

DOI: 10.7652/xjtuxb201503012

出水超空泡的形状与弗劳德数影响的实验研究

贾会霞, 胡俊辉, 施红辉, 陈波
(浙江理工大学流体工程系, 310018, 杭州)

摘要: 潜射导弹/射弹超空泡出水时超空泡与界面的作用机理目前还不完全清楚,而非定常流重力作用下的超空泡形状的描述也需要进一步探讨。为此,进行了水下高速射弹超空泡出水的实验研究,用高速摄影仪拍摄了航行体出水过程中空泡形状变化的图像,测量分析了各种不同头型航行体诱导的空泡尺寸、轮廓和生成溃灭形态的变化规律,并将研究结果与已有的理论公式和半经验公式进行了对比。研究表明,对所研究的情况,Savchenko 半经验公式的适用范围可以扩展到空化数小于 0.12;此外,实验测得的超空泡归一化长度亦高于考虑弗劳德数影响的 Vasin 的理论值,文中采用一系数对该公式进行了修正。实验研究还发现,航行体头型对超空泡的尺寸影响较大,超空泡与自由液面接触后,空泡直径有一定程度的增大。

关键词: 超空泡;出水;高速射弹;超空泡形状

中图分类号: O359 **文献标志码:** A **文章编号:** 0253-987X(2015)03-0067-07

Experimental Research on the Shape of Water-Exit Supercavity and the Effect of Froude Number

JIA Huixia, HU Junhui, SHI Honghui, CHEN Bo
(Department of Fluid Engineering, Zhejiang Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract: The interreaction mechanism between the supercavitation and the free interface of the submarine-launched missiles or projectiles with supercavities has not been clearly understood. And the description about the supercavity shape in an unsteady flow with gravity also needs to be further investigated. An experimental study on underwater high-speed projectiles was carried out in a self-designed experimental facility. The water-exit process of projectiles and the shape change of supercavities were recorded by a high-speed camera. The size, contour, formation and collapse of the supercavities were measured and analyzed. The experiment data were compared with the theoretical formula and semi-empirical formula. The results show that under the studied conditions, the semi-empirical formula of Savchenko can be extended to the cavitation number less than 0.12. In addition, the experimental data are higher than the theoretical value given by Vasin considering the effect of gravity. A coefficient is added to modify the given formula. Furthermore, the experimental study shows that the shape of projectile head has great effect on the size of the formed supercavities. When the supercavities come into contact with the free surface, the supercavity diameter will be increased to a certain extent.

Keywords: supercavitation; water-exit; high-speed projectiles; supercavity shape

当物体在水下高速运动时,物体周围的液体压力降低,当物体速度达到一定程度时,液体会发生气 化,在物体周围形成空泡,当空泡包裹住整个物体表面时,这种现象被称为超空泡。水中运动物体诱导

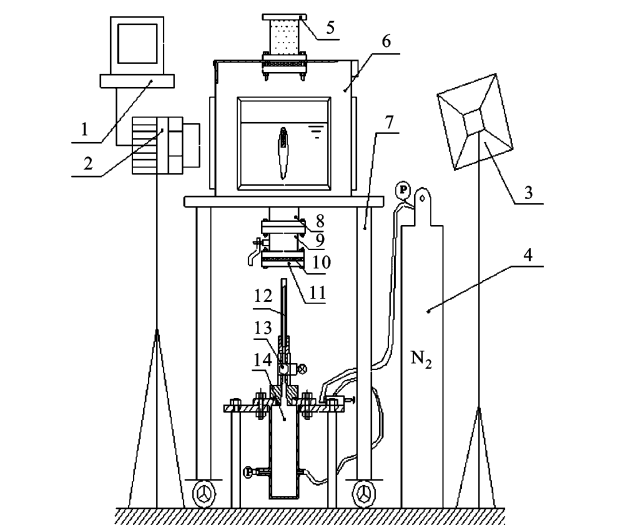
的超空泡流动是一个典型的气-液两相流问题。利用超空泡技术可以大大降低水下运动物体的黏性阻力,实现减阻提速的效果,在水中兵器、水下运输、海上急救等方面有着广泛的应用^[1]。

