

文章编号:2095-6134(2016)02-0271-06

物体高速出水过程中的空化气液两相流流型研究^{*}

施红辉[†], 高聚瑞, 贾会霞, 胡俊辉, 周杨洁, 陈 波

(浙江理工大学机械与自动控制学院流体工程系, 杭州 310018)

(2015 年 3 月 13 日收稿; 2015 年 6 月 1 日收修改稿)

Shi H H, Gao J R, Jia H X, et al. Cavitating gas – liquid two – phase flow pattern in water exit a high-speed body[J].
Journal of University of Chinese Academy of Sciences, 2016,33(2):271-276.

摘 要 实验研究超空泡航行体出水时的气液两相流流型. 观察到当航行体靠近自由面时, 超空泡的崩溃、再产生以及与自由面相互作用等复杂力学过程. 对于崩溃超空泡, 其尾部由透明变为阴影, 可能与尾射流的产生有关; 但一般而言, 超空泡的崩溃是整体性的. 基于 FLUENT 软件并采用 VOF 方法, 对超空泡出水过程进行数值模拟, 数值计算结果与实验结果吻合良好.

关键词 超空泡; 高速物体出水; 高速摄影; 流型

中图分类号:O351.3 文献标志码:A doi:10. 7523/j. issn. 2095-6134. 2016. 02. 020

Cavitating gas-liquid two-phase flow pattern in water exit of a high-speed body

SHI Honghui, GAO Jurui, JIA Huixia, HU Junhui, ZHOU Yangjie, CHEN Bo

(Department of Fluids Engineering, College of Mechanical Engineering and Automation, Zhejiang
Sci-Tech University, Hangzhou 310018, China)

Abstract The flow patterns of cavitating gas-liquid two-phase flow in water exit have been studied experimentally. The complicated processes of cavity's collapse, its re-generation, and cavity's interaction with the free surface, etc. have been observed. For a collapsing cavity, its transparent tail becomes opaque, which may be related to the formation of re-entrant jet. However, in general, the cavity collapses entirely. By using the FLUENT software and VOF method, the flow field is simulated numerically and the results are in agreement with experiment.

Key words supercavity; high-speed water exit; high-speed photography; flow pattern

水下高速运动的航行体诱导的超空泡流动是一个典型的气液两相流. 对空化超空泡行为的研究, 可以被认为是气泡动力学研究的延伸^[1-2]. 研究超空泡的流型, 将有助于确定其附加质量. 在 20 世纪 40—60 年代期间, 前苏联将超空泡的减阻原理应用在水中高速鱼雷的开发中^[3], 并在 70 年代中期研制出第一代暴风雪超空泡鱼雷. 美国也将超空泡技术应用在机载快速灭雷系统^[4] (简称 RAMICS) 中, 射弹高速入水打击水下目标. 中国近年来也对超空泡现象开展了系统的数值模拟

^{*} 浙江省自然科学基金(LQ13A020005, LQ13A020006, Z1110123, LY16A020003)资助

[†] 通信作者, E-mail: hhshi@zstu.edu.cn

和实验研究. 陈瑛等^[5]采用均质平衡流空泡模型,模拟空泡长度和最大直径随空化数的变化规律.熊天红等^[6]考虑气液间相变,利用 LES 湍流模型和 VOF 方法,实现三维非定常带尾翼射弹超空泡流的数值模拟.王海斌等^[7]采用通气的方法在较低流速下生产人工通气超空泡.施红辉等^[8]通过利用高速摄影仪清晰地观察到细长体高速入水后诱导生成的水中空泡流的形态及演化过程.他们还开展了完全超空泡出水的初步实验研究和理论分析^[9].在此基础上,本文对出水超空泡流场(主要针对水下超空泡)进一步地进行实验研究和数值模拟,明了了一些关键的现象.对于水面上气液两相流的详细的研究结果,将在另文中介绍.

1 实验装置与实验方法

图 1 是实验研究所用装置的系统简图. 如图所示,水箱 6 置于支撑架 7 上,水箱的材质是 5 mm 厚的不锈钢板,尺寸为 60 cm × 60 cm × 100 cm,水箱的四面均开设有观察窗,尺寸为 30 cm × 80 cm,材质是 5 mm 厚的透明有机玻璃. 高速摄影系统包括工控计算机 1、高速摄影仪 2、光源 3. 实验采用 Photron 公司的 FASTCAM SA5 高速摄像机,最高拍摄速度可达一百万帧. 每次实验开始前,我们将水箱的底部用 0.1 mm 厚的锡纸密封并打开球阀 9,实验结束后再关闭球阀. 发射系统主要由发射管 12、电磁阀 13、高压气缸 14 等组成. 实验时将高压气源 4 里的氮气通入到高压气缸中,通过气压表和电磁阀调节至实验所需的压力,打开电磁阀,高压氮气驱动发射管中的射弹模型从水箱底部高速射入水中,射弹模型将会依次穿过锡纸 10、球阀 9 和法兰 8 向上运动,安全截获器 5 用于回收射出水面的射弹. 实验前水箱中的水是静止的,处于常温状态.

