,122(4):806-810.

[7] Truscott T, Techet A, Beal D. Shallow angle water entry of ballistic projectiles[C]//CAV2009: The 7th International Symposium on Cavitation. Michigan, USA: Ann Arbor, 2009:1-14.

[8] Logvinovich G V. 自由边界流动的水动力学[M]. 施红辉,译. 上海:上海交通大学出版社,2012:97-111.

[9] 周素云,施红辉,胡青青,等. 水平超空泡发生装置的研制及相关实验研究[J]. 浙江理工大学学报,2013,30(2):218-223.
Zhou Su-yun, Shi Hong-hui, Hu Qing-qing, et al. Development of horizontal supercavity generating facility and relevant experimental study[J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2013,30(2):218-223.

[10] 胡青青. 不同倾角下钝体入水后的超空泡流动的实验观察及数值计算[D]. 杭州:浙江理工大学,2014:75-82.

[11] 施红辉. 周素云,胡俊辉,等. 水平超空泡与自由面相互作用的实验装置:中国,ZL201210155061.6[P]. 2014-04-16.

[12] 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 water entry ballistics research[J]. Journal of Naval University of Engineering, 2000,12(1):18-23.

[13] 何春涛,王聪,何乾坤,等. 圆柱体低速入水空泡试验研究[J]. 物理学报,2012,61(13):134701.
He Chun-tao, Wang Cong, He Qian-kun, et al. Low speed water-entry of cylindrical projectile[J]. Acta Physica Sinica, 2012,61(13):134701.

[14] 王献孚. 空化泡和超空化泡流动理论及应用[M]. 北京:国防工业出版社,2009:1-56.

Experimental study of supercavitating flows induced by oblique and vertical water entry of blunt bodies

Shi Hong-hui, Hu Qing-qing, Chen Bo, Jia Hui-xia

(*School of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou* 310018, *Zhejiang, China*)

Abstract: Small-angle oblique and vertical water entry experiments were carried out to observe the supercavitation generated by the blunt bodies with different initial velocities. The development features of the supercavitation in different cases were analyzed. Experimental results show that for small-angle oblique and vertical water entry, the the round-head and flat-head (disc cavitator) blunt bodies can form stable trajectories. When the initial water-entry velocity is lower, the closure mode of the cavity is deep closure. When the initial water-entry velocity is higher, the closure mode of the cavity is surface closure, and its speed decay rate is larger. For the supercavity generated by the small-angle oblique water entry of the blunt bodies, the front part of the supercavity contour is in agreement with the result by G. V. Logvinovich's semi-empirical formula. For the vertical water entry of the blunt bodies, the influences of the head shapes were discussed on the beginning points and morphologies of the supercavities.

Key words: mechanics of explosion; supercavity morphology; oblique water entry; blunt body; velocity; free surface

(责任编辑 张凌云)