水下航行体超空泡出水问题是超空泡流动的一个重要分支,航行体的运动方向为垂直亦或是倾斜向上,主要应用在水下潜艇或者水下潜射导弹上^[2]。国外的 Waugh、Xing-Kaeding 等对航行体带空泡出水过程中自由液面和空泡的溃灭以及重力的影响规律进行了实验研究^[3-4];国内的鲁传敬教授利用 CFD 方法以及动网格技术对细长体出水过程中航行体受力波动、液面的升高、航行体尾部拖水等问题进行了研究^[5],王一伟等对典型航行体模型水下发射的全过程进行数值模拟,得到了航行体周围空泡演化过程、表面压力分布变化、航行体关键截面的全时程载荷响应^[6]。

空泡的形态及其形成机理和影响因素研究一直是该领域的研究重点,因为空泡的几何形态直接关系到水下航行体的受力情况,对航行体的稳定性有着重要的影响。国内外学者开展了大量的研究工作, Munzer-Reichardt、Logvinovich、Savchenko 等提出了描述空泡形状的理论公式和半经验公式^[7-9], Parishev 和 Vasin 提出了考虑重力效应时的空泡形状理论公式^[10-11];曹伟、周素云等利用实验手段对水平自然射弹空泡的形态进行了研究^[12-13],张学伟、刘海旻等应用数值仿真方法研究了空泡的形态^[14-15]。自然空化空泡在出水过程中,不可避免地会受到重力和自由面的影响,因此其形态变化更为复杂,目前国内外相关方面的研究还比较少。本文利用高速射弹模型实验和高速摄影方法,研究了不同模型和参数下自然空化超空泡出水形态尺寸的变化规律。

1 实验装置

实验的研究工作是在一套高速航行体出水实验系统中进行的,实验装置如图 1 所示。该系统主要由发射装置、观察装置和测量装置 3 部分组成。其中,测量装置包括工控计算机、高速摄影仪和照明灯,发射装置由高压气源、高压气缸、电磁阀和发射管等构成。发射装置为一台一级轻气炮,在实验时,通过调节高压气缸内气体压力驱动发射管中航行体高速运动。本实验采用高压氮气驱动,压力范围为 0~2.5 MPa,可以使航行体加速到 100 m/s 以上。观察装置包括航行体捕获器、观察窗、法兰、球阀、防水隔膜和法兰盖板。航行体从发射管加速射出后,



1:工控计算机;2:高速摄影仪;3:照明灯;4:高压气源;5:航行体捕获器;6:观察窗;7:水箱支撑架;8:法兰;9:球阀;10:防水隔膜;11:法兰盖板;12:发射管;13:电磁阀;14:高压气缸

图 1 高速物体出水实验装置示意图

垂直向上地冲破防水隔膜进入水箱,在水中形成超空泡;此时,采用高速摄影仪(美国 Cooke 公司的 pco. 1200s)记录整个过程,摄影所需的光源由 3 盏 1 kW 的照明灯提供。实验装置的具体构造和实验步骤可以参照文献^[16-17],这里不再赘述。

本研究对多种模型的航行体进行了射弹实验,此处只给出几种。实验采用的航行体模型的外形及其尺寸如图 2 所示,表 1 给出了相关参数,模型的材料为镁铝合金。在本文中将采用 1#~4# 来分别代表所研究的不同航行体模型。

进行后期的实验数据处理时,需要确定拍摄图片尺寸与实际尺寸之间的缩放比例,本文采取的方法是在实验前拍摄直尺图像(见图 3),根据直尺上的刻度取得图像的缩放比例。

表 1 几种不同形状的航行体模型($D_n=6\text{ mm}$)

型号	头型	长度 L/mm	长径比	质量/ g
1#	平头	36	6	2.735
2#	平头	60	10	4.408
3#	60°锥型	48	8	3.276
4#	圆台	48	8	3.238

注: D_n 为航行体特征直径。

由于空泡、水、有机玻璃观察窗的折射会导致图像各部分的比例不均匀,相关研究^[18]表明这种误差的影响较小,一般在 0.3%~0.6%,可不予考虑。

空化数是空泡流动中一个很重要的参数,其表达式如下

$$\sigma = \frac{p_{\infty} - p_c}{0.5\rho V_{\infty}^2} \tag{1}$$

式中： p_{∞} 表示物体前方未扰动处液流静压，计算中一般取为当地大气压力与航行体的注水静压力之和； p_c 为空泡内的压强，在自然空泡实验中取为饱和蒸汽压力 p_v ； V_{∞} 是物体相对来流的速度，射弹实验中为射弹的速度，实验中采用相邻两张照片之间的平均速度； ρ 为流体的密度。