利用该装置可以将射弹加速到 100 m/s 以上. 实验所采用的射弹材料为铝镁合金,其外形及尺寸如图 2 所示,尺寸单位为 mm. 表 1 给出 5 个不同的实验工况,5 个实验的拍摄速度均为 5 000 帧/s. 将拍摄到的航行体出水照片导入 AutoCAD 2013 中进行数据处理,测量航行体的位移和速度. 需要指出的是,光线通过近似圆柱体的超空泡时会发生折射,尽管空泡内的航行体清晰可见,但

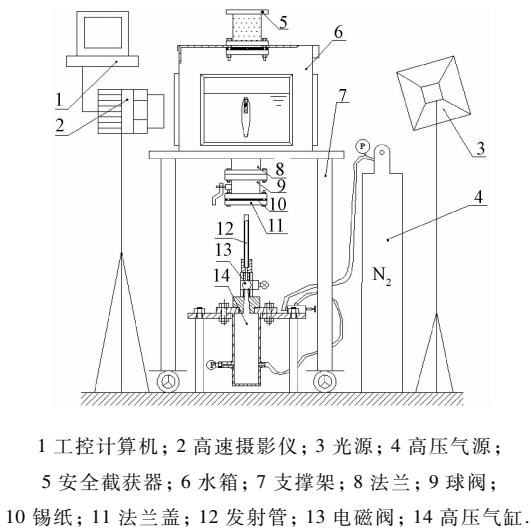


图 1 高速物体出水装置的实验简图
Fig. 1 Schematic of the experimental device

此时的物体直径已小于实际的尺寸(但物体长度仍不变),因此不能用物体直径作为数据处理的几何标尺. 我们用高速摄像机拍摄插入水中的钢尺,取尺子上的刻度作为标尺^[10]. 仲霄等^[11]在进行通气超空泡内部流场的 PIV 测量时,也注意到了空泡导致的粒子图像变形和失真.

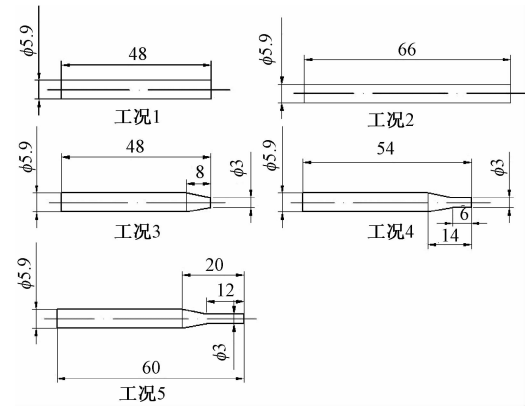


图 2 实验模型的尺寸
Fig. 2 Size of the testing models

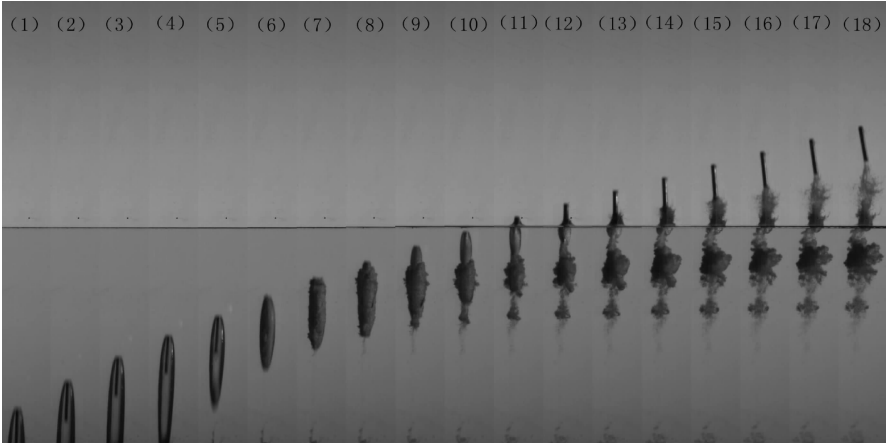
表 1 不同工况下的实验参数汇总表
Table 1 Experimental cases and parameters