重力因素对空泡外形特征也会产生影响，考虑重力因素的弗劳德数的表达式为

$$Fr = \frac{V_{\infty}}{(gD_n)^{1/2}} \tag{2}$$

式中： Fr 为弗劳德数； g 为重力加速度； D_n 为航行体特征直径。

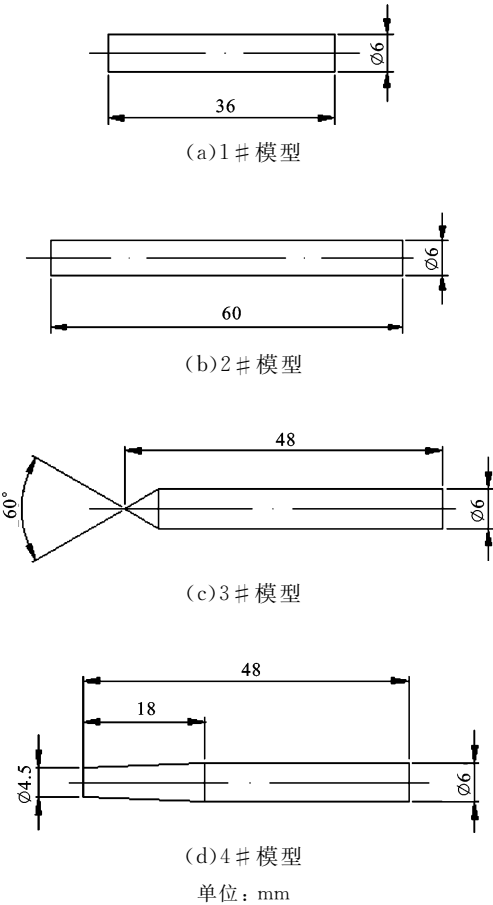


图 2 实验航行体模型的尺寸

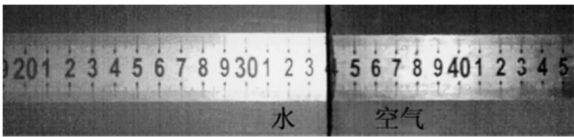


图 3 高速摄影仪拍摄的直尺图片

2 实验结果和分析

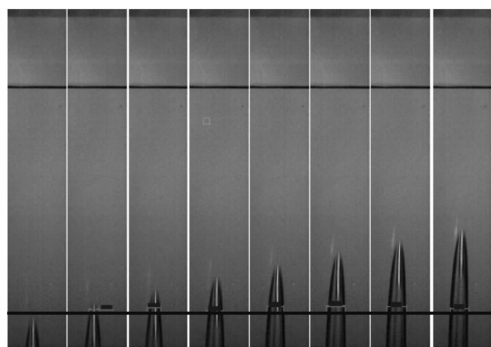
2.1 自然超空泡从生成到溃灭的形态变化

图 4 示出了 4#射弹模型(空化器直径为 4.5 mm 的圆台型航行体)的出水全过程。本文实验的拍摄速度为 4 000 帧/s,即相邻两张照片的时间间隔为 0.25 ms。航行体经水箱下方打开的球阀进入水箱,从下向上运动。当航行体进入可视观察窗时,航行体的速度为 63 m/s。因为航行体的速度较高,在航行体周围产生了较大尺寸的超空泡。在图 4(16)中可看到完整的超空泡。航行体在阻力和自身重力的作用下(其中阻力起主导作用)速度逐渐减小,对应的超空泡的尺寸也有所减小,这在后续给出的结果中也可看出。

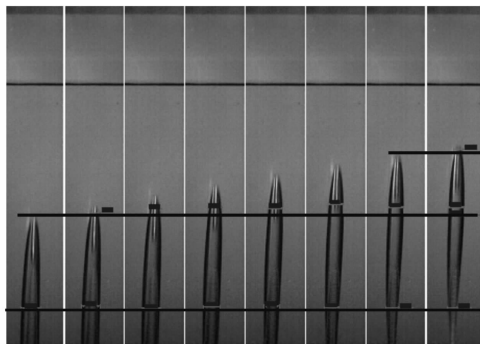
该工况因为航行体入水速度较大,因而一直到出水时刻(见图 4(23))超空泡形状都较稳定,并未出现自尾部至头部的空泡溃灭和再生成,当航行体出水时才发生空泡的溃灭。

当航行体从下向上运动时,包裹航行体的超空泡因为航行体的运动,超空泡所在的水位也在不断地减小,即使在同一时刻,超空泡自身在长度方向上受到的水压也是不同的。因此,为了研究出水超空泡的形状变化特性,选取了 3 个水深进行研究。以水面自由面为 0 点,向上为正方向,水深 h 分别取 -265.43、-153.77、-81.89 mm。

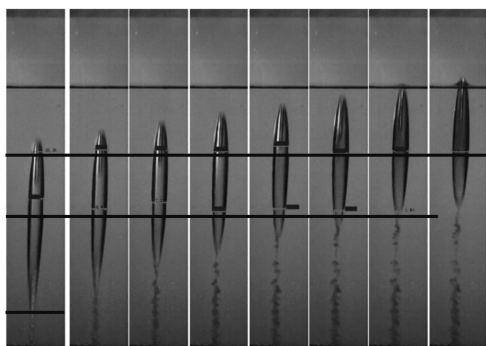
定义航行体头部到达固定水位时刻为 0,用航行体特征直径($D_n=6$ mm,见图 2)对空泡直径 D_c 进行归一化。航行体以不同速度穿过选取的不同水位时,归一化直径随时间的变化关系如图 5 所示。由图可知:航行体穿过固定水位时,空泡经历了快速扩张、缓慢变化、快速收缩的过程;空泡生长到溃灭的时间为 3.5~4.25 ms。-265.43、-153.77 mm 水位处的空泡归一化直径都近似地呈抛物线形式,在 $t=2$ ms 时达到峰值; $h=-81.89$ mm 水位处,空泡直径并没有像其他水位那样在 2 ms 时达到峰值,而是接着扩张到 2.5 ms 时才达到峰值。其原因可能是:在其他两个水位处,空泡从形成到溃灭,航行体都在水下,尚未越过自由水面,而对于 $h=-81.89$ mm 的水位,图 5 中横坐标的 2 ms 时刻正好对应图 4(23)所示的航行体出水以及超空泡开始接触空气的时刻,在自由液面和浮力等的影响下,空泡头部的纵向体积增长被抑制,空泡尾部横向地扩张,从而导致在此水位空泡直径的继续膨胀增长,延缓了溃灭。



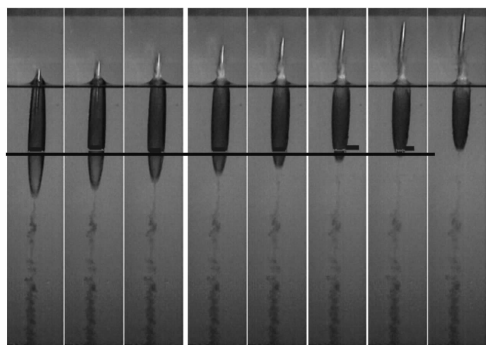
(1) (2) (3) (4) (5) (6) (7) (8)



(9) (10) (11) (12) (13) (14) (15) (16)



(17) (18) (19) (20) (21) (22) (23) (24)



(25) (26) (27) (28) (29) (30) (31) (32)

图4 圆台型航行体模型的出水全过程

2.2 出水自然空化超空泡的尺寸变化

超空泡的形状会影响航行体在水中所受到的阻力。超空泡的长度和直径采用航行体特征直径 D_n 进行归一化。

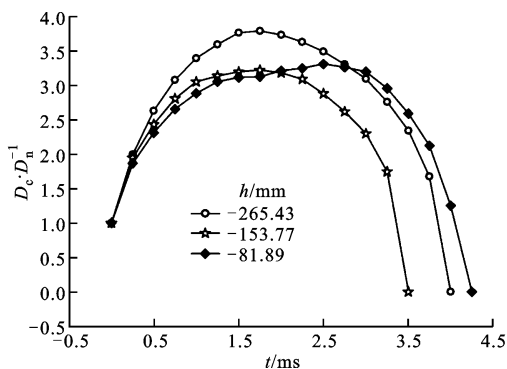


图5 不同水位处空泡形态变化

图6给出了4种航行体的归一化长度随空化数的变化与理论和半经验公式的对比。据式(1)计算空化数 σ 时,式中的 p_∞ 取航行体头部所在位置处的水静压强和当地大气压之和。须注意的是,此处并未考虑 Fr 的影响(Fr 的影响随后讨论)。图中带符号的4条实线为本文的实际测量数据;实线为根据 Logvinovich 所提出的空泡截面独立膨胀原理^[8] 计算得到的结果;长虚线为根据 Savchenko 提出的半经验公式^[9] 计算得到的结果,它适用的空化数范围在 $1 \times 10^{-4} \sim 1.2 \times 10^{-2}$ 内;短虚线(几乎与实线相重合)是根据 Munzer-Reichardt^[7] 模型计算得到的结果。该模型是赖卡特基于低阶势流理论方程导出的,他所给出的空泡形状如下