工况	头型	长径比	质量 m/g	驱动压力 P_0 / MPa	水深 H/cm	初速度 V_0 / ($\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$)
1	平头	8	3.68	1.6	40	40.59
2	平头	11	5.01	1.6	40	35.69
3	圆台(空化器长 0)	8	3.39	1.6	40	89.49
4	圆台(空化器长 6)	9	3.52	1.6	40	88.26
5	圆台(空化器长 12)	10	3.65	1.6	40	94.51

2 实验结果与分析

工况 1、2 均是在驱动压力 1.6 MPa(绝对压力)条件下获得的航行体出水的高速摄影照片. 由于拍摄的时序照片较多,限于本文篇幅只截取了其中的部分照片,图 3、图 4 中相邻 2 幅照片的时间间

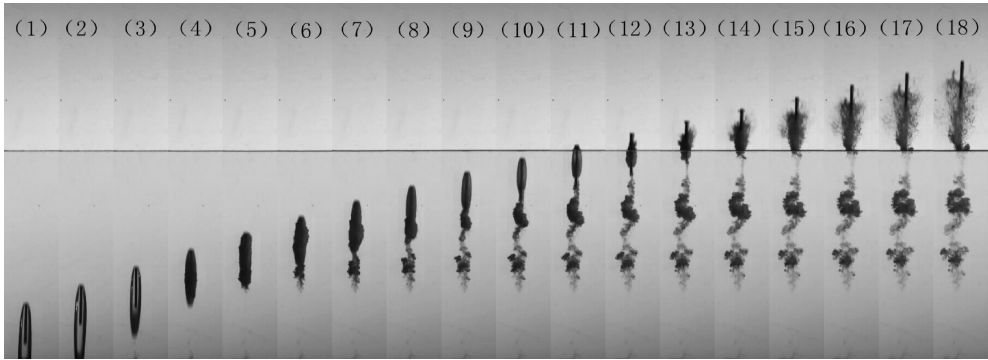
隔为 0.8 ms. 射弹模型进入水箱后由于发射速度较高,在射弹的周围立即形成完全包裹着的超空泡,如图 3(2)—图 3(5),图 4(2)和图 4(3). 此时航行体完全处于蒸汽超空泡内,空泡前部形态基本不变,航行体所受的黏性阻力约为压差阻力的 0.01 倍^[10],此时的阻力主要为压差阻力.



每张照片的实际宽度为 55 mm.

图 3 工况 1 航行体出水过程

Fig.3 Water exit of the vehicle in case 1



每张照片的实际宽度为 78 mm.

图 4 工况 2 航行体出水过程

Fig.4 Water exit of the vehicle in case 2

随后射弹模型在上升的过程中,由于阻力的作用速度不断降低,在图 3(6)中,射弹模型速度降至 27.87 m/s,此时空泡开始溃灭,超空泡界面开始模糊. 溃灭后的空泡最终融入尾流消失. 在图 3(10)—图 3(12)中可以清晰地看到空泡脱落的尾迹. 在工况 2 的条件下,图 4(4)中可以看到空泡的界面开始模糊,而且空泡开始脱落(见图 4(6)、图(7)). 在图 4(9)—图 4(11)中,航行体的末端有第 2 股脱落的空泡流,由此可知空泡的脱落是逐次逐批的. 另外,此时在航行体的头部产生

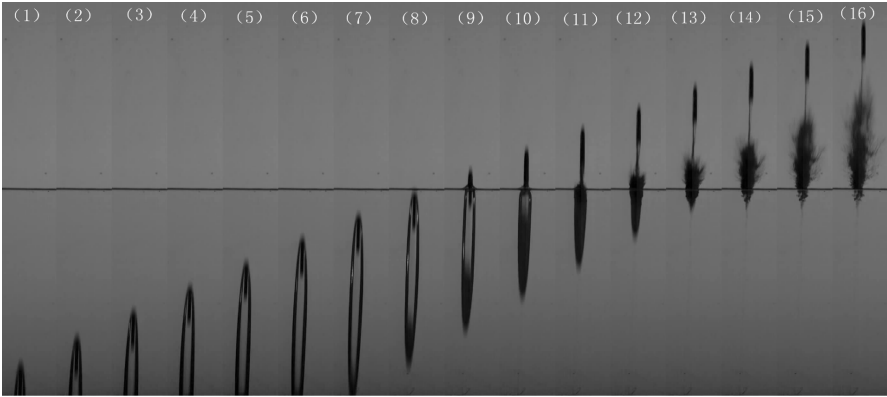
新的超空泡,由于航行体较长,而航行体的速度已较低,新产生的超空泡已经不能完全覆盖整个航行体,即形成局部超空泡.