$$\bar{D}_c = \frac{D_c}{D_n} = \left(\frac{c_d}{\sigma - 0.132\sigma^{8/7}} \right)^{1/2} \quad (3)$$

$$\bar{L}_c = \frac{L_c}{D_n} = \frac{\sigma + 0.008}{\sigma(0.066 + 1.7\sigma)} \left(\frac{c_d}{\sigma - 0.132\sigma^{8/7}} \right)^{1/2} \quad (4)$$

$$c_d = c_{x0}(1 + \sigma + 0.028\sigma^2) \quad (5)$$

式中: D_n 表示空化器特征直径; c_d 为空化器阻力系数; c_{x0} 为 $\sigma=0$ 时的阻力系数,对于圆盘空化器,取 $c_{x0}=0.805$ 。

从图6中可看到,所有的实验数据都要高于 Logvinovich 和 Reichardt 的理论公式值,而低于 Savchenko 的半经验值。

2#和4#航行体与 Savchenko 所给出的数值非常接近。1#航行体的实验数据介于 Logvinovich 和 Savchenko 的值之间,变化趋势与理论和半经验公式相似。

从图6中还可看到,对于上述3种工况(即1#、2#和4#),随空化数的增大,空泡的归一化尺寸都逐渐减小,且变化趋势基本一致。对比1#和2#的结果发现,在相同的空化数时,2#航行体的归一化空泡长度要大于1#的值(这两种工况进行归一化

的空化器直径是相同的)。3#航行体的超空泡归一化长度随空化数的变化趋势较为平缓,这可能是因为:一方面,理论公式只是用来描述圆盘空化器航行体产生的空泡,而3#为60°锥角航行体,它的头部绕流情况和平头空化器头部绕流相差很大,产生的空泡要小一些;另一方面,60°锥头时超空泡的尾部溃灭影响范围较大,这使得超空泡的尺寸难于测量。

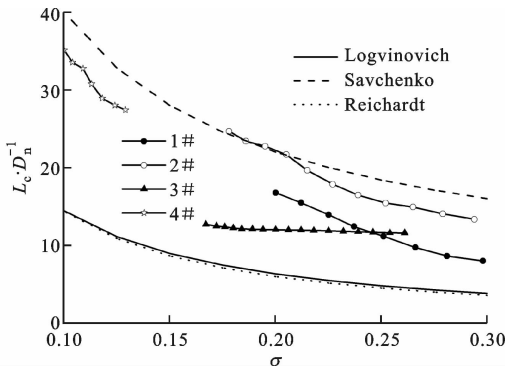


图 6 归一化长度随空化数的变化规律

图 7 为实验测得的几种工况超空泡归一化直径与理论和半经验数据的对比。

从图 7 中可看到,4#航行体的实验数据与 Savchenko 给出的半经验公式的数值符合很好,但对于其他 3 种工况,则或高于半经验公式给出的较大值,或低于理论公式给出的较低值。其原因一方面可能是因为本文所实验的航行体的最大直径不大,只有 6 mm,而在实验时存在着各种测量上的误差,如实验时空泡、水、有机玻璃观察窗的折射,以及实验后超空泡尺寸测量时的误差。除此之外,当超空泡尺寸相对较小时,超空泡的尾部溃灭也会影响超空泡的测量结果。

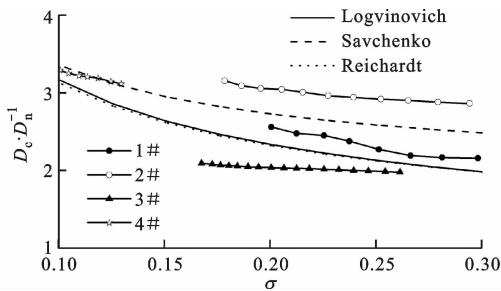


图 7 归一化直径随空化数的变化规律

对于重力场中的超空泡流动,当考虑重力效应时,需引入 Fr 。Vasin 给出了考虑 Fr 时超空泡长度的计算公式^[10-11]

$$\bar{L}_c = \frac{L_c}{D_n} = kFr \left[-\frac{3}{4}\sigma Fr + \left(\frac{9}{16}\sigma^2 Fr^2 + \frac{3}{2}a \right)^{1/2} \right] \quad (6)$$

式中: $a=2$; k 为本文引入的一修正系数,当 $k=1$ 时,即为 Vasin 所给出的公式。

图 8 给出了实验数据和 Vasin 公式计算结果的对比。从图中可看到,对所实验的 4 种航行体,超空泡的归一化长度都要高于 Vasin 所给出的计算值。

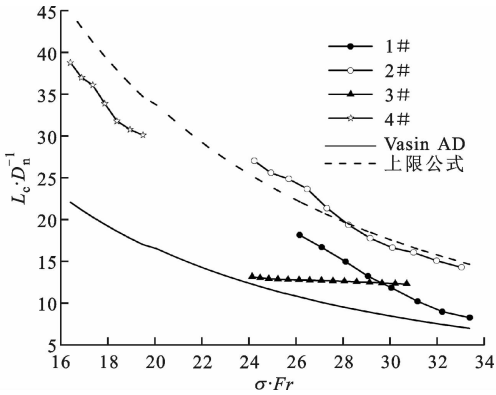


图 8 归一化长度随空化数与弗劳德数乘积的变化规律

对比图 8 与图 6 可以发现,图 8 中的实线与 Logvinovich 和 Reichardt 的理论值接近。因此,本文在式(6)中引入一系数 $k=2$ 对 Vasin 表达式进行修正。图 8 中的虚线即为本文得到的 $k=2$ 时的经验表达式,用上限公式标注。对于垂直出水超空泡,当考虑重力效应时,超空泡归一化长度可能介于 $k=1$ 和 $k=2$ 之间。

2.3 出水自然空化超空泡的轮廓分析

如图 9 所示,以航行体头部为坐标原点,空泡轴线为 x 轴, x 处的空泡直径为 $D(x)$,分别测量不同 x 位置的空泡直径,即可得到在某空化数下的空泡轮廓。

为方便研究比较,对空泡轮廓参数同样采用航行体特征直径 D_n 进行归一化处理,具体定义如下

$$\bar{x} = x/D_n; \quad \bar{D} = D(x)/D_n$$

此处,只给出了一个工况下(平头长径比为 12 时)3 个空化数实验得到的结果,3 个空化数分别为 0.147、0.155、0.163。图 10 给出了实际测量的 3 个空化数下的空泡图像,从该图中并不能直观地看出不同空化数时空泡轮廓曲线的不同。

图 11 给出了 3 个空化数的空泡外形轮廓曲线的对比图。从图中可以看出:空泡的相对直径随轴向相对坐标 $\bar{x}$ 先增大后减小,呈抛物线变化;相同 $\bar{x}$ 下空化数越小,相对直径 $\bar{D}$ 越大; $\bar{x}<8$ 时,各空化数下 $\bar{D}$ 相差不大; $\bar{x}>8$ 时,各空化数下 $\bar{D}$ 的差距变大。相同模型的航行体在不同空化数时,空泡前部分轮廓曲线大致相同,后部分轮廓随空化数增大而减小,空化数的变化对空泡尾部影响较大。



图9 空泡轮廓的测量方法示意图

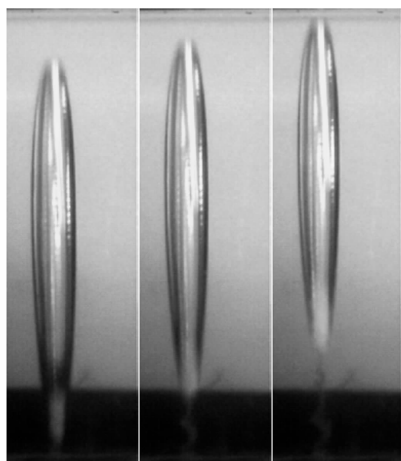
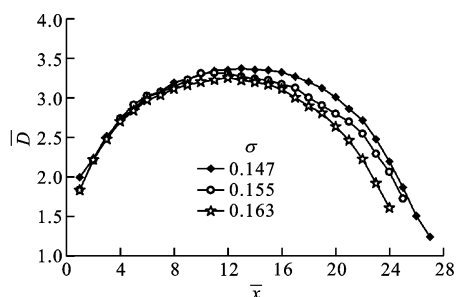
(a) $\sigma=0.147$ (b) $\sigma=0.155$ (c) $\sigma=0.163$