在图 3(11)中,航行体的头部开始穿出水面,航行体表面的空泡被剥落并停留在水面上,在大气压力与空泡内部压力的巨大压差作用下空泡迅速溃灭. 溃灭瞬间产生巨大的压力脉冲,对航行体会产生很强的冲击作用,产生较大的俯仰力矩,导致航行体的运动方向发生较大的变化,如图 3(15)—图 3(18)中航行体发生大角度的偏转. 在

图 4(15)—图 4(18)中,航行体出水时伴随着向上喷溅的水花,有时喷溅水花的速度超过射弹的速度,因此水花对射弹的作用力可能会使航行体的速度在出水瞬间的某些时刻出现增加的现象^[10].

图 5—图 7 分别对应工况 3—5 下射弹模型高速出水过程,拍摄频率为 5 000 帧/s,相邻 2 幅图片的时间间隔为 0.4 ms. 这 3 种工况下航行体的速度较快,工况 5 中航行体的速度达到 94.5 m/s. 在不改变空化器直径(均为 3 mm),增加空

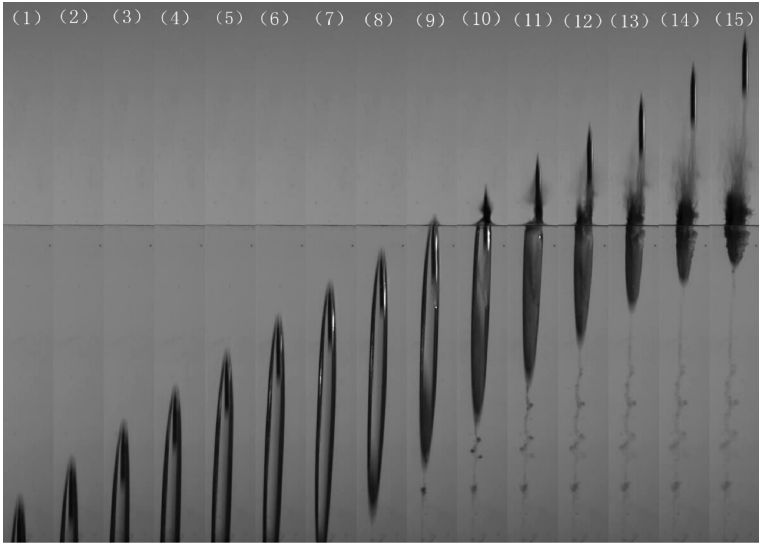
化器长度的情况下,航行体均能保持垂直出水,几乎没有发生偏转,而且弹道的稳定性也非常好,空泡也几乎没有脱落,仅在图 6(9)—图 6(11)中有少许空泡脱落. 在图 5(9)、6(10)、7(9)中闭合的空泡壁面分别与大气相连打开,空泡内压立即由饱和蒸汽压上升为大气压,外界压力使水蒸气凝结液化,空泡发生溃灭. 通过测量,这 3 种工况下超空泡的直径分别为 18.24,17.78 和 17.47 mm,可见空化器的长度对航行体的稳定性影响不大,只是轻微地影响超空泡的形态特征.



每张照片的实际宽度为 65 mm.

图 5 工况 3 航行体出水过程

Fig. 5 Water exit of the vehicle in case 3



每张照片的实际宽度为 45 mm.

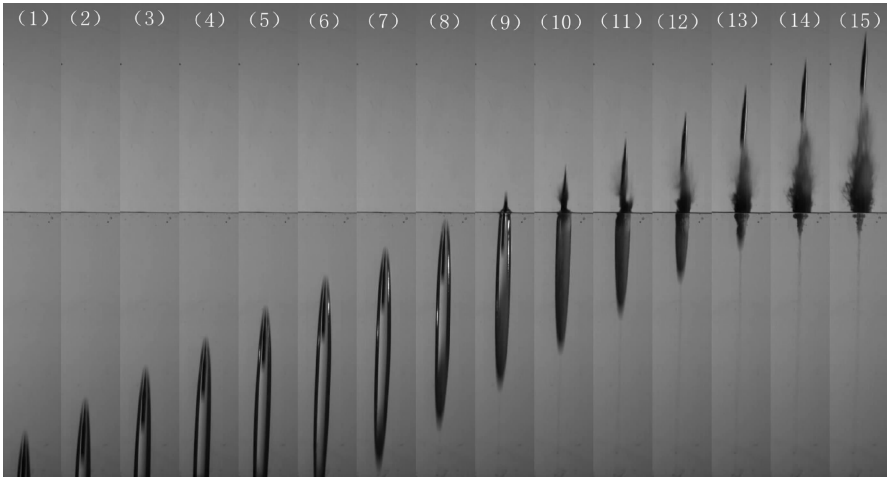
图 6 工况 4 航行体出水过程

Fig. 6 Water exit of the vehicle in case 4

3 数值模拟

采用 ANSYS/FLUENT 14.0 软件,对超空泡出水过程进行非定常流场的数值模拟. 采用 VOF

模型,设置空气、水、水蒸气三相;湍流模型采用 RNG $k-\varepsilon$ 模型. 利用有限体积法对控制方程进行离散,方程的离散方式为二阶迎风格式;采用基于压力基隐式算法进行求解,压力和速度的耦合采



每张照片的实际宽度为 60 mm.

图 7 工况 5 航行体出水过程

Fig.7 Water exit of the vehicle in case 5

用 PISO 算法,和 SIMPLE 算法相比,PISO 算法可以大大减少每一时间部的迭代次数,提高计算效率^[12]. 网格的划分由 FLUENT 前期处理软件 GAMBIT 完成,网格内部采用四边形结构.为使计算有较高的精度,网格在局部区域进行加密:航行体模型四周,和空泡尾部由于压力变化剧烈,为了更好地模拟空化的开始,对这几个区域的网格进行加密处理.由于空气和水的自由界面流动也较为复杂,因此自由面附近的网格也需要加密.同时为了能有效地使用壁面函数,体现边界层的特性,对固壁附近的网格进行局部的加密.多相流模型中设置第一相为液相(水相),第二相为蒸汽相,它们之间通过空化模型的蒸汽压力来相互转化;第三相为空气相,其设置通过 Patch 来实现,在流场初始化之后,设定计算区域上部分为空气.

空化模型采用具有较高收敛速度和计算稳定性的 Schnerr-Sauer 模型^[13],即

$$R = \frac{\rho_v \rho_l}{\rho} \alpha (1 - \alpha) \frac{3}{M} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p - p_v}{\rho_l}}, \quad (1)$$

式中, R 是气泡半径, α 是与汽相体积分数, M 是质量交换速率, ρ_v 、 ρ_l 和 ρ 分别是汽相、液相和混合物的密度, p 和 p_v 分别是周围水体压力和饱和蒸汽压力.

二维计算区域大小为 400 mm × 800 mm,整个计算区域的网格数为 33 万左右,网格划分采用结构性网格.网格划分如图 8 所示,左图为网格的整体划分,右图是网格的局部放大图.航行体垂直向上运动,计算区域被航行体的运动轨道分成 a、b、c、

d 4 块,左右两边为加密的结构性网格,航行体上方的区域网格随着航行体的运动被压缩而不断合并,航行体上方区域的网格随着航行体的运动被拉伸而不断分裂生成新的网格.边界条件的设定如下:如图 8(a)所示,设定计算区域的上边界为压力入口,入口压力为环境压力(标准大气压力 101 325 Pa),计算区域其余 3 个边界以及航行体的上下边界为固壁无滑移边界;设定区域 a 右侧边界 1 和区域 c、d 的右侧边界 2、3 为一对 interface 边界,这样他们重合的部分为流体内部边界 interior,不重合的部分为无滑移固壁 wall,即航行体的左侧面,用同样的方法设定航行体右侧的边界.图 9 示出一例超空泡航行体出水的数值模拟结果.数值计算捕捉到了,当超空泡航行体接近自由面时,自由面的抬升和隆起;以及航行体出水后,附着在航行体表面的水分被带入空气中.由此我们不难理解在上面介绍的实验中发现的、在水面上向上喷溅的水花.