图10 不同空化数的空泡形状(平头长径比为12)

图11 不同空化数下空泡外形轮廓曲线
(平头长径比为12)

Logvinovich 和 Reichardt 提出的描述空泡轮廓的理论公式如下

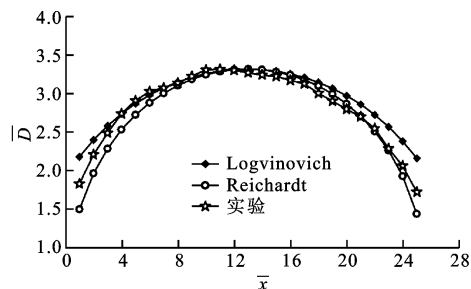
$$\bar{D} = \bar{D}_c \left\{ 1 - \left[1 - \left(\frac{1.92}{\bar{D}_c} \right)^2 \right] \left[1 - \frac{2\bar{x}}{\bar{L}_c} \right]^2 \right\}^{1/2} \quad (7)$$

$$\bar{D} = \bar{D}_c \left[\frac{4\bar{x}(\bar{L}_c - \bar{x})}{\bar{L}_c^2} \right]^{1/2.4} \quad (8)$$

图12给出了空化数为0.155时实验测得的空泡外形轮廓曲线与Reichardt和Logvinovich公式的理论值对比。Reichardt和Logvinovich的理论曲线为对称的椭圆弧形,两种理论曲线峰值相同,但Reichardt曲线的其余部分低于Logvinovich的理论曲线。

在该实验工况下,实验数据和理论公式值吻合较好,各空化数下空泡轮廓的前半部分实验数值比Logvinovich的理论数值小,但比Reichardt的理论

数值大,空泡轮廓的后半部分实验数值更接近Reichardt的理论数值。实验测得的空泡曲线不对称,空泡后半部分的直径要小于前半部分对应位置处的直径,其原因可能是垂直出水的空泡受到重力的作用,在空泡表面上的纵向压力梯度使得尾部空泡收缩所致。

图12 空泡外形轮廓实验数据与理论值的对比
(空化数为0.155)

3 结 论

(1)在高速摄影照片中设定欧拉控制面,让空泡通过控制面,得知了空泡直径经历了快速扩张、缓慢变化、快速收缩的过程;自由液面对出水空泡的径向收缩有抑制作用,并促使空泡直径有一定程度的增大,空泡溃灭时间增加。

(2)对本文所给出的工况,Savchenko所给出的半经验公式的适用范围可以扩展到空化数为0.12的情况,此时实验数据与半经验值符合较好。实验测得的超空泡归一化长度值都高于Logvinovich和Reichardt的理论计算值。相同空化数下,航行体头型对空泡的归一化尺寸影响较大。减小航行体头部锥角会大幅度地降低空泡尺寸。

(3)对所实验的几种工况,当引入考虑重力效应的弗劳德数时,实验测得的超空泡归一化长度基本上在Vasin的理论计算值的1倍到2倍之间。

(4)出水超空泡的轮廓在最大空泡直径处的两侧不完全对称,后半部分尺寸略小。这可能是因为重力的作用下,垂直出水空泡表面的纵向压力梯度使得尾部空泡收缩所致。

参考文献:

- [1] 姜百汇, 马春勋, 刘乐华. 国外超空泡技术及其应用[J]. 飞航导弹, 2008(5): 20-24.
JIANG Baihui, MA Chunxun, LIU Lehua. The technology and its application of supercavitation in foreign[J]. Winged Missiles Journal, 2008(5): 20-24.
- [2] 姚奕, 聂永芳, 冯林平. 潜射导弹运载器水下发射关

- 键技术研究 [J]. 飞航导弹, 2010(2): 56-60.
- YAO Yi, NIE Yongfang, FENG Linping. The key technology research of submarine missile carrier launching underwater [J]. Winged Missiles Journal, 2010(2): 56-60.
- [3] WAUGH J G, STUBSTAD G W. Water-exit behavior of missiles: part 1 Preliminary studies, AD273717 [R]. China Lake, California, USA: Underwater Ordnance Department, 1961.
- [4] XING-KAEDING Y, JENSEN G, PERIC M. Numerical simulation of water-entry and water-exit of a horizontal circular cylinder [C] // Proceedings of the 6th International Conference on Hydrodynamics. Beijing, China: The Chinese Society of Theoretical and Applied Mechanics, 2004: 663-669.
- [5] 鲁传敬, 李杰. 水下航行体出水空泡溃灭过程及其特性研究 [C] // 第十一届全国水动力学学术会议暨第二十四届全国水动力学研讨会并周培源教授诞辰 110 周年纪念大会文集. 无锡: 海洋出版社, 2012: 54-67.
- [6] 王一伟, 黄晨光, 杜特专, 等. 航行体垂直出水载荷与空泡溃灭机理分析 [J]. 力学学报, 2012, 44(1): 39-48.
- WANG Yiwei, HUANG Chenguang, DU Tezhuan, et al. Mechanism analysis about cavitation collapse load of underwater vehicles in a vertical launching process [J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2012, 44(1): 39-48.
- [7] REICHARDT H. The laws of cavitation bubbles at axially symmetrical bodies in a flow, No. 766 [R]. Spring Quarry, Great Britain: Ministry of Aircraft Production, 1946: 322-326.
- [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: 97-122.
- [9] SAVCHENKO Y N. Experimental investigation of supercavitating motion of bodies [C] // VKI Special Course on Supercavitating Flows. Brussels, Belgium: VKI, 2001: EN-010-04.
- [10] PARISHEV E V. Pulsations of vertical cavities in ponderous fluid [J]. Uch Zap TsAGI, 1981, 12(3): 1-9.
- [11] VASIN A D. The principle of independence of the cavity sections expansion (Logvinovich's principle) as the basis for investigation on cavitation flows [C] // VKI Special Course on Supercavitating Flows. Brussels, Belgium: VKI, 2001: RTO-EN-010(8).
- [12] 曹伟, 王聪, 魏英杰, 等. 自然超空泡形态特性的射弹实验研究 [J]. 工程力学, 2006, 23(12): 175-187.
- CAO Wei, WANG Cong, WEI Yingjie, et al. High-speed projectile experimental investigations on the characteristics of natural supercavitation [J]. Engineering Mechanics, 2006, 23(12): 175-187.
- [13] 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 Suyun, SHI Honghui, HU Qingqing, et al. Development of horizontal supercavity generating facility and relevant experimental study [J]. Journal of Zhejiang Sci-Tech University, 2013, 30(2): 218-223.
- [14] 张学伟, 张亮, 于开平, 等. 自然超空泡形态稳定性的数值仿真 [J]. 弹道学报, 2009, 21(2): 103-106.
- ZHANG Xuewei, ZHANG Liang, YU Kaiping, et al. Numerical simulation of shape stability of natural supercavitation [J]. Journal of Ballistics, 2009, 21(2): 103-106.
- [15] 刘海旻, 张宇文, 弋辉. 空泡形态的公式计算与 CFD 仿真 [J]. 指挥控制与仿真, 2011, 33(6): 116-118.
- LIU Haimin, ZHANG Yuwen, YI Hui. Cavity form formula computation and CFD simulation [J]. Command Control & Simulation, 2011, 33(6): 116-118.
- [16] 施红辉, 胡俊辉, 周浩磊. 完全超空泡出水的实验研究及理论分析 [J]. 空气动力学学报, 2014, 32(4): 544-550.
- SHI Honghui, HU Junhui, ZHOU Haolei. Experimental study and theoretical analysis of water exit of a supercavity [J]. Acta Aerodynamica Sinica, 2014, 32(4): 544-550.
- [17] 胡俊辉. 水下垂直发射的航行体在出水过程中超空泡的形成、溃灭及其与自由面相互作用的水动力学机理研究 [D]. 杭州: 浙江理工大学, 2014.
- [18] 袁绪龙, 张宇文, 刘乐华. 空泡外形测量与分析方法研究 [J]. 实验力学, 2006, 21(2): 215-219.
- YUAN Xulong, ZHANG Yuwen, LIU Lehua. On methods of cavity profile measurement and analysis [J]. Journal of Experimental Mechanics, 2006, 21(2): 215-219.

(编辑 荆树蓉)