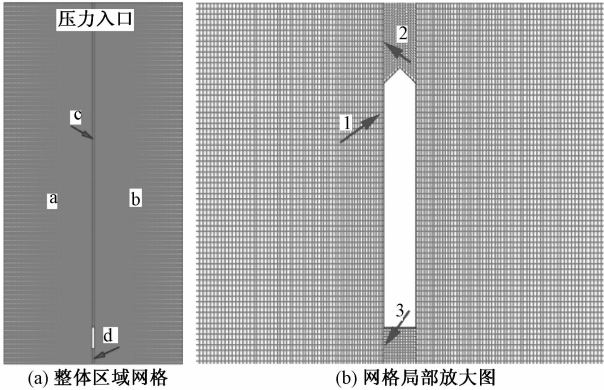
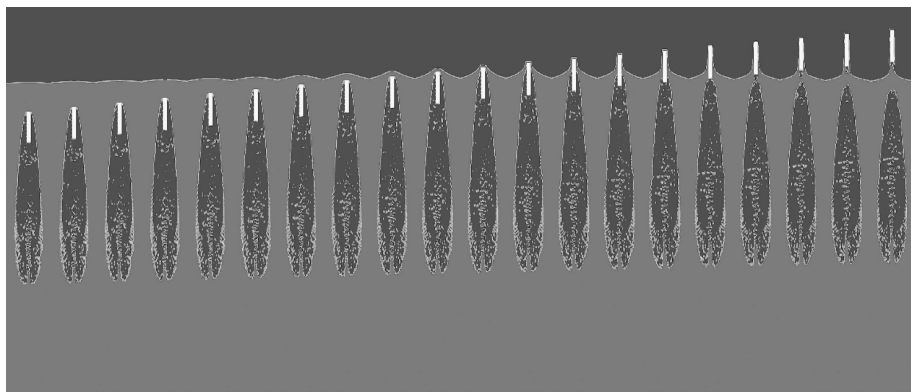


图 8 计算区域网格

Fig.8 Computational domain and grid graphics



相邻 2 张图片的时间间隔为 0.25 ms.

图 9 初速为 37m/s 的平头圆柱体(直径为 6 mm)出水过程的数值模拟结果

Fig.9 Numerical results for a 6-mm-diameter cylinder having a flat head with an initial velocity of 37 m/s

4 结论

带有超空泡的航行体的出水过程,伴随着复杂的空化气液两相流流动.当超空泡接近自由面发生溃灭时,溃灭产生的冲击力,容易使航行体出水后的弹道发生偏转.当超空泡接近自由面还没有发生溃灭时,此时航行体的出水比较顺利,但一般总伴随着向上剧烈喷溅的水花,这个水花甚至能给航行体施加动量使其增速.数值模拟工作指明,在航行体出水前,首先自由面会抬升隆起,然后部分水份会随航行体一起离开自由面.之后,水面的闭合、空化空泡的收缩溃灭、水分撞击航行体等,都会对喷溅水花有所贡献.

参考文献

- [1] Ceccio S L. Friction drag reduction of external flows with bubble and gas injection[J]. Ann Rev Fluid Mech, 2010, 42: 183-203.
- [2] Sarajam B. Experimental and numerical investigation of an unsteady supercavitating moving body[J]. Ocean Eng, 2013, 59: 9-14.
- [3] 罗格维诺维奇 ГВ. 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.
- [4] Jenkins A, Evans L T. Sea mine neutralization using the AN/AWS-2 rapid airborne mine clearance system [C] // IEEE Aerospace Conference Proceedings, 2004; 2 999-3 005.
- [5] 陈瑛,鲁传敬,吴磊. 三维小空化数空泡流数值方法[J]. 计算物理, 2008, 25(2): 163-171.
- [6] 熊天红,张木,易文俊,等. 小空化数下带尾翼射弹超空泡减阻试验与数值模拟[J]. 南京理工大学学报, 2013, 37(2): 244-250.
- [7] 王海斌,王聪,魏英杰,等. 水下航行体通气超空泡的实验研究[J]. 船舶力学, 2007, 11(4): 514-520.
- [8] 施红辉,周浩磊,吴岩,等. 伴随超空泡产生的高速细长体入水实验研究[J]. 力学学报, 2012, 44(1): 49-55.
- [9] 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.
- [10] 高聚瑞. 垂直出水超空泡与自由面相互作用时的三维流场实验及数值模拟[D]. 杭州:浙江理工大学, 2015.
- [11] 仲霄,王树山,马峰. 通空气泡内部流场的 PIV 实验图像处理[J]. 船舶力学, 2013, 17(7): 715-721.
- [12] 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.
- [13] Schnerr G H, Sauer J. Physical and numerical modeling of unsteady cavitation dynamics [C] // Fourth International Conference on Multiphase Flow. New Orleans, USA, 2001.